

Stabilita ES

Sít'ový simulátor

MODES

Ing. Karel Máslo, CSc.



odd. Analýz PS

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
 - kritérium N-1 (přetížení, napětí)
 - **stabilita** (napěťová, úhlová..), zkratová odolnost

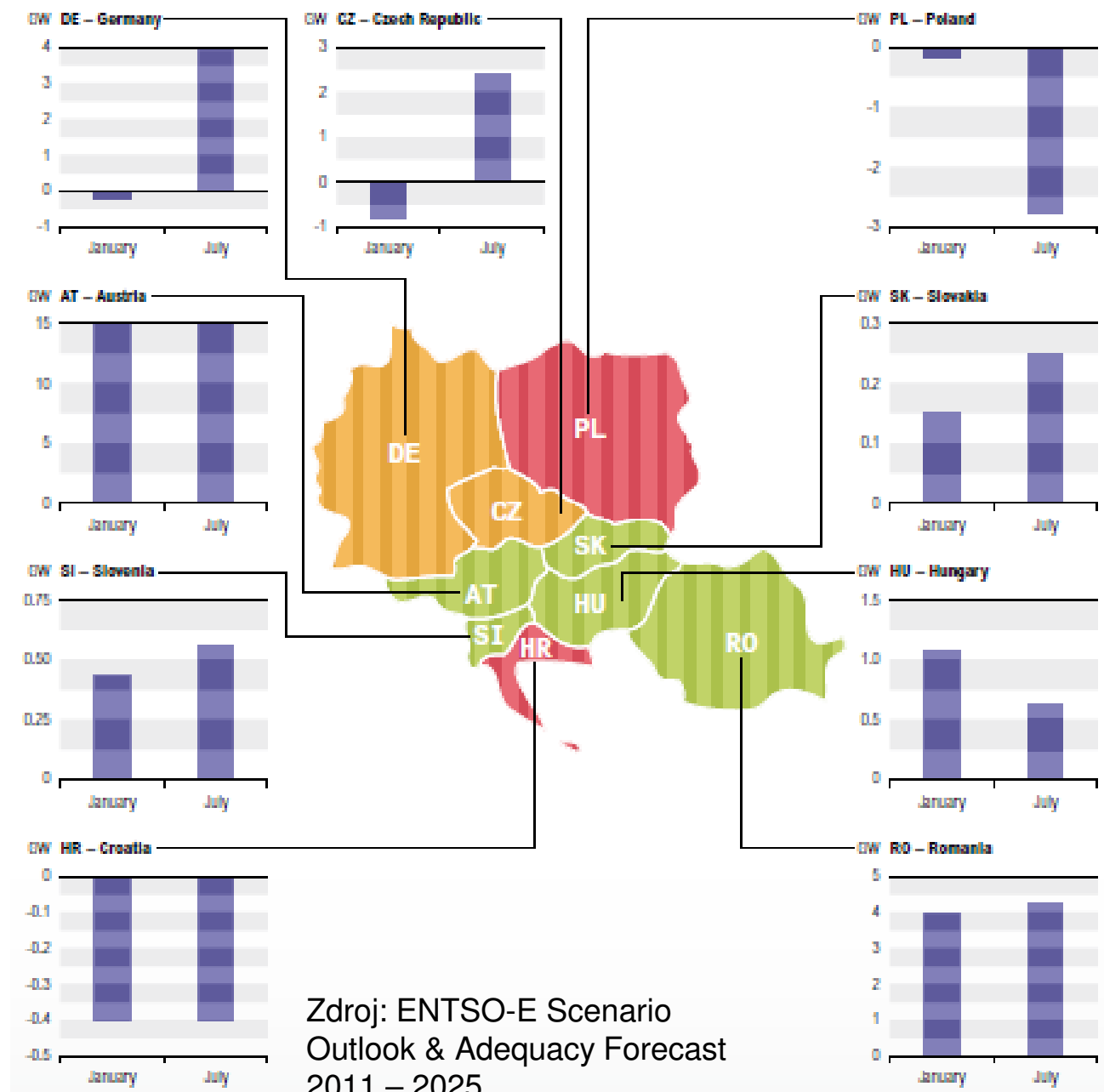
...

- 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

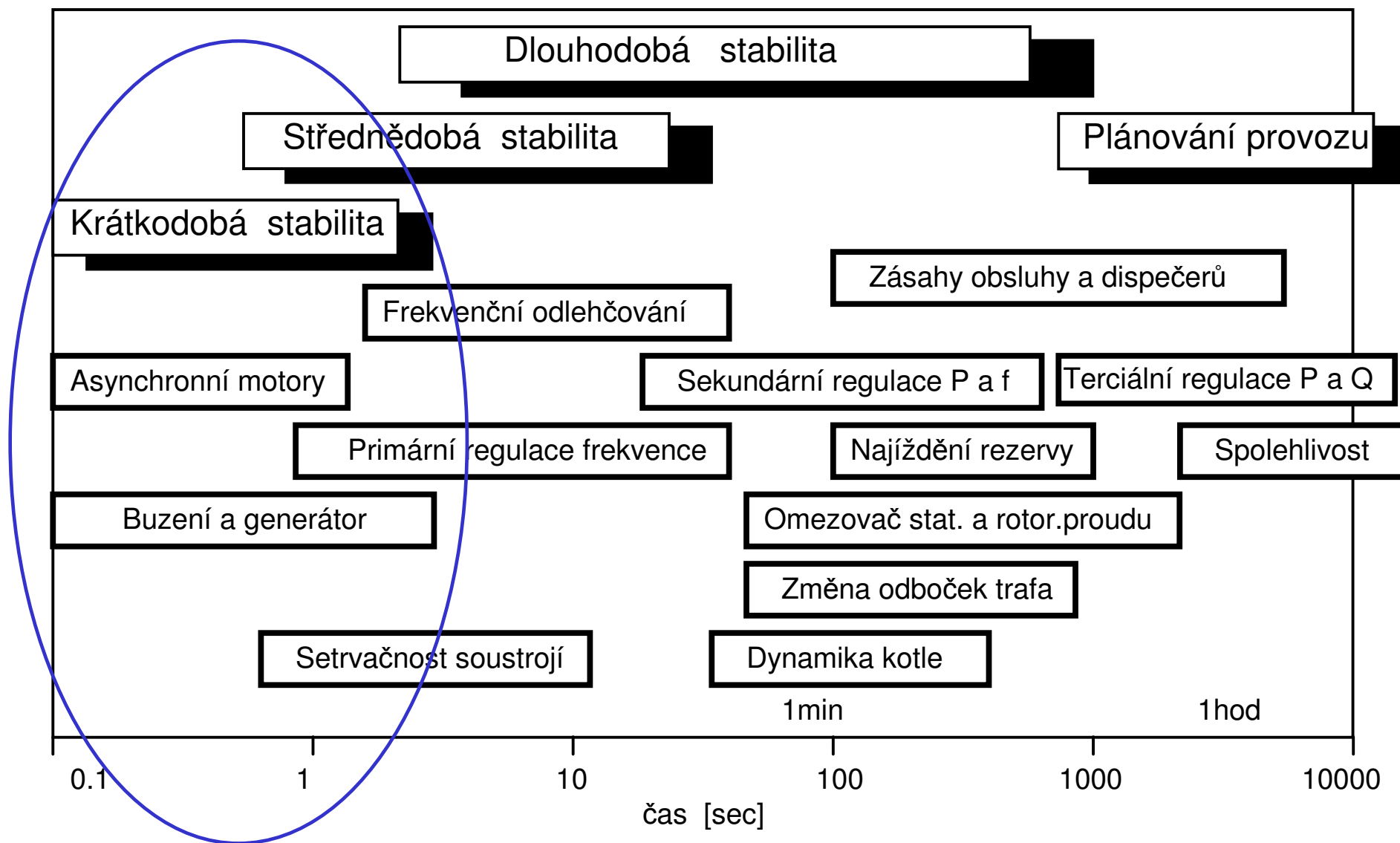
Adekvátnost provozu



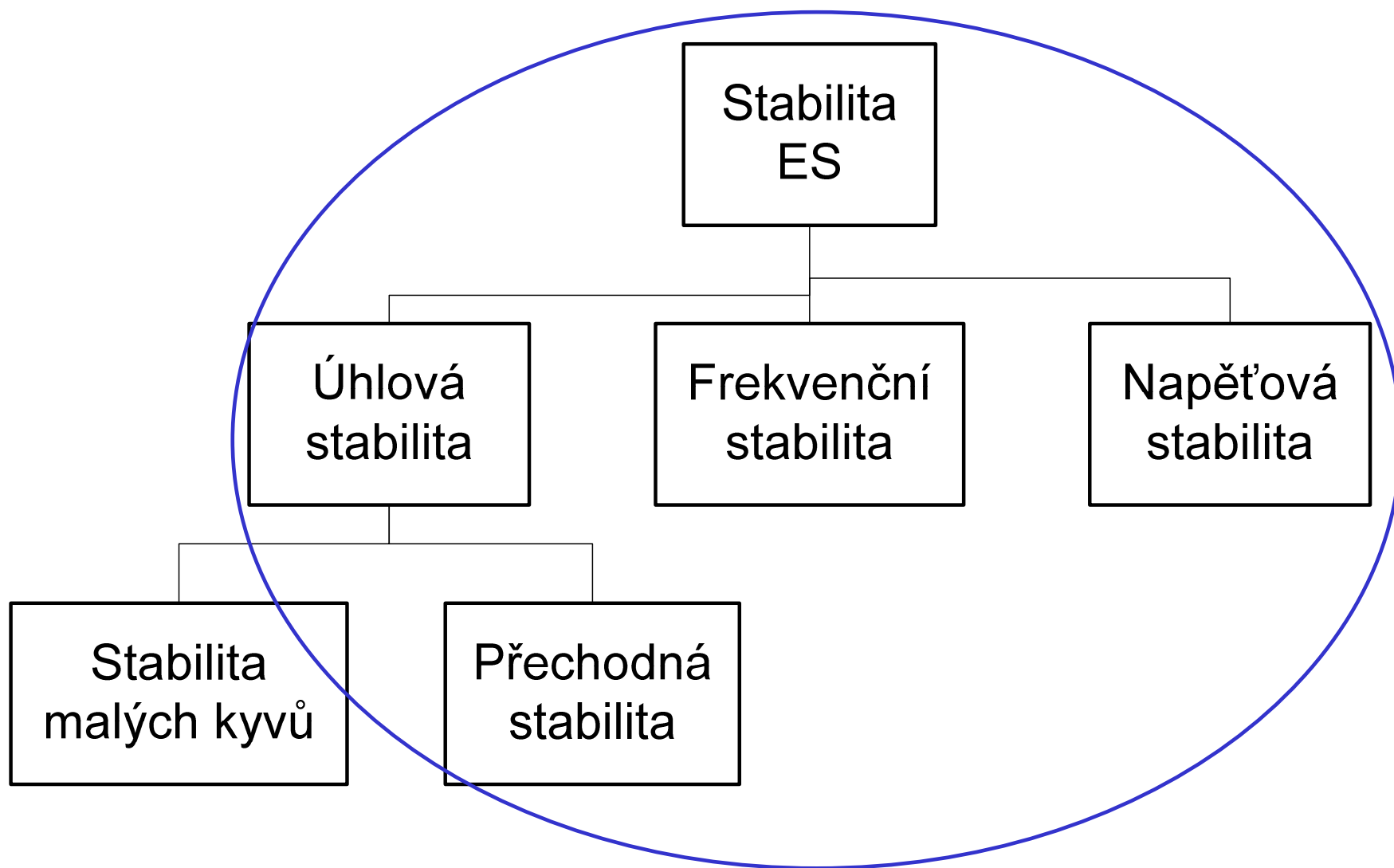
Rozruchy

- provozního charakteru - **změny odebíraného** nebo dodávaného výkonu, plánované změny topologie sítě (např. vypínáním nebo zapínání 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.

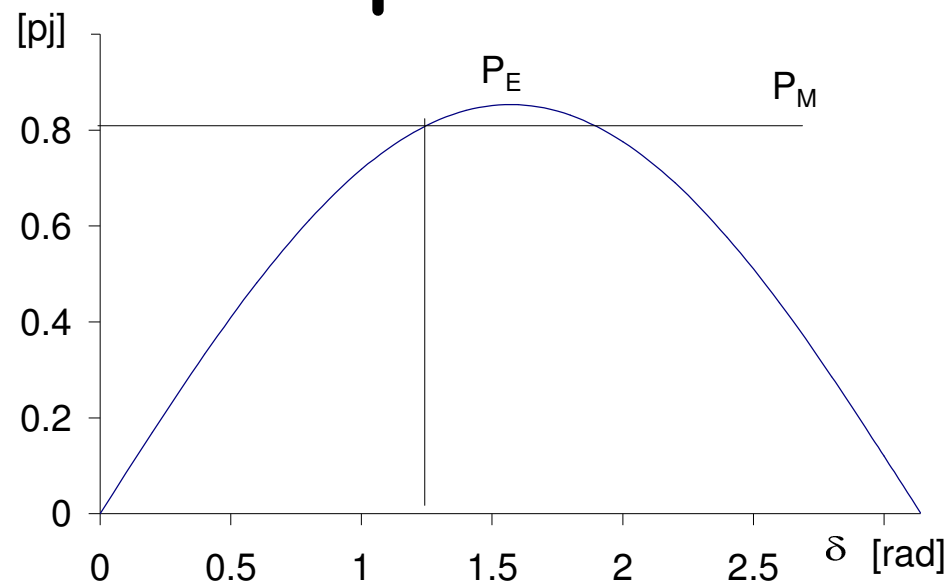
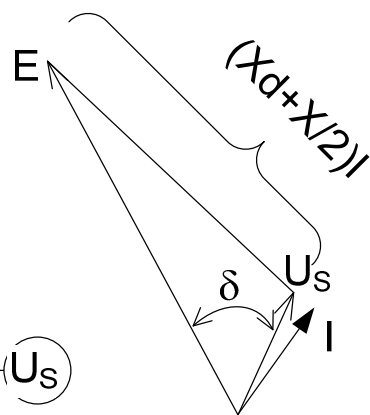
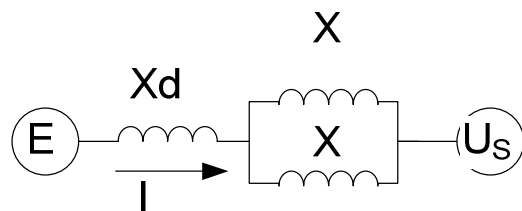
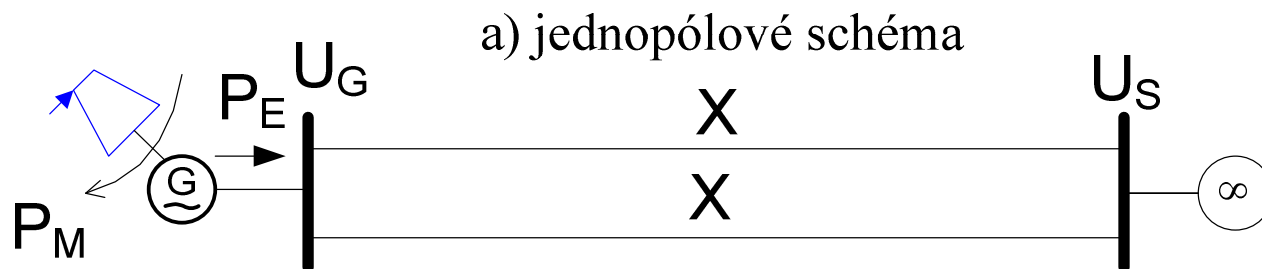
Časový rozsah přechodných dějů v ES



