



**AZ ENERGETIKA
ÚJABB EREDMÉNYEI**

MŰSZAKI TUDOMÁNYOK

TERSZTYÁNSZKY TIBOR

**A VILLAMOS-
ENERGIA-
RENDSZER
ÉLET-
KÉPESSÉGÉNEK
NÖVELÉSE**

AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST

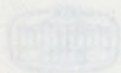
MŰSZAKI TUDOMÁNYOK
AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

5791
2. KÖTET

A VILLAMOSENERGIA- RENDSZER ÉLETKÉPESSÉGÉNEK NÖVELTÉSE

RÁDÓNYI LÁSZLÓ

elöljáró: LEVAI ANDRÁS
titkára: RÁDÓNYI LÁSZLÓ
tagjai: BEDE GÁBOR
BÜKI GERGELY
CSOM GYULA
HALSZ JÓZSEF
JÁRÓSI MÁRTON
JASZAY TAMÁS
REMÉNYI KÁROLY
VALDA GYÖRGY



HITEL



AKADÉMIAI KIADÓ

17617/

MŰSZAKI TUDOMÁNYOK AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

2. KÖTET

SZERKESZTI

RÁDONYI LÁSZLÓ

A SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

elnöke: LÉVAI ANDRÁS
titkára: RÁDONYI LÁSZLÓ
tagjai: BEDE GÁBOR
BÜKI GERGELY
CSOM GYULA
HALZL JÓZSEF
JÁROSI MÁRTON
JÁSZAY TAMÁS
REMÉNYI KÁROLY
VAJDA GYÖRGY



AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST 1992

5791

TERSZTYÁNSZKY TIBOR

A VILLAMOSENERGIA- RENDSZER ÉLETKÉPESSÉGÉNEK NÖVELÉSE



MTAK



0 00003 36700 1

AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST 1992

508508

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

2. KÖTET

SZERKESZTŐ

RÁDONYI LÁSZLÓ

MAGYAR
TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
KÖNYVTÁRA

elnök: LÉVAI ANDRÁS

titkár: RÁDONYI LÁSZLÓ

tagjai: BEDE GÁBOR

BÜKI GERGELY

CSEM GYULA

HALZL JÓZSEF

MÁRTON

JASZAY TAMÁS

ISBN 963 05 6376 2

Kiadja az Akadémiai Kiadó, Budapest
Első kiadás, 1992

© Tersztyánszky Tibor, 1992

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás,
a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás, valamint
a fordítás jogát, az egyes fejezeteket illetően is.

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat igazgatója
A nyomdai munkálatokat az Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat végezte

Felelős vezető: Zöld Ferenc

Budapest, 1992

Nyomdai táskaszám: 21110

Felelős szerkesztő: Sente László — Műszaki szerkesztő: Merkly László

A fedélterv Bogdán Hajnal munkája

Kiadványszám: 1/40

Megjelent: 15 (A/5) ív terjedelemben

HU ISSN 0239-1228

Printed in Hungary

M. TUD. AKADÉMIA KÖNYVTÁRA

Könyvleltár. 1531. /19. 93. sz.

ELŐSZÓ

A fejlett országokban ma már természetesnek tartott, és ennek megfelelően elvárt, folyamatos, biztonságos és megfelelő minőségű villamosenergia-szolgáltatást az együttműködő villamosenergia-rendszerek kialakítása tetten gazdáságosan megvalósíthatóvá. Az erőművek közötti kooperáció megvalósítása az erőművek száma, az erőművek és fogyasztók közötti távolságok növekedése következtében egyre nagyobb feszültségű, teljesítményű és földrajzi kiterjedésű rendszerek kialakításához vezetett. A nagy villamosenergia-rendszerek ismert előnyeivel (gazdaságos tartalékolás, kapacitáskihasználás, kölcsönösen előnyös energiaszállítások stb.) egyidejűleg jelentkeztek a nagy rendszerek sajátos tervezési és üzemeltetési problémái is. Éppen a legfejlettebb országokban nagy kiterjedésű, több ezer, sőt több millió fogyasztót érintő, hosszú időtartamú, többórás szolgáltatáskimaradással járó üzemzavarok fordultak elő. Felvetődött a kérdés, hogy milyen módon lehet a villamosenergia-rendszerek üzembiztonságát javítani, milyen mértékben szükséges és gazdaságos az egyes rendszerek közötti kooperációs vezetékek számát, illetve átvivőképességét növelni, milyen üzemviteli intézkedésekkel lehet a nagy kiterjedésű és hosszabb időtartamú rendszerüzemzavarok bekövetkezését megakadályozni?!

A villamosenergia-szolgáltatás minőségének jelentős társadalmi és gazdasági kihatásai miatt a szakértők világszerte nagy figyelmet szentelnek ezeknek a kérdéseknek, amelyeket a szakma nemzetközi szervezetei (CIGRÉ, UNIPEDE* stb.) is állandóan napirenden tartanak. Az Egyesült Államokban az 1965. évi New-York-i nagy üzemzavar után szervezték meg az észak-amerikai országok energiarendszerének üzembiztonsági tanácsát (NERC = North American Electric Reliability Council), amely ajánlásokot készít a tervezésre, üzemvitelre és évente értékeli a rendszerszintű üzemzavarok tapasztalatait.

Hazánkban az országos villamosenergia-rendszer az 50-es években alakult ki, és térségünkben először valószínűsítették meg nemzetközi kooperációs kapcsolatokat a magyar és csehszlovák rendszerek között már ugyanezen évtizedben. A 60-as években jött létre az akkori európai KGST országok villamosenergia-rendszereinek egyesülése, amelynek üzembiztonsága - a 70-es és 80-as években a világon egyedülállóan nagyarányú villamosenergia-importunk miatt - különleges fontosságú volt számunkra. Jelenleg a nyugat-európai országok együttműködő rendszerével, az UCPTÉ** rendszerrel való kapcsolataink tervezett kiépítése teszi időszerűvé a villamosenergia-rendszerek problémáinak vizsgálatát. A villamosenergia-importunk nagysága, valamint a viszonylag nagymértékű erőművi teljesítménykoncentráció miatt a hazai szakértők is rendszeresen foglalkoztak a villamosenergia-rendszerek tervezésének és üzemeltetésének kérdéseivel, és nem kis mértékben ennek volt köszönhető, hogy katasztrofális méretű vagy rendkívüli károkat okozó rendszerüzemzavarok még a 80-as évek

* CIGRÉ = Conférence Internationale des Grand Réseaux Électriques, UNIPEDE = Union Internationale des Producteurs et Distributeurs D'Énergie Électriques.

** UCPTÉ = Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité.

viszonylag kedvezőtlen nemzetközi üzemviteli feltételei között sem következtek be.

Tersztyánszky Tibor a 60-as évek óta aktív résztvevője a hazai villamosenergia-rendszerrel és annak nemzetközi összeköttetéseivel kapcsolatos tervezői és kutatói munkának. Ebben a könyvben a villamosenergia-rendszerek üzembiztonságával kapcsolatos külföldi és hazai tapasztalatok, eredmények ismertetésén kívül beszámol saját kutatásairól is, amelyek a villamosenergia-rendszerek közötti kooperációs vezetékek üzemére, valamint az üzemzavar esetén szükségessé váló fogyasztói terheléskorlátozás módszereire vonatkoznak.

A könyv mind a gyakorlati, mind az elméleti szakemberek részére ajánlható. A gyakorlati szakértők részére a villamosenergia-rendszerek teljesítmény-egyensúlyával, annak megbomlásával, valamint a fogyasztói terheléskorlátozással foglalkozó fejezetek (4. fejezet, valamint a 3. fejezet vonatkozó alfejezetei) tartalmazznak összefoglaló ismertetést és új gondolatokat. Az elmélet iránti érdeklődők figyelmébe ajánlom a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének valószínűségszámítási módszerekkel való meghatározásával, valamint a korlátozási veszteség minimalizálásával foglalkozó fejezeteket (2. fejezet, valamint a 3. és 4. fejezet vonatkozó alfejezetei).

Remélem, hogy ez a könyv is hozzájárul majd ahhoz, hogy a hazai villamosenergia-szolgáltatás minőségi színvonalára - amely viszonylag kedvezőtlen feltételek között is megközelítette a fejlettebb európai országokét - a jövőben is gazdaságosan fenntartható, sőt még emelhető legyen.

dr. Benkó Imre
c. egyetemi tanár

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	15
1. A VILAMOSENERGIA-RENDSZEREK TELJESÍTMÉNY-EGYENSÚLYA	23
1.1. A villamosenergia-szolgáltatás célkitűzése	23
1.2. A teljesítmény-egyensúly mint a villamos- energia-rendszer zavartalan üzemének alap- vető feltétele	26
1.3. A teljesítmény-egyensúly megbomlását ki- váltó okok csoportosítása	29
1.4. Igények az erőműrendszer rugalmasságával szemben	31
1.5. A forrásoldali teljesítménykiesés kiszabá- lyozásának korlátai	37
1.6. Rendszerüzemzavarok	49
1.7. A villamosenergia-szolgáltatás helyre- állítása	55
1.8. Következtetések	58
2. A RENDSZER-ÖSSZEKÖTTETÉSEK VÉLETLEN JELLEGŰ TERHELÉSÉNEK JELLEMZŐI A FOLYAMATOS VILAMOSENERGIA-ELLÁTÁSBAN	60
2.1. A rendszer-összeköttetések véletlen jel- legű terhelései, sajátosságai és szerepe	60

2.2.	A rövid időtartamú tényleges terhelések vizsgálata valószínűségelméleti alapon	66
2.2.1.	A vizsgálat módszere	67
2.2.2.	A vizsgálati módszerrel végzett elemzés eredményei	72
2.2.3.	Az eloszlásfüggvény hipotézisének ellenőrzése	78
2.3.	A rövid időtartamú villamosenergia-üzemzavar kiségitésének sztochasztikus modellezése	79
2.4.	A számítógépes sztochasztikus modell hitelesítése	85
2.5.	Üzemzavari kiségitések érzékenységi vizsgálatai	89
2.5.1.	Az erőművi tartalékteljesítmény változásának hatása	90
2.5.2.	A beépített erőművi teljesítmény növekedésének hatásai	95
2.5.3.	A maximális véletlen terhelés és a tartalékteljesítmény kapcsolata	96
2.6.	A rendszer-összeköttetések eredő véletlen jellegű terhelése nagyszámú erőművi blokk esetén	99
2.7.	1000 MW-os blokk figyelembevétele kis rendszer esetén	104
3.	TELJESÍTMÉNYHIÁNYOS RENDSZER FREKVENCIA-CSÖKKENÉSE	113
3.1.	A teljesítmény-egyensúly megbomlásával jelentkező problémák	113
3.2.	A teljesítményhiányossá vált villamosenergia-rendszer dinamikus szimulációs modelljének szempontjai és követelmény-rendszere	116

3.2.1.	Szimulációs időtartomány	117
3.2.2.	Rendszermodell	118
3.2.3.	Elemi modellek, beavatkozási lehetőségek	120
3.2.4.	Követelményrendszer	121
3.3.	A megvalósított dinamikus szimulációs modell	123
3.3.1.	Kiinduló állapot	124
3.3.2.	Perturbációk	125
3.3.3.	Erőműmodell	125
3.3.4.	Rendszerfrekvencia	126
3.3.5.	Hálózat	126
3.3.6.	Fogyasztói terhelések	127
3.3.7.	Terheléskorlátozási modell	127
3.3.8.	Hálózatszámítás	127
3.4.	Elvégzett vizsgálatok	128
3.4.1.	Modellhitelesítés	128
3.4.2.	Terheléskorlátozás	132
3.5.	A frekvenciacsökkenés kezdeti sebessége	134
3.5.1.	Gyakorlati alkalmazás	138
3.5.2.	A frekvenciacsökkenés kezdeti sebességének prognosztizálása	140
4.	VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÓK TERHELÉSKORLÁTOZÁSA	142
4.1.	A villamosenergia-rendszer üzemállapotai és a fogyasztói terheléskorlátozás kapcsolata	142
4.2.	Frekvenciafüggő terheléskorlátozás	148

4.3.	Frekvenciafüggetlen terheléskikapcsolás, rendszerbontás	155
4.4.	Hangfrekvenciás vezérlés alkalmazása fogyasztói terheléskorlátozásra	164
4.5.	A tartós villamosenergia-korlátozási veszteség minimalizálása	168
4.5.1.	A matematikai modell módszertani alapjai	169
4.5.2.	A matematikai modell kialakítása	171
4.5.3.	A minimalizált fogyasztói terheléskorlátozás matematikai modellje	172
4.5.4.	A modelltől levezethető számítási eljárás	174
4.5.5.	Kiegészítő megjegyzések	175
4.6.	Kárgörbék	176
4.7.	Egyezségeen alapuló terheléscsökkenés	183
4.8.	Feszültségcsökkenéssel elérhető terheléscsökkenés	191
4.8.1.	Egyedi villamos berendezések feszültségérzékelése	191
4.8.2.	Fogyasztói körzetek feszültségérzékelése	199
4.8.3.	Egyes, tipikus fogyasztói körzetek tényleges feszültségérzékelése mérés alapján	200
4.9.	A frekvenciacsökkenés hatása a fogyasztói terhelésre	205
4.10.	A lágú terheléskorlátozás alkalmazásának lehetősége és korlátai	206
FÜGGELÉK		
F1.	Empirikus sűrűségfüggvény közelítése elméleti sűrűségfüggvénnyel	211

F2. Üzembiztonsági kritériumok és példák	213
F2.1. Üzembiztonsági kritériumok a NORDEL-rendszerben	213
F2.2. Üzembiztonsági kritériumok az USA egyik villamosenergia-rendszer-egyesülésében	216
F2.3. Üzembiztonsági követelmények a nyugat-európai rendszeregyesülésben	219
F2.3.1. Erőművi teljesítmények	219
F2.3.2. Átviteli hálózat	220
F2.3.3. A belga villamosenergia-rendszer	221
F2.3.4. A francia villamosenergia-rendszer üzembiztonsági kritériumai	222
F2.3.5. Üzembiztonsági kritériumok az angol villamosenergia-rendszerben	223
F2.4. A frekvenciátűrésre vonatkozó követelmények	224
F3. A villamosenergia-ellátás és -szolgáltatás megbízhatóságának értékelésére szolgáló indexek, mutatók áttekintése	226
F3.1. Determinisztikus indexek	228
F3.2. Valószínűségi indexek	229
IRODALOMJEGYZÉK	232

BEVEZETÉS

A villamosenergia-szolgáltatás egyre nagyobb és bonyolultabb rendszeregyesülések keretei között folyik, az együttműködésből adódó műszaki és gazdasági előnyök kihasználása érdekében. A nagy rendszeregyesülésekben viszont - kis valószínűséggel ugyan - de nagy kiterjedésű és jelentős fogyasztói kieséssel, korlátozással járó üzemzavarok léphetnek fel. A rendszerüzemzavarok a mai iparosított, robottechnikával és elektronikus információs, ill. szabályozó rendszerekkel felszerelt társadalom működését alapvetően befolyásolják.

Az utóbbi években éppen ezért fokozottabb figyelmet fordítanak az energiarendszerek, ill. nagy rendszeregyesülések üzembiztonsági, üzemfolytonossági, stabilitási és életképességi kérdéseire. Kifejezésre jut az a vélemény, hogy az energia árának alakulása, az energetikai berendezésekre fordítandó beruházások nagysága, valamint az a törekvés, hogy mind hatékonyabban vegyék igénybe a berendezéseket, ténylegesen a tartalékok csökkenéséhez, ill. a rendellenességek keletkezési valószínűségének és időtartamának növekedéséhez vezet. Úgy vélik, hogy ez az irányzat a jövőben is megmarad [1, 2].

A problémák létezéséről tanúskodnak többek között az olyan nagymértékű rendszerüzemzavarok, amelyek nagy terü-

leteken a fogyasztók teljes feszültségkimaradásával és - a legkorszerűbb technikai eszközök ellenére - hosszú helyreállítási idővel járnak együtt |3, 4|.

Ugyanakkor mind több nemzeti beszámoló és nemzetközi kiértékelő, összehasonlító publikáció jelenik meg az üzemzavarok kiértékeléséről |5-8|.

A rendellenességek és zavarok kiterjedésének megakadályozására irányuló tervezési és üzemeltetési intézkedések rendszerében - mintegy a védelem első vonalában - a rendszer rugalmasságát vizsgálják, fokozzák, ideértve a rendszer-összeköttetések átviteli képességét és a gyorsan mobilizálható tartalékokat |9-13|.

A másik problémakörben az adott viszonyok között az üzemmód, az üzemállapot előkészítése, a rendszer lehetőségeinek minél jobb kihasználása, feltárása érdekében végzett tevékenységek, a számítógépes információ és/vagy szabályozó rendszerek és ehhez szükséges szoftverek korszerűsítése a cél |14, 15|.

Az automatikus védelmi kikapcsolások, az üzemzavari irányítás, valamint az üzemzavarmentés speciális fajtái a rendszerüzemzavarok kaszkád kiterjedését, a teljes rendszerösszeomlást hivatottak megelőzni. És végül az üzemzavar után az eredeti, egyensúlyi állapot helyreállításának a gyorsítása képezi a villamosenergia-szolgáltatók feladatát |16-20|.

A műszaki (vagy emberi) okból bekövetkező erőművi teljesítőképesség-hiányt megfelelő erőművi tartalék tervezésével és létesítésével ellensúlyozzák |21, 22|, és a hirtelen kiesés vagy terhelésváltozás miatti frekvencia-csökkenést erőművi szabályozással kompenzálják |23-25|. A folyamat időben dinamikusan zajlik le, miközben a fogyasztók teljesítménye a feszültség- és frekvenciaváltozás függvényében változik |26-33|. Az üzemzavar eseten-

ként a stabilitás megbomlásával járhat |34|, sőt az atomerőművekre is rendkívüli veszélyt jelenthet |35|.

A villamosenergia-rendszer biztonságát növeli és a fogyasztók folyamatosabb ellátását segíti elő a villamosenergia-rendszereket összekötő vezetékeken áramló villamos energia. A rendszer-összeköttetéseken, a hosszabb távon rögzített villamosenergia-szállításokon kívül, a rendszerek együttműködéséből adódó véletlen jellegű terhelések lépnek fel, melyek egy részének műszaki, más részének gazdasági okai vannak |36|.

A szakemberek már az ötvenes-hatvanas években vizsgálták a rendszerek közötti kooperációból eredő feladatokat |37-41|.

Fizikai és gyakorlati okokból célszerű a véletlen jellegű, rövid távú csereteljesítményeket két részre osztani: rövid idejű szabályozatlan (pl. másodperces átlagú) és tartósabb (pl. órás átlagú) terhelésekre. A szabályozatlan csereteljesítmények tulajdonságait a |42-44| elemezte, az üzemirányítás számára a határ-üzemállapot egyértelműbb meghatározására a |45-49| ad módszereket. A tartós véletlen jellegű terheléseket a szerző vizsgálta meg valószínűségelméleti alapon és matematikai statisztikai módszerekkel ellenőrizve a hipotézist, kandidátusi értekezése és publikációi keretében |50-53|.

A kétfajta véletlen jellegű terhelés szintézisére és a tervezésben történő felhasználásra vonatkozó módszer csak legújabban került publikálásra |13|.

Másként jelentkezik a probléma, ha a rendszer-együttműködésben részt vevő egyik, viszonylag kis teljesítményű erőművi rendszert nagy, esetleg a rendszer 5-10%-át is elérő vagy azt meghaladó egységteljesítményű blokkal bővítik. Gyakorlatban erre csak determinisztikus tervezési előírásokat alkalmaznak |54, 55|. Az iparilag fejlett néhány országban jelenleg üzemeltetett legnagyobb erőmű-

vek és egységteljesítmények a B.1. táblázatban láthatóak |56|.

B.1. táblázat. Néhány országban az üzemben lévő legnagyobb villamoserőmű és blokk teljesítménye

Ország	Legnagyobb erőművi teljesítmény, MW			Legnagyobb egységteljesítmény, MW		
	atom-erőmű	víz-erőmű	hő-erőmű	atom-erőmű	víz-erőmű	hő-erőmű
FÁK	4000	6000	3800	1500	640	1200
USA	3200	6200	3200	1000	700	1300
Japán	4700	1280	4400	1175	320	1000
NSZK	2500	1100	2900	1300	...	770

Míg a felsorolt országokban esetenként a villamosenergia-rendszer teljesítményének az 1%-át sem teszi ki a legnagyobb erőművi egységteljesítmény, addig kisebb rendszerben (vagy magántulajdonú villamosenergia-szolgáltatónál) a legnagyobb egységteljesítmény még a 10-15%-ot is meghaladhatja |28|. A rendszer-összeköttetéseknek ilyen helyzetben speciális üzemzavari kisegítés átvitelét kell(ene) biztosítani rendszerbontás nélkül. A rendszer-összeköttetések ilyen szempontból és valószínűségelméleti alapon való tervezési módszerének kidolgozásáról a szerzőnek nincs tudomása.

A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelései esetenként kis valószínűséggel ugyan, de igen nagy értékeket vehetnek fel |57|. Ha a terhelések elérnek egy bizonyos előre meghatározott értéket, bontani kell a rendszereket |58, 59|.

A modellezések, számítási eljárások többek között az információs háttér által korlátozottak, de a részleteiben

és az összhatásában közel azonos pontosságra való törekvés ellentmondásokat vet fel, amelyeket az adott feladatnak alárendelve kell megoldani. Ezek hangsúlyozottan vonatkoznak rendszerszintű elektromechanikai lengésekkel járó automatikus szabályozásokkal és működésekkel befolyásolt átmeneti folyamatok vizsgálatára [31, 32, 59, 61].

Dinamikus modellel és vizsgálatokkal az utóbbi évtizedben kezdtek foglalkozni [31, 32]. A hirtelen bekövetkező teljesítménydeficit esetén az erőművi szabályozók nem kielégítő statizmusát mutató mérésekről és modellezésről is beszámolnak [62]. Az ismertetett modellek alkalmazásának feltétele a vizsgált rendszerre vonatkozó adatok minél teljesebb körű ismerete. Nem ismeretes azonban olyan publikáció, amikor 150-200 GW-os rendszerrel jár párhuzamosan egy 5-10 GW-os rendszer, és a kisebb rendszernek mind az üzemvitel-előkészítés, mind a tervezés során fel kell készülnie a különböző okokból bekövetkező rendszerbontásokra és frekvenciacsökkenés esetén fogyasztói terheléskorlátozásra.

A villamosenergia-szolgáltatás társadalmilag elvárt [55, 63] tervezése, létesítése és üzemeltetése ellenére különböző veszélyességű üzemállapotok következhetnek be [64, 65], a súlyosabb követelmények elhárítására tett intézkedések [66] ellenére. A szolgáltató ezért esetenként különböző módszerekkel a fogyasztói terhelést csökkenti [67-70], többek között kihasználva azt a tényt is, hogy a fogyasztók terhelése feszültségtől és frekvenciától függ [71-73], de szükség esetén a teljesítmény-egyensúly helyreállítása érdekében fogyasztói korlátozásokat kell életbe léptetni [74, 75]. A korlátozással járó kárral számos publikáció foglalkozik [76-78], és esetenként ellentmondó következtetést vonnak le [79, 80]. A [81, 82] irodalom bizonyos egyszerűsítésekkel, közelítéssel élve

javaslatot ad a jelenlegi gyakorlat szerint meghatározható fogyasztói kárra, ami az erőműrendszer tartalékteljesítményének tervezésénél |21, 83| is felhasználható.

Az esetleges teljesítményhiány ésszerű szétosztására készített algoritmusokról is megjelentek publikációk |84, 85|, de ezek elméletileg helyes javaslatokon túlmenő, gyakorlatilag is használható módszert nem ismertetnek, viszont ezeknek a fejlesztésére megvannak a lehetőségek |86-88|.

A villamosenergia-rendszerek életképességét próbára tevő rendszerüzemzavarok nemzetközi elemzése és a hazai gyakorlat |19, 89-91| egyértelműen bizonyítja, hogy megelőzésükben a rendszer-összeköttetéseken átvitt üzemi zavarai kiegészítés lehetőségének és mértékének, az üzemi zavar kiterjedésében a frekvencia csökkenésének, ill. a fogyasztói kikapcsolásoknak van döntő szerepe. A szerző ezért a következő, a rendszerek üzembiztonságát növelő elemzéseket és tervezési módszer fejlesztéseket tűzte ki célul:

- a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terheléseinek vizsgálata mind általános esetben, mind speciálisan egyedi nagy erőművi blokk esetén, valószínűségelméleti alapon történő közelítésben;
- korlátozott átviteli képességű rendszer-összeköttetések esetén, a rendszerbontások dinamikus szimulálásával a deficitikus villamosenergia-rendszerben a frekvenciacsökkenés, ill. ezen csökkenés sebességének meghatározása;
- teljesítményhiány esetén a fogyasztói korlátozás hátrányos hatásának csökkentése.

A jelen mű témakörének hazai időszerűségét fokozza, hogy

1. a századforduló körül üzembehelyezendő 1000 MW-os atomerőművi blokk speciálisan új helyzetet teremt a villamosenergia-szolgáltatás üzembiztonsága szempontjából;
2. az új magyar energiapolitika diverzifikációs célkitűzése új műszaki követelményeket támaszt a villamosenergia-rendszer tervezőivel és üzemeltetőivel szemben.
3. A határainkon túl, mind keletre, mind nyugatra egyes metszésekben kevés a szabad átviteli kapacitás, ami hátrányosan érintheti a magyar villamosenergia-rendszer üzembiztonságát.

A villamosenergia-rendszerek életképességének biztosítása, és azon belül egyes elmezési, ill. tervezési módszerek fejlesztése igen összetett feladat. Köszönetemet kell kifejeznem a szakterület kiváló hazai művelőinek, Bán Gábor egyetemi tanárnak, Bókay Béla címzetes egyetemi tanárnak, a műszaki tudományok doktorainak, Benkó Imre címzetes egyetemi tanárnak, Füredi Mihály főiskolai tanárnak, a műszaki tudományok kandidátusainak, Novotny Ferenc főiskolai docensnek, Faludi Andor és Szabó László egyetemi adjunktusoknak, Bacskó Mihály osztályvezetőnek, akik elvi észrevételeikkel, gyakorlati közreműködésükkel jelentősen hozzájárultak ezen mű eredményes elkészítéséhez és ahhoz, hogy ezen a területen a külföldi és hazai szakirodalomban publikáltakhoz képest újat is sikerült alkotnom.

1. A VILLAMOSENERGIA-RENDSZEREK TELJESÍTMÉNY-EGYENSÚLYA

1.1. A VILLAMOSENERGIA-SZOLGÁLTATÁS CÉLKITŰZÉSE

A villamosenergia-szolgáltatás tervezését, berendezéseinek létesítését és üzemeltetését meghatározó legfőbb szempontok: az üzembiztonság, minőség és a költségek. Bár ezek a követelmények a különböző gazdasági fejlődés miatt országonként, szolgáltatónként eltérőek általánosan a következők szerint fogalmazhatók meg.

Az *üzembiztonsági követelmény* azt jelenti, hogy a villamosenergia-rendszert úgy kell tervezni és üzemeltetni, hogy ellenálljon mindazon hihető hibáknak, melyek részleges vagy teljes fogyasztói kieséshez vezethetnek. Az üzembiztonsági követelmények a villamos és mechanikai jellemzők egyenlőtlenségeivel (pl. vezetékek legfeljebb a sodronyok megengedett legnagyobb hőmérsékletéig üzemeltethetők tartósan) vagy üzembiztonsági kritériumokkal [pl. $(n-1)$ -biztonság] kerülnek kifejezésre.

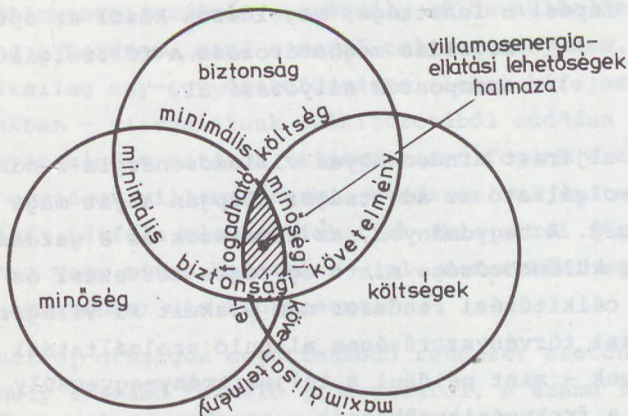
A *fogyasztói követelmény* szerint a szolgáltatónak minden pillanatban és a hálózat minden pontján folyamatosan el kell látni a fogyasztókat megfelelő minőségű villamos energiával. Szabványok (pl. feszültségtűrés) vagy társadalmilag kialakult, ill. elfogadott normák (pl. 2 óra/év fogyasztói feszültségkimaradás) határozzák meg az értékeket.

A gazdasági követelmény az összes olyan költség minimalizálását jelenti, amelyet a tervező vagy üzemeltető szervek befolyásolhatnak a gazdaságos energiaszolgáltatás érdekében. A számszerű célkitűzéseket az adott ország politikai-gazdasági körülményei szerint állapítják meg (pl. piacgazdaságban az egyéb energiahordozókkal való versenyképesség).

A gyakorlatban szoros kapcsolat van ezen fő szempontok között. A szolgáltatás minőségét nem lehet biztosítani a villamosenergia-rendszer biztonságos üzeme nélkül. Megfelelő biztonsági és minőségi színvonalat csak úgy lehet elérni, ha a rendszerben kielégítő beruházásokat valósítanak meg, és az üzemvitel során bizonyos költségek keletkeznek. Természetesen a különböző energiarendszerek különböző műszaki és gazdasági jellemzőkkel rendelkeznek. A villamosenergia-szolgáltatás tervezői és üzemeltetői személyzete ezen adottságok megfelelő figyelembevételével és súlyozásával keresi a rendszer optimális üzemét.

A követelmények közötti korrekt kompromisszumot a szolgáltatási szempontok olyan minimális és maximális követelményeinek meghatározásával lehet elérni, melyek gyakorlatilag elérhetők és elfogadhatók. Ilyen feltételekkel meghatározott szolgáltatási lehetőségek megoldásterének határait az 1.1. ábra érzékelteti.

A következő megfontolással jelölhető ki az ésszerű szolgáltatás lehetőségeinek a halmaza. A villamos energia nagyipari méretekben ma még mindig nem tárolható, ezért először a két fő szolgáltatási szempontnak, azaz a biztonságnak és a minőségnek kell felvenni a társadalmi szokásoknak és elvárásoknak megfelelő, de alapjában véve tetszőleges kedvező követelményszintet. Majd ellenőrizni kell az így kapott költségeket a költségkorlátokkal. Attól függően, hogy a kapott költségek túl magasak vagy



1.1. ábra. A villamosenergia-szolgáltatás követelményeinek betartásával a fogyasztók ellátásának lehetőségei

van még pénzügyi lehetőség, a kezdeti biztonsági és minőségi szinteket módosítani kell, ill. lehet, amíg a biztonságra, minőségre és költségre vonatkozó ésszerű megoldást megkapja a szolgáltató. Az adott körülmények között, a lehetséges megoldások közül az optimális a fő szolgáltatási szempontok egyedi mérlegelésével nyerhető.

Az ily módon értelmezett optimális villamosenergia-szolgáltatáshoz szükséges célkitűzések meghatározása tehát két lépésben történik:

1. lépés: a biztonság, minőség és költség vonatkozásában a minimális és maximális követelmények megfogalmazása és ezen kritériumok segítségével a reális megoldások terének meghatározása;

2. lépés: a lehetséges megoldások közül az optimális megoldás meghatározása a fő szolgáltatási szempontok súlyozásával.

Az eljárást minden egyes villamosenergia-rendszer vagy szolgáltató az adottságai alapján saját maga határozza meg. A hagyományok, az elvárások és a gazdasági lehetőség különbözősége miatt egységes tervezési és üzemeltetési célkitűzési rendszer nem alakult ki világszerte. A fizikai törvényszerűségen alapuló szolgáltatási követelmények - mint például a teljesítmény-egyensúly, deficit esetén a frekvenciacsökkenés - azonban minden rendszerben érvényesek.

1.2. A TELJESÍTMÉNY-EGYENSÚLY MINT A VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ZAVARTALAN ÜZEMÉNEK ALAPVETŐ FELTÉTELE

A villamos energiának mint ipari terméknek az az alapvető sajátossága, hogy nem tárolható: a termelő rendszernek másodpercről másodpercre követnie kell a villamosenergia-fogyasztók igényeit, ill. az igényeiben fennálló változásokat. Ez a sajátosság a termelés és a fogyasztás pillanatnyi teljesítmény-egyensúlyában nyilvánul meg és általános érvényű, vagyis független attól, hogy egyetlen villamos generátor, ill. egy többgenerátoros erőmű vagy egy országos, ill. nemzetközi kooperációs villamosenergia-rendszer látja el a velük villamosan összekapcsolt fogyasztókat. A termelt villamos teljesítmény összegének azonban nemcsak a közvetlen fogyasztói igényt, hanem a villamos energiának a termelés helyétől való elszállítását és a fogyasztók felé történő elosztását szolgáló hálózatokon fellépő veszteségeket is fedeznie kell.

A villamos teljesítmény-egyensúly külön-külön érvényes mind a hatásos, mind a meddő teljesítményekre, és matematikailag egy-egy összefüggéssel lehet kifejezni. A továbbiakban - vizsgálatunk célkitűzéséből adódóan - teljesítményen mindig hatásos teljesítményt fogunk érteni.

Egy országos villamosenergia-rendszer teljesítmény-egyensúlyát kétféle alakban írhatjuk fel, attól függően, hogy van-e vagy nincs kapcsolat (pl. nemzetközi együttműködés keretében) más rendszerrel:

- önálló, országos együttműködő rendszer esetén, amely n számú termelő gépegységből, m számú fogyasztóból és r számú hálózati elemből áll:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{i=1}^m P_{Fi} + \sum_{i=1}^r P_{Vi}; \quad (1.1)$$

- rendszerek együttműködése - pl. nemzetközi rendszeregyesülésben való részvétel - esetén, ha az országos (vagy vállalati) szintű rendszert a rendszerközi vezetékek határpontjáig tekintjük és ezek számát N -nel jelöljük:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{i=1}^N P_{Ii} = \sum_{i=1}^m P_{Fi} + \sum_{i=1}^r P_{Vi}, \quad (1.2)$$

ahol P_{Gi} az erőművek hatásosteljesítmény-betáplálása; P_{Ii} a rendszerösszekötő vezetékek határpontjain az export-import hatásos teljesítmény eredője, P_{Fi} a fogyasztói hatásosteljesítmény-igény, P_{Vi} a hálózat teljes hatásosteljesítmény-vesztesége.

A fentiekből következően egy villamosenergia-rendszerben a fogyasztói korlátozás nélküli zavarmentes üzem

egy egyensúlyi állapotnak felel meg, amelynek további jellemzéséhez még az alábbi jellegzetességeket is figyelembe kell venni:

- a fogyasztói igények egy energiarendszeren belül nem állandók, hanem pillanatról pillanatra változnak, ugyanis a fogyasztók berendezéseiket - szükségleteiknek megfelelően - ki- vagy bekapcsolják, ill. üzemben lévő berendezéseik termelését igényük szerint változtatják;
- a fogyasztók által felvett villamos teljesítmény nagysága szoros függvénykapcsolatban áll a hálózati frekvenciával és a fogyasztót ellátó táppont feszültségével;
- a fogyasztói terhelések változása kihat a hálózati veszteségekre, de változnak a hálózaton fellépő feszültségesések is, amelyek ugyanakkor visszahatnak a fogyasztói terhelések nagyságára;
- a galvanikusan összekapcsolt rendszerek a rendszerösszekötő vezetéseken megvalósuló véletlen jellegű terhelésáramlások révén kölcsönhatásban vannak egymással.

Mindezekből következik tehát, hogy egy villamosenergia-rendszer teljesítmény-egyensúlyának biztosítása komplex rendszertechnikai feladat, amelyen belül - normál üzemben - a meghatározó szerep a változó igényt reprezentáló villamosenergia-fogyasztóké. A termelői, szolgáltatói oldalon pedig a teljesítménykibocsátást és az egész energiarendszerben a feszültséget kell szabályozni, mégpedig oly módon, hogy a rendszer teljesítmény-egyensúlya - a minőségi követelmények lehető kielégítése mellett - minden időpontban biztosított legyen.

1.3. A TELJESÍTMÉNY-EGYENSÚLY MEGBOMLÁSÁT KIVÁLTÓ OKOK CSOPORTOSÍTÁSA

A nagy kiterjedésű és bonyolult felépítésű (igen sok elemet tartalmazó) villamosenergia-rendszer, valamint az igen nagyszámú fogyasztó miatt a leggondosabb tervezés, gyártás, szerelés, szakszerű üzemeltetés és üzemirányítás ellenére is bekövetkeznek olyan események, amelyek a rendszer teljesítmény-egyensúlyát megbontják.

Az egyensúlyt megbontó okok hatásuk, jellegük és fellépési helyük szerint csoportosíthatók.

1. *Hatásuk szerint* lehetnek:

- a) kisebb mértékűek, amelyek a teljesítmény-egyensúly csupán olyan mérvű változásait okozzák, hogy azok a villamosenergia-rendszerek együttműködéséből eredő előnyök kihasználásával, a termelő gépegységek primer és/vagy szekunder szabályozásával, valamint a gépegységek fel-, ill. leterhelésével, indításával, leállításával kiegyenlíthetők. A villamosenergia-fogyasztók az üzemi helyzet ilyen változását nem veszik észre;
- b) súlyosabb mértékűek, amelyek miatt olyan mérvű teljesítményhiány következik be, hogy az egyensúlyt a villamosenergia-fogyasztók terhelésének átmeneti csökkentésével, esetleg kikapcsolással, esetenként pedig az energiarendszer üzemirányítása szintjéről kiinduló fogyasztókra kiható beavatkozással, megszorító intézkedésekkel (korlátozás) lehet csak helyreállítani.

2. *Jellegük szerint* lehetnek:

- a) időben előreláthatóak, ez - időtartamot tekintve - jelenthet néhány órát, napot vagy több hónapon keresztül a nap bizonyos szakaszát;
- b) időben előre nem láthatóak, felléphetnek váratlanul, üzemzavarként, melyek időtartama rendszerint rövid, de esetenként néhány órát kitehet. Ha az üzemzavar fellépése után felmérhető, hogy hosszabb ideig tart (pl. 1 órán túl), akkor az üzem-előkészítés és a fogyasztók szempontjából ez az eset a megtehető intézkedések miatt átminősülhet előrelátható jellegűvé.

3. *Fellépési helyük szerint* lehetnek:

- a) forrás és hálózati oldalon:
 - hazai erőművi teljesítményhiányok,
 - együttműködő rendszerszintű problémák,
 - belső átviteli és elosztóhálózat hibái;
- b) fogyasztói oldalon:
 - átlagostól eltérő viszonyok (pl. hőmérséklet-csökkenés) miatti terhelésnövekedés,
 - új fogyasztóberendezések tömeges alkalmazása (pl. hőtároló kályha), jelentős, esetleg nem arányos árváltozások az energiahordozók területén.

További vizsgálatunkat, a nagyobb gyakoriság okán, az erőművi és hálózati hibák miatt fellépő teljesítményhiányok hatására korlátozzuk. Elemezzük az emiatt szükséges intézkedéseket és azok hatását.

1.4. IGÉNYEK AZ ERŐMŰRENDSZER RUGALMASSÁGÁVAL SZEMBEN

A teljesítmény-egyensúly megbomlásának elkerülése érdekében a villamosenergia-szolgáltató vállalatok olyan erőműrendszert terveznek és üzemeltetnek, amely bizonyos határok között rugalmas és a változásoknak megfelelően szabályozható. Ezt a követelményt azonban nem egyformán tudják az erőművek kielégíteni. Klasszikusnak tekinthető gyakorlat, hogy adott fogyasztói igények üzembiztos és gazdaságos kielégítését biztosító erőműrendszerben megfelelő arányok alakulnak ki a magas kihasználással (6000-7000 h/év) üzemelő ún. alaperőművek, a közepes kihasználású (3000-5000 h/év) ún. menetrendtartó erőművek és az alacsony kihasználással (1000-2000 h/év) igénybevett ún. csúcserőművek között.

A három erőműtípus igénybevétele, üzemmódja jellegzetes módon eltér egymástól, és pedíg

- az alaperőművek üzemidejük túlnyomó többségében folyamatosan névleges vagy ahhoz közeli teljesítményt biztosító kiterheléssel vesznek részt a fogyasztói igények kielégítésében;
- a menetrendtartó erőművek általában a napi csúcsgénybevételekhez szükséges üzemállapotban (kazán, turbina, ill. a blokkösszetétel) üzemben vannak, de kiterhelésük mértéke a nap folyamán változó, a fogyasztói igények napi változásának megfelelően;
- a csúcserőművek jellegzetes üzemmódja a szakaszos igénybevételek, amelynek többnyire ciklikus indulásokkal és leállásokkal, az ún. megszakításos üzemvitellel tesznek eleget.

A szóban forgó három jellegzetes üzemmód befolyással van az erőműrendszer rugalmasságára, mivel

- az alaperőművek teljes kiterheltségük miatt általában csak lefelé szabályozhatók,
- a menetrendtartó erőművek kiterheltségüktől függően, az adott üzemállapothoz tartozó szabályozási intervallumban (minimális és maximális terhelés között), mind lefelé mind felfelé szabályozhatók,
- a csúcserőművek szakaszos igénybevételük miatt csak bizonyos időszakokban, akkor is speciális módon vesznek részt a szabályozásban (indítás után maximális teljesítményig felterhelnek, e terhelést a szükséges ideig tartják, majd a maximális terhelésről 0-ra leterhelnek).

A leírtakból következik, hogy adott energiarendszerben, adott napon üzemelő erőműrendszer szabályozhatósága rugalmassága napszakonként változó, e változásra az alábbi tendenciák jellemzőek:

- csúcsidőszakban üzemel a legtöbb termelőegység, az alaperőművek és a csúcserőművek maximális terhelés tartanak, így a felterhelhetőségre, a csúcsidei forgótartalék mértékig a menetrendtartó erőművekben van lehetőség, míg leterhelésre valamennyi erőműtípus képes;
- nappali időszakban általában az alaperőművek (teljes terhelésen) és a menetrendtartó erőművek üzemelnek, a csúcserőművek többnyire hidegtartalékban állnak, így fölfelé szabályozásra a menetrendtartó erőművekben van lehetőség, ill. bizonyos idő alatt (15-50 perc) a csúcserőművek indíthatók, míg leterhelésre a menetrendtartó és az alaperőművek képesek;
- éjszakai időszakban a csúcserőművek állnak, a menetrendtartó erőművek jelentős része technikai

terhelési minimumán üzemel, az alaperőművek többnyire teljes terheléssel járnak, így fölfelé szabályozásra a menetrendtartó erőművekben van lehetőség (a szuperminimumon üzemelő egységeknél a felterhelhetőség a normál értéknél lassúbb), leterhelésre a még technikai minimum felett üzemelő menetrendtartó egységeknél és az alaperőművekben van mód.

Az erőműrendszerben lévő lehetőségek áttekintése után megvizsgáljuk, hogy milyen igények támasztandók az erőműrendszer rugalmasságával szemben. Az erőműrendszer rugalmasságára a következő okok miatt van szükség:

- a) Az időben (napi ciklusokban) változó fogyasztói igények termelői oldalon történő előre tervezhető követése.

A munkanapi fogyasztói igények évszakoktól függő jellegzetes megjelenési formát mutatnak. A téli időszakban a napi csúcsterhelés a késő délutáni, ill. koraesti (17-18 h) időszakra esik, míg a délelőtti csúcsterhelés a reggeli órákban (7-8 h) néhány %-kal az esti csúcsterhelés alatti értékben jelentkezik. Az ún. délutáni völgy rövid (1-2 óra), mélypontja a műszakváltásra jellemző 14 h-ra esik. Az éjszakai minimális terhelés 3-4 h között jelentkezik, a napi csúcsterhelés 70-75%-os mértékében. A nyári munkanapi csúcsterhelés a télinél 20-25%-kal alacsonyabb értékben a délelőtti (10-11 h) órákra esik. Az esti csúcsterhelés a késő esti 21 h-ra esik, rövid időtartamú és néhány %-kal alacsonyabb a délelőtti csúcsnál. A

délutáni völgy időtartama hosszú (14-19 h), az éjszakai minimum szintén 3-4 h között jelentkezik, és a napi csúcsterhelés mintegy 70%-os mértékig esik vissza.

Az előforduló szélsőséges esetek jól érzékelhetők abból a gyakorlati tapasztalatból, hogy egy éjszakai nagy nézőszámot lekötő tv-műsor befejeztekor országos szinten, a mintegy 200-300 MW-nyi teljesítményértékű tv-készülékek lekapcsolása néhány másodperc alatt megtörténik, ezt részben kompenzálja bizonyos mennyiségű világítási fogyasztó bekapcsolása (WC, fürdőszoba), majd néhány perc múlva a világítási fogyasztókat is lekapcsolják.

b) Az előre megtervezett fogyasztói igények különböző okokból bekövetkező, tervezettől eltérő jelentkezése.

Az előző pontban a fogyasztói igények jelentkezési módjára vonatkozóan leírtakon túlmenően, az előre megtervezett fogyasztói igények a tervezetthez képest eltérő módon jelentkezhetnek, elsősorban időjárási okok miatt. Nappali időszakban az égbolt jelentős beborulása, a világítási fogyasztók tömeges bekapcsolása miatt többszáz MW-tal növeli a fogyasztói igényeket. Téli időszakban váratlan időjárás változás (hidegfront, ill. melegfront betörés) az előre megtervezett fogyasztói igényeket akár $0,01 P_{\text{csúcs}}/^{\circ}\text{C}$ -kal változtatja.

c) Az energiarendszerben bekövetkező váratlan kiesések negatív hatásainak minimumra szorítása.

Az erőműrendszerben adott időszakban üzemenlévő egységek valamelyikének váratlan meghibásodása esetén, a meghibásodott egységet a hiba jellegétől függően

- vissza kell terhelni,
- üzemem kívül kell helyezni,
- védelmi működésre az egység kikapcsolódik.

A visszaterhelés általában a forgótartalék szükséges mértékű igénybevételével pótolható.

Az üzemem kívül helyezés attól függően, hogy azonnali végrehajtást vagy bizonyos időn belüli végrehajtást igényel-e, a forgótartalékból, nemzetközi kooperációból megállapodásos alapon, ill. hidegtartalék indításával kompenzálható.

A védelmi működésre történő kikapcsolódás, a működés pillanatában a párhuzamos üzemi nemzetközi kooperációból pótlódik, amelyet rövid időn belül hazai tartalékok igénybevételével kell kiváltani. Lényeges - a beavatkozási módokat is meghatározó - tényező a meghibásodás miatti visszaterhelés mértéke vagy az üzemem kívül helyezendő, ill. kikapcsolódó blokkegység teljesítőképessége. Ilyen szempontból a veszélyes eseteket a nagyblokk-kiesések (200 MW, ill. nagyobb), a legveszélyesebb eseteket a legnagyobb egységteljesítő-képességű blokk kiesése (jelenleg 440 MW, amely az ezredforduló közelében 1000 MW is lehet) jelenti.

A villamosenergia-rendszer rugalmasságával szemben éppen ezért igényként jelentkezik, hogy az ilyen, különösen a nagy teljesítményű gépek kiesése következtében fellépő teljesítményegyensúlyfelbomlás minél gyorsabb ellensúlyozására a rendszer felkészüljön, mégpedig a társadalmilag elvárt és gazdaságosan megvalósítható megbízhatósággal (pl. megfelelő erőművi forgótartalék, gyorsan indítható hidegtartalék, nemzetközi üzemzavari segítségi megállapodás). Mindezek hiányában vagy

elégtelensége esetében - különböző típusú - fogyasztói terheléskorlátozást kell végrehajtani.

- d) A nemzetközi kooperációból adódó szabályozási követelmények betartása, a nemzetközi kooperációs üzemzavarok hatásainak kompenzálása.

A rendszer-együtműködés szabályozási követelményei az egyeztetett menetrendek óras vagy fél-, ill. negyedórás intervallumokban történő, előírt tűréshatárok között tartását igénylik. A különböző rendszer-együtműködési megállapodásoktól, ill. a konkrét műszaki megvalósítástól függ, hogy az exportáló és az importáló közül melyiknek feladata a menetrendtartás szabályozása, vagy az exportáló és importáló közös feladata, a másik féltől függetlenül, az önálló szabályozási tevékenység. Bár melyik esetben igényként jelentkezik a rugalmasság az erőműrendszerrel szemben.

Különleges igényt jelent a rendszer-együtműködés szabályozásában - és így az erőműrendszer rugalmasságával szemben - a váratlan teljesítményhiány következtében a rendszer-összeköttetéseken a menetrendtől eltérő, jelentős teljesítményáramlás-változás. Ez akkor válhat igen veszélyessé, ha egy viszonylag kis rendszer (pl. a magyar) egy nagyságrendnél is nagyobb teljesítményű rendszer-egyesüléssel (akár a volt KGST, akár UCPTE) jár párhuzamosan, és a rendszer-összeköttetések importszállításokkal vannak leterhelve. Ilyen esetben az együtműködő rendszerek erőművi teljesítményének aránya szerint (szélső esetben esetleg akár még 98%-ban is) a kis rendszer teljesítményhiánya az átvételi utakra többletterhelést jelent. A többletterhelés mielőbbi megszüntetése a kisebbik rendszer életbevágóan fontos érdeke, mivel az a

fogyasztói igények kielégítésében jelentős hányadot képviselő villamosenergia-import átvételét is veszélyeztetheti és kaszkád rendszerösszeomlást okozhat, ami jelentős, esetleg teljes fogyasztói ellátáshiánnyal jár.

A teljesség kedvéért megemlítjük, hogy az erőműrendszer rugalmasságával szemben az előzőekben leírt igények kielégítésére többféle eszközt és módszert alkalmaznak évtizedek óta (primer szabályozás, szekunder szabályozás, megszakításos üzem, forgótartalék tartás). Célkitűzésünknek megfelelően a továbbiakban ezen eszközöknek a korlátait vizsgáljuk meg.

1.5. A FORRÁSOLDALI TELJESÍTMÉNYKIESÉS KISZABÁLYOZÁSÁNAK KORLÁTAI

A villamosenergia-rendszerben az időben állandóan változó fogyasztói igények kielégítésére a szolgáltatónak állandóan fel kell készülnie. Az előrelátható jellegzetes terhelésváltozásokra a villamosenergia-rendszer üzemirányítói az erőművek terhelését az üzembiztonsági, minőségi és gazdaságossági követelményeknek megfelelően szabályozzák. A véletlen jellegű terhelésváltozásokkal együtt fellépő frekvenciaváltozás esetén az erőművek stationer és kvázistacioner üzemállapotaiban a szabályozóberendezések (turbina-, kazánszabályozók stb.) tartják az előírt értéken, az anyag- és energiaáramok befolyásolásával, a szabályozott jellemzőket |22, 23|.

A hirtelen bekövetkező erőművi- vagy importhiány esetén az üzemben lévő rendszer paraméterei és automatizmusa határozza meg a kialakuló viszonyokat, köztük a villamosenergia-rendszer frekvenciacsökkenését és annak se-

bességét. A folyamat fizikai jelenségét minőségileg a következők jellemzik.

