

Kako "obnovljivi viri energije niso bili vzrok letošnjega razpada španskega elektroenergetskega sistema"

How "Renewable Energy Sources were not Cause of This Year's Blackout of Spanish Power System"

Rafael Mihalič

UL, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25

Ljubljana, Slovenija rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Urban Rudež

UL, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25

Ljubljana, Slovenija

urban.rudez@fe.uni-lj.si

POVZETEK

Dan po letošnjem razpadu elektroenergetskega sistema (EES) na Iberskem polotoku, torej 29. aprila, je španski premier Pedro Sánchez izjavil, da razpada niso povzročili ne prevelik delež obnovljivih virov energije (OVE) ne pomanjkanje moči jedrskih elektrarn. Izjava je bila precej prenapeljena, saj raziskave tehničnih vzrokov tovrstnih pojavov praviloma trajajo več mesecev, analiza konceptualnih vzrokov na ravni evropske celinske interkonekcije pa še dlje.

V prispevku povzemamo analizo in podajamo komentarje o fizikalnih dogajanjih v španskem in evropskem EES, ki so privedla do obratovalnih parametrov, zaradi katerih so se sprožili določeni zaščitni ukrepi in s tem praktično onemogočili obratovanje EES na Iberskem polotoku. Drugače povedano, predstavljamo in razlagamo sosednje dogodke, ki je vodilo do razpada EES na Iberskem polotoku.

Osnovno vprašanje je, zakaj je do takih odstopanj parametrov EES sploh prišlo in ali so v dani situaciji vsi sistemi (zlasti zaščitni) odreagirali ustrezno. Dosedanja analiza je pokazala, da gre po eni strani za izjemno tehnično zahteven sistem, ki ga fiziki opisujejo kot samoorganizirajoči se kritični sistem, katerega stanje in dogajanje skoraj ni mogoče povsem dognati, po drugi strani pa za kompleksen preplet vzrokov in posledic, pri katerem so OVE enako vpleten akter kot kateri koli drugi.

V tako kompleksnih sistemih, kot je EES, okvar in razpadov ni mogoče povsem preprečiti, lahko pa njihovo verjetnost zmanjšamo s pravilnim načrtovanjem in vodenjem. Kaže pa se, da bo prehod iz konvencionalnega koncepta vodenja in delovanja EES, ki je temeljil na obnašanju elementov v skladu z njihovimi fizikalnimi lastnostmi, v na programski opremljen temelječ EES (pretvorniki, kompenzacijske naprave na osnovi močnostne elektronike ipd.) povezan z več tveganji, kot si jih je marsikdo pripravljen priznati.

ABSTRACT

The day after this year's blackout in the Iberian Peninsula, that is, on April 29, Spanish Prime Minister Pedro Sánchez stated

that the blackout was not caused either by an excessive share of renewable energy sources (RES) or by a shortage of nuclear power capacity. His statement was rather premature, since investigations into the technical causes of such events usually take several months, while the analysis of conceptual causes at the level of the continental European interconnection takes even longer.

This paper summarizes the analysis and provides discussion on the physical processes in the Spanish and European electric power systems (EPS) that led to operating parameters which triggered certain protective measures, thereby effectively disabling the operation of the Iberian EPS. In other words, we present and explain the sequence of events that resulted in the blackout.

The key question is why such deviations in EPS parameters occurred in the first place and whether all systems (particularly protection systems) responded appropriately under the circumstances. The analysis carried out so far has shown that, on the one hand, the EPS is an extremely technically demanding system, described by physicists as a self-organizing critical system whose states and processes are almost impossible to fully grasp. On the other hand, it is a complex interplay of causes and consequences, in which RES are just as involved an actor as any other.

In systems as complex as the EPS, faults and blackouts cannot be completely prevented, but their likelihood can be reduced through proper planning and management. However, it appears that the transition from the conventional concept of EPS operation and control, based on the physical behaviour of its components, to a software-based system (converters, powerelectronics-based compensation devices, etc.) will be associated with more risks than many are willing to acknowledge.

KLJUČNE BESEDE

Elektroenergetski sistem, Španija, Iberski polotok, razpad elektroenergetskega sistema, obnovljivi viri električne energije.

KEYWORDS

Electric power system, Spain, Iberian Peninsula, power system blackout, renewable energy sources.

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s). Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia © 2025 Copyright held by the owner/author(s). <https://doi.org/10.70314/is.2025.okolje.9>

