

Stabilita ES

Sít'ový simulátor

MODES

Ing. Karel Máslo, CSc.



odd. Analýz PS

Přednáška ZČU Plzeň

2.12.2016

Obsah přednášky: Dynamická stabilita

1. Definice spolehlivosti provozu ES

1. Adekvátnost
2. Bezpečnost provozu

2. Dynamická stabilita

1. Úhlová stabilita
2. Frekvenční stabilita
3. Napět'ová stabilita

3. Příklady systémových poruch

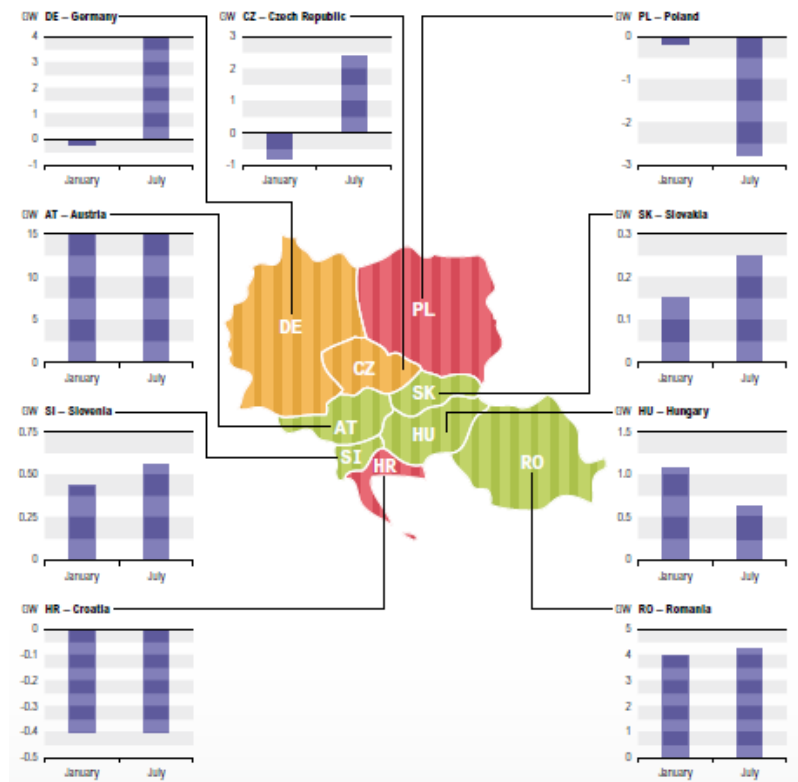
4. Obranný plán proti šíření poruch

5. Popis síťového simulátoru MODES

Spolehlivost provozu ES

- ❖ Adekvátnost – výkonová přiměřenost
 - ❖ Bezpečnost provozu
 - o kritérium N-1 (přetížení, napětí)
 - o **stabilita** (napěťová, úhlová..), zkratová odolnost ...
 - V Kodexu PS je definována stabilita provozu jako schopnost soustavy udržet rovnovážný stav během normálního provozu i po **přechodných dějích** způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením i poruchovými výpadky zařízení
- Kodex PS –část I. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy, dostupný na <http://www.ceps.cz>
- Společná pracovní skupina IEEE a CIGRE definovala stabilitu ES zhruba takto: jestliže dojde v soustavě k **rozruchu**, musí se soustava vrátit do rovnovážného stavu s veličinami v dovolených mezích a soustava jako celek zůstane nedotčena

Adekvátnost provozu



Zdroj: ENTSO-E Scenario Outlook
& Adequacy Forecast 2011 – 2025

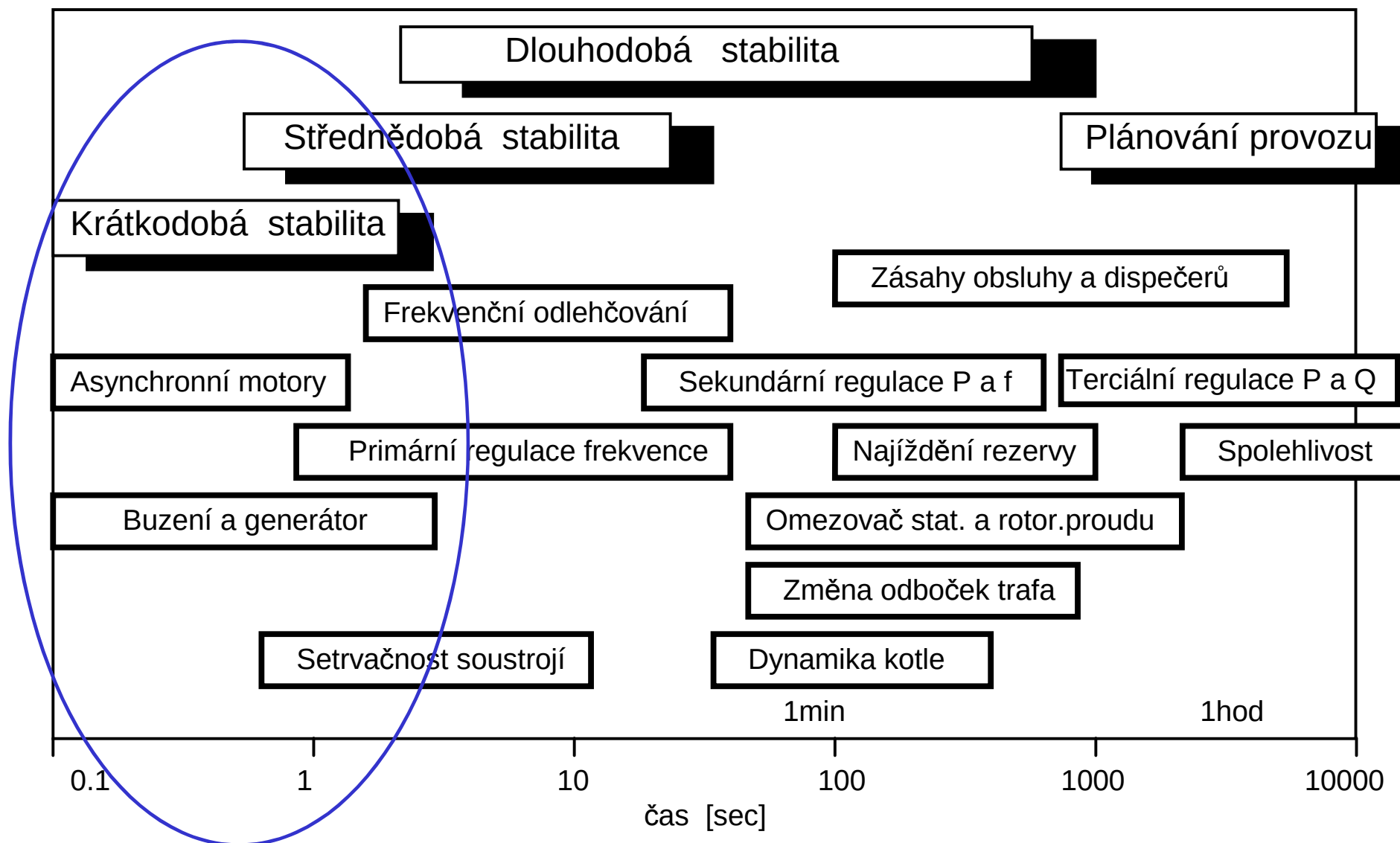


Zdroj: ENTSO-E
Winter outlook report 2016/201

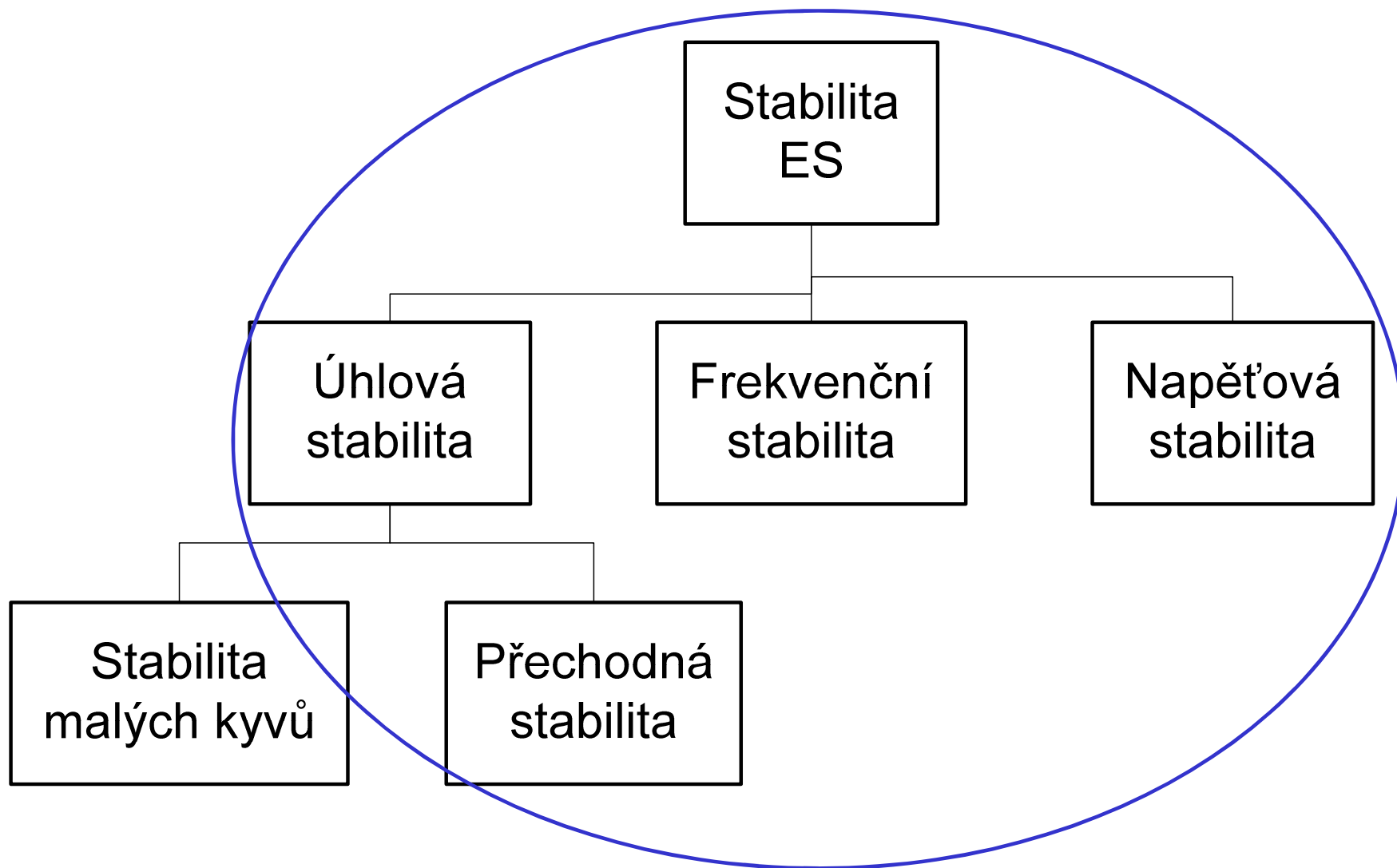
Rozruchy

- provozního charakteru - **změny odebíraného** nebo dodávaného výkonu, plánované změny topologie sítě (např. vypínáním nebo zapínáním vedení),
- poruchy zařízení působených skrytými vadami nebo zrychleným stárnutím (**výpadky el. bloků a vedení**)
- poruchy způsobených klimatickými vlivy jako údery blesku, silným větrem, vysokou teplotou (**zkraty**)
- vlivy fungování trhu s elektřinou
- poruchy způsobené lidskou neúmyslnou chybou
- sociální vlivy –např. stávky v elektrárnách
- geomagnetické bouře
- teroristická a kybernetické útoky.

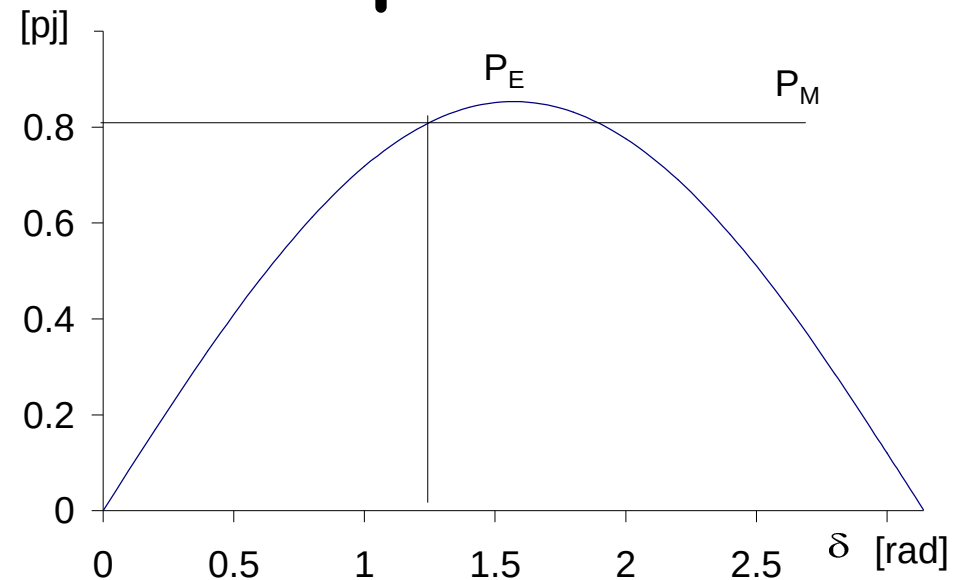
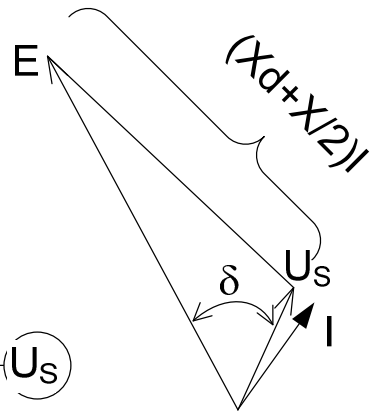
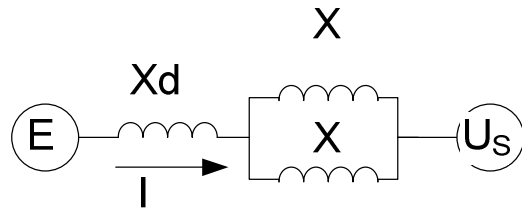
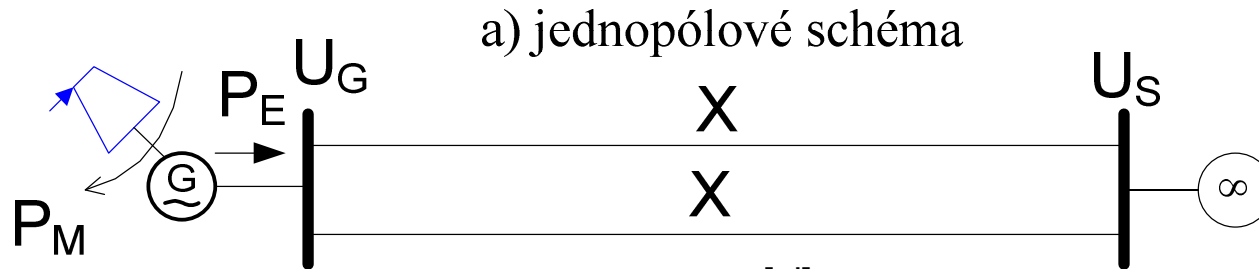
Časový rozsah přechodných dějů v ES



Stabilita ES



Úhlová stabilita



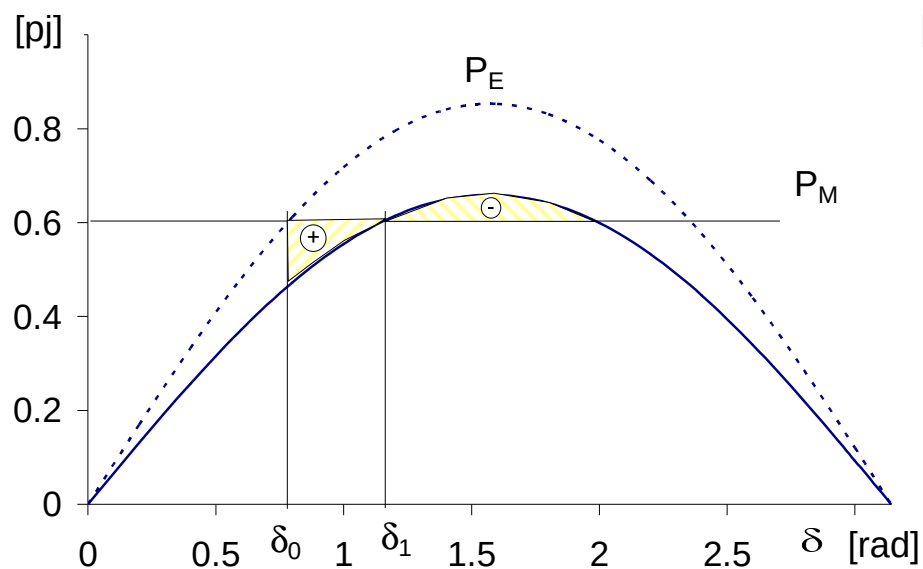
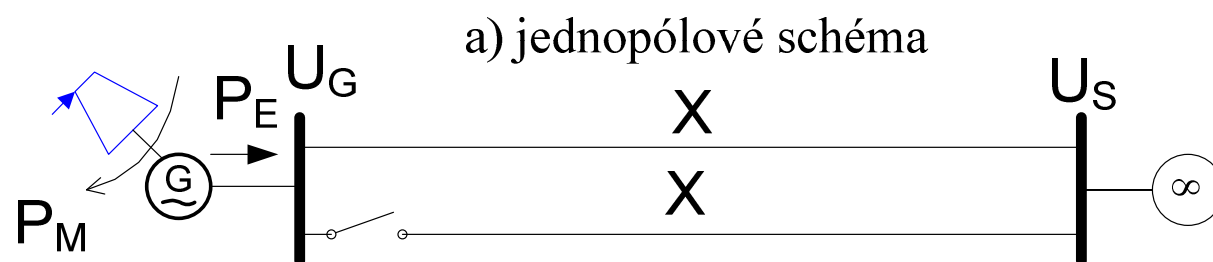
b) náhradní schéma

