

IBERIJSKI SCENARIJ I ŠTO SMO NAUČILI

Dr.sc. Goran Majstrović



Zagreb, 4.12.2025.

Sadržaj



1. Rekapitulacija incidenta
2. Kronologija
3. Uzroci
4. Što smo naučili ?

ENTSO-E:

“Najozbiljniji raspad u povijesti europskog elektroenergetskog sustava”

- bez napajanja je ostalo **~60 milijuna ljudi**
- vrijeme do ponovne uspostave cjelokupnog napajanja svih kupaca **~23 h**
- Madrid: ljudi blokirani u liftovima u **286 zgrada**
- mreža mobilne telefonije neraspoloživa **~10 h**
- različiti izvori procjenjuju štetu na **3.5 – 4 mlrd.€**



ENERGETSKI KOLAPS

Portugalci otkrili uzrok nestanka struje: Riječ je o rijetkom fenomenu; Španjolska proglasila izvanredno stanje!

SIGURNOST DOGAĐAJ KIBERNETIČKI NAPAD INCIBE

Španjolska - istraga mogućeg kibernetičkog napada kao uzroka nestanka energije

Dan nakon povijesnog nestanka struje u Španjolskoj. "Istražujemo i moguću sabotažu"

TRAŽI SE KRIVAC

Je li ovisnost o solaru gurnula Španjolsku u kaos? 'To nije istina, tehnologija je stabilna!'

EKSTREMNE TEMPERATURNE RAZLIKE

Portugalski operator: Nestanak struje izazvao je rijedak fenomen u Španjolskoj

Taj se fenomen naziva "inducirana atmosferska varijacija", koja je potom dovela do oscilacija koje su uzrokovala kvarove u sinkronizaciji elektroenergetskih sustava

RIJETKA POJAVA

Geofizičar otkrio razlog nestanka struje u Španjolskoj i Portugalu: Moguće je da se radi o atmosferskoj pojavi

Tko je kriv ?

Damian Cortinas, predsjednik ENTSO-E:



entsoe

“Ovo je prvi raspad sustava uzrokovan previsokim naponima. To nam je potpuno novo *područje* u operativnom i *tehničkom* smislu, a uloga ENTSO-E **nije da svali krivnju ni na jednu stranu**, već da objektivno analizira okolnosti i *činjenice*...”

Tko je kriv ?

Sara Aagesen, potpredsjednica Vlade Španjolske i ministrica tranzicije:



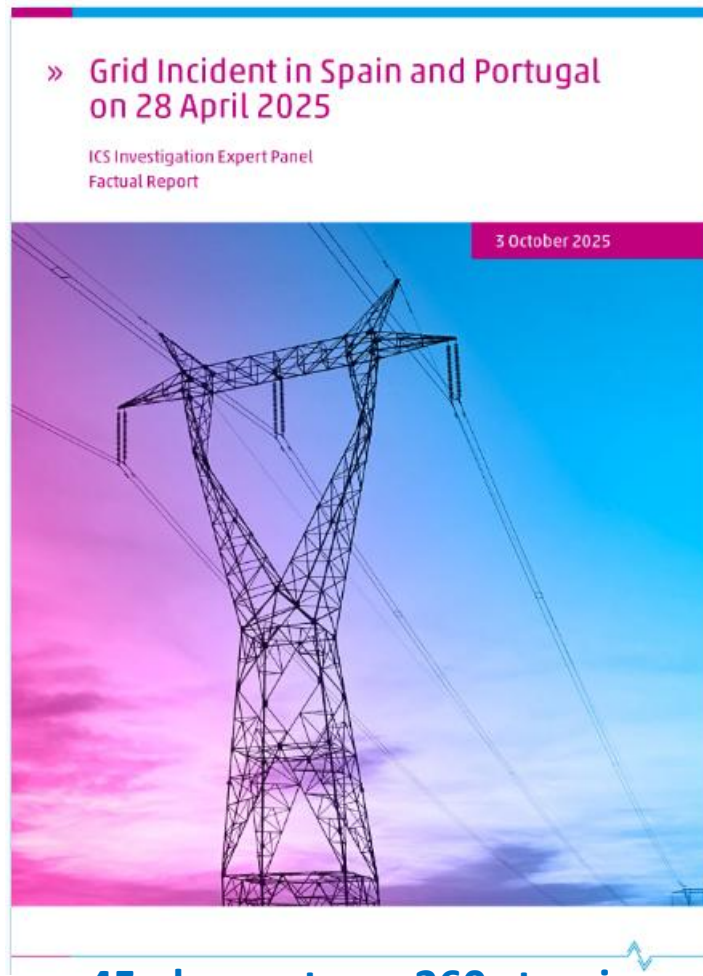
“Krivi su i nacionalni operator sustava Red *Eléctrica* i privatni proizvođači. Preliminarni ENTSO-*E* izvještaj je potpuno u skladu s rezultatima istrage Vlade.

Sustav nije imao dovoljne mogućnosti kontrole napona zato što nije bio dobro planiran, ali i zato što oni koji su obvezni i plaćeni nisu pružili odgovarajuću uslugu regulacije napona.”

Red *Eléctrica* i privatne tvrtke inzistirale su na tome **da nisu krive.**

Red *Eléctrica* je za raspad okrivila elektrane koje nisu ispunile svoje obveze regulacije napona, a privatni proizvođači su okrivili operatora za loše planiranje pogona.