1 UVOD

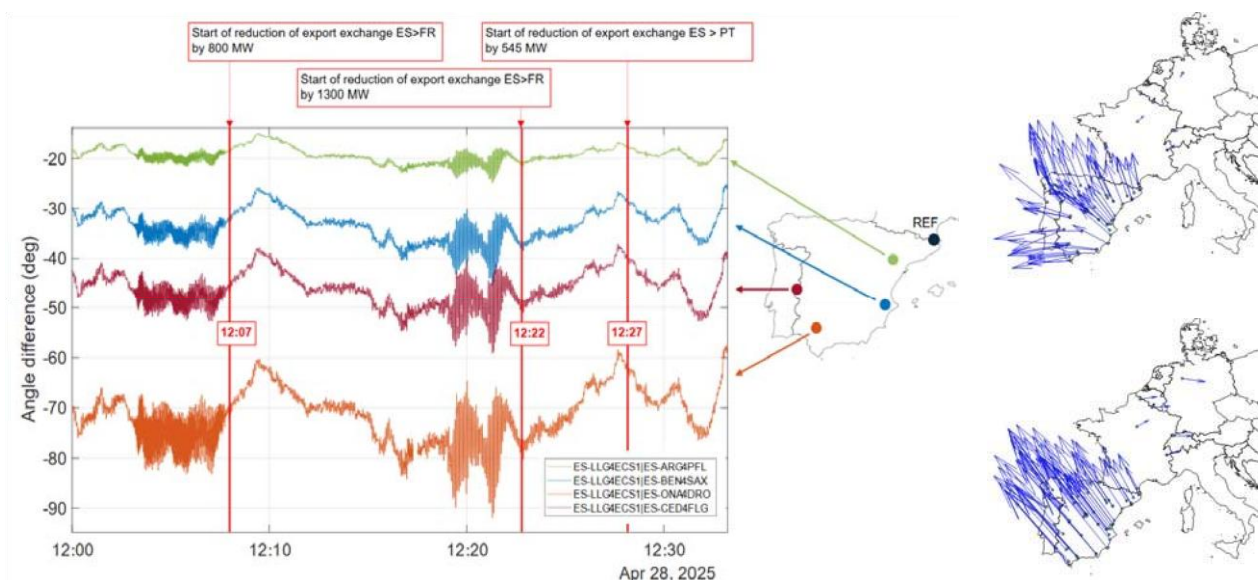
Elektroenergetski sistem (EES) Iberskega polotoka je 28. aprila 2025 doživel popoln razpad, ki je prizadel več kot 50 milijonov prebivalcev Španije in Portugalske. Nenadna prekinitev oskrbe z električno energijo je bil eden največjih tovrstnih dogodkov v Evropi v zadnjih desetletjih in je opozoril na ranljivost sodobnih EES v obdobju tako imenovane energetske tranzicije. Dogodek je izpostavil vrsto tveganj, od odvisnosti od nestanovitnih obnovljivih virov električne energije, pomanjkanja sistemskih vztrajnostnih mas, neprilagojenih zaščitnih mehanizmov vse do omejenih čezmejnih prenosnih zmogljivosti in s tem čezmejne podpore v kriznih stanjih.

Razpad EES na Iberskem polotoku se je zgodil v času, ko je bila tam proizvodnja v večinskem deležu odvisna od sončne in vetrne energije, medtem ko so konvencionalne termoelektrarne večinoma mirovale. Prvi znaki nestabilnosti so se pokazali okoli poldneva, ko so bile nekajkrat zaporedoma zaznane oscilacije (nihanja) frekvence in napetosti. Ukrepi za odpravo teh nihanj so privedli EES v stanje, ko so se sprožili nekateri zaščitni sistemi, kar je stanje hitro poslabšalo. Izpadlo je namreč več velikih proizvodnih enot, po preliminarnih poročilih izključno OVE.

proizvodnje, škode v turizmu in izgub v maloprodaji še bistveno višje, skupaj 10 - 12 milijard evrov. Mednarodni analitiki (npr. Reuters, S&P Global) omenjajo razpon 5 - 15 milijard evrov, odvisno od tega, kako hitro se je industrija po izpadu ponovno zagnala. Skupna škoda torej še ni natančno določena, a strokovna skupnost jo večinoma postavlja v okvir desetih milijard evrov.

Poleg neposrednih posledic za prebivalstvo in gospodarstvo je dogodek sprožil tudi razprave o dolgoročni varnosti oskrbe z električno energijo ter o nujnosti novih tehničnih in regulativnih ukrepov.

Analiza razpada EES na Iberskem polotoku je zato pomembna tako za tehnično stroko kot tudi za oblikovalce energetskega politika. Ponuja namreč dragoceno izkušnjo o aktualnih težavah EES, ki prehajajo iz koncepta vodenja na osnovi predvidljive konvencionalne proizvodnje z velikimi rotirajočimi masami na koncept vodenja s stohastično proizvodnjo z majhno ali ničelno vztrajnostjo. Ta prehod je veliko kompleksnejši, kakor si to predstavlja laična javnost, in bo zahteval množico dodatnih ukrepov (in s tem finančnih sredstev), da bi zagotovili zadovoljivo stopnjo robustnosti oziroma odpornosti EES tudi v prihodnje.



Slika 1: WAMS meritve Red Eléctrica, REN in ostalih TSO: potek razlike napetostnih kotov (levo), pripadajoča nihajna načina (desno) [1]

Zaradi hitrega posledičnega upada frekvence na polotoku je zaščita povezano z evropskim omrežjem povsem upravičeno prekinila. Kot zadnji urgentni ukrep se je v Španiji in na Portugalskem sprožila še sistemska zaščita pod-frekvenčnega razbremenjevanja, katere poseg pa ni bil učinkovit. Vzroke za to je mogoče iskati v domnevno prenizkih vztrajnostnih masah v tistem trenutku in posledično prehitremu upadu frekvence za uspešno delovanje omenjene zaščitne sheme. Kakorkoli, v roku nadaljnjih nekaj sekund je Iberski EES razpadel.

Posledice so bile obsežne. Brez elektrike je ostalo več deset milijonov ljudi, prizadeta so bila mesta, industrija, prometna infrastruktura in telekomunikacijska omrežja. Bolnišnice so morale preiti na zasilna napajanja z agregati, javni promet se je ustavil, številna podjetja so utrpela proizvodne izgube, ocene gospodarske škode se (razumljivo) razlikujejo.

