

VZROKI IN "VZROKI" LETOŠNJEGA RAZPADA ELEKTROENERGETSKEGA SISTEMA NA IBERSKEM POLOTOKU

RAFAEL MIHALIČ

Sprejeto
17. 12. 2025

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija; e-pošta:
rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Izdano
31. 3. 2026

DOPISNI AVTOR
rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Ključne besede:
razpad
elektroenergetskega
sistema,
obnovljivi
viri
energije,
sistemska
stabilnost,
vztrajnostne
mase,
energetski
prehod.

Povzetek Prispevek obravnava razpad elektroenergetskega sistema (EES) na Iberskem polotoku 28. aprila 2025, ki velja za enega največjih in najodmevnejših razpadov v Evropi v zadnjih desetletjih. Dogodek je poseben predvsem zato, ker je do njega prišlo v razmerah zelo visokega deleža proizvodnje iz obnovljivih virov energije (OVE), predvsem sončnih in vetrnih elektrarn, ter ob nizki prisotnosti konvencionalnih virov z rotirajočimi masami. Avtor analizira zaporedje dogodkov pred razpadom, vključno z napetostnimi in frekvenčnimi nihanjem, pomanjkanjem sistemske vztrajnosti, neuravnoveženostjo jalove moči ter omejeno povezanostjo Iberskega polotoka z evropsko interkonekcijo. Posebna pozornost je namenjena vlogi pretvorniško-priključenih virov, zaščitnih mehanizmov in odzivov sistemskih operaterjev. Prispevek poudarja, da razpada ni mogoče pripisati enemu samemu vzroku, temveč prepletu tehničnih, sistemskih in političnih dejavnikov. V zaključku avtor izpostavi potrebo po bolj premišljeni in celoviti integraciji OVE, razvoju tehnologij za nadomeščanje vztrajnostnih mas, izboljšanju zaščitnih sistemov ter večji politični zrelosti pri oblikovanju evropske energetske politike.



<https://doi.org/10.18690/po.13.25.45-64.2026>
Besedilo © Mihalič, 2026



1. Uvod

V evropskih strokovnih krogih, povezanih z načrtovanjem, vodenjem, upravljanjem in vzdrževanjem elektroenergetskih sistemov (EES), velja razpad EES (ponarodelo: blackout) Iberskega polotoka, ki se je zgodil 28. aprila 2025, za "dogodek stoletja". Razpad je prizadel več kot 50 milijonov prebivalcev Španije in Portugalske ter predstavlja največji razpad EES v Evropi v zadnjih desetletjih, po številu prizadetih ljudi enakovreden razpadu Italijanskega EES leta 2003. Je pa to prvi velik razpad EES, ki so ga v trenutku razpada z energijo napajali pretežno obnovljivi viri energije (OVE), točneje sončne in vetrne elektrarne.

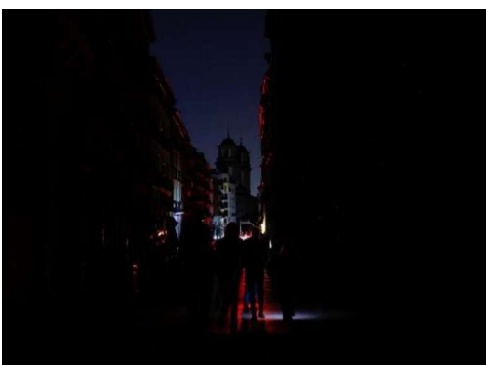
Dogodek je razkril povečano ranljivost sodobnih EES v razmerah tako imenovanega energetskega prehoda (ponarodelo: Energiewende) in izpostavil vprašanja o njihovi sposobnosti varnega obratovanja v razmerah, ko proizvodnja temelji na elektronsko vodenih virih brez rotirajočih mas s stohastično razpršeno proizvodnjo ter brez ustrezne koordinirane regulacije sistemskih veličin.