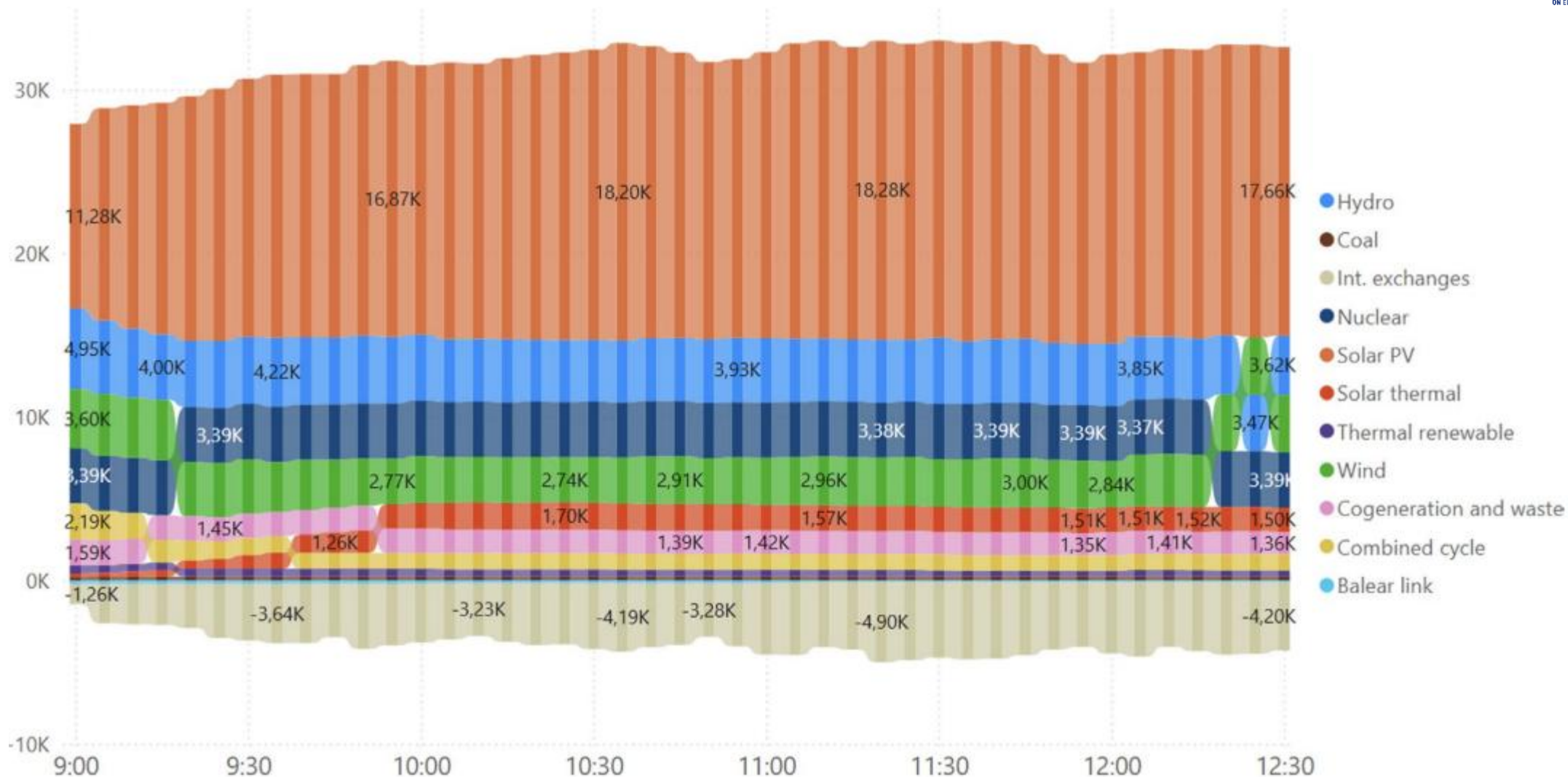
Stanje u EES Španjolske prije incidenta



45 eksperata na 260 stranica

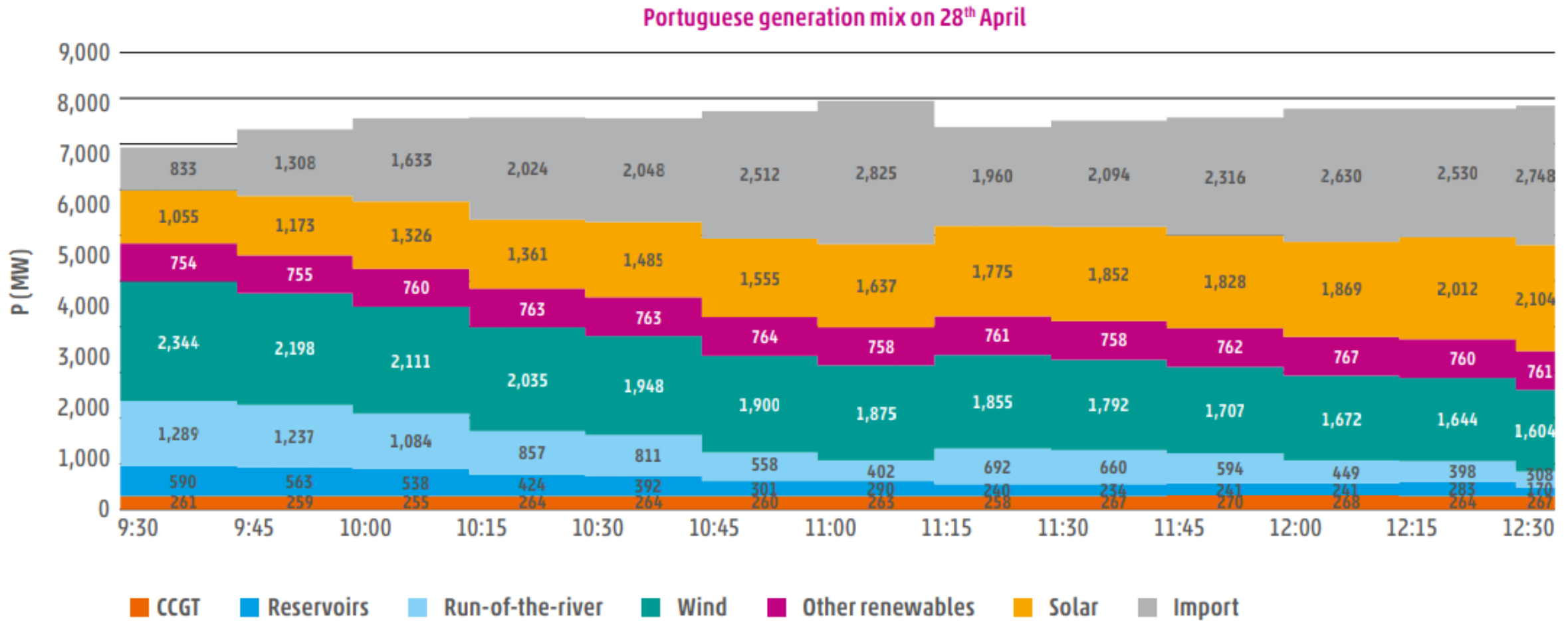
- **Proizvodnja:** 32,3 GW
- **Potrošnja:** 25 GW
3 GW → crpne HE
- **Razmjene:**
 - 2,6 GW → Portugal
 - 0,9 GW → Francuska
 - 0,8 GW → Maroko
 - 4,3 GW → izvoz
- **Tržište:** cijena na burzi < 0 €/MWh
- **Regulacija napona:** jedan STATCOM uređaj u pogonu (Vitoria 220 kV, ±150 Mvar)

Proizvodni miks Španjolske prije incidenta



Solar + solar thermal = **76%** ukupnog opterećenja (**60%** domaće proizvodnje)

Proizvodni miks Portugala prije incidenta



Solar = 26% domaće proizvodnje

Solar + vjetar = 47% domaće proizvodnje

Topologija mreže prije incidenta



Prekogranični kapaciteti Španjolska–Portugal:

- 6 DV 400 kV
- 3 DV 220 kV
- ukupna prijenosna moć ~9,6 GW
- ukupno NTC ~**3-5 GW**

Prekogranični kapaciteti Španjolska–Francuska:

- 2 DV 400 kV
- 2 DV 220 kV
- 1 HVDC 320 kV
- ukupna prijenosna moć ~2,8 GW
- ukupno NTC ~**1 GW**

Raspoloživost:

Dva DV značajna za interkonekciju planirano **van pogona**:

- DV 400 kV Brovales—Alqueva (ES—PT)
- 220 kV Biescas—Pragnères (FR—ES)

Kronologija incidenta 28.4.2025.