c) vektorový diagram

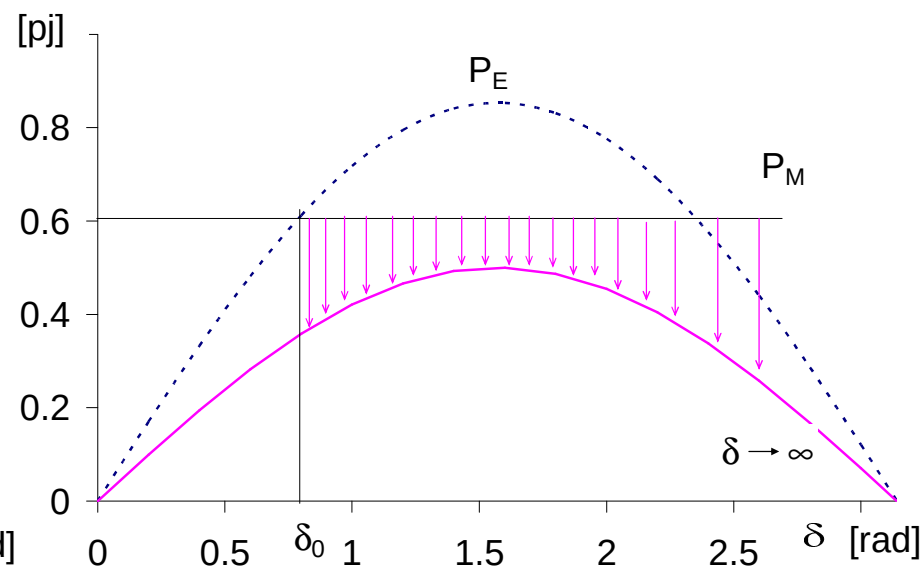
d) výkonová charakteristika

$$P_E = \frac{E \cdot U_S}{X_\Sigma} \sin(\delta)$$

Úhlová stabilita – oslabení sítě

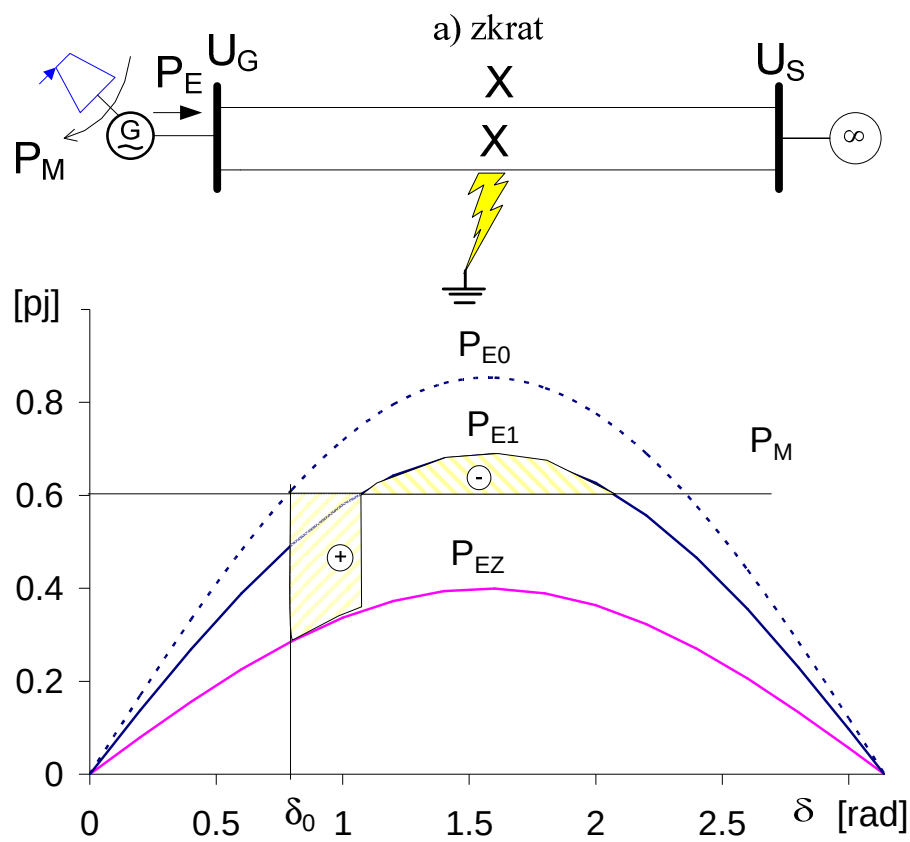


b) stabilní přechod

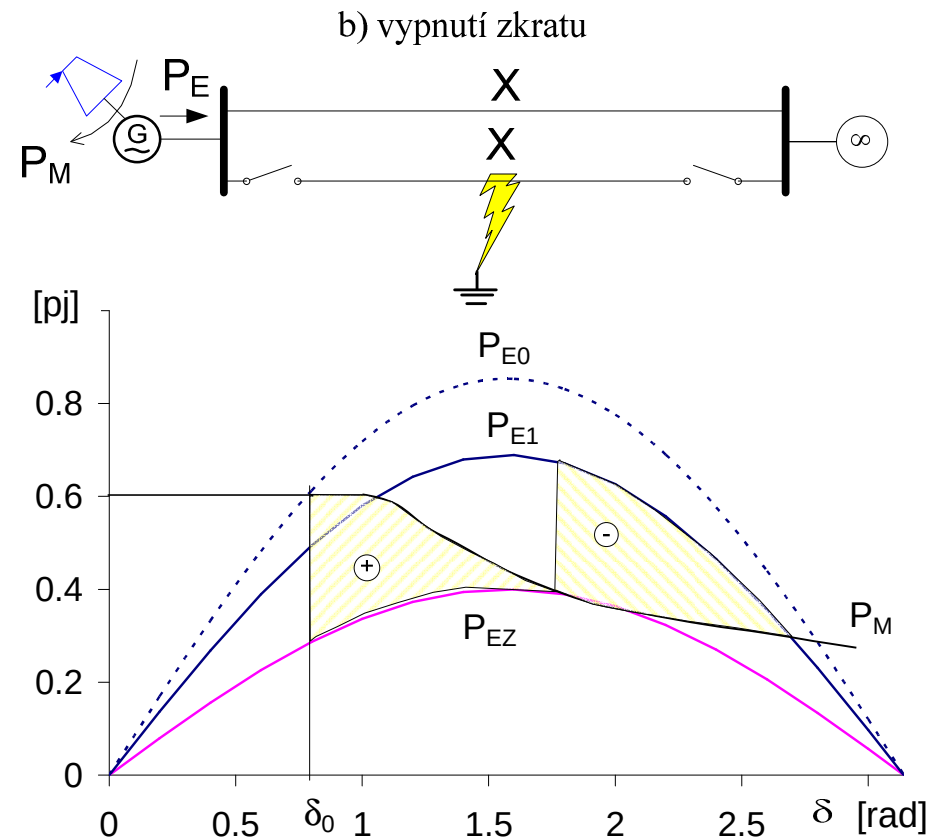


c) nestabilní přechod

Úhlová stabilita - zkrat

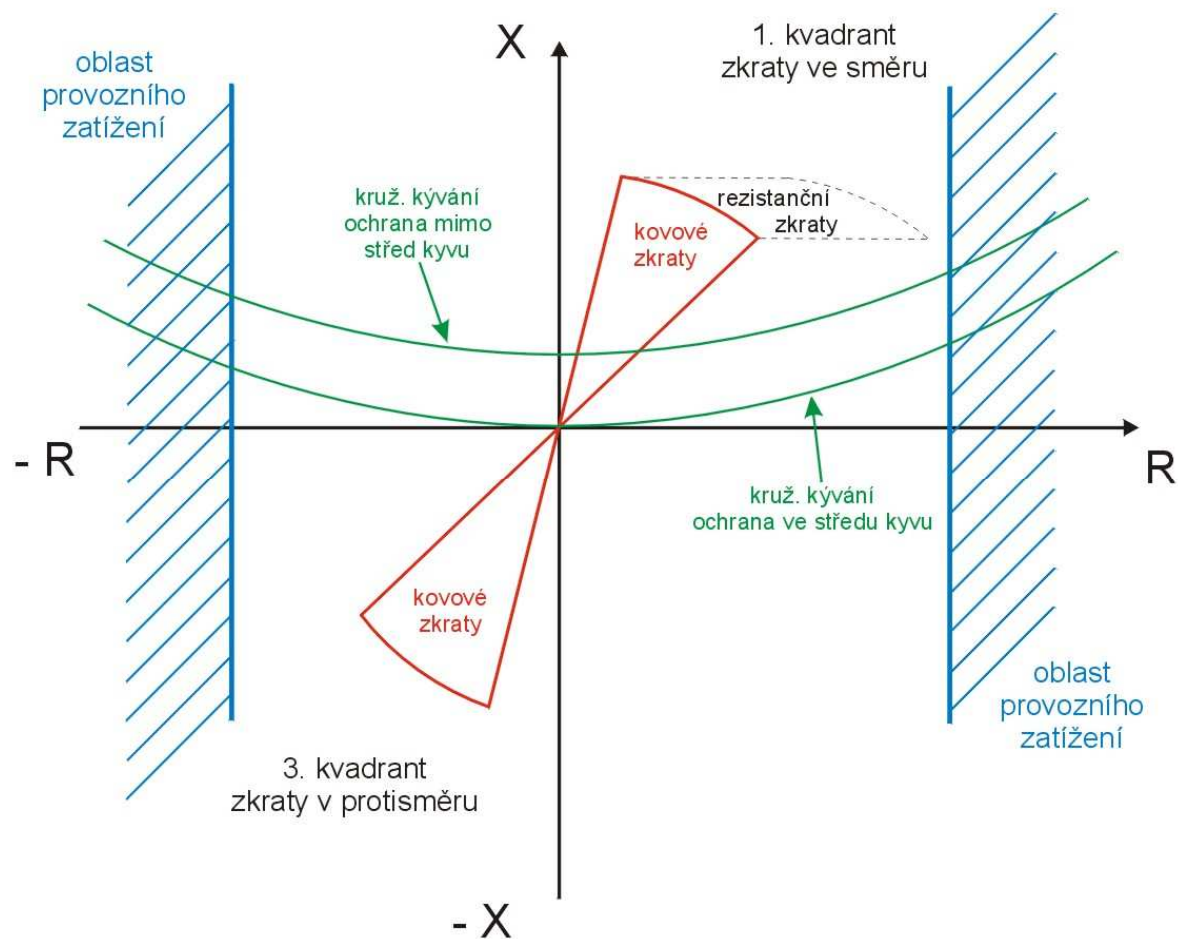
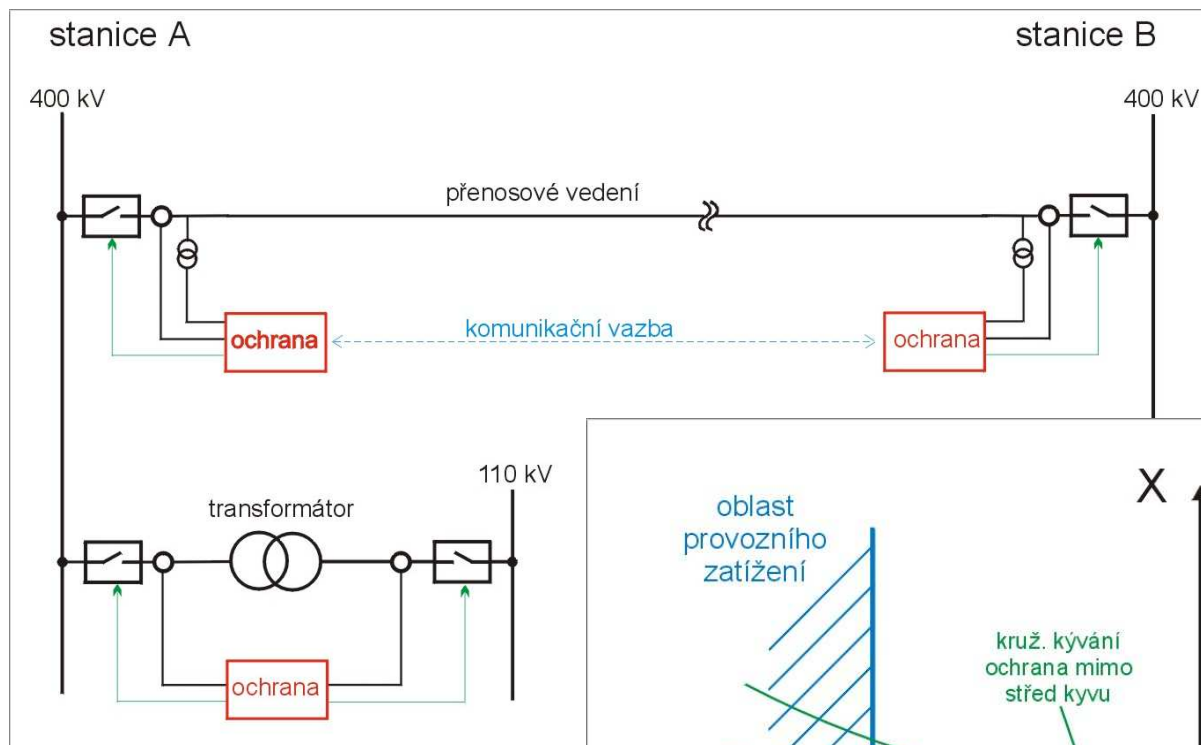


c) stabilní přechod

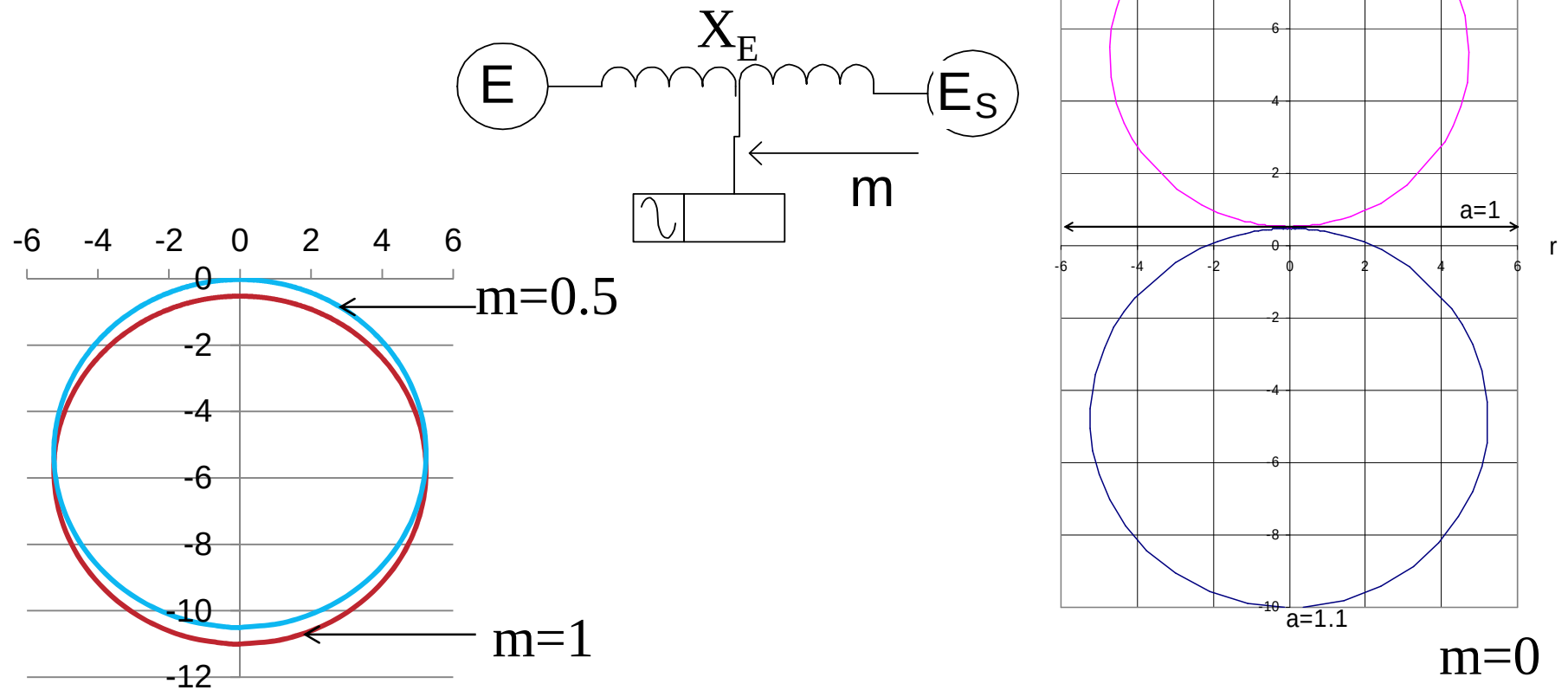


d) stabilní přechod s rychlým řízením ventilů

Distanční ochrana

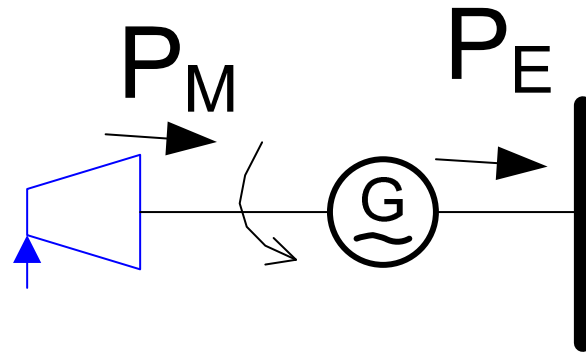


Střed kývání



$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = X_E \left\{ \left[\frac{j}{1 - a * e^{j\delta}} \right] - jm \right\}; a = \frac{E}{E_s}$$