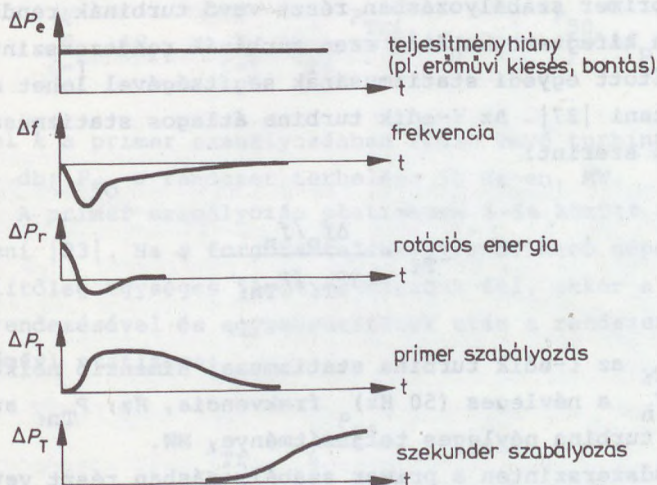
Az első pillanatban a teljesítmény mindenekelőtt a villamosenergia-rendszer forgó tömegei rotációs energiáinak megváltozásával egyenlítődik ki, mely frekvenciacsökkenéssel jár. A frekvenciaeltérés a párhuzamosan járó összes erőműben is érzékelhető, és a villamosenergia-szolgáltató az erőművekben ezt használja fel a turbina fordulatszámának megváltoztatására a 0,3-2 s-on belül működő primer szabályozás segítségével. Ez azonban csak rövid idejű kiszabályozást biztosít a kazánban lévő gőz nyomásának csökkenése miatt. A szekunder szabályozás fizikai okok miatt csak bizonyos idő elteltével tudja biztosítani a kazánba juttatott tüzelőanyag-, levegő- és vízmennyiség áramlásának változásával a turbina megváltozott teljesítményét. A jelenség időbeli dinamikus lefolyását az 1.2. ábra mutatja vázlatosan.

A jelenségek mennyiségi változásai a következő közelítéssel értékelhetők.

A primer szabályozásban részt vevő erőművi turbinák fordulatszám-szabályozói - amennyiben az egyes turbinák még nincsenek teljesen kiterhelve - a frekvenciacsökkenéssel arányosan ΔP_{Ti} többleteljesítménnyel növelik a mechanikus meghajtó teljesítményt, és így a kialakuló egyensúlyi állapot |23|:

$$\pm \Delta P_{Ti} + T_{pi} \frac{d\Delta P_e}{dt} + k_{Ti} \Delta f_p = 0, \quad (1.3)$$

ahol ΔP_{Ti} az i -edik turbina teljesítményváltozása, MW; T_{pi} az i -edik turbina primer szabályozó időállandója, s; ΔP_e a hirtelen bekövetkező erőművi teljesítménykiesés, MW; k_{Ti} az i -edik turbina frekvenciatényezője, ami azt a teljesítményértéket jelenti, amennyivel a turbina primer



1.2. ábra. A forrásoldali teljesítménykiesés hatására a frekvencia- és teljesítményviszonyok időbeli alakulása kisebb teljesítményhiány és megfelelő teljesítményszabályozás esetén

szabályozója a turbinába bemenő teljesítményt - a transziens folyamatok lezajlása után - a lineáris szakaszon megváltoztatja 1 Hz-re vonatkoztatva, MW/Hz; Δf_p frekvenciaváltozás a primer szabályozás hatására, Hz; az előjelek sorrend szerint összetartoznak.

Lassú változásnál - gyorsabbnál pedig a biztonság irányába történő elhanyagolással - ez a többletteljesítmény:

$$\pm \Delta P_{T_i} + k_{T_i} \Delta f_p \approx 0. \quad (1.4)$$

Amennyiben a forgótartalék kevés, a k_{T_i} frekvenciatényező is kisebb, sőt a nulla felé tarthat. Kiterhelt turbina frekvenciatényezője is nulla.

A primer szabályozásban részt vevő turbinák rendszer szinten kifejtett hatását ezen turbinák rendszer szintre átszámított egyedi statizmusának segítségével lehet megállapítani [27]. Az i -edik turbina átlagos statizmusa definíció szerint:

$$X_{Ti} = \frac{\Delta f_p / f_n}{\Delta P_{Ti} / P_{Tni}} \quad , \quad (1.5)$$

ahol X_{Ti} az i -edik turbina statizmusa, dimenzió nélküli szám; f_n a névleges (50 Hz) frekvencia, Hz; P_{Tni} az i -edik turbina névleges teljesítménye, MW.

Rendszer szinten a primer szabályozásban részt vevő turbinák teljesítményváltozásának hatása összeadódik. Az (1.5)-ből kifejezve az i -edik turbina teljesítményváltozását és rendszer szinten összegezve, kapjuk a Δf_p primer szabályozás hatását:

$$\sum_{i=1}^k \Delta P_{Ti} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{X_{Ti}} \frac{P_{Tni}}{f_n} \Delta f_p \quad . \quad (1.6)$$

Az (1.5)-höz hasonlóan definiálunk egy X_{Tr} rendszer szintű eredő turbinastatizmust:

$$X_{Tr} = \frac{\Delta f / f_n}{\sum_{i=1}^k \Delta P_{Ti} / P_{50}} \quad . \quad (1.7)$$

A primer szabályozás hatására létrejövő Δf_p frekvencia-változás következtében az összes többlet erőművi betáplálás rendszer szinten:

$$\sum_{i=1}^k \Delta P_{Ti} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{X_{Ti}} \frac{P_{Tni}}{f} \right) \Delta f_P = \frac{1}{X_{Tr}} \frac{P_{50}}{f_n} \Delta f_P, \quad (1.8)$$

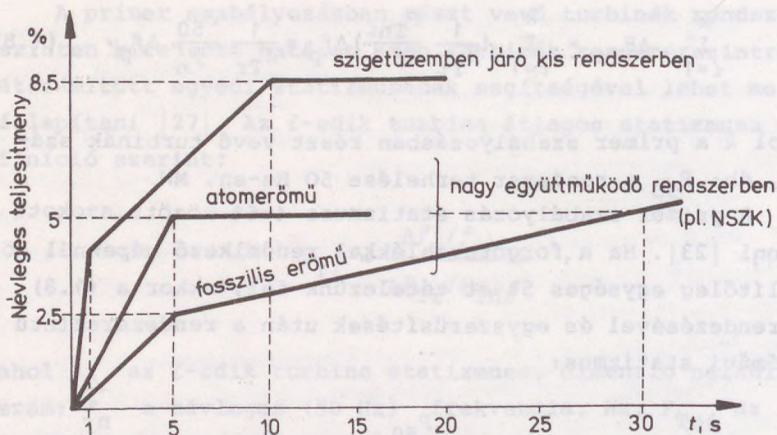
ahol k a primer szabályozásban részt vevő turbinák száma, db; P_{50} a rendszer terhelése 50 Hz-en, MW.

A primer szabályozás statizmusa 4-6% között szokott lenni [23]. Ha a forgótartalékkal rendelkező gépeknél közelítőleg egységes 5%-ot tételezünk fel, akkor a (1.8) átrendezésével és egyszerűsítések után a rendszerszintű erőművi statizmus:

$$X_{Tr} = \frac{P_{50}}{\sum_{i=1}^k P_{Tni}} \cdot 0,05. \quad (1.9)$$

Ebből következik, hogy ha az erőművi teljesítmények pl. 1/3-a vesz részt a primer szabályozásban, rendszerszinten a statizmus 15%-ot tesz ki, és ennek megfelelően csökken a frekvenciaesés kiszabályozásának rendszerszintű erőművi lehetősége.

Az erőművi primer teljesítményszabályozás minél gyorsabb végrehajtása érdekében a villamosenergia-termelők követelményeket írnak elő a berendezésekkel szemben, a frekvenciaváltozás kiegyenlítése érdekében. Pl. az NSZK-ban az együttműködő villamosenergia-rendszerben részt vevő szolgáltató vállalatok által kidolgozott ajánlás szerint a primer szabályozásban részt vevő fosszilis hőerőműveknek a névleges teljesítményük minimálisan 2,5%-át 5 s-on, további 2,5%-át 30 s-on belül, atomerőműveknek pedig a névleges teljesítményük 5%-át 5 s-on belül fel kell tudni venni frekvenciacsökkenéskor, sőt szigetüzemben járó rendszernél, ahol a legnagyobb erőművi gépegység a csúcsteljesítmény 15%-át is meghaladja, még na-



1.3. ábra. A primer szabályozásban részt vevő hőerőművi gépegységek felterhelési sebességére vonatkozó követelmények az NSZK együttműködő villamosenergia-rendszerében és szigetüzemű kis energiaszolgáltató vállalatnál [28]

gyobb szabályozási követelményt írnak elő (1.3. ábra) [28].

Az erőművi teljesítmények primer szabályozásának lehetősége mindezek ellenére korlátozott a frekvenciacsökkenés kiegyenlítésében. Az (1.8) egyenletből

$$\Delta f_p = \frac{\sum_{i=1}^k P_{Ti}}{P_{50}} X_{Tr} f_n \quad (1.10)$$

alapján pl. 3% forgó-tartalékteljesítmény és a gépek egyedi primer fordulatszabályozóinak 5%-os statizmusa esetén csak 0,225 Hz csökkenésig, azaz 50 Hz esetén 49,775 Hz-ig hatékony az erőművi primer szabályozás. Ha

a teljesítményhiány nagyobb annál, hogy az egyensúly ezen a frekvenciacsökkenésig kialakuljon, akkor a frekvencia tovább esik.

A frekvenciacsökkenés kiszabályozásában maguk a fogyasztók is segítenek az erőműveknek az önszabályozásukkal, mert berendezéseik egy részének villamosenergia-igénye frekvencia- és feszültségfüggő, és így a frekvencia és a feszültség csökkenésével együtt csökken a fogyasztói teljesítményfelvétel is.

A fogyasztók frekvenciafüggősége a frekvenciaváltozás kis értékei esetén, $-5\% < \Delta f / f_n < 2\%$ tartományban, állandó feszültségen lineárisnak tekinthető fel, ami a

$$K_F = \frac{\Delta P_F^f / P_{50}}{\Delta f / f_n} \quad (1.11)$$

dimenzió nélküli arányossági vagy frekvenciatényezővel fejezhető ki, ahol ΔP_F^f a fogyasztói terheléscsökkenés a frekvenciacsökkenés következtében; P_{50} az $f_n = 50$ Hz-en a fogyasztói terhelés.

A villamosenergia-fogyasztók dimenzió nélküli frekvenciatényezője $K_F = 0-2$ között változik, a fogyasztói összetétel szerint. A fogyasztói frekvenciatényező felhasználásával az (1.11)-ből meghatározható, hogy csak a fogyasztók önszabályozó hatására milyen értékű lenne a $\Delta f'_0$ frekvenciacsökkenés különböző ΔP_e forrásoldali, erőművi teljesítménykiesés esetén, állandó feszültséget feltételezve:

$$\Delta f'_0 = \frac{\Delta P_e}{P_{50}} \frac{f_n}{K_F} \quad (1.12)$$

Ez a frekvenciaesés következne be, ha nem lenne erőművi forgótartalék, feszültségváltozás, és ha a hirtelen be-

következő forrásoldali kiesést a többi erőmű nem kezdené kiszabályozni.

A különböző fogyasztók más-más frekvenciatényezővel rendelkeznek, a beépített berendezéseik függvényében. Az ipari nagyfogyasztókra 1978. évre elvégzett magyar vizsgálat szerint [31] pl. a bányászat 2,01; az élelmiszeripar 1,4; a könnyűipar 1,03 és a kohászat 0,8 frekvenciatényezővel rendelkezik.

A frekvenciacsökkenéssel a teljesítményhiány is csökken, így az f frekvencia az idő függvényében a következőképpen alakul, ha csak a fogyasztók frekvenciafüggő önszabályozását vesszük figyelembe:

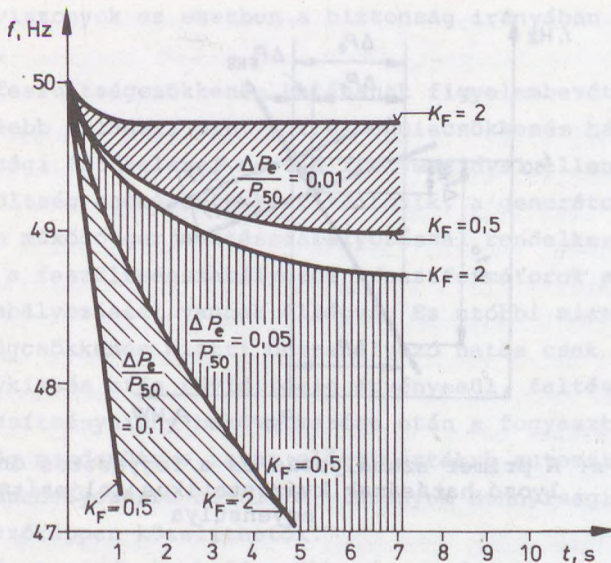
$$f'(t) = f_n - \Delta f'_0 (1 - e^{-t/T_F}) , \quad (1.13)$$

ahol T_F a fogyasztók kinetikai időállandója.

Általánosságban az 1.4. ábra mutatja különböző forrásoldali kiesésnél a különböző frekvenciatényezőjű fogyasztók önszabályozó képességét. Az ábrából megállapítható, hogy a fogyasztók önszabályozó hatása is korlátozott, kb. 3%-nál nagyobb forrásoldali kiesést már nem tudnak a villamosenergia-szolgáltatás biztonsága számára szükséges kb. 47,5 Hz felett saját maguk stabilizálni. Az erőművi primerszabályozó hatást azonban javítják. Az együttes hatásukat erőművi vagy importkiesésnél az 1.5. ábra mutatja be kvázistatikus állapotban.

A forrásoldali kiesésre kialakuló eredő kvázistatikus frekvenciacsökkenést az erőművi primer szabályozás és a fogyasztók önszabályozása együtt határozza meg. Ha a kiesés nagyobb, mint a forgótartalék, azaz

$\Delta P_e > \sum_{i=1}^k \Delta P_{Ti}$, akkor a frekvenciaváltozás módosul a primer szabályozás hatására, és a kvázistatikus frekvencia közelítőleg:

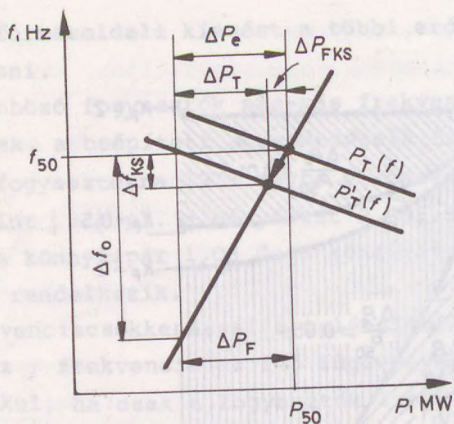


1.4. ábra. A frekvenciacsökkenés időbeli alakulása csak a fogyasztók önszabályozó hatását figyelembe véve, $K_F = 0,5-2$ és 1%-os, 5%-os, valamint 10%-os erőművi teljesítménykiesés esetén

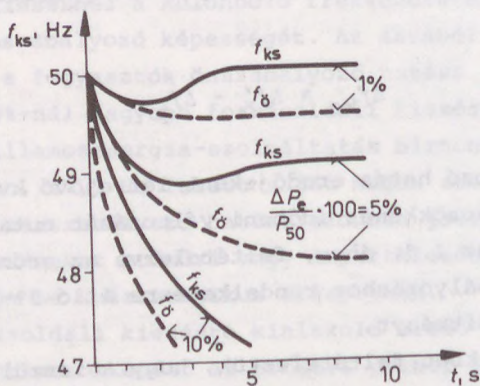
$$\Delta f_{ks} \cong \Delta f'_{\emptyset} - \Delta f_p . \quad (1.14)$$

A két szabályozó hatás eredőjeként létrejövő kvázisztatikus frekvenciacsökkenés időbeni változását mutatja be példaszerűen az 1.6. ábra, feltételezve az erőművi fordulatszám-szabályozáshoz rendelkezésre álló 3%-os forgótartalékteljesítményt.

Az eddigiekben feltételeztük, hogy a feszültség állandó. Az erőművi vagy importkiesésnél feszültségcsökkenésre is sor kerülhet, és ez a fogyasztói terhelésvétel további csökkenését eredményezi, és így a frekvenciaesés kisebb lesz. Az eddig bemutatottakhoz képest a tény-



1.5. ábra. A primer szabályozás és a fogyasztás önszabályozó hatásának kvázisztatikus teljesítményegyensúlya



1.6. ábra. A frekvenciacsökkenés kvázisztatikus időbeni alakulása a primer szabályozás és a terhelés önszabályozásának együttes hatására. $K_F = 1$, 3% forgótartalék, és 1%-os, 5%-os, valamint 10%-os erőművi kiesés esetén

leges viszonyok ez esetben a biztonság irányában kedvezőbbek.

A feszültségcsökkenés hatásának figyelembevétele összetettebb feladat, mint a frekvenciacsökkenés hatásának mennyiségi értékelése, mert a frekvenciával ellentétben a feszültség csomópontonként változik, a generátorok gyorsan működő gerjesztésszabályozással rendelkeznek, valamint a feszültségszabályozós transzformátorok automatikus szabályozással vannak ellátva. Ez utóbbi miatt a feszültségcsökkenés miatti önszabályozó hatás csak a teljesítménykiesés után rövid ideig érvényesül, feltéve, hogy a teljesítményhiány bekövetkezése után a fogyasztói feszültség mindenütt a zavar előtti értékre automatikusan visszaszabályozásra kerül. A viszonyok mennyiségileg a következőképpen közelíthetők.

A fogyasztók terheléscsökkenése a feszültségcsökkenés miatt:

$$\Delta P_F^u = P_{50} - \sum_{i=1}^r P_{0i} \left(\frac{U_i}{U_{0i}} \right)^p, \quad (1.15)$$

ahol P_{0i} az i -edik fogyasztó üzemzavar előtti terhelése; U_{0i} , ill. U_i az i -edik fogyasztónál a feszültség az üzemzavar előtt és rövid ideig az üzemzavar után; p a fogyasztó feszültségtényezője.

Azzal a közelítéssel élve - ha pontosabb adatok nem állnak rendelkezésre - hogy a fogyasztók feszültségtényezője $p = 1$, és a csomópontok feszültségének átlagolása nem ad lényeges hibát, a frekvencia- és feszültségcsökkenésből adódó fogyasztói terheléscsökkenés összegezéséből, az (1.12) és (1.15) egyenletek alapján, a fogyasztói önszabályozás eredő frekvenciacsökkenése:

$$\Delta f_{\text{ö}} \approx \frac{\Delta P_e}{P_{50}} - \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) \frac{f_n}{K_F} . \quad (1.16)$$

Ennek megfelelően, a feszültségszabályozós transzformátorok automatikus szabályozásáig, módosul az (1.14)-ben szereplő kvázistatikus frekvenciacsökkenés is.

Végezetül meg kell említeni, hogy üzemzavarok esetén a frekvencia időbeli alakulását több helyen méréssel és szimulációs modellezéssel is vizsgálják | 27, 31-33 | , melyek az adott rendszerről pontos eredményeket adnak a dinamikus viszonyokra is, pl. a turbina primerszabályozó viselkedéséből adódó dinamikus lengésekre. A 3. fejezetben ezt még részletesen megvizsgáljuk.

A teljesség kedvéért szükséges kitérni a fogyasztói meddő teljesítmény frekvencia- és feszültségfüggésének hatására az eddig kapott eredmények szempontjából.

A fogyasztói meddő teljesítmény feszültség- és frekvenciafüggésére számos vizsgálatot folytattak. A kapott eredmények elég különbözőek attól függően, hogy milyen összetételű fogyasztói csoportot, területet vizsgáltak. A meddő teljesítmény/feszültségváltozás arány pl. egy IEEE Working Group nemzetközi vizsgálata alapján 0,6-5 a Budapesti Műszaki Egyetem magyar viszonyok között 3-6 értéket állapított meg.

A meddő teljesítmény frekvenciafüggőségére már kevesebb mérési adat áll rendelkezésre. Ezekből viszont az egyértelműen kitűnik, hogy a meddő teljesítmény mindig a frekvenciaváltozással ellenkező értelemben változik. A konkrét adatok itt is a fogyasztói területtől függenek, a változás arányára 0 és 4,6 közötti adatokra vannak publikációk. Mindezek után megállapítható, hogy az eddigiekben vizsgált csökkenő frekvenciánál nő a meddőfelvétel. Ez viszont alacsonyabb feszültséget, ezáltal kevésbé növekvő meddőigényt és csökkenő hatásosteljesítmény-felvétel-

telt okoz. A csökkenő hatásosteljesítmény-felvétel pedig kevésbé csökkenő frekvenciát eredményez. Az előzőekben ismertetett eredményekre való hatás tehát az, hogy a fogyasztói meddő teljesítmény frekvencia- és feszültségfüggése a kiváltó okot megszüntetni igyekszenek, tehát az előzőekben leírt eredményekre a biztonság irányába hatnak.

1.6. RENDSZERÜZEMZAVAROK

A villamosenergia-rendszerek bonyolultabbá válása, az erőművi betáplálások koncentrációja, a nagyteljesítményű hálózati táppontok létesítése, a földrajzilag hatalmas méretű váltakozóáramú rendszeregyesülések létrejötte olyan új sajátosságokhoz vezetett, hogy nagy területeket és sok fogyasztót érintő súlyos üzemzavarok keletkezésének és kifejlődésének veszélyhelyzete megnövekedett. Ilyenkor felmerülnek a rendszer életképességének - vagyis annak, hogy a rendszer alkalmas legyen arra, hogy ne következzen be teljes vagy részleges rendszerösszeomlás - biztosításával kapcsolatos hiányosságok, ill. fejlesztési feladatok. Ezekhez viszont a bekövetkezett rendszerüzemzavarokat elemezni kell.

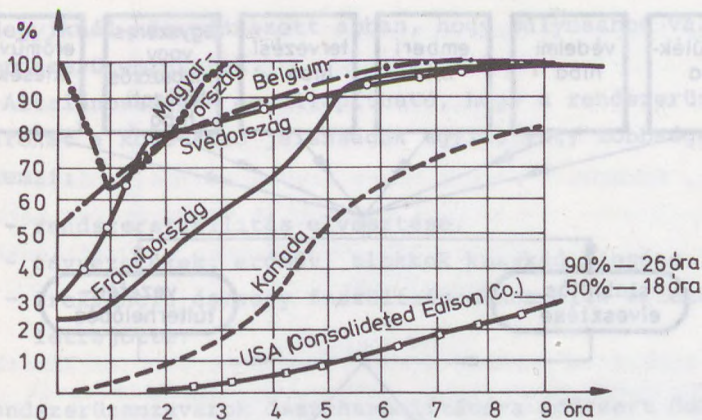
Az utóbbi évtizedben az a hazai és külföldi tapasztalat, hogy míg a nagy üzemzavarok száma kevés, az ilyenkor kiesett fogyasztói villamos energia igen nagy, és ez egyes esetekben már a társadalom működőképességét is kedvezőtlenül befolyásolja. Az ilyen rendszerüzemzavarok ezért a szakmai körökből kilépnek, és esetenként szélesebb érdeklődésre tarthatnak igényt. A probléma ellentmondásosságát az emeli ki, hogy nagy rendszerüzemzavarok éppen a fejlett ipari országokban következnek be, és a fogyasztók ott a legérzékenyebbek.

Az elmúlt másfél évtizedben több nagy villamosenergia-rendszerben történt kiterjedt, nagyszámú fogyasztó villamosenergia-ellátásának tartós kimaradását okozó rendszerszintű üzemzavar közül néhányat példaszerűen az 1.1. táblázat és az 1.7. ábra mutat be az USA, Franciaország, Belgium, Svédország, Magyarország és Kanada esetében. A nagy fogyasztói kiesés (36-100%) után, mint az ábrából látható, a terhelés 90%-ának újraellátása villamos energiával 3 és 26 óra közötti időtartamot vett igénybe.

Egy rendszerüzemzavar kialakulásának közelítő áttekintését adja az 1.8. ábra. Látható még ezen közelítő áttekintésből is, hogy több kedvezőtlen esemény egyidejű fellépése esetén következik be a teljes vagy részleges rendszerösszeomlás.

A rendszerüzemzavarok bonyolult folyamata arra ösztönözte az illetékes tervező és üzemeltető szakembereket, hogy szervezeten foglalkozzanak a villamosenergia-rendszer életképességét döntően befolyásoló események okaival és levonják megelőzésük érdekében a szükséges tanulságokat. A nagyfeszültségű hálózatokkal foglalkozó CIGRE nemzetközi szervezet keretében került sor erre az átfogó elemzésre [19, 20].

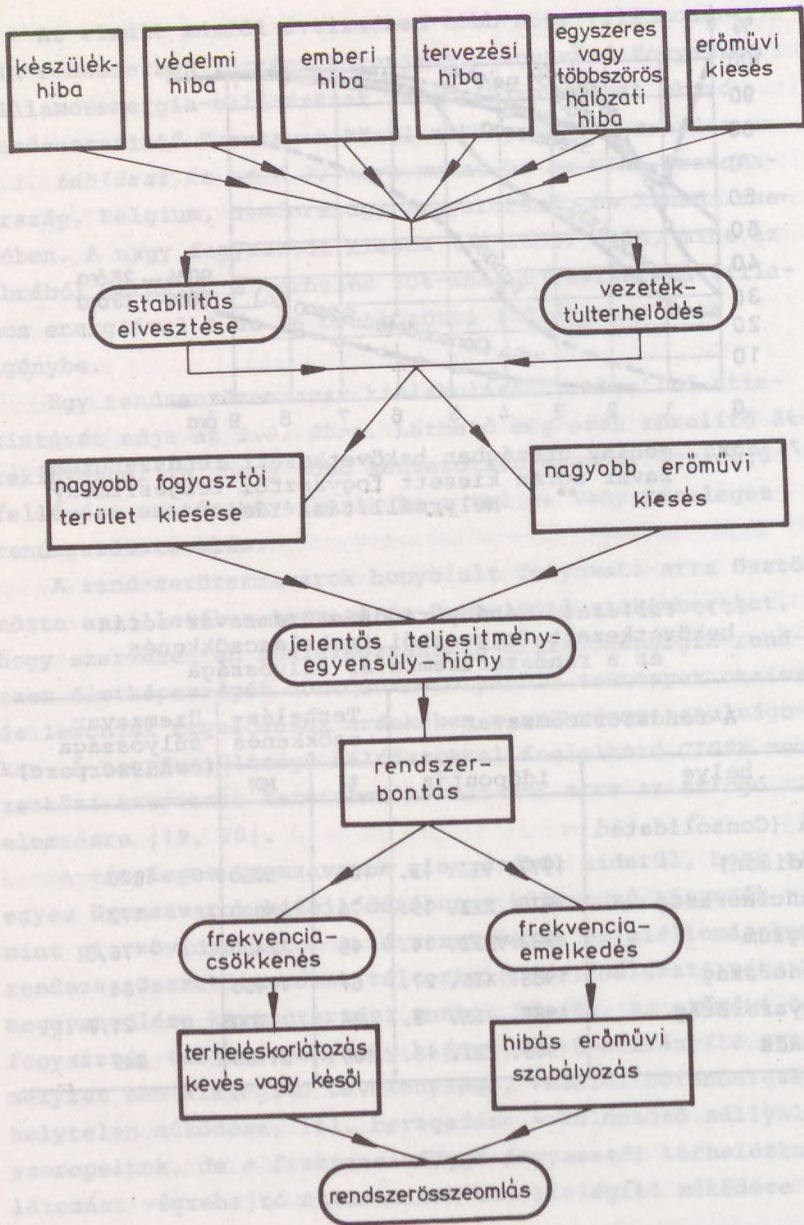
A tényleges üzemzavarok elemzéséből kiderül, hogy az egyes üzemzavarok kifejlődésében a különböző tényezők - mint pl. rövidzárlatok a távvezetéteken és alállomásokon, rendszer-összeköttetések túlterhelődése, hálózati séma meggyengülése karbantartási munkák idején, az erőművi és fogyasztói teljesítménysúly hiánya, az üzemirányító személyzet nem kielégítő tevékenysége, védelmi berendezések helytelen működése, ill. beragadása - különböző súllyal szerepelnek, de a frekvenciafüggő fogyasztói terheléskorlátozást végrehajtó automatikák nem kielégítő működése



1.7. ábra. Néhány országban bekövetkezett rendszerüzemzavar során kiesett fogyasztói teljesítmény helyreállítási ideje

1.1. táblázat. Néhány rendszerüzemzavar során bekövetkezett fogyasztói terheléscsökkenés és a rendszerüzemzavar súlyossága

A rendszerüzemzavar		Terheléscsökkenés		Üzemzavar súlyossága (rendszerperc)
helye	időpontja	%	MW	
USA (Consolidated Edison)	1977. VII. 13.	100	5850	1020
Franciaország	1978. XII. 19.	75	28000	172
Belgium	1982. VIII. 14.	45	2400	76,8
Svédország	1983. XII. 27.	67	11400	84
Magyarország	1987. IX. 3.	36	1700	21,7
Kanada	1989. III. 13.	100	21100	249



1.8. ábra. A rendszerüzemzavar közelítő mechanizmusa

mindegyiknél közrejátszott abban, hogy súlyosabbá váltak a rendszerüzemzavarok.

Általánosságban megállapítható, hogy a rendszerüzemzavarokat a következő jelenségek egyike vagy többsége jellemzi:

- rendszerstabilitás elvesztése,
- távvezetékek, erőművi blokkok kaszkád kiesése,
- frekvencia és/vagy feszültség abnormális értékének létrejötté.

A rendszerüzemzavarok összehasonlítására módszert dolgoztak ki az üzemzavarok súlyosságának mennyiségi megítélésére. Ez az ún. "rendszerperc", melynek definíciója:

$$\text{rendszerperc} = \frac{\text{nem szolgáltatott villamosenergia (MWh)} \times 60}{\text{eddig maximális csúcsteljesítmény (MW)}} \quad (1.17)$$

Ez azt jelenti, hogy egy rendszerperc egyenlő az eddigi csúcsideji teljesítmény egy percig történő teljes kiesésével. Ez a mértékegység módot ad a különböző rendszerekben, különböző években bekövetkezett üzemzavarok összehasonlítására. A könnyebb értékelés céljából a rendszerüzemzavar súlyosságát a következő definícióval csoportosítjuk:

0. fokozat - olyan üzembizonytalanság, amely általánosan elfogadható a fogyasztók részéről.
1. fokozat - olyan üzembizonytalanság, mely befolyással lehet a fogyasztók kisebb-nagyobb csoportjára, de nem tekinthető nagyon komolynak. A fogyasztókra való hatás a normálisnak elfogadottnak kevesebb mint a 10-szerese.

2. fokozat - megbízhatatlan üzemi helyzet, amely már komoly hatással van a fogyasztókra. A fogyasztói zavarás a normálisnak elfogadottnak 10-100-szorosa.

3. fokozat - fogyasztókra nagyon súlyos hatással bíró üzemi állapot. A fogyasztókra tett hatása 100-1000-szerese a normálisnak elfogadottnak.

Ezek alapján a rendszerüzemzavarokra az 1.2. táblázatban látható súlyossági fokozatok alakíthatók ki.

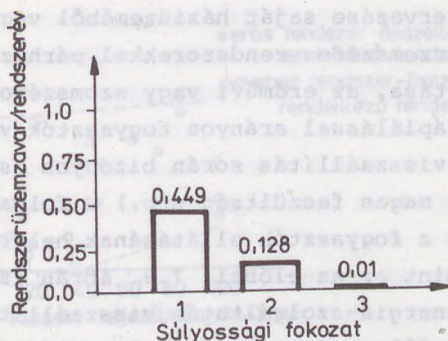
1.2. táblázat. A rendszerüzemzavarok súlyossági fokozatai

Súlyossági fokozat	Súlyosság
0. fokozat	kevesebb mint 1 rendszerperc
1. fokozat	1-9 rendszerperc
2. fokozat	10-99 rendszerperc
3. fokozat	100-999 rendszerperc

Ezen elvek alapján vizsgálva a 41 európai és 102 észak-amerikai villamosenergia-szolgáltató vállalatnál bekövetkezett rendszerüzemzavarokat az adódott, hogy 1. fokozatú rendszerüzemzavar kb. minden 2,5 évben, 2. fokozatú üzemzavar kb. 8 évenként, és 3. fokozatú 100 évenként következhet be (1.9. ábra) |20|.

A tényadatok alapján, figyelembe véve az egyes rendszerek különböző sajátosságait, közelítőleg a következő általános tendenciák adódnak:

- a szomszédos rendszerekkel való összeköttetések jelentősen hozzájárulnak az 1. fokozatú rendszerüzemzavarok csökkentéséhez;



1.9. ábra. Különböző súlyossági fokozatú rendszerüzemzavar bekövetkezésének valószínűsége 29 ország 1369 rendszerévének tapasztalata alapján |8|

- a stabilitás által korlátozott rendszerekben lényegesen több üzemzavart tapasztaltak minden egyes súlyossági fokozatban, mint a termikus határteljesítményű rendszereknél,
- nagyobb teljesítményű rendszerekben minden súlyossági fokozatban több rendszerüzemzavar következik be, mint a kisebb rendszerben;
- észak-amerikai és európai vállalatoknál közelítőleg azonos a rendszerüzemzavar-gyakoriság az összes súlyossági fokozatban.

1.7. A VILLAGENERGIA-SZOLGÁLTATÁS HELYREÁLLÍTÁSA

A rendszer életképességének összeomlása után az üzemirányítók megkezdik az eredeti állapotra való visszaállításra szolgáló intézkedéseket. Ilyenek pl. a rendszer több áttekinthető részre való bontása, egyes elkülönült részrendszerekben az erőművek indulásának, terhelésfel-

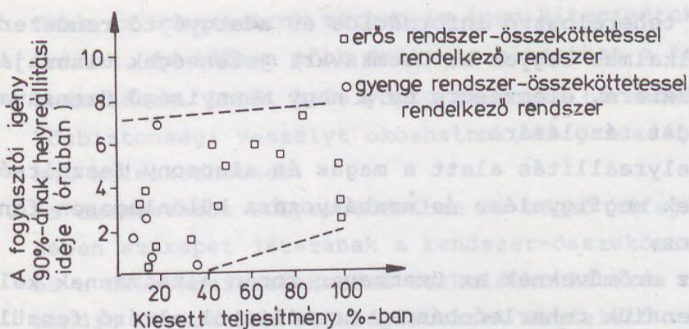
vételének megszervezése saját háziüzeméből vagy idegen feszültségről, szomszédos rendszerekkel párhuzamos kapcsolás végrehajtása, az erőművi vagy szomszédos rendszerből kapható betáplálással arányos fogyasztók visszakapcsolása stb. A visszaállítás során bizonyos események (túlterhelődés, magas feszültség stb.) a folyamatot megzavarhatják, és a fogyasztók ellátásának helyreállítása lelassulhat, amint ez az előbbi, 1.9. ábrán is látható.

A villamosenergia-szolgáltatás visszaállításának egyik mértéke a 90%-os fogyasztás helyreállításának az ideje. Ez alapján a különböző rendszerüzemzavarok összehasonlíthatók. Az 1.10. ábra ezt mutatja be az üzemzavar következtében kiesett fogyasztói terhelés függvényében. Az ábrából gyenge pozitív korreláció állapítható meg a helyreállítási idő és a rendszerüzemzavar során kiesett fogyasztói terhelés között.

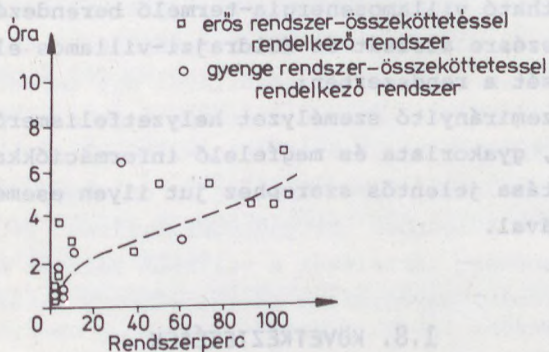
Az üzemzavar alatt nem szolgáltatott villamos energia alapján képzett "rendszerperc" magában foglalja mind a kiesett teljesítményt, mind a helyreállítási időt. Ezért, ha azzal a durva közelítéssel élünk az előbbi ábra alapján, hogy a helyreállítási idő arányos a kiesett fogyasztói teljesítménnyel, akkor feltételezhetjük, hogy a helyreállítási idő a rendszerperc négyzetgyökével arányos. Ezt az arányosságot mutatja az 1.11. ábrán a szaggatott vonallal jelzett közelítés. Ezen kapcsolat ismerete arra jó, hogy ha adva van egy rendszerperc érték, akkor a helyreállítási idő durván becsülhető.

A rendszerösszeomlás részbeni megállításában és a fogyasztói terhelés visszakapcsolásában a következő tényezők a legfontosabbak:

- frekvenciacsökkenési-terheléskorlátozási rendszer megfelelő tervezése és működése, azaz se túl sok, se túl kevés fogyasztó legyen kikapcsolva, megakadályozva a frekvencia lengését;



1.10. ábra. A rendszerüzemzavarnál kiesett teljesítmény 90%-ának helyreállítási ideje a kiesett teljesítmény függvényében [90]



1.11. ábra. A rendszerüzemzavar esetén kiesett teljesítmény 90%-ának helyreállítási ideje az üzemzavar súlyosságának függvényében [90]

- a teherelosztó információs és adatgyűjtő rendszere alkalmas legyen az üzemzavari jelenségek visszajátzására, elemzésére és a nagy mennyiségű üzemzavari adat tárolására;
- helyreállítás alatt a magas és alacsony feszültségek megfigyelése és szabályozása különlegesen fontos;
- az erőműveknek az üzemzavar során alkalmasnak kell lenniük teherledobásra, normálistól eltérő feszültség- (gerjesztés-) szabályozásra;
- helyreállítás során az erőművek képesek legyenek a normál üzemtől eltérően mind a frekvencia-, mind a teljesítményszabályozásra,
- normál üzem részeként kell tekinteni az azonnal indítható villamosenergia-termelő berendezések rendelkezésre állását és földrajzi-villamos elhelyezkedését a rendszerben;
- az üzemirányító személyzet helyzetfelismerő képessége, gyakorlata és megfelelő információkkal való ellátása jelentős szerephez jut ilyen esemény alkalmával.

1.8. KÖVETKEZTETÉSEK

1. A több rendszer összekapcsolásával létrehozott, ill. az önmagukban is területileg kiterjedt vagy bonyolult, nagyteljesítményű villamosenergia-rendszereknek számos műszaki-gazdasági előnye és összességben megnövekedett üzembiztonság ellenére is reális valószínűsége van a villamosenergia-szolgáltatás megszakadásának az üzemzavar miatt bekövetkező rendszerösszeomlás miatt.

2. Ezek az üzemzavarok térben is igen kiterjedtek lehetnek, és időben több óráig is eltarthat a felszámolásuk. Ebből kifolyólag jelentős társadalmi, közbiztonsági veszélyt okozhatnak, és gazdasági károk keletkezhetnek.
3. Az üzemzavarok súlyosbodásában és végső kifejlődésében szerepet játszanak a rendszer-összeköttetések és a frekvenciacsökkenési terheléskorlátozás nem mindig a váratlan szükségleteknek megfelelő viselkedése, ezért e területeken sokat lehet tenni a rendszerszintű üzemzavarok megelőzése érdekében.

2. A RENDSZER-ÖSSZEKÖTTETÉSEK VÉLETLEN JELLEGŰ TERHELÉSÉNEK JELLEMZŐI A FOLYAMATOS VILLAMOSENERGIA-ELLÁTÁSBAN

2.1. A RENDSZER-ÖSSZEKÖTTETÉSEK VÉLETLEN JELLEGŰ TERHELÉSEI, SAJÁTOSÁGAI ÉS SZEREPE

A villamosenergia-rendszerek fogyasztói terhelésével egyensúlyt tartó erőműrendszereket különböző módon, a rendszerenként kialakult filozófiával úgy tervezik, hogy a legtöbb erőművi üzemzavar esetében legyen elég tartalékteljesítmény a fogyasztók folyamatos ellátása érdekében. A számításokat gyakorlatilag az ún. egyponthozalakkal végzik a különböző energiarendszerekben, tehát amikor az erőműrendszer tartalékát a villamos hálózat nélkül, csak az erőművi gépegységek adatai alapján határozzák meg.

Az erőművi tartalék tervezése történhet determinisztikus vagy valószínűségelméleti alapon előre meghatározott üzembiztonsági kritériumok és/vagy gazdasági szempontok betartásával. Általánosságban mondható, hogy a villamoserőmű-rendszerek elemzése megbízhatósági szempontból különböző típusú megbízhatósági indexek, mutatók számítását és értékelését jelenti. A használatos mutatókról a Függelékben található tömör tájékoztatás. A számítások a fogyasztói terhelés évi csúcsára, téli csúcsidejére vagy az egész évre (ekkor is különböző

módon, pl. heti csúcsterhelésekre) készülhetnek. Az egyes rendszerek erőműrendszerei ezért bizonyos valószínűséggel a saját fogyasztói terhelésüknél nagyobb vagy kisebb teljesítőképességgel rendelkeznek. A rendszer-együtműködés eredményeképpen az éppen többlettel rendelkező erőműrendszer kiegészítést nyújthat az éppen hiányt szenvedő vagy csak igen rossz hatásfokkal üzemeltethető erőművi tartalékokkal rendelkező erőműrendszernek. Más alkalommal ez fordítva lehet. Egyik esetben sem érzik meg a fogyasztók a villamosenergia-rendszer üzemeltetőinek gondját, a rendszer-összeköttetések a véletlen jellegű terhelésként realizálódó terhelések formájában megvalósuló kiegészítés miatt.

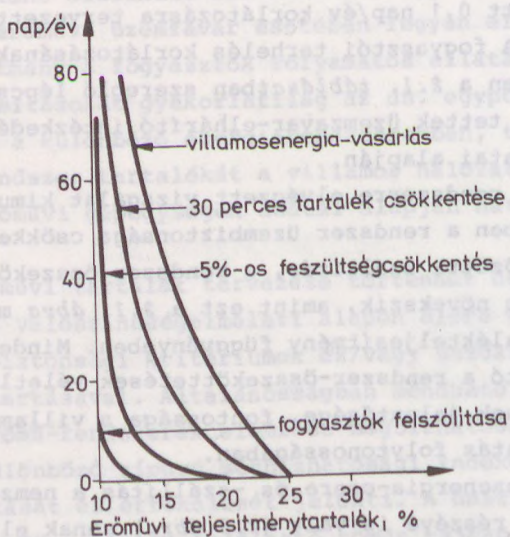
A villamosenergia-rendszerek közötti üzemzavari villamosenergia-vásárlásra egy USA-ban végzett vizsgálat szerint - 20 000 MW-os rendszerben - évente 17 esetben van szükség 1 000 MW-os kiegészítésre, még egy társadalmilag elfogadott 0,1 nap/év korlátozásra tervezett rendszerben is. A fogyasztói terhelés korlátozásának elkerülése érdekében a 2.1. táblázatban szereplő lépcsőkben és időtartamban tettek üzemzavar-elhárító intézkedéseket öt év tapasztalatai alapján.

Az adott rendszerre elvégzett vizsgálat kimutatta, hogy amennyiben a rendszer üzembiztonsága csökken, a rendszerek közötti szállítás, a rendszer-összeköttetések igénybevétele növekszik, amint ezt a 2.1. ábra mutatja az erőművi tartalékteljesítmény függvényében. Mindezekből megállapítható a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének jelentősége, fontossága a villamosenergia-szolgáltatás folytonosságában.

A villamosenergia-csere és -szállítás a nemzetközi kereskedelem részévé is vált (2.2 ábra) annak ellenére, hogy általában minden ország igyekszik villamos energiában önellátó lenni. Ezen látszólagos ellentmondásnak fel-

2.1. táblázat. Az üzemzavar-elhárítási intézkedések sorrendje

Sorrend	Üzemzavari teendő	Hatása csúcs-időben, MW	Előfordulás, nap/év
1.	Vásárlás a szomszéd rendszerből	1 000	17,0
2.	Tartalékok csökkentése	1 300	2,2
3.	Feszültségcsökkentés	700	0,2
4.	Felhívás a fogyasztókhoz	400	0,04
5.	Forgótartalék teljes kihasználása	1 300	0,02
6.	Fogyasztói lekapcsolás	1 300	0,0016



2.1. ábra. A villamosenergia-rendszerek közötti üzemzavari vásárlás növekedése a rendszer üzembiztonságának csökkenésével

Ország	Bruttó villamosenergia-termelés, TWh	Import %			Export %			Teljes forgalom részaránya, %
		40	30	20	10	0	10	
Ausztria	50,4				13,5		14,5	28,0
Belgium	70,8				6,7		12,0	18,7
Bulgária	41,1				13,2		4,0	17,2
Dánia	25,7	46,5					19,1	65,6
Francaország	420,1				1,5		12,5	14,0
Magyarország*	29,9		27,7				3,5	31,2
Németország	549,8				5,7		5,6	11,3
Olaszország	216,9				16,4		0,4	16,8
Svájc	55,8	37,2					40,9	78,1

* 1991 évi adat

2.2. ábra. Néhány európai ország villamosenergia-exportja, -importja és részaránya a bruttó villamosenergia termelésből 1990-ben

oldása a villamos energiának azon specialitásában van, hogy ipari méretekben nem tárolható, és ez azt jelenti, hogy egy villamosenergia-rendszerben fellépő rendkívüli esemény az ellátás folyamatosságát veszélyezteti, és ilyenkor a rendszer-együttműködés keretében a másik rendszerből történő véletlen jellegű villamosenergia-szállítás a fogyasztók folyamatos ellátását biztosíthatja. Azt lehet mondani, hogy a villamos energia rendszer-

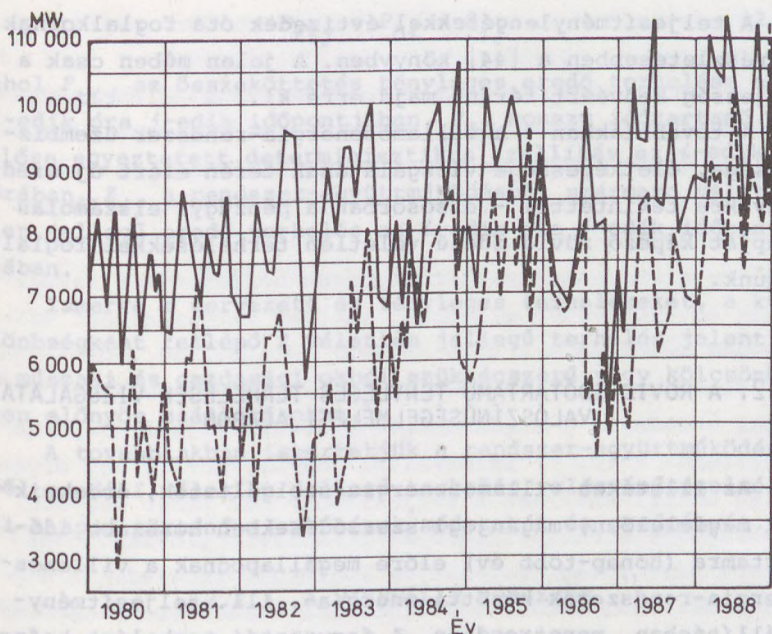
összeköttetésekben megvalósuló szállítása az egyes országok, vállalatok villamosenergia-szolgáltatásának önállósága, a folyamatos ellátásból és az olcsóbb energiavásárlásból adódó gazdasági előnyök, valamint a különböző frekvenciaszabályozási stratégiák közötti kompromisszum eredménye (2.3. ábra).

A váltakozó áramú rendszer-összeköttetésekben áramló villamos teljesítménynek időben változó, sztochasztikus jellegét érzékelteti a 2.4. ábra, amely a rendszer-összeköttetésekben eredőben megvalósuló determinisztikus, hosszú távú (néhány hónap, év) export-importot és az erreszuperonálódó véletlen jellegű terhelés alakulását ábrázolja.

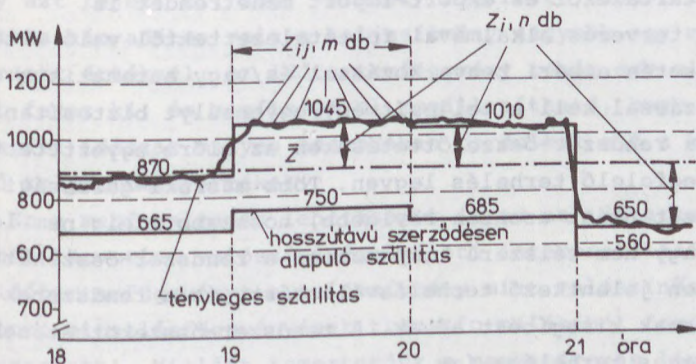
Az előzőekben leírt fizikai realizációk mutatják, hogy a rendszerek együttműködéseként a rendszer-összeköttetések terhelése számos ok okozataként jelentkezik és - a hosszú távon előre meghatározott determinisztikus terhelésen kívül és túlmenően - véletlen jellegű terhelésként valósul meg.

A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelései két fő csoportra oszthatók:

- teljesítménylengés (tizedmásodperc-perc időtartamú), amelyet a rendszer-együttműködésben egyeztetett T időn belül ki kell szabályozni;
- rövid időtartamú (1/4 óra, óra, nap) véletlen jellegű terhelés, amely műszaki-gazdasági alapon megvalósuló üzemzavari és/vagy marginális villamosenergia-cseréből adódik, és a rendszerek közötti pénzügyi elszámolás tárgya. A villamosenergia-szállításokra 1-2 órával vagy nappal korábban történt szóbeli megállapodás alapján is sor kerülhet.



2.3. ábra. Nyugat-európai országok határt keresztező rendszer-összeköttetések terhelése (— nappal, --- éjszaka)



2.4. ábra. A rendszer-összeköttetések megvalósuló sztochasztikus terhelések

A teljesítménylengésekkel évtizedek óta foglalkoznak, legrészletesebben a |44| könyvben. A jelen műben csak a teljesség kedvéért térünk majd erre ki.

A továbbiakban - a villamosenergia-rendszer üzembiztonsága, életképessége vizsgálatának terén elért új eredményekre tekintettel - elsősorban a pénzügyi elszámolás alapját képező rövid idejű véletlen terhelésekkel foglalkozunk.

2.2. A RÖVID IDŐTARTAMÚ TÉNYLEGES TERHELÉSEK VIZSGÁLATA VALÓSZÍNŰSÉGELMÉLETI ALAPON

Az illetékes villamosenergia-szolgáltatók, érdekeiknek megfelelően, magánjogi szerződésekben hosszabb időtartamra (hónap-több év) előre megállapodnak a villamosenergia-rendszerek közötti energia-, ill. teljesítményszállításban, menetrendben. A fogyasztói terhelést befolyásoló tényezők (naptípus, időjárás stb.) feltételezésével a várható fogyasztás alapján tervezhető az erőművek menetrendje a gazdaságos teherelosztás figyelembevételével, számításba véve a kényszermenetrendű erőműveket, forgótartalékot és export-import menetrendet is.

A tervezés alkalmával feltételezettektől való eltérés esetén emberi beavatkozással és/vagy automatikus szabályozással kell a teljesítmény-egyensúlyt biztosítani, hogy a rendszer-összeköttetéseken az előre egyeztetetteknek megfelelő terhelés legyen. Több műszaki-gazdasági okból esetenként azonban rövidebb, hosszabb ideig nem lehet vagy nem célszerű kompenzálni a rendszer-összeköttetéseken jelentkező terhelésváltozást, és a rendszerek egymásnak kisegítést adnak. A rendszer-összeköttetések tényleges terhelése így

$$P_{tij} = P_{di} \pm Z_{ij} , \quad (2.1)$$

ahol P_{tij} az összeköttetés tényleges eredő terhelése az i -edik óra j -edik időpontjában, P_{di} hosszú időtartamú előre egyeztetett determinisztikus szállítás az i -edik órában, Z_{ij} a rendszer-együtműködésből származó véletlen jellegű eredő terhelés az i -edik óra j -edik időpontjában.