12:03–12:07 i 12:19–12:21

- **dvije epizode oscilacija** snage i frekvencije u mreži, **uspješno prigušene**

12:32:57–12:33:17

- **serija ispada elektrana** na jugu Španjolske (2,2 GW). U par sekundi ispada ukupno 15 GW ili ~50% ukupne proizvodnje

12:33:18–12:33:21

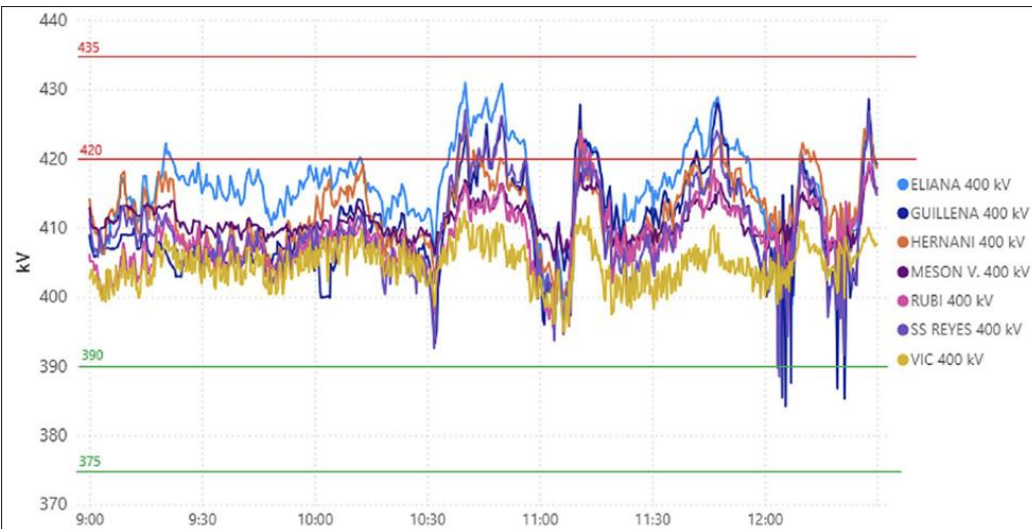
- Kaskadni **ispadi elektrana**, frekvencija iberskog sustava **pada ispod 48 Hz**, aktivirani automatski planovi podfrekvencijskog rasterećenja (load shedding, 6 stupnjeva), ali ne uspijevaju zaustaviti kaskadne ispađe.

12:33:21

- **Ispad AC kabela s Marokom** zbog pada frekvencije, **AC vodovi** između Francuske i Španjolske **se isključuju** (zaštita od gubitka sinkronizma).

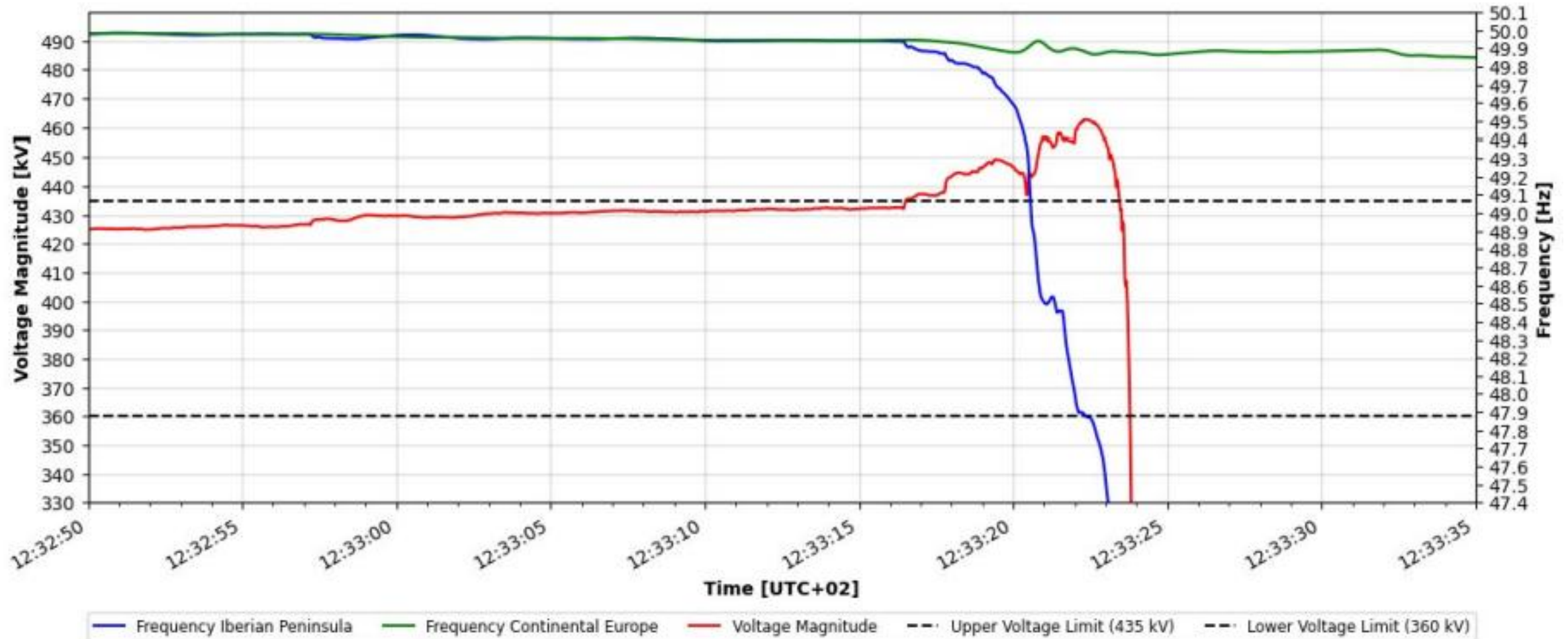
12:33:24

- iberski sustav se **potpuno urušava**, **zaustavlja se i prijenos preko HVDC** veza Francuska–Španjolska.