Dileme in vprašanja povezana z omenjeno tematiko niso nič novega in si jih strokovnjaki in znanstveniki, ki delujemo na področju EES, zastavljamo že nekaj desetletij. Na žalost so bila podana opozorila in sugestije o nujnosti celovitega prehoda celotnega EES, in ne le proizvodnje energije, do sedaj bolj ali manj bob ob steno. Z domnevnimi okoljskimi in povsem nesmiselnimi, tako imenovanimi klimatskimi cilji [1, 2], je evropska politika, gledano tehnično in ekonomsko, povsem zaslepljena in brez jasne strategije favorizirala le masovno izgradnjo razpršene proizvodnje in nosi polno odgovornost za vse probleme energetske politike, ki izhajajo iz tega, beri 3 x dražja električna energija, kakor v okoljih [3], ki predstavljajo neposredno industrijsko konkurenco EU, stagnacijo razvoja in blagostanja prebivalstva EU ter zaton evropske industrijske proizvodnje in primata v znanosti in inovativnosti. Ampak to je zgodba za drugo priložnost.

Kot rečeno, je "blackout" nastopil v obdobju, ko je bila proizvodnja električne energije na Iberskem polotoku vezana pretežno na OVE, večina konvencionalnih termoelektrarn je obratovala z minimalno močjo ali je bila zaustavljena. Okoli poldneva so se začele pojavljati ponavljajoče se oscilacije frekvence in napetosti, kar je ogrozilo stabilnost sistema. Poskusi stabilizacije so privedli EES v nesprejemljivo stanje, ki je botrovalo sprožitvi zaščitnih mehanizmov, ki so dokazano povzročili izpad več velikih proizvodnih enot in domnevno množice majhnih proizvajalcev. Vsi ti so bili izključno iz segmenta obnovljivih virov.

Zaradi hitrega in izrazitega padca frekvence je bila povezava z evropskim elektroenergetskim omrežjem pravilno samodejno prekinjena. Kljub aktivaciji systemske zaščite podfrekvenčnega razbremenjevanja v Španiji in na Portugalskem ta ukrep ni dosegel zelenega učinka. Eden od razlogov je bila verjetno tudi nizka

raven vztrajnostnih mas v sistemu, zaradi česar je frekvenca upadala prehitro, da bi obstoječa zaščitna shema lahko učinkovito delovala. V nekaj sekundah je tako prišlo do popolnega razpada ibernskega EES.



Slika 1: Impresije med letošnjim špansko-portugalskim razpadom EES

Vir zgoraj: <https://www.varcevanje-energije.si/>, Jožica Ekart, 07/08/2025, spodaj: Reuters (28. april 2025))

Posledice izpada so bile zelo obsežne. Brez električne energije so ostala velika urbana območja, prizadeti so bili industrija, promet, telekomunikacije in javne storitve. Bolnišnice so morale preiti na rezervne vire napajanja, javni promet se je ustavil, številna podjetja pa so utrpela znatne proizvodne izgube. Ocene gospodarske škode se razlikujejo, vendar se večinoma gibljejo v razponu okoli desetih milijard evrov, pri čemer del ocen sega tudi bistveno višje.

Dogodek ni imel le neposrednih ekonomskih in družbenih posledic, temveč je (Končno!!!) sprožil tudi širšo razpravo o dolgoročni zanesljivosti oskrbe z električno

energijo ter o potrebi po prilagoditvi tehničnih in regulativnih okvirov. Analiza razpada iberškega EES je zato ključna za elektroenergetsko stroko, še bolj pa za snovalce energetske politike, saj jasno kaže, da je prehod iz sistema, temelječega na predvidljivi konvencionalni proizvodnji z velikimi, rotirajočimi masami, v sistem s stohastično proizvodnjo in nizko vztrajnostjo, bistveno zahtevnejši, kot praviloma izpostavljajo evropski politiki ter "strokovnjaki" in bo zahteval obsežne dodatne ukrepe za zagotovitev dolgoročne robustnosti in odpornosti EES. Pa naj se ponovim: "Kar sicer strokovnjaki za sistemске vidike obratovanja in načrtovanja EES že leta ponavljamo, kot lajna."

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

Slika 2: Izgleda, kot raca, se oglša, kot raca, plava, kot raca, ampak niti slučajno ni raca.

Vir: <https://www.pv-magazine.com/2025/04/29/pedro-sanchez-says-spains-blackout-not-triggered-by-excess-renewables/>

Za trenutno stanje duha v evropski energetske politiki, ki seveda v nobenem primeru ne bo priznala, da je stvar povsem zavozila, je zelo indikativen naslednji dogodek. Španski premier Pedro Sánchez je namreč že en dan po razpadu, torej 29. aprila, javno zatrdil, da vzrok dogodka ni bil ne previsok delež OVE, ne pomanjkanje jedrske proizvodnje. Takšna izjava je povsem nekredibilna, neresna in bi bila smešna, če ne bi bila žalostna, saj podrobne tehnične preiskave tovrstnih sistemskih razpadov običajno trajajo več mesecev, še daljši čas pa je potreben za razumevanje širših vzrokov na ravni evropske elektroenergetske interkonekcije Entso-e.