Prve ocene španske vlade so kazale, da neposredna škoda (izgubljena proizvodnja, stroški nujnih ukrepov, motnje v prometu) znaša okoli 4 - 6 milijard evrov. Gospodarske zbornice so opozorile, da bodo posredne posledice zaradi ustavljene

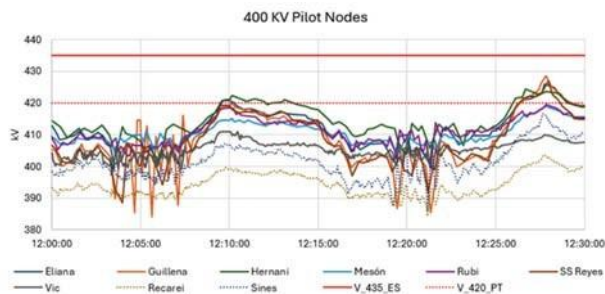
2 Zaporedje dogodkov pred razpadom

Dan se je na Iberskem polotoku začel brez posebnih opozorilnih znakov. Proizvodnja iz obnovljivih virov, predvsem sončnih elektrarn (SE) je bila visoka. Poraba se je gibala okoli 27 GW, proizvodnja sončne energije je dopoldan hitro naraščala. Tako je že nekaj po 9. uri 60 % vsega odjema pokrivala sončna energija, in sicer ob podpori vetrnih elektrarn in manjšega deleža iz jedrskih elektrarn. Kljub temu, da je bil sistem (navidežno) varno v stabilnem področju, so se kmalu po 9. uri pojavile povišane napetosti v visokonapetostnem omrežju. Te so še ostajale v dovoljenih mejah, a so nakazovale, da se razmerje med proizvodnjo in odjemom jalove moči ruši in nagiba v smeri njenega presežka.

Med 10. in 11. uro je sončna proizvodnja dosegla skoraj vrh, medtem ko so bile konvencionalne elektrarne (plinske, termoe in jedrske) v obratovanju z minimalnimi obremenitvami. Sistem je bil tako izpostavljen netipičnim pogojem: presežkom moči ob zelo nizkih vztrajnostnih masah. Po 11. uri so se pojavila prva regionalna elektromehanska nihanja med sinhronskimi generatorji

s lastno frekvenco 0,64 Hz. Operater REE je poskušal nihanja zadušiti z vnaprej predvidenimi ukrepi, t.j. vključevanjem dodatnih prenosnih vodov in zmanjševanjem pretokov proti Franciji. Enosmerno HVDC povezavo s Francijo so nastavili na način obratovanja z nastavljenim prenosom moči (angl. fixed power mode). Ti ukrepi so sicer učinkovali, a so imeli stranski učinek: ob nižjih obremenitvah prenosnega omrežja se je napetost v njem dodatno dvignila, zaradi česar so se obratovalne točke sinhronskih generatorjev v konvencionalnih elektrarnah pomaknile še bolj v pod-vzbujeno področje. Slednje je manj stabilno zaradi zmanjšanja tako imenovanega sinhronizacijskega koeficienta. To pomeni slabšanje dušenja sistema in povečanje tveganj za dodatna nihanja.

Okrog 12:10 je dejansko prišlo do novega nihanja, tokrat med-sistemskega značaja z lastno frekvenco 0,21 Hz. Šlo je za nihajni način med Iberskim polotokom in Baltskimi državami. Operaterji so za zadušitev tega uporabili podobne ukrepe kot v prvem primeru; pretok energije v Francijo so še zmanjšali in priklopili dodatne vode na jugu Španije. In rezultat je bil identičen kot prvič: dodaten dvig napetosti v prenosnem omrežju, katerega časovni potek ilustrira Slika 2. Pri tem črtkana rdeča vodoravna črta označuje maksimalno dovoljeno obratovalno napetost na Portugalskem, polna rdeča vodoravna črta pa v Španiji.



Slika 2: časovni potek napetosti 400 kV pilotnih vozlišč [1]

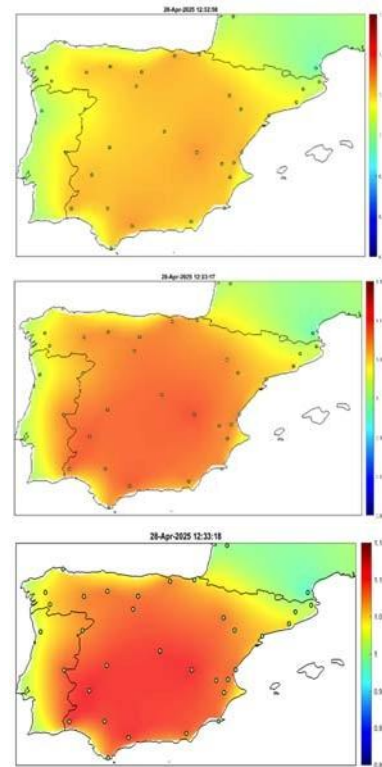
Omenjeni dvigi napetosti pred 12:30 uro na videz niso imeli večjih posledic, vendar je podrobnejši pregled pokazal nepričakovano hiter porast odjema španske porabe ob ca. 11:00, 12:10 in 12:25 za skupaj približno 2000 MW. Možno je, da je šlo za navidezni dvig odjema kot posledica izpada razpršene proizvodnje električne energije – konkretno SE, ki so locirane na lokaciji odjema. Na tem mestu je smiselna obrazložitev, da je ob zasuku smeri pretoka energije v primerjavi s klasičnim EES (kjer energija vedno teče v smeri od prenosnega omrežja proti odjemu), mogoče na nizkonapetostnih nivojih omrežja pričakovati procentualno višjo napetost kot na visokonapetostnem omrežju. Potrditev te domneve v tej fazi pa še ni mogoča, saj podatki razmer na srednje-napetostnih in nizkonapetostnih nivojih omrežja javnosti zaenkrat še niso dosegljivi.