Ismerve a tervezett és tényleges terheléseket, a különbségként fellépő Z véletlen jellegű terhelés jelenti a műszaki és gazdasági okból szükségszerű vagy kölcsönösen előnyös szállításokat.

A továbbiakban ismertetjük a rendszer-együtműködésből eredő Z véletlen jellegű terhelés valószínűségelméleti alapon történő elemzésének módszerét és eredményét.

2.2.1. A VIZSGÁLAT MÓDSZERE

A valóságos jelenségek valószínűségi modellel kezelhetők meg.

A villamosenergia-rendszerek közötti teljesítményáramlást az időtartamgörbe jellemzi. Az időtartamfüggvényt azt fejezi ki, hogy valamely rögzített időhorizont mekkora hányadában volt a teljesítmény nagyobb egy meghatározott értéknél. Az időtartamfüggvény tehát egy eloszlást fejez ki, és segítségével megállapítható, hogy a vizsgált időszak milyen hányadában fordultak elő a különböző teljesítményértékek.

Ez a megfogalmazás lehetőséget is ad az időtartamgörbék közvetlen valószínűségelméleti interpretálására. Az időtartamfüggvényt a teljesítmény mint valószínűségi változó eloszlásfüggvényének transzformálásából fogjuk származtatni. Mielőtt ismertetjük a meghatározás lépcső-

it, elkészítjük azt a modellt, amely lehetővé teszi a jelenség eloszlásfüggvényekkel való jellemzését.

A valószínűségi számításban egy véletlen jelenség kiemelését elemi eseménynek nevezik. Egy-egy ilyen eseményhez különböző számértékek tartoznak, amelyek a jelenség újabb és újabb ismétlődése során, a véletlen események bekövetkezése szerint véletlenszerűen valósulnak meg. Az elemi eseményekhez ilymódon hozzárendelt számértékek egy függvényt alkotnak, amelyet valószínűségi változónak neveznek.

Esetünkben, a teljesítmény alakulását vizsgálva, az elemi események a különböző lehetséges teljesítményértékek, tehát a $(0, K)$ intervallum számai, ahol K egy olyan felső határ, amelynél a teljesítmény nem lehet nagyobb. A vizsgálat során célszerű a villamosenergia-import értékeit pozitívnak felvenni, a kialakult szokásoknak megfelelően. Valószínűségi változóként minden elemi eseményhez hozzárendeljük a mért értéket. Bennünket az így meghatározott valószínűségi változó eloszlásfüggvénye érdekel, mivel azt kell meghatározni, hogy a lehetséges teljesítményértékek milyen valószínűséggel esnek különböző értékek közé.

Az előzőekben megteremtettük azt a kapcsolatot, amely lehetővé teszi, hogy a teljesítményalakulás jellemzésére használt időtartamgörbét valószínűségelméleti alapon határozzuk meg, így a további statisztikai számításaink alapján mód nyílik arra, hogy a valóságos jelenséget elméleti alapon elemezzük.

Az eloszlásfüggvény meghatározása előtt megmutatjuk, hogyan lehet annak ismeretében az időtartamfüggvényt meghatározni.

A szokásnak megfelelően az időtartamfüggvényben relatív időtartamokkal dolgozunk, tehát a teljes vizsgálati időt 1-nek tekintjük.

Jelölje x azt a relatív időtartamot, amely megmutatja, hogy a tekintett idő milyen hányadában volt a terhelés nagyobb valamely adott Z teljesítményértékénél. A teljesítményt mint valószínűségi változót ξ -vel jelöljük. A megfelelő eloszlásfüggvényt $F(Z) = \Pr(\xi < Z)$ -vel jelöljük.

A fenti jelölések mellett teljesül az

$$x = \Pr(\xi \geq Z) = 1 - \Pr(\xi < Z) = 1 - F(Z) \quad (2.2)$$

egyenlőség, amelyből átrendezés után a $Z(x)$ időtartamgörbére a következő kifejezés adódik:

$$Z(x) = F^{-1}(1-x). \quad (2.3)$$

A kifejezésben F^{-1} az F eloszlásfüggvény inverzét jelöli.

Elméleti megfontolások, valamint a gyakorlati számítások arra utalnak, hogy az eloszlásfüggvények halmazából elegendő a Pearson-féle differenciálegyenletnek eleget tevő függvényeket vizsgálni [92-94] (lásd még Függelékét). Pearson-féle eloszlásúnak nevezzük azokat a valószínűségi változókat, amelyek y -nal jelölt sűrűségfüggvénye teljesíti a következő differenciálegyenletet:

$$\frac{y'}{y} = \frac{x + a}{b_2 x^2 + b_1 x + b_0}. \quad (2.4)$$

Az eloszlásfüggvények típusának meghatározása a Pearson-féle differenciálegyenlet együtthatóinak vizsgálatából adódik.

A differenciálegyenletben szereplő konstansok az első négy momentum segítségével kifejezhetők. A kapcsolat a következő egyenletrendszer segítségével írható le:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 2m_1 \\ -m_1 & 1 & 2m_1 & 3m_2 \\ -m_2 & 2m_1 & 3m_2 & 4m_3 \\ -m_3 & 3m_2 & 4m_3 & 5m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \\ -m_2 \\ -m_3 \\ -m_4 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

ahol m_1, m_2, m_3, m_4 az empirikus momentumok.

A feladat megoldása tehát abból áll, hogy

- kiszámítjuk az első négy momentumot,
- megoldjuk a (2.5) egyenletrendszert,
- a számított együtthatókkal meghatározzuk a differenciálegyenlet megoldását,
- a kapott eloszlásfüggvény transzformálásával kiszámítjuk az időtartamfüggvény értékét.

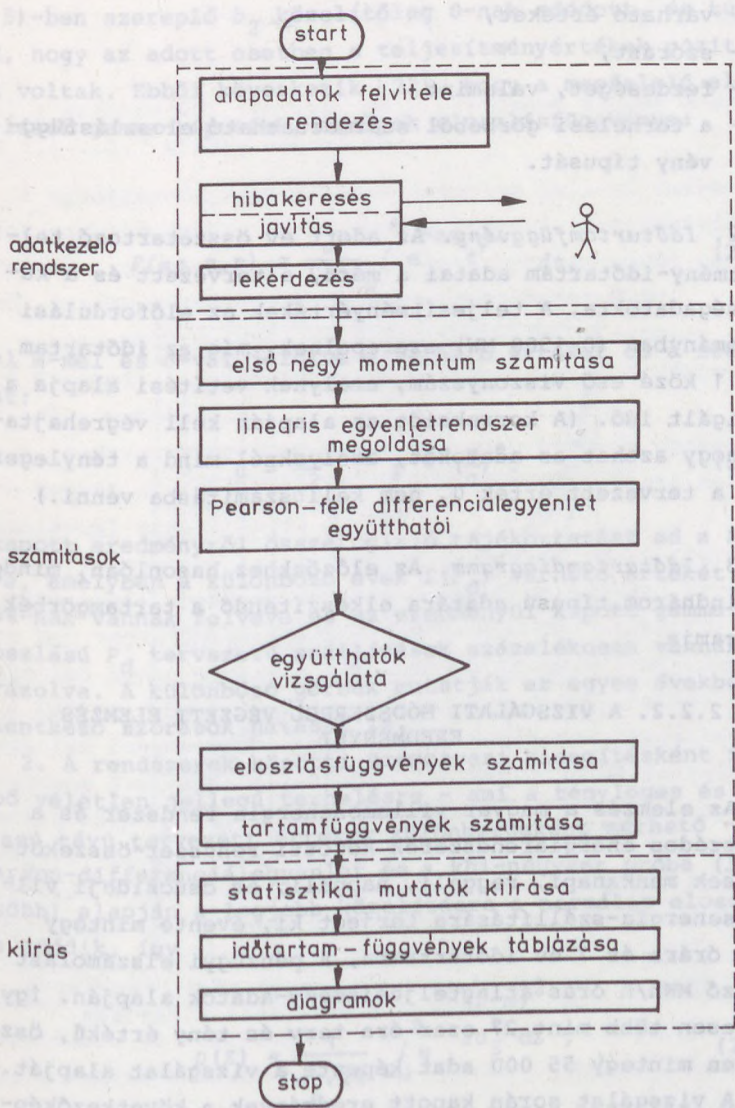
A nagy mennyiségű adat gyors feldolgozása, a fellépő bonyolult számítások hatékony végrehajtása számítógéppel lehetséges. A számítógépes program a következő fő részeket tartalmazhatja:

- adatelőkészítő rendszer (alapadatok, hibakeresés, lekérdezés),
- időtartamgörbék számítása (statisztikai mutatók, differenciálegyenlet együtthatói stb.),
- eredmények kiírása.

A vizsgálat folyamatát a 2.5. ábra mutatja be.

A számítógépi program "output"-jai:

1. *Statisztikai mutatók.* Minden évre az alapvető statisztikai jellemzők, melyek tartalmazzák az adott év ténylegesen mért, tervezett és különbségadataiból számított



2.5 ábra. Folyamatábra a rendszer-összeköttetések terhelésének időtartam-vizsgálatára Pearson-féle együtthatókkal

- várható értéket,
- szórást,
- ferdeséget, valamint
- a terhelési görbéből származtatható eloszlásfüggvény típusát.

2. *Időtartamfüggvény.* Az adott év összetartozó teljesítmény-időtartam adatai a mért, a tervezett és a különbségadatokra. A teljesítményértékek az előfordulási tartományban (0-1500 MW) szerepelnek, míg az időtartam 0 és 1 közé eső viszonyszám, amelynek vetítési alapja a korrigált idő. (A korrekciót az alapján kell végrehajtani, hogy azokat az adatokat, amelyeknél mind a tényleges, mind a tervezett érték 0, nem kell számításba venni.)

3. *Időtartamdiagramm.* Az előzőekhez hasonlóan, minden év mindhárom típusú adatára elkészítendő a tartamgörbék diagramja.

2.2.2. A VIZSGÁLATI MÓDSZERREL VÉGZETT ELEMZÉS EREDMÉNYEI

Az elemzés a magyar villamosenergia-rendszer és a szomszédos energiarendszerek közötti rendszer-összeköttetések munkanapi, reggeli, nappali, és csúcsideji villamosenergia-szállítására terjedt ki, évente mintegy 4000 órára és 7 év időtartamra, a pénzügyi elszámolást képező MWh/h órás átlagteljesítmény-adatok alapján. Így összesen több mint 27 ezer óra terv és tény értékű, összesen mintegy 55 000 adat képezte a vizsgálat alapját.

A vizsgálat során kapott eredmények a következőképpen foglalhatók össze:

1. A rendszerek közötti P_d determinisztikus tervszerű szállítás órás értékeinek egy-egy éves vizsgálatánál a

(2.5)-ben szereplő b_2 közelítőleg 0-nak adódott, és tudjuk, hogy az adott esetben a teljesítményértékek pozitívak voltak. Ebből következik [22], hogy a megfelelő eloszlások gamma-típusúak, amelyek eloszlásfüggvénye:

$$F(x; \alpha, p) = \frac{a^p}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x e^{-at} t^{p-1} dt, \quad (2.6)$$

ahol m -mel és σ -val jelölve a várható értéket és a szórást:

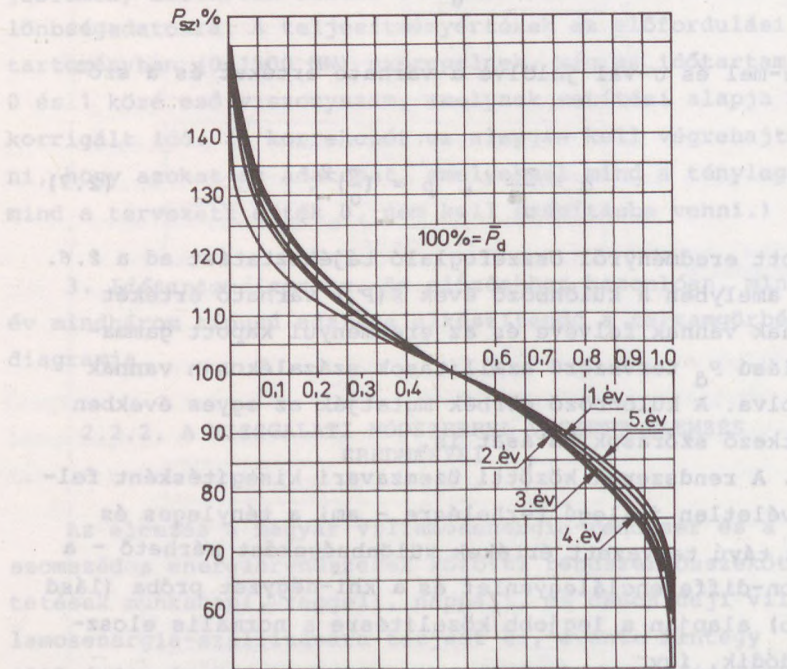
$$\alpha = \frac{m}{\sigma}, \quad p = \left(\frac{m}{\sigma}\right)^2. \quad (2.7)$$

A kapott eredményről összefoglaló tájékoztatást ad a 2.6. ábra, amelyben a különböző évek $E(P_d)$ várható értékét 100%-nak vannak felvéve és az eredményül kapott gamma-eloszlású P_d tervszerű szállítások százalékosan vannak ábrázolva. A különböző görbék mutatják az egyes években jelentkező szórások hatását is.

2. A rendszerek közötti üzemzavari kisegítésként felépítő véletlen jellegű terhelésre - ami a tényleges és hosszú távú tervezett értékek különbségeként mérhető - a Pearson-differenciálegyenlet és a khi-négyszet próba (lásd később) alapján a legjobb közelítésre a normális eloszlás adódik, így

$$D(Z) = \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(Z-m)^2}{2\sigma_Z^2}} dZ, \quad (2.8)$$

ahol Z a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű, tartós (órás átlagú) terhelése, σ_Z a véletlen jellegű terhelés szórása, m a terhelések várható értéke.



2.6. ábra. A determinisztikus, hosszú távú, tervszerű villamosenergia-szállítás eloszlása

Olyan kis rendszer esetén, mely legalább egy nagyságrénddel nagyobb rendszerrel (rendszeregyesüléssel) jár párhuzamosan, a véletlen jellegű terhelés szórása a kisebb rendszer P_1 terhelésével közelíthető [95]:

$$\sigma_Z = c \sqrt{P_1}, \quad (2.9)$$

ahol c arányossági tényező, mely pontosabb adatok hiányában 1,1...1,7 között vehető fel.

A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének várható értéke közel azonos erőművi tartalékteljesítménnyel tervezett és üzemeltetett rendszereknél zérus körül ingadozik a tényleges viszonyok között.

A különböző években az eloszlás abszolút számban eltérő értékeit a szóráshoz viszonyítva relatív értékben a 2.7. ábra mutatja.

A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésére kapott normális eloszlás a következő elméleti megfontolással indokolható.

A villamosenergia-rendszerek együttműködését reprezentáló rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelése két vagy több erőműrendszer nagyszámú, egymástól független gépegységeinek igénybevehető teljesítményének és a két vagy több energiarendszer nagyszámú, egymástól független fogyasztói terhelésének, tehát sok független komponens összegeződő hatására jön létre. A valószínűség-elmélet központi határelosztás-tétele szerint, ha egy vizsgált valószínűségi változó véletlen ingadozása sok egymástól független véletlen komponens eredménye, amely komponensek külön-külön kis mértékben hatnak, de hatásuk összegeződik, akkor a valószínűségi változó normális eloszlású [96]. Ezért a nagyszámú erőművi blokk esetében (legalábbis jó közelítéssel) jogosan feltételezhetjük, hogy a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű üzemi terhelése normális eloszlású.

3. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű, Z óras átlagú teljesítményszórásnak változását a rendszer terhelésének függvényében mutatjuk be, és pedig az első

... az ... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

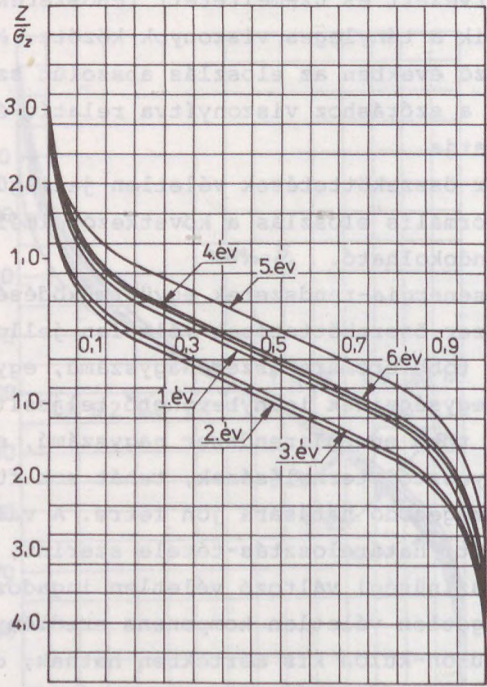
... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

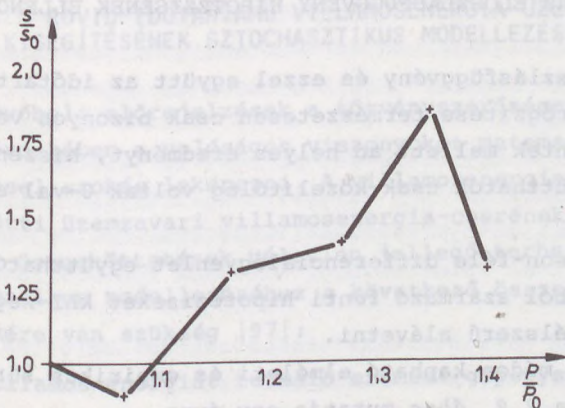
... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

... rendszer-összeköttetések véletlen jellegű ...

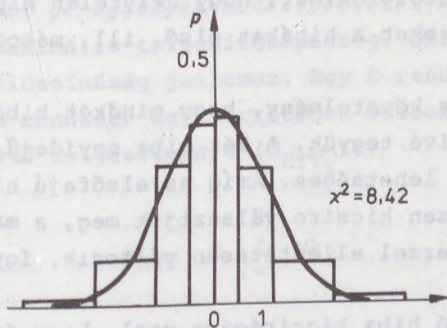


2.7. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű, órás átlagú terhelésének eloszlása

év értékének egységében kifejezve (2.8. ábra). Az eredményekből látható, hogy a Z órás átlagú véletlen terhelések szórása hullámzó a vizsgált időszakban. A tapasztalt jelenség több okra vezethető vissza, mint pl. nagyobb



2.8. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű, órás átlagú terhelésének szórása



2.9. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésére feltételezett normáloszlás khi-négyzet próbája

üzembizonytalanságú, új, nagy egységteljesítményű gép(ek) megjelenése, előnyös gazdasági feltételekkel történő vásárlás az együttműködő villamosenergia-rendszer más rendszereitől. Ilyen jellegű okokra mutat a 2.4. ábrán látható órás várható értékek változása is.

2.2.3. AZ ELOSZLÁSFÜGGVÉNY HIPOTÉZISÉNEK ELLENŐRZÉSE

Az eloszlásfüggvény és ezzel együtt az időtartamgörbék fenti rögzítése természetesen csak bizonyos valószínűségi szintek mellett ad helyes eredményt, hiszen megfelelő együtthatók csak közelítőleg voltak 0-val egyenlők.

A Pearson-féle differenciálegyenlet együtthatóinak vizsgálatából származó fenti hipotéziseket khi-négyzet próbának célszerű alávetni.

Az ily módon kapható elméleti és empirikus sűrűségfüggvény a 2.9. ábra mutatja egy évre.

Tudjuk azonban, hogy a hipotézisekről való döntés során kétféle hibát követhetünk el. Előfordulhat, hogy a hipotézis igaz, de döntési eljárásunk alapján elvetjük azt, másrészt előfordulhat, hogy helytelen hipotézist fogadunk el. Ezeket a hibákat első, ill. másodfajú hibának nevezzük.

Természetes követelmény, hogy mindkét hiba nagyságát lehetőleg kicsivé tegyük. A két hiba egyidejű csökkentése azonban nem lehetséges. Amíg az elsőfajú hiba nagyságát tetszőlegesen kicsire választjuk meg, a másodfajú hiba nagysága ezzel ellentétesen változik, így jelentős méretű lehet.

A másodfajú hiba kicsiségére utal, hogy fenti hipotéziseket az esetek többségében minden 80% feletti szinten el lehetett fogadni. Ami azt jelenti, hogy az általában alkalmazott 95%-os szinten természetesen megfelel a normális eloszlásra tett hipotézis. Megjegyezzük, hogy a vizsgált 7 év adatai közül csak egynél kellett a khi-négyzet próbával a matematikai statisztikai irodalomból ismert intervallumproblémával foglalkozni.

2.3. A RÖVID IDŐTARTAMÚ VILLAMOSENERGIA-ÜZEMZAVAR KISEGÍTÉSÉNEK SZTOCHASZTIKUS MODELLEZÉSE

A jövőbeli előrejelzések a törvényszerűségek megismerése érdekében a valóságos viszonyokat matematikai modellezéssel szokás leképezni. A villamosenergia-rendszerek közötti üzemzavari villamosenergia-cserének és így a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének sztochasztikus modellezéséhez a következő összetevők modellezésére van szükség |97|:

- villamos energiát termelő erőművi gépegyeségek,
- villamosenergia-fogyasztás,
- rendszer-összeköttetések,
- kiegészítő magatartás.

Az erőművi gépegyeségek modellezésénél minden egyes egységet a maximális teljesítőképesség, önfogyasztás és a kiesési valószínűség jellemez. Egy k rendszer (pl. ország) vagy a rendszer egy körzetének összes erőművi igénybe vehető teljesítménye (P_{EIT_k}):

$$P_{EIT} = \sum_{i=1}^{n_k} \gamma_{ki}, \quad (2.10)$$

ahol n_k a k -adik rendszerben a gépegyeségek száma; γ_{ki} a k -adik rendszer i -edik erőművi gépegyeségnek igénybe vehető teljesítőképességét kifejező valószínűségi változó. A γ_{ki} véletlen valószínűségi változókat függetlennek tekintjük. Értéke

$$\gamma_{ki} = \begin{cases} 0, & p_{ki} \text{ valószínűséggel,} \\ p_{ki}, & (1 - p_{ki}) \text{ valószínűséggel.} \end{cases}$$

Ebben P_{ki} a k -adik rendszer i -edik erőművi gépegységének önfogyasztással csökkentett maximális teljesítőképessége; p_{ki} a k -adik rendszer i -edik erőművi gépegységének kiesési valószínűsége.

Az egy pontra összevont erőművi teljesítmény rendelkezésre állásának P_{EIT} valószínűségeloszlása diszkrét eloszlás, amelyet hisztogrammal közelíthetünk, és amelyet a γ_{ki} véletlen valószínűségi változók konvolúciójával számítunk.

A gépek karbantartási ütemezését célszerű időszakonként szimulálni. A karbantartás szimulációjánál véletlenszerűen vesszük ki a gépeket a rendszerekből addig, amíg a kivett gépek összegezett teljesítménye a szükséges karbantartással egy előre meghatározott MW értéket el nem ér.

A fogyasztói terhelések modellje a fogyasztói igények napi változását P_F véletlen változóként írja le az egyes részrendszerekben. A fogyasztói terhelés az előrebecsült napi terhelési görbékkel vehető figyelembe. A modellben különböző terhelési görbék alkalmazandók évszakonként és naptípusonként (első munkanap, munkanap, szombat, vasárnap). A δ_{kt} valószínűségi változó írja le a napi terhelési görbe t -edik időpontjához tartozó fogyasztói igényt, amelyet célszerű normál eloszlásúnak tekinteni. Adott időpontra a fogyasztói igény várható értéke és szórása állandónak tekinthető a következők szerint:

D_{kt} a δ_{kt} várható értéke a nap t -edik időpontjában, MW-ban kifejezve megegyezik a k -adik rendszer napi terhelési görbéjének értékével a t -edik időpontban;

σ_{kt} a δ_{kt} szórása.

A maximális szórást a csúcsterheléshez képest százalékosan célszerű felvenni. A napi terhelési görbe egyes intervallumaiban a szórás a terhelés és csúcsterhelés

hányadosának négyzetgyöke szerint csökken, így fejezve ki, hogy a terhelés csökkenésével a szórás is csökken.

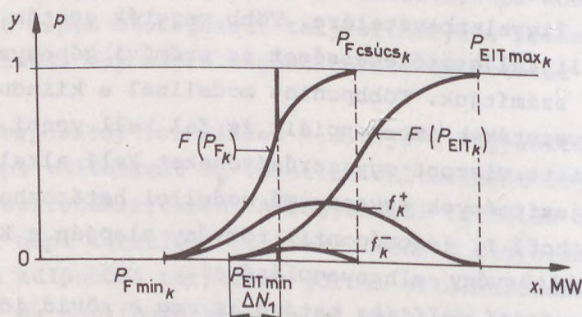
Ha hosszútávú egyezményben rögzített villamosenergia-szállítások is vannak, akkor ez az előzőekben hasonlóan modellezhető és algebrailag összegezendő a fogyasztással.

A hálózati modell - mivel egy rendszer vagy rendszer-rész erőművei egy pontba vannak összevona - az egyes rendszerek közötti rendszer-összeköttetésekre terjed ki. Jellemző adatként két pontos modellnél a maximális átviteli teljesítőképességet és a kiesési valószínűséget kell felvenni. Ezek az adatok alkalmasak a rendszer-összeköttetésekre bekövetkező nem várt kiesések és átviteli korlátozások figyelembevételére. Több vezeték esetén az eredő átviteli teljesítőképességet az erőművi gépegységekhez hasonlóan számítjuk. Többpontos modellnél a kiinduló adatokhoz a vezetékek impedenciáit is fel kell venni. Bonyolultság miatt viszont egyszerűsítéseket kell alkalmazni, pl. a teljesítmények egyenáramú modellel határozhatók meg a Kirchoff I. (csomóponti) törvény alapján a Kirchoff II. (hurok)törvény elhanyagolásával.

A kisegítési politika határozza meg a rövid idejű villamosenergia-csere módját, vagyis az egyes rendszerekben az üzemzavarok esetén kérhető energiavásárlás módját. A kisegítésnél alapelv, hogy a rendszerreszek egymásnak legfeljebb annyi segítséget adnak, amennyi kihasználatlan tartalékuk van, tehát a másik rendszer teljesítőképesség-hiánya nem okozhat fogyasztói korlátozást a kisegítést adó rendszerben. A gazdaságos energiacsere modellezése további fejlesztő munkát igényel.

A továbbiakban a hiány-többlet sűrűségfüggvényt kell meghatározni. Ehhez össze kell vetni a k -adik rendszerben rendelkezésre álló erőművi teljesítőképességet a fogyasztói igényekkel. Az erőművek igénybevehető összteljesítményének valószínűségi változóját (P_{EIT}) és a villamosener-

gia-fogyasztás valószínűségi változóját (P_F), a nagyszámú gépegyesek, ill. a nagyszámú fogyasztó független üzemviszonyai miatt, független valószínűségi változónak tekintjük. A változók eloszlásfüggvényét a 2.10. ábra mutatja úgy, hogy a terhelési görbéknél használatos egy éves időtartamot 1-nek vettük fel és a valószínűségszámításnál elfogadott szokáshoz alkalmazkodva elforgattuk a tengelyeket. Az erőművi igénybe vehető teljesítményt is ennek megfelelően mutatja az ábra.



2.10. ábra. A villamosenergia-fogyasztásnak és nagyszámú gépegyesből álló erőműrendszer igénybe vehető teljesítőképességének valószínűségeloszlásfüggvénye, valamint hiány-többlet valószínűsége

A villamosenergia-rendszerek együttműködése a fogyasztók folyamatos ellátása érdekében akkor jut szerephez, ha egy adott villamosenergia-rendszerben - a gazdaságilag és társadalmilag elvárható erőművi tartalék tervezése és megépítése ellenére - a fogyasztói terhelés nagyobb, mint az éppen igénybe vehető erőművi teljesítmény. Pl. a k -adik rendszerben fellépő N_1 teljesítményhiány valószínűsége:

$$\Pr(\xi = \Delta N_1) = F(P_{\text{EIT}_k}) [1 - F(P_{F_k})] \quad (2.11)$$

A k -adik rendszerben az igénybe vehető erőművi összteljesítmény és az eredő fogyasztói igény valószínűségi változói különbségének $f_k^-(\Delta N)$ sűrűségfüggvénye a következő konvolúciós integrállal számítható:

$$f_k^-(\Delta N) = \int_0^{h_k^{\max}} h_k(y - \Delta N) g_k(\Delta N) dy, \quad (2.12)$$

ahol h_k a k -adik rendszer P_{F_k} fogyasztásának sűrűségfüggvénye; g_k a k -adik rendszer P_{EIT_k} igénybe vehető erőművi teljesítményének sűrűségfüggvénye. Értelemszerűen így határozható meg az $f^+(\Delta N)$ többlet-sűrűségfüggvény is.

Az üzemzavari kisegítés modellezésének, tehát a "bajban lévő" rendszerben a fogyasztói korlátozás elkerülésének kiinduló alapja, hogy a rendszeregyesülésben van olyan másik villamosenergia-rendszer, amelyben éppen van erőművi többletteljesítmény. Ebben az esetben a rendszerösszeköttetésben véletlen jellegű teljesítményáramlás révén a teljesítményhiányos rendszerben a fogyasztók ellátása folyamatos marad.

A rendszerösszeköttetésekén áramló teljesítmény sűrűségfüggvénye aszerint számítható, hogy az együttműködő rendszerek hogyan, milyen mértékben adnak egymásnak kisegítést. Ha feltételezzük, hogy a kisegítő rendszer saját kárára nem ad üzemzavari kisegítést, akkor a rendelkezésre álló teljesítmény függvényében egészben vagy részlegesen kerül sor kisegítésre. Ez alapján a rendszerösszeköttetés véletlen jellegű Z terhelése és az üzemzavari csereteljesítmény $f(Z)$ sűrűségfüggvénye meghatározható. A sűrűségfüggvény kiszámításánál figyelembe kell

venni azt, hogy a másik rendszer éppen tud-e adni kiségitést. Ezért két részből tevődik össze az is, hogy az egyik rendszer kap-e kiségitést. Így pl. az 1-es rendszer vételezése a 2-estől a következőképpen adódik.

a) eset: Az 1-es rendszer a ΔP_1 teljesítményhiányát, amelynek valószínűsége a hiány-sűrűségfüggvényből $f_1^-(\Delta P_1)$, korlátozás nélkül megkapja a 2-es rendszerből, tehát $\Delta P_2 \geq |\Delta P_1|$. Ez esetben a teljesítményhiány egyenlő a rendszer-összeköttetés terhelésével, tehát $\Delta P_1 = Z$. Annak a valószínűsége, hogy a 2-es rendszerben ΔP_1 vagy annál nagyobb teljesítmény áll rendelkezésre $1 - F_2^+(\Delta P_1)$, ahol F_2^+ a 2-es rendszer többlet-eloszlásfüggvénye. A 2-es rendszerből így a kiségités valószínűsége:

$$f'_{21} = f_1^-(\Delta P_1) [1 - F_2^+(\Delta P_1)]. \quad (2.13)$$

b) eset: Az 1-es rendszer ΔP_1 teljesítményhiányát a 2-es rendszer csak részben tudja pótolni, mert nincs annyi felesleges teljesítménye, azaz $\Delta P_2 < \Delta P_1$. Ez esetben nyilván $\Delta P_2 = Z$ és $Z < \Delta P_1$. Annak valószínűsége, hogy a 2-es rendszer ΔP_2 teljesítménykiségitést tud adni $f_2^+(\Delta P_2)$, és hogy az 1-es rendszernek Z vagy annál kisebb teljesítményhiánya van $F_1^-(\Delta P_2)$, ahol F_1^- az 1-es rendszer hiány-eloszlásfüggvénye. Az 1-es rendszer ez esetben a 2-esből

$$f''_{21} = f_2^+(\Delta P_2) F_1^-(\Delta P_2) \quad (2.14)$$

valószínűséggel kap kiségitést a fogyasztói korlátozás elkerüléséhez.

A rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelése az 1-es rendszer irányába a két szállítás összege:

$$f_{21} = f'_{21} + f''_{21}.$$

Hasonló megfontolással meghatározhatók a fordított irányú kisegítésekből adódó terhelések is, és mindezek adják az üzemzavari kisegítés sűrűségfüggvényét, ill. hisztogramját:

$$f(Z) = f_{21} + f_{12}. \quad (2.15)$$

A bemutatottakból látható, hogy az üzemzavari kisegítésnek, azaz a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelésének sztochasztikus modellezése megvalósítható.

2.4. A SZÁMÍTÓGÉPES SZTOCHASZTIKUS MODELL HITELESÍTÉSE

A következőkben bemutatásra kerül, hogy egy év tényleges adataival hogyan hitelesíthető az előző pontban leírt és a Villamosenergia Kutató Intézetben kidolgozott kétpontos számítógépes sztochasztikus modell. A számítások a magyar és a vele párhuzamosan járó Villamosenergia Rendszer Egyesülés egy teljes év mintegy 4000 órájú nagyterhelésű időszakára kerültek elvégzésre.

A számítógépes vizsgálatnál arra kell törekednünk, hogy a lehető legpontosabban közelítsük meg azokat a felteteleket, amelyek mellett a mérések feldolgozása megtörtént, és a modellel a valósággal minél jobban egyező eredményt kapjunk. A számításnál a párhuzamosan járó villamosenergia-rendszert két részre bontjuk, a magyar energiarendszerre és a többi részre. Mivel csak a véletlen

jellegű szállításokat keressük, foglalkoznunk kell a nagymértékű tervszerű import pontos figyelembevételével. Legegyszerűbb és legpontosabb az a módszer, amely szerint az előbb meghatározott két rendszer közötti eredő export-import hisztogramot határozzuk meg, és erről számítással választjuk le a tervszerű részt. A gyakorlatban, távlati tervezési szinten, a magyar energiarendszer fogyasztói igényét önkényesen szétválasztják saját erőművekből ellátandó és importból ellátandó részre. Ez a szétválasztás jó lehet teljesítőképesség-tervezési szinten, de olyan egyszerűsítéseket tétel fel, amelyek a hitelesítés szempontjából nem megengedhetőek. A rendelkezésre álló adatok szerencsére lehetővé teszik az előbbi eljárás követését és a tervszerű rész pontos leválasztását.

A vizsgálat terjedelme. A vizsgálatot a tényszámok alapján végezzük el egy egész évre vonatkozóan, a munkanapok legnagyobb fogyasztású 16 órájára, a szombatokat és ünnepet megelőző napokat nem tekintetve munkanapnak. Így összhang van a mért adatok előbbieken közölt feldolgozási módjaival.

A fogyasztói igények figyelembevétele. Az évet hat időszakra bontjuk a sztochasztikus modell miatt:

január	1 - február	15.,
február	16 - április	30.,
május	1 - augusztus	31.,
szeptember	1 - október	31.,
november	1 - november	30.,
december	1 - december	31.

Az egyes időszakok 32, 54, 88, 44, 21 és 22 munkanapból állnak. Az egyes időszakokat egy-egy heti átlagos fogyasztói menetrend képviseli (5 munkanap). A heti fogyasztói csúcs megegyezik az időszak heti csúcsainak át-

lagával. A fogyasztói menetrend 16 órából áll, egy-egy órán belül a fogyasztást állandónak tekinthetjük.

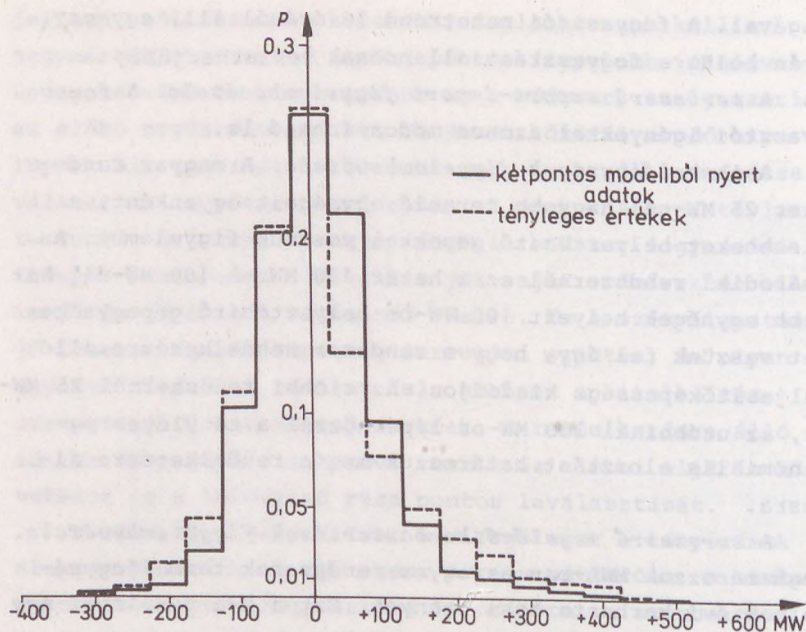
A tervszerű export-import figyelembevétele. A fogyasztói igényekkel azonos módon írható le.

A termelőegységek figyelembevétele. A magyar rendszer 25 MW-nál nagyobb termelő egységeit egyenként, a kisebbeket helyettesítő gépekkel vesszük figyelembe. A "második" rendszernél ez a határ 100 MW. A 100 MW-nál kisebb egységek helyett 100 MW-os helyettesítő gépegységet veszünk fel úgy, hogy a rendszer rendelkezésre álló teljesítőképessége kiadódjon. Az előbbi rendszernél 25 MW-os, az utóbbinál 100 MW-os lépésközzel a tényleges polinomiális elosztást határozzuk meg a rendelkezésre állásra.

A tervszerű megelőző karbantartások figyelembevétele. Meghatározzuk MWh-ban az egyes rendszerek termelőegységeinek évi karbantartási igényét. Ezt a MWh területet úgy osztjuk el az év hat időszaka között, hogy az egyes energiarendszerek tartaléka az év folyamán lehetőleg állandó legyen. Erre konkrét adat nem lehet, de joggal feltételezhető, hogy a valóságban is így dolgoznak. A számítás eredménye hat MW-érték. A számítógépes program ezeket az értékeket közelíti meg úgy, hogy kisorsol gépeket, amelyeket ténylegesen kivesz az egyes rendszerekből.

A tényleges viszonyok rekonstruálásának eredményei. A számítás eredménye egy 50 MW lépcsőszélességű csereteljesítmény-hisztogram, amely relatív egységben adja meg az egyes csereteljesítmény-értékek előfordulásának gyakoriságát.

Ki kell emelni, hogy mindkét rendszer egyenlő pontossággal és részletességgel van leírva a számításokban, tehát nem a részletesen jellemzett magyar rendszer áll szemben egy durván megközelített valamivel (pl.: végtelen gyűjtősin) vagy közelítően leképzett nagy rendszerrel.



2.11. ábra. A tényleges viszonyok összehasonlítása a sztochasztikus modellel kapott eredményekkel

2.2. táblázat. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelése tényleges és számítással kapott adatainak összehasonlítása

	Matematikai- statisztikai számítással	Számítógépes modellezéssel
Rendszer-összeköttetések tartós véletlen terhelésének		
szórása, MW	115,4	97,5
várható értéke, MW	11,4	9,8
A kisebb rendszer gépeinek		
szórása, MW	-	126
biztonsági szintje (fogyasztási csúcs ellátásának valószínűsége), %	-	76

A modell hitelesítésének egyik legnagyobb eredménye és újszerűsége éppen ez.

A modellezéssel nyert adatokból és a tényleges mért értékekből készített hisztogramokat a 2.11. ábra mutatja be. Látható, hogy modellezés jó közelítéssel reprodukálja a tényleges viszonyokat és segítségével gyakorlatilag megbízható eredményt adó vizsgálatok végezhetőek. A számítógépes reprodukálásból kapott értékek a 2.2. táblázatban láthatóak.

A rendszer-összeköttetések terhelésének matematikai-statisztikai számítással kapott szórása indokolt, hogy nagyobb legyen, mint a számítógépes modellezéssel kapott szórásérték, mert a modellel csak az üzemzavar-kisegítés célú szállítás képezhető le, míg a tényleges viszonyok között különböző okokból (pl. tartós gépkiesés) gazdaságos, marginális cserék is vannak. A szerző ismerete szerint ez az első vizsgálat, amely információt ad a szállítások műszaki és gazdasági tartamának mennyiségére. A továbbiakban a modellel természetesen csak a műszaki részt lehet figyelembe venni azzal, hogy a gazdasági szempontok motiválják az eredményeket. Természetesnek látszó másik szempontra is érdemes felhívni a figyelmet: a modellezéssel esetenként több információt is kaphatunk (pl. biztonsági szint, géppark szórása), mint a rendszer-összeköttetések terheléseinek matematikai-statisztikai ellenőrzésével.

2.5. ÜZEMZAVARI KISEGÍTÉSEK ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATAI

A rendszer-összeköttetések véletlen terhelése sok paramétertől függ (terhelés eltérése az előirányzottól, gépek rendelkezésre állásának paraméterei, összeköttetés átviteli képességének határa, tartalékteljesítmény, a

vásárolt és termelt villamos energia ára stb.). A műszaki jellegű tényezők nagy részét a valóságot jó megközelítő módon az előzőekben leírtak szerint lehet leképezni. A viszonyok azonban állandóan változnak, ezért indokolt megvizsgálni néhány paraméter hatását a véletlen terhelésekre.

A sok lehetséges paraméter közül különösen érdemes megvizsgálni az erőművi tartalékteljesítmény változásának és a rendszerek természetes növekedésének hatását a tartós véletlen terhelésekre. A vizsgálatokat az előző pontokban ismertetett tényleges viszonyokra hangolt számítógép-programmal, ill. adatokkal végeztük el a kétpontos modellel leképzett rendszerekre.

2.5.1. AZ ERŐMŰVI TARTALÉKTELJESÍTMÉNY VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA

Amint láttuk, a rendszer-összeköttetések véletlen terhelései, az üzemzavar-kisegítés függ az összekapcsolt rendszerek hiány-többlet teljesítőképességétől, ami viszont a rendszerek rendelkezésére álló erőművi teljesítőképesség függvénye. Egy-egy rendszerben leginkább a tartalékteljesítmény növelésével, ill. csökkentésével módosítható a rendelkezésre álló teljesítőképesség. A továbbiakban ezért megvizsgáljuk, hogy ez a minőségi változás mit jelent a rendszer-összeköttetések üzemzavar-kisegítésére, mint a tartós véletlen terhelés legnagyobb összetevőjére.

A tartalékteljesítmény változásának hatását úgy célszerű megvizsgálni, hogy a gyakorlatban előforduló eseteket képezzük le. Így a 4000 MW-os kisebbik rendszerben 1 db 200 MW-os blokk, az 50000 MW-os nagy rendszerben pedig 10 db 200 MW-os blokk hiányát vagy többletét vesszük fel. A teljesítményváltozást az egész évre vonatkoztat-

juk, január 1-december 31-ig. Feltételezzük továbbá, hogy nem egy beruházási késésről van szó, hanem egy tartós elhatározás eredményeképpen hiányzó (vagy többlet) blokkról.

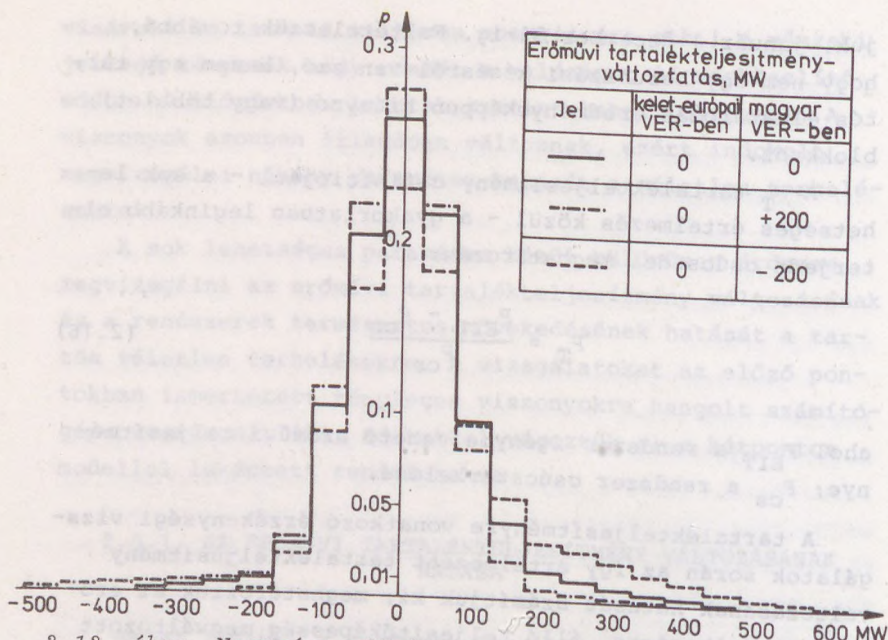
A P_T tartalékteljesítmény definíciójául - a sok lehetséges értelmezés közül - a gyakorlatban leginkább elterjedt csúcsidei meghatározás:

$$P_T = \frac{P_{EIT} - P_{CS}}{P_{CS}}, \quad (2.16)$$

ahol P_{EIT} a rendszer igénybe vehető erőművi teljesítménye; P_{CS} a rendszer csúcsterhelése.

A tartalékteljesítményre vonatkozó érzékenységi vizsgálatok során az így értelmezett tartalékteljesítmény változásának hatását számítjuk ki; meghatározzuk az erőművi rendelkezésre álló teljesítőképesség megváltozott hisztogramját, az év mintegy 4000 nagyterhelésű órájára hangolt program segítségével a két rendszer között a Z tartós véletlen terhelés (üzemzavari kiegészítés) hisztogramját, valamint a tartós véletlen terhelés legfontosabb valószínűségelméleti jellemzőit: a σ_Z szórást és az $E(Z)$ várható értéket.

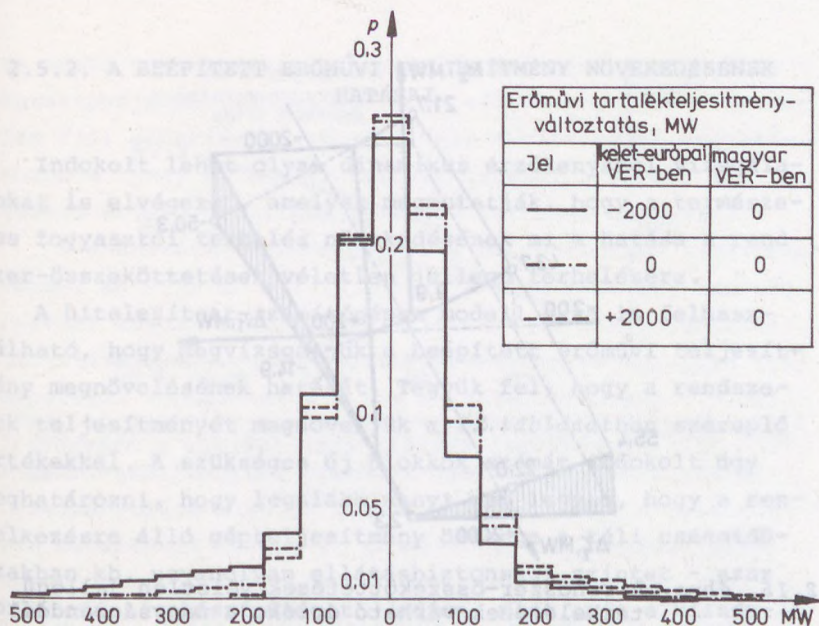
A tartalékteljesítmény változásainak hatását a rendszer-összeköttetés terhelésének hisztogramjára a 2.12. és 2.13. ábra mutatja be. Megállapítható a hisztogramokból, hogy a gyakorlatban kialakult erőművi tartalékteljesítmények esetén kapott normális sűrűségfüggvény változtatásának hatására aszimmetrikussá válik. Az elvégzett khipnégyzet próba alapján nem fogadhatók el ezek a módosított hisztogramok normális eloszlású sűrűségfüggvényeknek. Felvetődik az a gondolat, de ez még további vizsgálatra szorul, hogy a rendszer-összeköttetések véletlen terheléseinek szimmetriájából ellenőrizni lehet a rendszerek



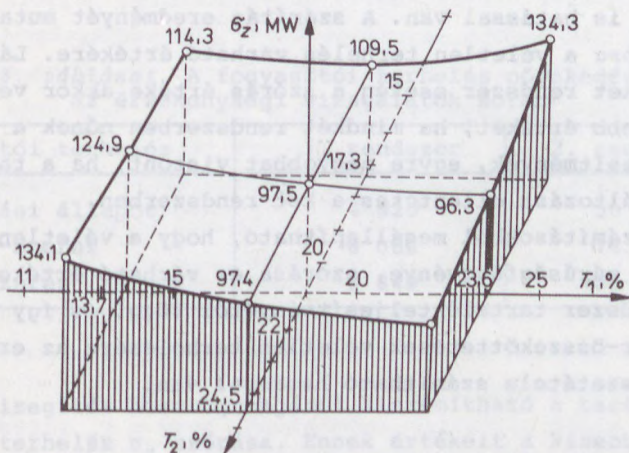
2.12. ábra. Nagyságrenddel kisebb rendszerben az erőművi tartalék változásának hatása a rendszerösszeköttetések üzemzavari, véletlen jellegű terhelésének valószínűségére

tartalékteljesítmény-tervezésének helyességét, vagy tovább menve, gazdasági megfontolásokat lehet tenni a nagyobb kisegítések vásárlására és a tartalékteljesítmény beruházási szükségletére.

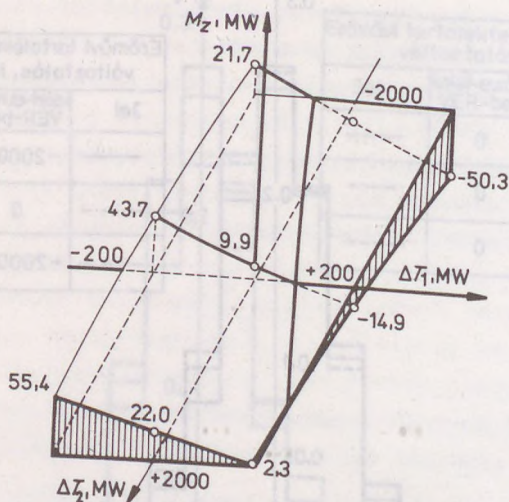
A kis rendszer tartalékteljesítmény-változásának hatását a tartós véletlen terhelést reprezentáló üzemzavari kisegítés szórására a 2.14. ábra mutatja be. Megállapítható, hogy a teljesítménytartalék csökkenésével nő a kisegítés szórása, növelésével pedig csökken. A kisebb erőművi gépparknak általában - és az adott esetben is - kisebb a szórása. Mindebből következik, hogy a véletlen terhelés szórása - legalábbis a vizsgált tartományban - fordított arányban van a géppark szórásával egy adott másik rendszerrel való együttműködésnél.