V nadaljevanju se osredotočamo na analizo fizikalnih procesov in obratovalnih razmer v portugalsko - španskem ter evropskem EES, ki so povzročile odstopanja ključnih fizikalnih parametrov in sprožitve zaščitnih mehanizmov, ki so v končni fazi privedli do nezmožnosti obratovanja EES na Iberskem polotoku. Namen analize je prikazati zaporedje dogodkov in medsebojno povezanost vzrokov, ki so vodili do razpada.

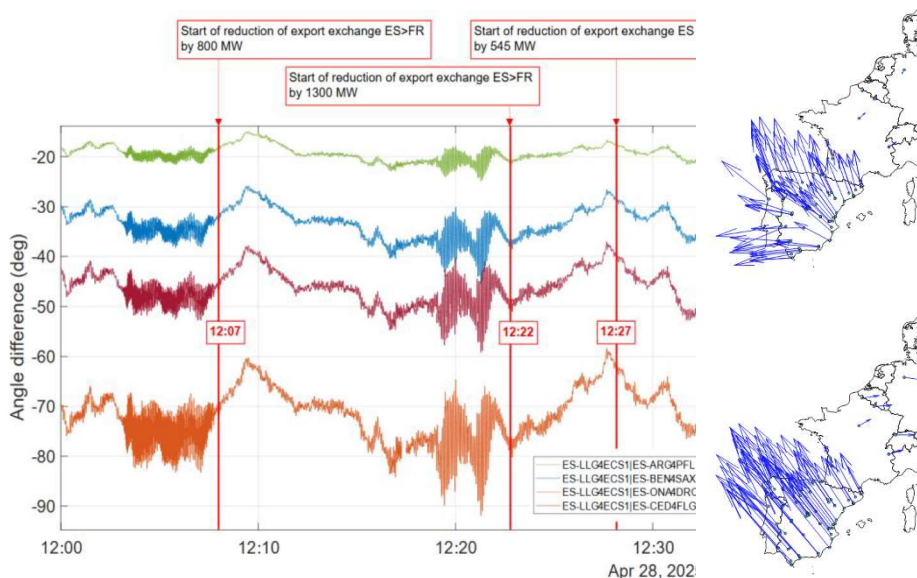
Osrednje vprašanje pri tem je, zakaj je do takšnih odstopanj sploh prišlo in ali so zaščitni ter drugi podporni sistemi v danih razmerah delovali pravilno. Doslej opravljene analize kažejo, da je EES izjemno kompleksen in ga je mogoče opisati

kot samoorganizirajoč se kritični sistem (glej [4]), pri katerem vseh stanj in interakcij ni mogoče vnaprej natančno predvideti. Razpad je tako posledica prepletene niza dogodkov, v katerem OVE niso edini dejavnik, temveč eden od več dejavnikov.

Popolna preprečitev okvar v tako zapletenih sistemih, kot je kontinentalni EES, ni realna, možno pa je zmanjševanje njihove verjetnosti z ustreznim načrtovanjem in upravljanjem. Pri tem se čedalje bolj zdijo utemeljeni pogledi poznavalcev obratovanja EES, da bo prehod iz klasičnega, fizikalno utemeljenega načina vodenja EES, v sistem, ki vse bolj temelji na programski opremi in močnostni elektroniki, prinesel dodatna tveganja. Ta so po vsej verjetnosti bistveno večja, kot se jih "wannabe strokovna" in širša javnost trenutno zaveda. Da večine evropskih politikov pri tem ne omenjam.