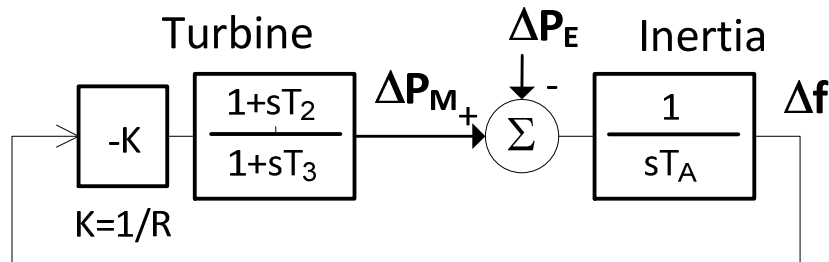
Frekvenční stabilita



$$J \cdot \frac{dn}{dt} = M_{\text{mech}} - M_{\text{el}}$$

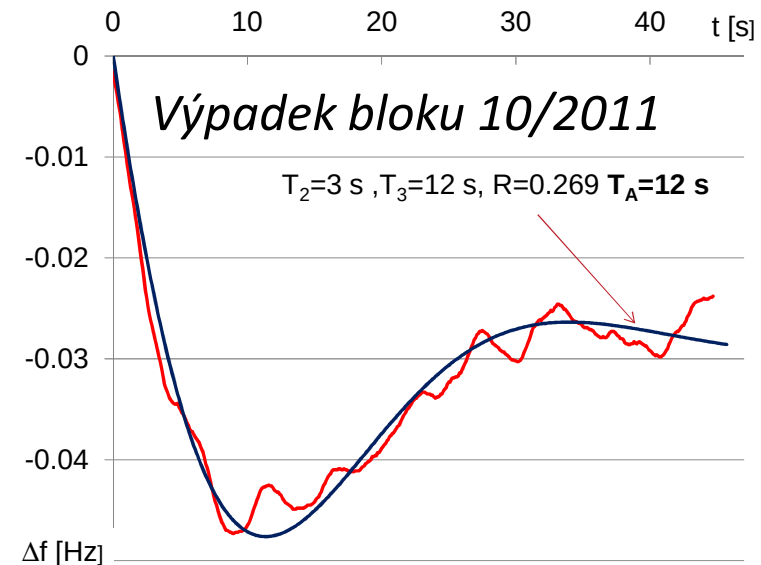
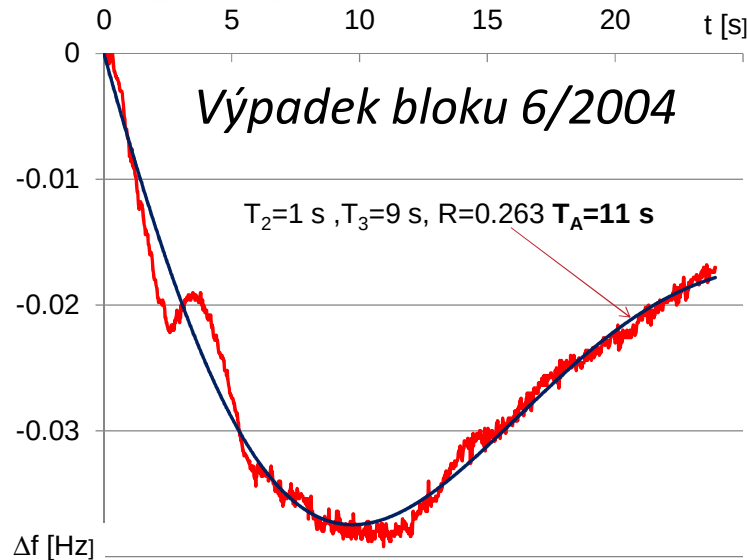
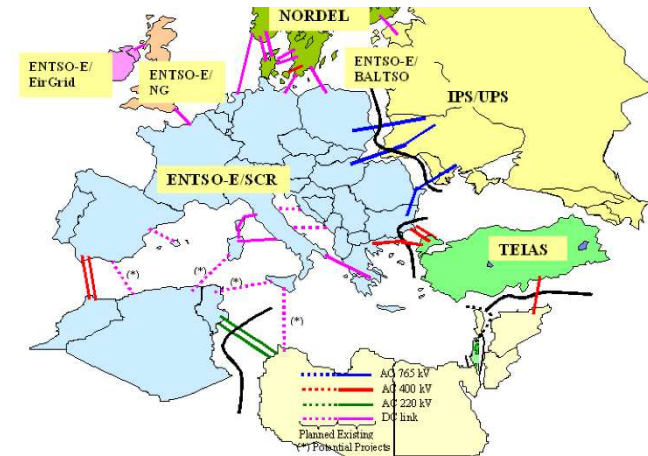
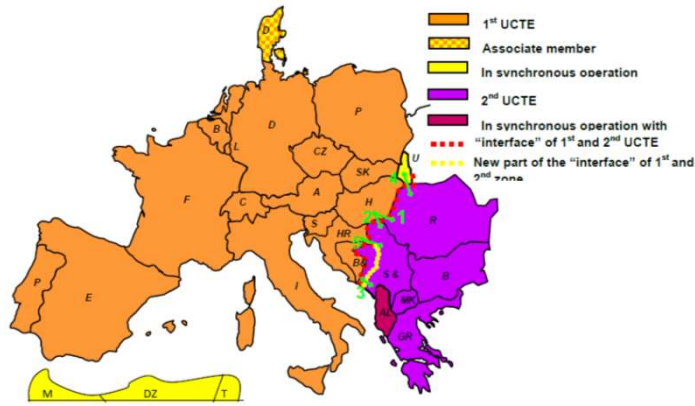
$$T_M \cdot \frac{df}{dt} = \Sigma(P_M - P_E)$$

Průběh frekvence po vzniku deficitu výkonu

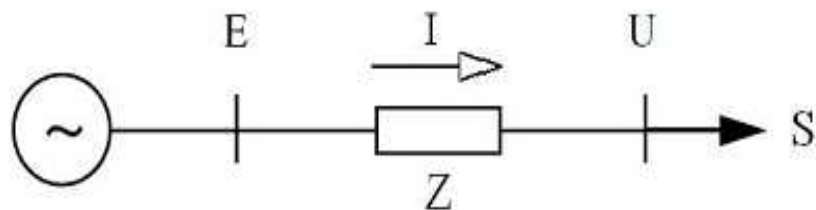


$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K} \left[1 - e^{-\lambda t} \left(\cos \omega t + \frac{A - \lambda}{\omega} \sin \omega t \right) \right]$$

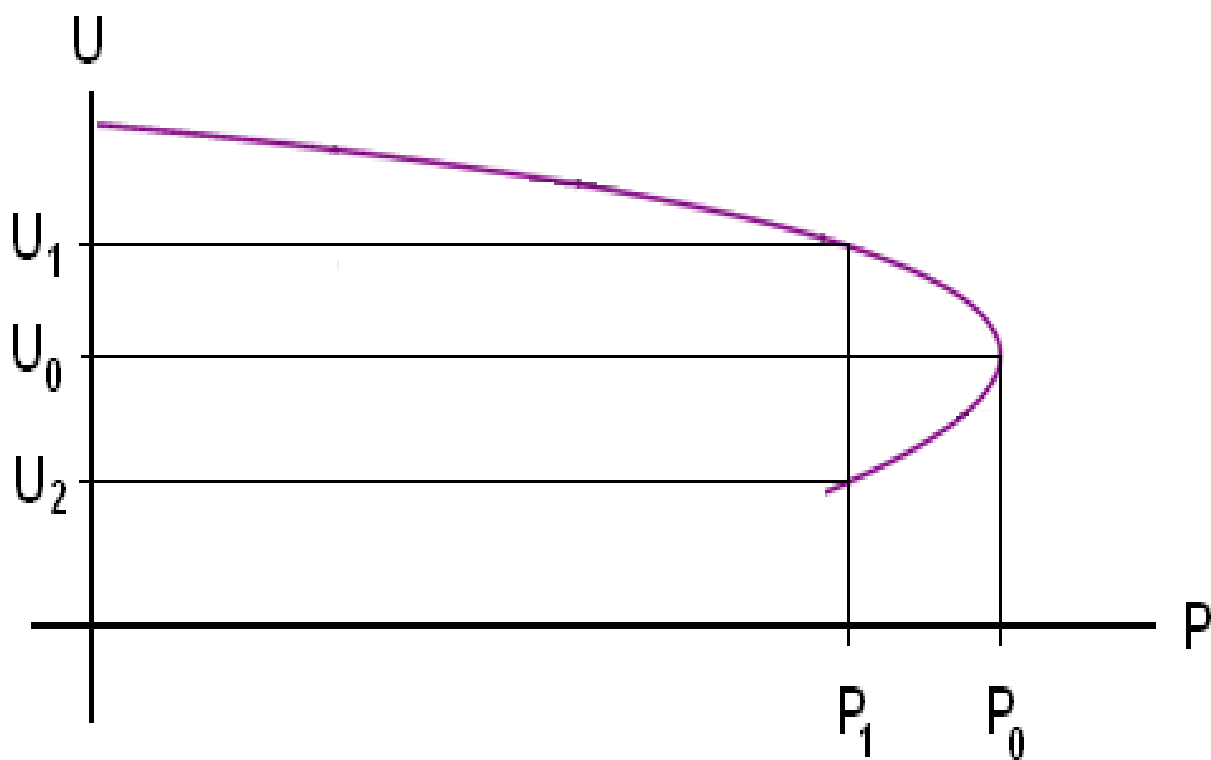
$$\lambda = \frac{(1 + KT_2/T_A)}{2T_3} \quad \omega = \frac{\sqrt{4KT_3/T_A - (1 + KT_2/T_A)^2}}{2T_3} \quad (1 + KT_2/T_A)^2 < 4KT_3/T_A$$



Napět'ová stabilita - zjednodušený pohled



$$\hat{E} - \hat{U} = \sqrt{3} \hat{Z} \hat{I}$$



C
E
E

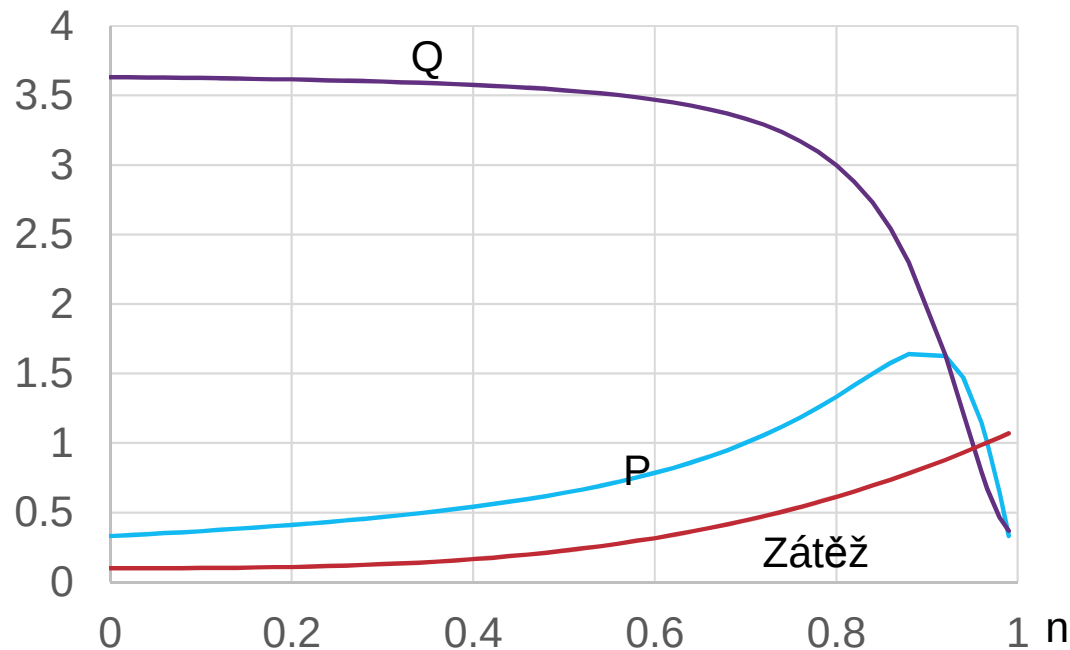


Napět'ová stabilita – reálné faktory

- zatížení asynchronní motory –lavina napětí,
- činnost hladinových regulátorů napětí (HRT)
- činnost podpět'ových ochran (na vlastní spotřebě)
- činnost omezovačů rotorového proudu v regulátorech buzení

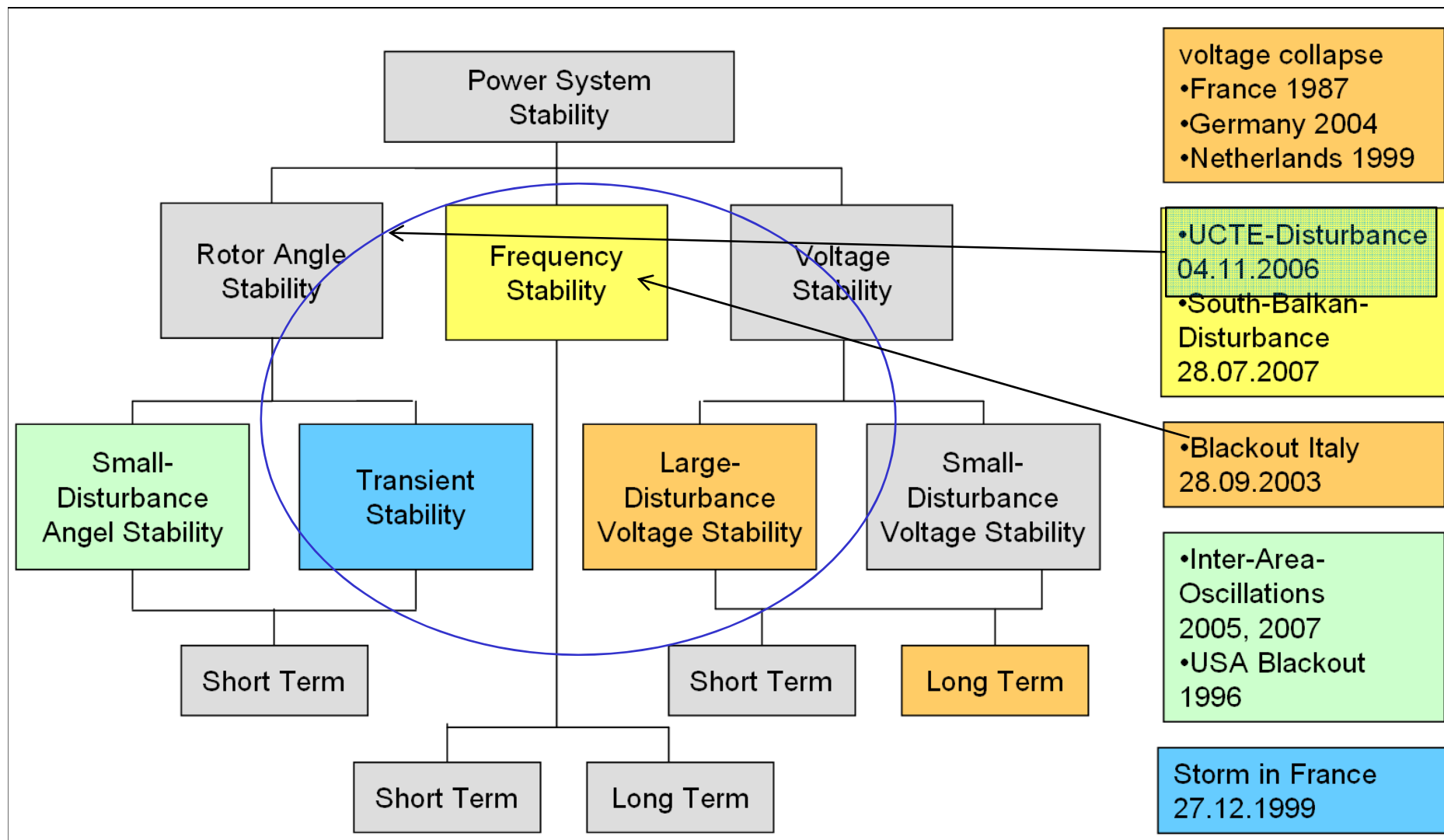
•

Charakteristiky asynchronního pohonu



Stabilita ES

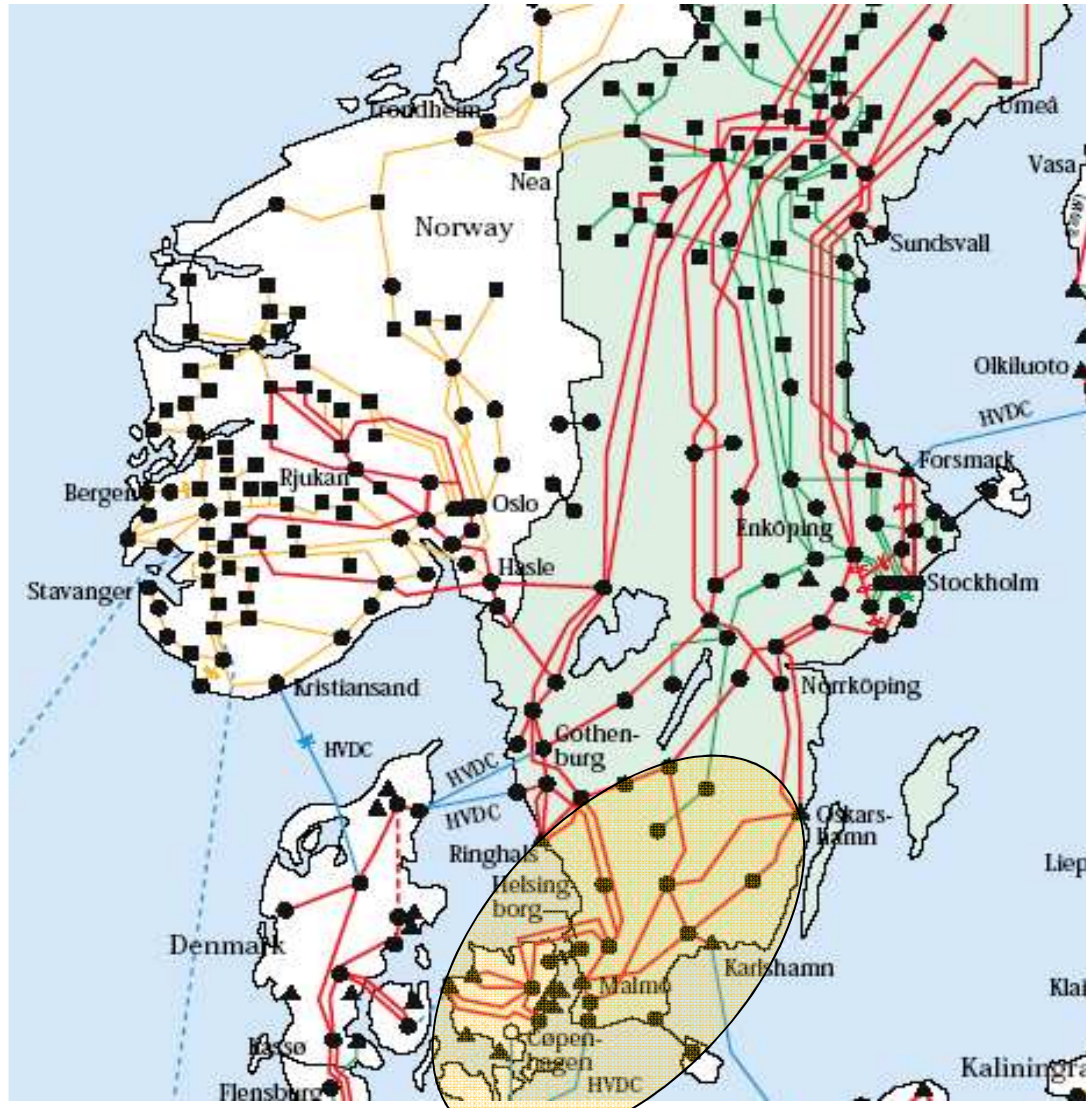
příklady reálných poruch



Zdroj: *ENTSO-E Technical background and recommendations for defence plans in the Continental Europe,*

Blackout již. Švédsko a vých. Dánsko

23.9. 2003



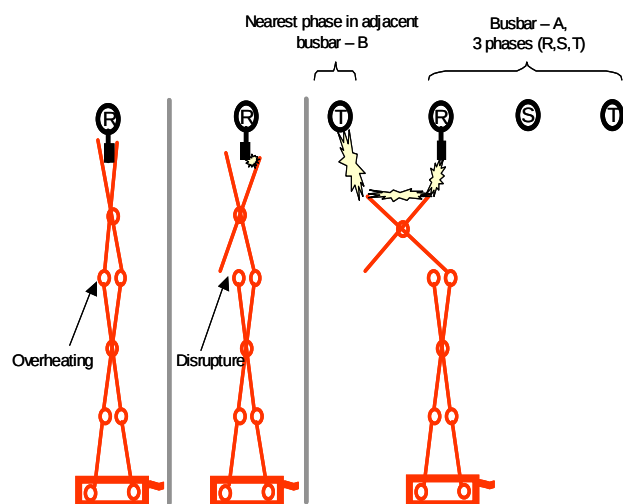
Zatížení Švédska bylo kolem 15 000 MW. První a druhý blok JE Barsebäck byl odstaven), takže spotřeba jižního Švédska byla hrazena jen místními malými zdroji a dovozem 1883 MW ze severu Švédska a 406 MW z ostrova Zeeland. Dvě vedení 400 kV byla v oblasti odstavena pro údržbu a rovněž stejnosměrné spojky do Polska a Německa byly mimo provoz.