2.13. ábra. A nagyságrenddel nagyobb rendszer erőművi tartaléka változásának hatása a rendszerösszeköttetések véletlen jellegű terhelésének valószínűségére



2.14. ábra. A nagyságrenddel kisebb rendszerben a tartalékteljesítmény változásának hatása a rendszerösszeköttetések üzemzavari terhelésének szórására



2.15. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének várható értéke a nagyságrenddel különböző kis és nagy rendszer tartalékteljesítményének változása következtében

A tartalékteljesítmény változása azonban a várható értékre is hatással van. A számítás eredményét mutatja a 2.15. ábra a véletlen terhelés várható értékére. Látható, hogy a két rendszer esetén a szórás értéke akkor vesz fel kisebb értéket, ha mindkét rendszerben nőnek a tartalékteljesítmények, egyre nagyobbat viszont, ha a tartalékok változása ellentétes a két rendszerben.

A számításokból megállapítható, hogy a véletlen terhelések sűrűségfüggvénye, szórása és várható értéke mindkét rendszer tartalékteljesítményétől függ, és így a rendszer-összeköttetések véletlen terhelésére az erőmű-park összetétele számítható hatással van.

2.5.2. A BEÉPÍTETT ERŐMŰVI TELJESÍTMÉNY NÖVEKEDÉSÉNEK HATÁSAI

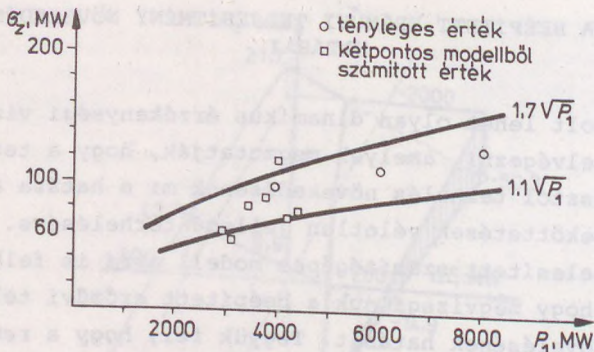
Indokolt lehet olyan dinamikus érzékenységi vizsgálatokat is elvégezni, amelyek megmutatják, hogy a természetes fogyasztói terhelés növekedésének mi a hatása a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésére.

A hitelesített számítógépes modell arra is felhasználható, hogy megvizsgáljuk a beépített erőművi teljesítmény megnövelésének hatását. Tegyük fel, hogy a rendszerek teljesítményét megnöveljük a 2.3. táblázatban szereplő értékekkel. A szükséges új blokkok számát indokolt úgy meghatározni, hogy legalább annyi gép legyen, hogy a rendelkezésre álló gépteljesítmény összege a téli csúcsideszakban kb. ugyanolyan ellátásbiztonsági szintet - azaz korlátozási valószínűséget - adjon, mint amit a kiindulási évben az empirikus adatokból kapunk. Ezekkel a rendszerteljesítményekkel megvizsgáljuk a rendszer-összeköttetés véletlen terheléseinek üzemzavar-kisegítési összetevőjét a korábban leírt és behangolt számítógépprogrammal.

2.3. táblázat. A fogyasztói terhelés növekedése az érzékenységi vizsgálatok során

Fogyasztói terhelés	1. rendszer	2. rendszer
Kiindulási állapot	4 020	50 270
kb. 1,5-szeres	6 080	76 164
kb. 2-szeres	8 040	100 500

A kisegítés hisztogramjából kiszámítható a tartós véletlen terhelés σ_2 szórása. Ennek értékeit a kisebbik rendszer terhelésének függvényében a 2.16. ábrán látható-



2.16. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű üzemzavari terhelésének szórása a nagyságrenddel kisebb rendszer teljesítménye függvényében

ak. Az ábra bemutatja a tényleges értékeket is, valamint a rendszer-összeköttetések szabályozatlan teljesítménylengése tulajdonságánál tapasztalt gyökös összefüggés miatt a $(1,1-1,7)\sqrt{P_1}$ görbét tájékoztatóként, iránymutatóként. Megállapítható, hogy a 4 000-10 000 MW-os kisebb rendszer esetén, amely nagyságrenddel nagyobb rendszerrel jár együtt, az $(1,1-1,7)\sqrt{P_1}$ jó tájékoztatót ad a tartós véletlen terhelés szórásaira, ahol P_1 a kisebbik rendszer terhelése MW-ban.

2.5.3. A MAXIMÁLIS VÉLETLEN TERHELÉS ÉS A TARTALÉKTELJESÍTMÉNY KAPCSOLATA

A hitelesített modellel végzett számítások lehetővé teszik, hogy megvizsgáljuk a Z üzemzavari véletlen terhelés maximális értékeinek érzékenységét az erőművi tartalékteljesítmény függvényében.

Az előző alponthoz bemutatottuk, hogy a P_T tartalékteljesítmény függvényében hogyan változik a kisegítés hisztogramja. A hisztogramokból megállapítható a vett és

az adott tartós véletlen terhelés üzemzavari kiségités összetevőjének valószínűsége. E célból képeztük a terhelés $F(Z)$ eloszlásfüggvényét, mely segítségével meghatározható, hogy különböző valószínűségnél nagyobb, ill. kisebb értékéhez milyen véletlen terhelés tartozik.

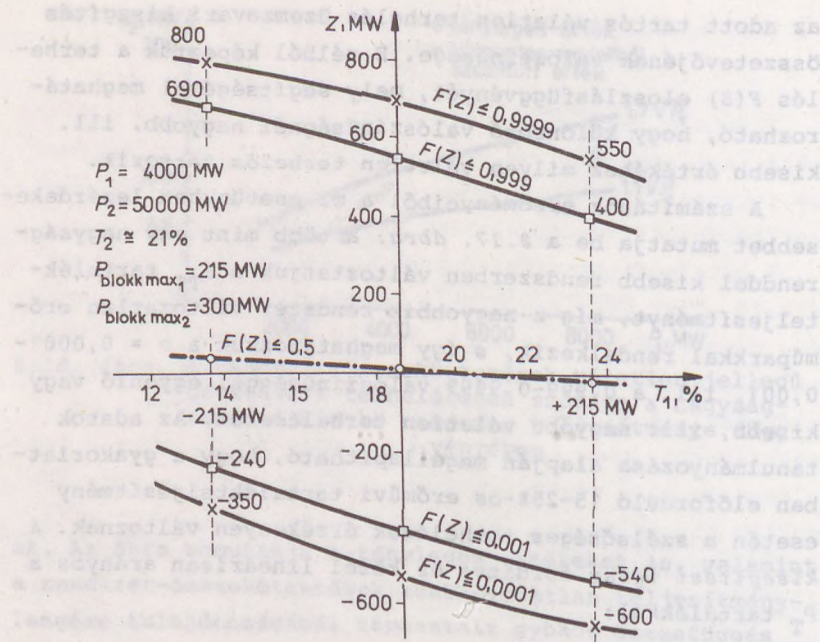
A számítások eredményeiből a mi esetünkben legérdekesebbet mutatja be a 2.17. ábra: a több mint egy nagyságrenddel kisebb rendszerben változtatjuk a P_{T1} tartalékteljesítményt, míg a nagyobbik rendszer változatlan erőműparkkal rendelkezik, s így meghatározzuk a $p = 0,0001-0,001$, ill. a $0,999-0,9999$ valószínűséggel egyenlő vagy kisebb, ill. nagyobb véletlen terheléseket. Az adatok tanulmányozása alapján megállapítható, hogy a gyakorlatban előforduló 15-25%-os erőművi tartalékteljesítmény esetén a szélsőséges terhelések érzékenyen változnak. A kiségitési igény fordítva és közel lineárisan arányos a P_T tartalékkal:

$$Z_{\max} = k \frac{1}{P_T} \quad (2.17)$$

A kiségitésadás pedig közel egyenesen aránylik a tartalék növelésével.

A következő pontban a maximális terhelés becslésénél a terhelések szórását fogjuk segítségül venni. Ezért megvizsgáljuk a szórás érzékenységet a tartalékteljesítmény változásának hatására az előbbieken ismertetett adatok alapján. Az eredményt a 2.18. ábrán mutatjuk be. A c tényező definíciója:

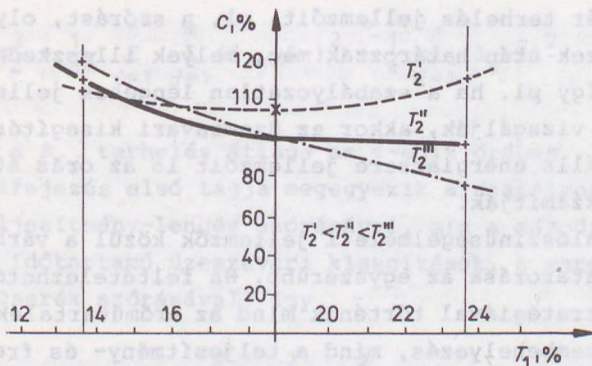
$$c = \frac{\sigma_T}{\sigma_b} \cdot 100, \quad (2.18)$$



2.17. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelése maximumának valószínűségeloszlása a kisebb rendszer erőművi tartalékának függvényében

ahol σ_T a különböző tartalékteljesítmény esetén fellépő véletlen terhelések szórása MW-ban; σ_b a tényleges viszonyok rekonstrukciója során bázisként felvett szórás MW-ban.

A számítás eredményeképpen látható, hogy a szórás értéke $(0,8-1,2)\sigma_b$ -re adódik a vizsgált esetekben. Ezért egy 1,2 nagyságrendű biztonsági tényező megfontolható az általános esettől eltérő tartalékviszonyok esetében.



2.18. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen terhelése szórásának érzékenysége az erőművi tartalék-teljesítményre

2.6. A RENDSZER-ÖSSZEKÖTTETÉSEK EREDŐ VÉLETLEN JELLEGŰ TERHELÉSE NAGY SZÁMÚ ERŐMŰVI BLOKK ESETÉN

A 2.1. pontban ismertetésre került, hogy a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelése

1. néhány óra (nap) időtartamú üzemzavar-kisegítés célú, gazdasági alapon létrejövő, valamint
2. másodperces-perces időtartamú műszaki okokból megvalósuló

szabályozatlan teljesítménylengések, ill. szabályozott kisegítések eredőjeként valósul meg. A rendszerek együttműködésének biztonságát a véletlen terhelések eredőjeként fellépő nagy teljesítményértékek veszélyeztetik az esetleges rendszerbontás veszélye és következménye miatt. A biztonságos rendszeregységműködés-tervezés érdekében meghatározzuk az eredő terhelés jellemzőit valószínűségelméleti alapon.

A két különböző okból, véletlen jelleggel létrejövő terhelés eredőjeként meghatározásánál feltételezzük,

hogy a két terhelés jellemzőit, pl. a szórást, olyan átlagképzések után határozzák meg, melyek illeszkednek egymáshoz. Így pl. ha a szabályozatlan lengések jellemzőit óránként vizsgálják, akkor az üzemzavari kiségités, ill. a marginális energiacsere jellemzőit is az órás átlagok alapján számítják.

A valószínűségelméleti jellemzők közül a várható érték meghatározása az egyszerűbb. Ha feltételezhető, hogy azonos stratégiával történik mind az erőműtartalék-tervezés és üzembehelyezés, mind a teljesítmény- és frekvenciaszabályozás, akkor csak a hosszú távú tervezéshez képest bekövetkezett változást kell figyelembe venni (pl. ha az erőműépítésben bekövetkezett eltérés hatására villamosenergia-vásárlás vagy-eladás történik). Ha ez nincs, akkor a rövid távú véletlen jellegű terhelésnél $E(Z) = 0$.

A szórás eredő értékének számításához jelöljük m -mel az egy órán (fél órán, negyed órán stb.) belül mért értékek számát, és n -nel az órás (félórás, negyedórás stb., de az előbbihez illeszkedő időtartamú) mérések számát. Így a teljes szórásnégyzet:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z_{ij} - \bar{Z})^2, \quad (2.19)$$

ahol Z_{ij} az i -edik óra j -edik időpontjában fellépő eredő véletlen terhelés; \bar{Z} a Z_{ij} terhelésekből képzett átlag.

Feltételezésünk szerint a kétféle véletlen jellegű terhelés vizsgálatánál az időintervallumok illeszkednek, ezért az előbbi egyenlet felbontható két részre, a matematikai statisztikában bizonyított [98] egyszeres osztályozás alapján:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z_{ij} - Z_i)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2, \quad (2.20)$$

ahol Z_i a Z_{ij} terhelés átlaga az i -edik órában.

A kifejezés első tagja megegyezik a szabályozatlan csereteljesítmény-lengés szórásával, míg a második tagja a rövid időtartamú üzemzavari kiségitések, a marginális energiacserék szórásával, így

$$\sigma_Z^2 = \sigma_\ell^2 + \sigma_r^2, \quad (2.21)$$

ahol σ_ℓ a rövid idejű szabályozatlan teljesítménylengés szórása, ami az irodalom szerint $(0,25-0,5)\sqrt{P_1}$ |44|; σ_r a rövid időtartamú kölcsönös üzemzavari kiségitések és gazdaságos energiavásárlások szórása, ami az elvégzett vizsgálat szerint $(1,1-1,7)\sqrt{P_1}$ -nek vehető fel; P_1 a vizsgált rendszer-összeköttetések által együttműködő rendszerek közül a kisebb terhelése.

Az előző adatok felhasználásával a véletlen terhelés eredő szórása nagyszámú géppark esetén, ha a legnagyobb gépegység teljesítménye nem lépi túl a beépített teljesítmény 5%-át:

$$\sigma_Z = (1,2-1,8)\sqrt{P_1}. \quad (2.22)$$

A tervezés fázisában, pontosabb adat hiánya esetén, átlagértékként

$$\sigma_Z = 1,5\sqrt{P_1} \quad (2.23)$$

alkalmazása javasolható.

A rendszer-összeköttetések átviteli képességét meghaladó terhelések az összeköttetés kikapcsolódását eredményezhetik, és rendszerüzemzavart okozhatnak. A rend-

szer-összeköttetések hasznossága különösen az üzemzavarok idején nagy, és ilyenkor döntő fontosságú, hogy a megfelelő átviteli képesség rendelkezésre álljon a szükséges kiegészítés átvételére. Gyakran éppen ez az oka, hogy ezek az összeköttetések viszonylag kevéssé vannak kihasználva: a rendszer-összeköttetések villamosenergia-forgalmának és az átviteli képességnek hányadosa ritkán haladja meg a 2000 MWh/MVA-t, kivéve, ha importtal van leterhelve a vezeték.

Különösen a kisebb energiarendszernek nagyobbal való együttműködésnél jelentős a megfelelő átviteli képességű összeköttetés, mert a kisebb rendszer viszonylag nagyobb kiegészítést igényel, a beépített erőművi teljesítményéhez viszonyítva.

Az üzembiztonság megítéléséhez ez esetben ismerni kell azokat a maximális terheléseket, amelyek a rendszer-összeköttetésekben felléphetnek, hogy már a tervezés fázisaiban figyelembe vehessük. Ezért a továbbiakban meg kívánjuk határozni a véletlenszerű terhelések valószínű maximumát.

A véletlen jellegű, eredő rendszerösszeköttetés-terhelés maximális értékének meghatározásához abból indulunk ki, hogy annak valószínűsége, hogy a véletlen jellegű terhelés (Z) és szórása (σ_Z) hányadosának maximális értéke a szórás z többszörösénél nagyobb:

$$P_r \left(\max \frac{Z}{\sigma_Z} > z \right) = 1 - |\Phi(z)|^n, \quad (2.24)$$

ahol n a vizsgált terhelések száma, z a σ_Z többszöröse, Φ a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelésének eloszlásfüggvénye.

Ha ϵ valószínűséggel kívánjuk meghatározni azt a legnagyobb terhelést, amelyet a maximum nem lép túl, akkor

a nagyterhelésű, évi mintegy 4000 órára vonatkozóan a 2.4. táblázat adja meg a z -t, a szórás többszörösének közelítő értékét.

2.4. táblázat. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésmaximumának valószínűsége és a szórás többszörösének kapcsolata

ϵ	0,05	0,01	0,001	0,0001
z	4,1	4,5	5,00	5,5

Ez azt jelenti, hogy a rendszer-összeköttetések eredő (szabályozott és szabályozatlan) véletlen jellegű terhelésmaximuma a (2.23) képlet felhasználásával $\epsilon = 0,001$ esetén

$$z_{\max} = z \sigma_Z = 7,5\sqrt{P_1}, \quad (2.25)$$

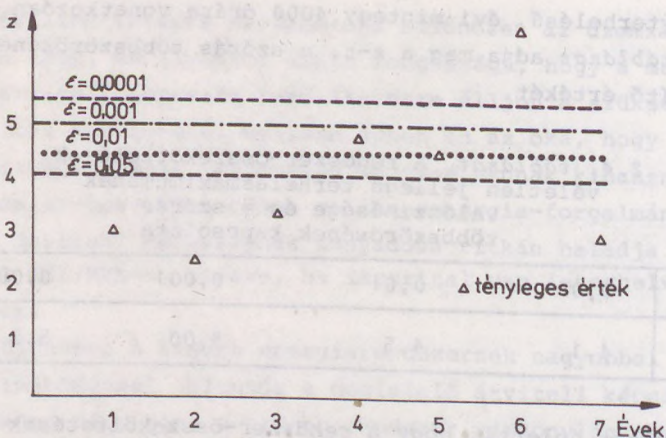
$\epsilon = 0,0001$ -nél pedig

$$z_{\max} = 8,25\sqrt{P_1}, \quad (2.25a)$$

abban az esetben, ha a kisebbik rendszerben a legnagyobb gépegység az összteljesítmény 5%-nál kisebb.

Ezen elméleti értékek gyakorlati adatokkal való szám-szerű összehasonlítását évente mintegy 4000 órás nagyterhelésű időszakra 7 éven át végzett terhelésmérések alapján a 2.19. ábra mutatja be. (A matematikai módszer leírását a [52, 57] tartalmazza.) A kiugró érték azt mutatja, hogy a tényleges maximális értékek nem mindig a számítás alapjául felvett normális eloszlású terhelésekből adódnak.

Megjegyezzük, hogy az $\epsilon = 0,0001$ valószínűséghez tartozó értéket azért számítottuk ki, mert az amerikai gya-



2.19. ábra. A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének tényleges és elméleti maximuma

korlatban a garantált szállítást biztosító rendszer-összeköttetések üzembiztonságát 0,9999-re veszik fel.

Megállapítható a fentiek alapján, hogy a további felhasználás céljaira pl. a rendszer-összeköttetések tervezésére, a kidolgozott módszer gyakorlatilag megfelel, sőt a rendszerek közötti, ún. szoros csatolás kvantitív mérőszámának is tekinthetjük.

2.7. 1000 MW-OS BLOKK FIGYELEMBEVÉTELE KIS RENDSZER ESETÉN

Ha egy erőműrendszerbe különböző okokból aránylag nagy (pl. az összteljesítmény 5-10%-át kitevő) egységteljesítményű gépegyeséget építenek be, akkor a központi határelosztás-tétel alapján érvényesülő normális eloszlással már nem közelíthető a rendszer-összeköttetések üzembiztonságát reprezentáló véletlen jellegű

tartós (órás átlagú) terhelése. Ilyen esetben a viszonylag nagy egységteljesítményű blokk hatását a nagysága miatt külön kell figyelembe venni, az erőműrendszer tervezéséhez hasonlóan [83]. Pl. ez a helyzet fordulhat elő, amikor 1000 MW-os atomerőművi blokk kerül beépítésre a mintegy 8-10 000 MW-os rendszerbe.

Az 1000 MW-os blokk úgy hat a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésére, hogy üzemzavari kiesésnél a kiesett teljesítmény egy részét a többi energia-rendszer pótolja a rendszerösszekötő vezetéseken keresztül, az együttműködő villamosenergia-rendszerek paramétereitől függő arányban. A rendszer-összeköttetések véletlen terhelését ez esetben - az előző pontban leírtakon túlmenően - két, egymástól független körülmény, a blokk üzemképessége és a rendszerteljesítmények aránya is befolyásolja.

Normális üzemben az 1000 MW-os erőművi blokk a rendszer-összeköttetések terhelésére nincs hatással, üzemzavari kiesése esetén viszont az összeköttetéseken - legalábbis átmenetileg - üzemzavari kiegészítésként fellép a véletlen jellegű terhelés. Ezen hatás valószínűségelméleti modellel történő számítás esetén binominális eloszlással közelíthető. Az n db blokk közül k db kiesésének valószínűsége:

$$\Pr_k = \binom{n}{k} p^{n-k} q^k, \quad (2.26)$$

és a blokk kiesésének valószínűségeloszlás-függvénye:

$$B(y) = \Pr(\eta < y) = \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} p^{n-i} q^i, \quad (2.27)$$

ahol $y = kP_{1000}$; k a kiesett blokkok száma ($k=0,1,\dots,n$), P_{1000} az 1000 MW-os blokkok teljesítménye; n a blokkok száma; q a blokk rosszszasági (üzemzavari) tényezője; p a blokk üzembiztonsága.

Bár a tervezési és üzemeltetési módszerek, üzembiztonsági kritériumok nem egységesek világszerte (lásd a 2. Függelék), abban viszont azonosak, hogy katasztrofális rendszerüzemzavarra - mikor több gép is kieshet egyszerre - nem tervezik sem az erőművi, sem a hálózati rendszereket. A determinisztikus módszereknél gyakran a legnagyobb gép kiesésének kritériumát elegendőnek tartják, a valószínűségelméleti modelleknél pedig a gépek kiesését független eseménynek tekintik, normális vagy egyéb eloszlással közelítve a valóságot. Ezért, az eddigi tervezési gyakorlattal összhangban, az egyedi nagyteljesítményű 1000 MW-os blokk kiesését és az előző pontban bemutatott nagyszámú gép kiesését független eseményeknek tekintjük, és így a rendszerösszekötő vezetékek - egyszerre történő bekövetkezésükre fellépő Z_y véletlen jellegű - terhelésre a független valószínűségi változók összegére vonatkozó szabály alkalmazható [94, 96].

Nagyszámú erőművi blokk és fogyasztói terhelés esetén a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű üzemzavari kiségitésre feltételezett és ellenőrzött normális eloszlást felhasználva, az eredő $G(Z_y)$ üzemzavari kiségités eloszlásfüggvénye:

$$G(Z_y) \equiv D(Z) * B(y). \quad (2.28)$$

Az 1000 MW-os blokk kiesése esetén azonban figyelembe kell venni azt is, hogy a párhuzamosan járó villamosenergia-rendszerek teljesítményük arányában nyújtanak egymásnak kiségitést az első pillanatokban [99]. Ez hosszabb ideig is eltarthat, ha nincs jelentős frekvencia-

csökkenés, és pedig addig, amíg az üzemzavaros rendszerben a tartalék erőművi teljesítmények felterhelésével vagy fogyasztói korlátozással a kiegészítést megszüntetik. Ha egy P_1 teljesítményű kisebb rendszer egy P_2 teljesítményű nagyobb rendszeregyesüléssel jár párhuzamosan, akkor a kisebb rendszernek a blokk-kiesés miatt nyújtott, azonnali kiegészítés aránya:

$$h = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \quad (2.29)$$

Ezt is figyelembe véve, a rendszer-összeköttetés eredő véletlen jellegű üzemzavari kiegészítő terhelése valószínűségeloszlására - a konvolúciót részletesebben kifejtve - azt kapjuk, hogy

$$G(Z_y) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} P^k Q^{n-k} \Phi\left(\frac{Z_y - hkP}{\sigma_Z}\right), \quad (2.30)$$

ahol Φ a σ_Z és $E(Z)=0$ értékű normális eloszlásfüggvény; $P = kP_{1000}$ az 1000 MW-os blokkok összteljesítménye; Z_y a rendszer-összeköttetések eredő véletlen jellegű terhelése az 1000 MW-os blokk(ok) kiesésekor fellépő rendszerkiiegészítést is figyelembe véve.

A (2.30) egyenlet alapján a villamosenergia-rendszerek szokványos együttműködése és az 1000 MW-os blokk kiesése esetén a rendszer-összeköttetésen fellépő Z_y véletlen jellegű terhelés kiszámítására számítógépes konvolúciós program került kidolgozásra. A bemenő adatok lényegében három részből állnak:

1. A nagyszámú erőművi blokk kölcsönös kiegészítését reprezentáló normális eloszlás jellemző mennyiségei: az eloszlás szórása és várható értéke.

2. A binominális eloszlást jellemző adatok: a blokkok száma, a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelése szempontjából a blokk mértékadó roszasági száma és teljesítménye MW-ban.

3. A kiegészítés arányára jellemző adat. A rendszer-összeköttetésekkel összekapcsolt rendszerek teljesítményaránya határozza meg ezt az értéket.

A rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelése szempontjából a blokk q roszasági számát korigálni kell, mert a rendszer-összeköttetések a blokk üzemzavari kiesésekor csak $T_{r\ddot{o}}$ ideig terhelődnek - még ha a blokk üzemzavari kiesése $T_{\ddot{u}z}$ ideig tart is -, mivel a megfelelő üzemirányítói intézkedések eredményeképpen a kiegészítés(t) megszűn(t)ik. A rendszer-összeköttetés üzemzavari, véletlen jellegű terhelődése szempontjából a korigált roszasági tényező:

$$q^* = \frac{\Sigma T_{r\ddot{o}}}{\Sigma T_{\ddot{u}z}} q \quad (2.31)$$

A 800-1300 MW-os amerikai, ill. francia nyomottvizes atomerőművi blokkok üzemzavari kiesésének többéves adatai $|100|$ alapján a szerző $q^* = 0,001-0,01$ értékkel való számítást javasol.

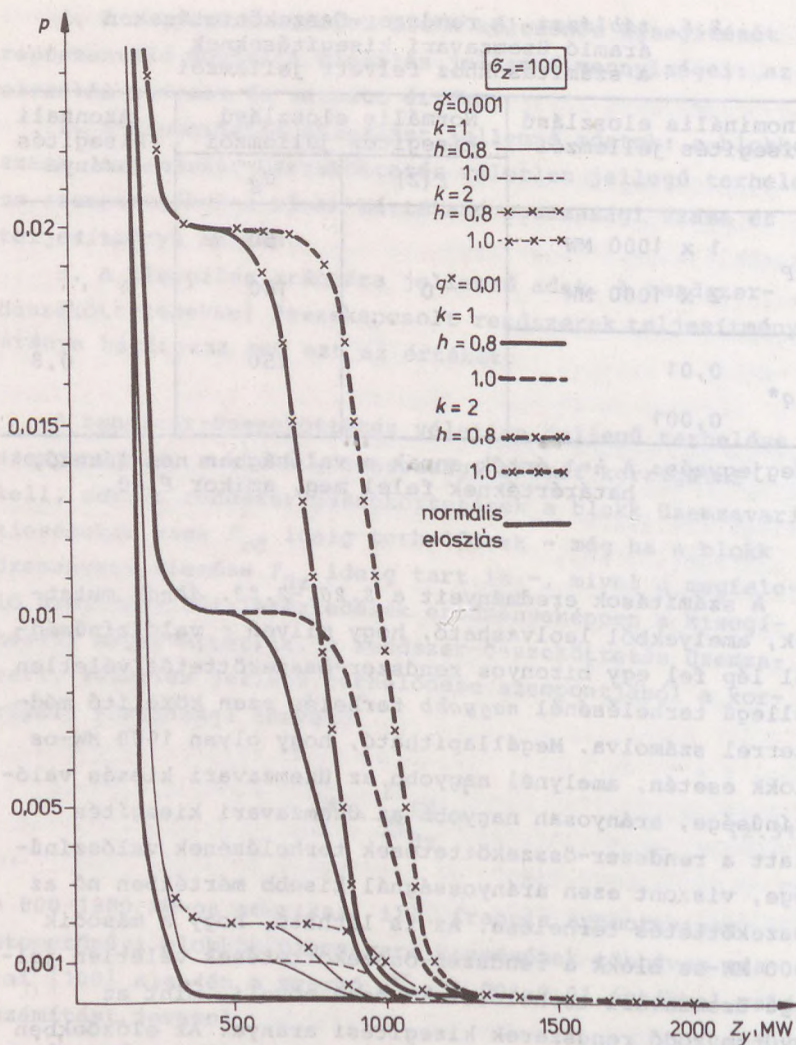
A rendszer-összeköttetések véletlen jellegű, import nélküli, az üzemzavar kiegészítését reprezentáló terhelésének példajaként a számítások a 2.5. táblázatban látható adatokkal kerültek elvégzésre.

2.5. táblázat. A rendszer-összeköttetésekben áramló üzemzavari kiségitéseknek a számításokhoz felvett jellemzői

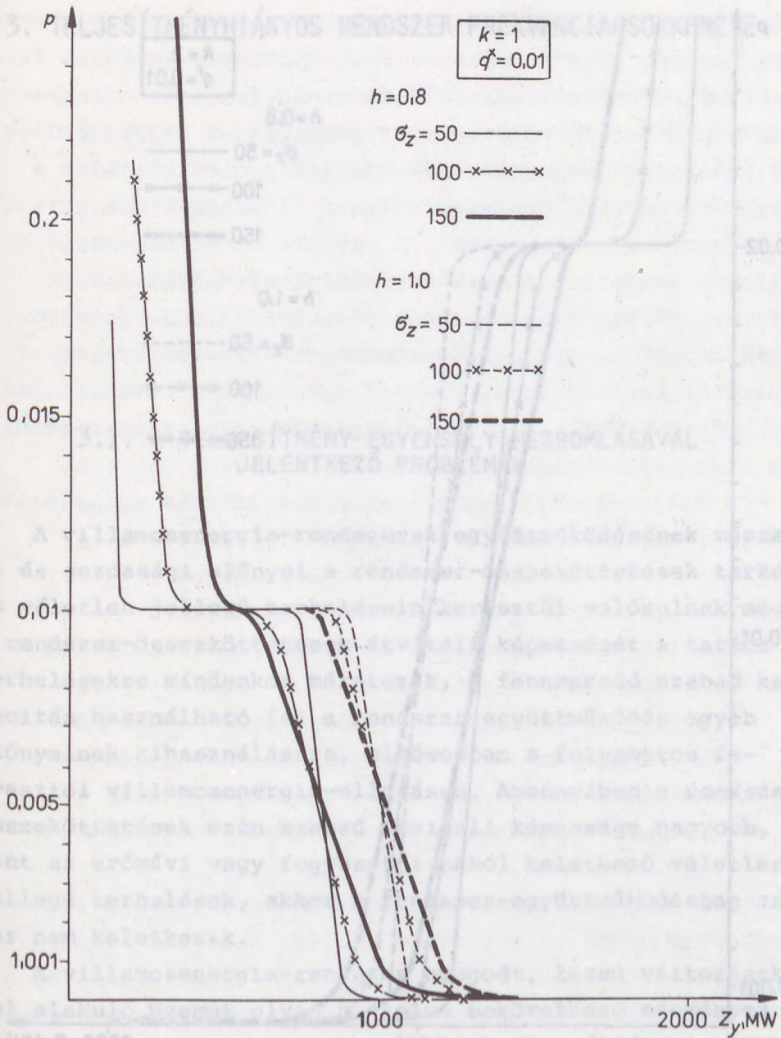
Binominális eloszlású kiségités jellemzői	Normális eloszlású kiségités jellemzői		Azonnali kiségités aránya
	$E(Z)$	σ_Z	
P 1 x 1000 MW 2 x 1000 MW	0	50	1
		100	h
q^* 0,01 0,001		150	0,8

Megjegyzés: A $h=1$ érték annak a valóságban nem létező, határértéknek felel meg, amikor $P_1=0$.

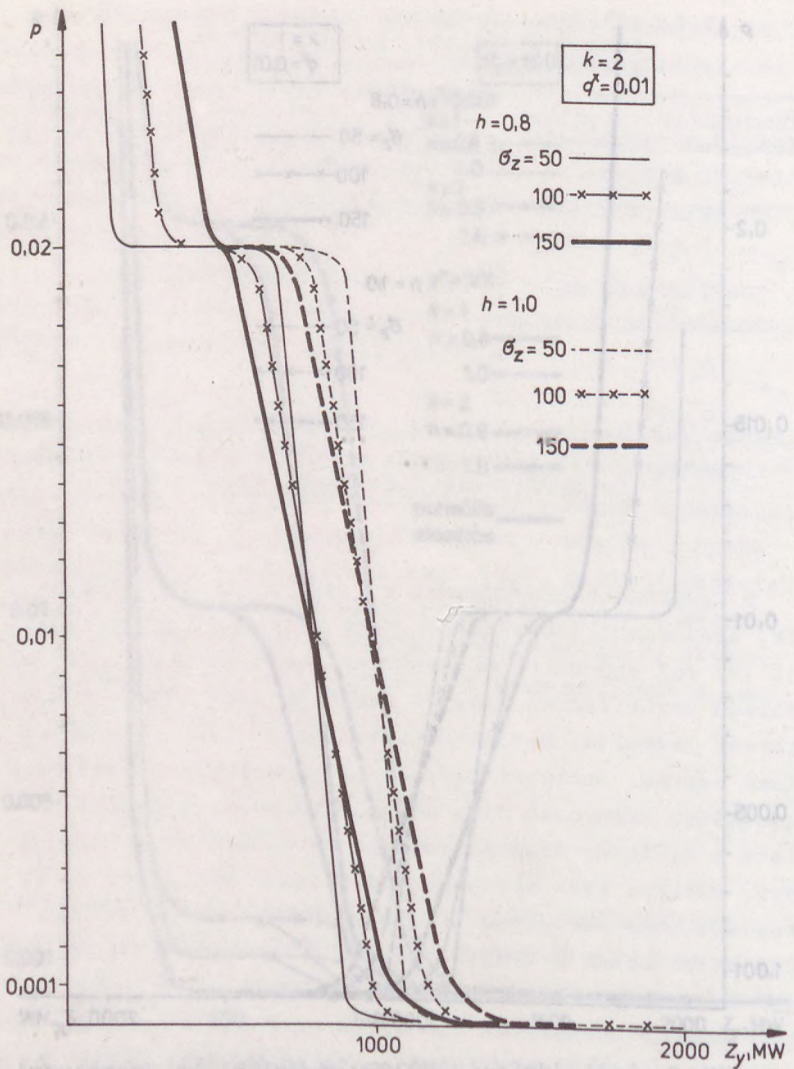
A számítások eredményeit a 2.20.-2.22. ábrák mutatják, amelyekből leolvasható, hogy milyen p valószínűséggel lép fel egy bizonyos rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelésénél *nagyobb* terhelés ezen közelítő módszerrel számolva. Megállapítható, hogy olyan 1000 MW-os blokk esetén, amelynél nagyobb az üzemzavari kiesés valószínűsége, arányosan nagyobb az üzemzavari kiségités miatt a rendszer-összeköttetések terhelésének valószínűsége, viszont ezen arányosságnál kisebb mértékben nő az összeköttetés terhelése. Az is látható, hogy a második 1000 MW-os blokk a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű üzemzavari terhelését kevésbé növeli, mint az együttműködő rendszerek kiségitési aránya. Az előzőekben leírtak tendenciájukban természetesen minden, az erőműrendszerbe beépített, az átlagosnál karakterisztikusan nagyobb blokknagyság esetén érvényesek.



2.20. ábra. 1000 MW-os atomerőművi blokk (1 és 2 db) üzemzavari kiesésének hatására a rendszerösszeköttetések Z véletlen jellegű terhelésénél nagyobb terhelés fellépésének valószínűsége egy 5000 MW-os rendszerben, ha a kisejtést 80, ill. 100%-ban a külső rendszertől kapja



2.21. ábra. 1 db 1000 MW-os atomerőművi blokk üzemzavari kiesésének hatása a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelésére, kb. 4000, 6000 és 10 000 MW-os rendszerben, 80, ill. 100%-os külső kisegítés esetén



2.22. ábra. 2 db 1000 MW-os atomerőművi blokk üzemzavari kiesésének hatása a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű terhelésére, kb. 4000, 6000 és 10 000 MW-os rendszerben, 80, ill. 100%-os külső kisegítés esetén

3. TELJESÍTMÉNYHIÁNYOS RENDSZER FREKVENCIACSÖKKENÉSE

3.1. A TELJESÍTMÉNY-EGYENSÚLY MEGBOMLÁSÁVAL JELENTKEZŐ PROBLÉMÁK

A villamosenergia-rendszerek együttműködésének műszaki és gazdasági előnyei a rendszer-összeköttetések tartós és véletlen jellegű terhelésein keresztül valósulnak meg. A rendszer-összeköttetések átviteli képességét a tartós terhelésekre mindenkor méretezik, a fennmaradó szabad kapacitás használható fel a rendszer-együttműködés egyéb előnyeinek kihasználására, elsősorban a folyamatos fogyasztói villamosenergia-ellátásra. Amennyiben a rendszer-összeköttetések ezen szabad átviteli képessége nagyobb, mint az erőművi vagy fogyasztói okból keletkező véletlen jellegű terhelések, akkor a rendszer-együttműködésben zavar nem keletkezik.

A villamosenergia-rendszer nyugodt, lassú változásokkal alakuló üzemét olyan hirtelen bekövetkező események zavarhatják meg, amelyek a termelést, a szállítási utakat vagy a fogyasztói terheléseket jelentősen megváltoztatják, az állandósultnak mondható egyensúlyi állapotot felborítják. A zavaró események, ill. ezek láncolata, a védelmi működések a zavarás előtti állapotban együttműködő (szinkronjáró) részrendszerek véletlen jellegű szétkapcsolódá-

sához, rendszerbomláshoz vezethetnek, és ez a teljesítményhiányos rendszer részben frekvenciacsökkenést, a teljesítménytöbblettel rendelkező rendszer részben frekvencianövekedést okoz. Bizonyos esetekben az együttműködés véletlenszerű megbomlásának megakadályozási eszköze a részrendszerek előre megtervezett (általában nem kívánatos) szétkapcsolása, amely a magukra maradt részrendszerekben további automatikus működéseket válthat ki. A tervszerű vagy véletlenszerű szétkapcsolódás esetenként elkerülhető a rendszer-összeköttetések terheléseinek fogyasztói korlátozással történő csökkentése révén, egyébként a szétválás, ill. a teljesítmény-egyensúly megbomlása után kell mentő intézkedéseket tenni.

A teljesítményhiány a frekvencia időbeli változásával jár együtt, amelynek mértéke függ:

- a hiányzó teljesítmény nagyságától;
- a teljesítményhiányos rendszerben a forgó tömegek összegétől;
- a primer szabályozás hatékonyságától (forgótartalékok nagysága, statizmus, felterhelési sebesség, esetleges helyi szekunder szabályozás);
- a kazánok puffergőz mennyiségétől és szabályozás-gyorsaságától;
- a központi szekunder szabályozás dinamikai viszonyaitól.

A frekvenciaváltozással együtt - bizonyos esetekben anélkül is - teljesítmény- és feszültséglengésekre is sor kerül, sőt egyes esetekben feszültség-összeomlás következhet be.

A teljesítményhiánnyal járó rendszerüzemzavarok esetén a következő - egymással erősen összefüggő - kérdések merülnek fel:

- Milyen a frekvenciacsökkenés kezdeti sebessége, meredeksége?
- Milyen mértékű és lefolyású a teljesítményhiány és/vagy a rendszerbontás utáni frekvenciaváltozás?
- A teljesítményhiányos részrendszerben ki tud-e alakulni állandósult szinkron üzem névlegeshez közeli frekvencián?
- Nem csökken-e a frekvencia annyira, hogy az már az erőművek biztonságos üzemét veszélyezteti?
- Szükséges-e és milyen mértékben fogyasztói korlátozás?
- Milyen kritériumoknak kell megfelelniük a frekvenciafüggő terheléskorlátozó automatikáknak?
- Hogyan történik a teljesítményszállítási utak átterhelődése, lesz-e tartós túlterhelődés és/vagy teljesítménylengés valamely kooperációs távvezetékben erőműben?
- Kaszkád üzemzavar megelőzésére szükséges-e a deficytes rendszer további bontása terhelés és fogyasztás szempontjából kiegyenlített körzetekre?
- Milyen intézkedésekkel lehet és kell felkészülni az üzem-előkészítés vagy -tervezés fázisában elképzelhető és hihető események bekövetkezése esetére?

A vizsgálatok során alapvető az a célkitűzés, hogy a hirtelen bekövetkező teljesítményhiány esetén a kedvezőtlen következmények - mint az erőművek kiesése és ezáltal nagymennyiségű fogyasztók tartós feszültségkimaradása - bekövetkezésének valószínűsége az elvárható legkisebbre csökkenjen, a szükséges mértékű, de rövid idejű fogyasztói korlátozás révén.

3.2. A TELJESÍTMÉNYHIÁNYOSSÁ VÁLT VILLAMOSENERGIA-RENDSZER DINAMIKUS SZIMULÁCIÓS MODELLEZÉSÉNEK SZEMPONTJAI ÉS KÖVETELMÉNYRENDSZERE

Valamilyen zavaró esemény hatására teljesítményhiányossá vált villamosenergia-rendszerben olyan átmeneti folyamatok zajlanak le, melyek igen összetettek, és áttekintésük igen bonyolult. Megismerésük, tanulmányozásuk egyik eszköze a számítógépi szimuláció, amely a tervezéshez, az üzem-előkészítéshez, a szükséges mentőintézkedések kidolgozásához az előbbieken feltett kérdések megválaszolásához hasznos segítséget nyújthat.

Az időfolyamatok szimulációs modellezésének módszere a rendszerszintű folyamatok rövid (kb. 1 s), közepes (kb. 1 min) és hosszú (10-60 min) időtartamú elektromechanikai lengésekkel járó átmeneteinek determinisztikus modellel való leképezését és digitális számítógépi programmal való szimulálását jelenti.

A villamosenergia-rendszer állandósult üzemére és átmeneti, üzemzavari állapotaira vonatkozó számításokat, még a determinisztikusan modellezhető esetekben is, a lehetőség szerinti legjobb becslésre, a valóságos értékek megközelítésére való törekvésnek kell tekinteni. A számítási modellek még nagy számítókapacitás rendelkezésre állása esetén is tartalmaznak elhanyagolásokat és közelítéseket, amelyeknek fő oka a villamosenergia-rendszer nagy kiterjedtsége, felépítésének és szabályozásának bonyolultsága.

A pontossággal szemben támasztott igény nem függetleníthető a számítás céljától, a rendelkezésre álló és az adott időpontra vonatkozó információktól, ill. adatoktól, a számítástól megkívánt gyorsaságtól, az eredmények felhasználási módjától. A modellezések, számítási eljárások elvileg csak az információhátter által korlátozottak, de a részleteiben és összhatásában is közel azonos pon-

tosságra való ésszerű törekvés mindig felvet ellentmondásokat, amelyeket az adott feladatnak alárendelve kell feloldani, tehát bármely számítási modell végső soron kompromisszumok eredménye.

Az említettek hangsúlyozottan vonatkoznak a rendszer-szintű, elektromechanikai lengésekkel járó, automatikus szabályozásokkal és működésekkel befolyásolt átmenti folyamatok vizsgálatára.

A rendszerbontással kapcsolatos időfolyamatok szimulációs modelljének kialakításakor a következőkben kifejtendő szempontok elsődlegesek.

3.2.1. SZIMULÁCIÓS IDŐTARTOMÁNY

A folyamatok időbeli szimulációja a rendszerelemek időbeli viselkedésére felírt differenciálegyenletek és az elemek közötti kapcsolatokat, hálózati összeköttetéseket leíró algebrai egyenletek együttes - numerikus integrálással, ill. hálózatszámítási eljárásokkal való - megoldásán alapul.

A szimulációs időtartomány rögzítése annak megállapítását jelenti, hogy milyen folyamatokat, fizikai hatásokat, beavatkozásokat tartunk fontosnak az adott feladat szempontjából, milyen közelítések és elhanyagolások tehetőek. A villamosenergia-rendszerben lejátszódó átmenti folyamatok igen széles időintervallumban jelentkeznek, például az elektromágneses tranziensek néhány ezredmásodperc alatt játszódnak le, egyes szabályozások hatása pedig többperces átmeneti folyamat során érvényesül. Ennek a két jelenségnek az időfolyamata nyilvánvalóan nem hat egymásra, ezeket azonos struktúrájú modellel vizsgálni rendkívül időigényes és szükségtelen.

A teljesítményhiányossá váló rendszer vizsgálata szempontjából lényeges elektromechanikai folyamatok leké-

pezéséhez nem szükséges a kapcsolási események elektromágneses hullámjelenségeit és a rendkívül kis időállandójú (100 ms alatt lezajló) szubtranzienst hatásokat figyelembe venni. A felső időkorlátot egyrészt az automatikus szabályozók időállandóihoz, a generátorok és a rendszerfrekvencia várható lengéskialakulási idejéhez kell igazítani (ez általában maximum 30-100 s szimulációs időt igényel), másrészt el kell dönteni, hogy szükség van-e és lehetőség hosszabb időtartamra vonatkozó szimulációra. Ebben az utóbbi esetben a fölérendelt tervszerű (szekunder és tercier) szabályozásokat, hőerőművekben a kazánüzemet, atomerőművekben a reaktorszabályozást, az állomásokban a transzformátorok terhelés alatti feszültség-szabályozását, a fogyasztói terhelések teljesítményváltásait is modellezni kell, és a szimulációt legalább 10-15 perces időtartamra kell kiterjeszteni. Figyelembe kell azonban venni, hogy az 0,1-100 s-10 min időtartományra nem várható egyenletes pontosság ugyanattól a modellettől.

3.2.2. RENDSZERMODELL

A modellezett rendszer gyakorlati okokból nem lehet a teljes egyesített villamosenergia-rendszer, ezért ezt az elméleti szempontból jelentkező nyitottságot a szimulációs modell kialakításával kell megszüntetni. Ez azt jelenti, hogy az elhagyott, részleteiben nem modellezett rendszerelemek hatásai a modellben összevontan, egyenértékű leképezésekkel realizálhatók, és így hozható létre a szimulációs számításokhoz szükséges zárt rendszermodell. A zártság alatt az értendő, hogy a dinamikus szimuláció kiinduló egyensúlyi üzemiállapota (erőművi betáplálások, teljesítményáramlások, feszültségek, frekvencia)

meghatározható, a modellben lezajló átmeneti folyamatok és a végállapot egyértelműen számítható.

A szimuláció feladata valamely levált rendszerrész viselkedésének, a teljesítményhiányra mint zavarásra adott válaszának számítása.

Abban az esetben, ha a rendszerbontás szimulációs vizsgálata az összekapcsolt rendszerek együttesére irányul (vagyis nemzetközi rendszer-együtműködés esetében a nemzeti energiarendszereket közel azonos részletességgel kívánjuk figyelembe venni), akkor az egyes részrendszerekhez azonos mélységű aktuális információval kell rendelkezünk.

Ha a vizsgálatok középpontjában egy kitüntetett részrendszer áll, és nem kívánjuk az összes részrendszer pontos leképezését, vagy adatok, aktuális értékek, ill. gépi kapacitás hiányában erre nincs lehetőségünk, akkor a részletesen vizsgált belső rendszerhez ki kell alakítani a külső hálózati kapcsolatok és az elhagyott rendszerrészek hatásait viszonylag jól leképezhető, de szükségszerűen egyszerűsített külső hálózatképet (valóságos, ill. fiktív vezetékek és erőművek). A belső hálózat és a külső ekvivalens között a valóságos viszonyokat a lehető legjobban leképező ún. átmeneti zónát kell fenntartani. Az átmeneti zóna kiterjesztése növeli a számítások megbízhatóságát, de ennek ellene hat az adatokban és az aktuális állapot megállapításában jelentkező bizonytalanság. A külső hálózaton bekövetkező rendszerbontás a modellben szereplő valóságos vezetékek kikapcsolásával, ill. a külső ekvivalens módosításával képezhető le, és a bontás új külső hálózatot és esetenként gyengített kooperációs kapcsolatokat eredményez. Előfordulhat az is, hogy a teljes belső hálózat leválasztódik az egyesített rendszerről, lehetséges továbbá, hogy a belső hálózat is

különálló részekre tagolódik, pl. a rendszermentő automatikák működése révén.

3.2.3. ELEMÍ MODELLEK, BEAVATKOZÁSI LEHETŐSÉGEK

A szimulációs időtartomány és a leképezni kívánt energiarendszer ismeretében alakíthatók ki a rendszerek elemi modelljei. Az erőműmodellek leképezhetnek egy-egy blokkot, vagy az adott erőműben párhuzamosan üzemelő azonos blokkokat koherens lengő csoportnak tekintve képviselhetnek egy eredőt. Az erőműmodellek tartalmaznak szinkrongenerátor-, turbina-, gerjesztésszabályozó és turbinaszabályozó modellt, ami matematikailag az említett rendszerelemek nemlineáris állapotrepresentációját jelenti. Tekintettel a megfigyelni kívánt időtartományra, a szinkrongépmo- dell a tranziens viselkedést leíró, forgórészmen- nyiségekre felírt áramköri differenciálegyenletek- ből és a forgó tömegek nemlineáris mechanikai mozgás- egyenleteiből alakítható ki.

Az automatikus szabályozásokat olyan mélységben kell leképezni, amelyek a szimulációs időtartomány szempontjából indokoltak, vagyis az átmeneti folyamat lezajlását és a végállapot kialakulását befolyásolják. Az erőműmodel- lekben figyelembe veendő gerjesztésszabályozás, szekunder és terciér turbinaszabályozás, valamint kazán- (reaktor-) szabályozás matematikai leképezése is a nemlineáris álla- pot representációi.

Az energiaátviteli elemek (távvezetékek és transzfor- mátorok) egzakt elemi modellje a saját feszültségszintre számított négy pólus. A fogyasztók legegyszerűbb figyelem- bevétele a kiinduló állapotjellemzőkből meghatározott im- pedanciamo- dell, lehetséges a fogyasztások általános, áram-feszültség és feszültség-frekvencia függvényel való leképezése is.

A szimulációhoz szükséges, hogy a tetszőleges időpontban bekövetkező kapcsolási események, terhelésváltozások, erőművi lekapcsolások feldolgozhatók legyenek. Ez az adott esemény interaktív módon való kezdeményezésével vagy a számítási eljárás során való feltétellenőrzések alapján automatikusan, esetleg ezek ötvözeteként valósítható meg.

3.2.4. KÖVETELMÉNYRENDSZER

A teljesítményhiánnyal járó folyamatok időbeli követésével (szimulálásával) történő vizsgálatoktól abban az esetben várható elfogadható pontosságú válasz a tervezők és az üzemelőkészítők részére, az előzőekben felvetett kérdésekre, ha a szimulációs modell kielégíti a következő követelményeket:

- A kiinduló egyensúlyi állapot csomóponti betáplálási, terhelési és a kooperációs teljesítmények a vizsgálni kívánt üzemiállapot szerint beállíthatók legyenek. A rendszer-összeköttetéseken, ill. a szállítási metszégeken áramló teljesítmények és az átviteli képességek a valóságos viszonyokat képezék le.
- A villamos távolságok helyesen közvetítsék a hirtelen változások következtében pillanatszerűen fellépő teljesítményátrendeződéseket.
- A valóságos, ill. fiktív erőműveknek megfelelően modellek az automatikus feszültségszabályozási és teljesítményszabályozási képességet jól írják le.
- A hálózat modellbeli erőműveinek forgó tömege, beépített teljesítménye, ill. ezek összessége és aránya, a teljesítmény-frekvencia szabályozás statizmusa, dinamikája és a forgótartalék a lehető legjobban közelítse meg az aktuális viszonyokat.