2. Dogajanje pred razpadom

Če želimo pojasniti vzroke razpada, je treba analizirati dogajanje v EES pred sprožilnim dogodkom. Kar se tiče stanja EES na Iberskem polotoku zjutraj ni bilo posebnih opozorilnih znakov. Proizvodnja OVE, predvsem sončnih elektrarn (SE) je bila visoka, poraba se je gibala okoli 27 GW (za občutek: okrog 20-kratnik tipične slovenske porabe). Moč SE je dopoldne hitro naraščala in je malo po 9. uri pokrivala 60 % vsega odjema. Ostalo so večinoma pokrile vetrne in manjši delež jedrske elektrarne. V EES ni bilo na prvi pogled opaziti ničesar takega, čemur ne bi bili priča že v preteklosti. EES je bil (navidezno) varno v stabilnem področju, so pa bile kmalu po 9. uri napetosti v visokonapetostnem omrežju nekoliko povišane. Te so bile sicer v dovoljenih mejah, a so nakazovale, da razmerje med proizvodnjo in odjemom jalove moči (ta v visokonapetostnih omrežjih najbolj vpliva na višino napetosti) ni idealno in ima tendenco gibanja v smeri njenega presežka.

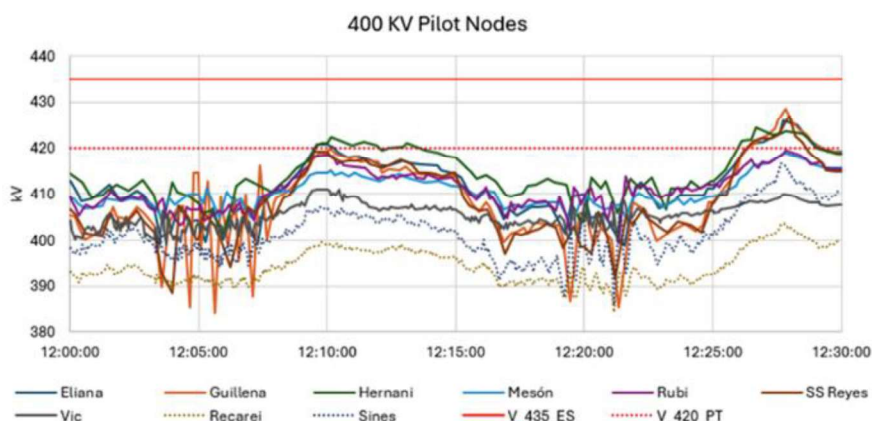


Slika 3: WAMS meritve Red Eléctrica, REN in ostalih TSO: potek razlike napetostnih kotov (levo), pripadajoča nihajna načina (desno) [5].

Med 10. in 11. uro je proizvodnja SE dosegla skoraj vrh, medtem ko so bile konvencionalne elektrarne (plinske, termo in hidro) v obratovanju z minimalno močjo. 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 z dominantno lastno frekvenco 0,53 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 nastavljivim 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 dominantno lastno frekvenco 0,24 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 **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.** Pri tem črtkana rdeča vodoravna črta označuje

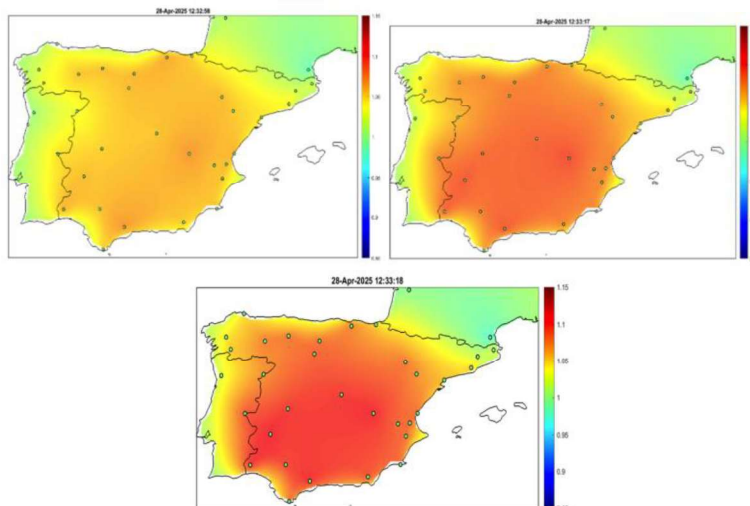
maksimalno dovoljeno obratovalno napetost na Portugalskem, polna rdeča vodoravna črta pa v Španiji



Slika 4: Časovni potek napetosti 400 kV pilotnih vozlišč [5].

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 nizko-napetostnih nivojih omrežja javnosti zaenkrat še niso dosegljivi.