Prelomni trenutek (glej ŽiT 2021/10 do ŽiT 2022/1, str. 16, 20, 22 in 26) se je zgodil ob 12:32:57. Takrat je izpadel

<https://doi.org/???>

transformator v bližini Granade, ki je prenašal energijo fotovoltaičnih, termo-solarnih in vetrnih elektrarn v omrežje. S tem je izpadlo približno 355 MW delovne moči s pripadajočo podporo jalove moči. Sledil je še izpad SE in termo solarnih elektrarn v območju Badajoz 725 MW moči. V nadaljnji sekundi je izpadlo na različnih lokacijah 1100 MW moči. V manj kot 20 sekundah se je napetost prenosnega omrežja močno povišala, kar

kaže Slika 3 s tremi zaporednimi posnetki stanja (zelena barva označuje napetost 400kV, rumena 420 kV, rdeča 440 kV).

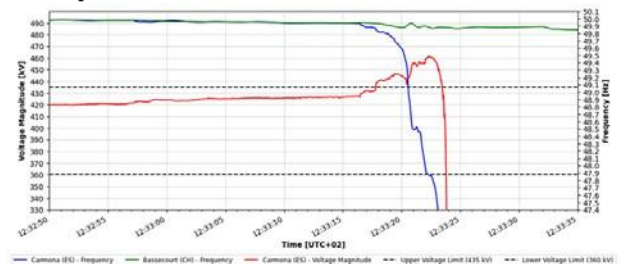


Slika 3: Posnetki 400 kV napetosti pilotnih vozlišč od 12.32.58 do 12.33.18 [1]

Ob 12:33:19 je španski EES zaradi pomanjkanja proizvodne moči začel padati iz sinhronizma s preostalim celinskim delom ENTSO-E. V naslednjih treh sekundah se je najprej aktiviral sistem zaščite pod-frekvenčnega razbremenjevanja, vendar ni bil uspešen pri stabilizaciji frekvence. Ob 12:33:20 se je prekinila povezava z Marokom, ob 12:33:21 so se izklopile AC povezave med Španijo in Francijo, ob 12:33:24 se je prekinila še HVDC povezava s Francijo. S tem je EES na iberškem polotoku razpadel.

V manj kot petih sekundah je torej iz omrežja izpadlo približno 15 GW proizvodnje, kar je predstavljalo skoraj 60 % celotne španske porabe. Razmere ilustrira Slika 4, kjer je z zeleno krivuljo prikazana frekvenca v Švici, z modro v Španiji in z rdečo napetost na 400 kV omrežju v Španiji.

Večji del Iberskega polotoka je ostal več kot deset ur brez električne energije. V Madridu je bila ponovna vzpostavitev omrežja po razpadu še posebej zahtevna zaradi preobremenjenih mestnih omrežij. Do poznega večera so bile vključene prve otočne enote za kritično infrastrukturo. Popolna resinhronizacija s preostalim celinskim delom ENTSO-E je bila dosežena šele naslednji dan ob 04:00, do 07:00 pa je bilo že skoraj 100 % porabe ponovno pokrite.



Slika 4: frekvenca in napetost med razpadom [1]

3 Možni vzroki za razpad

Takoj po dogodku so se pojavile številne razlage možnih vzrokov razpada, ki vse po vrsti sodijo na področje špekulacij, saj analize tovrstnih dogodkov običajno trajajo nekaj mesecev, končno poročilo je predvideno za 3. oktober. Med najbolj bizarne hipoteze spadajo tako imenovane inducirane atmosferske vibracije, ki so se hitre znašli v precejšnjem številu medijev. Šlo naj bi za pojav, ki bi naj povzročil mehanske oscilacije vodnikov daljnovodov. Nekatere hipoteze so sumile kibernetški napad, nekatere hiter in nepredviden pojav oblačnosti nad Španijo.

V resnici bi lahko tudi tik pred objavo končnega poročila ENTSO-E o dogodku težko pokazali s prstom na en sam vzrok. Pri tako kompleksnem sistemu, kot je EES, je funkcionalna prepletenost medsebojnih vplivov posameznih elementov v vsakem obratovalnem stanju tako izrazita, da je iskanje osnovnega vzroka izjemno težko. Sprožilni dogodek namreč ne pomeni hkrati tudi vzroka. Nenazadnje se sistemski operaterji pri obratovanju in načrtovanju EES strogo držijo spoštovanja tako imenovanega »n-1« kriterija in pogosto tudi natančne analize bolj verjetnih »n-2« stanj. Iskanje vzroka je v takšnih primerih podobno kot ugotavljanje kateri mehanski del iztrošenega več desetletij starega avtomobila je kriv za trk divjadi. Sicer bi do česa takšnega lahko prišlo tudi ob dobro vzdrževanem vozilu a bi bila takšna nezgoda bistveno manj verjetna.

Kot smo razložili v [2], so EES nelinearni sistemi ali določene samoorganizirajoči se kritični sistemi, v katerih neizogibno prihaja do motenj vseh razsežnosti. Tega ne moremo preprečiti, lahko pa s pravilnim načrtovanjem in vodenjem njihovo verjetnost zmanjšamo. Drugače rečeno, razpadov EES ne moremo preprečiti, od našega ravnanja oziroma načrtovanja pa bo odvisno, ali nas bo doletel pogosto ali le enkrat na nekaj desetletij.

