

A 2025. április 28-i üzemzavar értékelése, a kapcsolódó hazai kutatások bemutatása

© Dr. Hartmann Bálint^{1,2}, 2025. május 15.

¹tudományos főmunkatárs, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, hartmann.balint@ek.hun-ren.hu

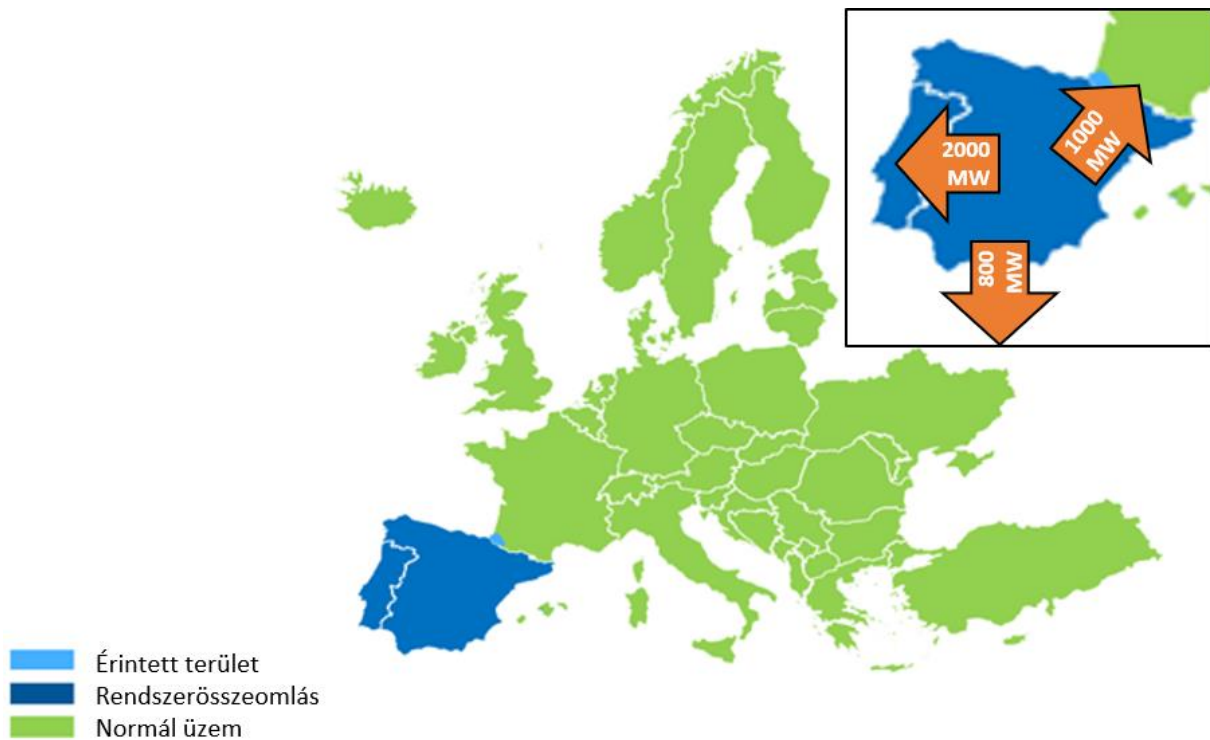
²tudományos főmunkatárs, BME Villamos Energetika Tanszék, hartmann.balint@vik.bme.hu

2025. április 28-án mintegy hatvanmillió ember életét borította fel egy Spanyolországra és Portugáliára kiterjedő áramszünet, mely az elmúlt évtizedek egyik legnagyobb, Európában bekövetkező üzemzavara volt. Jelen írás célja az aktuálisan (május 15.) elérhető információk összefoglalása, illetve az üzemzavart kiváltó lehetséges okok hátterének tudományos értelmezése. Az esemény kivizsgálására az Európai Villamosenergia-átviteli Rendszerirányítók Szövetsége (ENTSO-E) vezetésével szakértői bizottság alakult, mely várhatóan hat hónap múlva fogja közzétenni jelentését. (A bizottság társelnöke Balog Richárd, a MAVIR rendszerirányítási és piacműködtetési igazgatója.) Munkájukat az Európai Bizottság (EU) 2017/1485 rendeletében rögzített jogi keretrendszer szerint fogják végezni [1]. A testület a munka első szakaszában az eseményhez köthető adatokat fogja összegyűjteni és elemezni azzal a céllal, hogy rekonstruálni tudja az április 28-i történéseket, és azonosítani tudja az üzemzavar kiváltó okait. A munka második fázisában hasonló események jövőbeli megelőzésére fogalmaznak meg ajánlásokat.