- A teljesítményhiányt eredményező perturbáció (erőművek, terhelések lekapcsolása és vezetékek kikapcsolása) tetszőleges szimulációs időpontban realizálható legyen.
- A rendszer, ill. a levált részrendszer időben változó átlagos frekvenciája és a csomóponti frekvencia a villamos kapcsolatban lévő erőművek és terhelések jellemzői alapján mindenkor számítható, a levált részrendszer tovább bontható legyen.
- A fogyasztói terhelések feszültség- és frekvenciafüggése figyelembe vehető és a teljesítményfelvétel változása fogyasztói csatlakozási pontonként minden időpontra meghatározható legyen.
- Képezze le a frekvenciától függő (vagy egyéb szempontok alapján meghatározott) fogyasztói terheléskorlátozásokat az esedékes időpontban.
- Amennyiben szükséges, a deficités részrendszeren belül egy ún. belső hálózatot ki lehessen jelölni a részletes vizsgálatok céljára. Ez esetben ki kell alakítani a külső hálózati kapcsolatok és az elhagyott rendszerrészek hatásait viszonylag jól leképező, de szükség szerint egyszerűsített külső ekvivalens hálózatot. A belső hálózat és a külső között a valóságos viszonyokat a lehető legjobban leképező ún. átmeneti zónát kell fenntartani.
- Villamosan leváló többletteljesítménnyel rendelkező másik részrendszer leképezése egyszerűsíthető a kiinduló állandósult állapot meghatározására, ha a többlettel rendelkező részrendszert nem kívánjuk vizsgálni.
- Végül, de nem utolsó sorban, a modell eredményei jól egyezzenek a ténylegesen hirtelen teljesítményhiányossá vált villamosenergia-rendszerek ese-

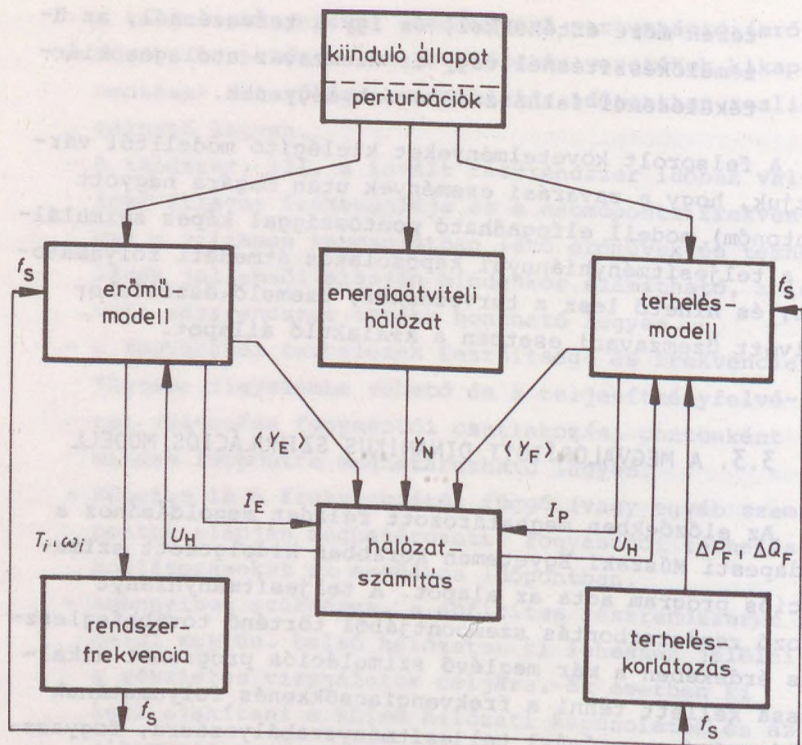
tében mért értékekkel, és így a tervezésnél, az üzemelőkészítésnél vagy az üzemzavar utólagos kiértékelésénél felhasználhatóak legyenek.

A felsorolt követelményeket kielégítő modelltől várhatjuk, hogy a zavarási események után magára hagyott (autonóm) modell elfogadható pontossággal képes szimulálni a teljesítményhiánnyal kapcsolatos átmeneti folyamatokat, és hihető lesz a tervezéskor, üzemelőkészítéskor felvett üzemzavari esetben a kialakuló állapot.

3.3. A MEGVALÓSÍTOTT DINAMIKUS SZIMULÁCIÓS MODELL

Az előzőekben meghatározott feladat megoldásához a Budapesti Műszaki Egyetemen korábban kidolgozott szimulációs program adta az alapot. A teljesítményhiányt okozó rendszerbontás szempontjából történő továbbfejlesztés érdekében a már meglévő szimulációs programot alkalmassá kellett tenni a frekvenciacsökkenés folyamatának leképezésére, erőművi teljesítményszabályozásra, fogyasztók frekvencia- és feszültségérzékenységre, valamint a fogyasztói lekapcsolások (FTK) elemzésére a valóságos viszonyok hű leképezésével. Ez utóbbi a fejlesztési munka egyik alapvető célja volt, amit a modell hitelesítésével - azaz a tényleges események során mért értékeknek és a modell segítségével számított eredményeknek az összehasonlításával - lehet igazolni.

A teljesítményhiánnyal járó rendszerbontás szimulációjára kidolgozott modell nagyobb egységei és a modellkapcsolatok a 3.1. ábrán láthatók. Az egyes blokkok tartalmáról és ezen keresztül a szimulációs számítás elvéről a következő ismertetés adható.



3.1. ábra. Teljesítményhiányossá vált villamosenergia-rendszerre kifejlesztett szimulációs modell főbb elemei és kapcsolatai

3.3.1. KIINDULÓ ÁLLAPOT

Ezen modellnél egy off-line üzemű load-flow számítás eredményei és ennek megfelelő állapotváltozók kezdeti értékei képezik a bemenő adatokat. Természetesen más input adatokkal is lehet szükség és lehetőség esetén dolgozni.

3.3.2. PERTURBÁCIÓK

A rendszer topológiáját, erőművi vagy fogyasztói terhelését módosító változásokat - egyedileg vagy csoportosan - lehet megadni kézzel vagy automatikusan. A változások - melyek bármely pillanatban felléphetnek - a következők lehetnek:

- vezeték(ek), transzformátor(ok) ki-, ill. bekapcsolása;
- erőművi blokk(ok) kiesése;
- fogyasztói terhelés változása, ki- vagy bekapcsolása;
- 3F zárlat;
- a szabályozott értékek változása.

Amennyiben a perturbáció hatására rendszerbontásra kerül sor, akkor a szimuláció az előre kiválasztott részrendszeren folytatódik, importáló rendszer esetén célszerűen a teljesítményhiányos rendszerben.

3.3.3. ERŐMŰMODELL

A villamosenergia-rendszer állapotváltozói az erőműmodellben szerepelnek, amelyek - a közepes időtartamú dinamikus szimulációnál - a szóban forgó erőmű turbinagenerátor egységét reprezentálják. Az erőműmodell fő elemei:

- szinkrongenerátor-modell és feszültségszabályozás;
- elektromechanikai lengésegyenlet;
- turbinaszabályozó és turbinamodellel.

A leképezés részletessége szempontjából háromféle erőműtípus 10 féle állapotváltozóval kerül leképezésre.

3.3.4. RENDSZERFREKVENCIA

A perturbáció következtében teljesítményhiányossá vált rendszer, ill. részrendszer pillanatnyi átlagos szögsebessége azon az elven képezhető, hogy a kiinduló egyensúlyi helyzethez képest a részrendszer mozgásmennyiségének megváltozása az egyes forgótömegekre vonatkozó megváltozásokból tevődik össze.

$$\Delta\omega_r = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \Delta\omega_{mi}}{N_r}, \quad (3.1)$$

és így

$$\omega_r = \omega_0 + \Delta\omega_r,$$

ahol ω_0 , ill. ω_r a részrendszer kezdeti, pillanatnyi átlagos szögsebessége; $\Delta\omega_{mi}$ az i -edik erőműmodell "q" tengelyének szögsebesség-eltérése a kiinduló állapothoz képest; $N_r = \sum N_i$ a részrendszer összperdűlete.

Ez alapján bármelyik időpillanatban az átlagos rendszerfrekvencia az erőművi blokkok egyedi szögsebességének súlyozott átlagával definiálható:

$$f_r = (\omega_0 + \Delta\omega_r) / 2\pi = \omega_r / 2\pi. \quad (3.2)$$

3.3.5. HÁLÓZAT

A villamosenergia-átviteli hálózat a kiinduló állapotban meghatározott topológiából származtatható, és a csomóponti admittanciamátrix reprezentálja. A távvezetékek és transzformátorok pi-moddellel vannak leképezve.

3.3.6. FOGYASZTÓI TERHELÉSEK

A hálózat csomópontjaiban a terhelés passzív söntadmittanciával van leképezve, és a fogyasztók hatásos teljesítményének a frekvencia- és feszültségváltozás hatására bekövetkező változása a ΔI_F áramkompenzációval van figyelembe véve, a fogyasztói területre jellemző frekvencia- és feszültségtényező segítségével.

Valamely i -edik csomópontban a frekvencia az átlagos rendszerfrekvenciától való eltéréssel határozható meg:

$$f_i = (\omega_r + \dot{\eta}) / 2\pi, \quad (3.3)$$

ahol $\dot{\eta}$ az i -edik csomópont feszültsége szögének változása.

3.3.7. TERHELÉSKORLÁTOZÁSI MODELL

A frekvenciafüggő terheléskorlátozás kezdő frekvenciaszintje és lépcsői, valamint a csúcsterhelés százalékában a lekapcsolandó terhelés kiinduló adatként adható meg csomópontként.

3.3.8. HÁLÓZATSZÁMÍTÁS

A hálózatszámítás valósítja meg az erőművek és a fogyasztói terhelések csomóponti modellje közötti kapcsolatot, és alapfeladata a csomóponti feszültségek meghatározása.

3.4. ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK

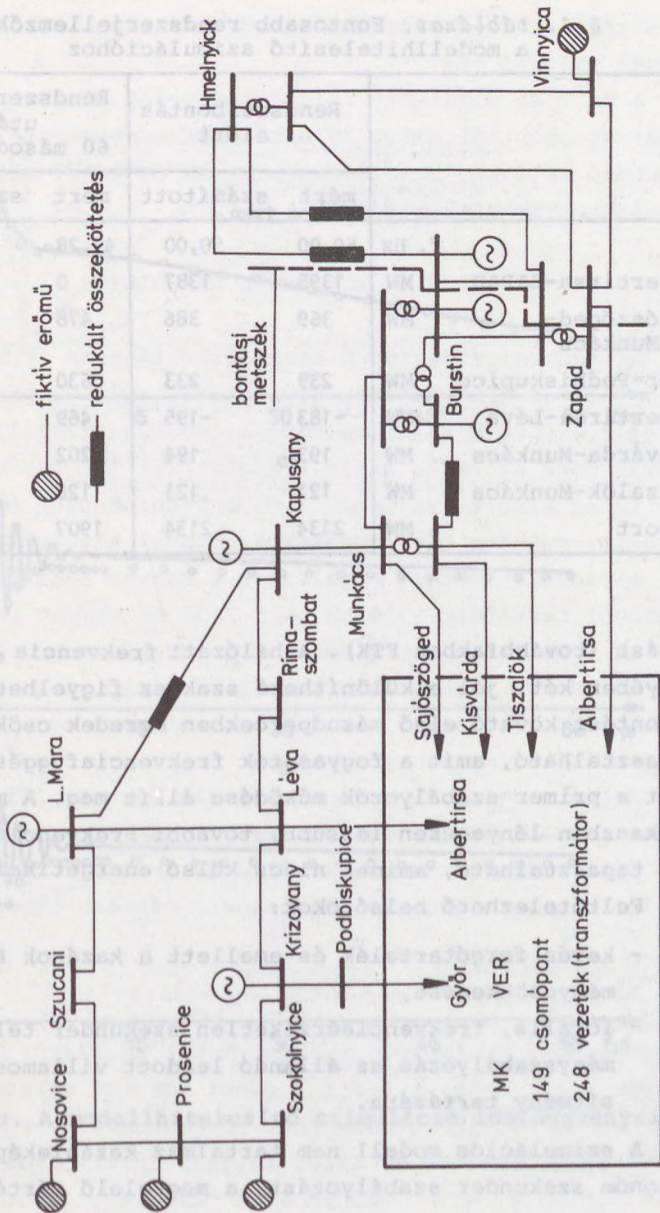
3.4.1. MODELHITELESÍTÉS

A szimulációs modell működésének helyességéről, az eredmények hihetőségéről lezajlott rendszerbontások szimulációjával győződhetünk meg. Az összehasonlítás alapja a rendszerbontások során rögzített időfüggvények, amelyeket az Országos Villamos Teherelosztóban működő Transiens Post Mortem Rewiev (TPMR) tárol. A TPMR analóg távmérésekből vesz mintákat 0,1 s ciklusidővel és digitális információként tárolja azokat. Az analóg távmérések impulzusfrekvenciás telemechanikai csatornákon jutnak az OVT-be.

A választott példa egy 1987 márciusában a Magyar Köztársaság Villamos Energia Rendszerében (MK VER) bekövetkezett rendszerbontás.

A kiinduló állapothoz tartozó hálózatot mutatja a 3.2. ábra. Az ábrán a szimulációhoz felvett külső hálózat és a rendszerbontáshoz tartozó metszék van részletezve, a belső hálózat leképezése tartalmazza az MK VER gyakorlatilag teljes 120/220/400 kV-os alaphálózatát, 149 csomópont és 248 soros elem figyelembevételével. Az MK VER kiinduló állapotbeli termelése 2700 MW, a teljesítményimport a kooperációs vezetékek hazai végpontján összegezve 2134 MW. A rendszerbontást követően a teljesítményhiánnyal leváló, vizsgált rendszerész kiinduló állapotbeli teljesítménye 45600 MW.

Az utólag rekonstruált kiinduló állapot néhány jellemzőjét, és a rendszerbontás pillanatától számított 60 s múlva érvényes értékeket tartalmazza a 3.1. táblázat. A táblázatban szereplő MW értékek a kooperációs vezetékek belső hálózati végpontjára vonatkoznak. Néhány fontosabb időfüggvény mért és számított menetét mutatja a 3.3. ábra. A vizsgált rendszerbontás nem okozott frekvencia-csökkenésre működő automatikus fogyasztói terheléskorlá-



3.2. ábra. Hálózati topológia a modellhitelesítő szimulációhoz

3.1. táblázat. Fontosabb rendszerjellemezők a modellhitelesítő szimulációhoz

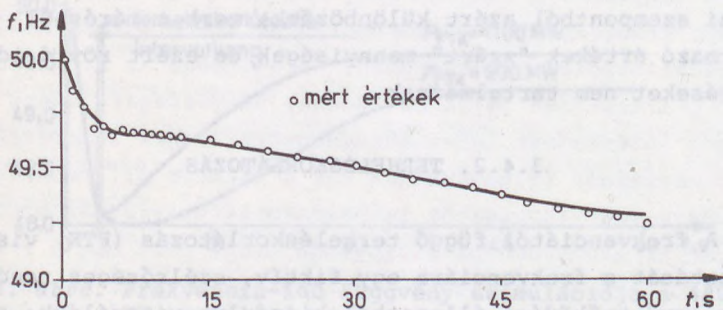
		Rendszerbontás előtt		Rendszerbontás után 60 másodperccel	
		mért	számított	mért	számított
	f, Hz	50,00	50,00	49,28	49,32
Albertirsa-ZAPAD	MW	1395	1387	0	0
Sajószöged-Munkács	MW	369	386	478	422
Győr-Podbiskupice	MW	239	233	630	638
Albertirsa-Léva	MW	-183	-195	469	500
Kisvárdá-Munkács	MW	193	194	202	179
Tiszalök-Munkács	MW	121	121	128	108
Import	MW	2134	2134	1907	1847

tozást (továbbiakban FTK). A hálózati frekvencia időfüggvényében két, jól elkülöníthető szakasz figyelhető meg. A bontást követő első másodpercekben meredek csökkenés tapasztalható, amit a fogyasztók frekvenciafüggése, valamint a primer szabályozók működése állít meg. A második szakaszban lényegesen lassúbb, további frekvenciacsökkenés tapasztalható, aminek nincs külső energetikai oka.

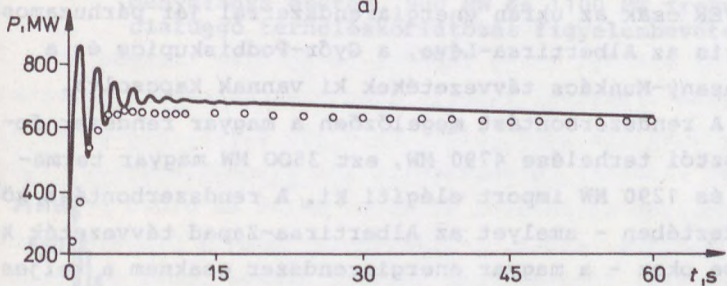
Feltételezhető belső okok:

- kevés forgótartalék és emellett a kazánok teljesítménycsökkenése,
- lokális, frekvenciaérzéketlen szekunder teljesítményszabályozás az állandó leadott villamos teljesítmény tartására.

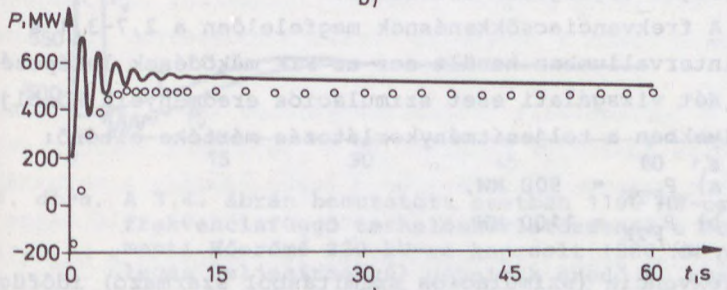
A szimulációs modell nem tartalmaz kazánlekepezést és autonóm szekunder szabályozást, a megfelelő mértékű és



a)



b)



c)

3.3. ábra. A modellhitelesítő szimuláció időfüggvényei

sebességű frekvenciacsökkenés turbinaalapjel-leszabályozással valósul meg.

A mért és számított teljesítmény-idő függvények dinamikai szempontból azért különbözőek, mert a mérésből származó értékek "szűrt" mennyiségek, és ezért rövid idejű lengéseket nem tartalmaznak.

3.4.2. TERHELÉSKORLÁTOZÁS

A frekvenciától függő terheléskorlátozás (FTK) visszahatását a frekvenciára egy fiktív, szélsőséges rendszer-együttműködési állapotból kiindulva vizsgáljuk: az MK VER csak az ukrán energiarendszerrel jár párhuzamosan, vagyis az Albertirsa-Léva, a Győr-Podbiskupice és a Kapusany-Munkács távvezetékek ki vannak kapcsolva.

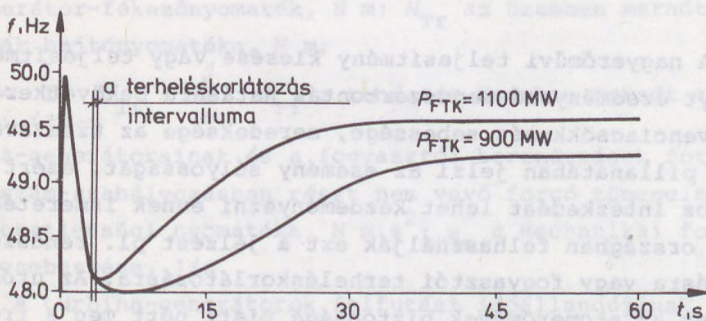
A rendszerbontást megelőzően a magyar rendszer fogyasztói terhelése 4790 MW, ezt 3500 MW magyar termelés és 1290 MW import elégíti ki. A rendszerbontást következtében - amelyet az Albertirsa-Zapad távvezeték kiesése okoz - a magyar energiarendszer csaknem a teljes importját véglegesen elveszíti.

A frekvenciacsökkenésnek megfelelően a 2,7-3,1 s időintervallumban került sor az FTK működések leképezésére. Két vizsgálati eset szimulációs eredményeit közöljük, amelyekben a teljesítménykorlátozás mértéke eltérő:

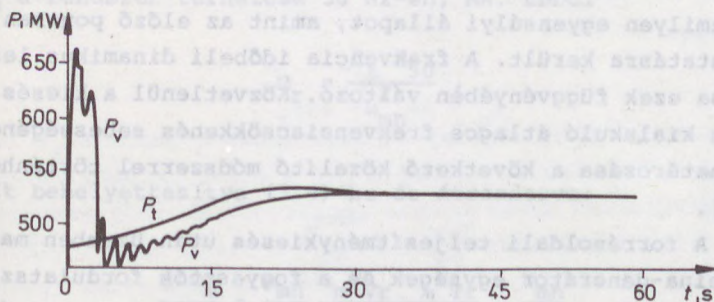
a) $P_{FTK} = 900 \text{ MW}$,

b) $P_{FTK} = 1100 \text{ MW}$.

A frekvencia (szimulációs számításból származó) időfüggvényét a 3.4. ábra mutatja a fenti két FTK változatra. A 3.5. ábrán látható a Dunamenti Hőerőmű 220 kV-ra kapcsolt blokkjainak (880 MW névleges teljesítmény) hálózatba táplált villamos teljesítménye és a turbinateljesítmény az 1100 MW-os korlátozásra vonatkozóan.



3.4. ábra. Frekvencia-idő függvény szimulációja a 4800 MW terhelésű magyar rendszer 27%-os teljesítményhiánya esetén, 900 MW és 1100 MW frekvenciafüggő terheléskorlátozás figyelembevételével



3.5. ábra. A 3.4. ábrán bemutatott esetben 1100 MW-os frekvenciafüggő terheléskorlátozásnál a Duna menti Hőerőmű 220 kV-ra kapcsolt (880 MW névleges teljesítményű) gépeinek eredő P_t turbin- és P_v villamos teljesítménye

3.5. A FREKVENCIACSÖKKENÉS KEZDETI SEBESSÉGE

A nagyerművi teljesítmény kiesése vagy teljesítményhiányt eredményező rendszerbontás hatására bekövetkező frekvenciacsökkenés sebessége, meredeksége az üzemzavar első pillanatában jelzi az esemény súlyosságát, ezért számos intézkedést lehet kezdeményezni ennek ismeretében. Több országban felhasználják ezt a jelzést pl. rendszerbontásra vagy fogyasztói terheléskorlátozásra. Az utóbbi időben az atomerőművek biztonsága miatt nőtt meg a frekvenciacsökkenés sebességének jelentősége, mert bizonyos esetekben az atomerőmű üzemzavari kiesését eredményezheti a nagy frekvenciamerevedés.

Az erőművi (vagy import) betáplálás kiesése után dinamikus viszonyok között, igen gyakran emberi beavatkozásra, szinte lehetetlen rövid idő alatt, alakul ki az egész rendszer paramétereitől és automatizmusától függően valamilyen egyensúlyi állapot, amint az előző pontban ez bemutatásra került. A frekvencia időbeli dinamikus lefolyása ezek függvényében változó. Közvetlenül a kiesés után kialakuló átlagos frekvenciacsökkenés sebességének meghatározása a következő közelítő módszerrel történhet |10|.

A forrásoldali teljesítménykiesés után üzemben maradt turbina-generátor egységek és a fogyasztók fordulatszám-szabályozásban részt nem vevő forgó tömegét a turbinák hajtó- és a generátorok fékezőnyomatékának különbsége lassítja, amit - értelemszerűen felhasználva a stabilitás számításánál alkalmazottakat |34| - a mechanikai forgómozgásra érvényes perdülettétel alapján a következő differenciálegyenlet ír le:

$$\Theta_r \frac{d\Delta\omega_m}{dt} = M_{Vr} - M_{Tr} , \quad (3.4)$$

ahol M_{Vr} a fogyasztói villamos teljesítménnyel arányos generátor-fékezőnyomaték, N m; M_{Tr} az üzemben maradt turbinák hajtónyomatéka, N m;

$$\Theta_r = \sum_{i=1}^k \Theta_{Ti} + \sum_{i=1}^j \Theta_{Fi} \quad \text{a rendszer üzemben maradt tur-}$$

bina-generátorainak és a fogyasztói berendezések fordulatszám-szabályozásban részt nem vevő forgó tömegeinek tehetetlenségi nyomatéka, N m s²; ω_m a mechanikai forgás szögsebessége, 1/s.

A turbina-generátorok felfutási időállandójának mintájára definálhatunk egy rendszerszintű T_ℓ (s) kinetikai lassulási időállandót:

$$T_\ell = \frac{\Theta_r \omega_{mn}^2}{P_{50}} \quad (3.5)$$

ahol ω_{mn} a mechanikai szögsebesség névleges értéke, 1/s; P_{50} a rendszer terhelése 50 Hz-en, MW. Ebből

$$\Theta_r = \frac{T_\ell P_{50}}{2 \omega_{mn}^2} \quad (3.6)$$

amit behelyettesítve (3.4)-be és átrendezve:

$$\frac{d\Delta\omega_m}{dt} = \frac{\omega_{mn}}{T_\ell} \frac{\omega_m M_{Vr} - \omega_m M_{Tr}}{P_{50}} \cdot \frac{\omega_{mn}}{\omega_m} \quad (3.7)$$

Az $\omega_m M_{Tr}$ egyenlő az üzemben maradt turbinák összteljesítményével, az $\omega_m M_{Vr}$ pedig a forrásoldali egység kiesése előtti villamos teljesítménnyel, ami egyensúlyban volt az üzemzavar előtti összfogyasztói teljesítménnyel, a különbségük egyenlő a kiesett ΔP_e erőművi teljesítménnyel:

$$\omega_m M_{Vr} - \omega_m M_{Tr} = \Delta P_e . \quad (3.8)$$

Mivel

$$\frac{\omega_{mn}}{\omega_m} \approx 1, \quad (3.9)$$

ezért a (3.7)-be helyettesítve a (3.8)-at és a (3.9)-et, kapjuk, hogy

$$\frac{d\Delta\omega_m}{dt} = \frac{\omega_{mn}}{T_\ell} \frac{\Delta P_e}{P_{50}} . \quad (3.10)$$

A mechanikai és villamos szögsebességek közötti összefüggés N póluspárszám esetén:

$$\omega = N\omega_m , \quad (3.11)$$

valamint

$$\omega_n = N\omega_{mn} = 2\pi f_n . \quad (3.12)$$

így

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = N \frac{d\Delta\omega_m}{dt} . \quad (3.13)$$

Ezeket az összefüggéseket behelyettesítve a (3.10)-be, azt kapjuk, hogy

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{2\pi f_n}{T_\ell} \frac{\Delta P_e}{P_{50}} . \quad (3.14)$$

A $\Delta\omega$ villamos szögsebesség-csökkenés kifejezhető a frekvenciakülönbséggel:

$$\Delta\omega = 2\pi f_n - 2\pi f \quad (3.15)$$

Ezen kifejezés felhasználásával, ill. egyszerűsítés után kapjuk az erőművi teljesítménykiesés esetén fellépő frekvenciacsökkenés sebességét:

$$\frac{df}{dt} = - \frac{f_n}{T_\ell} \frac{\Delta P_e}{P_{50}} \quad (3.16)$$

Tekintve, hogy a (3.5) szerint a T_ℓ lassulási időállandót a villamosenergia-rendszer üzemben maradt turbina-generátorainak a tehetetlenségi nyomatékával definiáltuk, ami a kiesett erőmű nagyságától függően változik, a T_ℓ időállandó is a kiesett teljesítménytől függően változik. Amennyiben nem egy adott esetben kell kiszámítani a frekvenciacsökkenés kezdeti sebességét, akkor célszerű a P_{50} fogyasztói terheléshez tartozó tehetetlenségi állandót alkalmazni. Így

$$\theta_r = \theta_{50} - \theta_e \quad (3.17)$$

ahol θ_e a kiesett erőmű turbina-generátorának tehetetlenségi állandója, $N m s^2$; θ_{50} a kiesés előtti összes turbina-generátor és fogyasztói berendezések fordulatszám-szabályozásban részt nem vevő forgó tömegeinek tehetetlenségi állandója, $N m s^2$.

Átrendezéssel és azzal a közelítéssel élve, hogy a tehetetlenségi állandók arányosak a villamos teljesítménnyel, azt kapjuk, hogy

$$\theta_r = \frac{\theta_{50} - \theta_e}{\theta_{50}} \theta_{50} = \frac{P_{50} - \Delta P_e}{P_{50}} \theta_{50} \quad (3.18)$$

A kapott közelítést behelyettesítve a T_ℓ (3.5) szerinti definíciójába, és $T_{\ell 50}$ jelölést használva:

$$T_{\ell} = \frac{P_{50} - \Delta P_e}{P_{50}} \frac{\Theta_{50} \omega_{mn}^2}{P_{50}} = \frac{P_{50} - \Delta P_e}{P_{50}} T_{\ell 50} \quad (3.19)$$

Kisebb erőművi kiesésnél a mért eredményekből a (3.16) alapján kiszámítható a rendszerre az 50 Hz körül érvényes lassulási időállandó:

$$T_{\ell 50} = \frac{f_n}{df/dt} \frac{\Delta P_e}{P_{50}} \quad (3.20)$$

A gyakorlatban $T_{\ell 50}$ -re 10-20 s vehető fel pontosabb adatok hiányában.

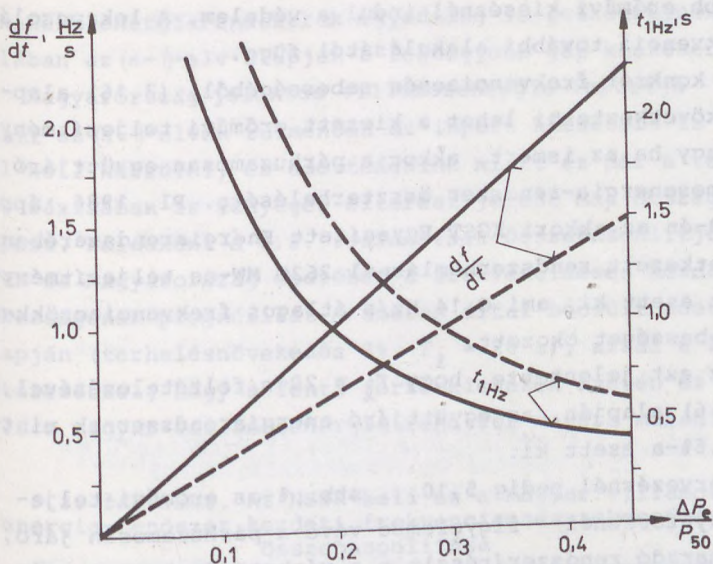
A (3.16)-ba helyettesítve a (3.19)-et, megkapjuk a nagyobb erőművi kiesésre is érvényes frekvenciacsökkenés kezdeti sebességét:

$$\frac{df}{dt} = - \frac{f_n}{T_{\ell 50}} \frac{\Delta P_e}{P_{50} - \Delta P_e} \quad (3.21)$$

A 3.6. ábra bemutatja a különböző forrásoldali kiesésnél kialakuló frekvenciacsökkenés kezdeti sebességét, valamint a rendszerfrekvenciának 1 Hz-zel történő csökkenésének idejét, feltételezve, hogy az erőművi szabályozók, valamint a fogyasztóknál a feszültség- és frekvenciacsökkenés hatása még nem érvényesül.

3.5.1. GYAKORLATI ALKALMAZÁS

A frekvencia névleges értékétől való eltérés mind a termelő-, mind a fogyasztóberendezésekre kedvezőtlen, esetenként káros hatással van. A frekvenciacsökkenés tulajdonságainak ismerete már a tervezés fázisában segíthet a hátrányos következmények mérséklésében.



3.6. ábra. Frekvenciacsökkenés kezdeti sebessége, valamint 1 Hz frekvenciaeséshez szükséges időtartam különböző teljesítménykiesésnél és különböző lassulási időállandónál

Magyar viszonyok között pl. a következő körülmény támasztja alá a frekvenciacsökkenés ismerete alakulásának időszerűségét. A Paksi Atomerőműben a reaktorban termelt hő elszállításában létfontosságú a főkeringtető szivattyúk üzeme, ezért teljesítményfelvételükkel is ellenőrzik a hűtővíz elszállítását. Ha olyan üzemzavar keletkezik, amikor a frekvenciacsökkenés sebessége nagyobb lenne, mint 1 Hz/s, akkor a szivattyúk nagy inerciája miatt a kifutás meghosszabbodna, és a teljesítményfelvétel olyan mértékben csökkenne, hogy a reaktor egyik üzemzavari védelmi fokozata 3 s múlva működésbe lépne [35]. A bemutatott módszer alapján megállapítható, hogy mintegy 2%-nál

nagyobb erőművi kiesésnél indul a védelem. A lekapcsolás a frekvencia további alakulásától függ.

A konkrét frekvenciaesés sebességéből, (3.16) alapján, következtetni lehet a kiesett erőművi teljesítményre, vagy ha az ismert, akkor a párhuzamosan együttjáró villamosenergia-rendszer összterhelésére. Pl. 1986. április 19-én az akkori KGST Egyesített Energiarendszerében bekövetkezett rendszerbomlásnál 2620 MW-os teljesítményimport esett ki, ami 0,14 Hz/s átlagos frekvenciacsökkenés-sebességet okozott.

Ez azt jelentette, hogy $T_{\lambda} = 20$ s feltételezésével, a (3.16) alapján, az együttjáró energiarendszernek mintegy 2,6%-a esett ki.

Tervezésnél pedig 5,10,...stb. %-os erőművi teljesítménykiesésnél - figyelembe véve a párhuzamosan járó, ill. maradó rendszer(rész)t - a várható frekvenciaesés, ill. frekvenciacsökkenés sebessége a módszerrel becsülhető.

3.5.2. A FREKVENCIACSÖKKENÉS KEZDETI SEBESSÉGÉNEK PROGNOSZTIZÁLÁSA

Az erőművi teljesítmény távlati tervezésénél a legtöbb villamosenergia-rendszerben (nemzeti vagy vállalati) valószínűségelméleti alapon határozzák meg a teljesítménykiesést. Az üzemvitel előkészítésénél, valamint a hálózat tervezésénél azonban majdnem mindenütt determinisztikusan veszik fel az erőművi kiesést. Pl. az UCPTÉ rendszerben az $(n-2)$ -elv alapján a két legnagyobb atomerőműblokk, a NORDEL-ben az $(n-1)$ -elv alapján a legnagyobb gép kiesésével számolnak [27]. A frekvenciaesést NSZK-ban 2 db 1250 MW-os atomerőművi blokk kiesésére vizsgálják [28]. A kelet-európai országok Egyesített Villamosenergia Rendszerében a legnagyobb erőművi blokk, az 1000 MW-os atomerőművi egység kiesése a tervezési kritérium.

A kisebb energiarendszerek egyedileg is felkészülnek általában az $(n-1)$ -elv alapján a legnagyobb gép kiesésére.

Magyarország jelentős villamosenergia-importja miatt az $(n-1)$ -elven túlmenően az import kiesésére is fel kell készülni, és adottságaink miatt ez már a tervezés fázisában is lényeges eltérést jelent más országokhoz képest. Példaként a 3.2. táblázatban összehasonlítjuk az NSZK és Magyarország esetében a frekvenciaesés kezdeti sebességének prognózisát a szerző által becsült adatok alapján (terhelésnövekedés 3%, $T_0 = 20$ s), azzal a feltételezéssel, hogy a fenti forráskiesések esetén az NSZK, ill. a magyar villamosenergia-rendszer magára marad.

3.2. táblázat. Az NSZK-beli és a magyar villamosenergia-rendszer kezdeti frekvenciaesés-sebességének összehasonlítása

Ország	Gépkiesés	Frekvenciaesés sebessége, Hz/s	
		1990	1995
NSZK	$n-2$	0,13	0,12
Magyarország	$n-1$ +import	1,15	1,30

A nagy eltérést a számításba vehető kieső teljesítmény és a rendszerteljesítmény aránya adja.

A számított kezdeti frekvenciaesés-sebesség várható jövőbeli alakulása meghatározza azt a feladatot, amelynek megoldására az egyes nemzeti villamosenergia-rendszerek előre felkészülhetnek.

4. VILLAMOSENERGIA-FOGYASZTÓK TERHELÉSKORLÁTOZÁSA

4.1. A VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÜZEMÁLLAPOTAI ÉS A FOGYASZTÓI TERHELÉSKORLÁTOZÁS KAPCSOLATA

A villamosenergia-termelők és -elosztók nem mindig tudják kielégíteni a villamosenergia-szolgáltatás műszaki-gazdasági követelményeit objektív és szubjektív okokból, és ezért a fogyasztók ellátásának helyzete, ill. a rendszer elemeinek igénybevétele szempontjából különböző üzemállapotba juthat egy villamosenergia-rendszer. Ezekre vonatkozóan az irodalomban találhatóak meghatározások [9-65]. Felhasználásuk során célszerűnek látszik figyelembe venni a hazai gyakorlatot és üzemzavar-meghatározást is [66], így a villamosenergia-rendszer üzemállapotai a következők lehetnek.

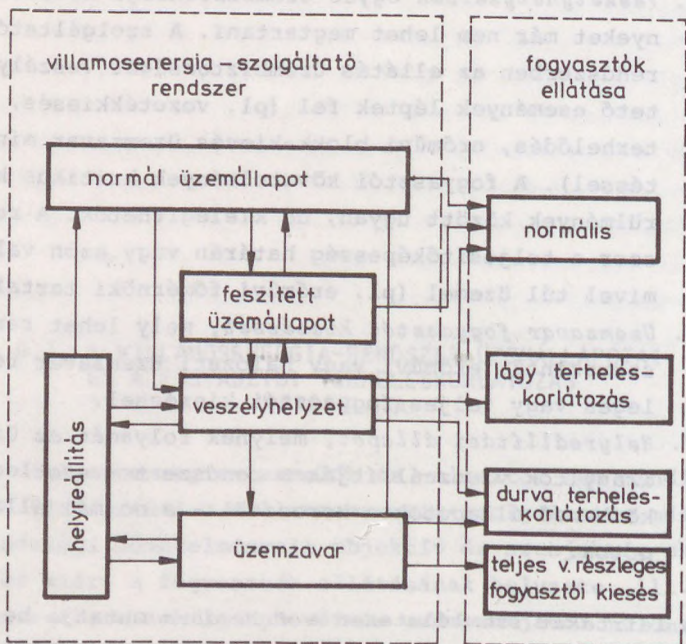
- I. *Normál üzemállapot*: ekkor a fogyasztói, üzembiztonsági és gazdasági követelmények maradéktalanul kielégíthetőek.
- II. *Fokozott figyelmet igénylő üzemállapot*: amikor fennáll a veszélye annak, hogy olyan események következnek be, melyek a villamosenergia-termelést, a termelési készséget, a villamosenergia-elosztást,

a rendszer üzembiztonságát veszélyeztetik. A gazdasági követelmény kielégítése másodrangú.

- III. *Veszélyhelyzetben* egyes üzembiztonsági követelményeket már nem lehet megtartani. A szolgáltató rendszerben az ellátás üzembiztonságát veszélyeztető események léptek fel (pl. vezetékkiesés, túlterhelődés, erőművi blokk-kiesés üzemzavar minősítéssel). A fogyasztói követelmények kritikus körülmények között ugyan, de kielégíthetők. A rendszer a teljesítőképesség határán vagy azon valamivel túl üzemel (pl. erőművi főmérnöki tartalék).
- IV. *Üzemzavar fogyasztói kieséssel*, mely lehet rendszerszintű, erőművi vagy hálózati üzemzavar részleges vagy teljes fogyasztói kieséssel.
- V. *Helyreállítási állapot*, melynek folyamán az üzemirányítók visszaállítják a rendszert - esetleg közbenső állapotokon keresztül - a normál állapotba.

A leírtakat szemléletesen a 4.1. ábra mutatja be. A villamosenergia-rendszer üzemállapotának megfelelően a fogyasztói terheléscsökkentések, korlátozások iránti igény is különböző. Nem merül fel átmeneti terheléscsökkentés szükségessége a normál (I.) és a fokozott figyelmet igénylő (II.) üzemállapotban. A veszélyhelyzetben (III.) már felmerülhet a terheléscsökkentési igény, pl. ha előre látható a terhelés növekedése miatt az erőművi és fogyasztói teljesítményegyensúly hiánya.

Az esetleges teljesítményhiány bekövetkezését műszaki-gazdasági okból még a tervezés fázisában sem lehet kizárni, ezért külföldön is, országunkban is a szolgáltatóknak fel kell készülniük és fel is készülnek a teljesítmény-egyensúly helyreállítására. A felkészülést az



4.1. ábra. Villamosenergia-rendszer üzemállapotainak és a fogyasztói terheléskorlátozásnak a kapcsolata

esetleges végrehajtás helye szerint a következőképpen csoportosíthatjuk.

a) Erőművek:

- forgó- és hidegtartalékok igénybevétele;
- erőművi blokkok rövid ideig tartó túlterhelései, figyelembe véve a túlterhelés esetleges következményeit és lehetőségeit (pl. tüzelőanyag),

- hőszolgáltató gépek csúcsrajzátása a hőigények kielégítésének módosításával, a hőtávvezetékek kapacitásának kihasználásával, a külső hőmérséklet figyelembevételével.

Ez utóbbi két intézkedés hatása műszaki okok miatt csak rövid idejű.

b) Villamosenergia-rendszerek együttműködésének kihasználása:

- üzemzavari kiségités vásárlása, esetleg visszashállítási kötelezettséggel, párhuzamos üzemben vagy szigetüzemben.

A kiségités eredményessége a partnerrendszerrel és a berendezések átviteli képességétől függ.

c) Fogyasztói terheléskorlátozás:

- lágú terheléskorlátozás, mint pl. feszültségcsökkentés, ami a fogyasztót nem zavarja, ha a feszültség a szabványban előírt tűréshatáron belül van;
- durva korlátozás, amely a fogyasztónál vagy kézi, vagy műszaki berendezések révén automatikus úton történő kikapcsolást, feszültségkimaradást jelent, és így ellátási zavart okoz.

A fogyasztói korlátozás esetén egész rövid időtől több óráig, napig, hónapig, tehát tartós ideig tarthat a teljesítményhiány megszüntetésének időtartama.

A villamosenergia-korlátozásnak különféle módjai lehetnek. A villamosenergia-rendszerben üzemzavar vagy

rendellenes üzemállapot (erőművi teljesítménykiesések, importkorlátozások, hálózati zavarok, tüzelőanyaghiány stb.) esetén az üzemirányító személyzet először minden intézkedést megtesz a tartalékok üzembevitelére, ill. kiküszöbölésére, és ha ez bármely ok miatt nem lehetséges, ill. nem elegendő, akkor kerül sor a terhelési egyensúly biztosításának érdekében a fogyasztói vételezés csökkentésére.

A villamos energia fogyasztói terheléskorlátozását alapvetően kétféle jogi feltételrendszer mellett lehet alkalmazni:

1. a fogyasztó és a szolgáltató közötti kétoldalú szerződéssel,
2. hatósági intézkedésrendszer biztosította formában.

Magyarországon napjainkig a hatósági intézkedési rendszer biztosítja a villamos terheléskorlátozások kidolgozását és alkalmazását. A kialakult hazai gyakorlat szerint a fogyasztói korlátozás két különböző csoportra oszlik:

- az előrelátható, tartós;
- az előre nem látható, üzemzavari

korlátozásokra, a rendszermentő intézkedések sürgőssége, időtartama és a rendszer várható üzemviszonyai alapján.

Az *előrelátható, tartós fogyasztói terheléskorlátozás* lényeges jellemzője, hogy a rendszerüzemzavar fellépésének időpontjában az együttműködő villamosenergia-rendszerben teljesítményhiány még nem lép fel. Ebben az esetben ugyanis a fogyasztói összterhelést az összes erőművi hidegtartalék üzembeállításával vagy/és importkiszegítésekkel fedezni lehet, azonban az illetékesek az üzemzavar jellegéből meg tudják állapítani, hogy az el-

hárítás várható időtartamán belül a megnövekedő fogyasztói terhelés már nem elégíthető ki, azaz előrelátható módon teljesítményhiány fog fellépni. Minthogy az üzemzavar fellépése után általában csak néhány órával később jelentkezik a hiány, így megfelelő idő áll rendelkezésre a szükséges korlátozások - előkészített - végrehajtására. A tervszerűség érdekében a fogyasztókkal előre egyeztetni kell a kikapcsolandó teljesítményt, a szükségleteknek megfelelő fokozatokban és sorrendben.

Az üzemzavari terheléskorlátozási formára, ill. alkalmazására akkor kerül sor, ha a villamosenergia-rendszer előző nap még egyensúlyban tervezett menetrendje mellett az erőművekben gépegységnyi hiány, az importot szállító távvezetékek meghibásodása vagy az egyesített energiarendszer üzemzavara következtében váratlan teljesítményhiány lép fel.

Az előrelátható, tartós korlátozási módhoz képest a leglényegesebb különbség tehát az, hogy a rendszerben az üzemzavar fellépésével egyidejűleg jelentkezik a teljesítményhiány. Ezért az importot szállító távvezetékek túlterhelődésének megakadályozása, az együttműködő rendszer szétesésének és a frekvencia letörésének elkerülése gyors intézkedéseket követel meg.

A korlátozás esetére is - meghatározott fogyasztók bevonása révén - korlátozási sorrendet kell összeállítani. A sorrendet több változatra készítik el, nevezetesen a szóbeli és az automatikus, frekvenciafüggő és frekvenciafüggetlen terheléskorlátozásra. A szóbeli korlátozási forma olyan üzemzavari esetekre vonatkozik, amikor a teljesítményhiány nem von maga után frekvenciacsökkenést, és van idő a viszonylag több időt igénylő végrehajtásra. Ha a teljesítményhiány fellépésekor a periódus is letörik, frekvenciafüggő automatikus terheléskorlátozásra kerül sor.

A korlátozás végrehajtása szempontjából csoportosítva a gyakorlatot, a következő felosztást kapjuk:

- a fogyasztói berendezéseknél szóbeli felszólításra *kézi úton* végrehajtott korlátozás, amely lehet
 - a) tartós (egy óránál hosszabb),
 - b) üzemzavari;
- áramszolgáltatónál és/vagy fogyasztónál végrehajtott, *automatikus* üzemzavari korlátozás, amely lehet
 - a) frekvenciafüggő,
 - b) frekvenciafüggetlen;
- a villamosenergia-szolgáltatónál végrehajtott műszaki intézkedés eredményeképpen *lágú terheléscsökkentés*.

A továbbiakban ezen felosztás alapján először a kézi úton végrehajtott tartós, majd az automatikus durva korlátozás, végül a lágú terheléscsökkentés területén kifejlesztett új módszerekkel foglalkozunk.

4.2. FREKVENCIAFÜGGŐ TERHELÉSKORLÁTOZÁS

A villamosenergia-rendszerek frekvenciájának állandó névleges értéken tartását normál üzemállapotban olyan automatikus rendszer biztosítja, amely a hatásosteljesítmény-igény előre nem tervezhető változásait az erre a célra kijelölt erőművek teljesítményének szabályozásával egyenlíti ki.

Amint az 1.5. pontban bemutattuk, a villamosenergia-rendszer üzeme során kialakulhatnak olyan üzemzavari helyzetek, amelyekben az automatikus rendszer már nem

képes a frekvencia szintjét a megadott értéken tartani, és a frekvencia a teljesítményhiány mértékétől függően csökken.

A frekvenciacsökkenés tovább csökkenti az erőművi kapacitásokat azáltal is, hogy a segédüzemi berendezések (szivattyúk, ventilátorok) teljesítménye is csökken, amely a generátorteljesítmények további csökkenésével a rendszer összeomlásához vezet. Az energiarendszer, ill. rendszerek szétesésének megelőzésére a frekvenciafüggő terheléskorlátozó automatika (FTK) szolgál.

Egy teljesítményhiányossá vált rendszerben tipikus frekvenciacsökkenési eseteket az 1.4. ábrán mutattuk be. A legkedvezőbb eset az, ha a forgótartalék nagyobb, mint a kiesett teljesítmény, és az automatikus szabályozóberendezések a teljesítményhiányt kompenzálni tudják a forgótartalékból. Ha olyan nagy teljesítményhiány lép fel, amely a korábbi fejezetben tárgyaltak szerint az erőművi szabályozás és a fogyasztói magatartás változással együtt sem tartható egyensúlyban, akkor a frekvenciaösszeomlás következtében az összes fogyasztó vagy legalábbis nagy részük hosszú ideig feszültség nélkül marad. Amennyiben idejekorán megfelelő mennyiségű frekvenciafüggő fogyasztói terheléskorlátozásra kerül sor a fogyasztók egy részénél, akkor a termelés-fogyasztás egyensúly megmarad, a kikapcsolt fogyasztók viszonylag rövid időn belül visszakapcsolhatók a megtett üzemirányítói intézkedések eredményeképpen. Tehát a frekvenciafüggő terheléskorlátozás nemcsak a villamosenergia-rendszer irányítónak fontos, annak érdekében, hogy az erőművek és hálózat párhuzamos üzemben maradjon, hanem még az érintett fogyasztóknak is, a hosszabb idejű ellátáshiány elkerülése érdekében (lásd az 1.6. pontot).

Meg kell jegyezni, hogy a frekvenciacsökkenés megszüntetéséhez, ill. a frekvencia névleges értékre törté-

nő visszaszállításához szükséges idő döntően a teljesítményhiány nagyságától, a kikapcsolt fogyasztói teljesítménytől és a szabályzóberendezések hatékonyságától függ, amint ezt az előzőekben már részletesen megvizsgáltuk.

A frekvenciafüggő terheléskorlátozó automatika-rendszer tehát a jelentős frekvenciacsökkentéssel járó üzemi zavari helyzetekben a frekvencia adott érték alá csökkenésének megakadályozására, ill. a frekvenciának az erőművek megbízható üzeméhez szükséges szintre való emelésére szolgál. (Az erőművi teljesítőképesség fenntartása a magyar villamosenergia-rendszerben rendkívüli jelentőséggel bír a Paksi Atomerőmű nagy teljesítmény-aránya, ugyanakkor az átlagosnál nagyobb frekvenciaérzékenysége miatt.) Az FTK rendszer tehát csak a frekvencia olyan mértékű csökkenése esetén lép működésbe, amely az energiarendszer erőműveinek üzembiztonságát, a rendszer megbízható párhuzamos üzemét, azaz a fogyasztók nagy tömegének ellátását veszélyezteti.

Ahhoz, hogy az FTK rendszer feladatát megfelelő módon lássa el, az következő követelményeket kell kielégítenie |102|:

1. Rugalmas legyen, hogy a különböző üzemi zavari helyzetekben is biztosítsa a nagy kiterjedésű, nagy teljesítményű, bonyolult struktúrájú energiarendszerben a frekvenciacsökkenés megállítást, ill. a frekvencia szükséges szintre emelését.
2. Csak a frekvenciacsökkenés megállításához feltétlenül szükséges fogyasztót kapcsoljon ki.
3. Ne engedje a frekvenciát egy meghatározott időtartamot meghaladóan az erőművek üzemét veszélyeztető szint alá csökkenni.

4. Biztosítsa a frekvencia emelését a villamosenergia-rendszer tartós, párhuzamos üzemeléséhez, az üzemzavar terjedése nélkül.
5. Az üzemzavar okozta károk minimalizálása mellett működjön.

E sokoldalú követelmény-rendszernek elsősorban az FTK rendszerbe bevont fogyasztói teljesítmények frekvencia és késleltetés szerinti fokozatokra bontásával lehet eleget tenni, miáltal csökkenthető az egyes fokozatokhoz tartozó korlátozott teljesítmény is. A kis késleltetésű, gyors működésű FTK fokozatok a frekvencia kis értékre való csökkenésének megakadályozására, a nagyobb késleltetésű ún. lassú fokozatok pedig a kis értéken stabilizálódott frekvencia elfogadható szintre emelésére szolgálnak.

Az FTK rendszerek a villamosenergia-rendszer szempontjából kétséggkívül hasznosak, a korlátozásba bevont fogyasztókra nézve azonban komoly hátrányokkal járnak. A fogyasztók ugyanis általában nehezen viselik el a váratlan lekapcsolásokat, mégha az hosszabb távon az érdekükben is történik.