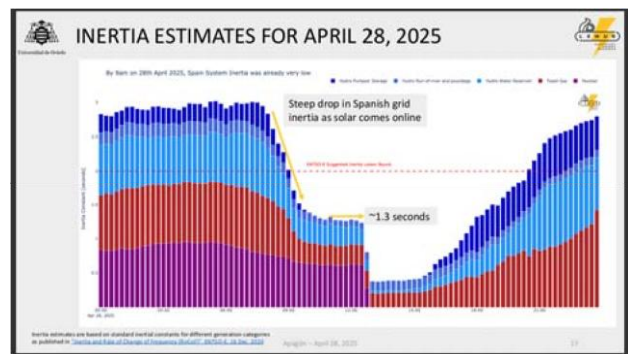
Čeprav torej težko izpostavimo en sam vzrok, pa nekatere splošne zaključke oziroma razloge, ki so pripeljali do situacije, ki je, kljub morebitnemu povsem ustreznemu odzivu elementov EES (recimo zaščite), privedla do razpada EES, lahko izpostavimo.

V času pred razpadom je prevladovala proizvodnja iz virov brez rotirajočih mas (okrog 75%).

Težki rotorji v konvencionalnih elektrarnah delujejo kot vztrajnostne mase, ki blažijo hitre spremembe hitrosti vrtenja strojev in s tem frekvence izmenične napetosti. Če ena od proizvodnih enot nenadoma izpade, preostali rotirajoči stroji še nekaj trenutkov ohranjajo ravnotežje moči in s tem podaljšajo čas za intervencijo bodisi operaterja bodisi kakšnega od avtomatiziranih mehanizmov. Na Iberskem polotoku je bilo teh mas v času pred mrkom precej malo. Tu velja iskati enega od morebitnih vzrokov, zakaj sistemska zaščita pod-frekvenčnega razbremenjevanja po ločitvi iberskega polotoka od preostale

R. Mihalič, U. Rudež

celinske interkonekcije ni bila dovolj učinkovita. Povsem mogoče je, da je bil padec frekvence preprosto prehiter. Slika 5 prikazuje, da so bile vztrajnostne mase po 9. uri daleč pod priporočeno minimalno vrednostjo s strani ENTSO-E (označena z rdečo črtkano črto).



Slika 5: Vztrajnostne mase španskega EES 28. apr. 2025 [3]

Od 9. ure naprej so se pojavile težave z zagotavljanjem ravnotežja jalove moči v EES in s tem vzdrževanja napetosti na visokonapetostnem omrežju znotraj predpisanih meja.

Stanje glede omenjenega dejstva na videz ni bilo posebno problematično, je pa zahtevalo obratovanje konvencionalnih generatorjev v skrajno pod-vzbujenem področju. To pomeni, da se zaradi tega njihov kolesni kot poveča in s tem sinhronizacijski moment zmanjša. Z drugimi besedami: stabilnost takšnega obratovanja je slabša.

Velika večina pretvorniško-priključenih virov nima (vključene) funkcije sprotne regulacije napetosti oziroma jalove moči.

To pomeni, da pretvorniško-priključeni viri obratujejo z maksimalno možno delovno močjo in nanjo vezano jalovo močjo pri nespremenjenem faktorju moči. S tem sprotne prilagajanja napetosti na priključni točki oziroma potrebam sistema po jalovi moči ne izvajajo. Poleg tega ima na nizko-napetostnem in srednje-napetostnem omrežju ravno proizvodnja delovne moči (in ne jalove!) največji vpliv na napetost. To sicer ne pomeni, da izvedba napetostnega regulacijskega mehanizma s strani pretvorniško-priključenih razpršenih virov v praksi ni mogoča, vendar je šele na stopnji razvoja, pripadajoča regulatorna in tržna okvira pa tudi.

Praktično vsi pretvorniki OVE so opremljeni z regulacijo sledenja omrežni napetosti (angl. grid following).

To pomeni, da frekvenco proizvedene izmenične napetosti prilagodijo frekvenci omrežja, na katerega so priključeni. Z rastjo deleža takšnih virov (in odjema) pa pridemo v situacijo, ko je njihov delež primerljiv z deležem moči konvencionalnih virov z rotirajočimi masami. Posledično se pretvorniki prilagajajo frekvenci, na katero sami vplivajo. Takšna situacija lahko

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

predstavlja izvor različnih vrst oscilacij v EES. Rešitve se išče v smeri pretvornikov z regulacijo oblikovanja omrežne napetosti (angl. grid forming), vendar ta tehnologija še ni na ustreznem nivoju zrelosti in še kar daleč od množične implementacije.

Velike termoelektrarne s funkcijo aktivnega dušenja nihanj so bile izključene.

To poudarjamo zaradi dejstva, da so velike termoelektrarne praviloma opremljene s funkcijo aktivnega dušenja nihanj (angl. Power System Stabilizer - PSS). Odsotnost termoelektrarn pomeni odsotnost tega mehanizma, čeprav se s tem odpira tudi vprašanje njihove ustrežne nastavitve pri spreminjajočem deležu OVE.

EES iberskega polotoka je zelo šibko povezan s svojimi sosedi.

Šibka povezanost pomeni, da ni mogoče izkoriščati vseh prednosti povezanosti v interkonekcijo, predvsem tistih vezanih na krizna stanja (torej pomoč sosedov). Obenem pomeni ozko grlo z relativno visoko impedanco, kar učinkuje kot električno podaljšanje sistema in s tem večja podvrženost možnosti nastanka elektromehanskih nihanj. V splošnem se priporoča moč povezav s sosedi vsaj v višini 20% moči konične porabe, medtem ko znaša ta odstotek za Španijo le 10%.