Az üzemzavar és a helyreállítás kronológiája

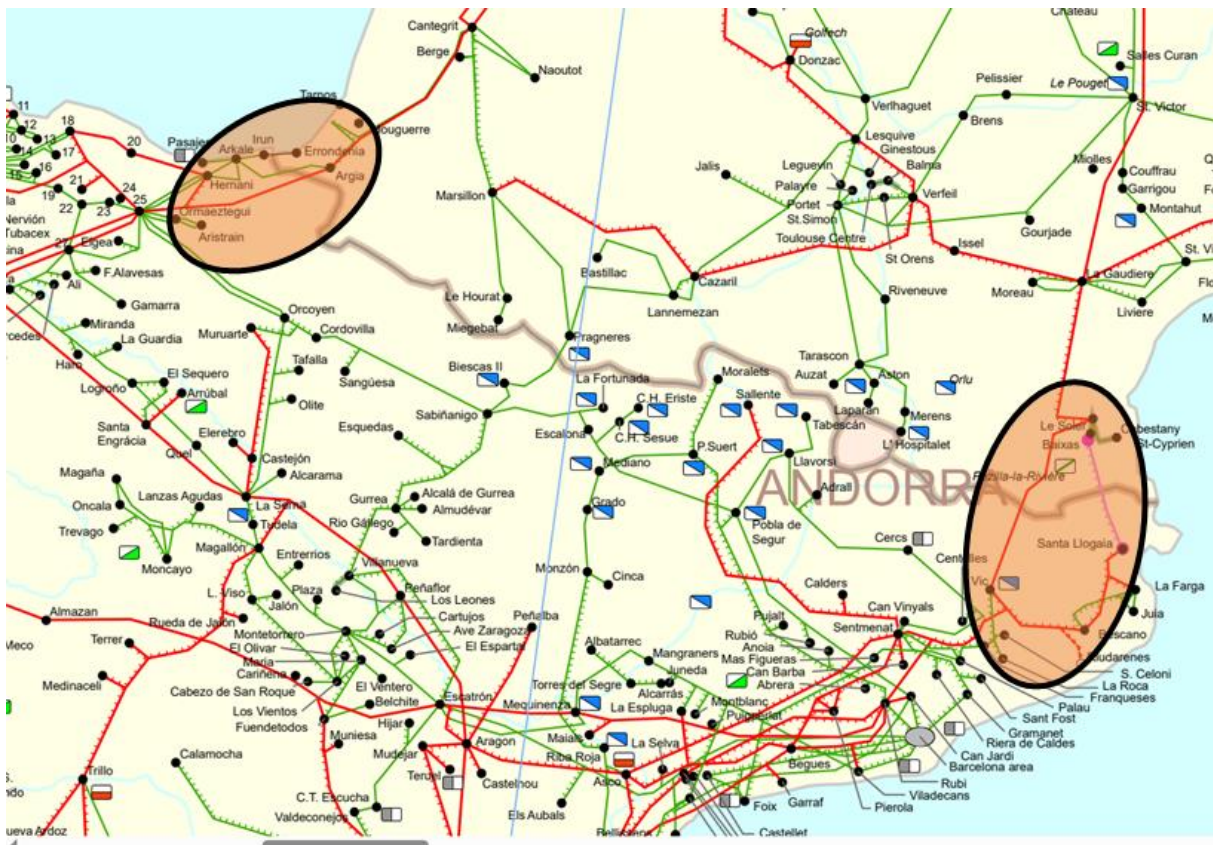
Mivel az üzemzavar során történt események rekonstrukciója még nem tekinthető teljesnek és véglegesnek, a kronológiai ismertetést az ENTSO-E által május 9-én nyilvánosságra hozott információkra építem, mely nem tartalmaz hipotéziseket.

Az incidenst megelőző fél órában a kontinentális európai (Continental European – CE) szinkronzónában két lengést (teljesítmény- és frekvenciaingadozást) is megfigyeltek, magyar idő szerint 12:03 és 12:07, illetve 12:19 és 12:21 között. A spanyol (Red Eléctrica) és a francia (RTE) rendszerirányítók beavatkoztak ezen lengések csillapítására. Az üzemzavar bekövetkezésének időpontjában nem tudunk lengésekről, a rendszer paraméterei pedig normál üzemi tartományon belül voltak. Spanyolország ekkor mindhárom szomszédja felé villamos energiát exportált: 2000 MW-ot Portugália, 1000 MW-ot Franciaország és 800 MW-ot Marokkó irányába.