Az automatikus frekvenciafüggő korlátozás végrehajtására a sorrendben szereplő fogyasztóknál és ellátási körzetekben automatikákat szerelnek fel, amelyek szükség szerint kapcsolják le a fogyasztói terheléseket.

A magyar villamosenergia-rendszer FTK korlátozási értékének meghatározása az alábbi szempontok alapján történik:

1. A magyar villamosenergia-rendszer a Villamos Energia Rendszeregyesülés (VERE) része, így biztosítani kell a rendszerek összértékének megfelelően egyeztetett, koordinált korlátozást. A terheléskorlátozások teljesítményelosztása az egyes energia-

rendszerek között a rendszerteljesítmények arányában történik:

$$P_{\text{FTK}_i} = P_{\text{FTK}_{\text{VERE}}} \frac{P_i}{P_{\text{VERE}}}, \quad (4.1)$$

ahol P_{FTK_i} az i -edik rendszer FTK-ba bevont fogyasztói terhelése; $P_{\text{FTK}_{\text{VERE}}}$ a párhuzamosan járó villamosenergia-rendszer egészében szükséges FTK volumen; P_i az i -edik rendszer teljesítménye; P_{VERE} a párhuzamosan járó villamosenergia-rendszer-egyesülés összteljesítménye.

2. A legkedvezőtlenebb esetre feltételezhető üzemi helyzetek egybeesése esetén is biztosítani kell a frekvencia elfogadható szinten való stabilitását. Ez rendszerenként különböző érték lehet, nem ritka az olyan rendszer, ahol 60%. A magyar villamosenergia-rendszerben a legkedvezőtlenbbek a teljes import és a legnagyobb teljesítményű erőművi blokk egyidejű kiesése tekinthető, vagyis

$$P_{\text{FTK}} = P_{\text{imp}} + P_{\text{max blokk}}, \quad (4.2)$$

ahol P_{FTK} a magyar villamosenergia-rendszerben automatikusan korlátozandó teljesítmény; P_{imp} az importált teljesítmény; $P_{\text{max blokk}}$ a legnagyobb erőművi blokk teljesítménye.

Az egyidejűség miatt a korlátozásba bevont fogyasztók a névleges teljesítményüknél csak kisebb teljesítménycsökkenést biztosítanak lekapcsolás esetén. Gyakorlati tapasztalatok alapján az egyidejűségi tényező értéke 0,8. Másik szempont, hogy a villamosenergia-rendszer

csúcsterhelése a nyári időszakban a téli értéknél alacsonyabb, a mérések szerint az arány 0,75. E két tényező figyelembevételével tehát ahhoz, hogy az FTK rendszer a nyári időszakban is működőképes maradjon, a téli maximumra meghatározott elméleti érték 1,67-szeresének megfelelő névleges teljesítményű fogyasztót kell ténylegesen automatikával felszerelni.

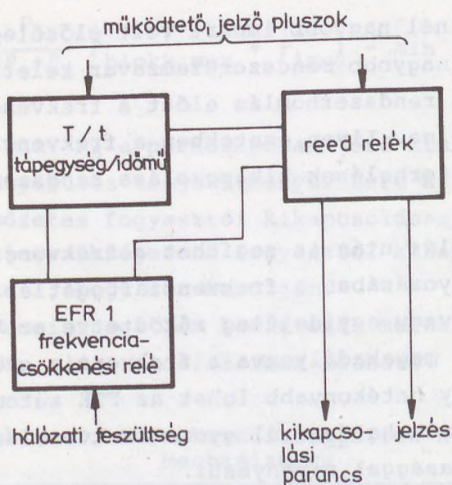
A magyar villamosenergia-rendszer importhánya - da a környező energiarendszerekhez képest az átlagosnál magasabb FTK teljesítmény biztosítását kívánja meg, amely nehézségeket jelent a fogyasztók kiválasztásánál. A hazai gyakorlatban ugyanis a hatósági elrendelésű korlátozások elsősorban az ipari fogyasztókat érintik. A kijelölnél azonban különös gondossággal kell eljárni a tekintetben, hogy az élet- és vagyonbiztonság érvényesüljön úgy, hogy minél nagyobb egységteljesítményű fogyasztók legyenek kikapcsolva a technológia lehetőségek függvényében. Az FTK szempontjából ideálisan jó fogyasztó pl. az alumíniumkohó, rendkívül kedvezőtlen ugyanakkor az olajfinomító vagy vegyiüzem, nagy egységteljesítménye ellenére. Az igen magas korlátozási teljesítmény (az együttműködő rendszer csúcsterhelésének mintegy 60%-a) biztosítása a fogyasztói szerkezetből adódóan egymagában csak az ipari fogyasztók igénybevételével nem oldható meg. Az ipari fogyasztók terhelésének részaránya ugyanis a fogyasztói nettó terhelésből ennél kevesebb, így a különbséget egyéb ellátási körzetek korlátozásával kell biztosítani. Ez a körülmény azonban alapvetően más problémákat vet fel a kiválasztásnál, mint amit az ipari fogyasztóknál kell megoldani. A teljesség igénye nélkül csak pl. a lakossági, kommunális, egészségügyi, közlekedési, közvilágítási energiaszolgáltatás szünetérzékenységre kell felhívni a figyelmet. A vázolt ellentmondást úgy célszerű feloldani, hogy a nagyobb frekvenciához, te-

hát várhatóan többször működő fokozatokba sorolják be a nagy egységteljesítményű ipari fogyasztókat, a későbbi és ezáltal ritka működési valószínűségi fokozatba pedig az egyéb ellátási körzeteket. Fontos szempont továbbá, hogy a korlátozásba bevont fogyasztók és körzetek egyenletes területi elosztásúak legyenek, hogy egy esetleges FTK működés távvezeték-túlterhelődéshez ne vezessen.

A jelenleg érvényes FTK korlátozási rendszer fokozatainak és teljesítményértékeinek az első négy fokozata nemzetközileg egyeztetett minimális érték. Az ötödik fokozat a frekvencia nagymértékű, gyors csökkenése esetén lép működésbe. A hatodik fokozat az alacsony szinten stabilizálódott frekvenciát emeli ismét elfogadható szintre.

Az FTK automatikus korlátozó rendszer megfelelő be rendezést igényel a frekvenciaváltozás érzékelésére és a beavatkozásra. Hazai viszonylatban a VEIKI által kifejlesztett EFR-3 típusú elektronikus frekvenciafüggő terheléskorlátozó automatikát alkalmazzák (4.2. ábra). Az EFR-3 típusú készülék három fő részből áll: az EFT-1 típusú, nagy pontosságú és kis hiszterézisű félvezetős frekvenciareléből, a T/t₁ típusú tápegységből és időműből és a Reed 622 kimenő tagból. A három egység külön-külön dugaszolható kivitelben készült.

Az EFR-1 típusú, nagy pontosságú és kis hiszterézisű frekvenciarelé kielégíti azt a követelményt, hogy nem kell a relét a szükségesnél alacsonyabb értékre állítani, és nem szükséges nagy időzítést alkalmazni. A kis hiszterézis azt jelenti, hogy a megszólalási és elengedési frekvenciaérték hányadosa az ún. ejtőviszony nagyobb, mint 0,999, a pontosság pedig $H \geq 0,1\%$.



4.2. ábra. Frekvenciafüggő fogyasztói terheléskorlátozó automatika [EFR 3 típusú, VEIKI (Budapest) gyártmány] moduljainak kapcsolási vázlata

4.3. FREKVENCIAFÜGGETLEN TERHELÉSKIKAPCSOLÁS, RENDSZERBONTÁS

Vannak olyan üzemzavarok, melyek nem járnak frekvenciacsökkenéssel. Ilyen eset fordul elő, ha az együttműködő villamosenergia-rendszeregyesülés egyik viszonylag kisebb teljesítményű rendszerében egy nagy blokk kiesik. Ekkor a rendszeregyesülés frekvenciája a teljesítményarányok miatt alig érzékelhetően változik. Pl. egy 300 000 MW-os rendszeregyesülésben egy 1000 MW-os blokk kiesése mintegy 0,005 Hz változást okoz. Viszont a viszonylag kis rendszer rendszer-összeköttetései a teljesítményarányokkal fordított arányban terhelődnek. Ekkor pl. egy 10 000 MW-os rendszer összeköttetéseire több mint 900 MW zúdulhat a kiesett 1000 MW-ból. Ha a távvezetékek átviteli képessége ezt nem bírja, akkor rendszerbomlás kö-

vetkezik be. Minél nagyobb import volt előzőleg a vezetékeken, annál nagyobb rendszerüzemzavar keletkezhet anélkül, hogy a rendszerbomlás előtt a frekvencia érdemben csökkent volna. Ilyen esetekben a frekvenciafüggetlen fogyasztói terhelések kikapcsolása rendszermentő hatású lehet.

Rendszerbomlás után is segíthet a frekvencia-összeomlás megakadályozásában a frekvenciafüggetlen korlátozás, megelőzve vagy egyidejűleg működtetve az FTK automatikákkal és így megakadályozva a frekvencia gyorsabb csökkenését. Így hatékonyabb lehet az FTK automatikák működése, amelyeknek hatása túl gyors frekvenciaesésnél nem kellő gyorsasággal érvényesül.

Ha egy rendszeren keresztül villamos energiát tranzitálnak, akkor is felléphetnek a frekvencia jelentős változása nélküli, veszélyes mértékű teljesítményáramlások az előbbiekkal azonosan súlyos következményekkel.

A frekvenciafüggetlen fogyasztói korlátozás alapja tehát az, hogy a rendszer-összeköttetések terhelése veszélyes mértékben ne növekedjen meg, korlátozni kell akkor, ha

$$Z + P_{\text{imp}} \geq cP_{\text{meg}} \quad (4.3)$$

ahol Z a rendszer-összeköttetés véletlen jellegű üzemi zavari terhelésnövekedése; P_{imp} az importált teljesítmény; P_{meg} a rendszer-összeköttetés megengedett terhelése; c egy biztonsági tényező.

Tekintve, hogy az értékek időben változnak, a legveszélyesebb helyzetre kell felkészülni, ami ha Z -t a $P_{\text{blokk max}}$ legnagyobb gépegységgel hozzuk kapcsolatba, akkor a (4.3) egyenlet felhasználásával a maximális korlátozás

$$\max \left(\frac{P_1}{P_1 + P_2} P_{\text{blokk max}} + P_{\text{imp}} \right) - \min (cP_{\text{meg}}) , \quad (4.4)$$

ahol a P_1 , ill. P_2 a párhuzamosan járó kis rendszer, ill. a rendszeregyesülés teljesítménye. Erre az értékre célszerű lépcsőzetes fogyasztói kikapcsolással felkészülni, így csak a legszükségesebb fogyasztói kikapcsolás végrehajtására kell, hogy sor kerüljön.

A frekvenciafüggetlen korlátozás mechanizmusa a leírtak alapján a 4.1. táblázatban látható.

4.1. táblázat. A frekvenciafüggetlen korlátozás mechanizmusa

Indítás oka	Ellenőrzés módja	Végrehajtás
Rendszer-összeköttetések veszélyes terhelődése (mind import, mind tranzit esetén)	Automatika Kézi (üzemirányító tapasztalata szerint)	Alállomásokon vagy nagy fogyasztóknál több fokozatban
Erőművi gépkiesés	Automatika + terhelést vizsgáló számítógép	
Rendszerbomlás következtetett be	Automatika	

A magyarországi villamosenergia-rendszernek, kis teljesítményhányada miatt, érdeke a frekvenciafüggetlen korlátozó automatika (FKA) rendszer alkalmazása a kaszkád bomlások elkerülése érdekében, az erőművi termelés és fogyasztás egyensúlyának megteremtése révén. Alkalmazása

csak nemrégén kezdődött meg. A korlátozásba bevont fogyasztók kiválasztása a korábban tárgyalt FTK rendszernél ismertetett szempontok alapján történik.

Az 1990-ben hazánkban alkalmazott FKA sorrend névleges korlátozási teljesítményei:

A fokozat: az FTK 8,4%-a

B fokozat: az FTK 4,7%-a

C fokozat: az FTK 5,2%-a

Összesen az FTK 18,3%-a

Az 1990-es évek elején FKA rendszer automatikus indító szervei az albertirsai állomáson és a Paksi Atomerőműben vannak, kézi indítás pedig az Országos Villamos Teherelosztó (OVT) vezénylőjéből lehetséges. Az indítási módok az alábbiak:

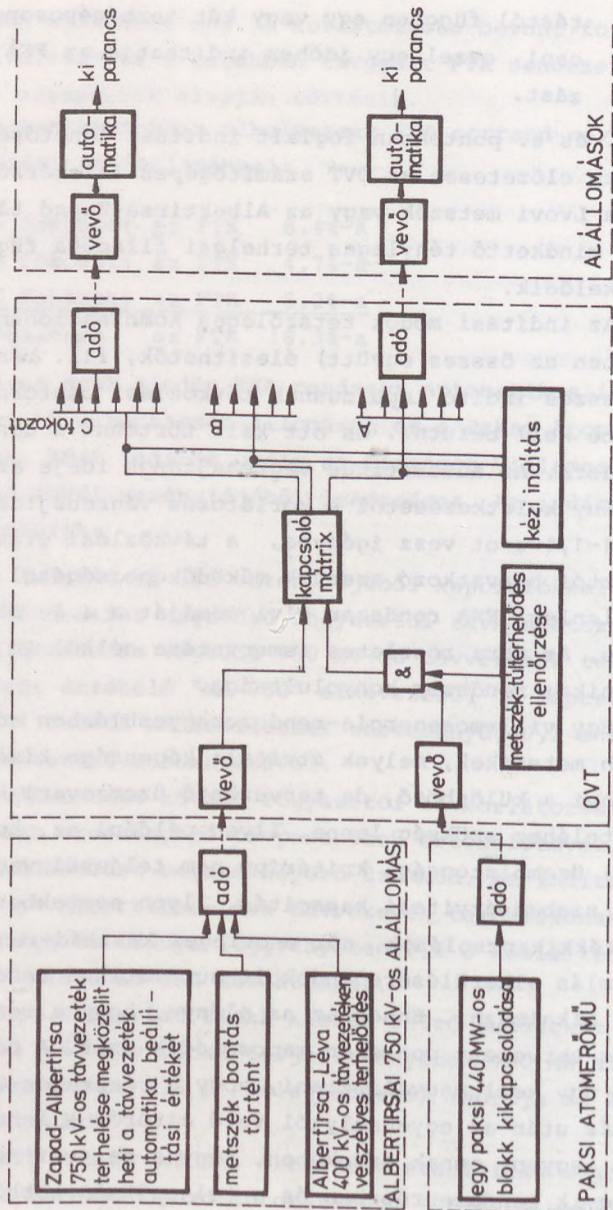
1. Kézi indítás az OVT vezénylőjéből kapcsolókkal.
2. Metszékbontást megelőző fogyasztói távkorlátozás az Albertirsán végződő 750 kV-os távvezeték terhelését érzékelő "MA-750" elnevezésű, 16 lépcsőben 1116-1800 MW beállítási tartományú, 0,2 s-os késleltetésű automatikával.
3. Metszékbontást követő fogyasztói távkorlátozás a bontást eredményező távparancsok érzékelésével.
4. Kaszkádbomlást megakadályozó üzemmód. Az indítóelem az Albertirsá-Léva távvezeték terhelésének nagysága és iránya függvényében 0,2 s késleltetéssel indítja az FKA korlátozást.
5. A Paksi Atomerőmű Blokk-kiesés Jelző Rendszere (BKJK) bármely blokk teljesítményének 100 MW alá csökkenésekor 0,5 s késleltetéssel indítja az FKA korlátozást.
6. A Paksi Atomerőmű ún. tranziens stabilitás megbomlását megakadályozó automatikája (SIVA) a beállítási

tástól függően egy vagy két turbógépcsoportot kikapcsol, ezzel egy időben indíthatja az FKA korlátozást.

Az 5. és 6. pontokban foglalt indítási lehetőségek mindegyike előzetesen az OVT számítógépes ellenőrző rendszerén a Lvovi metszék vagy az Albertirsa-Zapad távvezeték, vagy mindkettő tényleges terhelési állapota függvényében értékelődik.

Az indítási módok tetszőleges kombinációban (szélső esetben az összes együtt) élesíthetők, ill. béníthatók. Az összes indító impulzusnak távközlési csatornákon az OVI-be kell befutni, és ott kell történni a döntés végrehajtásra. Az automatikus végrehajtások ideje az indító esemény keletkezésétől a korlátozás végrehajtásáig elvileg 1-1,1 s-ot vesz igénybe, a távközlési utak és a fogyasztói beavatkozó szervek működőképességétől függően. A jelenlegi FKA rendszer elvi sémáját a 4.3. ábra mutatja be. Az ábra részletes ismertetése nélkül is kitűnik a technikai rendszer bonyolultsága.

Egy villamosenergia-rendszeregyesülésben adódhatnak olyan metszések, melyek átviteli képessége kisebb, mint amennyi a különböző, de tervezhető üzemzavari kiegészítések átviteléhez szükség lenne. Ilyen például az, hogy az $(n-1)$ üzembiztonsági kritérium nem teljesül vagy nincs elég szabad átviteli kapacitás. Ilyen esetekben a spontán vezetékkipcsolások, sőt esetleges kaszkád-rendszerösszeomlás elkerülésére indokolt automatikus rendszerbontást alkalmazni. Ennek az az előnye, hogy a rendszeregyesülés tervezett pontokon kapcsolódik szét. A bontás helyét úgy kell megválasztani, hogy a részrendszerekben a bontás után az egyensúlytól való eltérés a lehető legkisebb legyen, annak érdekében, hogy a teljesítményhiány az egyik rendszerrészben és a teljesítménytöbblet a másik rendszerrészben szabályozóberendezésekkel, végső



4.3. ábra. Frekvenciafüggetlen korlátozási rendszer elvi működési sémája [104]

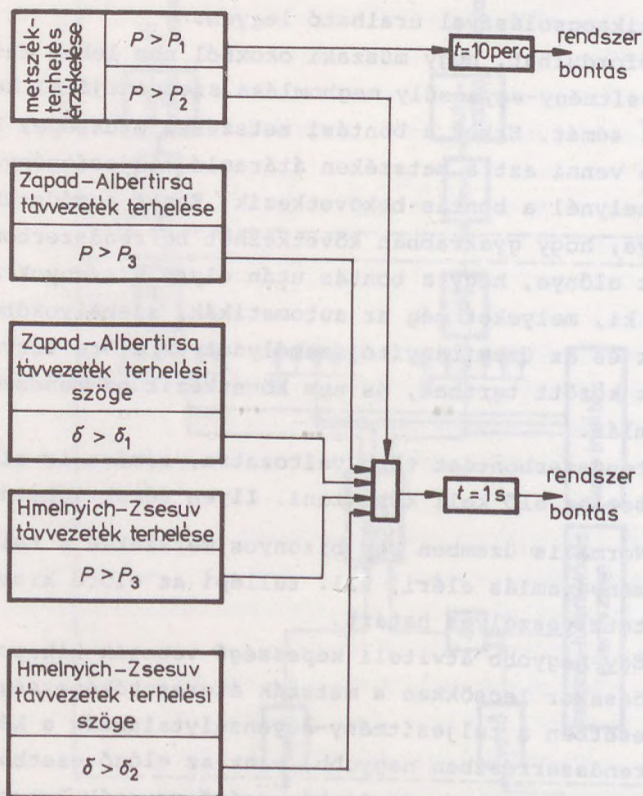
esetben fogyasztói terheléskikapcsolással, ill. erőművi gépek kikapcsolásával uralható legyen.

Előfordulhat, hogy műszaki okokból nem lehet találni a teljesítmény-egyensúly megbomlása szempontjából kedvező bontási sémát. Ekkor a bontási metszéken szükséges kisebb értékre venni azt a metszéken átáramló teljesítményértéket, amelynél a bontás bekövetkezik. Ennek a módszernek hátránya, hogy gyakrabban következhet be rendszerbontás, viszont előnye, hogy a bontás után olyan viszonyok alakulnak ki, melyeket még az automatikák, szabályozóberendezések és az üzemirányító személyzet az előre tervezett keretek között tarthat, és nem következik be rendszerösszeomlás.

A rendszerbontást több változatra, sémára is elő lehet, esetleg elő kell készíteni. Ilyen sémák lehetnek:

- Normális üzemben egy bizonyos metszéken a teljesítményáramlás eléri, ill. túllépi az előre kiszámított veszélyes határt.
- Egy nagyobb átviteli képességű vezeték kikapcsolódásakor lecsökken a metszék áteresztőképessége. Ez esetben a teljesítmény-egyensúlytalanság a két rendszer részben nagyobb, mint az előző esetben.
- Két, nagyobb átviteli képességű vezeték kapcsolódik ki vagy az egyik karbantartást végeznek és a másik üzemzavar miatt kiesik. A teljesítmény-egyensúlytalanság még nagyobb lehet, mint az előbb.

A metszék túlterhelését megakadályozó bontó rendszer-automatika elvi működését a 4.4. ábra segítségével tekintjük át. Az indító események közül csak a fontosabb indításokat ismertetjük. Ezek közé tartozik a metszék terhelésének összegezése távmérés segítségével. Ha a metszék terhelése túllépi az üzemállapottól függően előre megállapított teljesítményértéket, akkor a túllépés

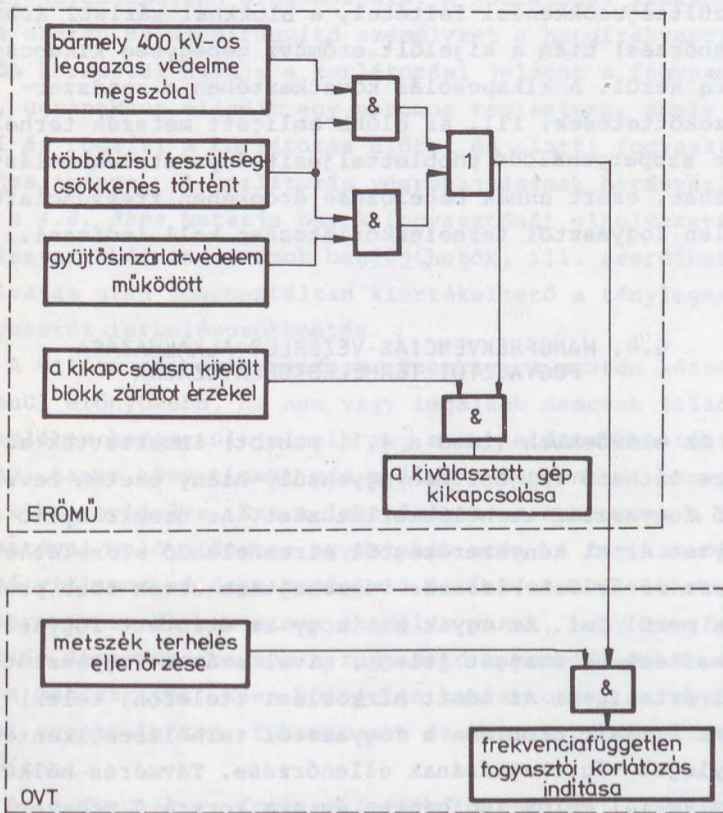


4.4. ábra. Villamosenergia-rendszer bontó automatika-rendszer elvi sémája [104]

mértéke szerint időzített késleltetéssel (pl. 1,5 s és 10 perc múlva) a bontás megtörténik. Indítható a bontás a kritikus rendszer-összeköttetések túlterhelésével vagy a távvezeték elején és végén mért szögelfordulás alapján. Ezek az indítások az előzőnek a tartalékai lehetnek.

Rendszermentő automatikák közé tartoznak a nagy erőművi koncentráció esetén veszélyessé váló tranzienstá-

bilitás elvesztését megakadályozó atutomatikák is. Egy ilyennek az elvi működését mutatja be a 4.5. ábra, a Paksi Atomerőmű esetében.



4.5. ábra. A Paksi Atomerőmű tranziens stabilitását védő automatika elvi működése [104]

Az automatika alkalmazására akkor van szükség, ha erőművi blokk-kikapcsolással és/vagy fogyasztói terheléskikapcsolással az erőmű tranziens stabilitása megőrizhető a közeli 3F, ill. 2FN zárlatok bekövetkezése esetén. A leágazási zárlatok érzékelése és ellenőrzése (túláramvédelem, feszültségcsökkenési feltétel, a blokknál zárlati áramellenőrzés) után a kijelölt erőművi gépegység kikapcsolásra kerül. A kikapcsolás következtében a rendszerösszeköttetések, ill. az előbb említett metszék terhelésére szuperonálódó többletteljesítmény metszék bomlást okozhat, ezért ennek megelőzése érdekében frekvenciafüggetlen fogyasztói terheléskorlátozást kell indítani.

4.4. HANGFREKVENCIÁS VEZÉRLÉS ALKALMAZÁSA FOGYASZTÓI TERHELÉSKORLÁTOZÁSRA

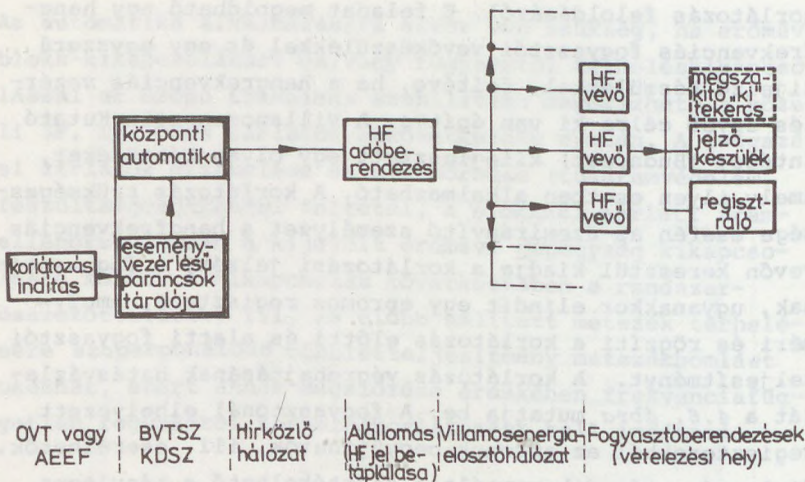
Az előzőekben (lásd a 4.1. pontot) ismertettük az előre látható teljesítményegyensúly-hiány esetén bevezethető fogyasztói terheléskorlátozást. Az üzemirányító szerkezet által kényszerűségből elrendelendő *előrelátható, tartós terheléskorlátozás* végrehajtása során több probléma merül fel. Az egyik az, hogy az érintett fogyasztók értesítése nehézséget jelent, mivel számos fogyasztót kell értesíteni az adott hírközlési (telefon, telex) úton. A másik probléma a fogyasztói terheléscsökkentés tényleges végrehajtásának ellenőrzése. Távmérés nélkül a helyszíni mérés időigényes és nem korszerű módszer. Így a terheléscsökkentést csak valószínűsíteni lehet. A következő probléma a korlátozás feloldásakor a fogyasztók minél gyorsabb értesítése.

A leírt problémák megoldásának egyik módja az érintett fogyasztók hangfrekvenciás úton történő értesítése a korlátozás kezdeti időpontjáról, a fokozatról, ill. a

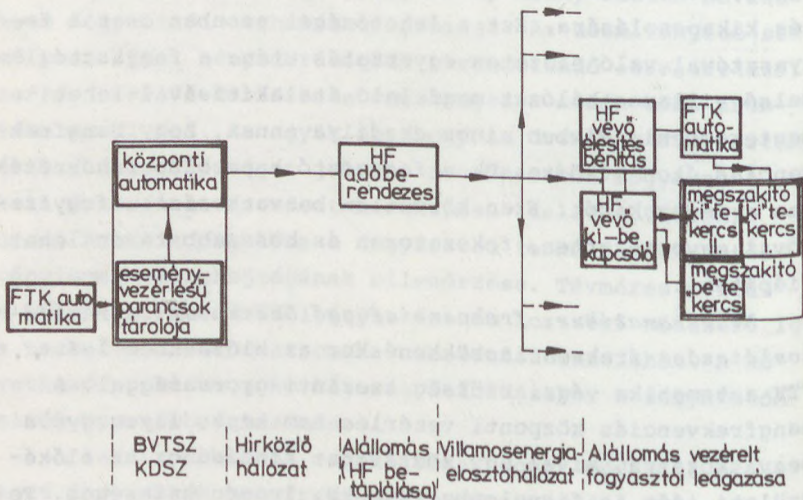
korlátozás feloldásáról. E feladat megoldható egy hangfrekvenciás fogyasztói vevőkészülékkel és egy egyszerű kijelző készülékkel, feltéve, ha a hangfrekvenciás vezérlés egyéb célra ki van építve. A Villamosenergia Kutató Intézet (Budapest) kifejlesztett egy olyan készüléket, amely ilyen esetben alkalmazható. A korlátozás szükségesége esetén az üzemirányító személyzet a hangfrekvenciás vonón keresztül kiadja a korlátozási jelzést a fogyasztónak, ugyanakkor elindít egy epromos regisztert, amely méri és rögzíti a korlátozás előtti és alatti fogyasztói teljesítményt. A korlátozás végrehajtásának hatásvázlatát a 4.6. ábra mutatja be. A fogyasztónál elhelyezett regiszterekből az epromok begyűjthetők, ill. cserélhetők. Kiolvasás után dokumentáltan kiértékelhető a tényleges fogyasztói terheléscsökkentés.

A villamosenergia-rendszer üzemzavara esetén kétségtelenül előnyösebb, ha nem vagy legalább nemcsak jelzőkészüléken keresztül jelenik meg a terheléscsökkentési igény, hanem közvetlenül mód nyílna a fogyasztói berendezés kikapcsolására. Ezt a lehetőséget azonban csak a fogyasztóval való előzetes egyeztetés után, a fogyasztói belső villamos hálózat megfelelő átalakításával lehet megteremteni. Elvben nincs akadálya annak, hogy hangfrekvenciás úton működtessük a fogyasztó kapcsolóberendezésében a megszakítót. Ezen közvetlen beavatkozást a fogyasztóval egyeztetetten, fokozatosan és hosszabb távon lehet kiépíteni.

Az automatikus, frekvenciafüggő üzemzavari terheléscsökkentést frekvenciacsökkenéskor az előzőekben leírt FTK automatika végzi szükség szerinti gyorsasággal. A hangfrekvenciás központi vezérlés nem képes ilyen gyors beavatkozásra, mivel egy kódtávirat kiadásához az előkészületi időt is figyelembe véve kb. 1 perc szükséges. Tehát a gyors kikapcsolást semmiképpen sem helyettesítheti.



4.6. ábra. Hangfrekvenciás vezérléssel végrehajtásra kerülő fogyasztói terheléskorlátozás hatásvázlata



4.7. ábra. A hangfrekvenciás vezérlés és a frekvenciafüggő terheléskorlátozás hatásvázlata

A hangfrekvenciás vezérlésnek mégis vannak előnyei ezen korlátozási módnál is, éspedig a következők:

- az áramszolgáltató alállomások leágazásainál telepített automatikák esetén a frekvencia normális értékre történt emelése után a visszakapcsolás központilag megoldható, az üzemirányító személyzet megítélése szerint. Ezen lehetőségnek a kezelőszemélyzet nélküli alállomásokon van különösen nagy jelentősége;
- az alállomásokon lévő automatikák fokozatonként élesíthetők vagy béníthatók az alállomás felkeresése nélkül;
- fogyasztói berendezéseknél telepített automatikáknál is megoldható a visszakapcsolás, ha a fogyasztóval történt előzetes megállapodás alapján ennek nincs technológiai akadály;
- "fogyasztóbarátibb" lehet, mint az alállomási leágazásokhoz telepített FTK kikapcsolás, éppen a fogyasztóval történt egyeztetés alapján a fogyasztóhoz közelebb történő kikapcsolás megválogatása miatt.

A hangfrekvenciás központi vezérlés alkalmazásával a következőképpen működhet a frekvenciafüggő terheléskorlátozás (4.7. ábra). Bármely fokozat működésének bekövetkezése esetén az előkészített leágazást az automatika a hagyományos módon kikapcsolja. Ezzel egyidejűleg az eseményvezérlésre működő hangfrekvenciás vezérlés központi automatikája kiadja a fokozatnak megfelelő KI parancs táviratot. A hangfrekvenciás vevőkészülék KI reléi KI parancsot adnak a leágazási megszakító második KI tekercsére. Ezzel elérhető, hogy az esetleg nem működött megszakítók (a tapasztalat szerint mintegy 15%) jó része mégis

kikapcsoljon. Így a frekvenciafüggő terheléscsökkentés hatékonysága javul.

A visszakapcsolás többféleképpen történhet: fokozatonként, alállomásonként, az áramszolgáltatási terület egészére vagy annak csak részére stb.

Frekvenciafüggetlen fogyasztói terheléskorlátozásnál szintén fogyasztóbarátibb kikapcsolást lehet elérni azáltal, hogy a fogyasztókkal előre egyeztetett berendezések kerülnek kikapcsolásra, az általánosan elterjedt nagyobb csomóponti alállomásokon végrehajtott kikapcsolások helyett. Az ilyen módon megvalósítandó kikapcsolást a hangfrekvenciás központi vezérlésnek az ún. gyűjtött parancs lehetősége adja meg. Így jelentős áramszolgáltatási területek helyett csak a korlátozásba bevont fogyasztókat érintené a lekapcsolás, vagyis nem olyan fogyasztókat sújtana, amelyek ellátását egyébként biztosítani szeretnénk vagy éppen kellene. Így a korlátozás nem egy - viszonylag szűk - terület egészét érintené, hanem elosztva a teljes áramszolgáltatás területére, mindenkor csak a kevésbé érzékeny fogyasztók üzemét zavarja.

Ilyen jellegű továbbfejlesztés megvalósítása, indokoltsága ellenére, hosszabb időt vesz igénybe.

4.5. A TARTÓS VILLAMOSENERGIA-KORLÁTOZÁSI VESZTESÉG MINIMALIZÁLÁSA

A tapasztalatok azt mutatják, hogy még a legnagyobb üzembiztonságú rendszerben is felléphetnek a termelés-fogyasztás egyensúlyát megbontó okok, amelyek következményei az összes tartalék felhasználásával és üzemzavari rendszerkiszegítésekkel sem pótolhatók. Ezekben az esetekben a rendszer teljesítmény-egyensúlyának helyreállítására a fogyasztók teljesítményvételezését korlátozni kell.

Ez a korlátozás a hazai gyakorlatban az ún. előrelátható fogyasztói terheléskorlátozás, melynek végrehajtását vagy előzetes bejelentésre, vagy az üzemzavar után egy órával léptetik életbe. A Korlátozási Sorrendben csakis ipari fogyasztók szerepelnek (ipari nagyfogyasztók, amelyek teljesítményigénye az 1 MW-ot meghaladja).

A terheléskorlátozási sorrend négy (A, B, C, D) fokozatra, ill. az ún. alapfokozatra készül. A legkisebb korlátozási teljesítményértékeket az A fokozat, míg a legnagyobbakat a D fokozat képviseli. Ezen negyedik fokozat teljesítményértéke a fogyasztói megadott csúcsidőszakra szerződött teljesítmény értékének és a maximálisan igénybe vehető D fokozatú teljesítmény értékének, az ún. létminimumnak a különbsége.

A fogyasztói korlátozások hatása a korlátozásba bevont fogyasztóknál különböző jellegű és mértékű veszteségek és/ill. károk formájában jelentkezhet. Vállalati és egyben nemzetgazdasági érdek is tehát, hogy ezen veszteségek, károk a lehető legkisebb mértékűek legyenek.

A vizsgálat célja olyan lineáris matematikai modell és számítási eljárás bemutatása, amelynek segítségével az Országos Előrelátható Villamos Terheléskorlátozás Sorrendjében szereplő fogyasztók korlátozásba bevonása és korlátozási teljesítményértékeik nagysága, egy alkalmasan megválasztott minimalizálási kritérium- és feltételrendszer szerint, úgy határozható meg, hogy a korlátozás miatti eredő veszteségek, károk minimálisak legyenek [86,87].

4.5.1. A MATEMATIKAI MODELL MÓDSZERTANI ALAPJAI

Az irodalomban [76-78] a korlátozás miatti kár általános számítására a

$$K = aP + bPt, \quad (4.5)$$

összefüggés szerepel, ahol K a korlátozás miatti veszteség, kár, Ft; a a teljesítménykiesés fajlagos kára, Ft/kW, P a korlátozási teljesítmény, kW, b a fajlagos kár, Ft/kWh; t a korlátozás időtartama, óra.

A (4.5) összefüggés alkalmazásához eddig hazai adatok nem állnak rendelkezésre, ezért a [81] irodalom közlítésével él, figyelemmel az elérhető hazai adatbázisra. Így az aP összetevő elhanyagolásával és a (4.5) összefüggés célszerű átalakításával, továbbá a hozzárendelt feltételrendszerrel a terheléskorlátozás okozta fogyasztói kár és az ún. kárgörbe számítással történő közelítő meghatározása [81]:

$$K \approx b_1 P_1 t + \dots + b_i P_i t + \dots + b_n P_n t = \left(\sum_{i=1}^n b_i P_i \right) t. \quad (4.6)$$

A korlátozás miatti eredő fajlagos kár:

$$b = \frac{K}{W} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n b_i P_i \right) t}{Pt} \quad (4.7)$$

ahol W a korlátozás miatti kieső villamosenergia-mennyiség, kWh; P az eredő korlátozási teljesítmény, kW:

$$P = P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (4.8)$$

A vállalati fajlagos kár (b_i) mint éves átlagérték meghatározására kétféle számítási mód lehetséges, általános alakban:

$$b = \frac{G}{E}, \quad \text{ill.} \quad b = \frac{F}{E}, \quad (4.9)$$

ahol G a vállalati éves nettó termelési érték, Ft; F a vállalati éves bruttó termelési érték, Ft; E a vállalati éves villamosenergia-felhasználás, kWh.

A két számítási mód közül a G/E kifejezést akkor helyes alkalmazni, ha a (4.5)-ben a K számítására az első tag is figyelembe vehető. Minthogy a hazai adatszolgáltatási rendszer az a értékét sem a vállalati, sem iparági szinten nem tartalmazza, a b számítására az F/E összefüggés indokolt, mintegy a kieső aP tag értékének kompenzálására [81,82].

4.5.2. A MATEMATIKAI MODELL KIALAKÍTÁSA

Az optimális terheléskorlátozás alapfeltétele, hogy egy adott korlátozási fokozatba olyan nagyságú teljesítményértéket kell a korlátozásba bevonni, hogy a korlátozás miatti eredő veszteség a legkisebb legyen. Ezt a feltételt a (4.6) alapján az alábbi célfüggvény írja le:

$$\begin{aligned} K &\approx b_1 P_1 t + \dots + b_i P_i t + \dots + b_n P_n t = \\ &= \left(\sum_{i=1}^n b_i P_i \right) t \rightarrow \min.! \end{aligned} \quad (4.10)$$

ahol $i=1, \dots, n$ a korlátozásba bevonandó fogyasztókat jelenti (sorszám és megnevezés). A (4.10)-hoz az alábbi megjegyzések és kényszerfeltételek tartoznak:

- a P_i értékek vállalatokra és korlátozási fokozatokra a minimalizálás eredményeként határozandók meg;

- a korlátozási sorrendek veszteségminimalizálásába csupán az első három (A, B, C) fokozatot lehet bevonni, mivel a D fokozatot alapvetően az ún. vállalati létminimum határozza meg;
- a vizsgált fokozatba kiosztandó korlátozási teljesítményértékek max. összegének az adott fokozatra előírt eredő korlátozási teljesítményértékkel kell egyenlőnek lennie:

$$P_1 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \leq P_Y \quad (4.11)$$

ahol P_Y maximális értéként az érvényes Korlátozási Sorrendből vehető ki ($y = A; B; C$ fokozat).

Egy adott korlátozási fokozat elrendelésénél a P_i korlátozott teljesítmény nem lehet nagyobb az i -edik vállalat D fokozatra vonatkozó és a vállalati létminimumot figyelembe vevő korlátozási teljesítmény értékénél, ugyanakkor értéke egyenlő nullával, ill. nagyobb annál:

$$0 \leq P_i \leq P_{iD} = P_{ics} - P_{ilm} \quad (4.12)$$

ahol P_{iD} a vállalat D fokozatra vonatkozó korlátozási teljesítmény értéke; P_{ics} a vállalat csúcsidőre szerződött teljesítmény értéke; P_{ilm} a vállalati ún. létminimum-teljesítmény (mindhárom teljesítményértéket a Korlátozási Sorrend |74| tartalmazza).

4.5.3. A MINIMALIZÁLT FOGYASZTÓI TERHELÉS-KORLÁTOZÁS MATEMATIKAI MODELLE

A (4.10), (4.11) és (4.12) összefüggések felhasználásával az előrelátható fogyasztói terheléskorlátozás minimalizálását, mindhárom minimalizálható fokozatra, az

alábbi lineáris matematikai modell alkalmazása szolgál-
tatja (n fogyasztóra):

- Az A-fokozat elrendelése esetén:

$$K_A = (b_1 P_{1A} + \dots + b_i P_{iA} + \dots + b_n P_{nA}) \cdot t \rightarrow \min., \quad (4.13)$$

$$P_{1A} + \dots + P_{iA} + \dots + P_{nA} = P_A, \quad (4.13a)$$

$$C \leq P_{iA} \leq P_{iD} \quad (i=1, \dots, n). \quad (4.13b)$$

- A B-fokozat elrendelése esetén:

$$K_B = (b_1 P_{1B} + \dots + b_i P_{iB} + \dots + b_n P_{nB}) \cdot t \rightarrow \min., \quad (4.13c)$$

$$P_{1B} + \dots + P_{iB} + \dots + P_{nB} = P_B, \quad (4.13d)$$

$$0 \leq P_{iB} \leq P_{iD} \quad (i=1, \dots, n). \quad (4.13e)$$

- A C-fokozat elrendelése esetén:

$$K_C = (b_1 P_{1C} + \dots + b_i P_{iC} + \dots + b_n P_{nC}) \cdot t \rightarrow \min., \quad (4.13f)$$

$$P_{1C} + \dots + P_{iC} + \dots + P_{nC} = P_C, \quad (4.13g)$$

$$0 \leq P_{iC} \leq P_{iD} \quad (i=1, \dots, n). \quad (4.13h)$$

4.5.4. A MODELLBŐL LEVEZETHETŐ SZÁMÍTÁSI ELJÁRÁS

A fentiek alapján olyan számítási eljárás határozható meg, amely mind kézi, mind számítógépes számításokra egyaránt alkalmas. Az eljárás fő lépései a következők:

- a korlátozásba bevonandó összes fogyasztó listája, jellemzőkkel megadva (pl. név, telephelyi cím stb.);
- a számítás alapadatainak összegyűjtése valamennyi fogyasztóra és korlátozási fokozatra:

$$F_i, E_i, P_A, P_B, P_C, P_D, P_{iD}, t;$$

- a b_i értékek kiszámítása;
- a fogyasztók rangsorolása és sorszámozása b_i értékek növekvő sorrendjében;
- a kényszerfeltételek egyidejű kielégítése mellett

$$P_{iA}, P_{iB}, P_{iC}$$

meghatározása;

- a korlátozás miatt fellépő eredő minimális és tényleges károk számítása:

$$K_{Amin}, K_{Bmin}, K_{Cmin}, K_D.$$

A fentiek alapján lehetőség van - a Ft-ban kifejezett kárszámítás mellett - a fokozatonkénti eredő (B , Ft/kWh) minimális fajlagos károk kiszámítására is, amelyek az optimális korlátozási teljesítményértékekhez és az egyes korlátozási fokozatoknak megfelelő eredő (P_A, P_B, P_C) teljesítményértékekhez tartoznak:

$$B_{Amin} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i P_{iAmin})}{P_A} ,$$

$$B_{Bmin} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i P_{iBmin})}{P_B} , \quad (4.14)$$

$$B_{Cmin} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i P_{iCmin})}{P_C} ,$$

Megjegyzendő, hogy a D-fokozat nem optimalizálható, ezért B_D a Korlátozási Sorrendben szereplő teljesítményértékekkel számolható:

$$B_D = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i P_{iD})}{P_D} . \quad (4.15)$$

4.5.5. KIEGÉSZÍTŐ MEGJEGYZÉSEK

A számítási módszer alapvető előnye, hogy a kényszerű helyzetet és hátrányos követelményeket jelentő fogyasztói korlátozás kedvezőtlen hatását - a károk minimalizálása révén - csökkenti.

A módszer szerint a vállalatokat a korlátozásba b_i értékeik növekvő sorrendjében kell - az A-tól C-fokozatig - bevonni, az eredő korlátozási teljesítmény (P_A, P_B, P_C) biztosítására.

Ez azt jelenti egyben, hogy az alacsony b_i értékekkel rendelkező vállalatok fognak szerepelni a korlátozásban. A D-fokozat nem optimalizálható, minthogy a vállalata-

tok D-fokozatú korlátozási teljesítményértékét csúcsidei szerződött teljesítményértékük és az ún. létminimum-teljesítményük egyértelműen meghatározza.

A módszer gyakorlati alkalmazásának, azaz a Korlátozási Sorrend kialakításához való figyelembevételének hárt szab az a tény, hogy több olyan, a sorrendet (a fogyasztók besorolását) befolyásoló tényezőt nem tud figyelembe venni, amely nem számszerűsíthető. Ezek, a gyakorlatban alapvetően fontos tényezők a következők:

- a korlátozandó fogyasztók a lakosság ellátását szolgálják, ill. nemzetgazdasági fontosságúak, mint pl.:
- alapvető élelmiszereket gyártó vállalatok,
- energiatermeléssel és -elosztással foglalkozó vállalatok,
- hatékonyan exportáló vállalatok;
- a korlátozandó fogyasztási helyek közötti termelési kapcsolatok;
- a korlátozásba bevont fogyasztók kiértékelési lehetőségei.

A módszer szerinti fogyasztói korlátozási sorrend - a korlátozás gyakorlati elrendelésekor kiindulási alapnak tekinthető. Célszerű a jövőben a fenti befolyásoló és jelenleg nem számszerűsíthető szempontokat - módszertani kutatások eredményeként - számszerűen (pl. súlyozási tényezőként) a módszerbe beépíteni.

4.6. KÁRGÖRBÉK

Az előzőekben szereplő kárfüggvények alkalmazásával a fogyasztói korlátozás okozta kár nagysága számszerűen is meghatározható. A számszerű adatok birtokában a károk

változása grafikusán ábrázolható, ez az ún. kárgörbe, amely - a választott paraméter(ek) függvényében - a változás mértékét és jellegét egyrészt szemléletesen bemutatja, másrészt a görbejellegre általános megállapítások is tehetők.

A kárérték mértékegységét tekintve háromféle kárgörbe vehető fel:

1. a K_1 érték, Ft vagy eFt;
2. a K_2 érték, Ft/h vagy eFt/h;
3. a b érték, Ft/kWh vagy eFt/MWh, ill. fokozatonként az eredő B érték Ft/kWh vagy eFt/MWh.

Az 1. és 2. esetben - minthogy a b_i értékeket a felvett, vizsgálati időszakokra állandónak tételezzük fel - egy kétváltozós $K(P, t)$ függvényről van szó, míg a 3. eset - ezen kárfüggvényben a korlátozás időtartama nem szerepel - egy egyváltozós függvényt jelent (fajlagos kárgörbe).

A 4.5. pontban és a |81|-ben bemutatott kárszámítási módszerek összehasonlítása lehetőséget ad arra, hogy

- a közös jellemzők és az egyedi jellemvonások kimutathatók legyenek;
- a tényleges számításoknál a károk nagysága módszerként és egymással összehasonlítva is értékelhető legyen;
- a gyakorlati alkalmazáshoz, a módszerbeni választás eldöntéséhez segítséget nyújtson;
- meghatározzuk a minimalizálási módszer hatását.

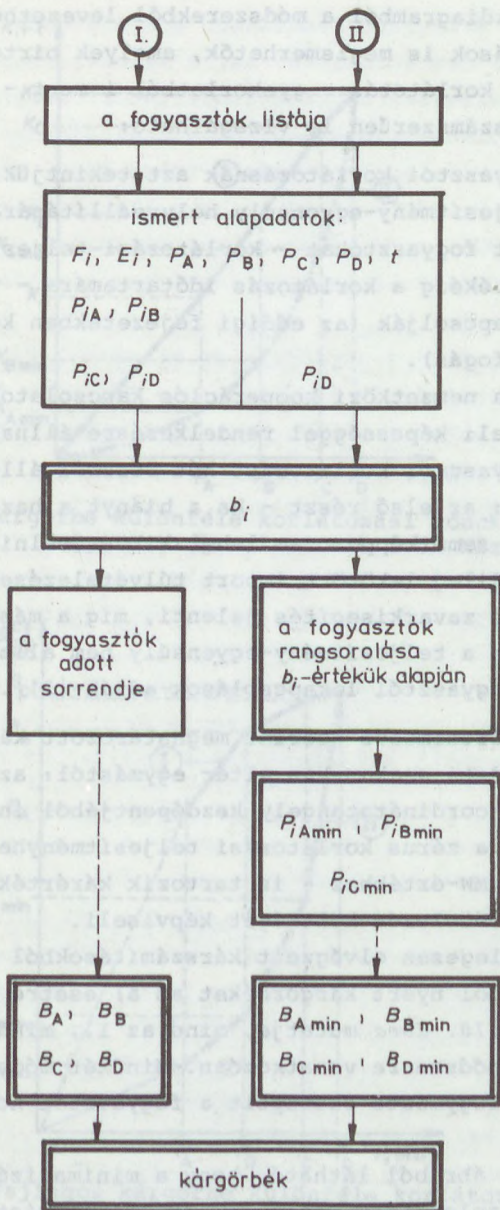
Jelöljük a korábbi módszert I-gyel, a 4.5. pontban ismertetett minimalizálási módszer II-vel, a két számítási módszer közös jellemzőit és egyúttal a különbségeket is jól áttekinthető formában a 4.2. táblázat tartalmazza.

A táblázatból a módszerek alapvető szerkezete és alapis-
mérvei is - összefoglalóan - megismerhetők.

4.2. táblázat. A hagyományos fogyasztói korlátozás (I)
és a minimalizálási módszer (II) jellemzői és az adatok
meghatározása

Alapjellemzők és adatok		Módszertani jellemzők	
		I.	II.
A fogyasztók listája		ismert	számítandó
Vállalati bruttó termelési érték: b_i		számítandó	számítandó
A fogyasztók korlátozási sorrendje		ismert	meghatározandó
Fogyasztónkénti korlátozási teljesítményértékek:	P_{iA} P_{iB} P_{iC}	ismert	meghatározandó
	P_{iD}	ismert	ismert
Fokozatonkénti eredő korlátozási teljesítmények: P_A, \dots, P_D		ismert	ismert
Korlátozási időtartam:		felvett	felvett
Fajlagos veszteségértékek: P_A', \dots, P_D'		meghatározandó	meghatározandó

A módszerek mind kézi, mind számítógépes számítások
elvégzésére alkalmazhatók. A vizsgálatok elvi blokk-
diagramját a 4.8. ábra mutatja. (Az ábrában a kettősen
vonalazott blokkok a meghatározandó - számítandó - érté-
keket jelölik, összhangban a 4.1. táblázattal.)