-12:30 blok č. 3 JE Oskarshamn snižuje výkon z 1175 MW na 800 MW vlivem problémů s ventily v obvodech napájecí vody. Problémy se nepodařilo odstranit a reaktor byl odstaven, což znamenalo výpadek téměř 1200 MW. Výpadek byl zvládnut činností automatické regulace frekvence na vodních elektrárnách propojené soustavy NORDEL. Rovněž napětí nevybočilo z dovolených mezí.

-12:35 dvoufázový přípojniový zkrat v rozvodně Horred na západním pobřeží.

Zdroj: The black-out in southern Sweden and eastern Denmark, 23 September, 2003

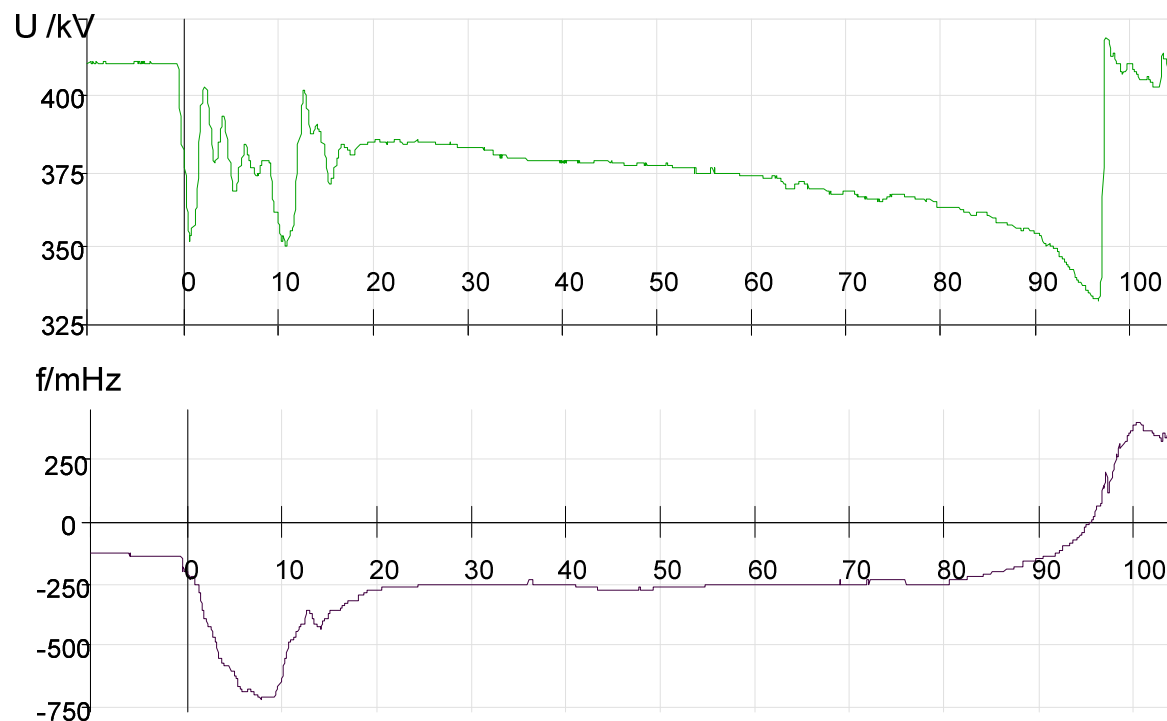
Iniciační porucha – důsledky



Přípojnicový zkrat způsobila porucha odpojovače a rozdílová ochrana přípojníc vypnula všechna vedení připojená na postižené sekce včetně dvou bloků 900 MW JE Ringhals. To způsobilo kyvy výkonu a pokles frekvence na 49 Hz, takže začalo působit podfrekvenční odlehčování zátěže. Sít' byla přetížena a z nedostatku jalového výkonu klesalo napětí.

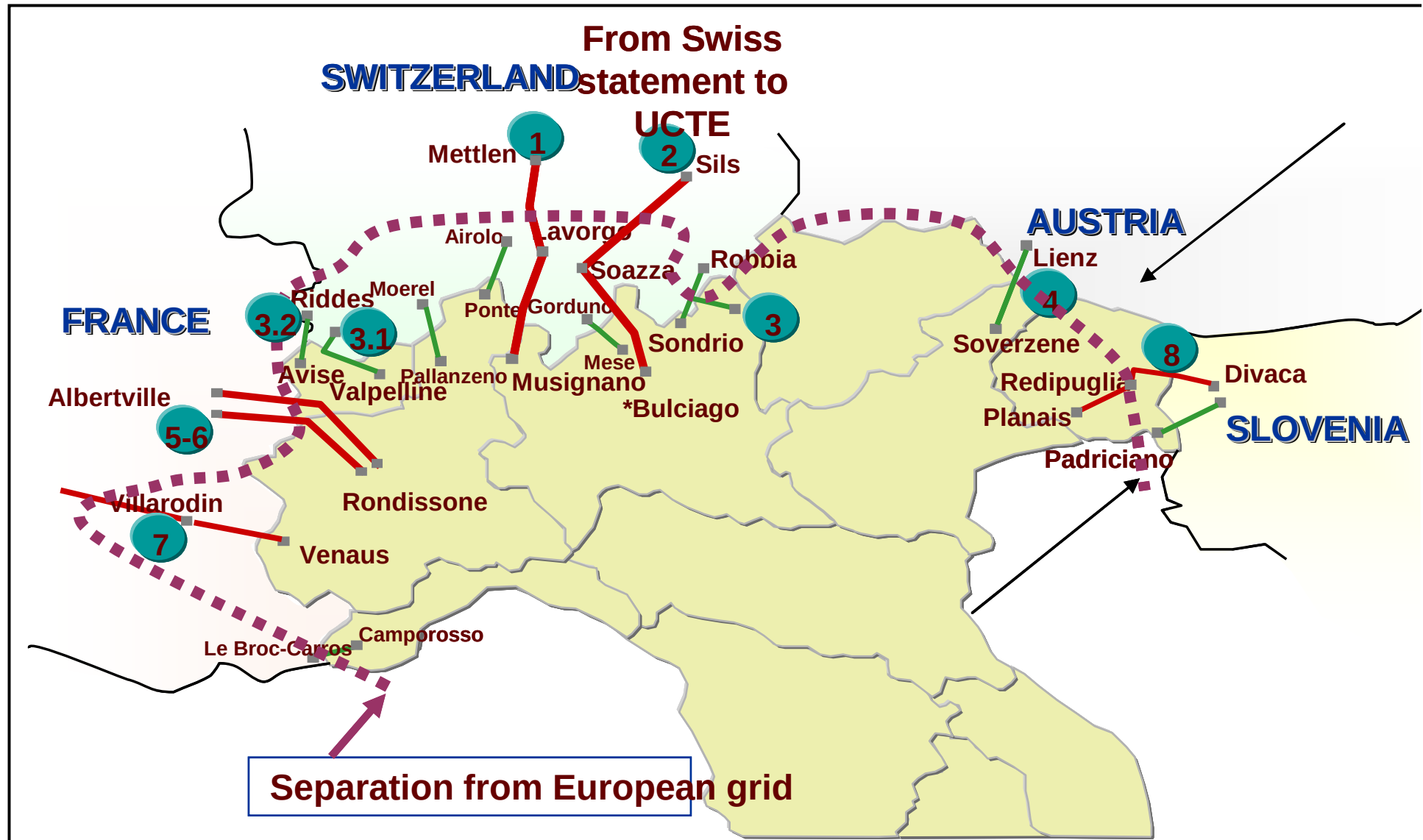
12:36:30 systém se stabilizoval a kyvy výkonu zanikly. Nicméně zatížení oblasti se začalo zvyšovat vlivem přepínání odboček na distribučních transformátorech, které se snažily zvýšit napětí v distribuční soustavě. To ovšem způsobilo pokles napětí 400 kV a napěťový kolaps celé jihozápadní části Švédska včetně hlavního města Stockholmu.

Vlivem poklesu napětí zapůsobily distanční ochrany v postižené oblasti a vypnuly přenosová vedení. Tím došlo k vytvoření samostatného ostrova jižního Švédska a východního Dánska. Tento ostrov byl deficitní (s nedostatkem činného i jalového výkonu) a frekvence i napětí klesaly, až dosáhly mezí pro vypínání zdrojů a v ostrově došlo k blackoutu



Blackout Itálie

28.9. 2003

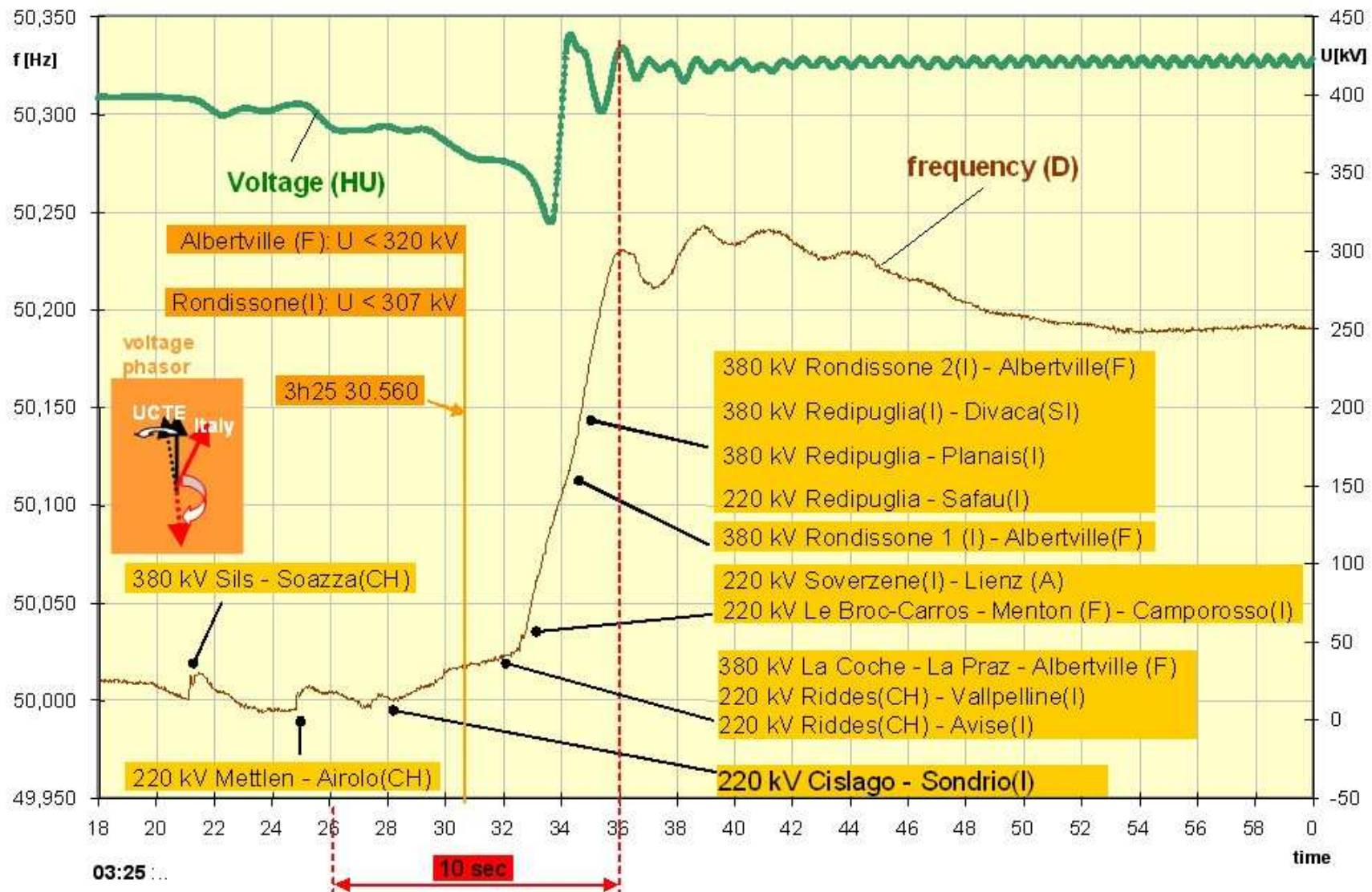


Blackout Itálie

f, U – Uchtelfangen (D) / Heviz (HU)

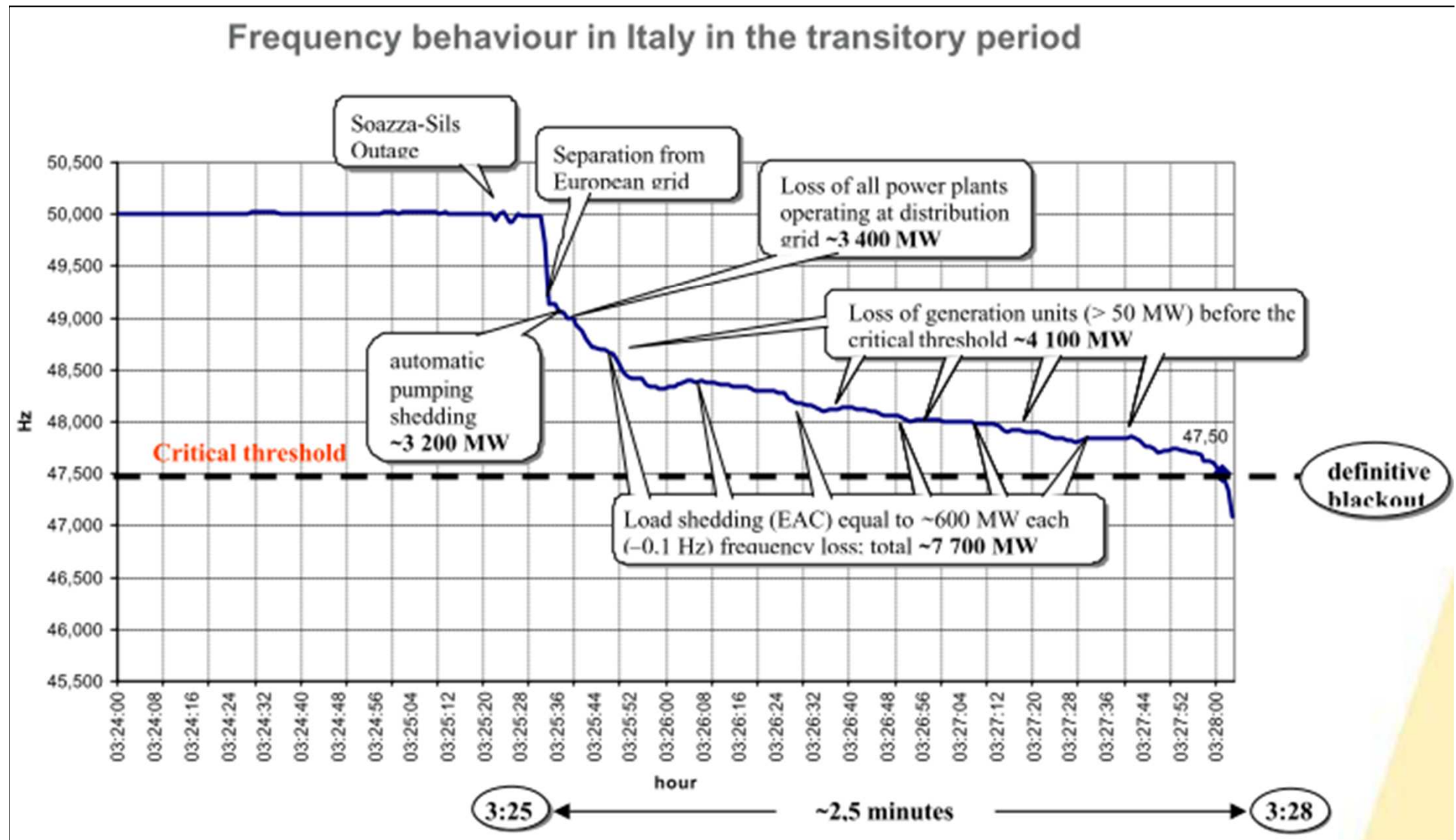
28.09.2003; 03:25 (UTC)