1. ábra: az üzemzavar által érintett területek, és az üzemzavart megelőző teljesítményáramlások (a szerző saját szerkesztése)

1. 12:32:57-től kezdődően 20 másodpercen belül három régióban különböző termelőegység kiesését rögzítették Dél-Spanyolországban (Granada, Badajoz és Sevilla környezetében), becslések szerint összesen 2200 MW kiesést okozva. Portugáliában és Franciaországban ebben a szakaszban nem rögzítettek termelői kiesést. Az első események hatására Spanyolországban frekvenciacsökkenést, Portugáliában pedig feszültségemelkedést figyeltek meg.
2. 12:33:18 és 12:33:22 között az Ibériai-félsziget villamosenergia-rendszerének frekvenciája tovább csökkent, és elérte a 48,0 Hz-et. Spanyolország és Portugália automatikus terheléscsökkentési védelmei (frekvenciafüggő terheléskorlátozás – FTK) aktiválódtak.
3. 12:33:21-kor a Franciaországot Spanyolorzággal összekötő váltakozó áramú távvezeték a szinkronizáció elvesztésére reagálva a védelmi berendezések kikapcsolták.
4. 12:33:24-kor az ibériai villamosenergia-rendszer teljesen összeomlott, és a Franciaország és Spanyolország közötti egyenáramú távvezetéken is megszűnt az energiaszállítás.



2. ábra: a Franciaországot és Spanyolországot összekötő legfontosabb távvezetékek (a szerző saját szerkesztése)

Az érintett átviteli rendszer-üzemeltetők gyakorlatilag azonnal megkezdték a helyreállítási munkákat az érintett franciaországi régióban, valamint Spanyolországban és Portugáliában. Ez a folyamat a következő lépéseket jelentette.

1. 12:44-kor újra feszültség alá helyezték az első 400 kV-os vezetékét Franciaország és Spanyolország nyugati határán (Argia—Hernani)
2. 13:04-kor újra feszültség alá helyezték a Marokkó és Spanyolország közötti összekötő vezetékét (Fardioua—Tarifa)
3. 13:30-ig az ún. black-start képességekkel rendelkező spanyolországi vízerőművek megkezdték black-start procedúrájukat
4. 13:35-kor újra feszültség alá helyezték a Franciaország és Spanyolország keleti határán futó 400 kV-os vezetékét (Baixas—Vic)
5. 16:11-kor és 17:26-kor a két portugáliai black-start képességgel rendelkező erőmű a korábbi sikertelen kísérletek után sikeresen elindította a black-start procedúrát, lehetővé téve a helyreállítási folyamat megkezdését Portugáliában két szigetszerű ellátási területtel
6. 18:36-kor újra feszültség alá helyezték az első 220 kV-os összekötő vezetékét Spanyolország és Portugália között, ami felgyorsította a portugál rendszer helyreállítását
7. 21:35-kor újra feszültség alá helyezték a Spanyolország és Portugália közötti déli 400 kV-os összekötő vezetékét
8. 2025. április 29-én 00:22-kor befejeződött az átviteli hálózat helyreállítási folyamata Portugáliában, majd körülbelül 04:00-kor ez Spanyolországban is megtörtént