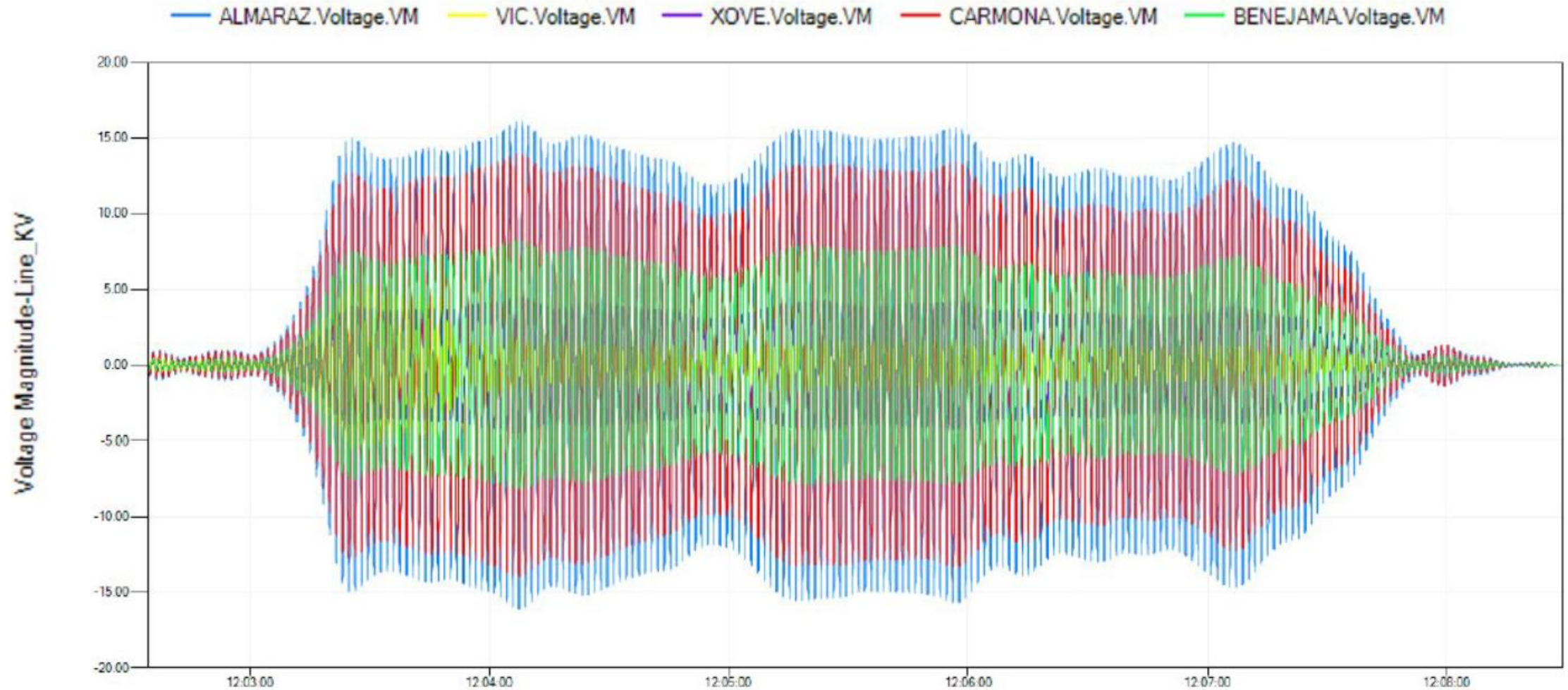


Iznosi napona na glavnim 400 kV čvorištima u Španjolskoj

Kronologija incidenta

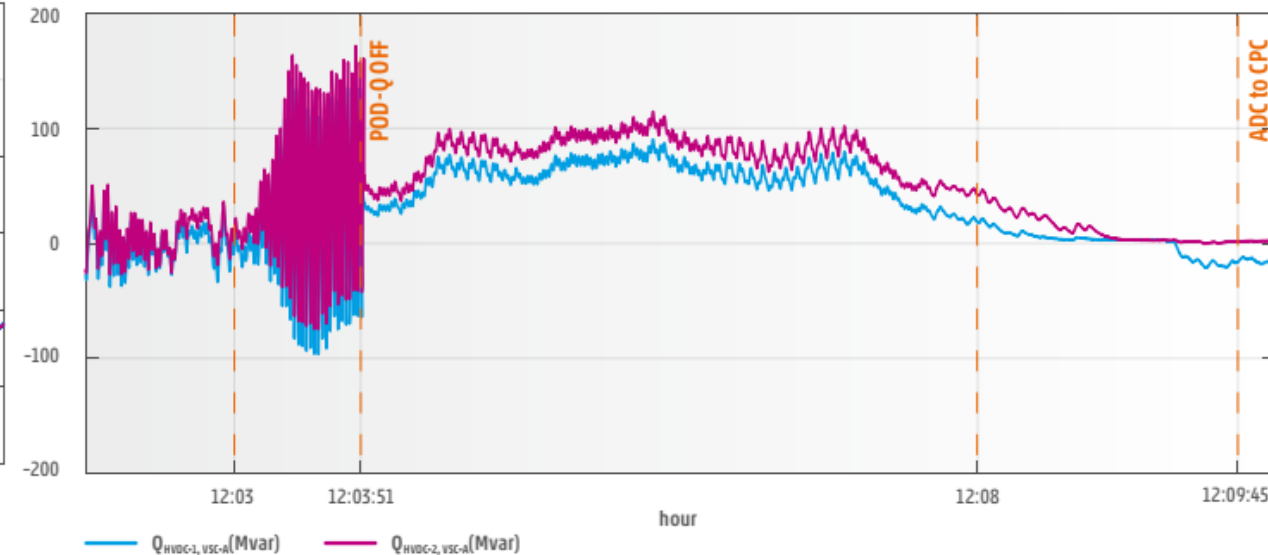
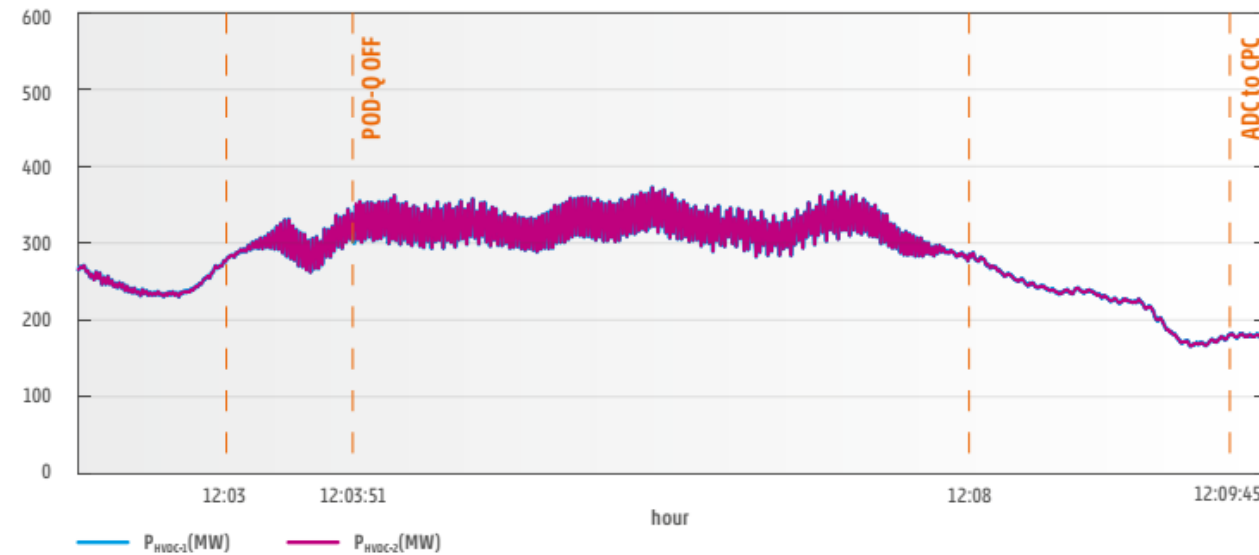