4.8. ábra. Villamosenergia-fogyasztók tartós korlátozási kára számításának összehasonlító blokkdiagramja

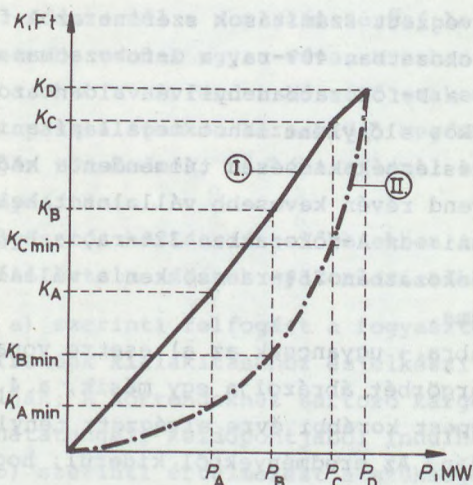
A blokkdiagramból a módszerekből levezethető számítási eljárások is megismerhetők, amelyek birtokában a fogyasztói korlátozás - gyakorlatból ismert - mindkét felfogása számszerűen is vizsgálható:

- a) Fogyasztói korlátozásnak azt tekintjük, amikor a teljesítmény-egyensúly helyreállítására meghatározott fogyasztókat - korlátozási teljesítményük mértékéig a korlátozás időtartamára - ténylegesen kikapcsolják (az eddigi fejezetekben képviselt felfogás).
- b) Ha a nemzetközi kooperációs kapcsolatok szabad átviteli képességgel rendelkezésre állnak, akkor a fogyasztói korlátozást két részből állónak tekintjük: az első részt - ha a hiányt a hazai erőművekből semmiképpen sem lehet kiküszöbölni - a menetrendileg lekötött import túlvételezésekként jelentkező zavarkisegítés jelenti, míg a második részt - ha a teljesítmény-egyensúly nem állt helyre - a fogyasztói lekapcsolások adják |21|.

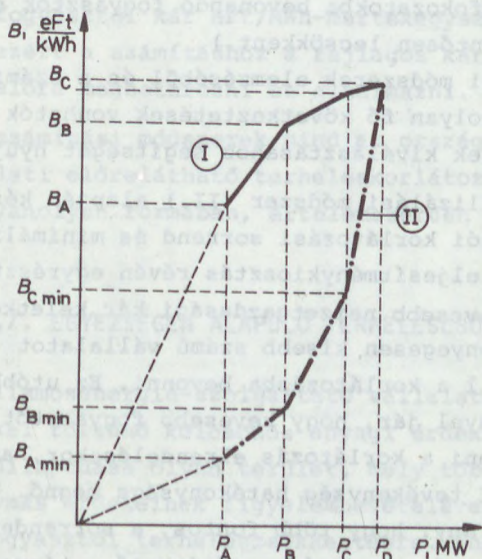
A két értelmezés szerint meghatározott kárgörbék jellege a kezdeti szakaszban eltér egymástól: az a) esetben a görbe a koordinátatengely kezdőpontjából indul, míg a b) esetben a zérus korlátozási teljesítményhez - mint lekapcsolási MW-értékhez - is tartozik kárérték, amely az import túlvételezés költségét képviseli.

A ténylegesen elvégzett kárszámításokból és azok eredményeiből nyert kárgörbéket az a) esetre vonatkozóan a 4.9 és 4.10. ábra mutatja, mind az I., mind a II. jelű számítási módszerre vonatkozóan. Mindkét módszernél azonos számú fogyasztó szerepelt a fogyasztói korlátozási listában.

A 4.9. ábrából látható, hogy a minimalizációs esetben (II.) jelentősen kisebb a korlátozás miatti kár: egy



4.9. ábra. Kárgörbe különféle korlátozási módok esetén, Magyarországon, a 80-as évek közepén



4.10. ábra. Fajlagos kárgörbe különféle korlátozási módok esetén

adott évre elvégzett számítások szerint az A-fokozatban 30%-ra, a B-fokozatban 40%-ra, a C-fokozatban 62%-ra csökkent, míg a D-fokozatban nyilvánvalóan azonos a kárérték. Járulékos előnyként lehet megállapítani, hogy a kisebb termelésiérték-kiesésen túlmenően a kedvezőbb fogyasztói sorrend révén kevesebb vállalatot kell a korlátozásba bevonni: az A-fokozatban 32%-ra, a B-fokozatban 52%-ra, a C-fokozatban 75%-ra csökken a vállalatok (fogyasztók) száma.

A 4.10. ábra - ugyancsak az a) esetre vonatkozóan - a fajlagos kárgörbét ábrázolja egy másik, a 4.9. ábra példájához képest korábbi évre elvégzett tényleges számítások alapján. Az eredményekből kiderül, hogy a II. számítási módszerrel készített fogyasztói korlátozási sorrend esetén a fajlagos kár az A-fokozatban 15%-ra, a B-fokozatban 25%-ra, míg a C-fokozatban 45%-ra csökkent le. (Az egyes fokozatokba bevonandó fogyasztók száma ugyancsak jelentősen lecsökkent.)

A számítási módszerek elemzéséből és a számítási eredményekből olyan fő következtetések vonhatók le, amelyek a módszerek kiválasztásához segítséget nyújtanak:

- A minimalizálási módszer (II.) alapján készített fogyasztói korlátozási sorrend és minimális korlátozási teljesítménykiosztás révén egyrészt mértékadóan kevesebb nemzetgazdasági kár keletkezik, másrészt lényegesen kisebb számú vállalatot (fogyasztót) kell a korlátozásba bevonni. Ez utóbbi azzal az előnnyel jár, hogy kevesebb fogyasztót kell kiértékelni a korlátozás elrendelésekor, azaz a korlátozási tevékenység hatékonysága megnő. Ugyanakkor hátrány, hogy több fontos, a sorrendet befolyásoló - és nem számszerűsíthető - tényezőt a módszer nem tud figyelembe venni.

- Az I. módszernél a nem számszerűsíthető tényezők figyelembe vannak ugyan véve, azonban oly módon, hogy azokat a sorrendet készítő szakemberek szakmai tapasztalataikon keresztül, megfontolások alapján törekednek, bár óhatatlanul szubjektíven, érvényesíteni.
- A fogyasztói korlátozás előbbiekben ismertetett kétféle értelmezésének gyakorlati alkalmazása:
 - az a) szerinti felfogást a fogyasztói korlátozási sorrendek kialakításához és elkészítéséhez használják; a sorrendekhez tartozó kárgörbék a koordinátatengely kezdőpontjából indulnak;
 - a b) szerinti értelmezést a szükséges, ill. optimális erőművi tartalékteljesítmények meghatározásához használják; a számítás alapjául szolgáló célfüggvényben - a magyar gyakorlat szerint - a fogyasztói kár eFt/MWh -mértékegységben szerepel, ezért a számításhoz a fajlagos kárgörbét kell előre meghatározni és alkalmazni.
- A számítási módszerek mind az országos, mind a területi előrelátható terheléskorlátozás esetére ugyanolyan formában, értelemszerűen alkalmazhatók.

4.7. EGYEZSÉGEN ALAPULÓ TERHELÉSCSÖKKENTÉS

A villamosenergia-szolgáltató vállalatoknak a fogyasztókkal történő kölcsönös anyagi érdekeltségen alapuló megállapodása olyan terület, mely több lehetőséget ad az egymás érdekeinek figyelembevételével történő átmeneti fogyasztói terheléscsökkentésre. Ennek megfelelően különböző módszerek, eljárások alakultak ki az egyes országokban. A megállapodásokkal elért fogyasztói terhe-

4.3. táblázat. Az egyezségeen alapuló fogyasztói terheléscsökkentés néhány országban

Ország	Terheléscsökkentés	Megjegyzések
Anglia	A-kategória: 70 MW B-kategória: 280 MW Szerződéses terhelés: 1150 MW Összesen: 1500 MW	1. 1982/83-ban 2. Csúcsterhelés kb. 4%-a
Franciaország	Megszakítható terhelésű fogyasztók: 480 MW Csúcsnapi terheléscsökkentésű fogyasztók: 550 MW	1. 1978/79-ben 1. 1982/83-ban
Belgium	Mérséklést elfogadó fogyasztók: 422 MW Megszakítást elfogadó fogyasztók: 509 MW	2. Tényleges csökkentés 1983 Januárjában 133 MW februárjában 193 MW márciusában 210 MW
Csehszlovákia	480 db fogyasztó: 450 MW	1. 1983. évi adat 2. Tényleges csökkentés: mérséklésnél 209 MW megszakításnál 375 MW
USA	Szakértői becslés: 4000 MW	1. 1984-ben 2. A csúcsterhelés 4,6%-a.

4.4. táblázat. Az egyezségeen alapuló fogyasztói terheléscsökkentés esetén az áramszolgáltató és a fogyasztó kötelezettségeinek összefoglalása

Terheléscsökkentés fokozata	Szolgáltató kötelezettsége	F o g y a s z t ó		
		kötelezettsége	gazdasági haszna	kockázata
	értesítés	csökkenteni a terhelést	a vállalt napszaki terheléscsökkentésre, az egész évre	az 1 hónapra eső nappali vagy csúcscsúcsdíj a vállalt, de nem csökkentett terhelésre
alfa	előző nap 17 óráig	50 óra/év	nappali vagy csúcscsúcsdíj 15%-a	nappali vagy csúcscsúcsdíj 30%-a
béta	a szükséges terheléscsökkentés előtt 2 órával	60 óra/év	nappali vagy csúcscsúcsdíj 30%-	nappali vagy csúcscsúcsdíj 60%-a
gamma	a szükséges terheléscsökkentés előtt 1/4 órával, vagy azonnali csökkentés	100 óra/év max. 4 óra/nap	nappali vagy csúcscsúcsdíj 50%-a	nappali vagy csúcscsúcsdíj 100%-a

Megjegyzés: A terheléscsökkentési fokozat elnevezése (alfa, béta stb.) fantázianév, megkülönböztetésül görög betűkkel a magyar gyakorlatban több évtizede használt A, B stb. korlátozástól.

léscsökkentés a 4.3. táblázat szerint alakult néhány országban. A külföldi gyakorlatot - néhány nem publikált adat feltételezésével - a 4.4. táblázatban látható módon lehet összefoglalni.

Amint az adatok mutatják, a szolgáltató és a fogyasztó

tó közötti egyezségen alapulóan jelentős fogyasztói terheléscsökkentés érhető el. A gazdasági érdekeltségen alapuló terheléscsökkentés természetéből adódóan nem alkalmas a gyorsan kezdődő üzemzavar elhárítására, hanem csak veszélyhelyzetben, ill. előrelátható erőművi teljesítményhiány esetén alkalmazható.

Mint az előzőekben láttuk, hazánkban az előrelátható korlátozás rendszere régóta ki van dolgozva, gazdasági érdekeltséggel azonban nincs kombinálva és elősegítve, így az önkéntes átmeneti terheléscsökkentésnek nincsenek meg a keretei és hagyományai. A fogyasztói terheléscsökkentés rendszerét ezért indokolt ilyen lehetőséggel is kiegészíteni, amint erre már egy 1987-ben kidolgozott OMFB tanulmány is rámutatott.

A gazdasági érdekeltségen alapuló átmeneti, önkéntes fogyasztói terheléscsökkentés alapelve, hogy tarifális kedvezmény lehetőségének intézményesítésével a fogyasztó, gazdasági érdekétől vezérelve, önként vállalja, hogy a szolgáltató kérésére, a rendszer veszélyhelyzetében meghatározott időre terheléscsökkentést hajt végre. Ez a lehetőség tovább bővítheti a jelenlegi tarifarendszer ösztönző elemeit.

Figyelembe véve, hogy a villamosenergia-szolgáltatásban az egyezségen, szerződésen alapuló terheléscsökkentés be nem tartásának műszaki okokból súlyos következményei lehetnek (pl. rendszerüzemzavar), a vállalt terheléscsökkentés elmulasztását gazdaságilag feltétlenül szankcionálni kell.

Az átmeneti fogyasztói terheléscsökkentési rendszer továbbfejlesztésének koncepciójánál a következő elveket indokolt figyelembe venni:

- Az átmeneti terheléscsökkentést vállaló fogyasztónak az általa vállalt terheléscsökkentéssel arányos gazdasági haszna legyen tarifális kedvezmény révén.

- A szolgáltató vállalat változatokat ajánljon és a fogyasztó a műszaki-gazdasági lehetőségei alapján választhasson.
- Az átmeneti terhelés-csökkentés feltételrendszerében (pl. időtartam, gyakoriság) szerződésben kell megállapodni.
- A szolgáltatónak joga legyen a nem teljesített szerződéses vállalásokkal arányosan, tarifálishan rögzített szankcionálásra.
- A villamosenergia-ipar központi szabályozásának megszűnéséig az önként vállalt terheléscsökkentés miatt keletkező árbevétel-kiesést kompenzálni kell.
- A gazdasági ösztönzést a használatos tarifarendszerhez illesztve, annak kiegészítéseként célszerű alkalmazni.
- A technikai berendezésekkel (távjelzés, távműködtetés, mérők stb.) biztosítani kell
 - a terheléscsökkentésről a fogyasztói értesítését,
 - a csökkentés tarifális időpontjának kezdetét,
 - végét, továbbá
 - az elszámoláshoz a dokumentálást.

Ezek alapján Magyarországon pl. a következő lehetőségek tűnnek megvalósíthatónak:

1. *A terheléscsökkentés időtartama.* Egy-egy szerződési ciklusban - aminek időtartama 12 hónap - a fogyasztói által vállalt átmeneti terheléscsökkentések együttes időtartamát is meg kell kötni: pl. minimum 20 - 50 óra, maximum 100 óra úgy, hogy az egy alkalommal vállalt terheléscsökkentés időtartama pl. minimálisan 2 óra, maximálisan 4 óra legyen.

2. *A terheléscsökkentés-kérés gyakorisága.* Egy-egy elszámolási időszakon (hónapon) belül az áramszolgáltató kötött (pl. 6) alkalommal kérheti a megállapodás szerin-

ti terheléscsökkentést, amit a fogyasztó egy-egy alkalommal visszautasíthat. További változatok is lehetségesek az előzőekben ismertetett időtartamok figyelembevételével:

- a) A fogyasztó csak a téli 6 hónapban (októbertől márciusig) vállal terheléscsökkentést, rögzített, együttes időtartamkorláttal.
- b) A fogyasztó csak a nyári időszakban (áprilistól szeptemberig) vállal terheléscsökkentést. Ez esetben is rögzített kell legyen a terheléscsökkentések együttes időtartama.
- c) A fogyasztó bármelyik előző változatban megnövelt időtartamra vállal terheléscsökkentést. E változatban a terheléscsökkentések együttes időtartama arányosan növekedik.
- d) A c) változat elképzelhető úgy is, hogy a fogyasztó növelt időtartamú terheléscsökkentést vállal alkalmanként, de a vállalás időtartama változatlan.

3. *Értesítési időhatárok.* Az értesítési időhatáron azt az időtartamot értjük, amivel előbb kell a fogyasztót értesíteni a terheléscsökkentés kezdési időpontjánál. Az értesítési időhatárok pl. a következők lehetnek a fogyasztóval való megállapodástól függően:

- a) A fogyasztót legalább 1 órával előbb kell értesíteni a terheléscsökkentés időpontjáról és annak időtartamáról.
- b) A fogyasztót legalább 6 órával előbb kell értesíteni a terheléscsökkentés időpontjáról és annak időtartamáról.
- c) A fogyasztót legalább 24 órával előbb kell értesíteni a terheléscsökkentés időpontjáról és annak időtartamáról.

4. A terheléscsökkentés megállapításának módjai a következők lehetnek:

a) A fogyasztó a terheléscsökkentést a megelőző hét azonos munkanapján a kért leterhelés kezdő időpontját követő első negyedórában igénybevett átlagteljesítményhez képest hajtja végre.

Előnye, hogy a fogyasztó és a szolgáltató részére az előző hét minden napjának minden negyedórás átlagteljesítménye rendelkezésre áll. Hátránya, hogy az 1 órával, de még a 6 órával előbbi értesítés esetén is viszonylag kevés idő áll a fogyasztó rendelkezésére a leterhelés megfelelő előkészítése céljára.

b) Abban különbözik az a) változattól, hogy a leterhelést nem az előző hét azonos napján, az értesítést követő első negyedórájának, hanem az előző hét azonos napjának a leterhelés kért napszaki időtartama alatt napszakonként külön-külön igénybevett átlagteljesítményhez képest kell végrehajtani.

Előnye, hogy a negyedórás maximumokat, illetve minimumokat már simítja, s így a torzulás kisebb. Hátránya az a) változattal azonos.

c) A fogyasztó a leterhelést az előző hét azonos munkanapjának a kért leterhelés napszakában (az előírt zónaidők szerinti nappal, csúcsidő) igénybevett átlagteljesítményéhez képest hajtja végre.

Előnye, hogy a b) változatnál is simítottabb az átlagteljesítmény-érték, nem valószínűsíthető a minimumhoz vagy a maximumhoz való közelállása, mint az az előző kettőnél bármikor előfordulhat, és végül mind a fogyasztónak, mind a szolgáltató-

nak 6 nap áll rendelkezésre, egyrészt a leterhelés kérésének előzetes felmérésére, illetve az arra való felkészülésre.

5. *Az egyezségen alapuló terheléscsökkentési szerződés tartalma.* A fogyasztóval az átmeneti terheléscsökkentésre kötött megállapodásban rögzíteni kell

- a vállalt terheléscsökkentés mértékét, esetleg évvagy napszakhoz kötve több értékben;
- a fogyasztó létminimumterhelését, ami alá nem köteles csökkenteni;
- az értesítés módját, a visszaigazolással együtt;
- az áramszolgáltató azon szervezeti egységét, amelyik a terheléscsökkentés kérésére jogosult;
- a fogyasztó terheléscsökkentésre jogosult megbízottjainak nevét, az intézkedésre jogosult szervezet vagy szervezetek megjelölésével;
- az egy-egy elszámolási időszakban kért és teljesített terheléscsökkentés megállapításának módját és rendjét, az igazolásra jogosultak nevének és szervezeti hovatartozásának megjelölésével együtt;
- hogy az esetleg felmerülő vitás kérdéseket a szerződő felek elsősorban közös megállapodással tisztázzák;
- hogy a megállapodásban foglaltakat az elszámolással együtt titokként kezelik, arról harmadik félnek tájékoztatást nem adnak.

6. *Műszerezés.* A díjegyvezmény a terheléscsökkentési rendszer alkalmazásának feltétele, hogy hiteles mérőszközzel állapíthassuk meg a fogyasztó átlagterhelését a bázisterhelés (előző heti) és a kért terheléscsökkentés időtartamában. Ehhez állandóan regisztrálni kell a fogyasztó terhelését, vagyis célszerű legkisebb egységként

negyedórás fogyasztásait, majd ezekből ki kell tudni választani a szükséges időtartamok alatti mennyiségeket, és azokból kell az elszámolási értékeket kiszámítani.

A mérési feladat megoldása a következő lehet. A fogyasztónál elszámolási célra felszerelt fogyasztásmérők impulzusait (szükség szerint összegezõn keresztül) egy elektronikus mérésadatgyûjtõ veszi. A mérésadatgyûjtõ feldolgozza és tárolja a normál elszámoláshoz tartozó mennyiségeket, ezen belül tárolja minden negyedóra fogyasztási értékét. Az árengedményes terheléscsökkentés ellenõrzési adatai és információi számítógéppel elõhívható, kinyomtatható legyen.

4.8. FESZÜLTÉGCSÖKKENTÉSSEL ELÉRHETÕ TERHELÉSCSÖKKENTÉS

4.8.1. EGYEDI VILLAMOS BERENDEZÉSEK FESZÜLTÉGÉRZÉKENYSÉGE

A villamos fogyasztói berendezések teljesítménye különbözõképpen módosul a csatlakozási pont feszültségeinek változására. A hatásos teljesítmény feszültségfüggése a következõképpen írható le a $0,85 U_0 \leq U \leq 1,15 U_0$ tartományban:

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^p, \quad (4.16)$$

és

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^q, \quad (4.17)$$

ahol P , ill. P_0 a megváltozott feszültséghez tartozó, ill. a változás elõtti hatásos teljesítmény; Q , ill. Q_0 a megváltozott feszültséghez tartozó, ill. a változás

előtti meddő teljesítmény; p , ill. q , a hatásos, ill. meddő teljesítményváltozás hatványkitevője; U , ill. U_0 a megváltozott ill. a változás előtti feszültség.

Az összefüggésekből a hatványkitevők a következő módon számíthatók:

$$p = \frac{\ln \frac{P}{P_0}}{\ln \frac{U}{U_0}}, \quad (4.18)$$

és

$$q = \frac{\ln \frac{Q}{Q_0}}{\ln \frac{U}{U_0}}. \quad (4.19)$$

Kis teljesítmény- és feszültségváltozás esetén a kitevők jó közelítéssel az alábbi összefüggésekkel számíthatók:

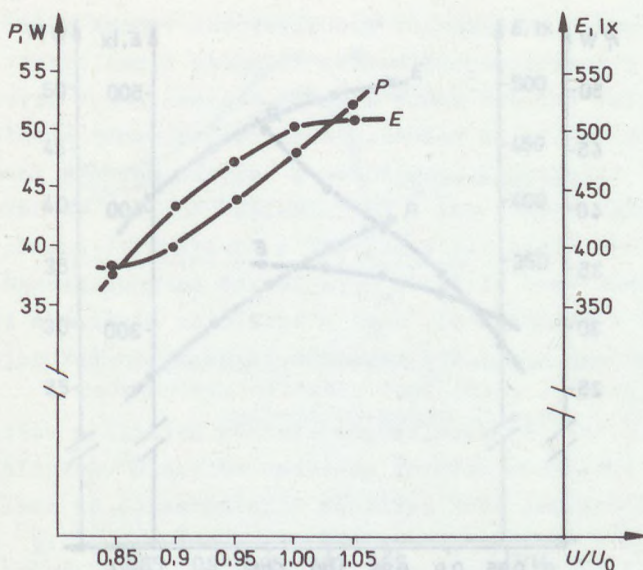
$$p = \frac{\Delta P/P_0}{\Delta U/U_0} = \frac{\Delta P \%}{\Delta U \%}, \quad (4.20)$$

és

$$q = \frac{\Delta Q/Q_0}{\Delta U/U_0} = \frac{\Delta Q \%}{\Delta U \%}. \quad (4.21)$$

A következőkben néhány, tipikus fogyasztó feszültségfüggését vizsgáljuk meg $|91|$, $|105|$.

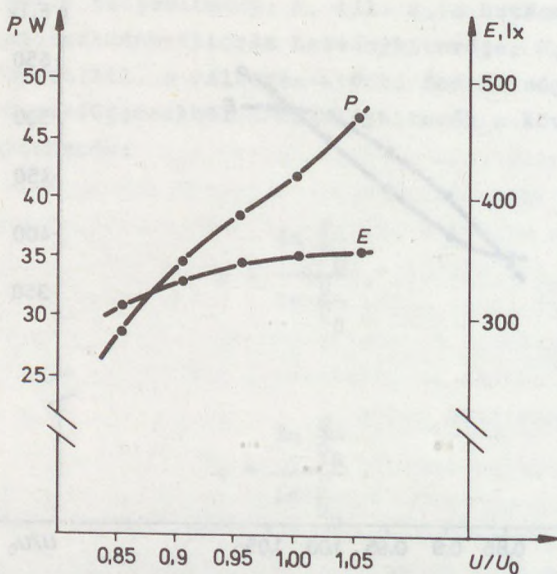
Izzólámpa. Mérés alapján a hatványkitevő $p = 1,5-1,73$ értékre adódott. Ez azt jelenti, hogy pl. 15%-os feszültségcsökkenésnél a megvilágítás 75%-ra csökken, ami már jelentős (4.11. ábra). Mivel az izzólámpákat általában háztartási fogyasztóknál alkalmazzák, ezért elképzelhető,



4.11. ábra. 60 W-os izzólámpa teljesítményfelvételének és megvilágításának változása a hálózati feszültség csökkentésekor

hogy feszültségcsökkenéskor további fényforrást kapcsolnak be az eredeti megvilágítás visszaállítása érdekében.

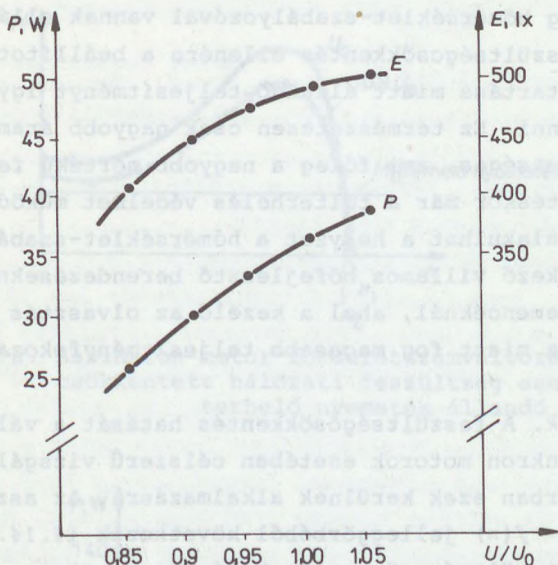
Fénycső. Mérés alapján $p = 1,95-2,49$, ill. $q = 1,76-3,76$ érték adódott egy 35 W-os fénycső hatványkifejtésére. A megvilágítás 87%-ra csökken 15%-os feszültségcsökkentésnél (4.12. ábra). A fénycsöves világítás általában olyan munkahelyeken fordul elő, ahol vagy nincs más világítás, és ott nem lehet a megvilágítást kompenzálni, vagy pedig ott, ahol még külön helyi világítás is van, aminek a távolsága állítható, így kiegyenlíthető a fénycső csökkent megvilágítása. Így tényleges teljesítménycsökkenés érhető el a feszültségcsökkenéssel.



4.12. ábra. 35 W-os fénycső teljesítményfelvételének és megvilágításának változása a hálózati feszültség csökkentésekor

Nátriumgőz lámpa. Egy Magyarországon rendszeresített lámpatestben elhelyezett fényforrás mérése alapján a hatványkitevő $p = 1,22-2,2$, ami azt jelenti, hogy pl. 15%-os feszültségcsökkentés esetén a megvilágítás kb. 80%-ra csökken (4.13. ábra). Na-gőz lámpák elsősorban közterületen, üzemcsarnokokban stb. kerülnek alkalmazásra, ezért feszültségcsökkentés esetén nem kell többletfényforrás bekapcsolásával számolni, így a teljesítménycsökkenés valóságos.

Televízió, ill. számítógép-monitor. A számítógép-monitorok (Nybble, Sharp, JVC) a vizsgált feszültségcsökkentési tartományban (-50%) tökéletes szín és képminőség-



4.13. ábra. 35 W-os nátriumgőz lámpa teljesítményfelvételenek és megvilágításának változása a hálózati feszültség csökkentésekor

gel rendelkeznek. Fekete-fehér televízióknál - 15%-nál a kép széle kismértékben hullámzik, és kismértékű képméretcsökkenés tapasztalható, színes televízióknál 25%-os feszültségcsökkenésnél sem tapasztaltak a vizsgált készülékeken problémát. A vizsgálat magyar televíziótípusokra terjedt ki.

Villamos fűtés. Hőfejlesztő berendezésekre $Z = \text{áll.}$ miatt egyértelműen a hatványkitevők $p = q = 2$ -re adódnak. A feszültségcsökkentés teljesítménycsökkentő hatása azonban nem egyértelmű. Háztartási fogyasztóknál, ha a teljesítmény csökken, akkor bizonyos idő múlva valószínűleg nagyobb teljesítményű fokozatra fognak kapcsolni. Az ipari hőfejlesztő berendezések az esetek túlnyomó többségében

gében pedig hőmérséklet-szabályozóval vannak ellátva, ezért a feszültségcsökkentés ellenére a beállított hőmérséklet tartása miatt állandó teljesítményt igyekeznek igénybe venni. Ez természetesen csak nagyobb áramfelvétellel lehetséges, ami főleg a nagyobb mértékű feszültségcsökkentéskor már a túlterhelés védelmet működtetheti. Hasonlóan alakulhat a helyzet a hőmérséklet-szabályozóval nem rendelkező villamos hőfejlesztő berendezéseknél is, pl. az ívkemencéknél, ahol a kezelő az olvasztás idejének a betartása miatt fog magasabb teljesítményfokozatra kapcsolni.

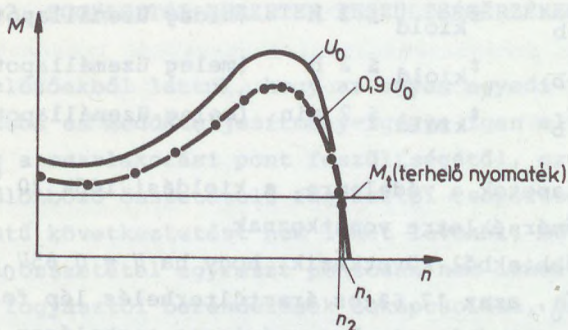
Motorok. A feszültségcsökkentés hatását a váltakozó áramú aszinkron motorok esetében célszerű vizsgálni, mivel elsősorban ezek kerülnek alkalmazásra. Az aszinkron motorok $M = f(n)$ jelleggörbéből következik (4.14. ábra), hogy 10% feszültségcsökkentés hatására a motor n fordulatszámra a görbe meredeksége miatt alig változik ($n_2 \approx n_1$), ezért jó közelítéssel a felvett villamos teljesítményre igaz, hogy

$$P = M\omega = \text{áll.} \quad (4.22)$$

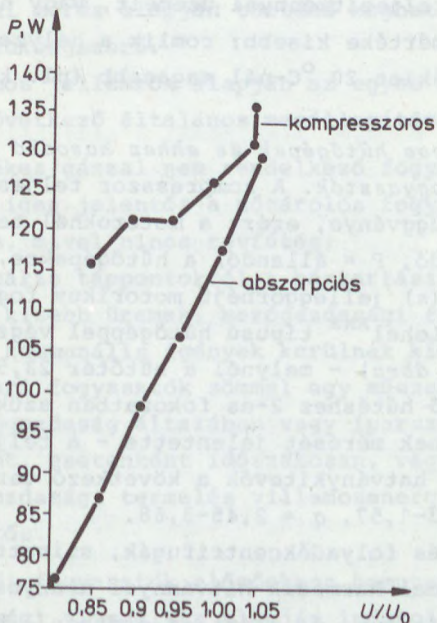
(ahol M a nyomaték, ω a szögsebesség), azzal a feltétellel, hogy a motor tengelyén jelentkező terhelő nyomaték állandó.

A leírtakból következik, hogy a teljesítményváltozás hatványkitevője $p = 0$, azaz a feszültségcsökkentés gyakorlatilag semmiféle teljesítménycsökkenést nem okoz, az áramfelvétel $P \approx \text{állandó}$ miatt azonban növekszik.

A motorok esetén célszerű megvizsgálni, hogy a feszültségcsökkentés miatti nagyobb áramfelvétel következtében védelemműködés mikor következik be. A túlterhelésvédelem I_b beállított árama általában a motor névleges árama. Túlterhelés esetén a szokásos kioldási idők:



4.14. ábra. Aszinkron motor fordulatszámváltozása 90%-ra csökkentett hálózati feszültség esetén, ha a terhelő nyomaték állandó



4.15. ábra. Hűtőgépek teljesítményfelvételének változása a feszültség csökkentésekor

1,05 I_b	$t_{kiold} \leq 2 \text{ h}$	(hideg üzemállapot),
1,2 I_b	$t_{kiold} \leq 2 \text{ h}$	(meleg üzemállapot),
1,5 I_b	$t_{kiold} \leq 2 \text{ min}$	(meleg üzemállapot).

Az üzemállapotok a védelemre, a kioldási idők 20°C környezeti hőmérsékletre vonatkoznak.

Az előbbiekből következik, hogy ha $U = 0,85U_0$, akkor $I = 1,176I_0$, azaz 17,6%-os áramtúlterhelés lép fel a motorban. Ez azt jelenti, hogy névleges terhelésen üzemelő motornál, 20°C környezeti hőmérsékletnél, a motor védelme a 15% feszültségcsökkentés bevezetése után kb. 2 óra múlva fog működni. Javul a helyzet, ha a motor a névlegesnél kisebb teljesítménnyel üzemelt, vagy ha a feszültségcsökkentés mértéke kisebb; romlik a helyzet, ha a környezeti hőmérséklet 20°C -nál magasabb (pl. kohászat, egyes bányák).

Kompresszoros hűtőgépek és ehhez hasonló jelleggörbéjű motorikus fogyasztók. A kompresszor teljesítménye a fordulatszám függvénye, ezért a motoroknál tett megjegyzés ($M = \text{állandó}$, $P = \text{állandó}$) a hűtőgépekre, ill. ehhez hasonló $P = f(n)$ jelleggörbéjű motorikus fogyasztóra nem igaz. Egy Lehel^{xxx} típusú hűtőgéppel végzett mérés szerint (4.15. ábra) - melynél a hűtőtér $23,5^\circ\text{C}$ -ről 7°C -ra történő hűtéshez 2-es fokozatban szükséges motor működési idejének mérését jelentette - a teljesítményváltozását mutató hatványkitevők a következő tartományban vannak: $p = 0,3-1,57$, $q = 2,45-3,68$.

A levegő- és folyadékcentrifugák, szivattyúk esetén a fordulatszámmal harmadik hatvánnyal arányos a felvett hatásos teljesítmény, és ezért ez esetben a hatványkitevő jóval nagyobb is lehet, és elérheti a $p = 4,5$ -öt is.

4.8.2. FOGYASZTÓI KÖRZETEK FESZÜLTÉGÉRZÉKENYSÉGE

Az előzőekből láttuk, hogy az egyes egyedi fogyasztók hatásos és meddőteljesítmény-igénye igen eltérő módon függ a csatlakozási pont feszültségétől, ezért ezekből a különböző összetételű fogyasztói csoportokra rendszerszintű következtetést nem lehet levonni, mert a fogyasztói összetétel egyrészt pontosan nem ismert, másrészt a fogyasztói berendezések bekapcsolása, üzeme napszaktól, évszaktól és helyi szokásoktól függően változik. Ezért a feszültségcsökkentés révén elérhető fogyasztói terheléscsökkentés megismerése céljából egyes tipikus fogyasztói ellátási területek, körzetek feszültségfüggésének helyszíni mérés alapján történő meghatározása az indokolt és szükségszerű.

A villamos jellemzők alapján az egyes ellátási területekre a következő általános megállapítások tehetők:

- vezetékes gázzal nem rendelkező fogyasztói területeken igen jelentős a hőtárolós fogyasztók részaránya, mivel nincs távfűtés;
- kommunális táppontokról a háztartási fogyasztókon kívül kisebb üzemek, mezőgazdasági fogyasztók, egyéb kommunális igények kerülnek kielégítésre;
- az ipari fogyasztók zömmel egy műszakban üzemelnek;
- a mezőgazdaság általában vagy iparszerű termelést folytat, esetenként időszakosan, vagy a hagyományos mezőgazdasági termelés villamosenergia-igénye nem jelentős.

Az egyedi fogyasztók előzőekben bemutatott feszültségérzékenységi vizsgálata alapján indokoltnak mutatkozik egy-egy ellátási terület $P = f(U)$ kapcsolatát is hatványfüggvénnyel leképezni. A feltételezés helyessége tényleges mérések esetén ellenőrizendő pl. korrelációs-számítással.

Az egyes tipikus fogyasztói körzetek hatásos teljesítményének feszültségfüggésére az egyedi fogyasztói be-
rendezésekre felírtakkal azonos alapelven, (4.16)-hoz
hasonlóan, felírható a következő összefüggés:

$$P = \frac{P_0}{U_0^p} U^p = cU^p. \quad (4.23)$$

Az érzékenységre jellemző p kitevő meghatározható
úgy, hogy az U_1 -ről U_2 -re változtatott tápfeszültség
esetében mérjük a P_1 -ről P_2 -re változó fogyasztói terhe-
lést, és ebből a következőképpen számítjuk:

$$p = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg U_1 - \lg U_2}. \quad (4.24)$$

A tényleges mérések alkalmával a leszabályozás a
transzformátor fokozatkapcsolójának léptetésével törté-
nik, így nagyobb számú ($P;U$) értékpár figyelembevételé-
vel p értékét a lineáris regresszió módszerével meg le-
het határozni, és a korrelációs tényező kiszámításával a
(4.23) hatványfüggvény alkalmazásának helyességét is meg
lehet vizsgálni.

4.8.3. EGYES, TIPIKUS FOGYASZTÓI KÖRZETEK TÉNYLEGES FESZÜLTSGÉRZÉKENYSÉGE MÉRÉS ALAPJÁN

A feszültségérzékenység szempontjából a fentiek fi-
gyelembevételével Magyarországon 1988-1989-ben a követke-
ző tipikus középfeszültségű fogyasztói körzetek kerültek meg-
vizsgálásra:

1. városi kommunális jellegű körzet (az ellátási te-
rületen meghatározó ipari fogyasztó nincs);
2. városi ipari-kommunális jellegű körzet;

3. vidéki mezőgazdasági jellegű körzet (az ellátási területen meghatározó ipari fogyasztó nincs);
4. vidéki ipari-mezőgazdasági jellegű körzet (jellemzője, hogy koncentráltan jelentkezik néhány 1 MW feletti ipari fogyasztó).

A valóságban ezen tipikus fogyasztói körzeteknek teljesen megfelelő elosztóhálózati ellátási körzetek nehezen képzelhetők el, de a táppontok egyedi mérlegelés alapján elég jól besorolhatók.

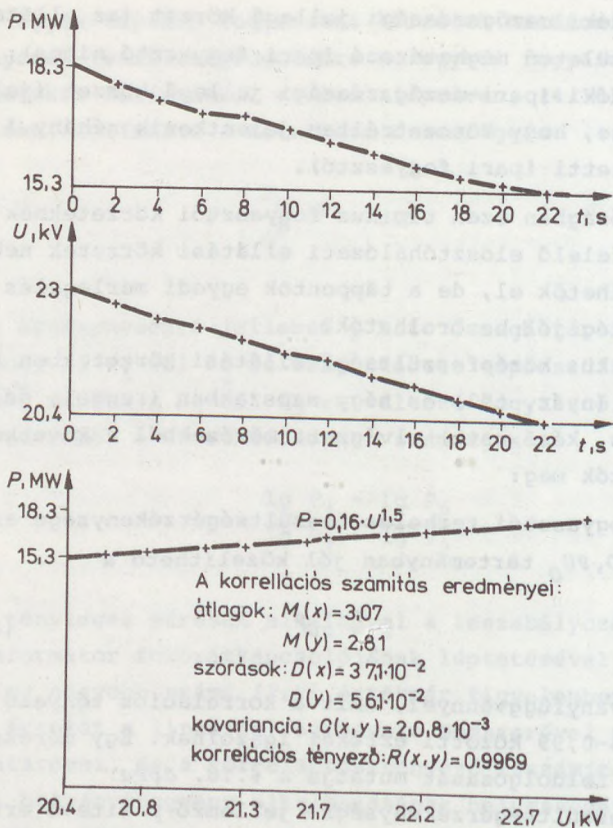
A tipikus középfeszültségű ellátási körzetekben két évszakban (nyár, tél) és négy napszakban (reggel, délben, esti csúcs, késő este) elvégzett mérésekből a következők állapíthatók meg:

- A fogyasztói terhelés feszültségérzékenysége az $U_0 - 0,9U_0$ tartományban jól közelíthető a

$$P = cU^p \quad (4.25)$$

hatványfüggvénnyel, amit a korrelációs tényező 0,85-0,99 közötti értékei igazolnak. Egy mérésorozat feldolgozását mutatja a 4.16. ábra.

- A feszültségérzékenységre jellemző p kitevő értéke 0,7-1,8 között változik (4.5 és 4.6. táblázat) és reggel, ill. éjszaka kisebb, a délelőtti csúcsban nagyobb, míg az esti csúcs idején 1,5 körüli érték.
- A munkanapi p értékek általában kisebbek, mint a munkaszüneti nap értékek.
- A feszültségkitevő értékei nyáron valamivel kisebbek, mint télen.
- A feszültségcsökkentésre a motorikus fogyasztók gyakorlatilag nem reagáltak.
- A vizsgálat ideje alatt (1-2 óra) fogyasztói panaszok, valamint minőségromlásra utaló információk



4.16. ábra. A nagykátai 120/20 kV-os alállomásból ellátott körzet terhelés-feszültségfüggés mérés feldolgozása

nem érkeztek, jóllehet a fogyasztók előzetesen értesültek a vizsgálatról.

- A fogyasztói készülékeknél végzett egyedi vizsgálatok (háztartási fogyasztók, világítás) bizonyították, hogy a tervezett mértékű feszültségcsökkentés

4.5. táblázat. A p feszültségkivevő szélső értékei egyes ellátási területekre (napszaktól való függés)

Körzet-típus	6-8 óra	10-12 óra	18-20 óra	20-22 óra
1	0,9-1,7	1,2-1,5	1,2-1,8	
2	0,8-1,6	1,2-1,3	1,5-1,6	
3	0,8-1,8	1,3-1,8	1,4-1,7	0,7-0,9
4	0,7-1,6	0,9-1,7	1,3-1,8	1,0-1,4

4.6. táblázat. A p feszültségkivevő szélső értékei egyes ellátási területekre (évszaktól való függés)

Körzet-típus	nyár 10-12 óra	tél 10-12 óra
1	1,2-1,3	1,2-1,5
2		1,2-1,3
3	1,3-1,4	1,3-1,8
4	1,0-1,3	0,9-1,8

a készülékekben károsodást nem okozott, üzemüket észrevehetően nem befolyásolta, amint az a szabványelőírásoknak megfelelően tervezett és gyártott berendezésnél várható is volt.

Az ipari nagyfogyasztók közül háromnál került sor mérésekre:

- üvegyár (Salgótarján),
- papírgyár (Diósgyőr),
- kohászat (Diósgyőr).

Az ipari nagyfogyasztóknál végzett mérések alapján a következőket lehet megállapítani:

- Egy-egy ipari nagyfogyasztó feszültségének szabályozása nem hat ki a 120 kV-os főelosztóhálózat feszültségére,
- 10% körüli feszültségcsökkentésre jelentős teljesítménycsökkenés lépett fel.
- Az ipari nagyfogyasztók a feszültségcsökkentés hatását jól viselték, üzemben maradtak.
- A vizsgált feszültségcsökkentési tartományban sem termeléskiesés, sem selejt nem keletkezett a vizsgálatból kifolyólag.

A mért feszültségcsökkentés és teljesítménycsökkenés induló értékre vonatkozó százalékos adatok a 4.7. táblázatban láthatóak. Az elvégzett kísérletek alapján megállapítható, hogy feszültség csökkentésével jelentős fogyasztói teljesítményt lehet elérni.

4.7. táblázat. A mért feszültségcsökkenés és teljesítménycsökkenés százalékos adatai

Ipari nagyfogyasztók	Feszültségcsökkentés $U_{le}' \%$	Teljesítménycsökkenés $P_{le}' \%$	$\frac{P\%}{U\%}$
Síküveggyár	15	17	1,13
Papírgyár	8,9	13,2	1,48
Kohászat			
Oxigéngyár	10,5	13,2	1,26
Hengermű	8,6	5,8	0,67

Az egyes elosztóhálózati táppontokon 10% feszültségcsökkentésre bekövetkező teljesítménycsökkenés mértéke 7-18% között van. Figyelembe véve a magyar villamosenergia-rendszerben a fogyasztói viszonyokat, ez azt jelenti,

hogy 6700 MW-os terhelés esetén eredőben mintegy 7-800 MW terheléscsökkenést lehet elérni.

4.9. A FREKVENCIACSÖKKENTÉS HATÁSA A FOGYASZTÓI TERHELÉSRE

A villamosenergia-rendszerekben állandó frekvenciát tartanak, és csak az előzőekben bemutatott üzemzavari esetben csökken le a frekvencia. Amint az 1.5. pontban bemutattuk, a frekvencia csökkenésével a fogyasztói teljesítmény is csökken. Ezt a fizikai tulajdonságot egyes esetekben ki lehet használni arra, hogy nagyobb üzemzavar elkerülése érdekében - szükség esetén, pl. szigetüzemben - forrásoldali teljesítményhiány esetén az üzemirányító személyzet tudatosan alacsonyabb frekvenciára szabályoztatja az erőműveket és ezzel javítja a forrásfogyasztás egyensúlyt. Ilyen tudatos fogyasztói terheléscsökkenés alkalmazására pl. USA-ban, Angliában, Oroszországban került sor. Az 1.6. pontban bemutatott rendszerüzemzavarok tapasztalata alapján a helyreállítási periódusban is van jelentősége ezen módszernek. Hatásosságához ismernünk kell az egyes fogyasztók frekvenciafüggését.

A fogyasztók egy részének teljesítményfelvétele független a frekvenciától. Ilyenek: villamos világítás, villamos ellenállás-kemencék, villamos úvkemencék stb.

A fogyasztók másik részének villamos teljesítményfelvétele a frekvenciaváltozással változik, lineárisan (forgácsoló szerszámgépek, emelőgépek, felvonók, kompresszorok stb.), négyzetesen (hengerek stb.), harmadik hatvány (szellőzők, keverők, centrifugák, szivattyúk stb.), esetleg ritkábban még nagyobb hatvány (statikus nyomású szivattyú) szerint. Az i -edik berendezés tényleges fogyasztói teljesítményfelvétele a frekvencia függvényében:

$$P_i = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^p \quad (4.26)$$

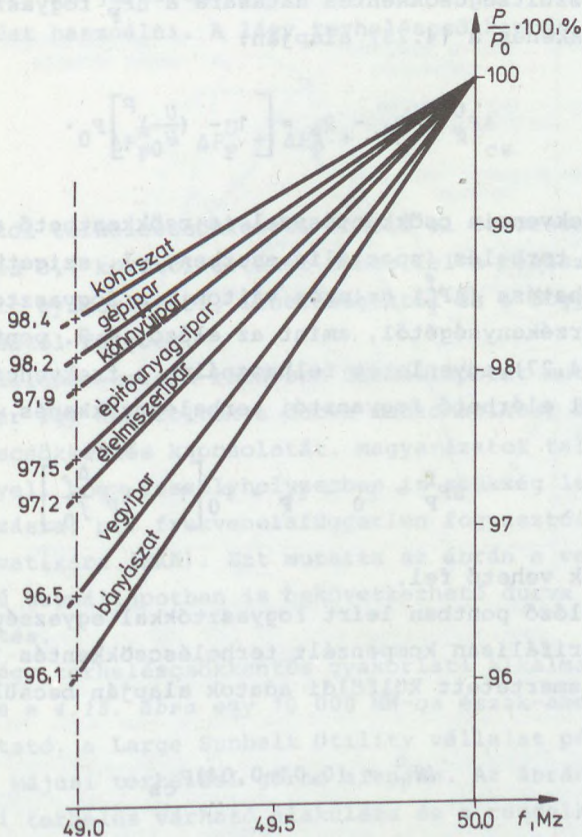
Differenciálhányadost képezve, átrendezve, szűk- (0,95-1,02) f_0 - tartományban megengedhető egyszerűsítéssel és az (1.11) egyenletnél alkalmazott jelölés miatt $p = K_F$ jelölést használva, kapjuk, hogy

$$P_i \cong P_0 \left(1 + \frac{K_F \Delta f}{f_0} \right) \quad (4.27)$$

Megvizsgálva az egyes ipari ágazatokba beépített különböző berendezések arányát, megkapjuk az ágazatok watos teljesítményváltozását a frekvencia függvényében. Egy ilyen vizsgálat eredményét mutatja be a 4.17. ábra, amely érzékelteti az egyes ipari ágazatok frekvenciaérzékenysé-
gét. Ennek megfelelően a frekvenciaérzékenység szerinti sorrendben a legnagyobb fogyasztói terheléscsökkenés a frekvencia függvényében a bányászatban (49 Hz-nél 3,94%), míg a legkisebb a kohászatban (49 Hz-nél 1,6%) mutatható ki, az egyes iparágakba beépített berendezések frekvenciaérzékenysége alapján.

4.10. A LÁGY TERHELÉSKORLÁTOZÁS ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE ÉS KORLATAI

A villamosenergia-rendszer üzemállapotairól írottak szerint (4.1 pont) a veszélyhelyzetnek definiált III. üzemállapotban a rendszer teljesítőképességének határán üzemel, a termelés-fogyasztás egyensúly elvesztésének és így a fogyasztói korlátozással járó üzemzavar bekövetkezésének valószínűsége megnő. Ilyen üzemállapotban biztonság irányában hat a terhelés csökkentése.



4.17. ábra. Egyes iparágak %-os wattos terhelésének változása a frekvenciaváltozás függvényében

Az előző pontokban három olyan módszert mutattunk be, amelyekkel a fogyasztói terhelést úgy lehet csökkenteni a veszélyhelyzetben, hogy a fogyasztó üzemét ezek vagy észrevehetően nem befolyásolják, vagy a díjjegyzményes

megállapodás esetén a terheléscsökkentés a fogyasztó műszaki-gazdasági tevékenységébe be van számítva.

A feszültségcsökkentés hatására a ΔP_F^U fogyasztói terheléscsökkenés a (4.23) alapján:

$$\Delta P_F^U = P_0 - P_F = \left[1 - \left(\frac{U}{U_0} \right)^p \right] P_0 \quad (4.28)$$

A frekvencia csökkentésével is csökkenthető a fogyasztói terhelés (speciális esetben, pl. szigetüzem, melynek hatása (ΔP_F^f) szintén változik a fogyasztók frekvencia-érzékenységtől, amint az előző, 4.9. pontban láttuk. A (4.27) egyenletet felhasználva a frekvenciacsökkentéssel elérhető fogyasztói terheléscsökkenés

$$\Delta P_F^f = P_0 - P_F = P_0 \left[1 - K_F \frac{\Delta f}{f_0} \right] \quad (4.29)$$

értékűnek vehető fel.

Az előző pontban leírt fogyasztókkal egyezségeen alapuló, tarifálishan kompenzált terheléscsökkentés (ΔP_F^e) pedig az ismerttetett külföldi adatok alapján becsülhető:

$$\Delta P_F^e = (0,01-0,04) P_{CS} \quad (4.30)$$

ahol P_{CS} a fogyasztói nettó terhelés.

A fentiekben leírt terheléscsökkentések nem azonos kategóriájúak az üzemzavar során (esetleg azt megelőző különböző okokból távműködtetéssel) sorra kerülő fogyasztói korlátozásokkal, amiket "durva" fogyasztói terheléscsökkentésnek nevezhetünk. Ezeket a terheléscsökkentéseket a fogyasztó vagy nem is veszi észre azonnal, vagy tarifálish kompenzállással a műszaki-gazdasági tevékenység-

gébe be van számítva, ill. elő van készítve. Mindezért célszerű definíciószerűen elkülöníteni a felsorolt korlátozásokat, és javaslom ezekre a "lágyszorúságcsökkentés" elnevezést használni. A lágyszorúságcsökkentés módszerével

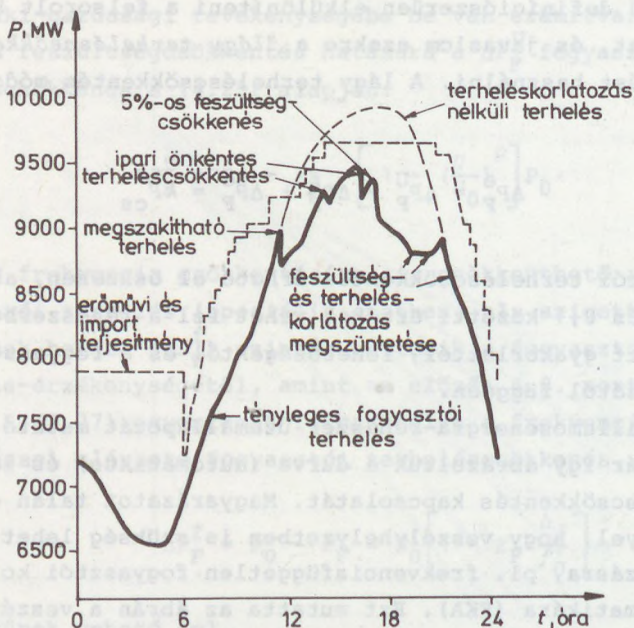
$$\Delta P_F^e = \Delta P_F^U + \Delta P_F^f + \Delta P_F^e = kP_{cs} \quad (4.31)$$

fogyasztói terheléscsökkentés érhető el összesen, ahol k 0,01 és 0,1 közötti értéket vehet fel a rendszerben alkalmazott gyakorlattól, lehetőségektől és a fogyasztó reagálásától függően.