Az első 20 másodperc

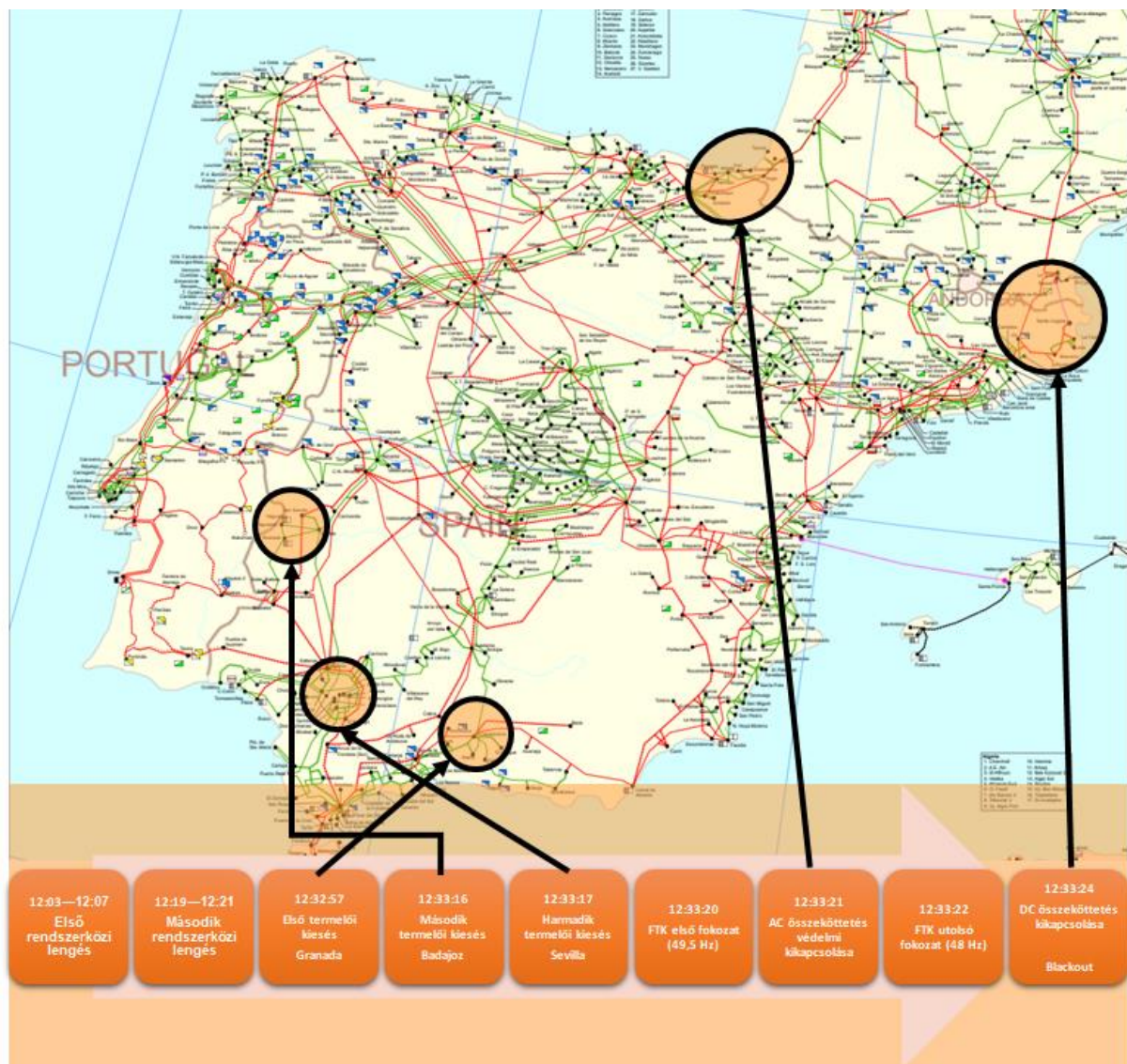
Hogy mi okozta az első 20 másodpercben mintegy 2200 MW-nyi termelő kiesését, azt egyelőre nem ismerjük. Kettő vagy több erőmű gyakorlatilag egyidejű kiesése statisztikailag nagyon alacsony valószínűséggel következhet be, hiszen a kieséseket hagyományosan egymástól független eseményekként kezeljük. Utóbbi a magyarázata annak is, hogy a világon gyakorlatilag mindenhol egyszeres hiányállapotokra (ún. N-1) méretezik a frekvenciatartási tartalékokat, melyek automatikusan és gyorsan képesek beavatkozni a teljesítmény-frekvencia egyensúly megtartása érdekében.

A mostani esetben legalább három régióból ismertek termelői kiesések, ezek Granada (12:32:57), Badajoz (12:33:16) és Sevilla (12:33:17).

Az üzemzavar során tapasztalt többszörös hiányállapot arra enged következtetni, hogy azonos kiváltó okot kell keresnünk. Szakmai fórumokon több helyen számoltak be Délnyugat-Spanyolországban (tehát az első termelői kiesések helyén) az üzemzavart megelőzően a normál üzemi tartományt jelentősen meghaladó feszültségekről (470 kV a 400 kV-os névleges értékhez képest), mely aktiválhatta az erőművek védelmi rendszereit. Ennek a feltételezésnek a hivatalos megerősítésére még várnunk kell, azonban mindössze négy hónappal ezelőtt történt már hasonló esemény; akkor a Cáceres-ben található Almaraz atomerőmű II. blokkját kapcsolta le a feszültségvédelem.