Oscilacije napona

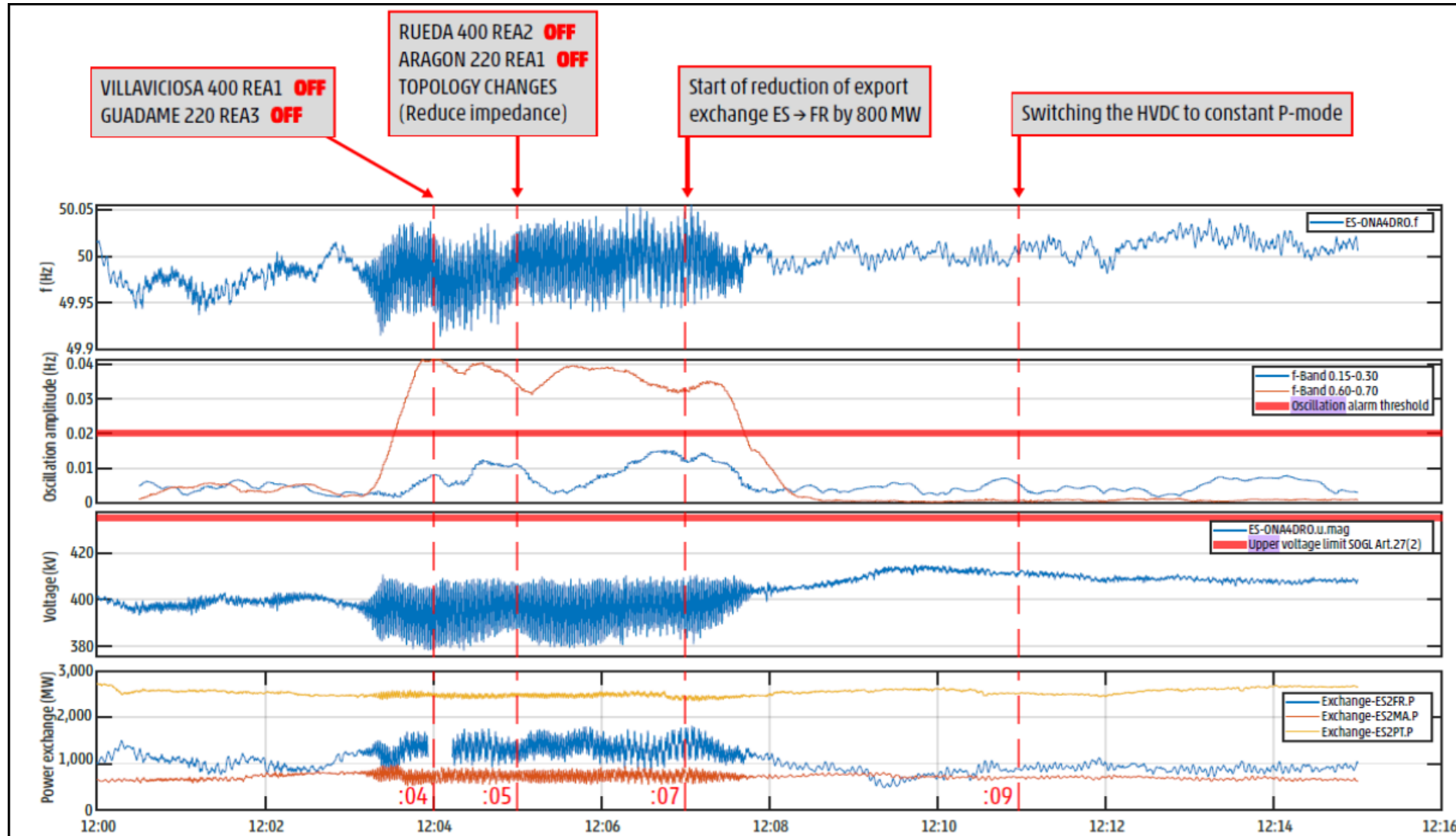


U čvoru Carmona 400 kV oscilacije napona unutar 2 minute ~10 kV

Oscilacije radne i jalove snage



Mjere prigušenja oscilacija



Posljedice mjera prigušenja oscilacija

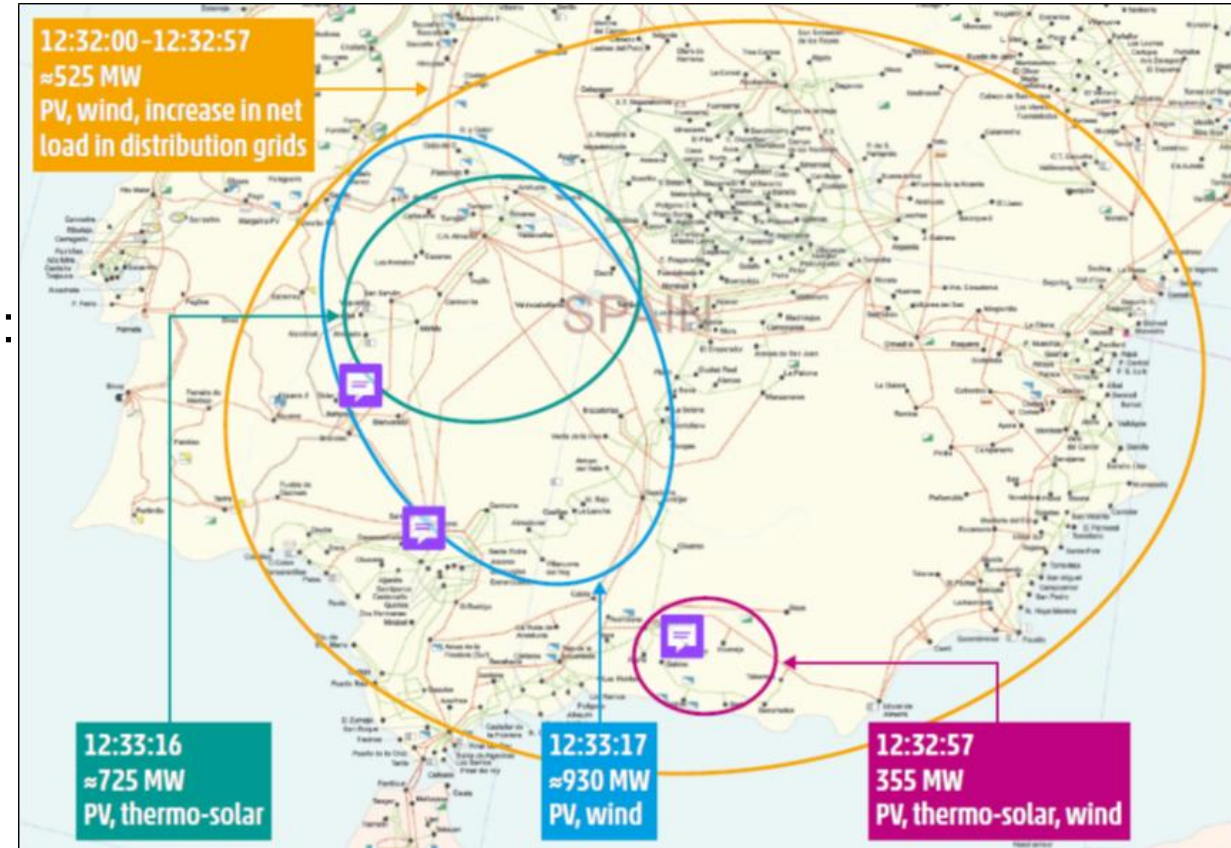
Mjere izazivaju **povišenje napona**:

Smanjenje razmjene Španjolska -> Francuska

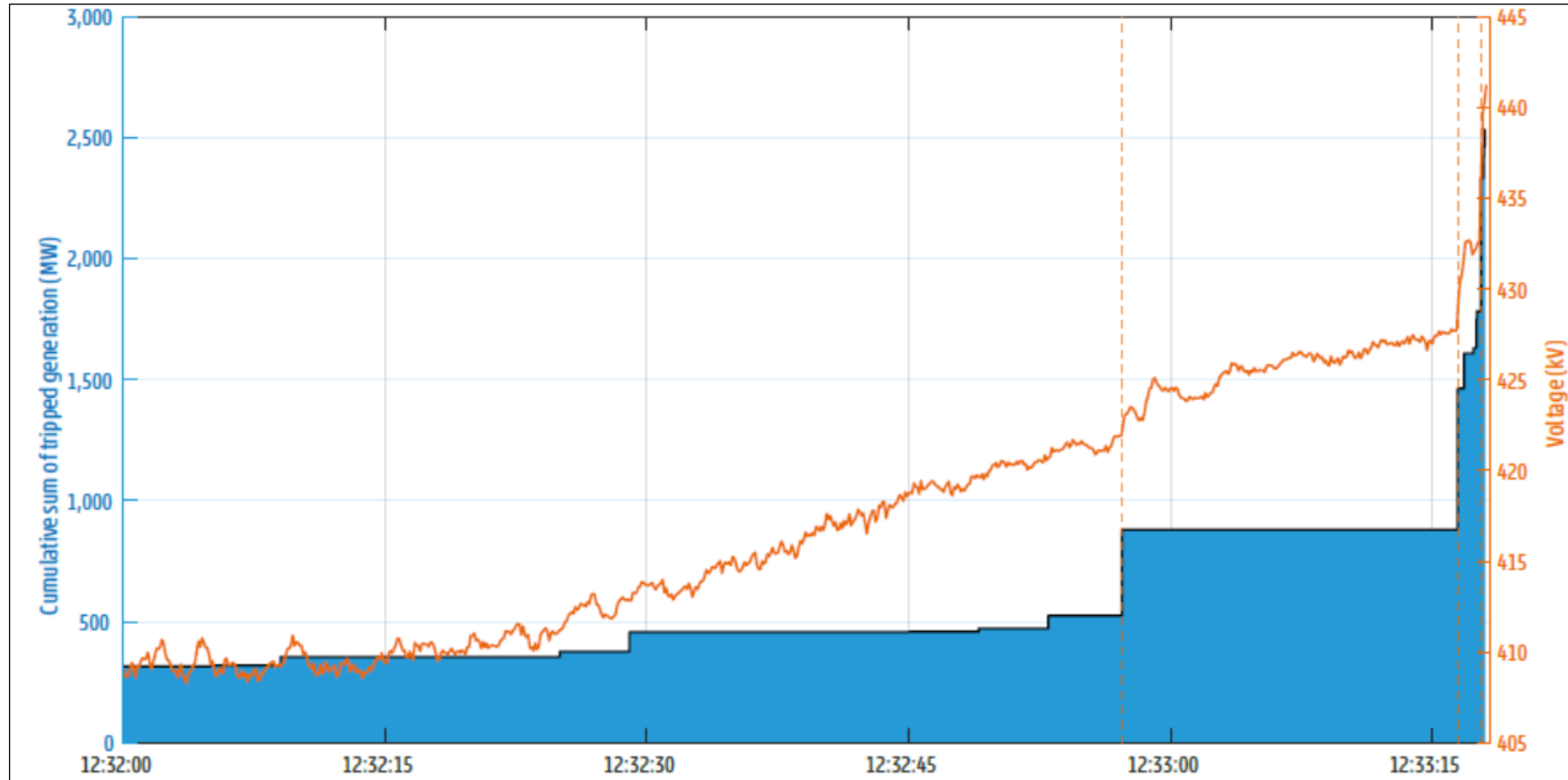
Uključenje dalekovoda koji su bili isključeni kao korektivna protumjera snižavanja napona

12:32 h **nema oscilacija** i naponi manji od 420 kV, ali:

1. **Povećanje opterećenja mreže**
2. **Ispad transformatora**
3. **Nepoznat uzrok**
4. **Ispad elektrana**