A villamosenergia-rendszer üzemállapotát mutató 4.1. ábrán már így ábrázoltuk a durva (automatikus) és lágyszorúságcsökkentés kapcsolatát. Magyarán talán csak az igényel, hogy veszélyhelyzetben is szükség lehet durva korlátozásra, pl. frekvenciafüggetlen fogyasztói korlátozó automatikára (FKA). Ezt mutatta az ábrán a veszélyhelyzetű üzemállapotban is bekövetkező durva terheléscsökkentés.

A lágyszorúságcsökkentés gyakorlati alkalmazását mutatja be a 4.18. ábra egy 10 000 MW-os észak-amerikai szolgáltató, a Large Sunbelt Utility vállalat példáján, az 1981 májusi terhelési görbe alapján. Az ábrán a fogyasztói terhelés várható alakulása és a rendelkezésre álló erőművi + import teljesítőképesség alapján látható a lágyszorúságcsökkentés hatása, szerepe, a forrásoldali előrelátható teljesítményhiány esetében, anélkül, hogy durva (automatikus vagy hatósági) korlátozást kellett volna alkalmazni.

Végezetül megemlítendő, hogy a gazdasági alapon történő egyezségeken alapuló átmeneti terheléscsökkentés - megfelelő ösztönzés és alkalmazás esetén - a terhelési görbe alakulására is hatással lehet, ami az erőműrend-



4.18. ábra. Lágyszabású terheléskorlátozás gyakorlati megvalósítása egy 10 000 MW-os rendszerben az USA-ban [67]

szer teljesítményének tervezésére is kihat. Ha a valóságban is jelentkezik már a terheléscsökkentés eredménye, akkor ezt a tényt célszerű kihasználni.

FÜGGELÉK
F1. EMPIRIKUS SŰRŰSÉGFÜGGVÉNY KÖZELÍTÉSE
ELMÉLETI SŰRŰSÉGFÜGGVÉNNYEL

K. Pearson (1857-1936) angol matematikus a gyakorlatban szóba jövő összes sűrűségfüggvényt mind be tudta foglalni a következő differenciálegyenlet megoldása közé:

$$\frac{y'}{y} = \frac{x + a}{b_2 x^2 + b_1 x + b_0},$$

ahol a, b_0, b_1, b_2 együtthatók. Kimutatható [93], hogy bizonyos feltételek mellett a differenciálegyenlettel meghatározott sűrűségfüggvény első négy kezdeti momentumából (ha van) az összes együttható meghatározható. Ha tehát kikötjük, hogy i ($i = 1, 2, 3, 4$) számú kezdeti momentumnak kell léteznie, akkor a tényleges adatokból kiszámítjuk ezeket a momentumokat, értéküket pedig behelyettesítve a Pearson-féle differenciálegyenletbe, meghatározzuk az i együtthatókat.

A kezdeti momentumok és az együtthatók említett összefüggésének általános bizonyítását a fentebb hivatkozott matematikai kézikönyv a 142. oldalon tartalmazza. A gyakorlati felhasználás céljából igazoljuk, hogy a normális és az exponenciális eloszlás sűrűségfüggvénye kielégíti a Pearson-féle differenciálegyenletet.

Normális eloszlás esetén:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

$$y' = -\frac{x-m}{\sigma^2} y,$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{x-m}{\sigma^2},$$

vagyis a Pearson-féle differenciálegyenlet paraméterei:

$$a = -m, \quad b_2 = b_1 = 0, \quad b_0 = -\sigma^2.$$

Exponenciális eloszlás esetén:

$$y = \lambda e^{-\lambda x},$$

$$y' = -\lambda y,$$

$$\frac{y'}{y} = -\lambda.$$

A megfelelő együtthatók

$$a = b_2 = b_0 = 0, \quad b_1 = -\frac{1}{\lambda}.$$

Hasonlóan igazolható, hogy a legfontosabb sűrűségfüggvények kielégítik a Pearson-féle differenciálegyenletet.

F2. ÜZEMBIZTONSÁGI KRITÉRIUMOK ÉS PÉLDÁK

Megfelelő üzembiztonság csak néhány alapvető tervezési és üzemeltetési kritérium kielégítése mellett érhető el. Meg kell említeni, hogy némely esetben egyik vagy másik tervezési vagy üzemeltetési kritérium valamilyen okból nem teljesíthető, és ekkor az üzemviteli személyzet igyekszik a rosszabb körülmények között olyan üzemmel szolgáltatni a villamos energiát, amely a lehetséges legkisebb kockázattal jár.

Az üzembiztonsági kritériumok országonként és rendszerenként különbözőek. A következőkben ismertetjük, hogy néhány nagy rendszeregyesülésben milyen kritériumokat alkalmaznak megjegyezve, hogy ezeken belül is egyes országok további követelményeket is alkalmazhatnak.

F2.1. ÜZEMBIZTONSÁGI KRITÉRIUMOK A NORDEL-RENDSZERBEN

A 90-es évek elejére a beépített erőművi teljesítmény 60 000 MW-ot, a fogyasztói csúcsterhelés mintegy 40 000 MW-ot tesz ki.

A megfelelően magas szintű villamosenergia-szolgáltatás érdekében a tervezéshez és üzemeltetéshez a következő irányelveket alkalmazzák:

A következő esetekben nem kerülhet sor fogyasztói korlátozásra:

- Erőművi berendezés kiesése. Ez nem jelenti szükségszerűen egy teljes erőmű kiesését, hanem egy olyan rendszerelem kikapcsolódását, mely a legnagyobb termelőegység, pl. atomerőművi reaktorblokk elvesztését eredményezi.
- Bármely nagyfeszültségű távvezeték vagy transzformátor végleges kiesése.
- Háromfázisú tranziens hiba bármely távvezetéken helyes kikapcsolással és automatikus visszakapcsolással.
- Bármely távvezeték végleges kikapcsolása egyfázisú sikertelen visszakapcsolás után.
- Háromfázisú gyűjtősínzárlat végleges lekapcsolással, automatikus visszakapcsolás nélkül.

Ezeket a kritériumokat mind a teljes ép rendszerben, mind erőművi gépegység, távvezeték vagy transzformátor karbantartásával vagy javításával gyengített rendszerben alkalmazni kell.

A felsoroltakon kívül még nagyobb és kevésbé valószínű hibákra is végeznek vizsgálatokat annak érdekében, hogy megállapítsák a rendszer ellenálló képességét, ill. gyengeségeit. Intézkedési terveket dolgoznak ki, hogy csökkentsék az ilyen események hatását, ha mégis bekövetkeznének. Néhány példa az ilyen valószínűtlenebb hibákra:

- teljes erőmű kiesése;
- kétrendszeres távvezeték mindkét rendszerének kiesése;
- azonos távvezeték-nyomvonalon az összes vezeték kiesése;

- végleges háromfázisú zárlat úgy, hogy a távvezeték egyik végén nem kapcsolna ki a megszakító;
- távvezeték végleges kikapcsolása háromfázisú tartós zárlat miatt, sikertelen egyfázisú visszakapcsolás után.

Az erőművi tartalékteljesítményre a következő szabályok érvényesek:

- A frekvenciaszabályozási teljesítmény a fogyasztói terhelés 1,5%-át tegye ki, amely $\pm 0,1$ Hz eltérést enged meg normál esetben. Ezt a szabályozási teljesítményt a részt vevő országok között az évi energiafogyasztás arányában osztják meg.
- Minden országnak rendelkeznie kell annyi gyorstartalékkal, hogy a fogyasztás és termelés közötti egyensúlyhiányt 15 percen belül meg tudja szüntetni.
- A NORDEL-rendszernek rendelkeznie kell továbbá olyan pillanatnyi tartalékkal, amely biztosítja hogy azok az üzemzavarok, melyek gyakoriságának valószínűsége nagyobb, mint három évenként egyszer, azok ne vezessenek a stabilitás megbomlásához vagy tartós $49,5^{\circ}$ Hz alatti frekvenciához.
- Erőművi tartalékteljesítmény meghatározásánál a lehetséges legrosszabb üzemzavari esetet és hálózati terhelés-frekvencia karakterisztikát veszik figyelembe. A tartalék országonkénti szétosztását az egyes országok legrosszabb esetei szerint végzik el.
- Az önálló szabályozással rendelkező területeknek az előbb említett legrosszabb esethez tartozó elegendő a gyors meddő teljesítménnyel is rendelkezniük kell.

Azonnali üzemzavari tartalékokat úgy kell tervezni, hogy az ún. "méretezési termelőberendezés-kiesés", azaz háromévenkénti egyszeri erőművi blokk kiesés után is a frekvencia 49,0 Hz felett maradjon és 30 s múlva 49,5 Hz fölé emelkedjen.

Az erőművi terhelési sebesség vízerőműveknél $1,5\% P_n/s$ -, hőerőművi blokkoknál $0,3\% P_n/s$ -nek kell lenni, ahol P_n a névleges teljesítmény. A hőerőművi blokkoknál el kell tudni érni az $5\% P_n$ teljesítménylépcsőt, atomerőműveknél 10% terhelésváltozást 30 sec-on belül, amiből $2/3$ -ot késlekedés nélkül, $1\% P_n/s$ terhelési sebességgel szükséges elérni.

F2.2. ÜZEMBIZTONSÁGI KRITÉRIUMOK AZ USA EGYIK VILLAMOSENERGIA-RENDSZEREGBEN

Az USA-ban több rendszeregyesülés van üzemben, melyeket az ún. Megbízhatósági Tanácsok koordinálnak. Az egyik az USA észak-keleti részét és Kanada keleti részét foglalja magába (többek között ide tartozik New-York, Quebec).

A minimális üzembiztonsági szintet - a különböző követelmények miatt - a következő módon határozták meg (más rendszeregyesülés más biztonsági előírással rendelkezik).

a) A rendszeregyesülés üzemét érintő rendszerrészre vonatkozólag:

Üzemhelyzet	Kritérium	Példa
Normál	$n-2$ és $n-0$, kettős rendszerű távvezeték	Stabilitás, ill. elfogadható átmeneti túlterhelődés határán belül kell maradni 1FN zárlat és megszakítóberagadás együttes fellépésénél
Üzemzavari (ha terheléskorlátozásra lenne szükség a normál üzemhelyzet kritériumának betartásához)	$n-1$	Stabilitás, ill. elfogadható átmeneti túlterhelődés határán belül kell maradni 3F zárlat esetén

b) Rendszeregyesülés üzemét nem érintő rendszerrészre vonatkozólag:

Üzemhelyzet	Kritérium	Példa
Normál	$n-1$	Stabilitás, ill. elfogadható túlterhelődés határán belül kell maradni 3F zárlatnál

c) Ellátási körzetekben:

Táppont vagy táppontcsoportok mérete	Kritérium	Helyreállítás módja*, ideje leggyorsabb/leglassabb
1-100 MW	n-0	Kapcsolás helyszínre kiszálló ügyeletes révén/javítás
101-500 MW	n-1	Táv működtetésű kapcsolat/kapcsolás helyszínre kiszálló ügyeletesessel
500 MW-nál nagyobb	n-2	Táv működtetésű kapcsolat/kapcsolás helyszínre kiszálló ügyeletesessel

*A helyreállítás módja információt ad a feszültségkimaradás időtartamára. Táv működtetésű kapcsolat 30 percen, kiszálló ügyeletes esetén a kapcsolat 2 órán belül megtörténik, míg a javítás jóval hosszabb is lehet, mint néhány óra.

d) Erőművi tartalékok:

- Minden időben annyi tartalékot kell tartani, hogy 10 percen belül pótolni tudja egy rendszerelem kiesését.
- Ennek az ún. 10 perces tartaléknak a rendszerben szinkronizáltan kell üzemben lennie, kivéve ha rendszerösszeköttetések révén a mérés menetrendszerezhető.
- Mindenkor annyi további tartaléknak kell lennie szinkronizálva vagy anélkül, hogy egy másik gépegység kiesése esetén ennek a teljesítménynek a felét pótolni tudják.

F2.3. ÜZEMBIZTONSÁGI KÖVETELMÉNYEK A NYUGAT-EURÓPAI RENDSZEREK EGYESÜLÉSÉBEN

F2.3.1. ERŐMŰVI TELJESÍTMÉNYEK

A nyugat-európai országok párhuzamosan járó rendszereinek üzemét koordináló ún. UCPTÉ az erőművi forgótartalékokra a következő ajánlást dolgozta ki annak érdekében, hogy elkerüljék valamely gépegység kiesése miatt fellépő zavarokat.

A forgótartalékokra vonatkozó minimális követelményt 2x1250 MW-os gépegység egyidejű kiesésének alapján határozták meg. Terheléskorlátozásnak ilyen esetben nem szabad bekövetkeznie. Ennek a kritériumnak az ép rendszerre kell érvényesülnie a különböző várható terhelési viszonyok között. Annak érdekében, hogy biztonságos üzemvitel legyen, ajánlják, hogy mindegyik ország a mindenkori tényleges terhelés legalább 2,5%-át tartsa forgótartalékban.

A terheléskorlátozási rendszert minden ország maga dolgozza ki. Megállapodtak azonban, hogy 49 Hz-nél a terheléskorlátozás első lépcsőjét működtetik, ami a fogyasztói terhelés 10%-ára terjed ki.

A hálózatra az $(n-1)$ -kritériumot általánosan alkalmazzák a nemzeti rendszerekben, a különböző terhelési viszonyok között és a karbantartások mérlegelése után.

Az UCPTÉ-kritériumok nemzeti alkalmazására példát szolgálhat az NSZK villamosenergia-rendszere.

Az erőművi forgótartalék-teljesítménynek minden időben annyinak kell lennie, hogy a legnagyobb gépegység (1250 MW-os blokk) kiesését úgy kompenzálja, hogy a frekvencia ne essen 49 Hz alá (ha szigetüzemet tételének fel), így terheléskorlátozásra nem kerül sor. Ezen követelmény következtében az ország minden egyes vállalata

tának az erőművi termelés 2,5%-ának megfelelő forgótartalékot néhány másodpercen belül aktivizálnia kell. Mivel néhány erőművi blokk nem vesz részt a primer szabályozásban, a többinek kell ezt a feladatot átvennie. Ezeket a blokkokat ezért úgy kell tervezni, hogy a névleges terhelés 5%-át néhány másodpercen belül felvehessék. A primer szabályozásban részt vevő erőművi egységek közül a fosszilis blokkok a szabályozási 5%-os tartalékteljesítmény 50%-át 5 másodpercen, a második 50%-ot további 25 másodpercen belül, az atomerőművi blokkoknak pedig a teljes 5%-ot 5 másodpercen belül fel kell tudni venniük.

F2.3.2. ÁTVITELI HÁLÓZAT

A nagy kiterjedésű üzemzavarok vagy a rendszerösszeköttetések túlterhelődésének elkerülésére kétoldalú intézkedéseket dolgoztak ki, kimondottan az összeköttetések üzemvitelére. Ezek terheléslekopcsolást és hálózatbontást is tartalmaznak.

A nemzeti energiarendszerek párhuzamos üze me bontásának előre meghatározott szempontjait és kritériumait kétoldalúan határozzák meg. Jelenleg néhány energiarendszer lehetségesnek tartja, hogy 49,5 Hz alatt bontja a rendszerösszeköttetéseket egymás között.

A rendszerösszeköttetéseknél az $(n-1)$ -elvet minden időben figyelembe veszik. Gyűjtősínzárlatok következményeinek elkerülésére a legtöbb fontosabb állomáson két gyűjtősínes üzemet kell vinni.

Az egyes országok hálózatának üzeméért az egyes vállalatok felelősek az országokon belül. Az $(n-1)$ -elv azonban általánosan elfogadott.

A rövidzárlatokra vonatkozó kritériumok nagyon hasonlóak a NORDEL-rendszerben alkalmazottakhoz.

A következőkben néhány, az UCPTÉ-rendszerhez tartozó ország különleges üzembiztonsági kritériumait tekintjük át.

F2.3.3. A BELGA VILLAMOSENERGIA-RENDSZER

Erőművek. Alapvetően az $(n-1)$ -elvet veszik figyelembe. Minden egyes erőművi kiesés után az erőművek menetrendjét úgy határozzák meg, hogy a következő $(n-1)$ kiesését (a hálózatot is figyelembe véve) a rendszer kibírja. A meddő teljesítményeket alaposan tanulmányozzák és részletesen menetrendesítik. Előrejelző teljesítményeloszlási számításokat végeznek, melyek figyelembe veszik a transzformátorok feszültség szabályozását, a feszültség stabilitást és az egyes elemek meddő terhelését.

Az $(n-2)$ -kritériumot és stabilitási problémákat csak távlati fejlesztési terv készítésével vesznek figyelembe.

Forgótartalék. A legnagyobb gépegység kiesésére számítanak úgy, hogy a blokk kiesése után 15 percen belül az ország erőművei a teljesítményegyensúlyt helyreállítják.

Üzemzavari rendszabályok

a) csökkenő frekvencia esetén:

- automatikus terheléskorlátozás 49,4 Hz-nél 5%, 49,0 Hz-nél 10% és 48,7 Hz-nél további 5%,
- 49,8 Hz-nél 5% feszültségcsökkentés a fogyasztóknál, szivattyútározás-felfüggesztés,
- 49,7 Hz-nél gyorsindítású erőművi egységek indítása, a megszakítható ellátású ipari fogyasztók kikapcsolása,
- 49,7 Hz-nél az ország szigetüzemre tér át, ha előzőleg exportált,

- 47,5 Hz-nél az erőművi blokkok szigetüzemre térnek át (átkapcsolnak a háziüzemre);
- b) állandó frekvencia melletti túlterhelődés esetén:
- veszélyjelzés megy az egyes diszpécserközpontokba, ha a távvezetékek több mint 80%-ra terhelődnek, vagy ha a feszültség a névlegesnek 5-7%-nál jobban csökken, és ezek legalább két diszpécserközpont területét érintik;
- c) szigetüzem esetén:
- előrelátható szigetüzem esetén az export-importot, a szivattyús tározás erőművi üzemvitelét, a forgótartalékot és az esetleges fogyasztói korlátozást ehhez elő kell készíteni úgy, hogy a szigetüzemhez vezető vezetékiesés következményei irányíthatók maradjanak, és ezeknek az előkészítő intézkedéseknek egy órán belül végrehajthatónak kell lenniük,
 - szigetüzemben a 980 MW-os legnagyobb gépegység kiesése még automatikus fogyasztói korlátozással sem uralható.

F2.3.4. A FRANCIA VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÜZEMBIZTONSÁGI KRITÉRIUMAI

Általános üzemviteli szabály az $(n-1)$ -elv, tehát normál üzemben bármely hálózati vagy erőművi egység kiesését ki kell bírnia a rendszernek. A Francia Villamos Művek (EdF) központi teherelosztójában a számítógépen való idejű számításokat végeznek annak érdekében, hogy a rendszer állapotát figyeljék, a diszpécserok részére a döntéshozatalt elősegítsék és a kritikus helyzetben a korrigáló intézkedésekre javaslatot adjanak.

Nem normális üzem esetére különböző vészjelzéseket alakítottak ki számítógép-felügyelet mellett. Ezek a következők:

- 1-es állapot - távvezetékek névleges terhelésének túllépése 20 percig megengedett,
- 2-es állapot - a túlterhelés elleni védelmet aktivizálni kell 10 perc után, ha a vezeték terhelése $1,3-1,7 I_n$ tartományban van,
- 3-as állapot - a védelmeket működtetni kell, ha a terhelés $1,7 I_n$ felett van.

Az üzemeltetési kritériumok a következők:

(n-1)-es hálózat

- elfogadható, ha a túlterhelések az 1-es és 2-es állapotnak felelnek meg, feltéve, ha a korrigáló intézkedések valóban 10-20 percen belül megtörténnek,
- nem fogadható el viszont a 3-as állapotban és a feszültség összeomláshoz vezető helyzetekben •

(n-1)-es üzem erőműrendszerben

- elfogadható az 1-es és 2-es állapotban, terheléskorlátozás azonban nem léphet fel, ennek biztosítására 10-20 percen belül intézkedéseket kell tenni,
- nem fogadható el a 3-as állapotban vagy a feszültség-összeomlás veszélyhelyzetben.

F2.3.5. ÜZEMBIZTONSÁGI KRITÉRIUMOK AZ ANGOL VILLAMOSENERGIA-RENDSZERBEN

A 275-400 kV-os kooperációs rendszer üzemeltetése során ne legyen fogyasztói kiesés, elfogadhatatlan feszültség- és frekvenciaviszonyok vagy instabilitás

- egyrendszeres vagy kétrendszeres távvezeték,
- egy nagyfeszültségű kábel,
- gyűjtősínszakasz,
- alaphálózati transzformátor,
- meddő kompenzátor,
- a nagy terhelésű egyrendszeres erőművi betáplálás üzemzavari kiesése során.

Ha a kétrendszeres vezeték kiesése igen nagy gazdasági következményt vonna maga után, akkor ez enyhíthető egyrendszeres vezeték kiesésre és a kétrendszeres vezetékiesés műszaki követelményeinek (pl. stabilitás elvesztése) kompenzálására.

Erőművi forgótartalékok terén erőműkiesésre, valamint rendelkezésre álló erőművi teljesítmény és várható terhelés előrejelzési hibának kompenzálására úgy készülnek fel, hogy nappal kb. 3%-nyi, esti csúcsban kb. 1%-nyi üresen forgó szivattyútározós erőművi teljesítményt tartanak. Éjjel mintegy 2%-ot tartanak, aminek kb. a felét részlegesen terhelt hőerőművek adják, a másik felét megszakítható szivattyúzás képezi.

F2.4. A FREKVENCIATŰRÉSRE VONATKOZÓ KÖVETELMÉNYEK

A megengedett frekvenciaeltérésekre nemzetközi előírás nincs, annak ellenére, hogy az egyes fogyasztói berendezések normál üzemének megvannak, a műszaki adatosságok miatt, az elfogadható frekvenciatűrései. Így például a szinkronhajtású lemezjátszónál $\pm 0,1$ Hz, papíripari hengerműveknél $\pm 0,5$ Hz, elektronikus adatfeldolgozó berendezéseknél $\pm 0,5-3$ Hz.

A mai, korszerű villamosenergia-ellátás - részben éppen a folyamatos villamosenergia-szolgáltatás miatt - a nemzetközi villamosenergia-rendszeregyesülések kialakí-

tásával valósul meg. Ez pedig azt jelenti, hogy csak részrendszerben, ill. nemzeti méretekben már nem szabályozható a fogyasztó részére szolgáltatott energia frekvenciája, hanem csak a rendszeregyesülés szintjén. Ezért a rendszeregyesülések maguk határozzák meg a frekvenciatűrési mértékét. Normál üzemben a következő előírások vannak érvényben:

- nyugat-európai rendszeregyesülés (az ún. UCPTÉ-rendszer, melyhez 12 ország tartozik jelenleg) ± 75 mHz,
- észak-európai rendszeregyesülés (az ún. NORDEL-rendszer, melyhez 4 ország tartozik) ± 100 mHz,
- kelet-kínai rendszer ± 200 mHz,

Esetenként a szinkron idő és a csillagászati idő közötti eltérésre is adnak tűréseket:

- nyugat-európai rendszeregyesülés ± 30 s,
- kelet-kínai rendszer ± 30 s,
- észak-európai rendszeregyesülés ± 10 s,
- USA egyes rendszeregyesülései ± 5 s.

F3. A VILLAMOSENERGIA-ELLÁTÁS ÉS -SZOLGÁLTATÁS MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK ÉRTÉKELÉSÉRE SZOLGÁLÓ INDEXEK, MUTATÓK ÁTTEKINTÉSE

Az itt felsorolt mutatók értékei közvetlenül utalnak a vizsgált energiarendszeren belül az energiaellátás megbízhatóságára. A villamosenergia-rendszer tervezésének és üzemeltetésének vizsgálata során az egyik alapvető szempont (villamos, gazdasági, környezetvédelmi és egyéb szempontok mellett) a megfelelő biztonságú energiaellátás, amely éppen a megbízhatósági mutatók megfelelő határok között tartásával becsülhető, ellenőrizhető.

A fogyasztók ellátásának biztonsága a teljes energiarendszert tekintve függ

- az energiatermelő egységek,
- a nagyfeszültségű átviteli hálózat és
- az elosztóhálózat valamennyi elemének megbízhatóságától, ill.
- külön kell vizsgálni a csatlakozó, együttműködő energiarendszerek hatását is.

A fenti komponensek együttes, komplex vizsgálata a gyakorlatban túlságosan bonyolult, ezért az egyes komponensek vizsgálatát általában egymás után, egymástól függetlenül végzik. Időnként az irodalomban megjelennek olyan villamosenergiarendszer-modellek is, amelyek lehetővé tesznek együttes vizsgálatokat is, de ezek a módsze-

rek általában bonyolultak, ugyanakkor a modellek valamilyen mértékű, esetleg túlzott egyszerűsítésével, ill. bonyolult adatmegadással járnak.

A továbbiakban részrendszerekre vonatkozó fogalmakat definiálunk, ahogy azt a nemzetközi irodalom ajánlja.

Az indexek típusai:

- determinisztikus indexek,
- valószínűségi indexek.

A determinisztikus indexek az erőművi kapacitás bővítésének hagyományos tervezési kritériumait alkotják.

Előnyük, hogy számítási módszerei kifejezetten egyszerűek, adatigényük nem bonyolult, és a tervezők alkalmazásuk terén nagy tapasztalatokkal rendelkeznek. Hátrányuk, hogy a jelenlegi heterogén erőművi konfiguráció, a nagy tartományban változó blokkméretek mellett alkalmazásuk, pontosságuk megkérdőjelezhető, de felsorolásuk nélkül a modernebb fogalmak célszerűsége nem értékelhető.

A valószínűségi alapon számolt indexek az energiaellátás megbízhatóságára hatással levő véletlen tényezőket veszik figyelembe, mint például az energiatermelő egységek kapacitásait, kiesési valószínűségeit, a távvezetékek maximális áteresztőképességeit, meghibásodási mutatóit, a fogyasztói igények alakulásának véletlenszerűségeit stb. A valószínűségi megbízhatósági indexek alkalmazásának előnye, hogy általuk valóban "mérhetővé" válik az energiaellátás megbízhatósága, amelyet a hagyományos determinisztikus indexeknél lényegesen pontosabban írnak le. Hátrányuk, hogy számítási módszereik viszonylag bonyolultak, ill. hogy adatigényüket tekintve hosszú évekre visszamenő, statisztikailag előzetesen kiértékelt adatokat, adatrendszereket igényelnek, és új berendezések esetén nem elég megbízhatóak.

Az alábbiakban a legelterjedtebben használt megbízhatósági indexek felsorolása és rövid leírása következik. Valamennyi index az energiaellátás megbízhatóságának mértékét adja valamilyen értelemben, valamennyinek van előnye, hátránya, ezért alkalmazásuk általában több index egyidejű kiértékelésével, figyelembevételével történik.

F3.1. DETERMINISZTIKUS INDEXEK

Tartalékteljesítmény (Reserve Margin = RM).

A maximális terhelés feletti erőművi kapacitás százalékos értéke a maximális terheléshez képest, vagyis a tartalékteljesítmény és a csúcsterhelés viszonya:

$$RM = \frac{P_G - P_{DMAX}}{P_{DMAX}} \cdot 100\%$$

ahol P_G a teljes beépített erőművi kapacitás, MW; P_{DMAX} éves csúcsterhelés, MW. Főleg közel azonos strukturájú és méretű energiatermelő egységekből álló rendszerekre alkalmazható. A valószínűségi indexek kidolgozása előtt a legelterjedtebb biztonsági indexként alkalmazták. Értékét mind a mai napig figyelembe veszik.

Legnagyobb egység (Largest Unit = LM). A tartalékteljesítmény viszonya a legnagyobb egységkapacitáshoz:

$$LU = \frac{P_G - P_{DMAX}}{P_{LU}} \cdot 100\%$$

ahol P_{LU} a legnagyobb egység kapacitása, MW.

Tartalékkapacitás = Előírt tartalék + Legnagyobb egység (RM + LU).

F3.2. VALÓSZÍNŰSÉGI INDEXEK

A teljesítményhiány valószínűsége (*Loss of Load Probability LOLP*). Annak valószínűsége, hogy a rendelkezésre álló erőművi teljesítmény nem elég a napi (heti, órai) terhelési csúcs kielégítésére. A legáltalánosabban használt megbízhatósági indexek egyike. (Általánosan elfogadott értékei 1 nap/10 év és 4 nap/10 év közötti értékek.)

Teljesítményhiány csúcsidőben (*Loss of Load Expectation = LOLE*). Az év azon napjainak (óráinak) száma, amikor a rendelkezésre álló erőművi teljesítmény nem elég a napi (órás) csúcsterhelések kielégítésére. (Lényegében a LOLP-ból származtatott várható érték.)

Erőművi tartalék teljesítmény valószínűsége (*Probability of Positive Margin = POPM*). Annak az eseménynek a valószínűsége, hogy az éves csúcsterhelés kielégíthető. Nem különösebben használt index.

Nem szolgáltatott energia várható értéke (*Expected Unserved Energy = EUE*). Egy évre megadja az erőművi kapacitáshiány miatt nem szolgáltatott energia értékét (kWh-ban). Európában az egyik legelterjedtebben használt index. Mérése igen problematikus, mert korlátozás idején a valós igény nem mérhető.

Energiahiány valószínűsége (*Loss of Energy Probability = LOEP*). Az előbbi index, az EUE értéke függ a vizsgált energiarendszer energiaigényének nagyságától. (Nagyobb rendszerekben arányosan nagyobb hiányok fordulhatnak elő.)

$$LOEP = \frac{EUE}{\text{teljes energiaigény}}$$

A LOEP értéke rendkívül kis szám, a rendszer nagyságától gyakorlatilag független, jól tervezett rendszerekben.

A teljesítményhiány várható értéke (*Expected Loss of Load = XLOL*). *XLOL* megadja a nem szolgáltatott terhelések várható értékét MW-ban, valamely energiatermelő egység kiesése esetén ($XLOL = EUE/LOLE$).

Üzemzavarmegelőzési eljárás várható indexe (*Emergency Operating Procedure Expectation = EOPE*). A *LOLP* és *LOLE* indexek általánosítása, ill. kiterjesztése azokra az üzemviteli helyzetekre, amikor még rendelkezésre áll valamennyi tartalékteljesítmény, de nagyobb üzemzavarok elkerülése érdekében fogyasztói korlátozás, feszültségcsökkentés vagy teljesítmények átütemezése szükséges.

A *LOLP/LOLE* indexek és az *EOPE* index értékei között lényeges eltérés lehet, mivel sokszor fordulhat elő olyan üzemviteli helyzet, amikor már csak kevés tartalékteljesítmény áll rendelkezésre, és a fentiek szerinti korlátozó diszpécseri beavatkozás szükséges. A *LOLP/LOLE* indexeknél lényegesen szigorúbb az *EOPE* index.

A fogyasztói igények kielégítetlenségének gyakorisága és időtartama (*Frequency and Duration of Failures to Meet the Load = F&D*). Az energiahiány bekövetkezésének gyakorisága az energiahiányos események számát (*F*) jelenti egy évre vonatkoztatva, míg az időtartam a kapacitás-hiányos periódusok várható hosszát (*D*) jelenti szintén egy éves időszakot tekintve. Ezen indexek számítása meg lehetőségen nagy matematikai apparátust és nagy mennyiségű adatot igényel, így alkalmazásuk nem terjedt el széles körben. Egy adott üzemállapotra vonatkoztatva:

$$LOLP = F \cdot D$$

Valóságos terhelésnövelő képesség (*Effective Load-carrying Capability = ELCC*). Egy új energiatermelő egység beépítésének hatására bekövetkezett változás a kielégíthető éves csúcsterhelésben, MW-ban kifejezve, az

adott LOLP index megtartása mellett. Az új gép hatása méretével, kiesési valószínűségével és karbantartási igényével van figyelembe véve.

Rendszerkapacitás-ekvivalens (Firm Capacity Equivalent FCE). Hasonló, de ellentétes index mint az előző ELCC index, egy adott gép kiesésének hatására bekövetkezett eredő kapacitáscsökkenést adja meg azonos LOLP fel-tételezése mellett.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Archambault, J.J. et al.: "The reliability of large power systems." CIGRE 1980. Report. 32-16.
2. Brancart, D. - Antoine, J.P.: "Flexibility of power systems." Electra No. 153 (1991).
3. Benkó I.: Jelentés a CIGRE 1984. évi konferenciájáról (39. Bizottság). Kézirat. ERŐTERV. Budapest, 1984.
4. Szemonov, V.A.: Krupnue szisztemnue avarii. Energohozjasztvo za rubezsom 1984. 6 sz. 23.
5. Don Koval, D.O.: "Energy curtailment." Kézirat. The University of Alberta, Edmonton, 1984.
6. Ottemberg, R.A.: "A summarized account of the major disturbance of December 27th 1983 in the Swedish Power Supply System." The Swedish State Power Board, Stockholm, 1984.
7. Benkó I.: A CIGRE 39. "Villamosenergia-rendszer üzemirányítása és szabályozása" bizottságának ülése. Elektrotechnika 79 (1986) 131.
8. Winter, W.Z. - Lereverend, B.K.: "Disturbance performance of bulk electricity systems." CIGRE 1986. Report. 37/38/39-02.
9. Mamikonjanc, L.G. - Tihonov, J.A.: Usztojcsivoszty i nadezsdnoszty zarubezsnuh energoszisztem, Energohozjasztvo za rubezsom 1984/6., 1.

10. Heilmann, F.: Frekvenz und Leistungpendelungen in Elektrischen Verbundnetzen. Dissertation. Universität Stuttgart, 1983.
11. Rudenko, Ju.N.-Szemonov, V.A.: Upravlenie nadezsnosztji energosizistem. Energoatomizdat, Moszkva, 1985.
12. Tersztyánszky T.: Villamos rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének vizsgálata az átviteli képesség megbízhatóságának tervezése szempontjából. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1977.
13. Tersztyánszky T.: Villamosenergia-rendszer összeköttetések véletlen jellegű terhelésének valószínűségeloszlása. Elektrotechnika 82 (1989) 177.
14. Svoen J. - van Son P.J.M.: Colloquium of Study Committee 39. Electra No. 108 (1986) 89.
15. Josefus, I.: Iszledovanie hierarhicseszkih szstruktur diszpecserszskogo upravljenija. Obzor Naucsnoiszledovatel'szkim Insztitutom Energetika, Prága, 1985.
16. Kolonszkij, T.V.: Oszobennosztji protivovavarijnogo upravljenija. Elektricsesztvo 1985 10., 49.
17. Aboytes, F.: "Security assesment in the operation." IEEE Trans. on Power System PWRS-1. (1986) 225.
18. Knight, V.G.: "System restoration following major disturbance." Electra No. 106 (1986) 33.
19. Póka Gy. (szerk.): Védelmek és automatikák villamosenergia-rendszerben. Magyar Elektrotechnikai Egyesület - Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1988.
20. Benkó I. - Medgyesi Gy.: A nemzetközi együttműködő rendszer tapasztalatai Magyarországon. Elektrotechnika 83 (1990) 51.
21. Számítási irányelv a villamosenergia-rendszer teljesítménymérlegének tervezéséhez. OMF B tanulmány, 1-8001-T, Budapest, 1981.
22. Lévai A. - Zettner T.: Hőerőművek IV. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
23. Zettner T.: Erőművek és erőművi főberendezések korszerű üzemirányítása. Doktori disszertáció, MTA Kézirattár, Budapest, 1975.

24. Bendes T.: Villamos erőtvitel és védelme IV. Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola jegyzete, Budapest, 1973.
25. Geszti P.O.: Villamosenergia-rendszerek II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
26. Brauner, G.: Kriterien der frequenzabhängigen Lastanpassung. ÖZE 38 (1985) 483.
27. Grebe, E. et al.: Dynamische Langzeitstabilität von Netzen. Elektrizitätswirtschaft 78 (1979) 725.
28. Gersdorff, B. - Tillwicks, T.: "Coping with the problems of an island utility." Modern Power Systems 6. No. 12 (1986) 19.
29. Horváth I. - Faludi A. - Szabó L.: A wattos teljesítmény, a meddő teljesítmény, a feszültség és a frekvencia kölcsönhatásainak vizsgálata. Kutatási zárójelentés. BME EI Villamos Művek Tanszék, Budapest, 1986.
30. Füredi M. - Tersztyánszky T.: "Calculation method for determining load frequency constant." Acta Technica Acad. Sci. Hung. 92 (1-2) (1981) 153.
31. Ashmole, P.H. et al.: "Power system model for large frequency disturbances." Proc. of the IEE 121 (1974) 601.
32. Welfonder, E. - Schäfer, T. - Asal, H.P.: Regelverhalten des westeuropäischen Verbundnetzes. Elektrizitätswirtschaft 85 (1986) 793.
33. Tersztyánszky T. - Faludi A. - Szabó L.: Dinamikus szimuláció alkalmazása a rendszerbontások vizsgálatára. Elektrotechnika 80 (1987) 281.
34. Bókay B. - Rácz L.: Villamosenergia-rendszerek stabilitása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
35. Medgyesi Gy. et al.: A Paksi Atomerőmű üzembiztonsága érdekében teendő megelőző intézkedések. MEE tanulmány ERŐTERV megbízásából, Budapest, 1987.
36. Tersztyánszky T.: Rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelései. Elektrotechnika 70 (1977) 411.

37. Szendy, K.: "Az országos kooperációs hálózat feszültségének kialakítása." A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományos Osztályának Közleményei 10 (1953) 177.
38. Ronkay F.: Villamosenergia-rendszerünk teljesítmény- és frekvenciaszabályozása. Elektrotechnika 52 (1959) 556.
39. Csiki J.: Villamosenergia-rendszerek közötti kooperáció, Elektrotechnika 52 (1959) 568.
40. Sóváry E. - Pető J.: Nagy villamosenergia-körzeteket összekötő kooperációs vezetékek méretezési irányelvei. Pályamű, MTA kéziratár, Budapest, 1965.
41. Bach, I. - Hadik, Z.: "Calculation of the electric energy exchange between cooperating systems." Acta Technica Acad. Sci. Hung. 70 (3-4) (1970) 313.
42. Portnoj, H.G. - Timcsenko, V.F.: Ucsot neregularnüh kolebanij mosnosztyi pri opredelenii usztojcsivoszti szlabüh szvazej. Elektricseszto 1968/9., 12.
43. Portnoj, H.G. - Szovolov, Sz.A. - Timcsenko, V.F. - Kusztov, Sz.Sz.: Verojatnosztnüe harakterisztiki neregularnüh kolebanij. Elektricseszkie Sztancii 1976/3., 46.
44. Timcsenko, V.F.: Kolebanija nagruzok i obmennoj mosnoszti energoszisstem. Energija, Moszkva, 1975.
45. Mitin, Jv. Sz. - Bivald, J.O.: Uszlovija usztojcsivoszti elektroperedacsi pri szlucsajnuh izmenijah peretoka mosnoszti. Izvesztija VUZ 1981/7., 87.
46. Venikov, V.A. - Aszambaev, Sz.N.: Ekszpressz-ocenska usztojcsivoszti processza po ego nacsalnoj sztadi. Izvesztija Akad. Nauk SzSzSzR Energetika i Transzport 1986/3., 23.
47. Vaszin, V.P. - Kovács, P.: Verojatnosztno-sztaticszeszkie priznaki usztojcsivoszti parallennoj rabotü en.el.-ih szisztem. Izvesztija Akad. Nauk SzSzSzR Energetika i Transzport 1986/3., 12.
48. Venikov, V.A. - Vajman, M.J.: Usztojcsivoszt elektroenergeticseszkuh szisztem pri izmenenijah nagorozok v uzlah. Izvesztija Akad. Nauk SzSzSzR Energetika i Transzport 1986/4., 45.

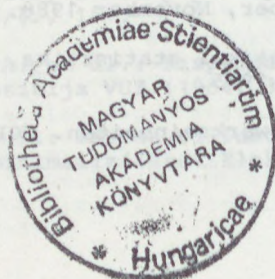
49. Kovács, P.J.: Razrabotka metodov povüsenija nadezs-nosztii prallennoj rabotü. Kandidátusi értekezés, Moszkva, 1987.
50. Tersztyánszky T.: A rendszerközi hatás elemzése. Elektrotechnika 69 (1976) 429.
51. Esterhás, S. - Tersztyánszky, T.: "Analysis of one-hour power flows between systems with probability theory." Acta Technica Acad. Sci. Hung. 84 (3-4) (1977) 281.
52. Tersztyánszky, T. - Tusnádi G.: Rendszer-összeköttetések maximális terhelésének becslése. Műszaki Tudomány 53 (1977) 451.
53. Tersztyánszky, T.: "Hungarian Contribution to the CIGRE Report on comparison of the reliability criteria used in various countries." CIGRE WG 37-01 84/07/102 (Hu), 1984.
54. MI-09-5001-86. Irányelvek a hazai alaphálózat tervezésére. Műszaki Irányelv, Ipari Minisztérium, Budapest, 1986.
55. Jusseret, R.: "Reliability criteria used in various countries." Electra No. 110 (1987) 67.
56. Okorov, V.P.: Zadacsi i problemü optimizacii razvitiija bolsih szisztem. Izvesztija Akad. Nauk SzSzsZr Energetika i Transzport 1985. 5.sz. 72. o
57. Tersztyánszky, T. - Tusnády, G.: "An estimation of the maximum loads of interconnection." Acta Technica Acad. Sci. Hung. 86 (1-2) (1978) 147.
58. Bán G. - Benkó I. - Faludi A. - Horváth I. - Szabó L.: A KGST VERE metszék áteresztőképességével kapcsolatos vizsgálatok. BME-EI Villamos Művek Tanszék, Budapest, 1985.
59. Tersztyánszky, T. - Falud, A. - Szabó, L.: "Power system decoupling analysis by time-domain dynamic simulation." IFAC Symposium, Brussels, 1988. Report 8.4.1.
60. Deckman, S.M. et al.: "Dynamic simulation for interconnected power systems." IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, 1985. Preprints pp. 305-312.

61. Faludi A. - Szabó L.: Elektrotechnikai időfolyamatok rendszerszintű szimulációja számítógépeken. Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola, XI. tudományos ülészak, Budapest, 1986.
62. Kalozsnúj, A.H. et al.: Izsledovanie usztojcsivoszti OESz Vosztoka. Elektriczeszkie Sztancii 1982/3., 17.
63. Hagenmeyer, E.: "Operational objectives and criteria for power system." Electra No. 108 (1986) 127.
64. Stengel, J. et al.: "State of art of use of computer aids." Electricity Supply (Journal of UNIPEDE) No. 88. (1979) 3.
65. Schulz, R.P. - Price, W.W.: "Classification and identification of power system emergencies." IEEE Trans. on PAS 103 (1984) 3471.
66. Utasítás az MVMT energetikai berendezéseiben fellépő üzemi hibák (nem tervezett üzemi események) meghatározására. Magyar Villamos Művek Tröszt, Budapest, 1987.
67. Delgado, R.M.: "Demand-Side Managment Alternatives." Proc. of the IEEE 73 (1985) 1471.
68. Consumer acceptance of load managment. UN-ECE EP/GE. 2/R. 65 and Add 1-6. May. 1983.
69. Chamberlin, J.H.: "Pricing and incentives." Proc. of the IEEE 73 (1985) 1513.
70. Tersztyánszky T.: Villamosenergia-ipari fejlődés Európában. Magyar Villamos Művek Tröszt Közlemények, 1987/4., 1.
71. Tajthy T.: Fogyasztói területek hatásos és meddő teljesítményfelvételének feszültségfüggése. Villamosság 18 (1970) 277.
72. Dollinger, J.: Die Frequenz - und Spannungabhängigkeit des Leistungsbedarfs elektrischer Verbraucher und Netze. Elektrizitätswirtschaft 86 (1987) 228.
73. A feszültségkorlátozás megvalósítása a korszerű üzemi irányítás keretében. Munkajelentés. Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola, Budapest, 1987.

74. Az Országos Előrelátható Villamos Terheléskorlátozás sorrendje. Állami Energetikai és Energiabiztonságtchniaki Felügyelet, Budapest, 1986.
75. Országos előre nem látható - üzemzavari - villamos terheléskorlátozás sorrendje. Magyar Villamos Művek Tröszt, Budapest, 1987. jún.
76. Böcker, H. - Kaufmann, W.: Optimierung des Aufwandes für die Zuverlässigkeit der Elektrizitätsversorgung in der Netzplanung zum Nutzen des Abnehmers. Elektrizitätswirtschaft 84 (1975) 215.
77. Persoz, H.: "Taking into account service continuity and quality in distribution network planning." CIRED 1977. Paper No. 4.1.
78. Reguly Z.: Az üzembiztonság gazdaságossági kihatásai. Elektrotechnika 71 (1978) 193.
79. Anderson, R. - Taylor, L.: "The social cost of un-supplied electricity." Energy Economics, 1986/7 139.
80. Mackay, E.M. - Berk, L.H.: "Costs of power interruptions to industry." CIGRE 1978. Report 32-07.
81. Füredi M.: Az előrelátható terheléskorlátozás okozta fogyasztói kár meghatározás számítással. Elektrotechnika 76 (1983) 303.
82. Füredi, M.: Quantitative Bewertung wirtschaftlicher Auswirkung der Zuverlässigkeitsänderung von Elektroenergiesystem. Elektrische 1985/9., 338.
83. Elek J.: A rendszerben szükséges kapacitástartalékok meghatározására kidolgozott új számítási módszer. ERŐTERV Közlemények 9. szám (1971) 61.
84. Kwiatkowski, M.: Rozdział operacyjny ograniczen poboru mocy między zakłady przemysłowe. Energetika (lengyel) 1982/4., 151.
85. Arzamszcev, D.A. et al.: Raspredelenie deficita mosnosti. Izvestija VUZ (1984) 3.
86. Tersztyánszky T.: Tartós villamosenergia korlátozási veszteség minimalizálása. Elektrotechnika 80 (1987) 161.

87. Tersztyánszky, T. - Füredi, M.: "Methods for determining loss-costs, due to electric power curtailment." Acta Technica Acad. Sci. Hung. 100 (3-4) (1987) 343.
88. Tersztyánszky T.: Fogyasztói terheléscsökkentési rendszer továbbfejlesztése. Elektrotechnika 81 (1988) 41.
89. Szemjonov, V.A.: Avarija v energoszisztem Svecii 27 dekabrja 1983. Energohozjasztvo za rubezsom 1984/4., 13.
90. Knight, V.G.: "Third survey of major disturbances." Electra No. 122 (1989) 77.
91. Tersztyánszky T. - Novothny F.: Feszültségszabályozással megvalósítható fogyasztói terheléscsökkentés. Elektrotechnika 84 (1991), 126.
92. Rényi A. - Szentmártonyi T.: Gépipari üzemek energiaszükségletének valószínűségszámítási meghatározása. MTA Alkalmazott Matematikai Intézetének Közleményei, Budapest, 1952.
93. Medgyesi P. - Takács L.: Műszaki matematikai gyakorlatok. Valószínűségszámítás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1957.
94. Korn, G.A. - Korn, T.M.: Matematikai kézikönyv műszakiaknak. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
95. Tersztyánszky, T.: Modelling of random loads of inter-ties. UN Seminar, Moscow, 1987. EP/SEM. 12/R.23.
96. Reimann J.: Ismerkedés a valószínűségszámítással. Zrinyi Kiadó, Budapest, 1972.
97. Tersztyánszky, T. - Major, P.: "Calculation of electric energy exchange between two power systems." IIASA Working Paper, November 1988. WP-88-106.
98. Vincze I.: Matematikai statisztika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
99. Ausfälle von Krafwerkseinheiten. UCPTE, Bericht, 1986.

100. Operating experience with nuclear power stations in member states in 1985. IAEA, Vienna, 1986.
101. Tersztyánszky J.: Frekvenciacsökkenés sebessége a villamosenergia-rendszerben. Elektrotechnika 81 (1988) 210.
102. Benkó B. - Kapás M.: Lehetőségek a frekvenciafüggő terheléskorlátozás javítására. Elektrotechnika 81 (1988) 261.
103. Tersztyánszky T. - Faludi A. - Szabó L.: Együttműködő villamosenergia-rendszerek szétkapcsolódásának vizsgálata. Kutatási jelentés I-II. BME EI Villamos Művek Tanszék, Budapest, 1986-1987.
104. Tombor A.: A rendszerautomatikák alkalmazásának aktuális problémái. Magyar Villamos Művek Tröszt Közleményei 24/5 (1987) 9.
105. Tersztyánszky T. - Novothny F.: Feszültségszabályozással megvalósítható fogyasztói terheléscsökkentés. Elektrotechnika 84 (1991) 126.



A villamosenergia-szolgáltatás egyre nagyobb és bonyolultabb, kontinensek jelentős részére kiterjedő, magas műszaki követelményeket igénylő rendszeregyesülések keretei között történik. Ez lehetővé teszi a szolgáltatás minőségének és megbízhatóságának növelését, illetve a költségek csökkentését. A villamosenergia-rendszerek közti együttműködés fejlődési tendenciája jelenleg is tapasztalható a világ különböző részein. A nagy rendszeregyesülésekben azonban, kis valószínűséggel ugyan, de nagy kiterjedésű üzemzavarok léphetnek fel, amelyek a társadalom működését alapvetően befolyásolják.

A szerző mintegy 25 éve foglalkozik a magyar villamosenergia-rendszer nemzetközi együttműködésének műszaki fejlesztési és üzembiztonsági kérdéseivel. Könyvében a vonatkozó szakirodalomra és saját kutatásaira alapozva ismerteti a villamosenergia-rendszerek üzemzavarai megelőzésének, illetve az esetlegesen bekövetkező üzemzavarok esetén a káros hatások csökkentésének lehetőségeit. A könyv első részében a nagy teljesítményű villamosenergia-rendszerek együttműködésének olyan tulajdonságait vizsgálja, melyek egy viszonylag kis rendszernek, mint például a magyarnak, speciálisan fontosak. Elemzi a teljesítmény-egyensúly megtartásának lehetőségét, illetve határát, a rendszer-összeköttetések véletlen jellegű terhelésének szerepét a folyamatos energiaellátásban, a teljesítményhiány esetén bekövetkező frekvenciacsökkenést, ennek dinamikus szimulációját. A könyv második részében a szerző a rendszerüzemzavar esetén, a rendszerösszeomlás elkerülése érdekében teendő műszaki intézkedéseket, a frekvenciafüggő és -független fogyasztói terheléskorlátozásokat, valamint a bekövetkező károk csökkentésének lehetőségét vizsgálja.

A könyv a villamosenergetikai szakembereknek szól. Jól használhatják a villamosenergia-rendszerek üzembiztonságának tervezésével foglalkozó kutatók, fejlesztők, oktatók és gyakorlati szakemberek. A villamos energia fogyasztói korlátozásával foglalkozó negyedik fejezet az ipari és mezőgazdasági villamos fogyasztók szélesebb olvasóközönségének is hasznos lehet.