Az események felgyorsulnak

A 12:33:18 és 12:33:22 közötti időszak kritikus az üzemzavar megállítása szempontjából. Jelentős frekvencia csökkenéssel (azaz forráshiánnyal) járó üzemzavari helyzetben a frekvencia adott érték alá csökkenésének a megakadályozására alkalmazzák a frekvenciafüggő terheléskorlátozást. Az FTK rendszert fokozatokba kell sorolni, a fokozatok frekvencia beállítását, késleltetési idejét és a fokozatokba bevont teljesítmények nagyságát a rendszerirányító határozza meg. A frekvenciamérések és a nyilatkozatok alapján feltételezhetően az FTK mind a hat fokozata is aktiválódott, az első 12:33:20-kor (49,5 Hz-en), az utolsó 12:33:22-kor (48 Hz-en). Ha utóbbi igaz, a spanyol villamosenergia-rendszer fogyasztásának körülbelül 50%-át lekapcsolva sem lehetett megállítani a frekvenciacsökkenést. Pusztán a teljesítményegyensúlyt vizsgálva ez nehezen lenne magyarázható, így valószínűleg az események gyorsaságában van a kulcs: az FTK késleltetési idők túl hosszúak voltak, ezáltal pedig az aktiválás túl lassú.



3. ábra: az események jelenleg ismert egymásutánisága (a szerző saját szerkesztése)

Ibéria magára maradt

Kulcsfontosságú másodperce az eseménynek 12:33:21, amikor a francia-spanyol határkeresztező távvezeték kikapcsol. Ennek oka ismert; a két országban egymástól egyre jobban eltérő frekvencia gyorsuló ütemben növelte a távvezeték két végpontja közötti szögkülönbséget. Amikor az elérte a 90°-os stabilitási küszöbértéket, a védelem lekapcsolta a vezetékét. Az ez idáig itt áramló villamos teljesítmény szinte pillanatszerűen oszlott meg a fennmaradó vezetékek között, mindössze 3 másodperc alatt elvezetve az összes vezetékek kikapcsolásához. Az Ibériai-félsziget tehát szigetüzemi állapotba került, ugyanakkor ennek még nem feltétlenül kellett volna teljes összeomláshoz vezetnie.

2021. július 24-én nagyon hasonló eseménysorozat játszódott le a régióban: erdőtűz okozta zárlat következtében egy franciaországi kétrendszerű távvezeték lekapcsolásával kiinduló kaszkád folyamat jelentős forráshiányt eredményezett az akkor éppen importáló félszigeten. Spanyolországban és Portugáliában ekkor is aktiválódott az FTK, és mintegy 6000 MW-nyi terhelés leválasztásával sikerült a frekvenciacsökkenést 48,65 Hz-en megállítani, és másodperceken belül kb. 49,5 Hz-ig emelni.

A két esemény közötti legfontosabb különbséget a frekvenciacsökkenés gyorsasága jelenti, melynek számszerűsítésére a ROCOF (Rate Of Change Of Frequency) mutatót használjuk. Ez nem más, mint két, 500 ms-os különbséggel mért frekvenciaérték eltérésének idő szerinti deriváltja. Amennyiben a ROCOF értéke túl nagy, a termelőegységek leválnak a hálózatról; a tényleges küszöbértékek országonként eltérőek lehetnek. 2021-ben a frekvenciacsökkenés gyorsasága Dél-Spanyolországban nem haladta meg a $-0,7$ Hz/s értéket, a félsziget középső részén pedig $-0,5$ — $-0,6$ Hz/s között maradt. A 2025-ös üzemzavar során az eddig napvilágot látott frekvenciamérési adatok szerint ennél gyorsabb változás történt, ami adott esetben okozhatta nagy mennyiségű termelő leválását, ezzel végleg elkerülhetetlenné téve a rendszerösszeomlást.

Rendszerközi lengések

A villamosenergia-rendszerek kisjelű stabilitását úgy definiáljuk, mint a rendszer azon képességét, hogy fenntartsa a szinkronizmust kis zavarok esetén, melyek a termelés vagy a terhelés megváltozásából, vezetékek kieséséből, stb. adódnak. Az elektromechanikus lengési (oszcillációs) jelenségek a villamosenergia-rendszerek természetének szerves részét képezik. A rendszerközi lengések, amelyekben az erőművi generátorok csoportjai koherensen oszcillálnak a rendszer más területeivel, különösen relevánsak a nagy villamosenergia-rendszerekben. Ez a helyzet az európai kontinentális szinkron rendszer esetében, ahol a jelenlegi helyzetben az ibériai rendszer Franciaországgal van összekapcsolva.