Početak raspada sustava



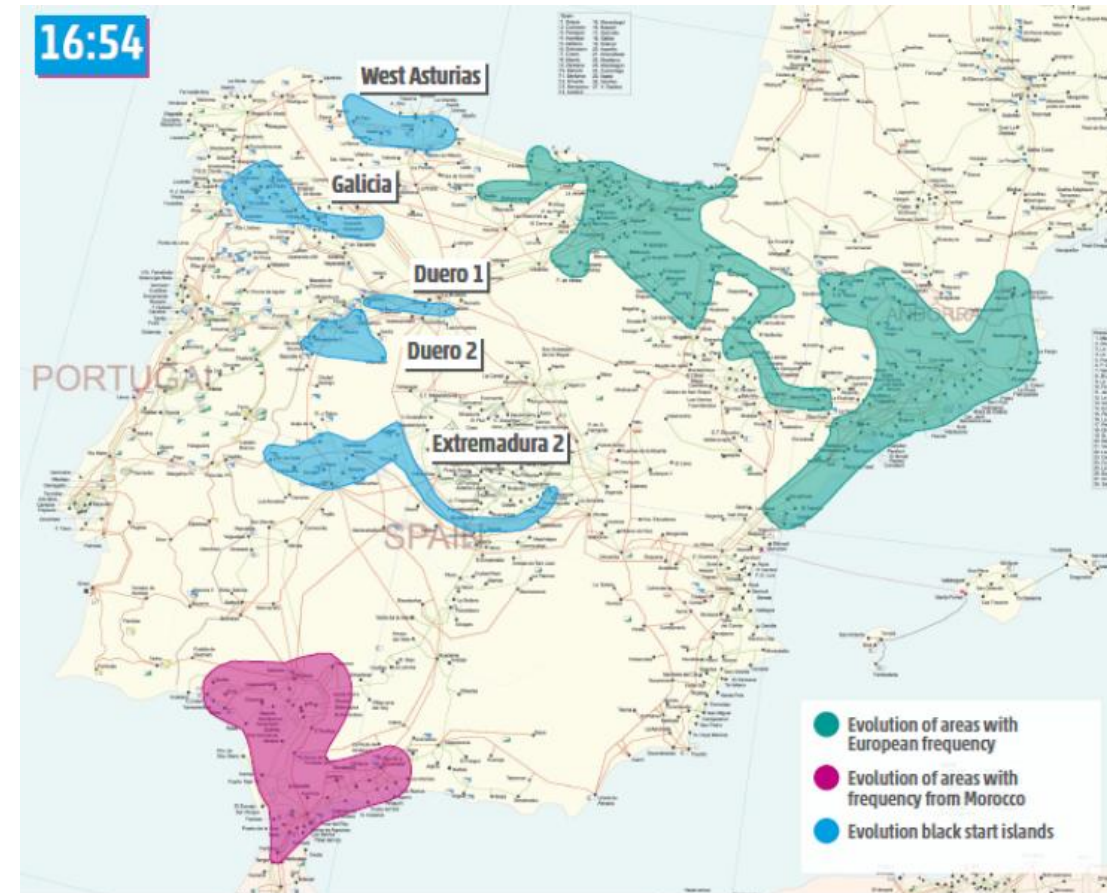
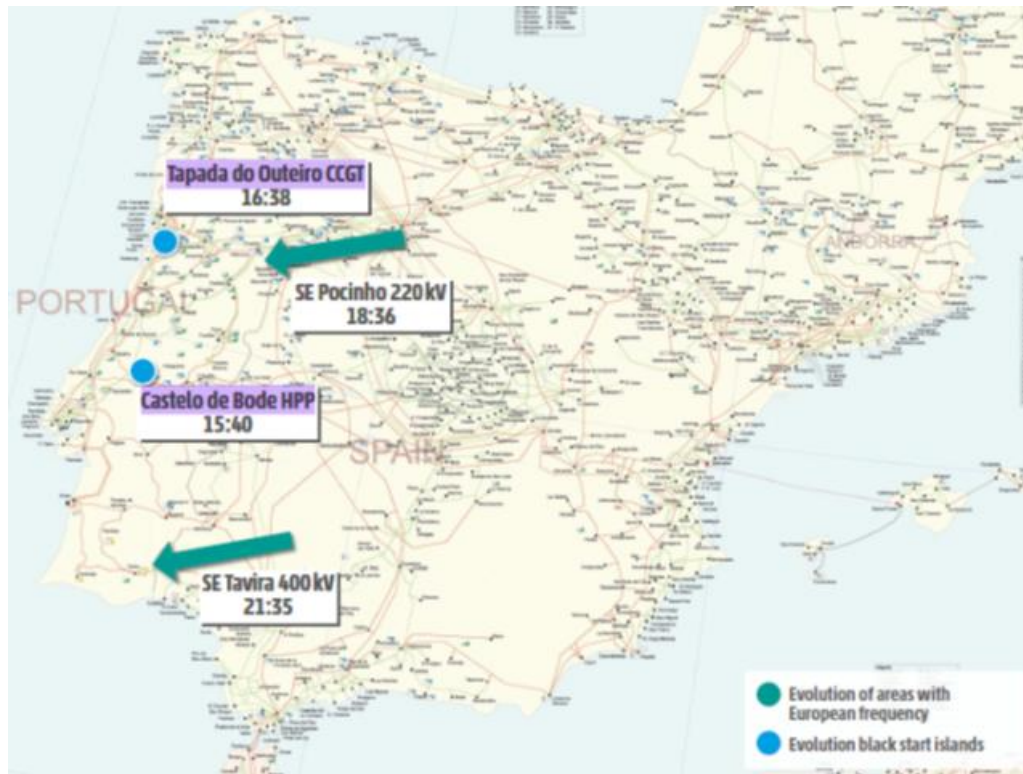
- Kumulativni **gubitak proizvodnje i rast napona** u TS Carmona
- Veliki manjak proizvodnje uzrokuje **gubitak sinkronizma** s ostatkom Europe

28.4.2025. 12:33 h



Ponovna uspostava pogona

- Metoda odozgo prema dolje – **iz tri pravca:**
- 7x2 HE (Španjolska)
- HE + TE (Portugal)



Što smo naučili ?



- EES je **najkompleksnija tvorevina u povijesti čovječanstva**
- U 130 godina u Europi je bilo nekoliko stotina raspada EES. **Ni jedan nije bio identičan prethodnom**
- Dosadašnje istrage vrlo **rijetko** javno i **jednoznačno utvrđuju krivca** (potencijalni odštetni zahtjevi)
- Najčešće **uzrok raspada nije samo jedan poremećaj**, nego niz ili kombinacija više uzroka

Što smo naučili ?