Stabilita ES



Úhlová stabilita



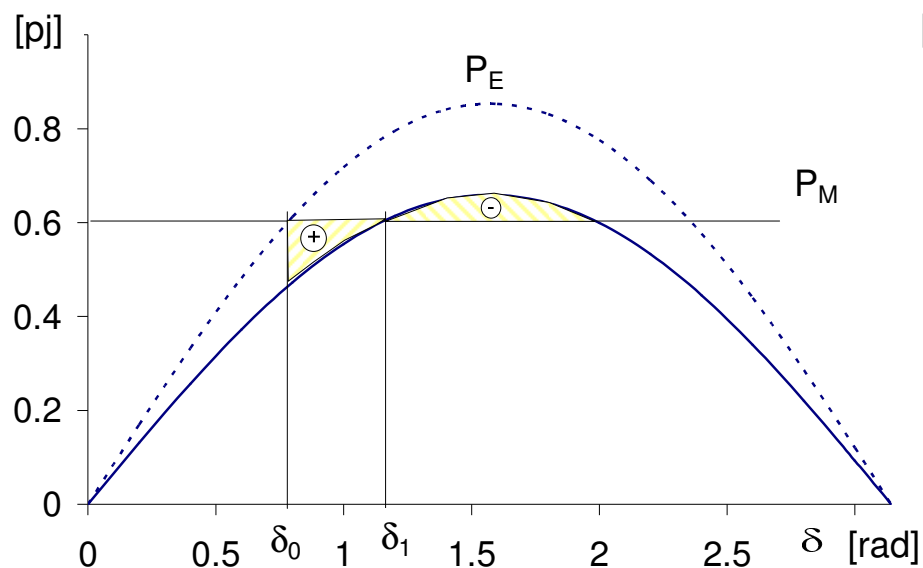
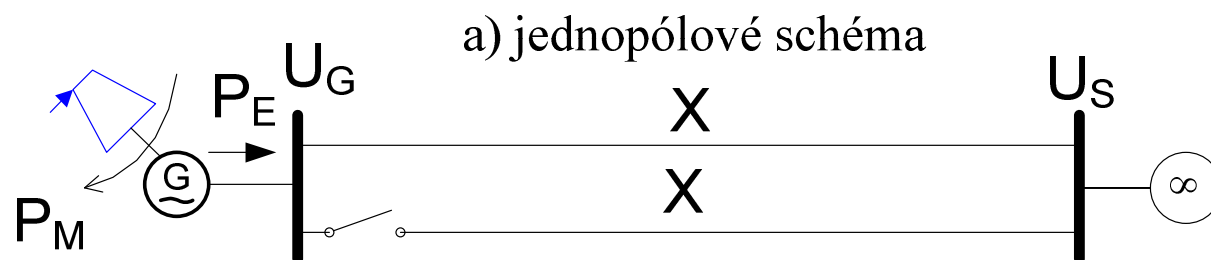
b) náhradní schéma

c) vektorový diagram

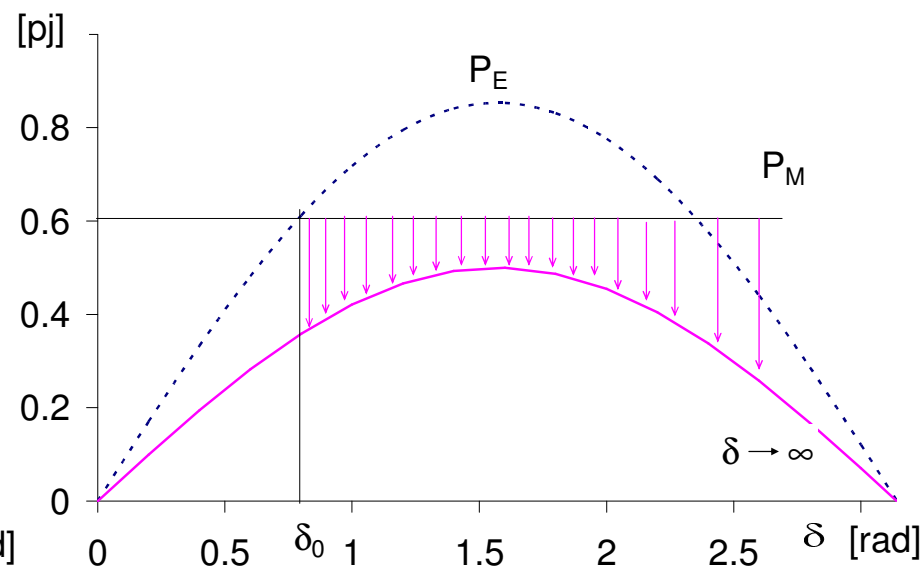
d) výkonová charakteristika

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

Úhlová stabilita – oslabení sítě

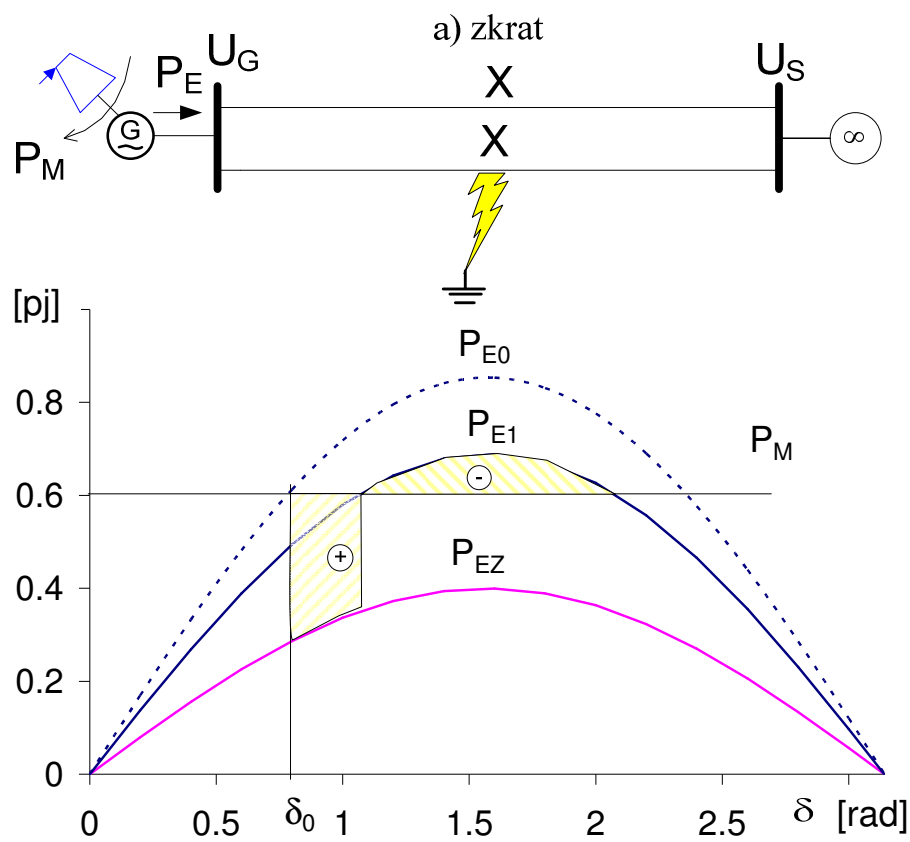


b) stabilní přechod

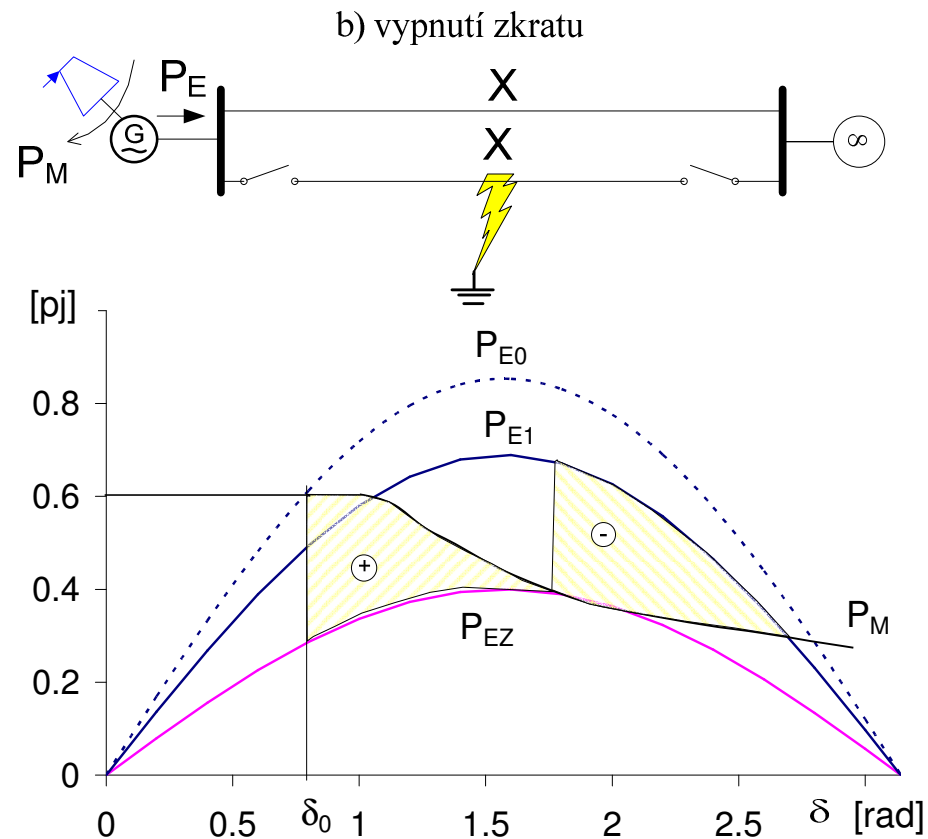


c) nestabilní přechod

Úhlová stabilita - zkrat

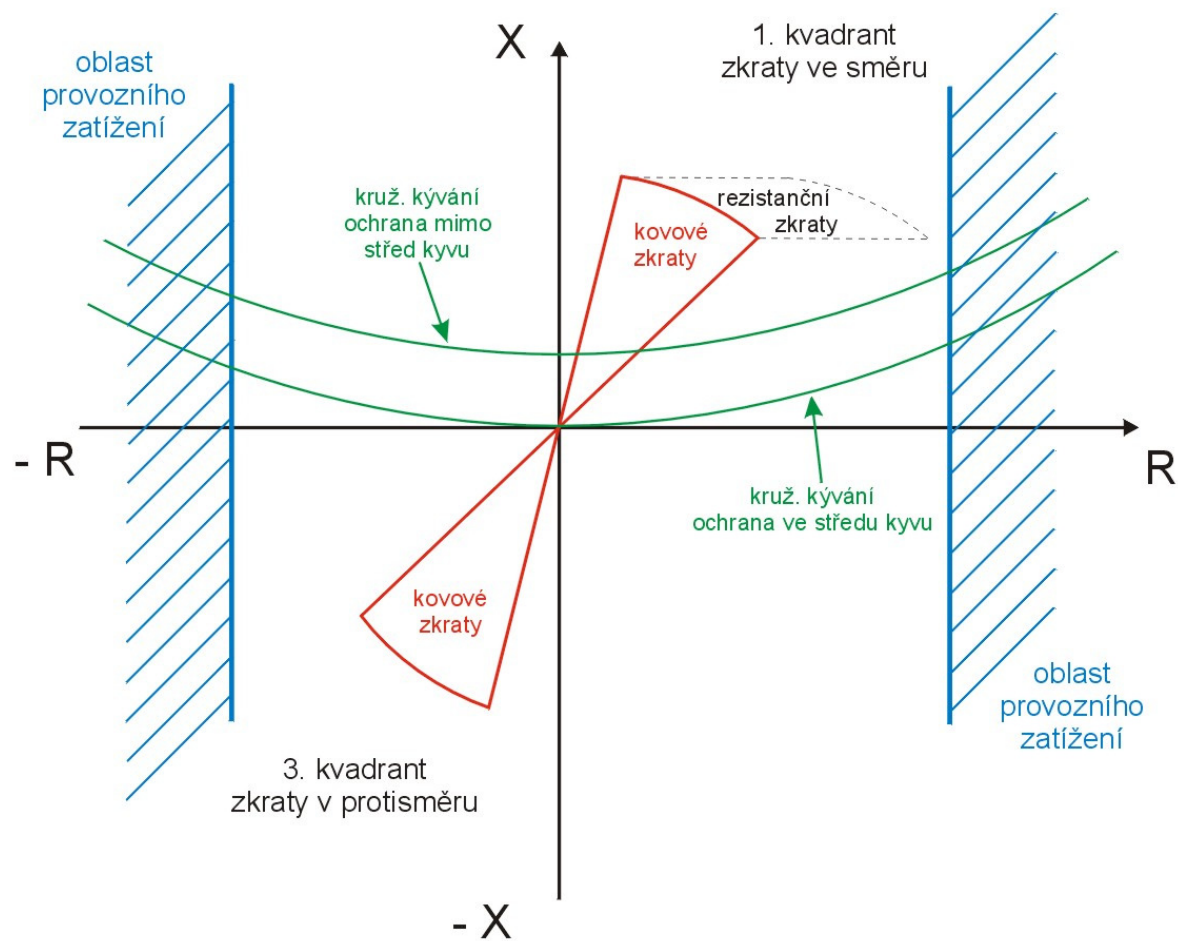
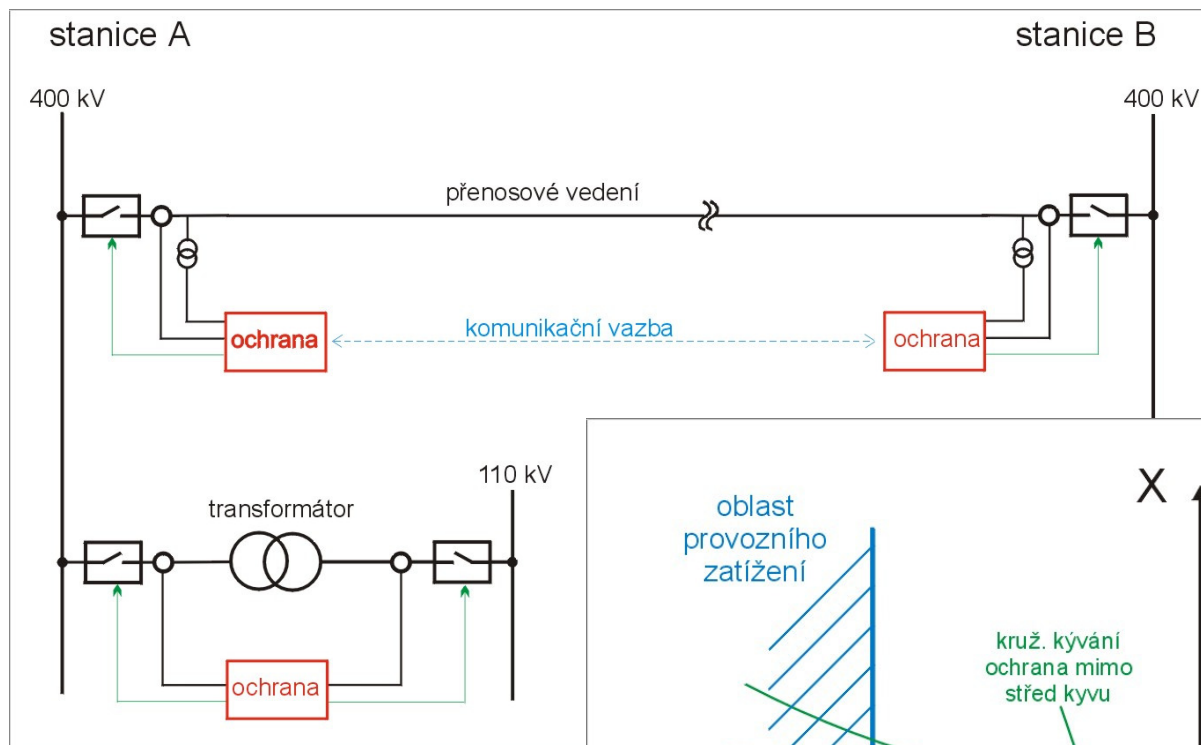