Ezek a lengések, amelyek tipikus frekvenciája $0,1$ Hz és $0,5$ Hz között van, nem jelentenek problémát a rendszer számára, ha megfelelően csillapítják őket. A gyenge csillapítás azonban a generátorok megszokott lengési módusainak „spontán” gerjesztését okozhatja (a rendszerváltozók kis, normális változásai esetén). Zavar esetén a rendszer működési paramétereiben – frekvencia, teljesítményáramlás, feszültségek – növekvő oszcillációk is megjelenhetnek. Ha ezeket az ingadozásokat nem korrigálják megfelelően, az összekapcsolt szinkron rendszer egészére kiterjedő események is kialakulhatnak. A konkrét helyzetre alkalmazva elmondhatjuk, hogy minél gyengébb az összeköttetés Franciaország és Spanyolország között, és minél inkább export irányú a forgalom Spanyolország irányából, annál nagyobb az esélye annak, hogy a csillapítás nem lesz elég hatékony. (Az üzemeltetési előírások általában legalább 5%-os csillapítási tényezőt írnak elő [3].) A kontinentális európai szinkronrendszer jellemző lengési módusait jól ismerjük, ebből az Ibériai-félsziget szempontjából kettőt érdemes kiemelni:

1. Kelet-nyugati módus: a szinkron rendszer nyugati (Ibéria) és keleti (Törökország) végén lévő generátorok ilyenkor egymással ellenfázisban lengenek. Ennek a módusnak a szokásos frekvenciája $0,12$ — $0,16$ Hz tartományban van. Általánosságban elmondható, hogy ez a módus megfelelően csillapított.
2. Kelet-közép-nyugat módus: ebben az esetben a rendszer nyugati (Ibéria) és keleti (a Balkán-félsziget déli része és Törökország) végén található generátorok szinte ellenfázisban oszcillálnak az európai kontinens közepén (Dánia, Németország, Lengyelország, Svájc, Csehország és Olaszország) található generátorokkal. Ez a módus általában $0,22$ – $0,28$ Hz tartományú lengési frekvenciáknál jelentkezik, és általában rosszabbul csillapított, mint a kelet-nyugati módus.

A kelet-közép-nyugat módus nem ismeretlen a spanyol rendszerirányító számára sem, 2016. december 1-én ugyanis történt már olyan, rendszerközi lengésre visszavezethető üzemzavar, melynek kiváltó okaként ezt azonosították [4]. Azon a napon a francia-spanyol határ nyugati részéhez közeli francia 400 kV-os alállomás egyik megszakítójának meghibásodása indította el az eseménysort. Spanyolország ekkor 2250 MW-ot exportált Franciaország felé, a kialakuló $0,15$ Hz-es módusú lengések amplitúdója

pedig elérte a 140 mHz-et. A két rendszerirányító két percen belül 1000 MW-ra csökkentette a határkeresztesző áramlásokat, ami további kb. négy perc alatt meg is tette hatását, és lecsillapította a lengéseket. Az üzemzavar kivizsgálását követően számos lépés történt (pl. egyes topológiai alakzatváltások elkerülése, lengéscsillapító berendezések kötelezővé tétele az 50 MW-nál nagyobb erőművek számára), de nyilvánvalóvá vált az is, hogy strukturális beavatkozásokra is szükség van. Ezeket a spanyol rendszerirányító 2021—2026 évekre kiadott hálózatfejlesztési tervének 2. függeléke tartalmazza, annak részletes bemutatásától eltekintek [5].

A 2025-ös üzemzavart megelőző fél órában regisztrált két rendszerközi lengés domináns módusa kb. 0,217 Hz volt, ez tehát jól illeszkedik a korábban azonosított kockázati tényezők sorába, és akár lehetett is az egyik kiváltó oka a termelőegységek lekapcsolásának. A regisztrátumokon látható ugyanakkor egy 0,63 Hz körüli módus is, ami a szakemberek számára eddig nem látott frekvencia. A mostanit megelőzően utoljára a fent tárgyalt 2021-es eseménysor helyezte fókuszba a rendszerközi lengéseket. Az azóta eltelt 4 évben jelentősen bővült a szinkronzóna nagysága, hiszen 2022 márciusában Ukrajna és Moldova csatlakozott, 2025 februárjában pedig a három balti állam. Nem zárható ki, hogy az összekapcsolt rendszer ilyen növekedése új domináns módusokat is indukál az európai rendszerben, de ennek igazolása még előttünk áll.