Prelomni trenutek (glej [4]) se je zgodil ob 12:32:57. Takrat je izpadel 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 (le reda 1 % skupne porabe) 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 5 s tremi zaporednimi posnetki stanja (zeleno označuje napetost 400kV, rumeno 420 kV, rdeča 440 kV



Slika 5: Posnetki 400 kV napetosti pilotnih vozlišč od 12.32.58 do 12.33.18 [5].

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 6 zgoraj. Indikativno je predvsem izjemno hitro sosledje dogodkov, ki učinkovito delovanje obstoječe sistemske podfrekvenčne zaščite precej oteži in je nekaj povsem novega v statistiki razpadov EES. Za primerjavo na sliki 6 spodaj podajamo upadanje frekvence med italijanskim razpadom EES leta 2003. Vse skupaj je potekalo več kot 30 krat počasneje in sistemska podfrekvenčna zaščita (če bi delovala pravilno) ne bi imela nobenih težav stabilizirati delovanja italijanskega EES v otočnem režimu.

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

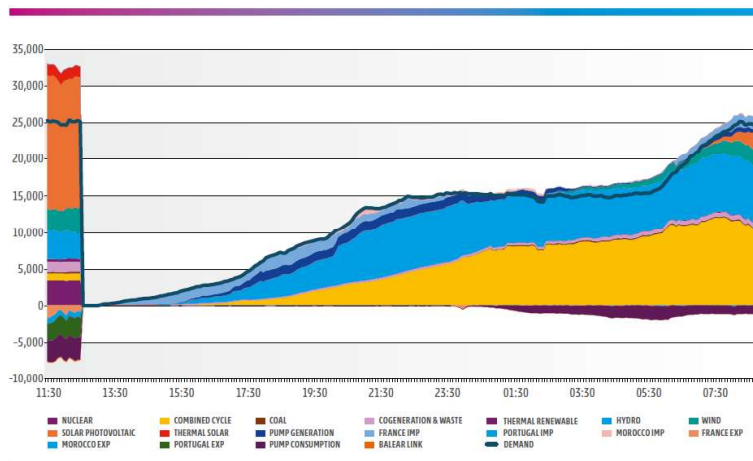
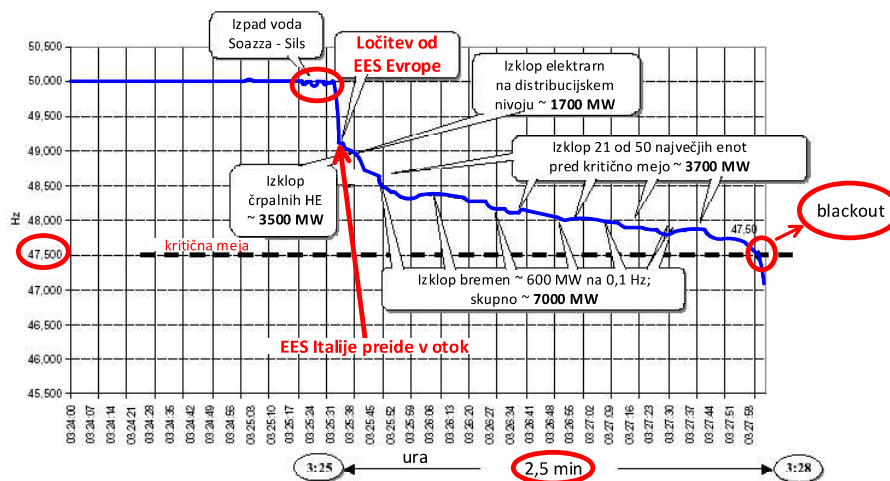


Figure 4-24: Evolution of generation and load of the Spanish system during the restoration phase - Red Eléctrica



Slika 6: Potek proizvodnje in porabe pred, med in po razpadu Iberskega polotoka [5] (zgoraj).

Sesedanje frekvence EES otoka Italije ob neustreznem odzivu sistemske zaščite [6] (spodaj).