c) stabilní přechod

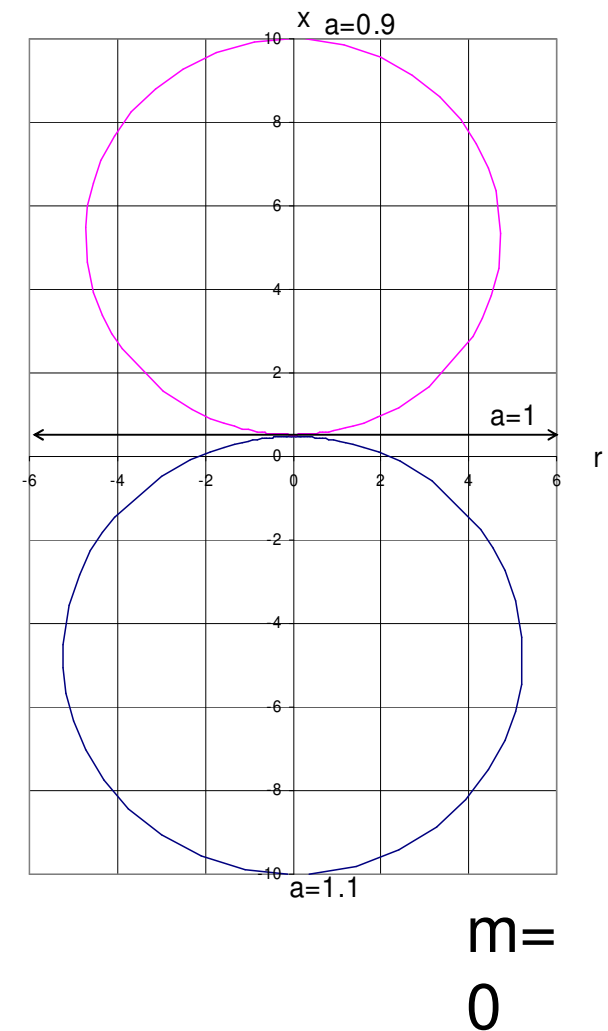
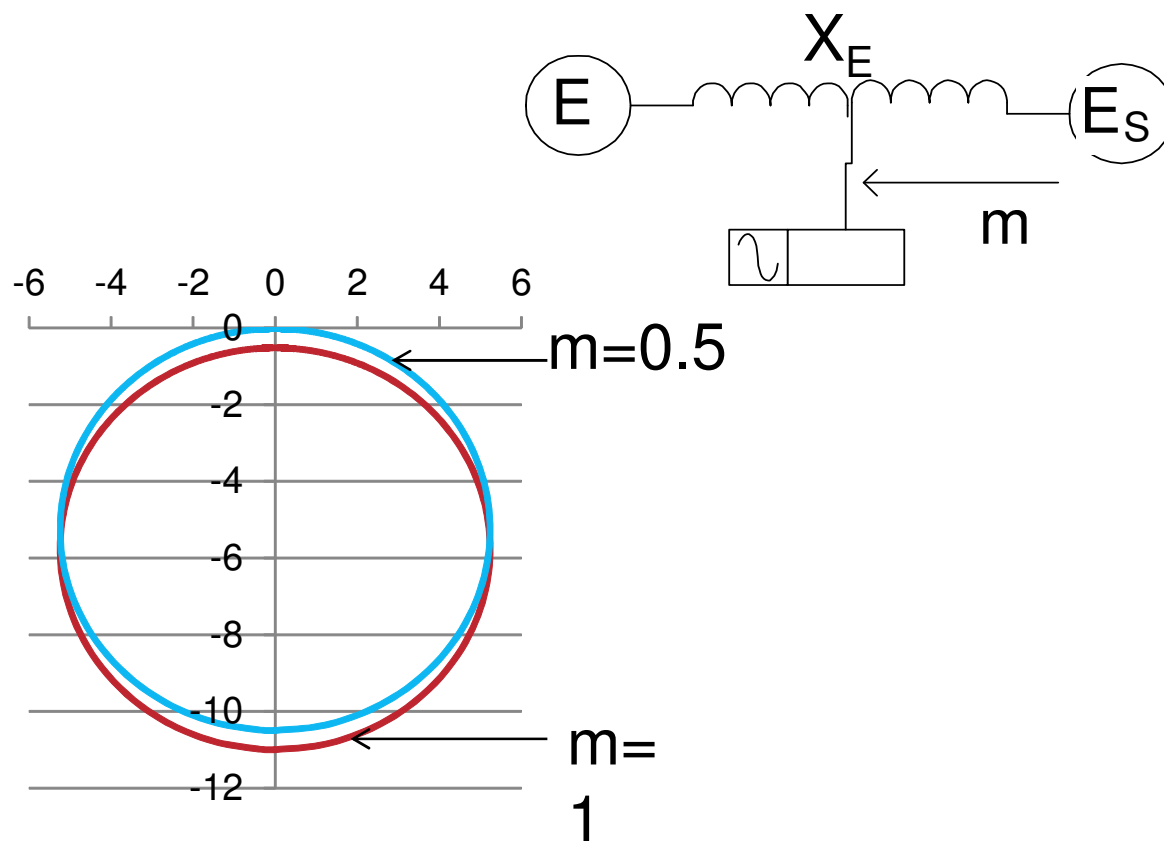


d) stabilní přechod s rychlým řízením ventilů

Distanční ochrana

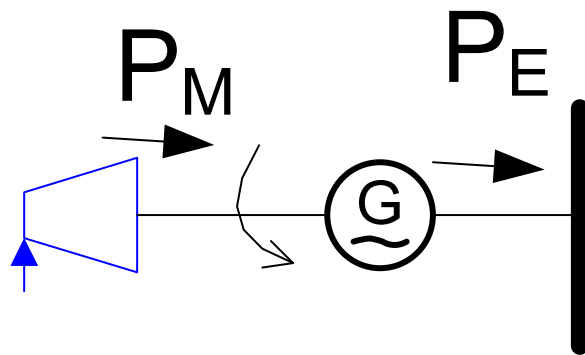


Střed kývání



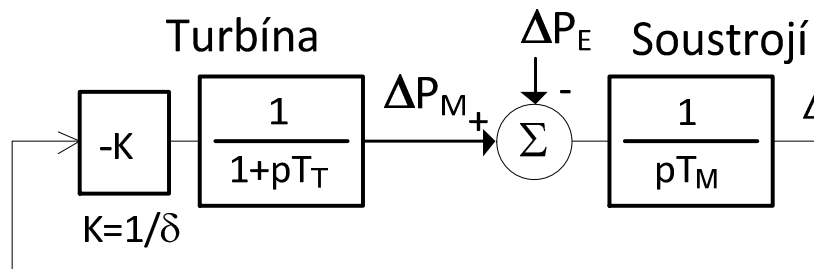
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = X_E \left\{ \left[\frac{j}{1 - a * e^{j\delta}} \right] - jm \right\}; a = \frac{E}{E_S}$$

Frekvenční stabilita

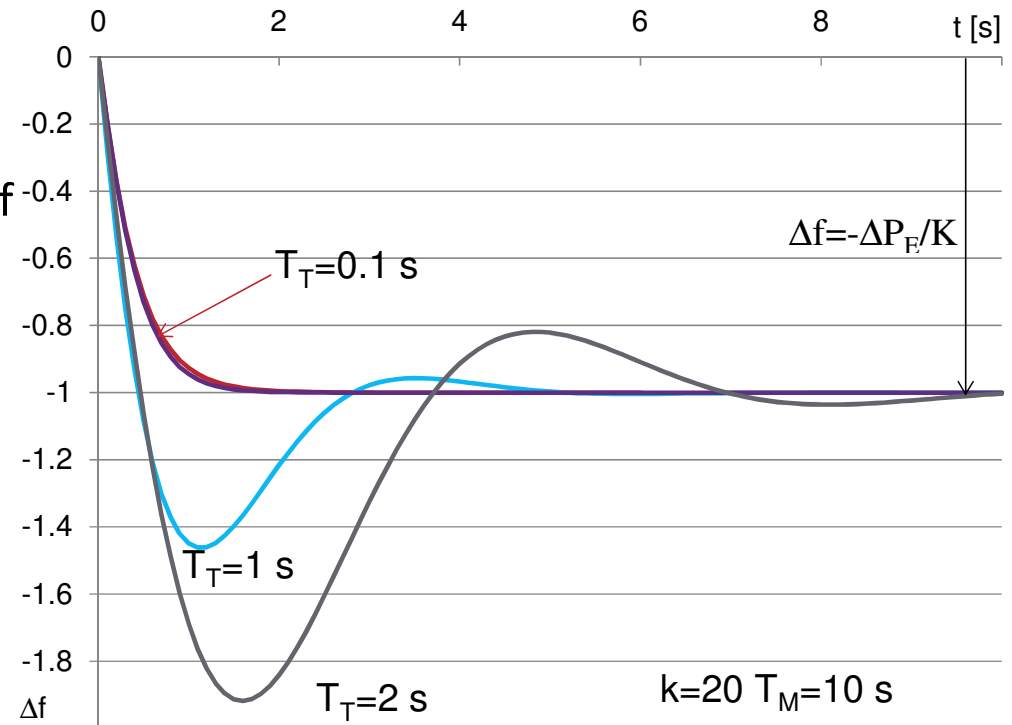
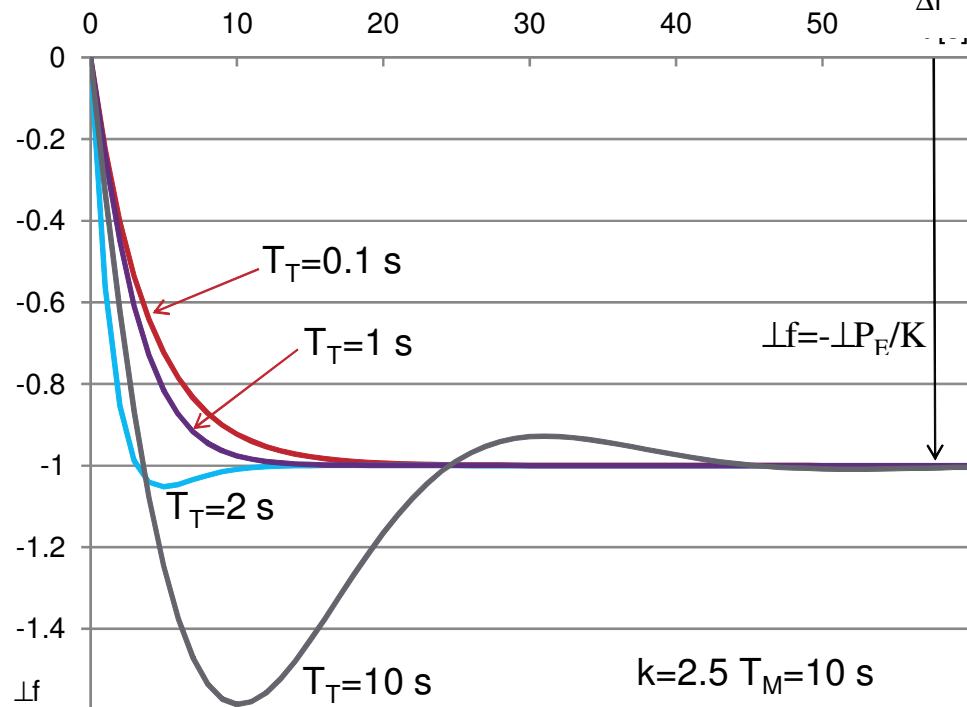


$$J \cdot \frac{dn}{dt} = M_{\text{mech}} - M_{\text{el}}$$

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



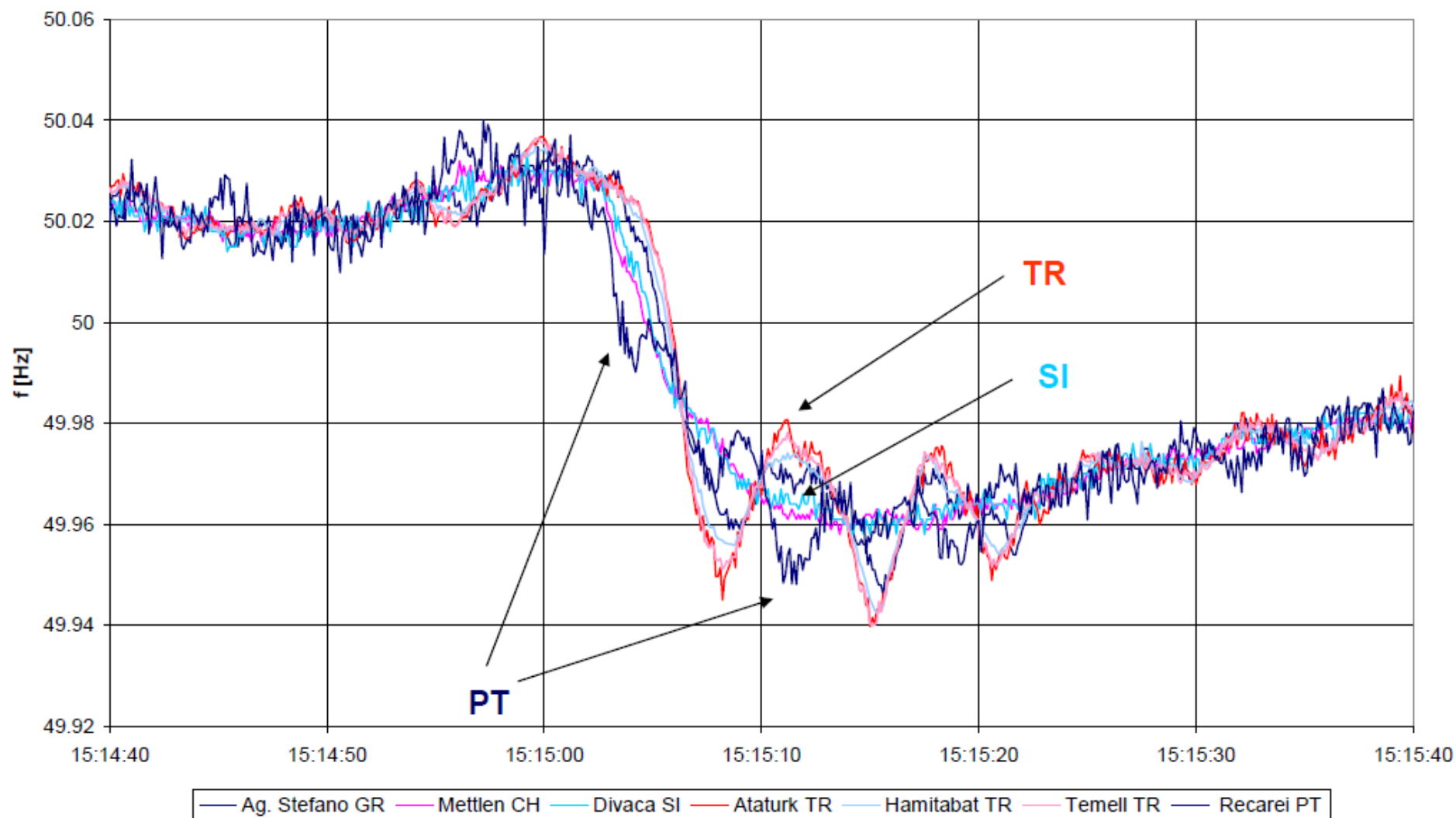
Synchronní propojení Primární regulace f



Ostrovní provoz
Regulace otáček

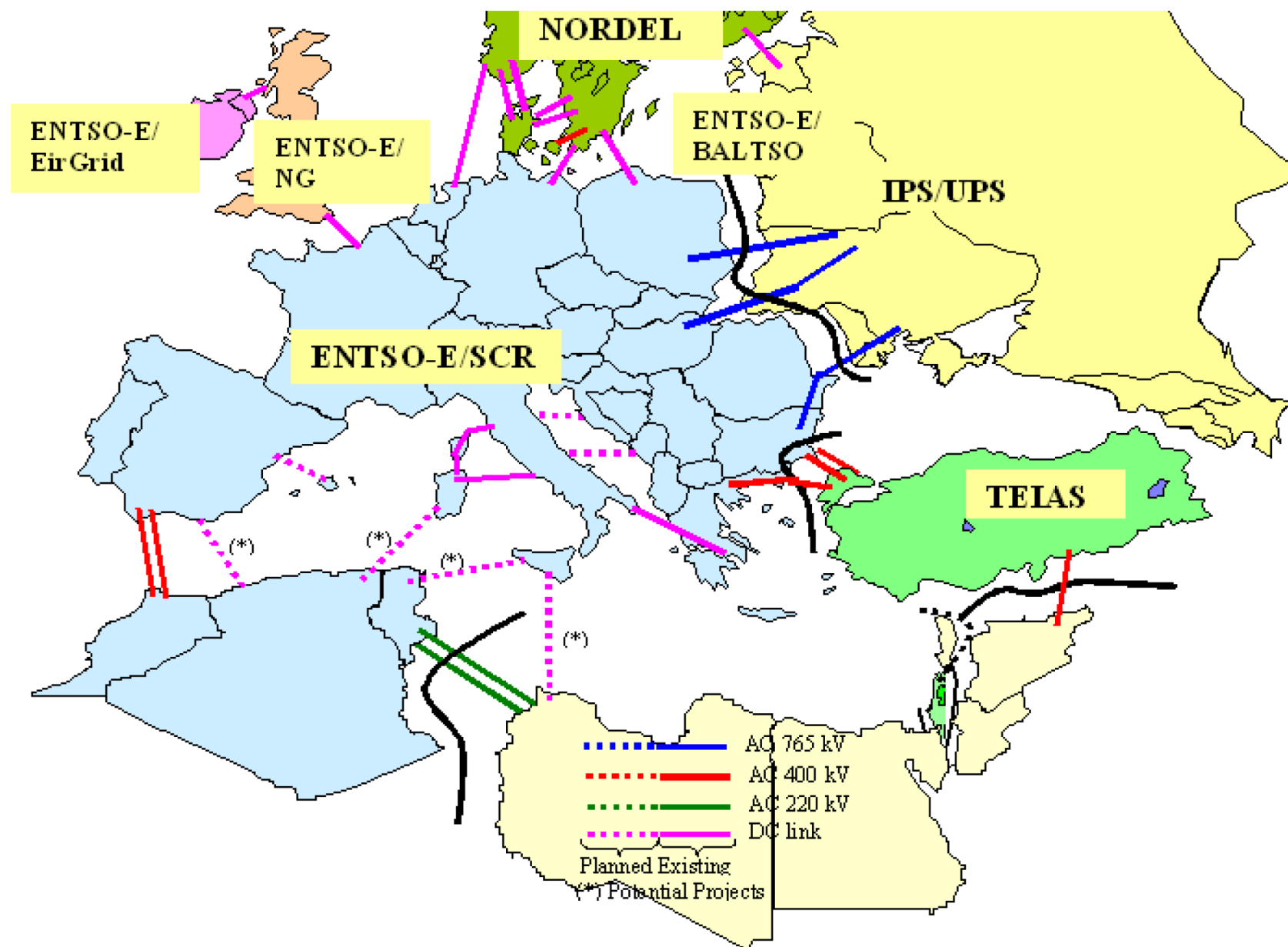
Průběh frekvence Δf
při deficitu ΔP_E

Výpadek 1500 MW s připojeným Tureckem

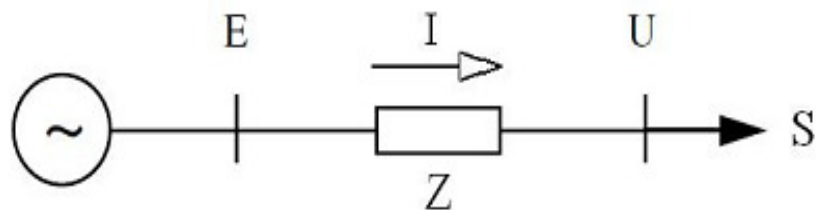


Zdroj: ENTSO-E SPD, Warsaw, Nov. 4th 2010, TEIAS System Connection, W. Sattinger, Swissgrid