A kiváltó okok

Ahogy korábban is írtam, a pontos kiváltó ok(ka)t még nem ismerjük, azt azonban tudjuk, hogy olyan többszörös hiányállapotba (N-k) került a spanyol hálózat, melynek átvészelésére egyetlen rendszer sincsen felkészítve. Ennek oka nem a képességek hiányában keresendő, hanem az ilyen események alacsony bekövetkezési valószínűsége és az elkerülésükhöz szükséges beruházások nagyon magas költsége közötti egyensúlytalanságban. Röviden megfogalmazva: technológiai rendszereink ilyen mértékű biztosítása gazdaságilag nem racionális. Ettől függetlenül fontos lesz megértenünk az üzemzavar kialakulásának okait, hogy a szükséges beavatkozásokat megtegyük. Tudományos közösségünk első értékelései öt olyan területet azonosítanak, melyek szerepet játszhattak a folyamatban. Írásom zárásaként ezeket mutatom be röviden, kiemelve azokat a területeket, ahol aktív kutatásokat folytatnak a magyarországi kutatóhelyek.

- Védelmi koordináció: a sok termelőegységek közel egyidejű kiesése felveti a védelmi koordináció javításának szükségességét. Ez kiterjedhet olyan problémákra is, mint az FTK és a ROCOF-védelmek összehangolása, vagy az FTK adaptívá tétele. Előbbi területen aktív kutatások folynak, míg utóbbira több hazai javaslat is született már [6][7].
- Rendszerközi lengések: ahogy azt írásomban részletesen is bemutattam, a nem megfelelően csillapított rendszerközi lengések olyan feszültség- és/vagy frekvenciaváltozásokat indíthatnak meg, melyek aktiválják a védelmeket, és erőművel és fogyasztók lekapcsolásához vezethetnek. A rendszerszintű stabilitás vizsgálata számításlag nehéz probléma, általában nagyszámú csatolt differenciálegyenlet megoldását teszi szükségessé. A HUN-REN EK kutatói a probléma vizsgálatára az ún. másodfokú Kuramoto-egyenletet használják. Az elmúlt években részletesen foglalkoztak a rendszermodellek heterogenitásainak hatásaival [8][9][10], a stabilitást növelő hálózatfejlesztési lehetőségekkel [11][12], az üzemzavarok statisztikai elemzésével [13][14] és a villamosenergia-rendszer szinkronizációs problémáival [15].
- Inercia: napjaink egyik legnagyobb kihívását jelenti a villamosenergia-rendszer üzemeltetéséhez kapcsolódóan az inercia (forgó tömeg) csökkenése, mely döntően a hagyományos szinkron gépes nagyerőműveket kiváltó, teljesítményelektronikán keresztül csatlakozó termelőegységekre vezethető vissza. A rendszer inerciájának csökkenése gyengíti annak természetes módon meglévő csillapítási képességét, ami gyorsabb

frekvenciaváltozásokhoz vezethet. A helyzetre számos publikáció hívta fel a figyelmet az elmúlt években, kiemelten foglalkozva a rendszerstabilitásra vonatkozó hatásaival [6][16][17] és a megoldási lehetőségekkel [18][19].

- Feszültségszabályozás: a kaszkád kapcsolások egyik gyakori kiváltó oka a nem elegendő mértékű, vagy nem kellően gyorsan szabályozott meddő teljesítmény, mely lokálisan nagyon erősen korrelál a feszültséggel. Gyors meddőteltjesítmény-szabályozásra több eszköz is alkalmas lehet, például az SVC (static var condenser), a STATCOM (static synchronous condenser), MCSR (magnetic controlled shunt reactor), vagy a nagyfeszültségű egyenáramú távvezetékek. Utóbbira fókuszál a Horizon Europe keretprogramban a BME VET részvételével futó [HYPNET](#) projekt.
- Áthidalási képességek: teljesítménynagyságtól függően minden erőmű számára léteznek előírások, melyek rögzítik, hogy milyen feszültség- és frekvenciaváltozásokat kell úgy elviselniük (áthidalniuk), hogy közben a hálózatról ne váljanak le. Az ilyen jellegű előírások nagyban támogatják a hálózat stabilitásának fenntartását, ezért a követelmények rendszeres felülvizsgálata is kiemelten fontos [20].

A lista természetesen nem teljes, fő célja támpontot nyújtani a szakterülettel nem napi szinten foglalkozó érdeklődők számára. Az áprilisi üzemzavart értékelő ENTSO-E jelentés elkészültéig tartó hónapokban minden bizonnyal egyre pontosabb képet fogunk kapni az azt kiváltó okokról, potenciálisan új kutatási kérdéseket is megfogalmazva.