3. Možni vzroki ali na kaj pokazati s prstom

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 bilo objavljeno v začetku oktobra. Med najbolj

bizarne hipoteze spadajo tako imenovane inducirane atmosferske vibracije, ki so se prvi dan znašle v precejšnjem številu medijev. Šlo naj bi za pojav, ki bi naj povzročil mehanske oscilacije vodnikov daljnovodov in na ta način povzročil nihanje moči v sistemu. Resnost takih teorij je na nivoju zarote zelenih možičkov iz Marsa, ki so vzeli na muho španske daljnovode. Nadaljnje hipoteze so sumile kibernetiki napad, spet druge hiter in nepredviden pojav oblačnosti nad Španijo. Slednji dve niti nista tako nemogoči, seveda pa takrat, ko so se te špekulacije pojavile ni bilo prav nobenih dokazov ali indicov za njihovo resničnost.

V resnici bi tudi po objavi 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 obratovnem 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 med vožnjo po cesti. Sicer bi do česa takšnega lahko prišlo tudi ob dobro vzdrževanem vozilu a bi bila takšna nezgoda bistveno manj verjetna.

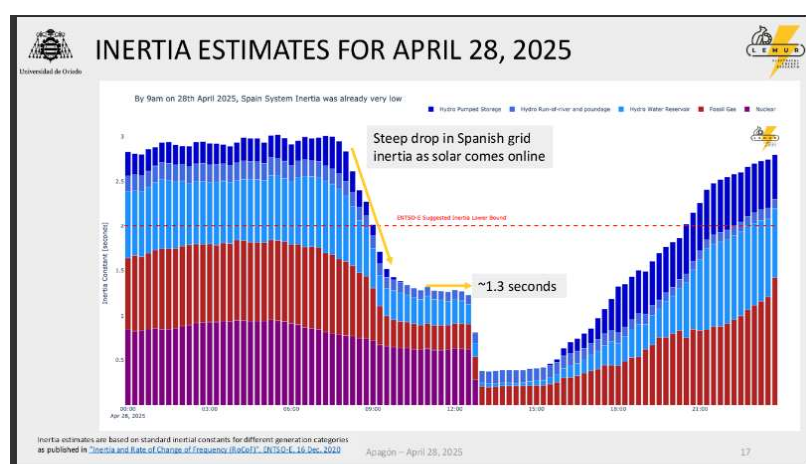
Kot smo razložili v [4], so EES nelinearni sistemi, ali določneje, samoorganizirajoči se kritični sistemi, v katerih neizogibno prihaja do motenj vseh razsežnosti. Tega ne moremo preprečiti, lahko pa s pravilnim načrtovanjem in vodenjem njihovo verjetnost zmanjšamo. Drugače rečeno, razpadov EES ne moremo 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 ustreznem odzivu elementov EES (recimo zaščite), privedla do razpada EES, lahko izpostavimo naslednja nedvoumna dejstva.

- **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 izrazito (pre)malo. Tu velja iskati enega od morebitnih vzrokov, zakaj sistemska zaščita pod-frekvenčnega razbremenjevanja po

ločitvi ibernskega polotoka od preostale celinske interkonekcije ni bila dovolj učinkovita. Povsem mogoče je, da je bil padec frekvence preprosto prehiter. Slika 7 prikazuje rezultate ocenjevalnika količine rotirajočih mas, iz katerih je razvidno, da so bile vztrajnostne mase po 9. uri daleč pod priporočeno minimalno vrednostjo s strani ENTSO-E (označena z rdečo črtkano črto). Kor izpostavlja [5], je bila že pred 9. uro ocenjena sistemska vztrajnost Iberskega polotoka (2,7 s, t. i. H-faktor) najnižja doslej izmerjena v evropskem omrežju.



Slika 7: Ocena vztrajnostnih mas španskega EES 28. apr. 2025 [7].

- **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, notranja napetost zmanjša. Posledica je zmanjšanje njihovega sinhronizacijskega momenta. Z drugimi besedami: stabilno področje takšnega obratovanja je manjše, verjetnost izgube stabilnosti večja.

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

To pomeni, da pretvorniško-priključeni viri obratujejo z maksimalno možno delovno 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. In ne pozabimo! Zahteva po jalovi moči zmanjša maksimalno delovno moč pretvornika. To pa pomeni, da bi se nazivna delovna moč SE zmanjšala in s tem tudi njen finančni izplen, ki bi marsikatero investicijo v SE na meji rentabilnosti hitro privedel v rdeče številke. Če seveda ta "storitev" ne bi bila dodatno plačana z denarjem vseh porabnikov električne energije.