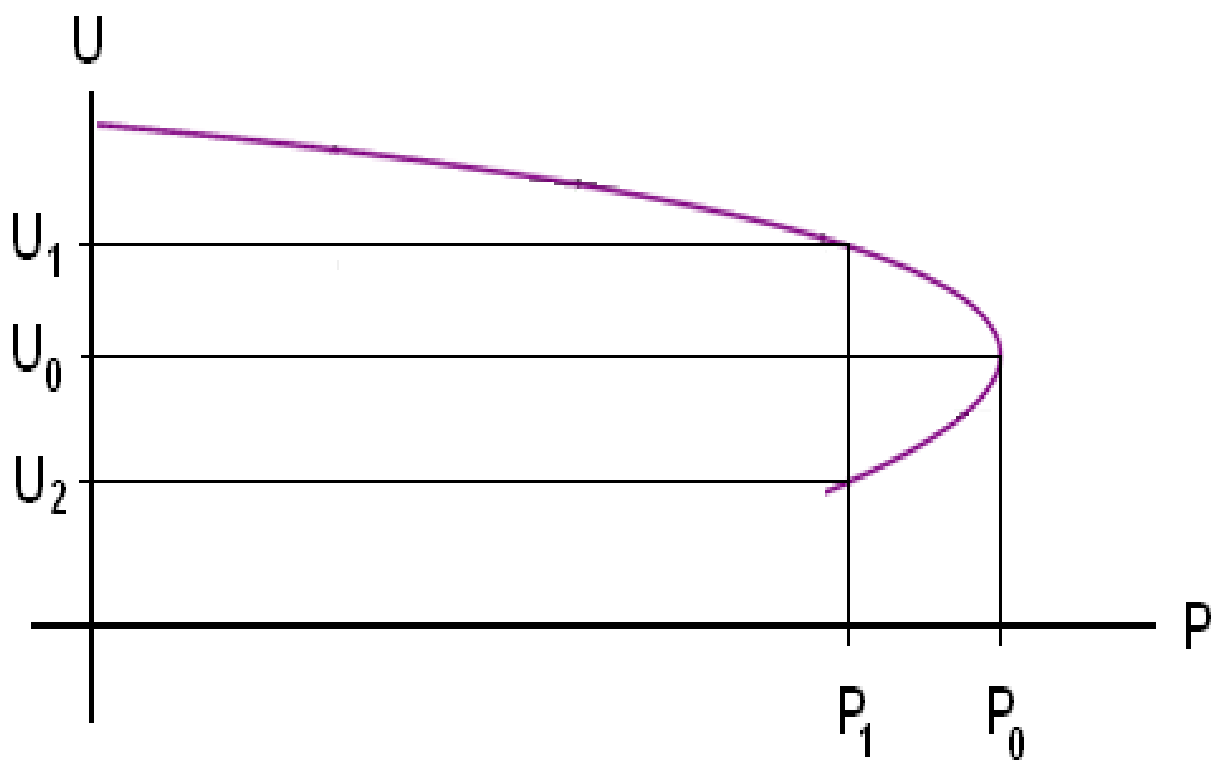
Rozšiřování kontinentálního propojení



Napět'ová stabilita - zjednodušený pohled



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



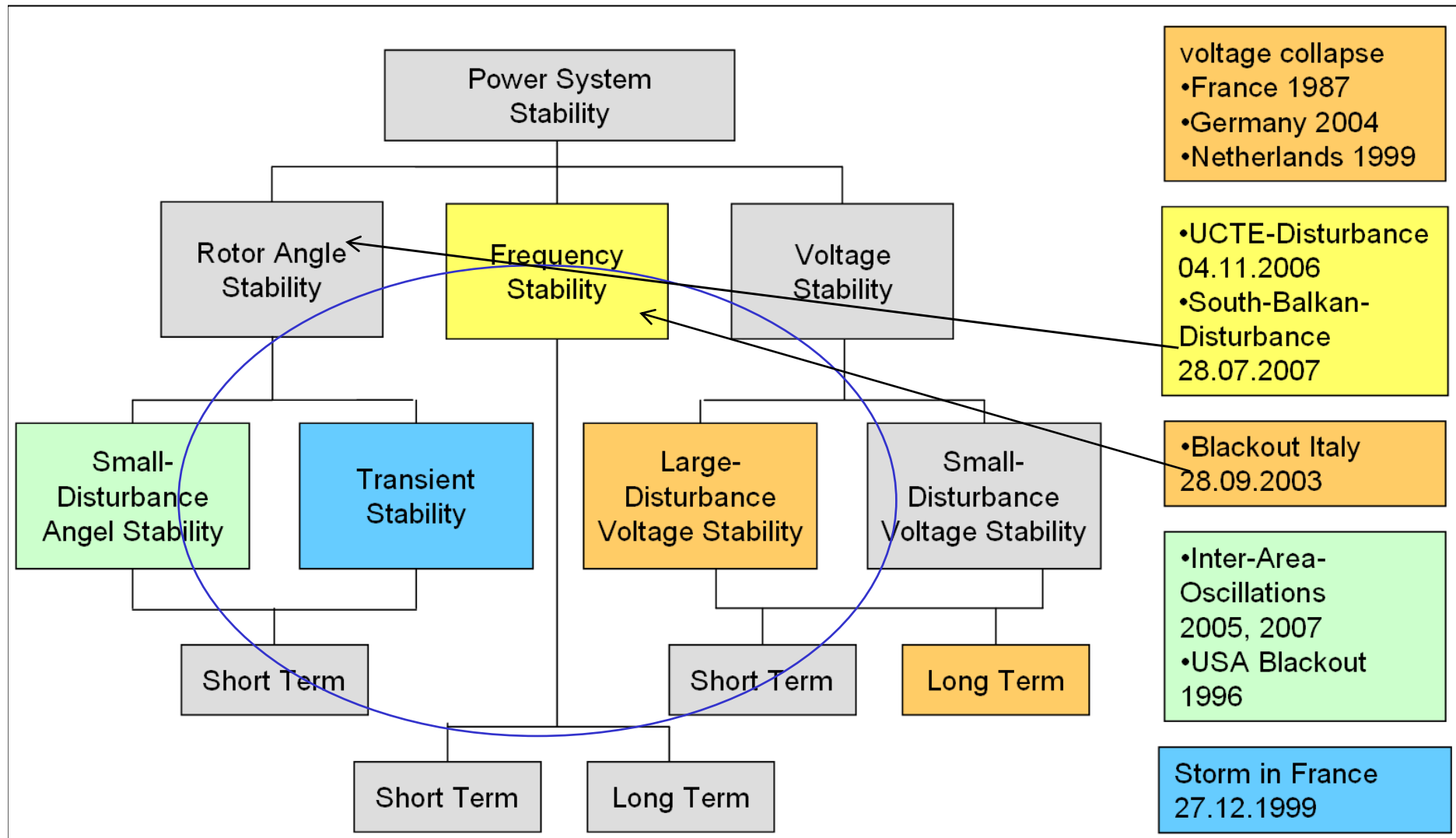
C
E
E



Napět'ová stabilita – reálné faktory

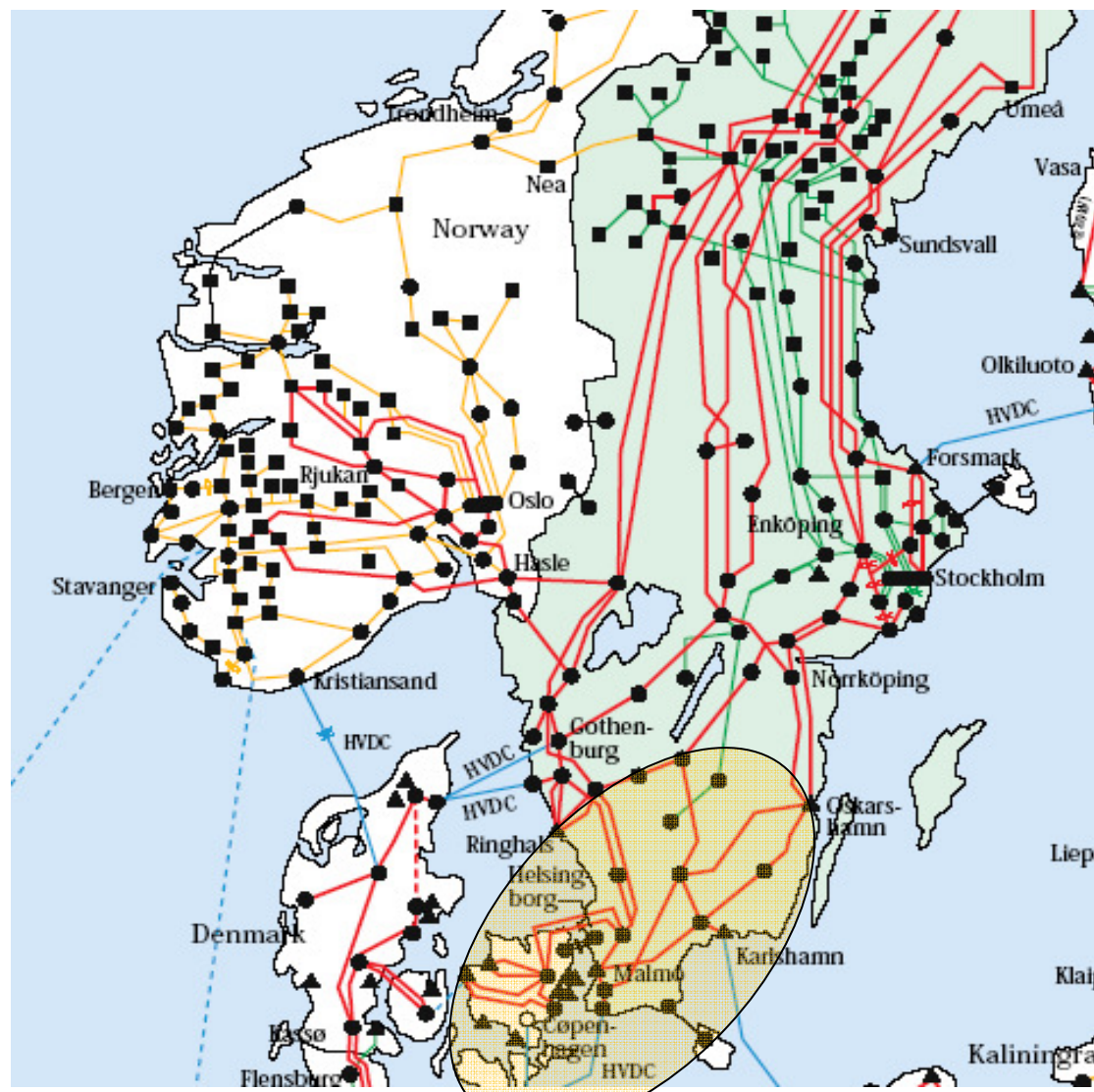
- zatížení asynchronní motory –lavina napětí,
- činnost hladinových regulátorů napětí (HRT)
- činnost podpět'ových ochran (na vlastní spotřebě)
- činnost omezovačů rotorového proudu v regulátorech buzení
-

Stabilita ES



Blackout již. Švédsko a vých. Dánsko

23.9. 2003

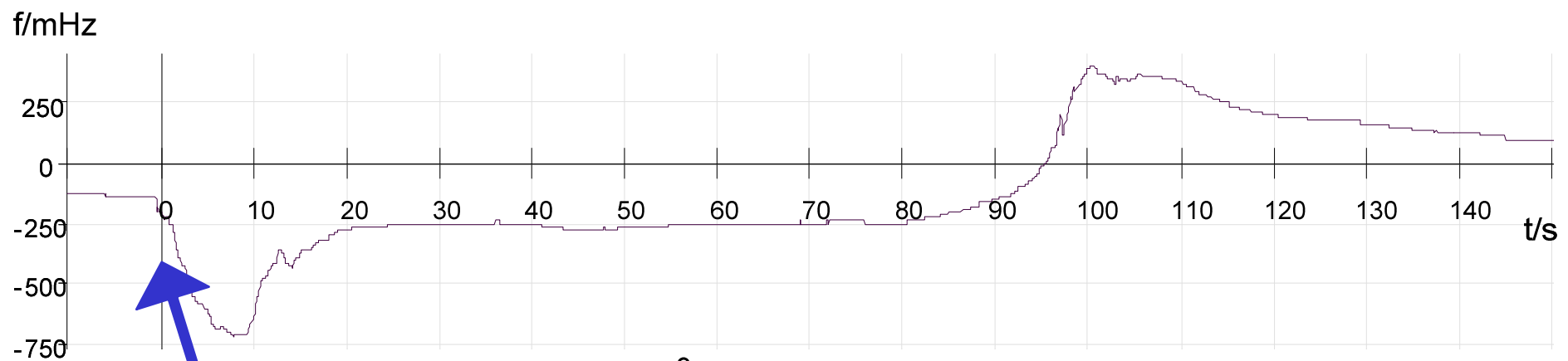
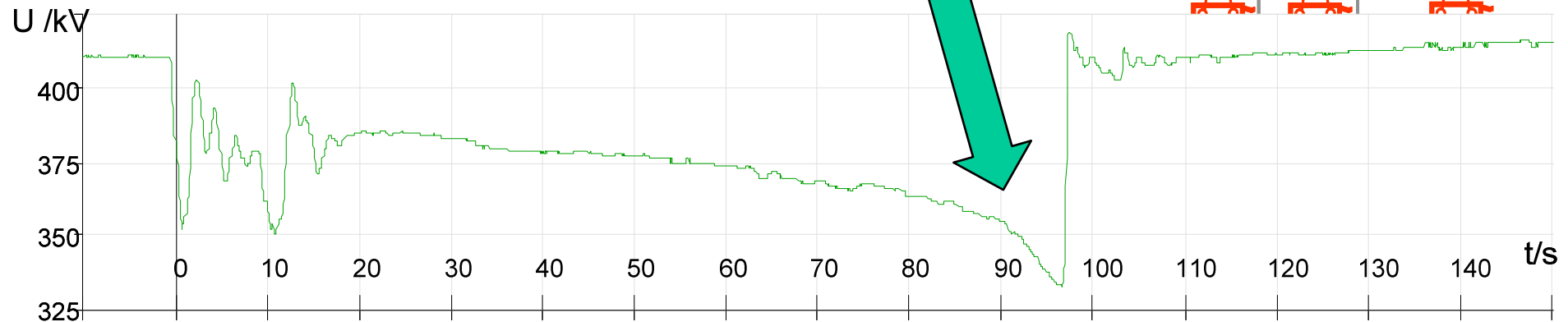
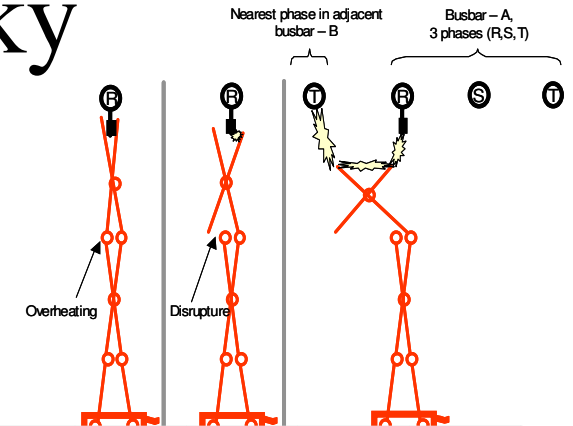