Indication of line trippings



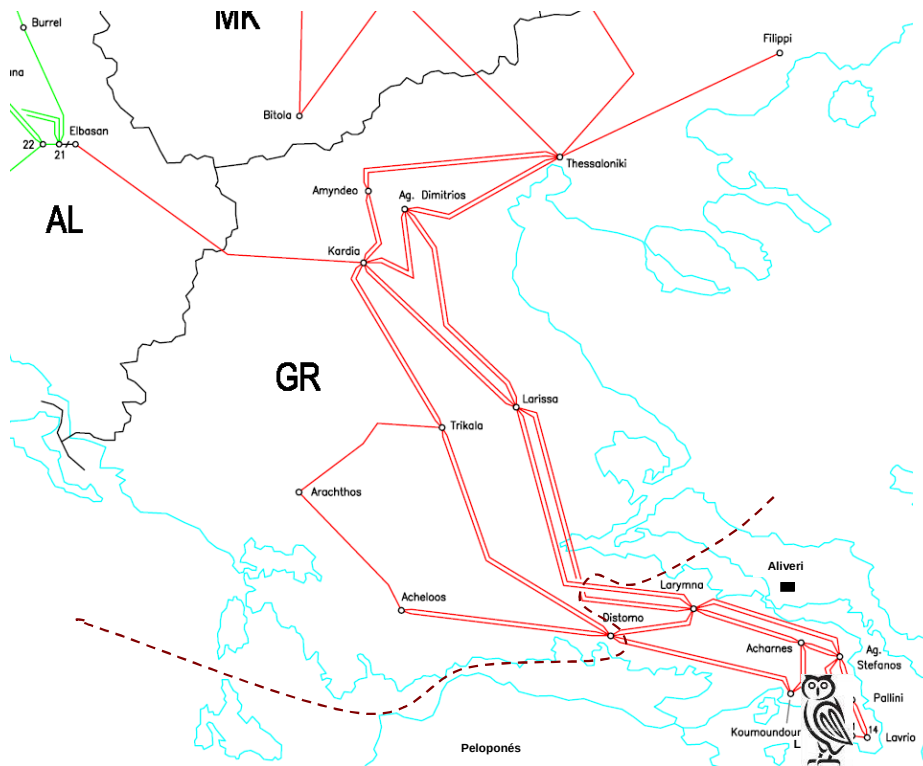
Blackout Itálie

frekvenční kolaps



Blackout jižního Řecka

(poloostrov Pelopones+Attika vč. Atén) 12.7.2004

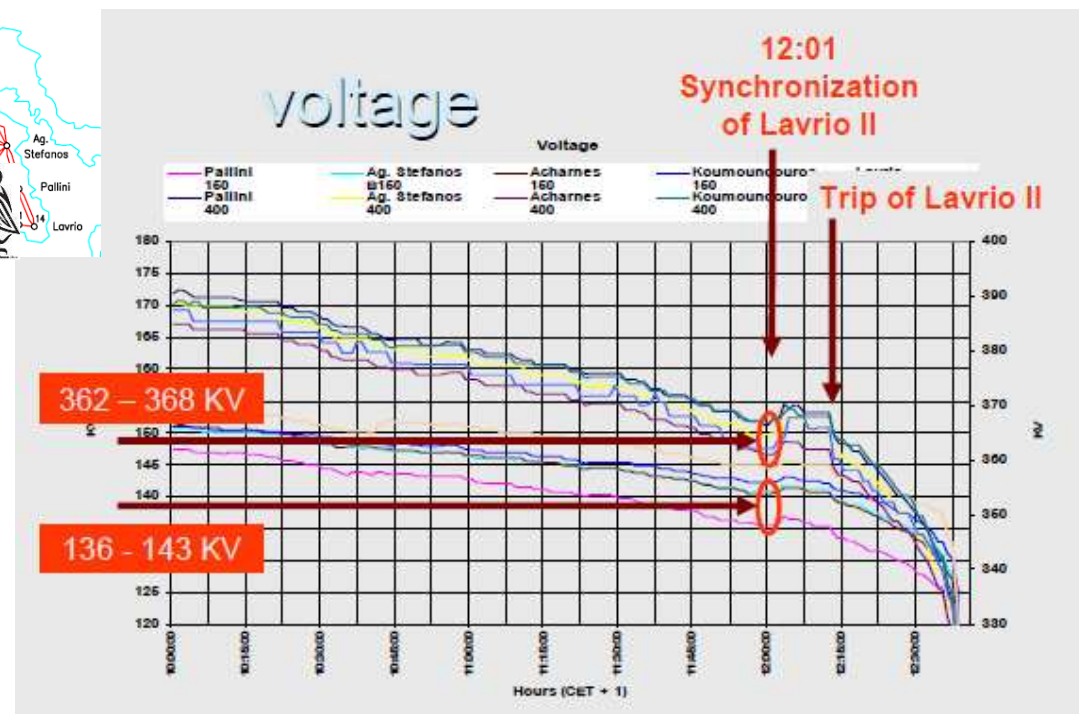


Během zatěžování bloku Lavrio na technické minimum došlo k dalšímu výpadku způsobeném vysokou hladinou vody v bubnovém kotli. Po výpadku chyběl jalový výkon pro udržení napětí. Ve snaze umožnit dodávku jalového výkonu snižovaly elektrárny v postižené oblasti činný výkon. Tím ovšem narůstal import činného výkonu z 2000 na 2400 MW a pokles napětí se ještě zvýšil.

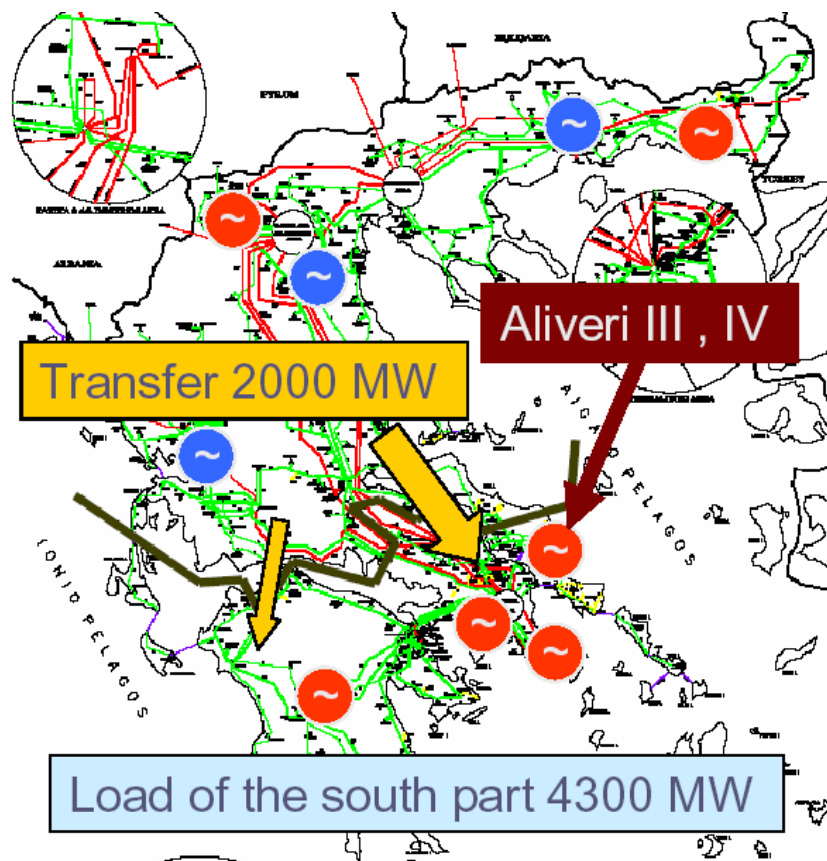
V ten den byly odstaveny pro poruchy a opravy 4 vedení 150 kV (nebyla opravena včas pro nedostatek personálu). To způsobilo velké zatížení tří autotransfómátů a pokles napětí v oblasti Atén.

V 7:08 vypadl blok 300 MW v elektrárně Lavrio v oblasti Atén pro poruchu ve vlastní spotřebě. Porucha byla opravena, ale problémy s najížděním bloku způsobily, že blok byl synchronizován a připojen v síti až v 12:01.

Do té doby narůstalo zatížení sítě a napětí klesalo až na 90 % jmenovité hodnoty. Kolem poledne činil tranzit ze severu na jih 2000 MW



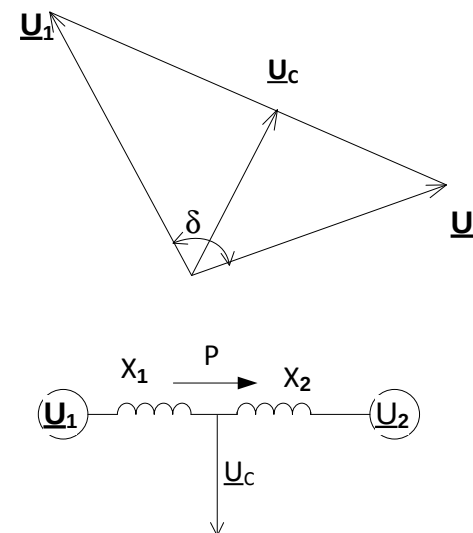
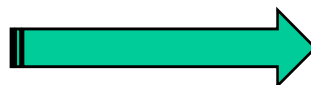
Průběh poruch – důsledky



-12:25 dispečink provozovatele přenosové soustavy požadoval odlehčení zatížení o 100 MW. V 12:30 bylo vypnuto ručně 80 MW. To však nestačilo k zastavení poklesu napětí a v 12:35 byl požadavek zvýšen o dalších 200 MW. Zatížení soustavy však naopak rostlo a odlehčení se nestačilo provést, protože komunikace mezi provozovatelem přenosové soustavy a provozovateli distribuční soustavy pomocí telefonu a ruční vypínání zatížení bylo pomalé na to, aby stačilo zastavit napěťový kolaps.

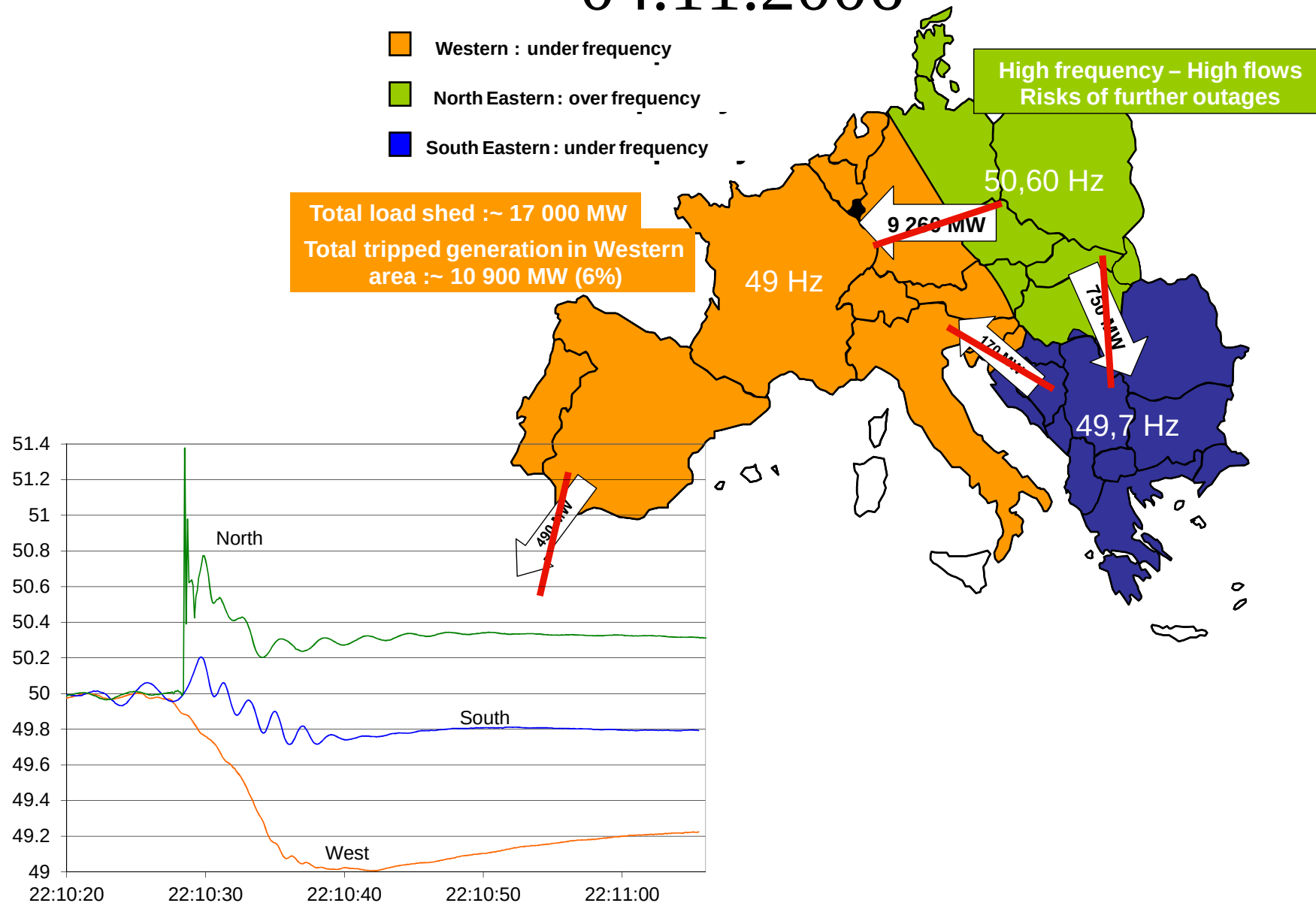
-12:37 vypadl působením ochrany z nezjištěných příčin blok č. 3 v elektrárně Aliveri ve středním Řecku. Další blok č. 4 byl v 12:38 vypnut ručně. Během napěťového kolapsu byla soustava rozdělena ochranami vedení 400 kV mezi severem a jihem, tím se jižní část dostala do ostrovního provozu. Generátory ve vzniklém ostrově byly vypnuty a došlo k blackoutu

Napěťový kolaps +
Ztráta uhlové stability

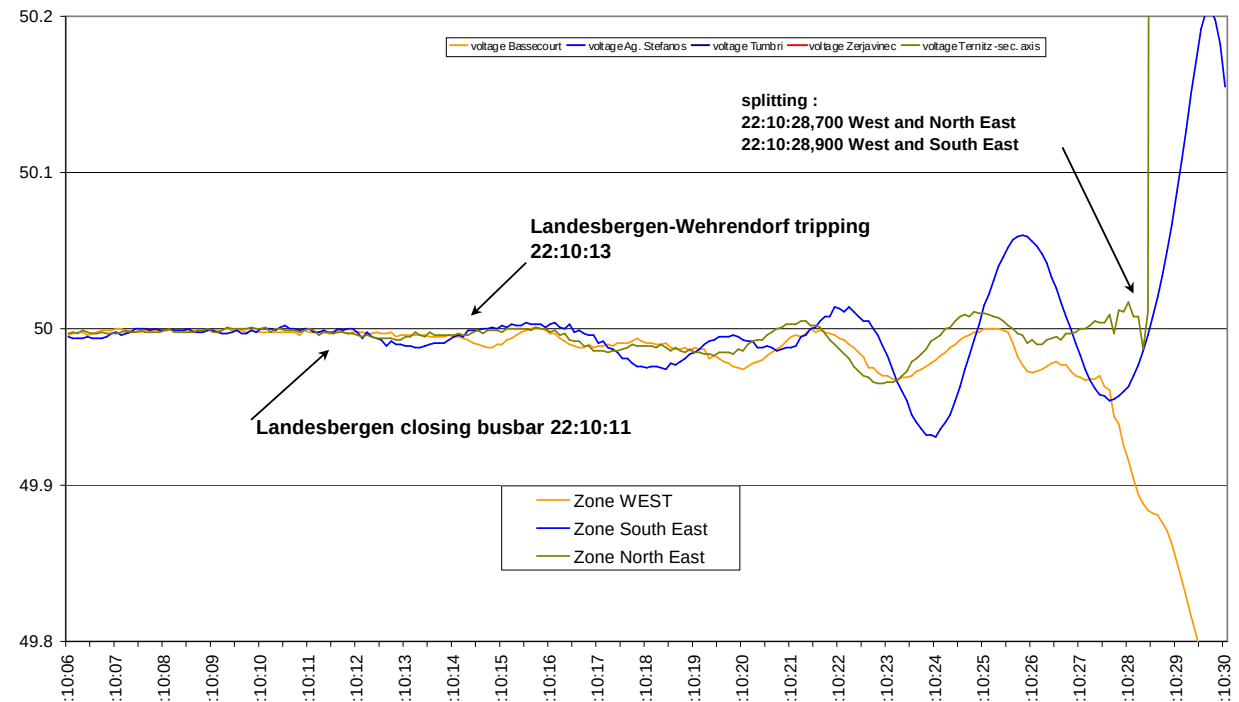
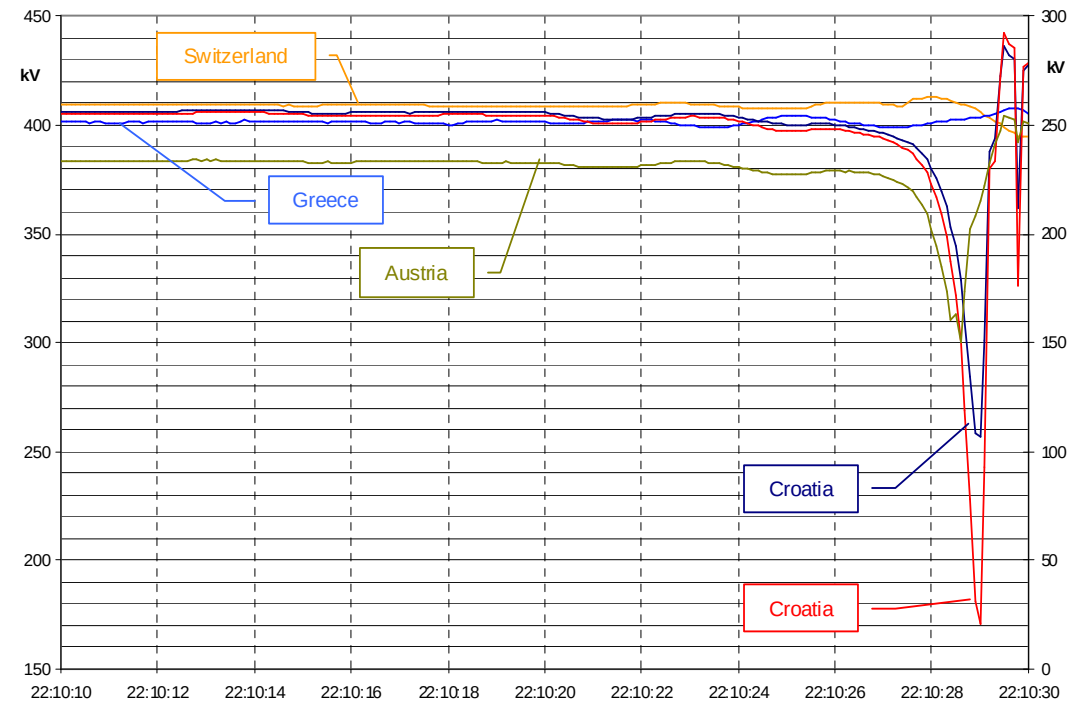