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

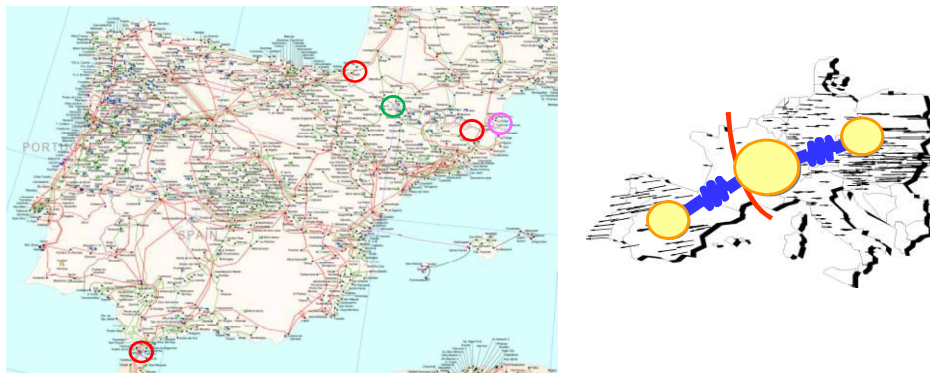
To pomeni, da frekvenco proizvedene izmenične napetosti prilagodijo frekvenci omrežja, na katerega so priključeni. Z rastjo deleža takšnih virov (in odjema) pa pridemo v situacijo, ko je njihov delež v EES primerljiv z deležem moči konvencionalnih virov z rotirajočimi masami. Posledično se pretvorniki prilagajajo frekvenci, na katero sami vplivajo. Takšna situacija lahko predstavlja izvor različnih vrst oscilacij v EES. Rešitve iščejo v smeri pretvornikov z regulacijo oblikovanja omrežne napetosti oz. njene frekvence (torej ne prilagajanje, marveč diktiranje - angl. grid forming), vendar ta tehnologija še ni na ustreznem nivoju zrelosti in je še kar daleč od množične uporabe.

- **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 ustrezne nastavitve pri hitro se spreminjajočem deležu proizvodnje OVE. Namreč, kot lahko PSS v določenih obratovalnih točkah EES uspešno duši oscilacije, jih načeloma v drugih obratovalnih točkah EES lahko ojača ali povzroči. Tema ustrezne nastavitve PSS je izjemno kompleksna, še posebno, če bi imeli opravka z množico takih regulatorjev (recimo, da bi jih udeležili s konverterji OVE).

- **EES iberskega polotoka je zelo šibko povezan s svojimi sosedi.**

Šibka povezanost pomeni, da ni mogoče izkoristiti 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%. Za občutek, za Slovenijo znaša ta parameter okrog 300%.



Slika 8: Shema 400 in 220 kV elektroenergetskega omrežja Iberskega polotoka [8] (levo). Načini nihanja generatorjev v enem od tipičnih načinov (desno).

Za ilustracijo podajamo na sliki 8, desno elemente desnega lastnega vektorja, ki za generatorje pokažejo kako močno zanihajo in s kako fazo (črne puščice). Gre za enega od nihajnih načinov Enso-e interkonekcije med Iberskim polotokom in vzhodno Evropo. Vidimo, da zaradi omenjene šibke povezave Iberski polotok koherentno niha napram ostali Evropi. Vse skupaj si lahko predstavljamo, kot sistem treh mas, povezanih z vzmetmi, pri čemer dve skrajni masi v protifazi nihata glede na bolj ali manj mirujočo veliko maso v sredini (to je eden od možnih načinov).

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 srednje-napetostnem 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 veča, 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 in načrtovanja EES bi težko rekli, da so se naučili kaj bistvenega, kar ne bi že vedeli in na kar ne bi že lep čas opozarjali. Razpad EES na Iberskem polotoku torej ni zanje nič nepredstavljivega. Samo upamo pa lahko (upanje umre zadnje), da se je problem dotaknil (kake hude "streznitve" si niti slučajno ne obetam) odločujočih v EU, in da bodo morda vendarle kdaj prisluhnili strokovnjakom, ne le "strokovnjakom".

Že v konvencionalnih EES je do razpadov včasih (sicer redko) prišlo, v razmerah drastičnih sprememb kakršnih smo priča zaradi evropskih in nacionalnih politik, pa se njihovo število zgolj povečuje in obseg posledic širi.