Zdroj: The black-out in southern Sweden and eastern Denmark, 23 September, 2003

Iniciační porucha – důsledky

Napěťový kolaps

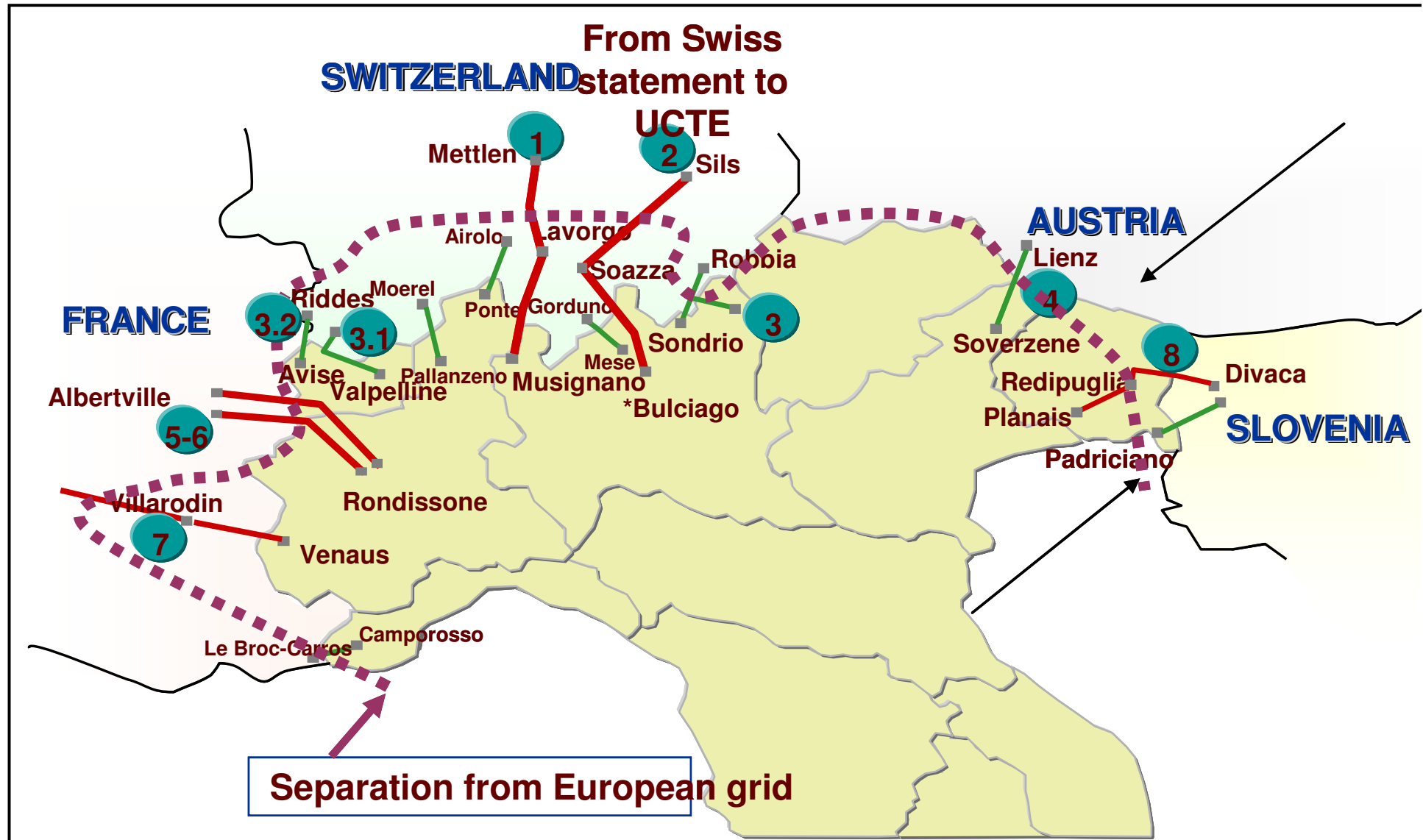
přepínání odboček traf



Výpadky bloků

Blackout Itálie

28.9. 2003

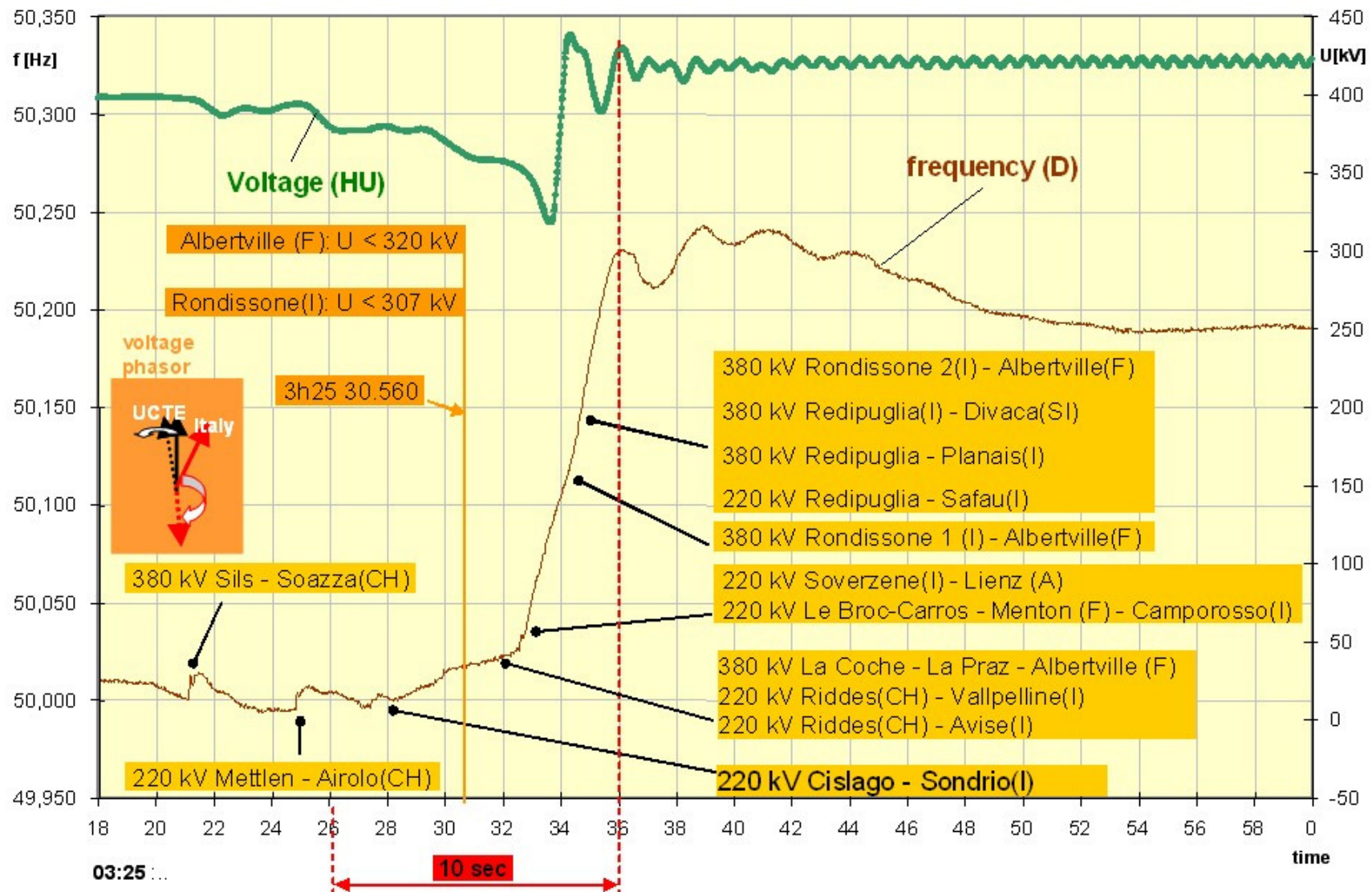


Blackout Itálie

f, U – Uchtelfangen (D) / Heviz (HU)

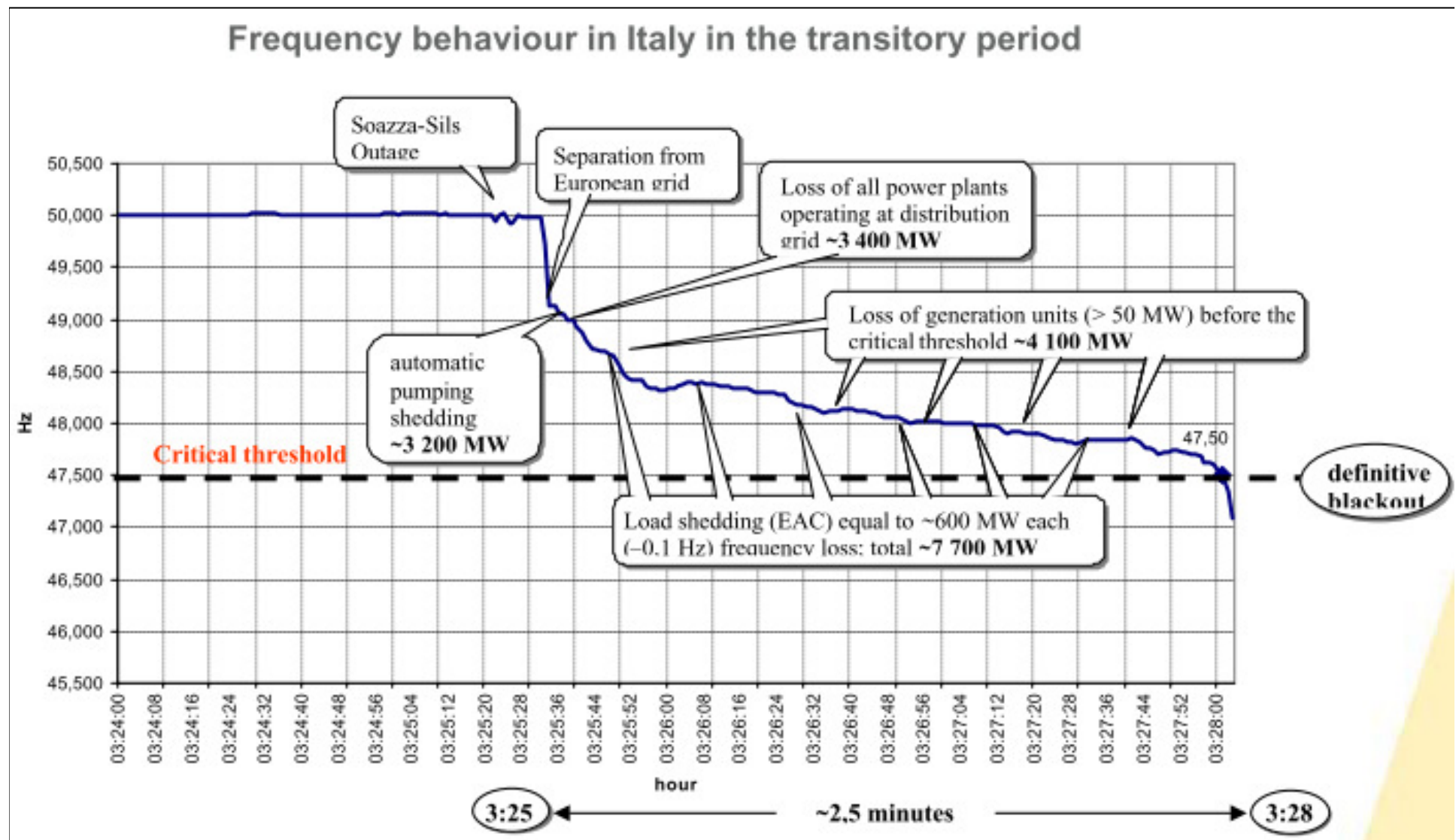
28.09.2003; 03:25 (UTC)

Indication of line trippings



Blackout Itálie

frekvenční kolaps



Napět'ový kolaps Polsko

26.6.2006

13:13 Slupsk HVDC link off, low auxiliary voltage

Ostroleka power plant:

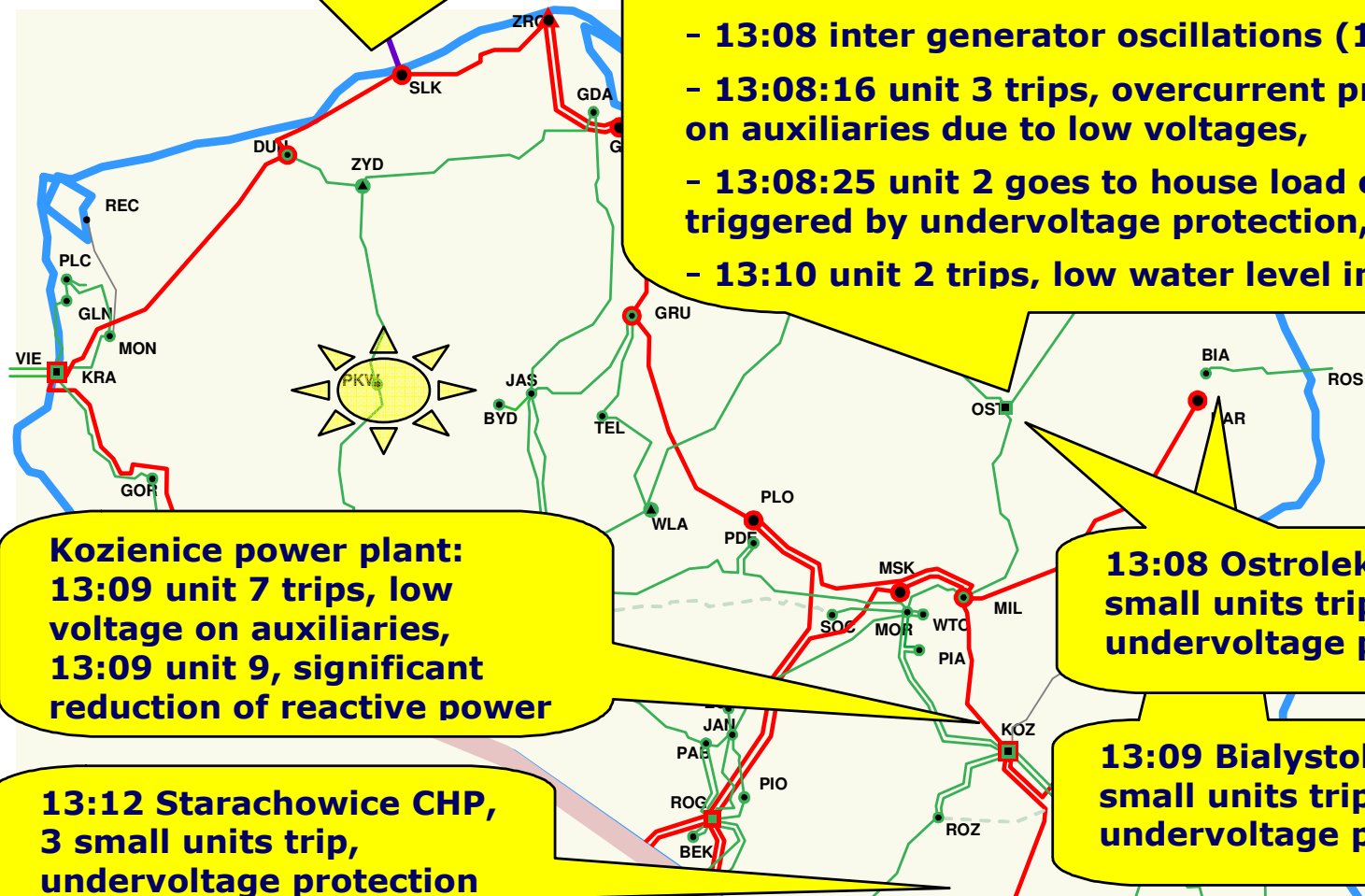
- 13:04 activation of limiters on unit 2,
- 13:08 inter generator oscillations (1 Hz),
- 13:08:16 unit 3 trips, overcurrent protection on auxiliaries due to low voltages,
- 13:08:25 unit 2 goes to house load operation triggered by undervoltage protection,
- 13:10 unit 2 trips, low water level in drum.