Rozpad propojení UCTE

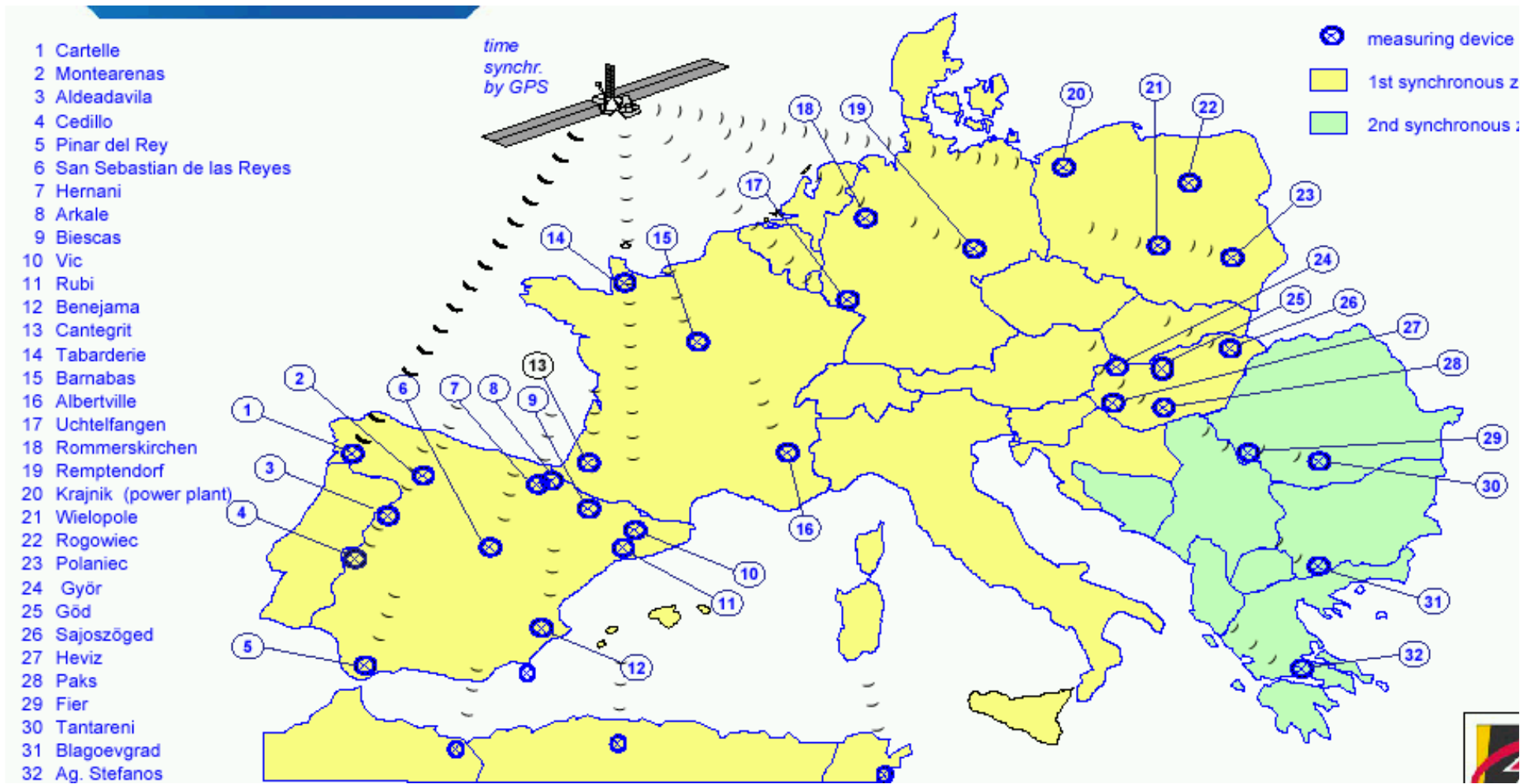
04.11.2006

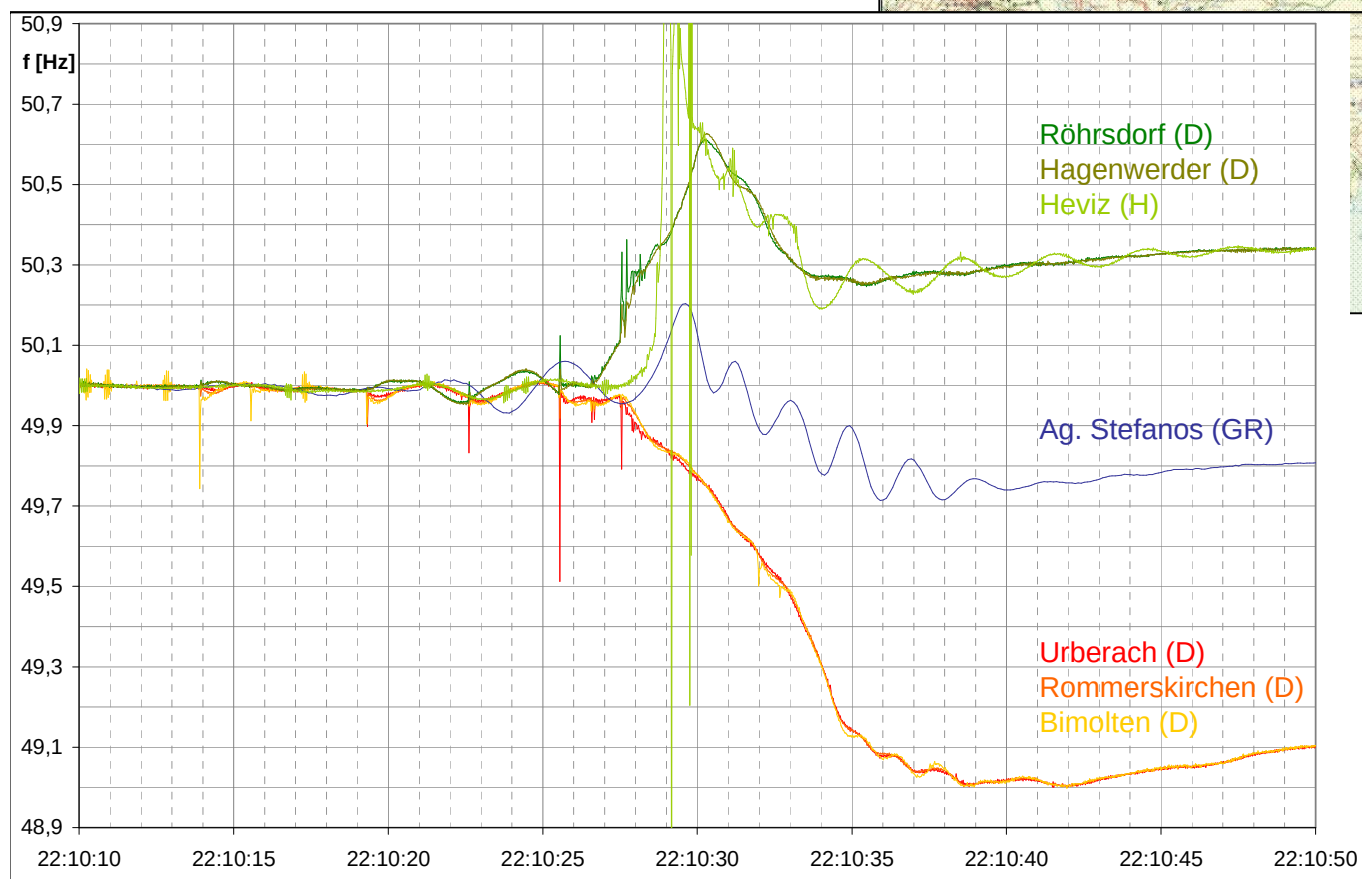
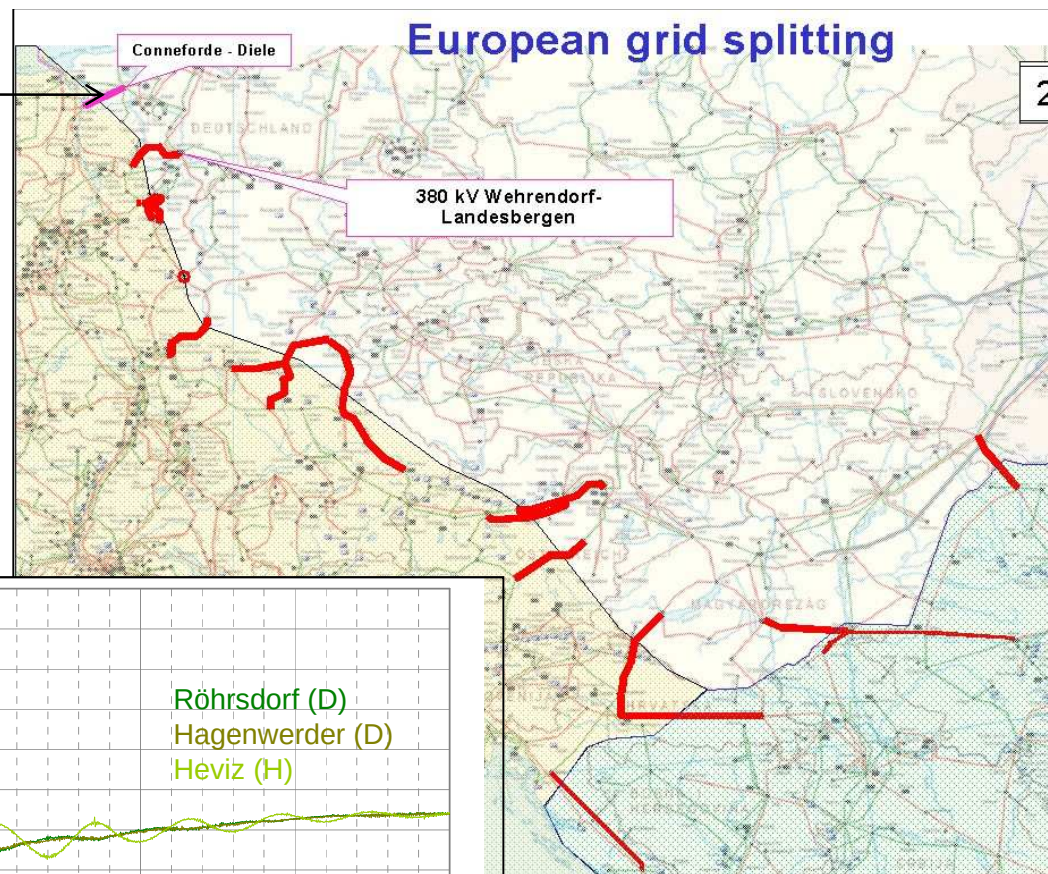


Rozpad propojení UCTE



WAMS





Měření WAMS

Blackout USA (Ar, Ca)+Mexiko

8.9. 2011



Porucha na jihozápadním pobřeží USA vedla během 11 minut ke kaskádovitým výpadkům končícím rozsáhlým blackoutem na území Arizony, Jižní Kalifornie a poloostrova Baja Kalifornie (Mex.)

Iniciační poruchou byl výpadek vedení 500 kV

Vedení je součástí hlavního přenosového koridoru, zásobujícího oblast San Diego elektrinou z elektráren v Arizoně a jeho výpadek způsobil přetěžování jiných vedení a napěťové problémy - to bylo příčinou následných výpadků vedení, transformátorů a generátorů, což vedlo k frekvenčního odlehčování zátěže, kolapsu sítě a **blackoutu**

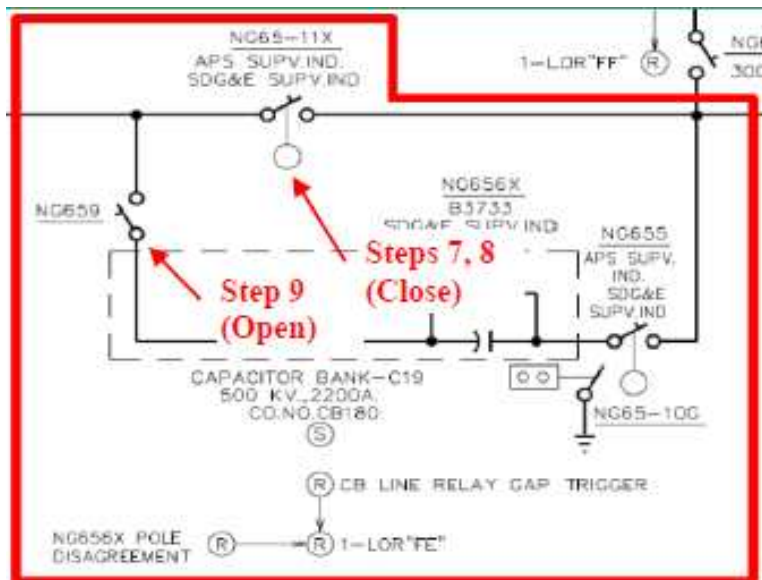
Rozbor poruchy ukázal, že soustava nebyla provozována bezpečně, tedy s dodržováním kritéria N-1.

Provozovatelé sítí neměli adekvátní prostředky pro řízení v reálném čase

Stavová estimace a kontingenční analýza pracovala s nedokonalými modely, které nezahrnovaly vliv sousedních sítí

Nastavení ochran traf proti přetížení bylo příliš rychlé (40 s), než aby dovolilo dispečerům nějaká nápravná opatření

Iniciační porucha – důsledky



V 13:57:46 byly kondenzátorové baterie zařazené v sérii s vedením 500 kV automaticky bypasovány působením ochran proti nesymetrickému zatížení. Sériová kompenzace indukčnosti dlouhých vedení se používá pro zvýšení přenosové schopnosti dlouhých vedení.

Provozovatel sítě APS vyslal do rozvodny technika, aby baterie odpojil od napětí. Technik měl s postupem odpojování zkušenosti a rovněž APS měl zpracován písemný šestnáctibodový postup, který společně prováděl a kontroloval s dispečerem (dispečer četl se seznamu krok za krokem a technik je pro kontrolu opakoval).

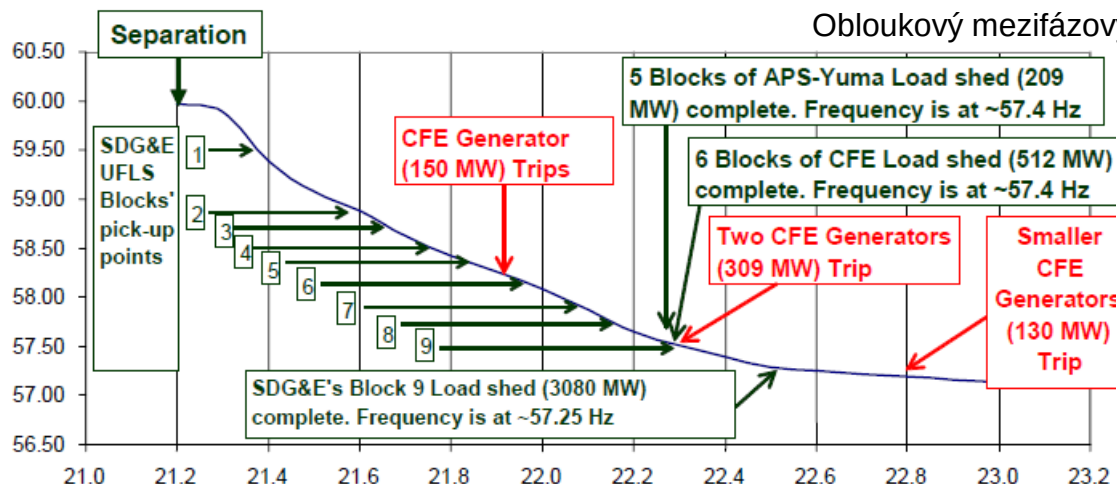
Každý krok postupu byl písemně zaznamenán spolu s časem provedení. Technik provedl správně krok 6, kdy potvrdil stav vypínače kondenzátorů jako zapnutý.

Mezitím si domlouval pomoc od obsluhy rozvodny pro uzemnění a následně zapsal čas kroku 6 omylem do řádku pro krok 8.

Po ukončení konverzace technik pokračoval krokem 9, čímž vynechal zapnutí vypínače vedení, který provede bypass kondenzátorů.

V kroku 9 rozpojoval ručně odpojovače obvodu - vznikl oblouk mezi kontakty odpojovače a následný přeskok oblouku mezi fázemi.