Hivatkozások

- [1] A Bizottság (EU) 2017/1485 rendelete (2017. augusztus 2.) a villamosenergia-átviteli hálózat üzemeltetésére vonatkozó iránymutatás megalkotásáról (2017) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32017R1485>
- [2] ENTSO-E: Continental Europe Synchronous Area Separation on 24 July 2021, Final Report (2022) <https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/Publications/2022/entso-e CESysSep 210724 02 Final Report 220325.pdf>
- [3] Red Eléctrica: P.O. 13.1 Criterios de desarrollo de la red de transporte (OP 13.1 Transmission network development criteria)
- [4] ENSTO-E: Analysis of CE Inter-area oscillations of 1st December 2016, ENTSO-E SG SPD REPORT (2017) <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Regional Groups Continental Europe/2017/CE inter-area oscillations Dec 1st 2016 PUBLIC V7.pdf>
- [5] Red Eléctrica: Transmission network development plan, 2021—2026 period https://www.planificacioneolica.es/sites/default/files/2024-01/REE_PLAN_DESARROLLO_EN_0.pdf
- [6] K. P. Juhász, I. Táci: Analysis on inertia reduction-contribution of the demand side, in Proc. 9th International Youth Conference on Energy (IYCE), Paper: 10634917 (2024) <https://doi.org/10.1109/IYCE60333.2024.10634917>
- [7] Juhász K. P., Táci I., Sztráda Gy.: Adaptív frekvenciafüggő terheléskorlátozás a csökkenő inerciájú villamosenergia-rendszerben, Energiagazdálkodás 65:4, pp 33-38 (2024) https://ete-net.hu/wp-content/uploads/2024/10/ENGA-2024_4_honlap.pdf
- [8] B. Hartmann, G. Ódor, K. Benedek, I. Papp: Studying power-grid synchronization with incremental refinement of model heterogeneity, Chaos 35:1, Paper: 013138 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0237050>

- [9] B. Hartmann, G. Ódor, I. Papp, K. Benedek, S. Deng, J. Kelling: Dynamical heterogeneity and universality of power-grids, *Sustainable Energy Grids & Networks* 39, Paper: 101491 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101491>
- [10] G. Ódor, B. Hartmann: Heterogeneity effects in power grid network models, *Physical Review E* 98:2, Paper: 022305 (2018) <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.022305>
- [11] B. Hartmann, G. Ódor, K. Benedek, I. Papp, M. T. Cirunay: Quantitative comparison of power grid reinforcements, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.05380>
- [12] G. Ódor, I. Papp, K. Benedek, B. Hartmann: Improving power-grid systems via topological changes or how self-organized criticality can help power grids, *Physical Review Research* 6:1, Paper: 013194 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.013194>
- [13] B. Hartmann, S. Deng, G. Ódor, J. Kelling: Revisiting and Modeling Power-Law Distributions in Empirical Outage Data of Power Systems, *PRX Energy* 2:3, Paper: 033007 (2023) <https://doi.org/10.1103/PRXEnergy.2.033007>
- [14] G. Ódor, B. Hartmann: Power-Law Distributions of Dynamic Cascade Failures in Power-Grid Models, *Entropy* 22:6, Paper: 666 (2020) <https://doi.org/10.3390/e22060666>
- [15] G. Ódor, S. Deng, B. Hartmann, J. Kelling: Synchronization dynamics on power grids in Europe and the United States, *Physical Review E* 106:3, Paper: 034311 (2022) <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.034311>
- [16] Juhász K. P., Táczai I., Sztráda Gy.: Rendszer inercia várható változásai és hatása a VER működésére, *Energiagazdálkodás* 64:3-4, pp. 87-91 (2023) https://ete-net.hu/wp-content/uploads/2024/10/ENGA-2023_4-5_archiv.pdf
- [17] I. Táczai, I. Vokony: Review of Stability Analysis in Power Systems with High Penetration of Non-synchronous Generation, *Renewable Energies & Power Quality Journal* 20, pp. 685-689 (2022) <https://doi.org/10.24084/repqj20.402>
- [18] I. Táczai, I. Vokony, B. Hartmann: A novel transient stability index based on grid reduction method to analyze power systems with high penetration of non-synchronous generation, in *Proc. IEEE Madrid PowerTech*, Paper: 9495033 (2021) <https://doi.org/10.1109/PowerTech46648.2021.9495033>
- [19] B. Hartmann, I. Vokony, I. Táczai: Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketisation of services, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29:12, Paper: e12128 (2019) <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12128>
- [20] I. Vokony, K. P. Juhász, M. Somogyi: A Benchmark and Validation Guide for the Hungarian Implementation of the Common European Requirements for Electricity Generators, *Renewable Energies & Power Quality Journal* 21:3, pp. 244-249 (2023) <https://doi.org/10.24084/repqj21.288>