Kozienice power plant:
13:09 unit 7 trips, low voltage on auxiliaries,
13:09 unit 9, significant reduction of reactive power

13:08 Ostroleka CHP, small units trips, undervoltage protection

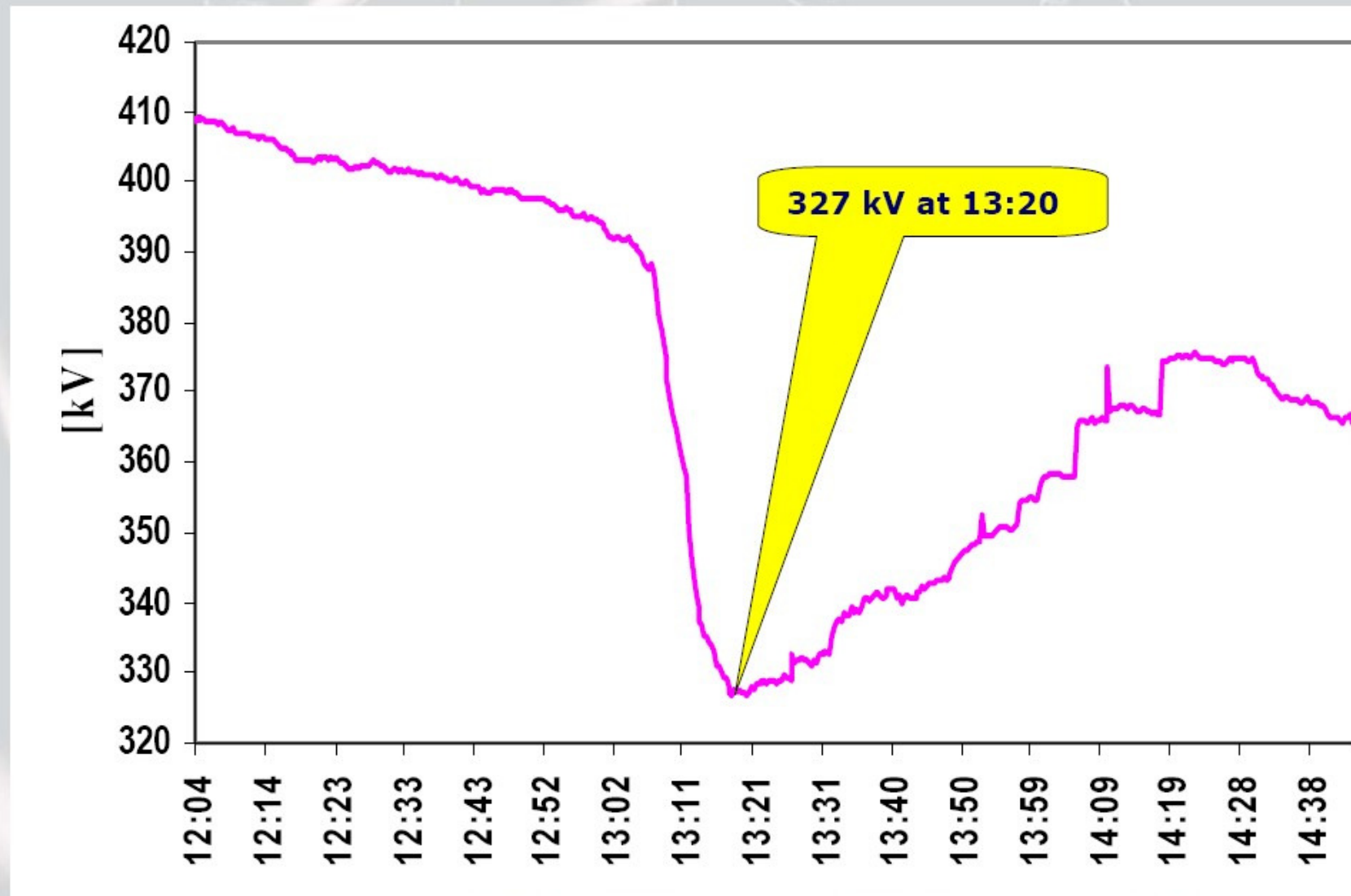
13:12 Starachowice CHP, 3 small units trip, undervoltage protection

13:09 Bialystok CHP, 2 small units trip, undervoltage protection



Napět'ový kolaps Polsko

Voltage in 400 kV substation Slupsk



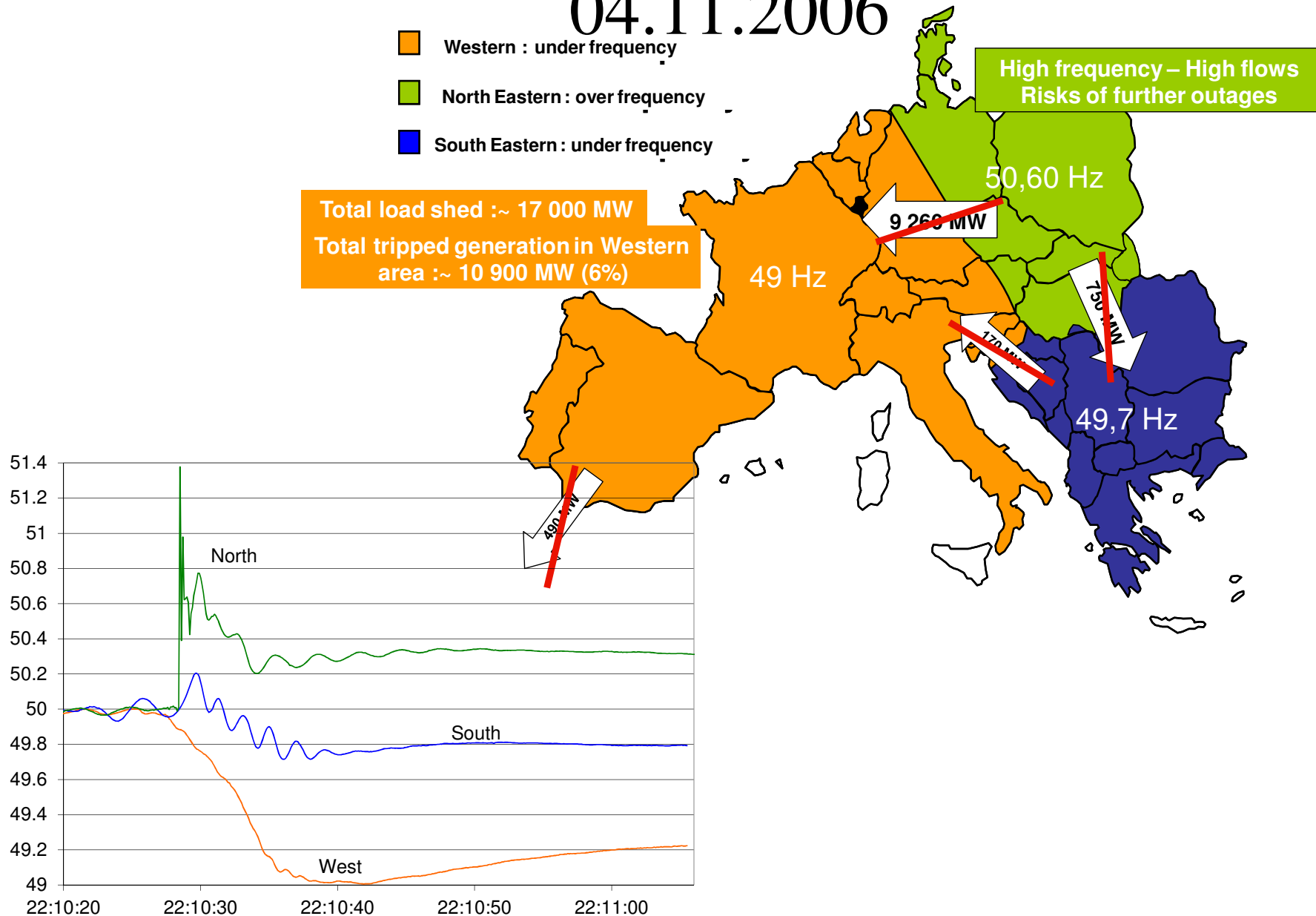
Rozpad propojení UCTE

04.11.2006

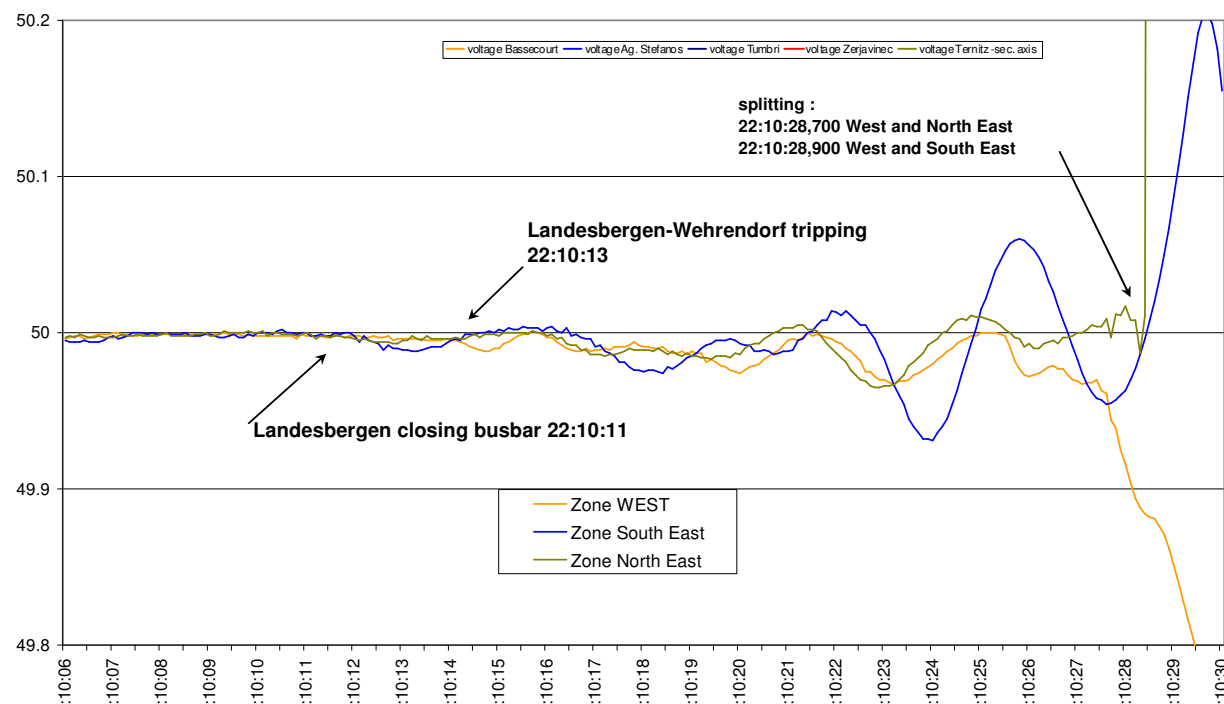
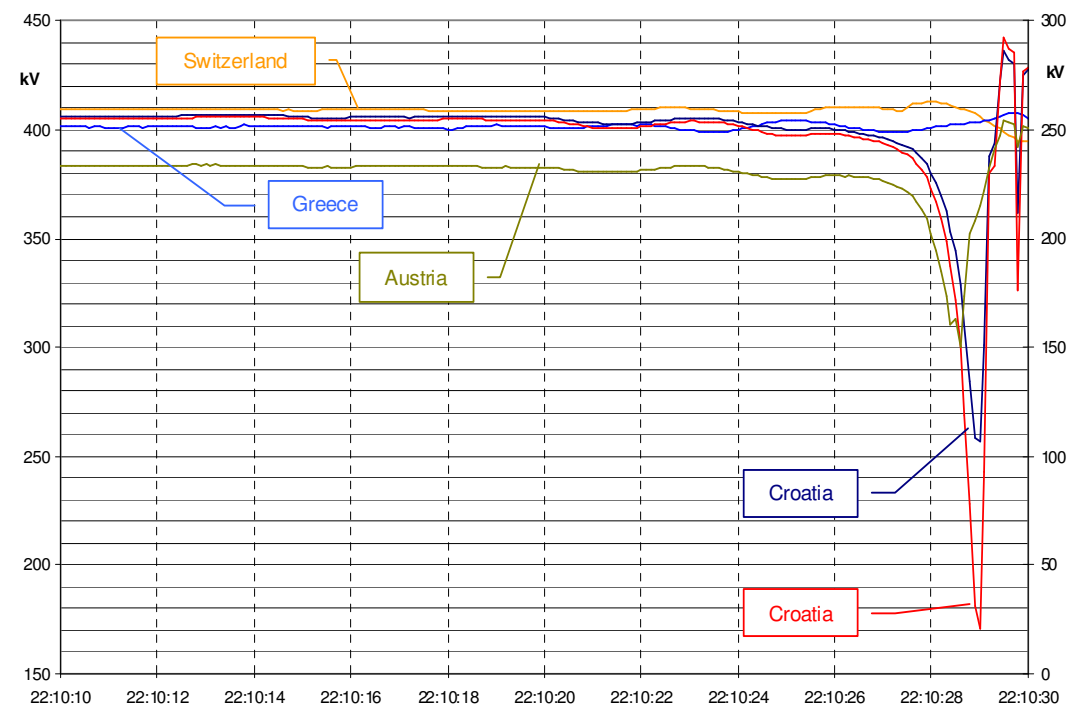
- Western : under frequency
- North Eastern : over frequency
- South Eastern : under frequency

High frequency – High flows
Risks of further outages

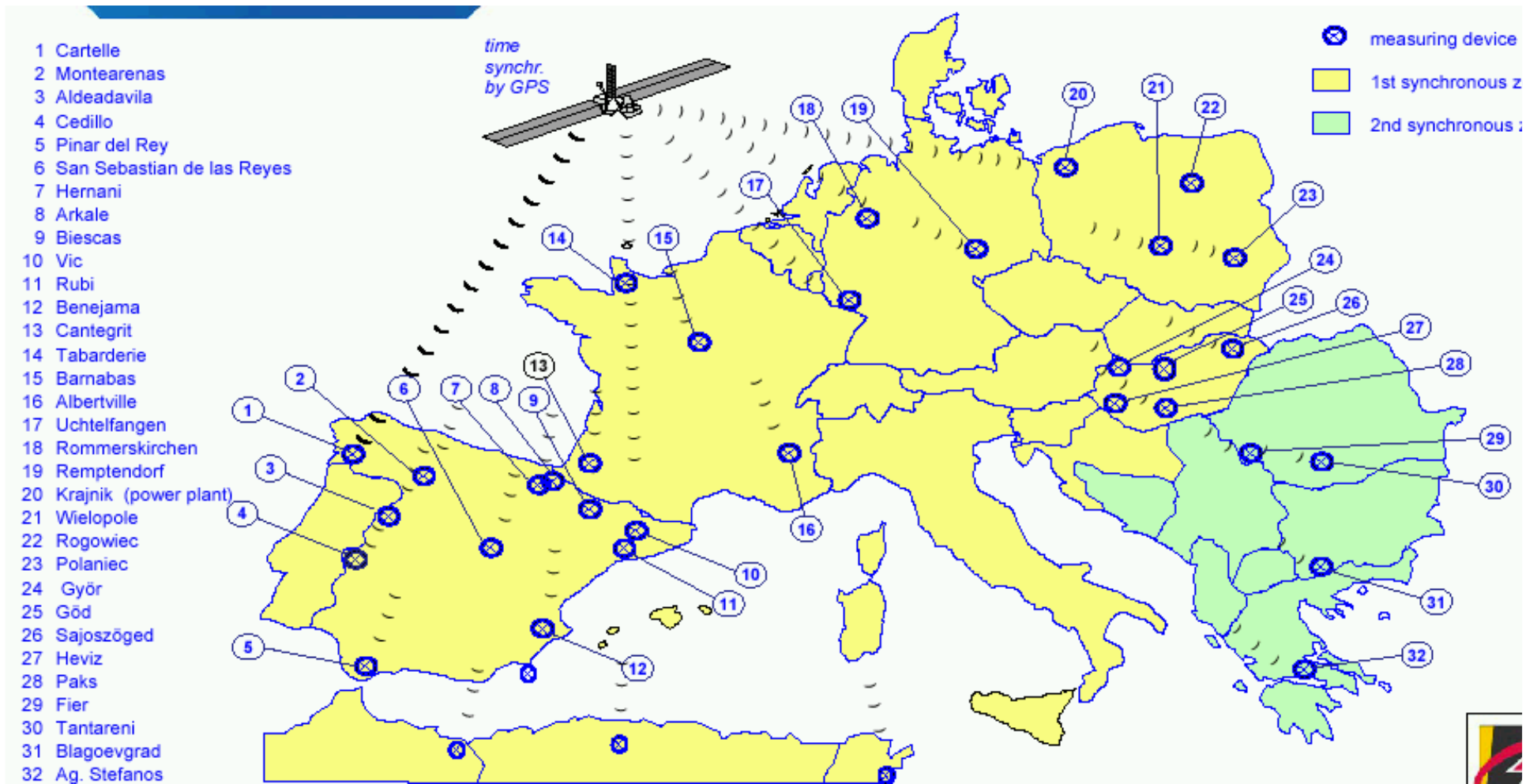
Total load shed : ~ 17 000 MW
Total tripped generation in Western
area : ~ 10 900 MW (6%)