Obloukový mezifázový zkrat vypnul distanční ochrany



Blackout části Holandska

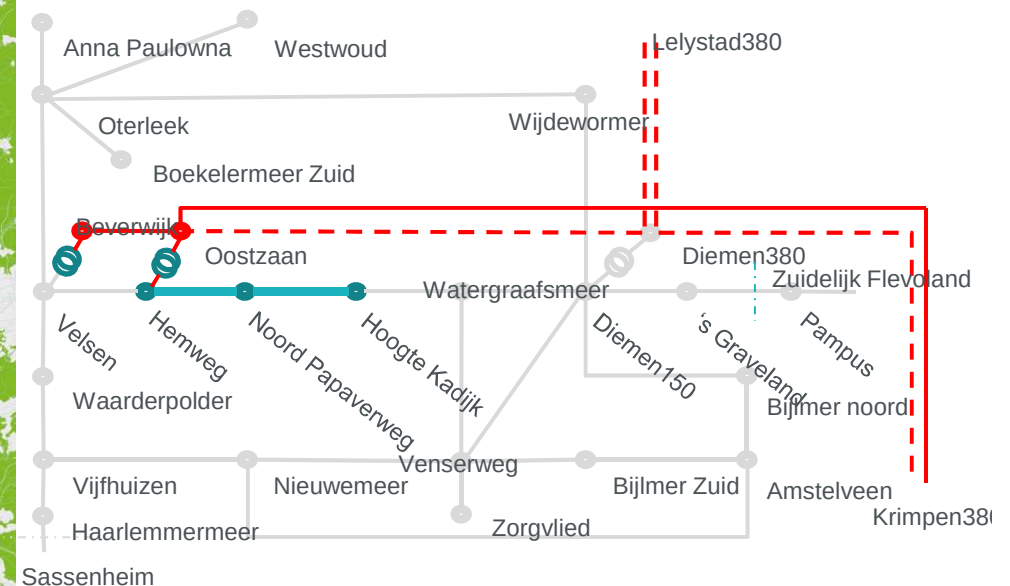
27.3.2015



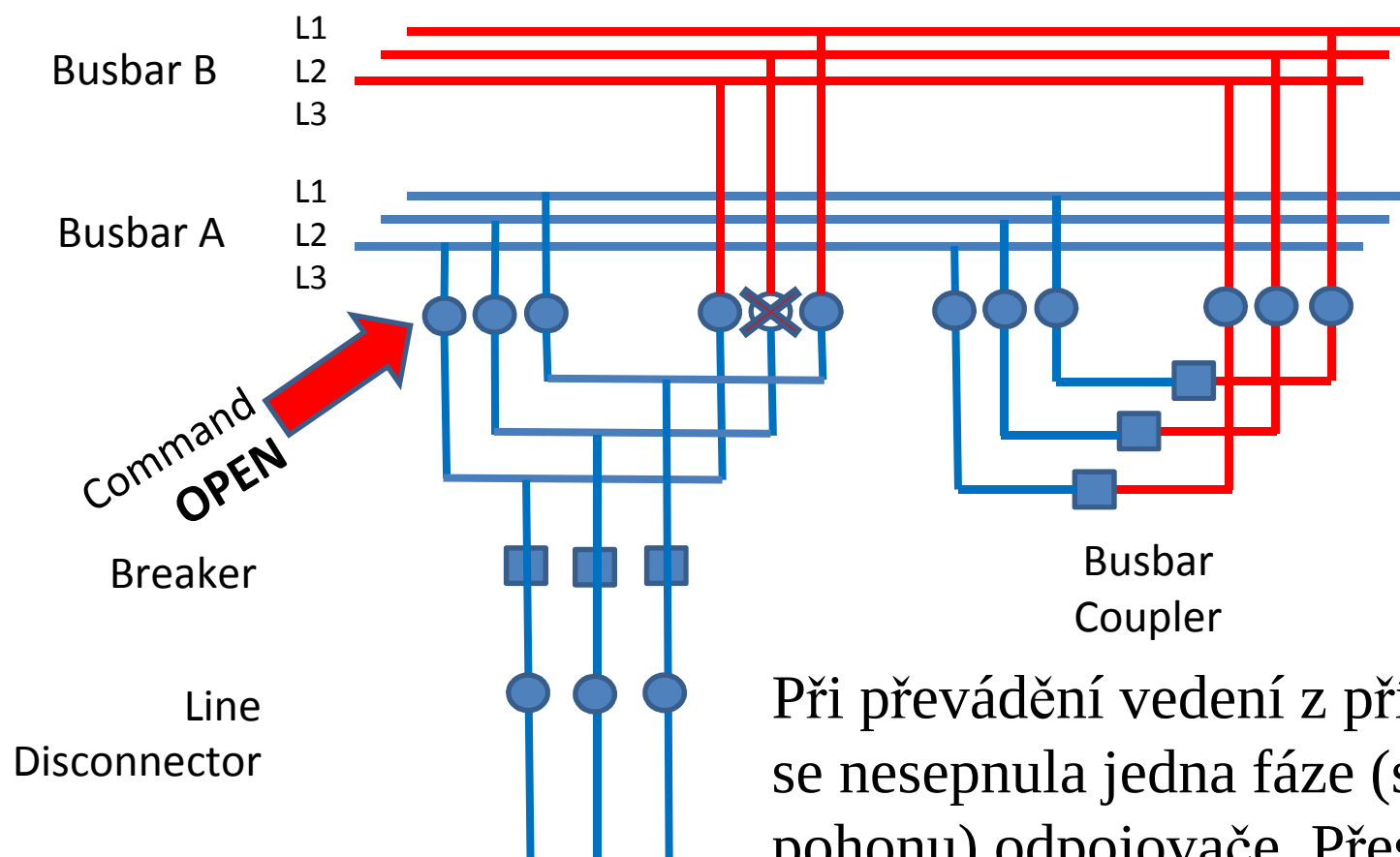
**Výpadek 380 kV rozvodny
Diemen způsobil ztrátu
napájení 19 rozvodn 150 kV,
což vedlo k blackoutu:**

- částí Amsterdamu
- letiště Schiphol
- dvou provincií

VtE neumějí ostrovní provoz



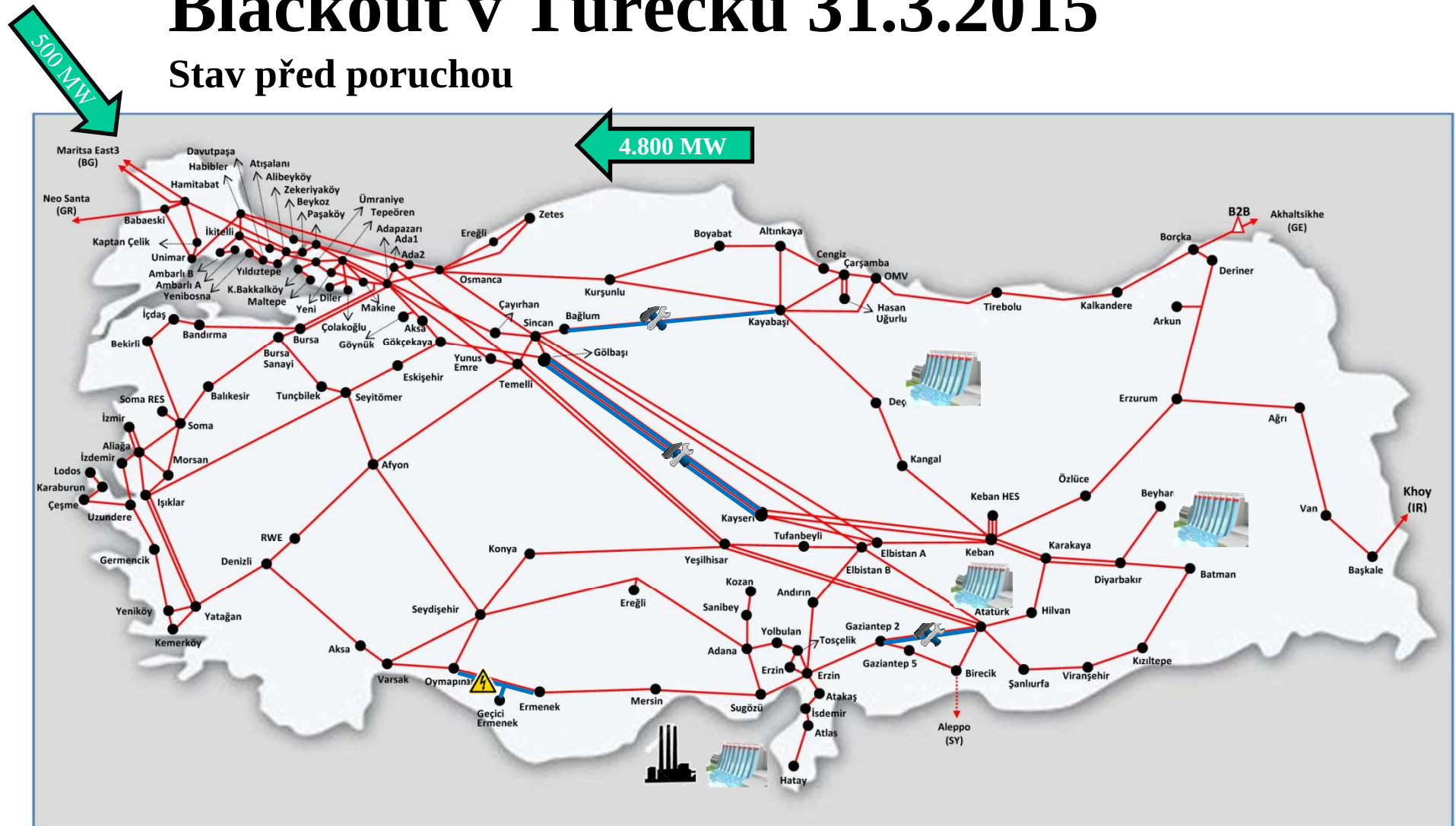
Iniciační porucha – důsledky



Při převádění vedení z přípojnice A na B se nesepnula jedna fáze (spálený motor pohonu) odpojovače. Přesto obsluha vypíná druhý odpojovač. Důsledkem je zřejmě vznik zkratu na obou přípojnicích a následný vypnutí celé rozvodny ochranami.

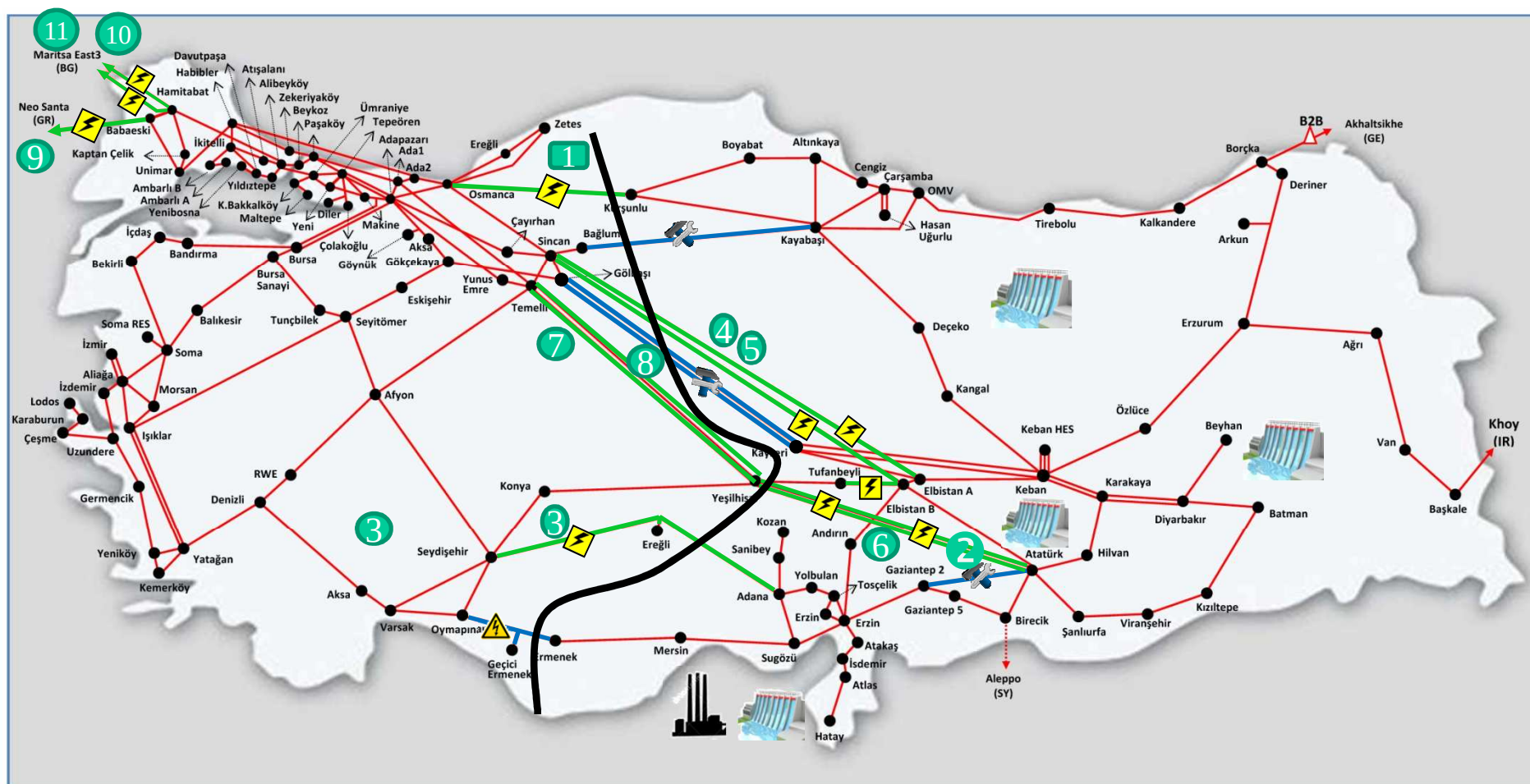
Blackout v Turecku 31.3.2015

Stav před poruchou



4 vedení v koridoru Východ-západ vypnuty pro údržbu nebo rekonstrukci
Všechny sériové kompenzace vypnuty
Výroba na východě ve VE způsobuje velké toky ve směry východ západ
TEIAS ale nepozoruje porušení kritéria N-1

Blackout v Turecku 31.3.2015 Stav po poruše



Iniciační porucha vypnutí vedení Osmana – Kursunlu distanční ochranou v 5. zóně (bez poruchy a nepřetíženo)

Účel 5.zóny bylo „chránit“ odpojovač v rozvodně.

Po vypnutí došlo ke ztrátě uhlové stability mezi východní a západní částí Turecka.

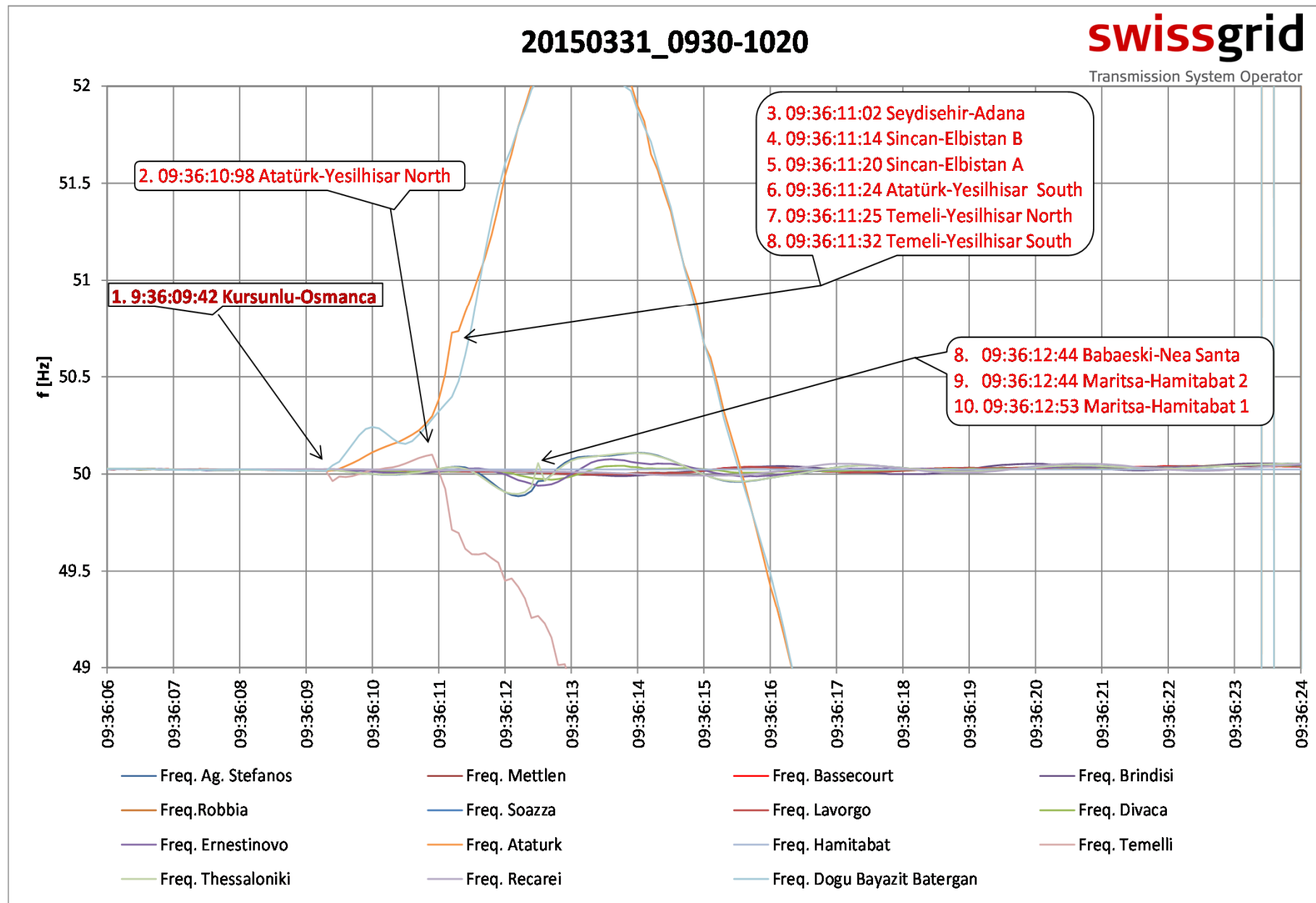
Ztráta stability byla detekována distančními ochranami na vedeních v profilu a všechna vedení ②-③ byla vypnuta

Turecká PS se rozdělila na západní a východní (deficitní a přebytkovou) část.

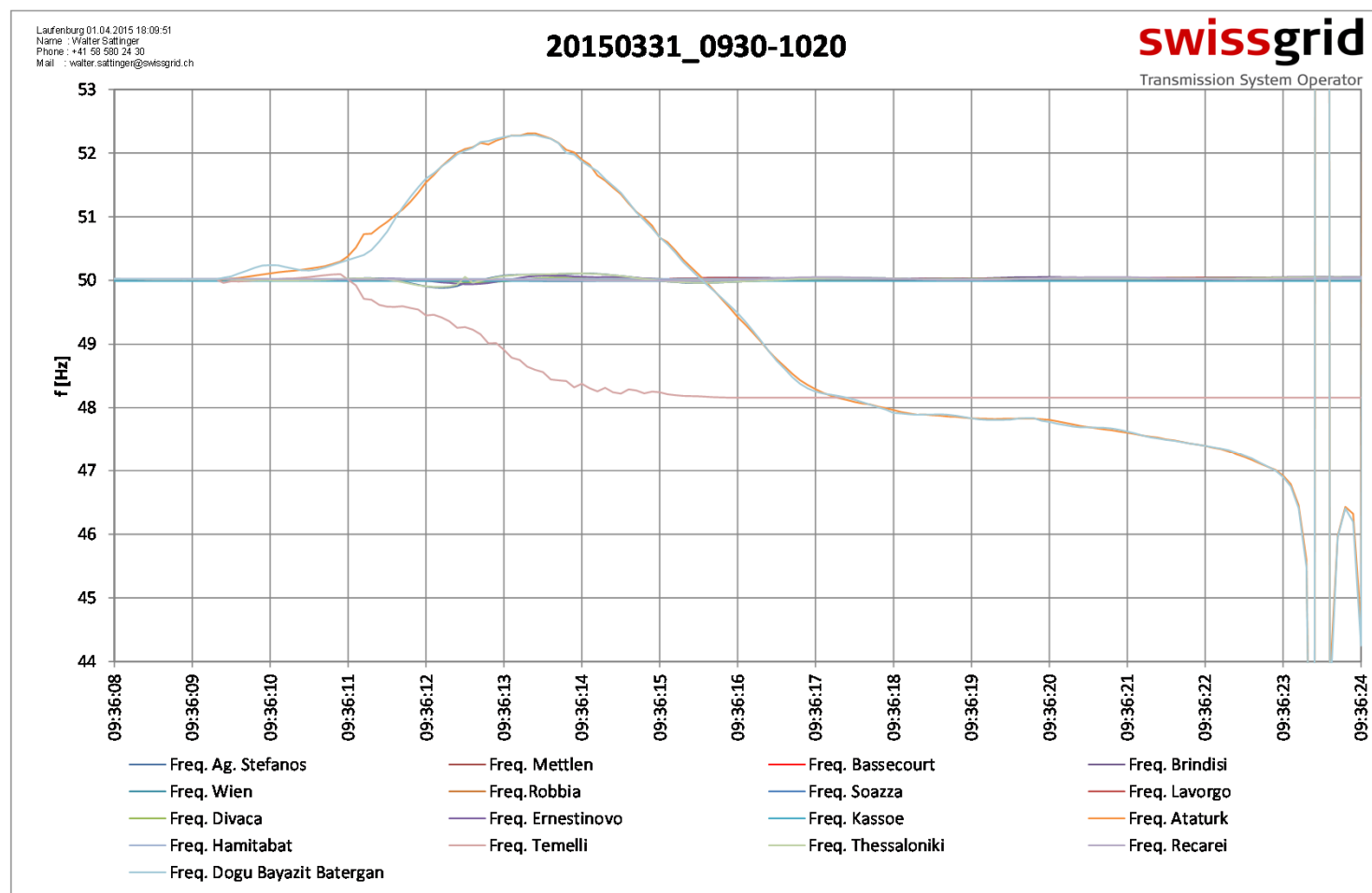
Západní část ztratila synchronismus se synchronní zónou a hraniční vedení do Bulharska a Řecka byla vypnuta

V západním ostrovu působilo frekvenční odlehčování, bylo vypnuto 4800 MW.