V tem smislu je razpad na ibernskem 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 še 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, kar se dogaja sedaj skoraj izključno zaradi ekonomskih dobrot, 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 in 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 take, tako imenovane dinamične sisteme z zakasnitvijo, v določeni obratovalni točki lahko obravnavamo kot neskončno-dimenzionalne linearne sisteme. Takšni sistemi pa nimajo več lastnih vrednosti (poenostavljeno – neke vrste resonančnih točk), pač pa lastne funkcije in torej neskončno lastnih vrednosti [9], kar ustrezno koordinacijo

vseh regulacijskih mehanizmov znatno oteži. Obetavna alternativa so že omenjeni pretvorniki s funkcijo oblikovanja omrežne napetosti, vendar bo najprej treba počakati na zadostno zrelost te tehnologije, nadalje pa še na njihovo implementacijo po vsej celini.

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 energetskega objekta v prostor. V konkretnem primeru sta francoski in španski operater operater (RTE in REE) zato že predstavila načrt za povečanje povezav od sedanjih ca. 3 GW na 8–10 GW do leta 2030. Ta ukrep naj bi zagotovil večjo čezmejno fleksibilnost in zmanjšal verjetnost ponovitve podobnih dogodkov. Ob vsesplošnem nasprotovanju javnosti gradnji energetske infrastrukture bo zelo zanimivo opazovati, ali jim bo uspelo v 5 letih udejanjiti to, za kar sta npr. Slovenija in Avstrija potrebovali po 30 let (povezavi Beričevo - Krško in Dunaj - Maribor).

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 prenapetostne 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. Entso-

e [5] ugotavlja, da so bile nastavitve prenapetostnih zaščit pri številnih PV elektrarnah preveč konservativne ($\pm 10\%$), zato so se številne enote izklopile, še preden bi prišlo do dejansko nevarnih napetostnih stanj. To potrjuje tezo, da so standardni zaščitni algoritmi, zasnovani za klasično napajane EES, v razmerah, ko so ti napajani pretežno preko pretvornikov, preveč togi, in da lahko sami sprožijo kaskadni izpad.

Gre pa pri tem za zelo zahtevno in časovno intenzivno dejavnost, kar privede na plan vprašanje, kje najti ustrezno 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 izpostavljam 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. Za konec

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 2.

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 pretvorniško-priključenimi napravami sicer izvajati, vendar je v praksi zaenkrat redka.
- vpliv delikatnosti pretvorniške opreme OVE na nastavitev 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.

Na dlani je, da je prispevek OVE k obravnavanemu razpadu EES na Iberskem polotoku, milo povedano, bistven. 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 ustrezno 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 [10]. Zanašanje na dobro zasnovano, pre-dimenzionirano in robustno 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 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 pasti, ki jih ta lahko s svojim strokovnim znanjem predvidi in napove.

In kaj po vsem skupaj odgovoriti premijeru Sanchezu? Verjetno to, da: "Če izgleda, kot raca, plava, kot raca in se oglašá, kot raca, je morda celo raca."

Literatura in viri

- [1] Erik Margan, antropogeni delež CO₂ v ozračju, *ŽiT* 9 in 10, 2019
- [2] Lotrič, Marko (avtor) / Gams, Matjaž (avtor, urednik) / Margan, Erik (avtor) / Mihalič, Rafael (avtor) / Ogrin, Tomaž (avtor) / Verbič, Jože (avtor) / Klopčič, Marija (avtor) / Tomažič, Branko (urednik), *Kmetijstvo je varuh okolja in narave : znanstveno podprto*. Elektronska izd. Ljubljana: Državni svet Republike Slovenije, 2025.
- [3] https://x.com/robert_rozic/status/1970544529557332191
- [4] *ŽiT* 2021/10 do *ŽiT* 2022/1, str. 16, 20, 22 in 26
- [5] ENTSO-E, Incident Report on the Iberian Blackout (Final Version, Sept 2025)
- [6] UCTE Interim Report 10-27-2003
- [7] Universidad de Oviedo
- [8] <https://www.entsoe.eu/data/map/>
- [9] BOKAL, Matevž. Stabilizacija digitalnih simulacij v realnem času s kompenzacijo časovnih zakasnitev : doktorska disertacija. Ljubljana: [M. Bokal], 2023. 109 str.
- [10] 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.