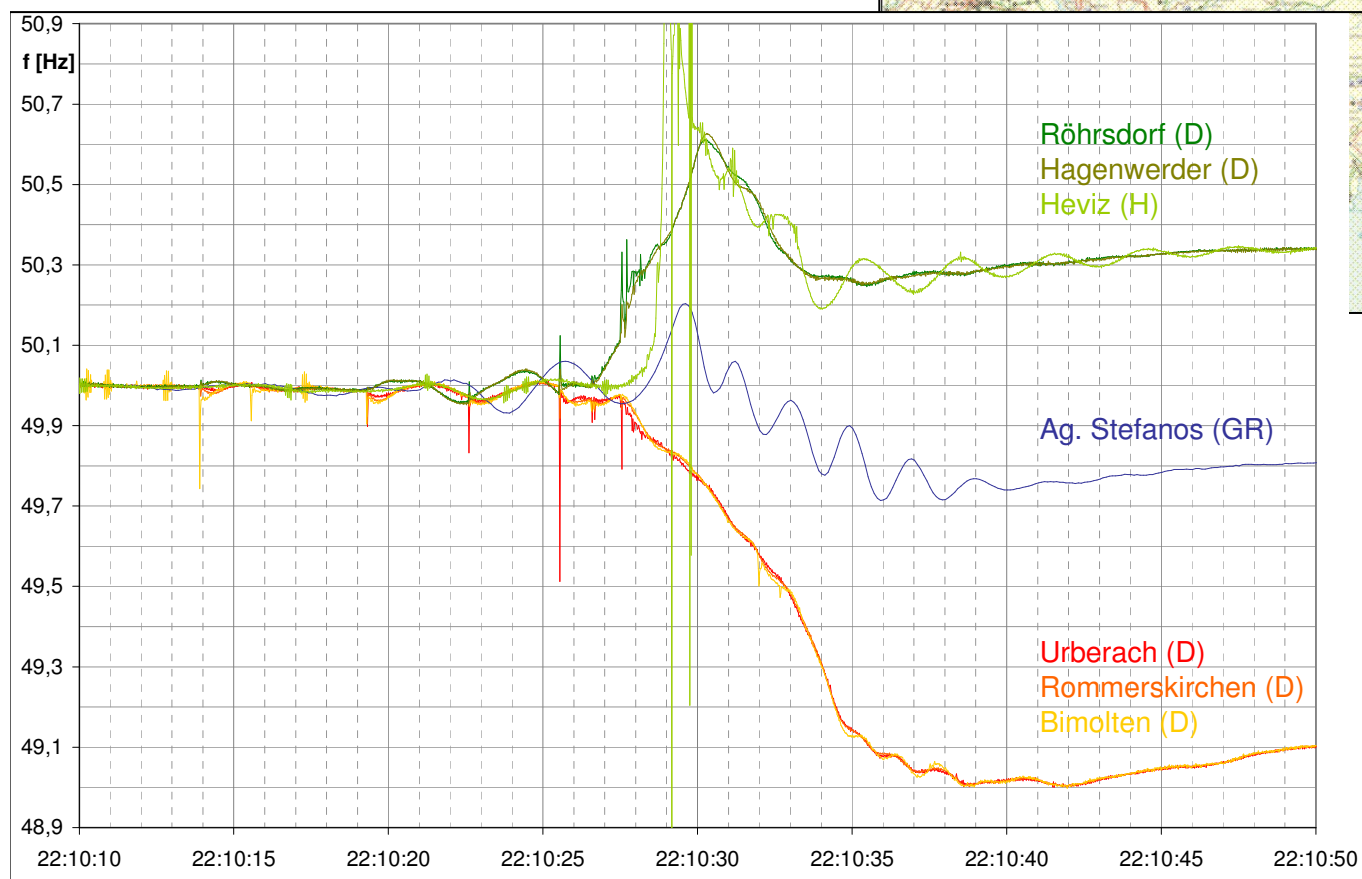
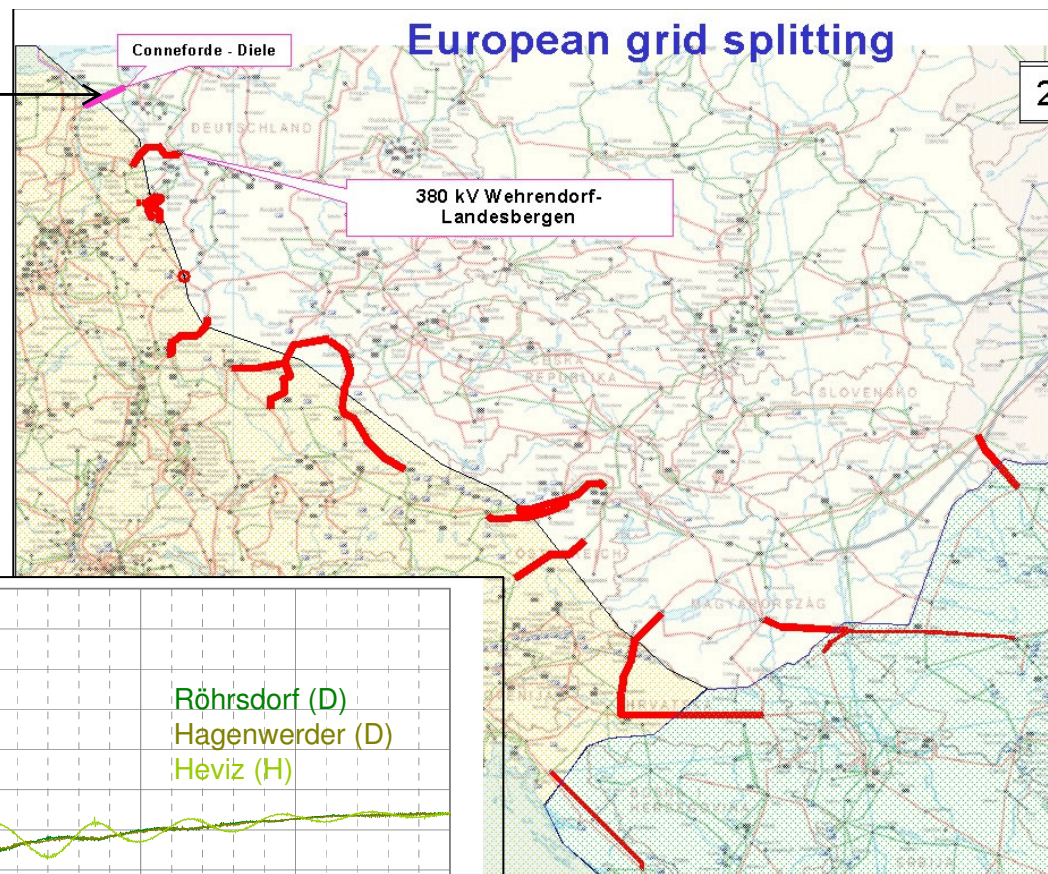


Rozpad propojení UCTE



WAMS





Měření WAMS

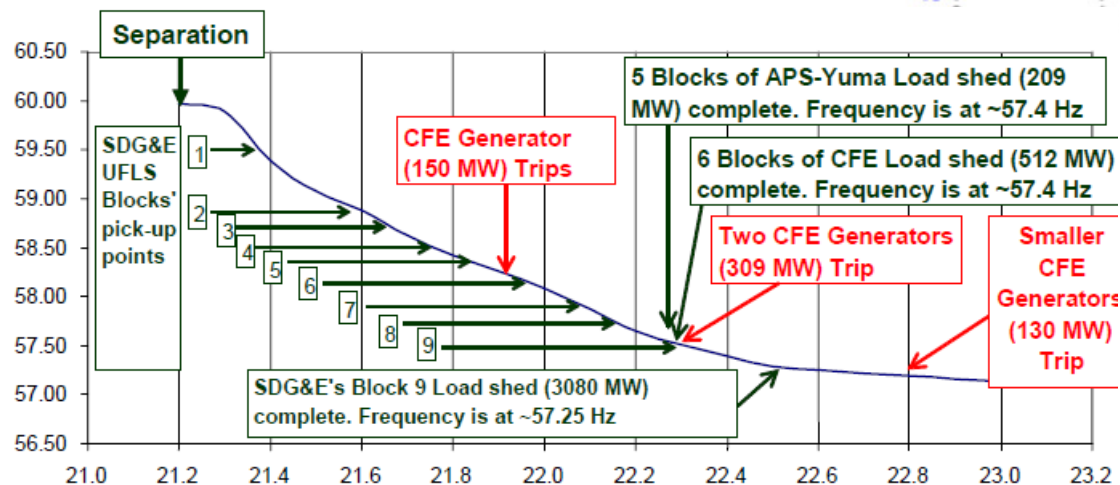
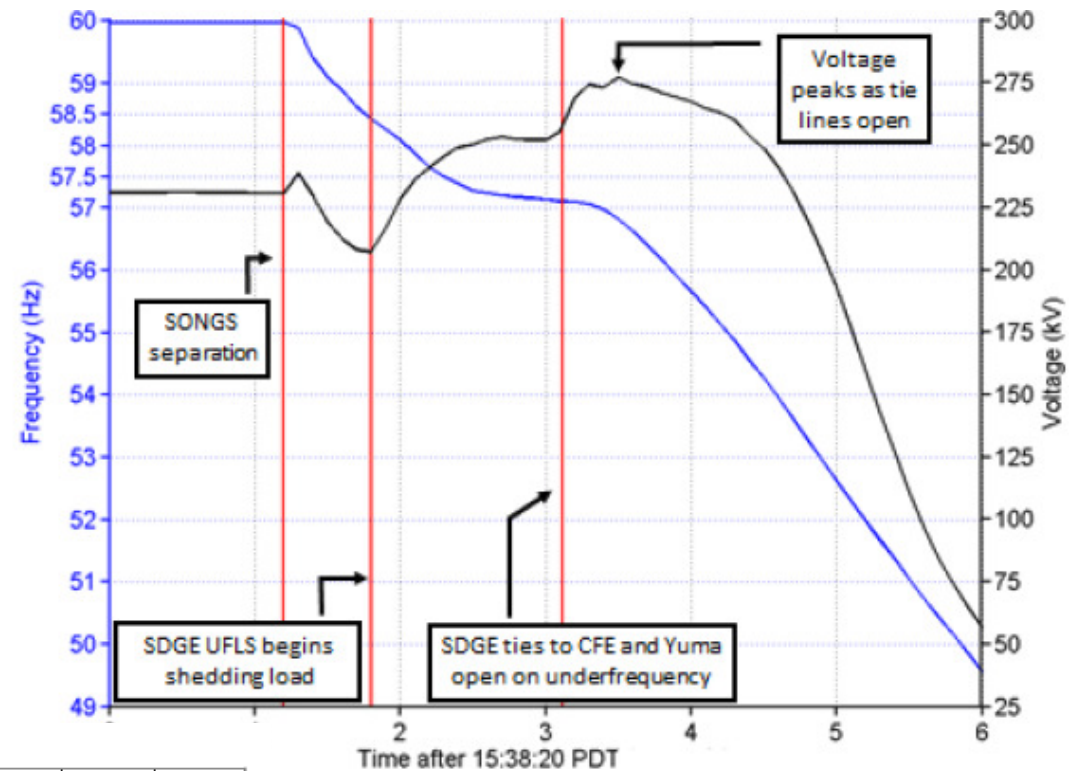
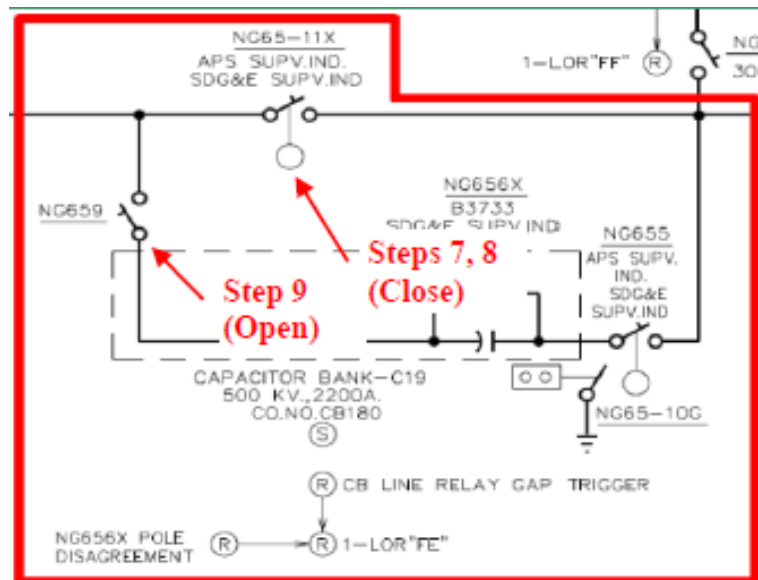
Blackout USA (Ar, Ca)+Mexiko

8.9. 2011



Zdroj: Arizona-Southern California Outages on September 8, 2011, FERC/NAERC report, April 201

Iniciační porucha – důsledky



Zdroj: Arizona-Southern California Outages on September 8, 2011, FERC/NAERC report, April 201

Dílčí závěr

- Přes pečlivé plánování a dodržování standardů spolehlivosti (kritérium N-1) může dojít k velké systémové poruše spojené se ztrátou stability, napět'ovým a frekvenčním kolapsem
- Proto je nutné mít vypracované Plány obrany proti šíření poruch:
 - nastavení distančních a jiných ochran
 - rychlé budící soupravy
 - blokování přepínání odboček traf při podpětí
 - frekvenční odlehčování zátěže
 - přepínání regulací turbíny
- Vyšetřování poruch zjednodušují systémy **WAMS**
- Analýzu rovněž usnadňují **sít'ové simulátory**

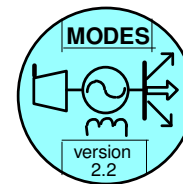
Určení programu MODES

Sít'ový simulátor - program umožňující sledovat dynamickou odezvu elektrizační soustavy při změnách v síti. Tyto změny mohou mít:

- poruchový charakter (výpadky elektrárenských bloků, zkraty a výpadky vedení)
- provozní charakter (činnost obsluhy na lokální i centrální úrovni, změny zatížení sítě).

K tomuto účelu program obsahuje knihovnu dynamických modelů jednotlivých prvků elektrizační soustavy (včetně prostředků pro modelování ochran a automatik).