Spoznavnost stanja srednje in nizkonapetostnega omrežja je pomanjkljiva.

Eden osnovnih problemov pri raziskovanju vzrokov proučevanega dogodka in preprečevanju podobnih scenarijev je, da v bistvu skorajda ne vemo, kaj se dogaja na srednjenapetostnem in še posebej nizko-napetostnem omrežju. Cena sistemov za spremljanje električnih parametrov v realnem času in ustrezna zanesljiva komunikacija sta namreč veliko predragi za masovno uporabo kot jo spremljanje stanja na teh omrežjih zahtevata. To pa hkrati pomeni, da je tako tehnično kot tudi finančno velik delež OVE zelo težko vključiti v sistemsko zaščito pred podobnimi dogodki.

Glede na navedene točke lahko sklepamo, da je bil nastop regionalnega in kasneje med-sistemskega nihanja verjetno posledica več dejavnikov. V splošnem se verjetnost nastopa nihanj večja, če se delež rotirajočih mas manjša, če v sistemu ni PSS elementov, če imamo v sistemu aktivne elemente, ki so regulirani z zakasnitvami (recimo pretvorniki), če je impedanca omrežja visoka ter če je sinhronizacijski moment majhen. Večina navedenih pogojev je bila v obravnavanem primeru vsekakor izpolnjena, zato pojav nihanj ni nič nenavadnega. Natančnega vzroka njihovega nastopa verjetno ni mogoče določiti in je skupek večjega števila dejavnikov. Vsak, ki se je že ukvarjal s sistemsko analizo linearnih sistemov in teorijo lastnih vrednosti ve, da za nihanje sistema z njegovo resonančno frekvenco nikoli ni odgovoren zgolj en element ali vrsta elementa. Takšna nihanja v EES so bila in so dejstvo. V konkretnem primeru je bil problem to, da so nihanja dušili z ukrepi, ki so obstoječo, že tako težko vzdrževano bilanco jalovih moči, še poslabšali. Sistem je bil namreč v stanju, ko bi že relativno minoren dogodek sprožil kaskado dogodkov iz katere ni več povratka v stabilno obratovanje.

4 Kaj smo se naučili?

Za strokovnjake iz področja obratovanja EES ne bi smel biti razpad EES na iberskem polotoku nič nepričakovanega. Že v konvencionalnih EES je do razpadov včasih (sicer redko) prišlo, v razmerah drastičnih sprememb kakršnih smo pričala zaradi evropskih in nacionalnih politik, pa se njihovo število zgolj povečuje in obseg posledic širi. Odmev dogodka v javnosti pomeni med drugim tudi, da se strokovnjakom vsaj začasno bolj temeljito prisluhne.

V tem smislu je razpad na iberskem polotoku na ravni Evropske Unije (EU) sprožil (bolj ali manj) resno razpravo o energetske varnosti. Evropska komisija je izpostavila, da dogodek dokazuje potrebo po močnejši medsebojni integraciji evropskih nacionalnih omrežij. Iberski polotok je že dolgo obravnavan kot šibki člen, a politični in ekonomski interesi, predvsem francoski, so preprečevali gradnjo novih prenosnih povezav. Po razpadu so

se okrepili pozivi k evropski solidarnosti, a tudi tukaj so se pokazale razlike: medtem ko so severne države pozivale k vlaganjem v prenosne vode, so druge izpostavljale pomen nacionalne energetske suverenosti. In vse to pred objavo končnih ugotovitev ENTSO-E. Kljub temu je do določenih spoznanj, ki so relevantna za odločevalce, mogoče priti.

Potrebna je bolj premišljena integracija OVE.

Menjava konvencionalnih virov električne energije z masivno integracijo OVE zahteva bolj premišljene korake, predvsem pa sočasne prilagoditve celotnega EES. Med te prilagoditve spadajo razvoj ustreznih komunikacijskih sistemov, ustreznih algoritmov za regulacijo pretvornikov, ustreznih načinov koordinacije delovanja regulacijskih in zaščitnih sistemov, razširitev nabora meritev, predvsem na srednje in nizko-napetostnem omrežju ipd. Te prilagoditve ne smejo biti izvedene šele po razmahu OVE, ki se dogaja skoraj izključno zaradi ekonomskih dobrobiti, ki jih investitorji v tem vidijo. Če teh sočasnih prilagoditev ni, se tveganje za razpade EES večjih razsežnosti zelo poveča.

Razviti in tehnično dovršiti je treba tehnologije za nadomestitev vztrajnostnih mas konvencionalnih elektrarn.

Odziv pretvorniško-priključenih naprav je lahko zelo hiter in načeloma jih je mogoče opremiti z algoritmi za zagotavljanje tako imenovanih virtualnih oziroma sintetičnih vztrajnostnih mas. To je koncept, pri katerem regulacija pretvornika zgolj posnema obnašanje sinhronskega stroja. Cilj je, da ob hitrih spremembah omrežne frekvence pretvornik za kratek čas močno spremeni oddajo moči, podobno kot to stori sinhronski stroj inherentno. Ključna težava pri tem je ta, da je danes velika večina pretvorniško-priključenih proizvodnih enot opremljena z regulacijo sledenja omrežni napetosti, ki pa lahko sintetično vztrajnost zagotovi zgolj ob precejšnji časovni zakasnitvi. Zanesljivo meritev frekvence, na katere odstopanje naj bi se naprava odzvala, je mogoče dobiti z zakasnitvijo nekje med 100 ms in 1 s. Te zakasnitve imajo lahko drastične posledice, saj lahko namesto izboljšanja dušenja nihanj te celo poslabšajo in sistem privedejo v nestabilnost. Matematično gledano imajo takšni sistemi bistveno več resonančnih točk (v bistvu neskončno) [4], kar ustrezno koordinacijo vseh regulacijskih mehanizmov znatno oteži. Obetavna alternativa so že omenjeni pretvorniki z regulacijo oblikovanja omrežne napetosti, vendar bo najprej treba počakati na zadostno zrelost te tehnologije, nadalje pa še na njihovo implementacijo po vsej celine.