- **Uzrok ovog raspada su visoki naponi i kaskadni ispadi elektrana**
- Doprinijele su **međupodručne subsinkrone oscilacije**
- REE je te **oscilacije prigušio** manevrima u topologiji 400 kV i prebacivanjem HVDC veze s Francuskom na konstantnu snagu, **ali to je dodatno povišilo napone**
- Kod mnogih generatora **zaštita očito nije bila dobro podešena**, jer su ispali iz pogona iako je tada napon bio u rasponu propisanom Mrežnim pravilima
- Moguće je da te elektrane nisu bile **sposobne za prolazak kroz stanje kvara** i da su zato ispadali iz pogona, a ne (samo) zbog podešenja sustava zaštite

Što smo naučili ?



Je li **problem inercija sustava** s velikim udjelom OIE?

Inercija **nije uzrok ovog raspada, ali...**

Sustav u kojem su u pogonu samo sinkroni generatori:

$$H_{eq} = \frac{\sum_i^N H_{gen,i} S_{gen,i}}{\sum_i^N S_{gen,i}}$$

Sustav u kojem su dodani moduli elektroenergetskih parkova (preko invertera):

$$H_{eq} = \frac{\sum_i^N H_{gen,i} \times S_{gen,i} + \sum_j^N 0 \times S_{inverters,j}}{\sum_i^N S_{gen,i} + \sum_j^M S_{inverters,j}} = \frac{\sum_i^N H_{gen,i} \times S_{gen,i}}{\sum_i^N S_{gen,i} + \sum_j^M S_{inverters,j}}$$

$$RoCoF = \frac{\Delta P}{2 H_{sys} f_0 S_{sys}}$$

RoCoF= 1Hz/s

ENTSO-E 2010: ispad ~5 GW

ENTSO-E 2025: ispad ~3-5 GW

Što smo naučili ?



- Uredba Komisije (EU) 2017/1485 (SOGL) nalaže da ENTSO-E objavljuje **Incident Classification Scale** (ICS) Report
- ICS služi za **detaljnu analizu, klasifikaciju i preporuke** vezane za različite incidente u pogonu
- ICS je na snazi **tek zadnjih 6 godina...**
- Ovo je bio **prvi raspad uzrokovan visokim naponom**, a ne ispadom proizvodnje. To ga čini “učionicom” za cijelu Europu, a ključne lekcije su:

Lekcija 1

Planiranje i vođenje sustava više se ne smije fokusirati samo na kriterij sigurnosti N-1 i održavanje frekvencije.



Regulacija napona i kompenzacija jalove snage postaju važan aspekt operativnog planiranja i vođenja EES

Lekcija 2

Visoki udio OIE sam po sebi nije problem, međutim

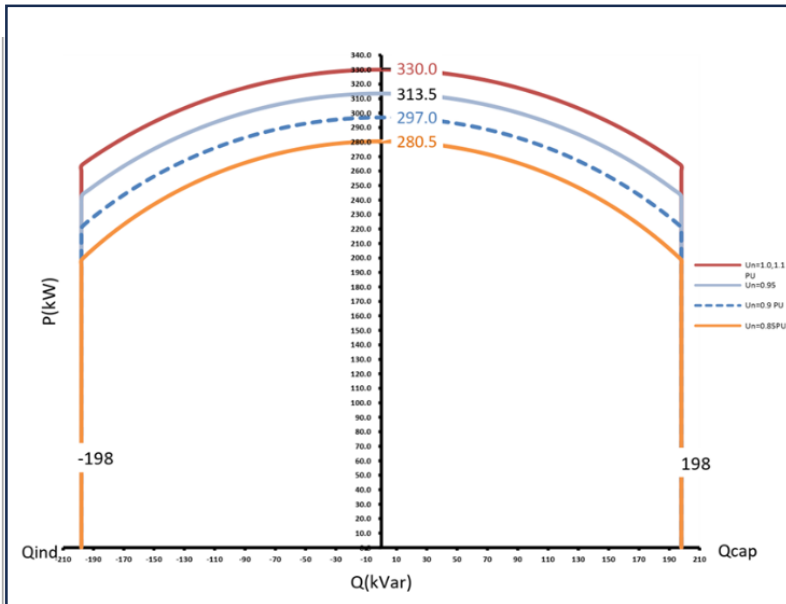


**mora biti nadopunjen dovoljnim brojem sinkronih
ili “grid-forming” resursa, te jasnim kriterijima
minimalne naponske podrške i podrške inerciji
sustava**

Lekcija 3

Formalna, “papirnata” usklađenost s Mrežnim pravilima nije dovoljna.

Operator sustava mora aktivno nadzirati, testirati i koristiti mogućnosti pružanja pomoćnih usluga (P/f, Q/U itd.)



Lekcija 4

Za poluotoke i periferne regije (poput Iberije, Balkana, Baltika) treba



planirati scenarij potpunog odvajanja i osigurati dovoljno lokalnih resursa za crni start, inerciju sustava i kontrolu naponskih prilika.

Lekcija 5



Treba gledati kritičnu infrastrukturu kao cjelinu (bolnice, telekom, vodovod, promet) i za njih planirati lokalne izvore (PV+baterije), jasne prioritete i procedure u slučaju totalnog raspada sustava

Lekcija 6

Pogon i vođenje EES s velikim udjelom i brojem OIE je znatno složeniji i zahtjevniji. Ipak,



poruka nije “manje OIE”, nego pametan dizajn EES i odgovarajuća regulacija novih uvjeta u mreži.

Bolje spriječiti nego liječiti

20.3.2025.

Heathrow Blackout

Prekid napajanja 18 h

~300k putnika i 1300+ letova

28.4.2025.

Iberian Blackout

Prekid napajanja 20 h

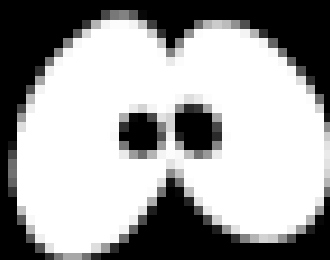
~60 mil. ljudi

2.-4.7.2025.

Sjever Italije

Ispad zbog preopterećenja DV

~2 mil. ljudi



8.1.2021.

Odvajanje EES u Europi

Centralna Europa razdvojena u dva područja

21.6.2024.

Balkan Blackout

Prekida napajanja 4 h u 4 države

~5 mil. ljudi

18.5.2025.

S.Makedonija Blackout

Prekida napajanja 1.5 h

~1 mil. ljudi

Hvala na pozornosti !



Dr.sc. Goran Majstrović
goran.majstrovic@eihp.hr