Blackout v Turecku 31.3.2015



Blackout v Turecku 31.3.2015

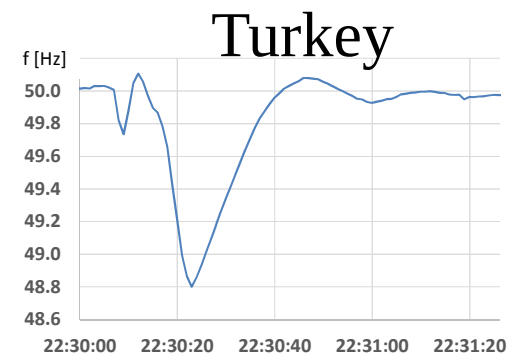
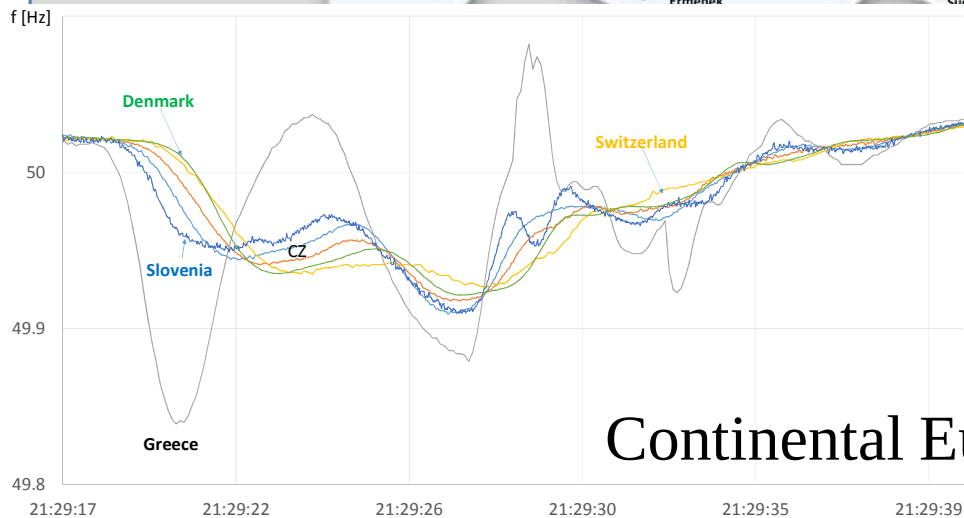


Po působení frekvenčního odlehčování frekvence v západním ostrově dále klesala (řada generátorů se vypnula dříve než to dovoluje frekvenční plán – při 47.5 Hz) a ostrov skončil v blackoutu.

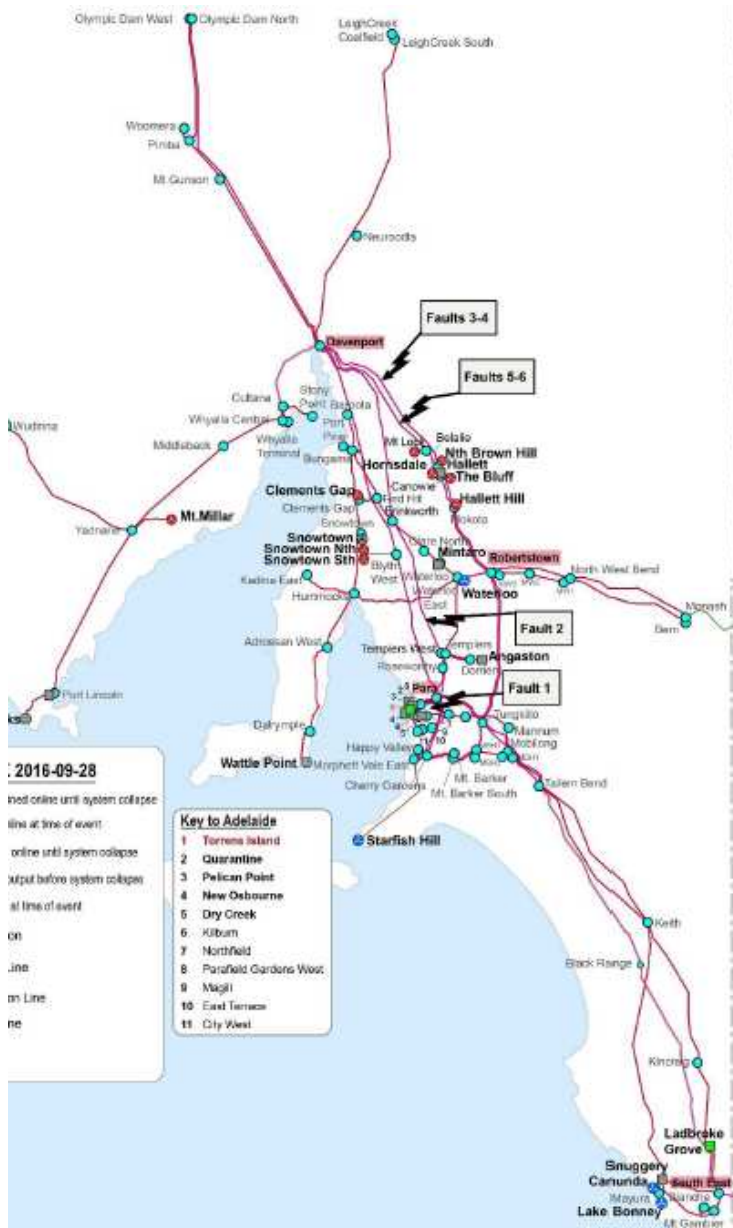
Frekvence východního ostrova s přebytkem 4700 MW rostla k 52.3 Hz, ale pak klesala a tento ostrov rovněž skončil blackoutem.

Obnova napájení začal neprodleně a napájení Evropské části vedením z Bulharska bylo obnoveno za hodinu a půl. 95 % zátěže bylo obnoveno do devíti hodin.

Porucha v Turecku 26.4.2016



Blackout jižní Austrálie (JA) 28.9.2016



Před poruchou oblast JA při zatížení 1895 MW dovážela 612 MW dvojitém vedením 275 kV Heywood-South East

883 MW zatížení JA pokrývaly větrné elektrárny (VtE)

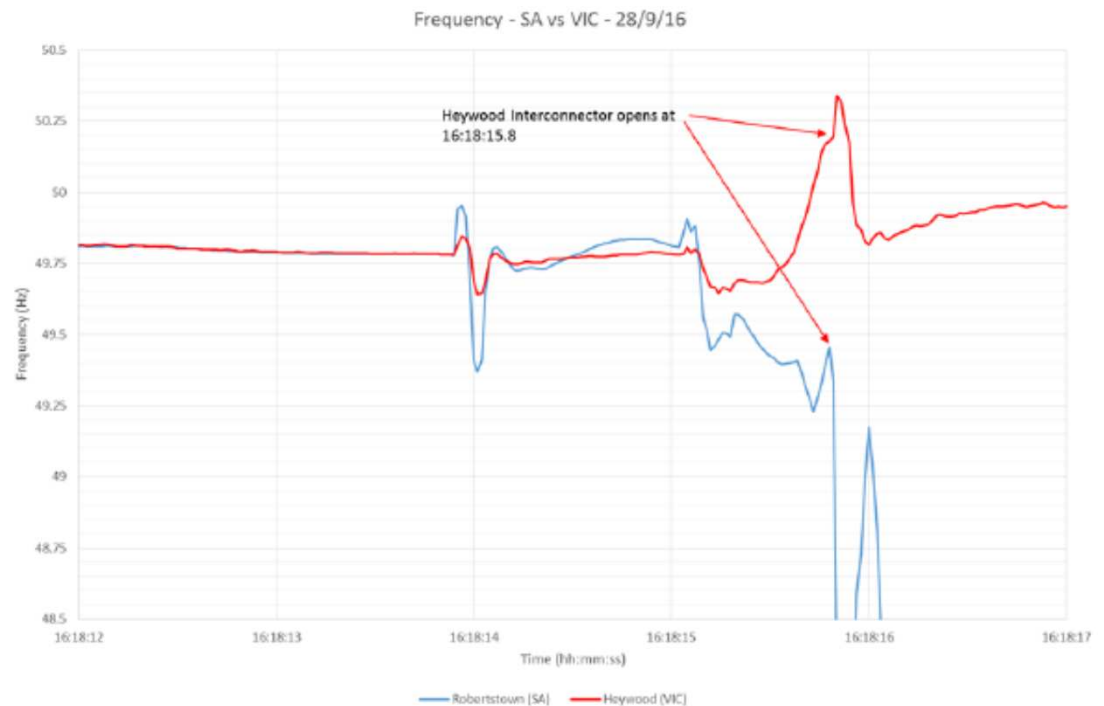
Extrémní počasí (silný vítr, kroupy a bouřky) způsobily výpadky tří vedení (dvoufázové a jednofázové zkraty s neúspěšným OZ)

Zkraty na vedení způsobily výpadek výroby z VtE 445 MW.

Vysoký přenos výkonu koridorem Heywood aktivoval ochranu na ztrátu synchronismu, která vedení vypnula.

Deficit výkonu kolem 900 MW rychlý pokles frekvence.

Přestože působilo frekvenční odlehčování následoval rychle blackout.



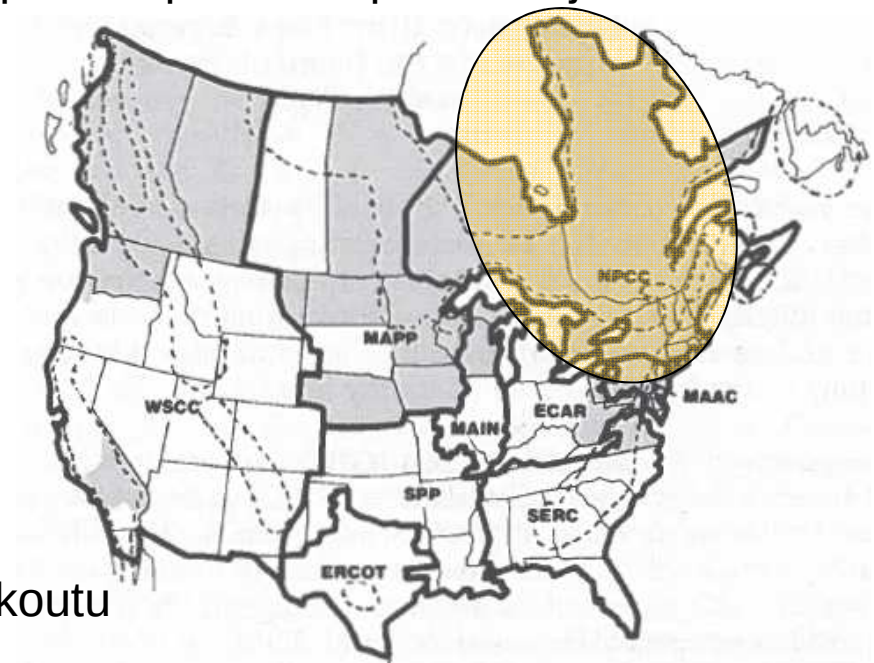
Zdroj: Black system event in South Australia on 28 September 2016, AEMO report

Blackouty – shrnutí

Blackout	Iniciační porucha	Příčina	Následek	Pozn.
Dánsko Švédsko 23.9.2003	Výpadek rozvodny	Technická závada	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Ztráta frekvenční stability	Částečný BO
Itálie 28.9.2003	Výpadek vedení	Vysoké přetoky	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Ztráta frekvenční stability	Úplný BO
Řecko 12.7.2004	Výpadek bloku	Technická závada	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Ztráta frekvenční stability	Částečný BO
Rozpad UCTE 04.11.2006	Rozpojení spínače přípojnic	Neproveden kontrolní výpočet důsledků	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Rozdělení synchron. propojení	Působení frekvenčního odlehčování
USA a Mexiko 8.9. 2011	Vypínání odpojovačem Výpadek vedení	Chyba obsluhy	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Ztráta frekvenční stability	Částečný BO
Holandsko 27.3.2015	Vypínání odpojovačem	Technická závada + chyba obsluhy	Výpadek rozvodny Ztráta frekvenční stability	Částečný BO
Turecko 31.3.2015	Výpadek vedení	Vysoké přetoky	Ztráta uhlové stability Kaskáda výpadků vedení Ztráta frekvenční stability	Úplný BO
Jižní Austrálie 28.9.2016	Výpadky vedení	Výpadky VtE při zkratech	Ztráta uhlové stability Ztráta frekvenční stability	Úplný BO

Geomagnetické bouře z r. 1989 - Kanada

- V 2:45 13.3.1989 došlo po silné geomagnetické bouři k poruchovému vypnutí sedmi statických kompenzátorů (kondenzátorových baterií a tzv. SVC – „Static VAR Compensators“ používaných pro regulaci napětí sítě) v síti Hydro-Quebec vlivem vyšších harmonických
- Vyšší sudé harmonické vznikly přesycením magnetizačního obvodu transformátorů způsobené indukovanými geomagnetickými proudy. Pro proudy vyšších harmonických mají kondenzátorové baterie (připojené mezi fáze a zem) nízkou impedanci a snadno se mohou přetížit – jsou vypnuty nadproudovými ochranami
- Výpadek těchto kompenzačních prostředků způsobil pokles napětí a zřejmě nestabilitu sítě vedoucí k výpadku vedení 735 kV k La Grande (10 GW VE)
- Výpadek vedení způsobil automatické vypnutí dvou bloků VE Le Grande 4
- Následně došlo k výpadku všech vedení koridoru Le Grande
- Deficit 9400 MW způsobil pokles frekvence a frekvenční odlehčování
- Další výpadky vedení a výkonu z Churchill Falls vedly ke kolapsu sítě a blackoutu



Zdroj: <http://www.nerc.com/pa/CI/CIPOutreach/Documents/1989-Quebec-Disturbance.pdf>



Geomagnetické bouře z r. 1989 - USA

- 20.3.1989 byla na bloku 1 (z r.1977) v JE Salem prováděna kontrola oleje v blokovém transformátoru, která ukázala vysoký obsah hořlavých plynů
- Dva bloky elektrárny Salem spolu s další JE Hope Creek (sumární výkon 3450 MW) stojí na umělém ostrově v zátoce Delaware na vých. pobřeží USA (stát New Jersey)
- Ostrov je postavený v bažinách na ocelových pilířích, připojených na elektrárenskou zemní síť. Pobřežní elektrárna je vyvedena do 500 kV sítě a tvoří tak ideální bránu pro vstup geomagneticky indukovaných proudů z Atlantiku do přenosové soustavy (přes uzemněné primární vinutí blokových transformátorů, které se skládají z tří jednofázových jednotek)
- To je umocněno ještě vysokým odporem skalnaté půdy v sousední Pensylvánii
- Inspekce blokových transformátorů potvrdila tepelná poškození vinutí a izolace.
- Příčina byla shledána v přesycování transformátoru stejnosměrným geomagneticky indukovaným proudem
- Přesycení zvětšuje ztráty vířivými proudy a zahřívání konstrukce.

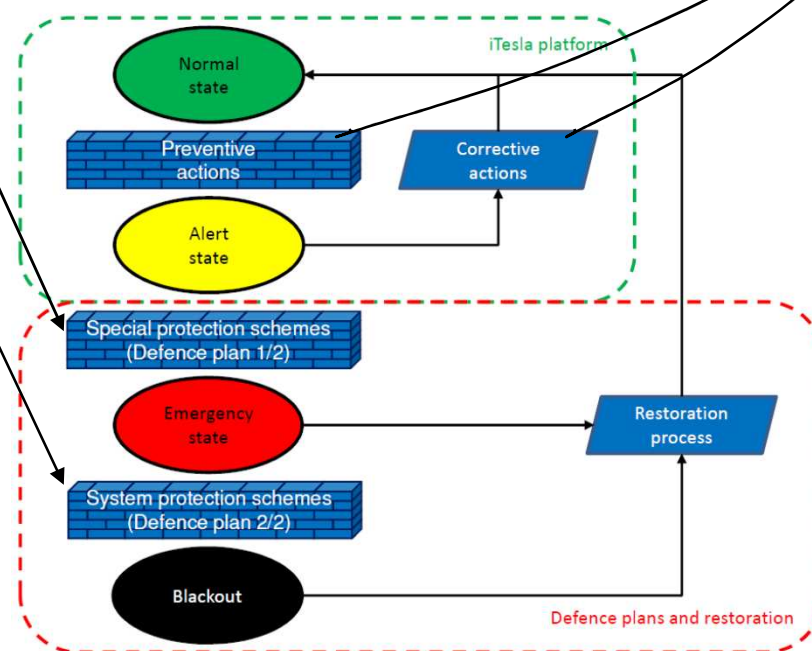


Rizikové faktory geomagnetických bouří

- 1. dlouhá vedení o napětí 500 a 735 kV,**
- 2. nízká vodivost půdy (skalnaté horniny sopečného původu)**
- 3. blízkost moře**
- 4. jednofázové plášťové transformátory,**
- 5. instalace kondenzátorových baterií a SVC.**

Závěry

- Přes plánování a dodržování **standardů bezpečnosti provozu** (kritérium N-1) může dojít k systémové poruše spojené se ztrátou stability, napětovým a frekvenčním kolapsem
- Je nutné mít vypracované **Plány obrany** proti šíření poruch:
 - nastavení distančních ochran
 - rychlé budící soupravy
 - blokování HRT při podpětí
 - frekvenční odlehčování zátěže
 - přepínání regulací turbíny
 - rezervní činné výkony



Zdroj: Defence plans and restoration, Final iTesla Workshop Network Security Assessment 4-5.12.2015, (<http://www.itesla-project.eu/key-project-events>)

- Vyšetřování poruch zjednodušují systémy **WAMS**
- Analýzu rovněž usnadňují **sít'ové simulátory**