Ojačiti je treba čezmejne prenosne povezave.

Celinska evropska interkonekcija ni bila zasnovana za povezano obratovanje in čezmejna trgovanja z električno energijo, zato je njena struktura sub-optimalna. Primanjkuje zlasti tako imenovanih čezmejnih povezav (interkonekcij) med nacionalnimi omrežji oziroma državami. Glede na izkušnje z gradnjo 400 kV daljnovodov v Sloveniji lahko upravičeno domnevamo, da je ojačitev čezmejnih prenosnih poti oddaljena desetletja. Pri tem je pomemben faktor povsod po Evropi odpor javnosti proti umeščanju energetskih objektov v prostor.

Zavedati se je treba omejitev baterijskih hranilnikov električne energije.

Gre za pretvorniško-priključene baterijske sisteme, ki so sicer za hitro in kratkotrajno regulacijo delovne in/ali jalove moči skoraj

idealna rešitev (pri tem se seveda že omenjenim problemom z regulacijo pretvornikov ne moremo izogniti). Pomanjkljivosti so visoka cena in zato neprimernost za hranjenje velikih količin električne energije. Trenutno se ustrezen ekonomski model za implementacijo takšnih sistemov še išče, gre pa v smeri izkoriščanja večnamenske uporabe.

Izvesti je treba prilagoditve na nekaterih zaščitnih sistemih.

Zaščitni sistemi so temelj zanesljivega in varnega obratovanja EES. Obstoječi koncepti so se razvijali in preizkušali desetletja dolgo. Nepremišljene in prenapregnjene spremembe, posodobitve oziroma uvedba povsem novih konceptov so za kritično infrastrukturo takšnega pomena kot je EES preveč tvegane. Dejstvo je, da se da z ustrežno koordinacijo, ustrežno nastavitvijo in neprestanim spremljanjem stanja EES in preverjanja ustreznosti nastavitve zaščitnih elementov veliko narediti. Gre pa pri tem za zelo zahtevno in časovno intenzivno dejavnost, kar privede na plan vprašanje, kje najti ustrežno število vrhunskih strokovnjakov za zaščito in kje najti dovolj sredstev. Ta zahteva je sicer zelo smiselna, a povezana z večjimi praktičnimi težavami in finančnimi vložki, kot se zdi na prvi pogled.

Zagotoviti dovolj robustno digitalizacijo.

Ena glavnih ovir uvedbe digitalizacije v vse faze vodenja EES je bila v preteklosti njena (ne)zanesljivost. Nadomeščanje obvladljivega števila večjih in tehnološko dovršenih proizvodnih enot z enormnim številom pretvorniško-priključenih enot pogosto cenene kakovosti vsekakor predstavlja tveganje iz stališča njihovega daljinskega krmiljenja. Vprašanje je, kakšnemu kibernetickemu tveganju se s tem izpostavlja in kako to vpliva na zanesljivost obratovanja EES.

Rabimo politično zrelost, ki presega nacionalne interese.

Daljšega komentarja temu spoznanju avtorji ne bomo namenili. Ne glede na to kako utopično to spoznanje že zveni, ga smatramo kot ključno za uspešni prihodnost Evrope.

5 Razprava

Iz napisanega ugotavljamo, da je skoraj nemogoče izolirati zgolj en vzrok razpada EES na iberškem polotoku. Hkrati pa tudi, da je nemogoče trditi, da kateri od elementov (ali skupine elementov) ni bil vzrok razpada kot je to storil španski minister – glej Sliko 5.

R. Mihalič, U. Rudež

stabilnega področja obratovanja EES si kot družba enostavno ne moremo privoščiti na dolgi rok. Pred odločevalci energetskih politik bi torej moral biti temeljit premislek o načinu udejanjanja idej tako imenovanega zelenega prehoda, vendar ob skrbnem naslonu na mnenje stroke in upoštevanja vseh pastí, ki jih ta lahko s svojim strokovnim znanjem predvidi in napove.

REFERENCE

- [1] <https://www.entsoe.eu/publications/blackout/28-april-2025-iberianblackout/>
- [2] Življenje in tehnika : revija za poljudno tehniko, znanost in amaterstvo. okt. 2021 do jan. 2022, letn. 72 in 73, [št.] 10, 11, 12 in 1, str. 16, 20, 22 in 26
- [3] Universidad de Oviedo
- [4] BOKAL, Matevž. Stabilizacija digitalnih simulacij v realnem času s kompenzacijo časovnih zakasnitev : doktorska disertacija. Ljubljana: [M. Bokál], 2023. 109 str., [12] str. pril., ilustr.
- [5] <https://www.pv-magazine.com/2025/04/29/pedro-sanchez-says-spainblackout-not-triggered-by-excess-renewables/>

Spain blackout not caused by renewables, says prime minister

Spanish Prime Minister Pedro Sánchez says Spain's recent blackout was not triggered by excess renewables or a lack of nuclear power. He claims the government will reform the grid, seek an independent report from Brussels, and launch a national inquiry.

APRIL 29, 2025 PILAR SÁNCHEZ MOLINA

Sl. 5: Izjava španskega ministra dan po razpadu. Vir: [5]

Zato v skladu s predhodno razpravo izpostavljamo potencialno vpletenost OVE pri celotnem poteku omenjenega razpada:

- vpliv OVE na precejšnje pomanjkanje vztrajnostnih mas za varno in stabilno obratovanje EES. Te bi sicer lahko nadomestili z virtualno vztrajnostjo, vendar do tega ni prišlo.
- vpliv OVE na pomanjkanje proizvodnih enot s funkcijo aktivnega dušenja nihanj. Podobne funkcije bi tehnično sicer lahko bile vgrajene v pretvorniško-priključene enote, vendar tudi do tega v praksi ne prihaja.
- vpliv OVE na pomanjkanje naprav za regulacijo jalove moči oziroma napetosti. To funkcijo je mogoče s pretvorniškopriključenimi napravami sicer izvajati, vendar je v praksi zaenkrat redka.
- vpliv delikatnosti pretvorniške opreme OVE na nastavitve zaščite. Polprevodniška elektronika, ki je ključna sestavina pretvornikov, je zelo občutljiva na kakršnekoli preobremenitve. Posledično je njihova zaščita z namenom zagotavljanja daljše življenjske dobe, nastavljena ostreje kot pri konvencionalnih proizvodnih enotah, ki lahko kratkotrajno prenesejo izjemne preobremenitve.

6 SKLEP

V čakanju na končno poročilo ENTSO-E, mnogi premišlujejo o morebitnih prispevkih OVE k obravnavanemu razpadu EES na iberškem polotoku. Naprav samih, t.j. fotovoltaičnih panelov, vetrnih turbin ali pretvornikov vsekakor ne moremo kriviti kot (vsaj ne edini) vzrok tega odmevnega dogodka. Ni pa mogoče zanikati, da bi z bolj premišljeno integracijo OVE in ustrežno ter celovito pripravo EES na visoke deleže pretvorniško-priključenih naprav verjetnost takšnega dogodka močno znižali. Seveda to ne more biti in tudi ne bo mogoče brez velikih investicij [6]. Zanašanje na dobro zasnovo, pre-dimenzioniranost in robustnost obstoječega EES nas lahko pripelje zgolj do določene točke, ko nas bodo razmere pripeljale do tega, da se ponovno globoko v sebi zavemo življenjsko pomembne funkcije EES v naši družbi. Neprestanega manjšanja

Information Society 2025, 6–10 October 2025, Ljubljana, Slovenia

- [6] MIHALIČ, Rafael. Kako poceni je električna energija iz obnovljivih virov = How cheap is electricity from renewable sources. V: OGRIN, Tomaž (ur.), MIHALIČ, Rafael (ur.). Miti in resnice o varovanju okolja = Myths and Truths about Environmental Protection : Informacijska družba - IS 2023 = Information Society - IS 2023 : zbornik 26. mednarodne multikonference = proceedings of the 26th International Multiconference : zvezek D = volume D : 11. oktober 2023, 11 October 2023, Ljubljana, Slovenia. Ljubljana: Institut "Jožef Stefan", 2023. Str. 35-40, ilustr. Informacijska družba. ISBN 978-961-264-279-2. ISSN 2630-371X.
http://library.ijs.si/Stacks/Proceedings/InformationSociety/2023/IS2023_Volume-D%20-%20Okolje.pdf

Nekateri ostali uporabljeni viri

- [7] https://x.com/jacob_maroga/status/1916855033481597116?t=cRLySsKPujIoGfkm6GgA&s=03
- [8] <https://physics.stackexchange.com/questions/848666/what-is-induced-atmospheric-vibration>
- [9] <https://wattsupwiththat.com/2025/04/28/congrats-to-spain-nation-goes-100-renewable-as-of-april-16th-2025-but-then-mass-blackouts-hit-spain-portugal/>
- [10] https://x.com/Object_Zero/status/1916863929055154532
- [11] <https://www.youtube.com/watch?v=dzd6JvJecVY>
- [12] <https://www.netzerowatch.com/s/Porter-Blackouts-n33z.pdf>
- [13] https://www.telegraph.co.uk/business/2025/04/28/blackout-risk-made-worse-by-netzero/?WT.mc_id=e_DM572583&WT.tsrc=email&etype=Edi_FTE_New&utm_source=email
- [14] <https://eike-klima-energie.eu/2025/04/29/blackout-in-spanien-wie-die-energie-wende-europas-stromnetze-ueberfordert/>
- [15] <https://www.delo.si/mnenja/gostujoce-pero-nauki-razpada-spanskega-elektroenergetskega-sistema>
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=EqLeJE3j3-w>
- [17] https://www.youtube.com/watch?v=KaBx8rhN_Z4
- [18] NREL: April 28th 2025 Iberian Blackout:
Analysis of available information Jose Daniel Lara, Ben Kroposki, Tarek Elgindy, Rodrigo Henriquez-Auba, Jarrad Wright
- [19] ERSE explica, INVESTIGATION INTO THE IBERIAN BLACKOUT OF 28 APRIL 2025, Lisbon, 12 May 2025
- [20] Friedrich Alexander University, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther
Blackout and System Restoration on the Iberian Peninsula on April 28 and 29, 2025, Factual analysis based on publicly available data and information