Možnosti programu MODES



- zobrazuje časové průběhy proměnných (tzv. **grafika**)
- definuje časový sled **zásahů** (tzv. **scénář**)
- ukládá výsledky simulace (časové průběhy proměnných) do tzv. **uživatelských výstupních souborů**
- sleduje překročení mezí proměnných sítě (tzv. **kontrola**)
- ukládá zprávy o průběhu výpočtu do souborů (tzv. **hlášení**)
- provádí analýzu stavů sítě, primární a sekundární regulace f/P (tzv. **analýzy**)
- počítá střední kvadratické odchylky vybraných proměnných
- počítá veličiny zkratového proudu I_k , I_{km} , I_{vyp} , I_{ke}

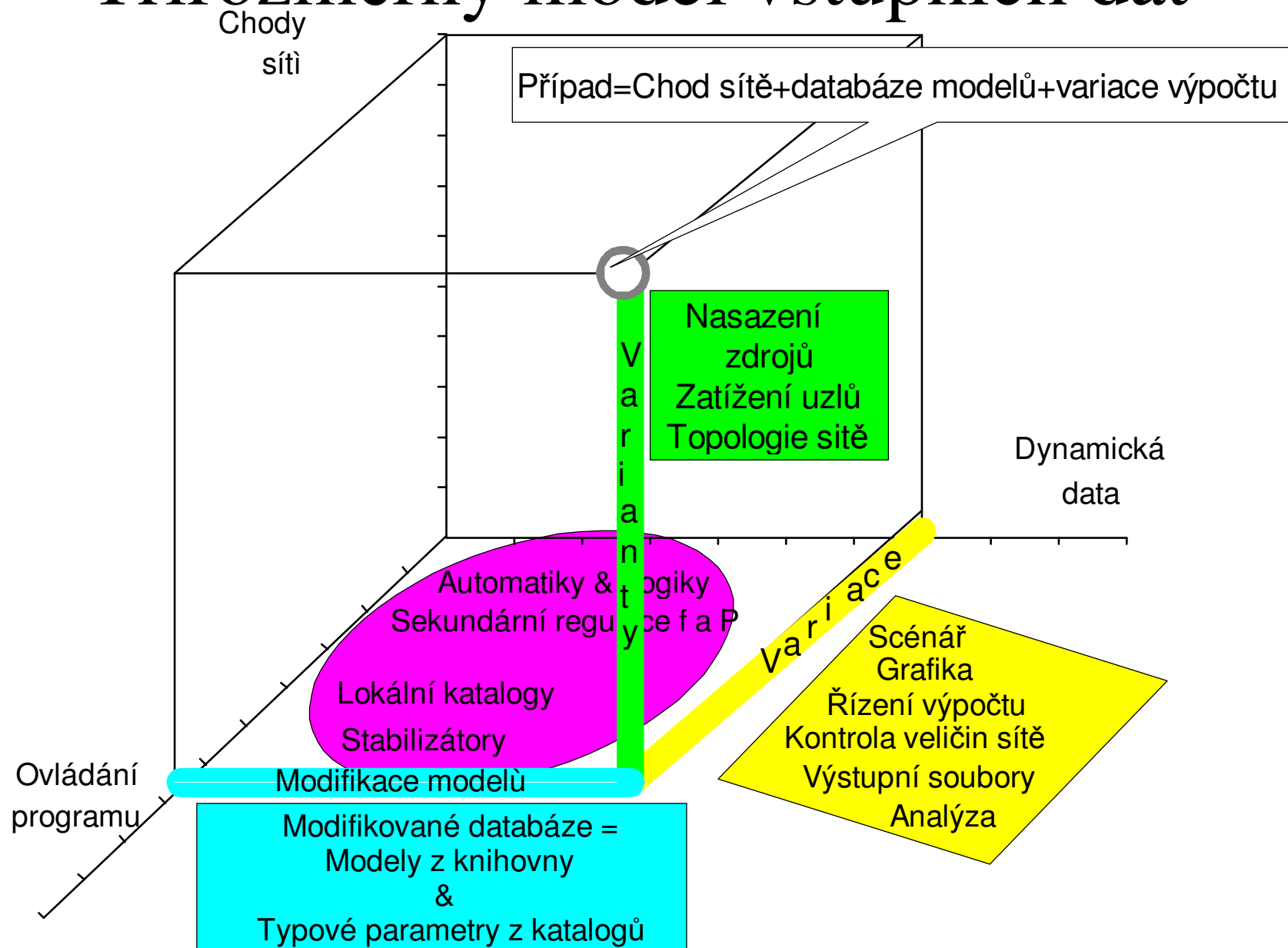
Interakci uživatele zprostředkuje Grafika

- informuje o jménu otevřeného projektu a případu
- hlásí poslední provedený zásah
- zobrazuje až 4 grafy s časovým průběhem až 7 proměnných v poměrných hodnotách
- ukazuje okamžité pojmenované hodnoty proměnných

Zásahy se zadávají předem pomocí Scénáře

Kod	Význam	Ident	Par1	Par2
'BRAN'	Mění stav větve -vypíná/zapíná oboustranně (0/1) odepíná v počátečním/koncovém uzlu (-4/4)	jmV	Istav	
'F_LO'	Rozpojení jedné/dvou fází(I=1/2)	jmV	I	
'TRAN'	přírůstek poměrného převodu trafa/odbočky pro 3VT	jmV	abs{dPt}[pj]/±1	
'STRC'	změna struktury regulátoru turbíny	jmB	I	
'EXCT'	změna zad. hodnoty regulátoru napětí/jal.výkonu/účinnku	jmB	dU/dQ[pj]/cosfi	-/-±1
'TURB'	změna zadané hodnoty regulátoru výkonu	jmB	dN/[pj]	
'LOAD'	změna výkonu zátěže v uzlu o dPzat a dQzat	jmU	dPzat[%]**	dQzat
'UNIT'	Zap.(Istavg=1) nebo vyp.(Istavg=0) vypínače bloku	jmB	Istavg	
'LFCB'	vyřazení(I=0)/zařazení (I=0)bloku do sek. regulace P/f	jmB	I	
'PUMP'	přechod do čerpadlového režimu pro 'HYDR' I=1	jmB	I	
'VALV'	aktivace/vypnutí rychlého zavření ventilu turbíny I=1/0	jmB	I	
'FREQ'	změna zadané hodnoty korektoru frekvence o df	jmB	df[pj]	
'SYNC'	synchronizace bloku	jmB	1	
'FOUL'	zkrat na větvi ve vzdálenosti od poč.uzlu Vzdal	jmV	Vzdal[%]	Xboc[Ω]
FSLG, FDLG, F_LL	jednopolový, dvoupolový zemní a dvoupolový zkrat na větvi ve vzdálenosti od poč.uzlu Vzdal	jmV	Vzdal[%]	Xboc[Ω]
'CLER'	odpojení zkratu I=3;zkratu+1 fáze I=1;Zkratu+3fází I=0, poč.uzlu I= -2; konc. uzlu I= 2	jmV	I	
'EXCH'	zavedení přidavného harm.signálu do regulátoru buzení	jmB	amplituda[pj]	ω[rad/s]
'TURH'	zavedení přidav. harm.signálu do regulátoru pohonu	jmB	amplituda[pj]	ω[rad/s]
'EXCS'	zavedení přidavného skok.signálu do regulátoru buzení	jmB	skok[pj]	
'TURS'	zavedení přidavného skok.signálu do regulátoru pohonu	jmB	skok [pj]	

Třírozměrný model vstupních dat



Uživatelské rozhraní MODMAN

Menu

Tlačítková lišta

Prohlížeč projektů a případů

Editor chodů sítě 

Editor modelů bloků 

Editor modelů uzlů 

Editor projektů 

Editor případů 

Dialogy 

Stavový řádek

Uživatelské rozhraní MODMAN umožňuje:

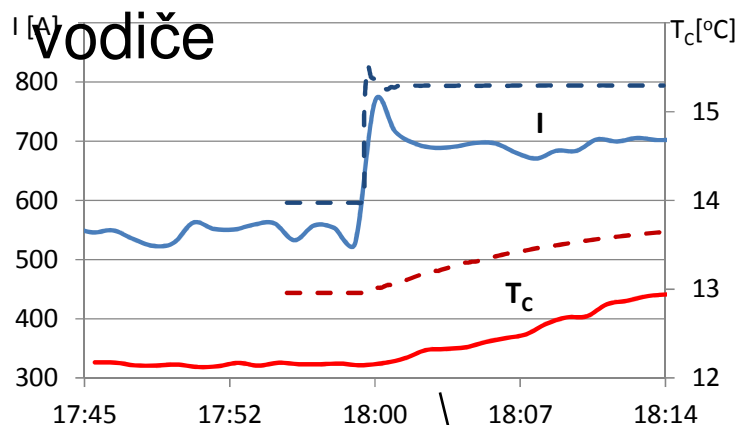
- orientaci v uložených projektech a případech
- správu a **projektů případů**
- vytváření nových **projektů a případů**
- spouštět programy pomocí tlačítek nebo z menu Spust'
- kontextovou a bublinkovou nápovědu
- editaci formulářů pomocí **dialogů a tvorbu variací**
- editaci chodů sítě Editorem chodů- **vytváření variant**
- editaci databází Editorem modelů-vytváření **modifikace**
- úpravy **typ. parametrů** dynamických modelů Editorem modelů
- přístup k **výstupním souborům** pomocí menu/tlačítek

Koncepce projektů a případů

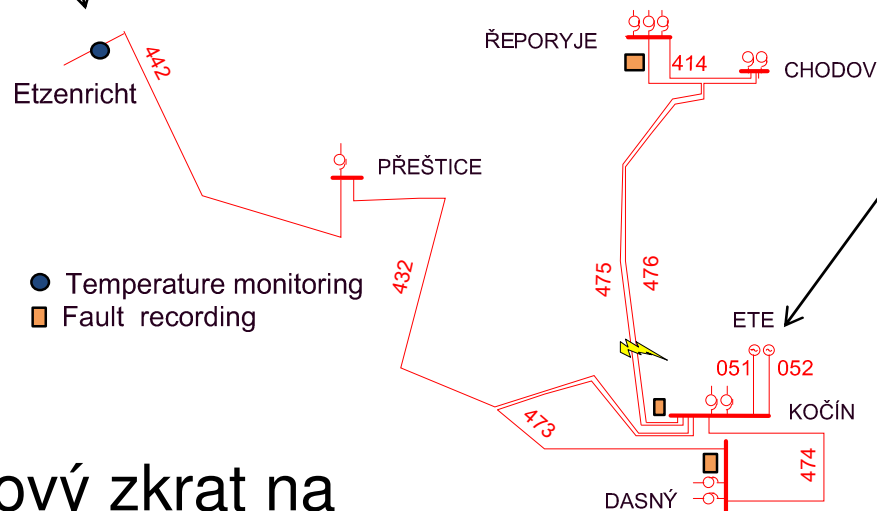
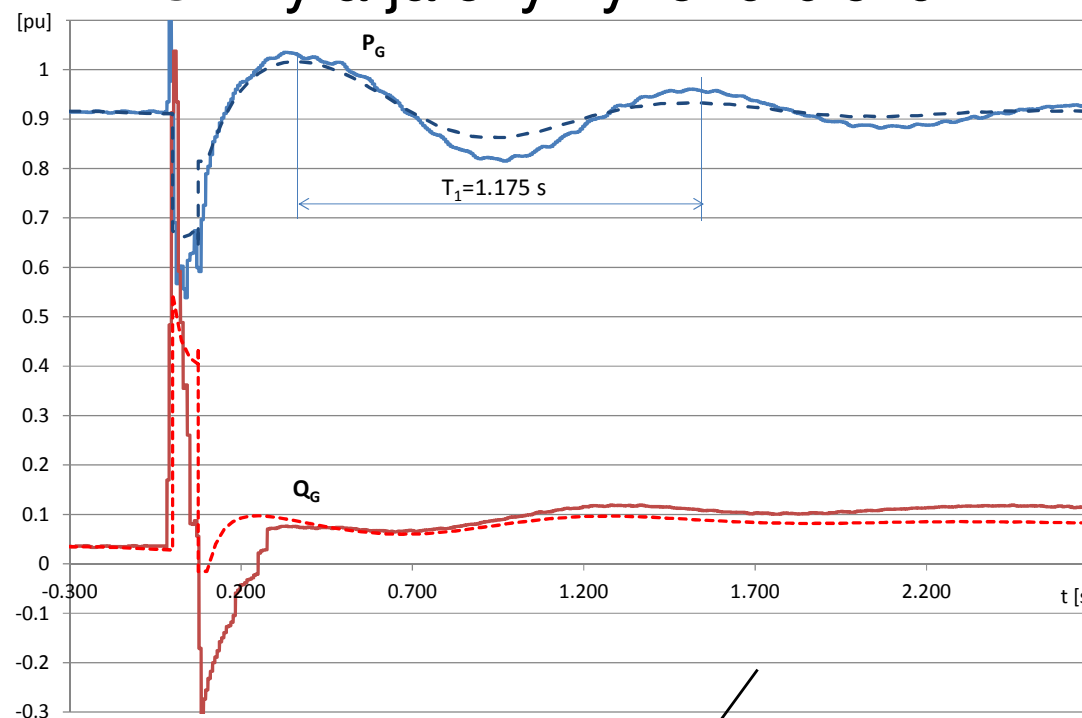
- **Případ** tvoří sada vstupních souborů jednotlivého výpočtu, který byl uživatelem specifikován a uložen jako případ do **archivu**, má svou identitu (jméno, data vytvoření a změn a jméno autora).
- Množina **případů** vytváří **projekt**. Data projektu jsou uloženy ve stejnojmenné složce v pracovním adresáři MODESu
- **Projekt** vznikne:
 - vytvořením nového **projektu**,
 - úpravou stávajícího **projektu** - součástí instalace jsou vzorové standardní projekty dokumentující schopnosti projektu (není vhodné je měnit, pokud s nimi pracujete, uložte je pod novým jménem), obsah standardních projektů je popsán v Průvodcích.
 - importem **projektu** (používá se pro výměny dat).

Verifikace – porovnání simulací s měřením

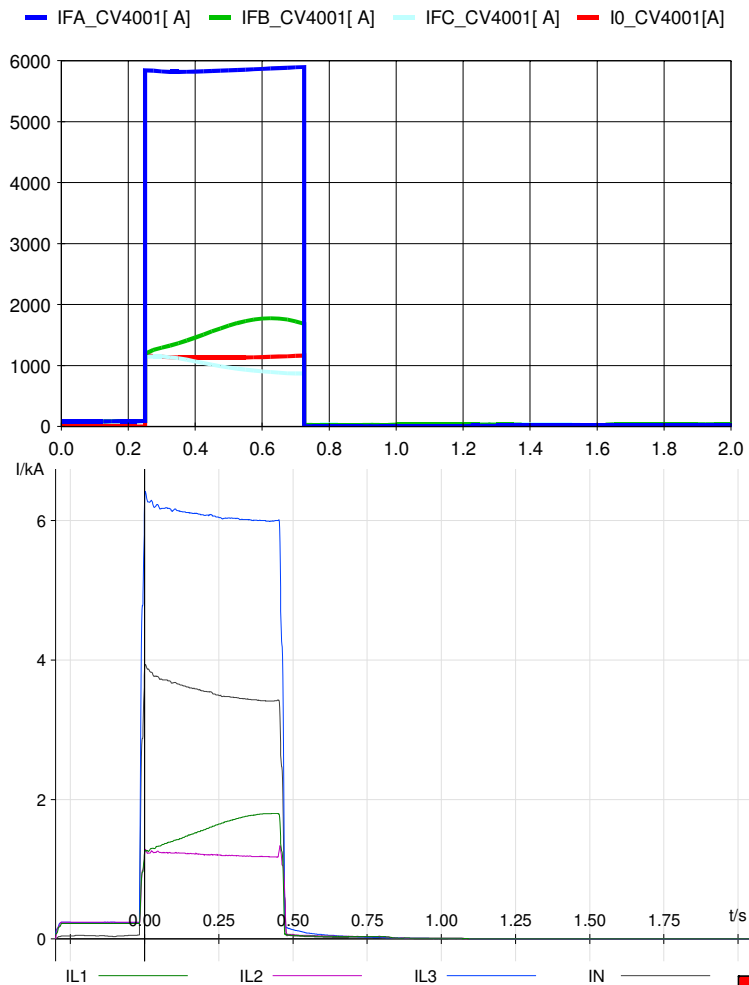
Simulace teploty



Činný a jalový výkon bloku

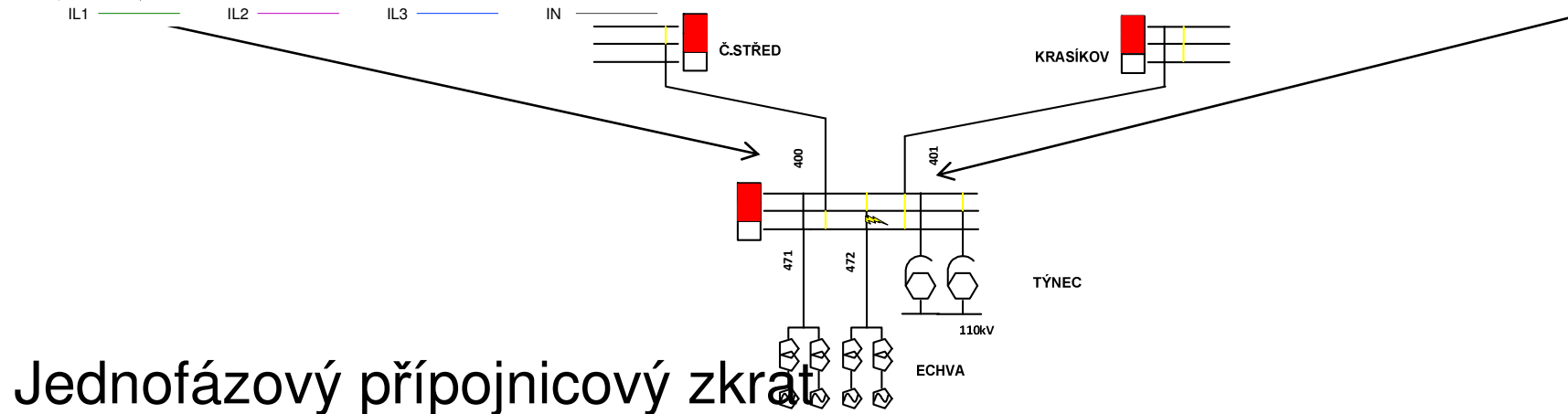
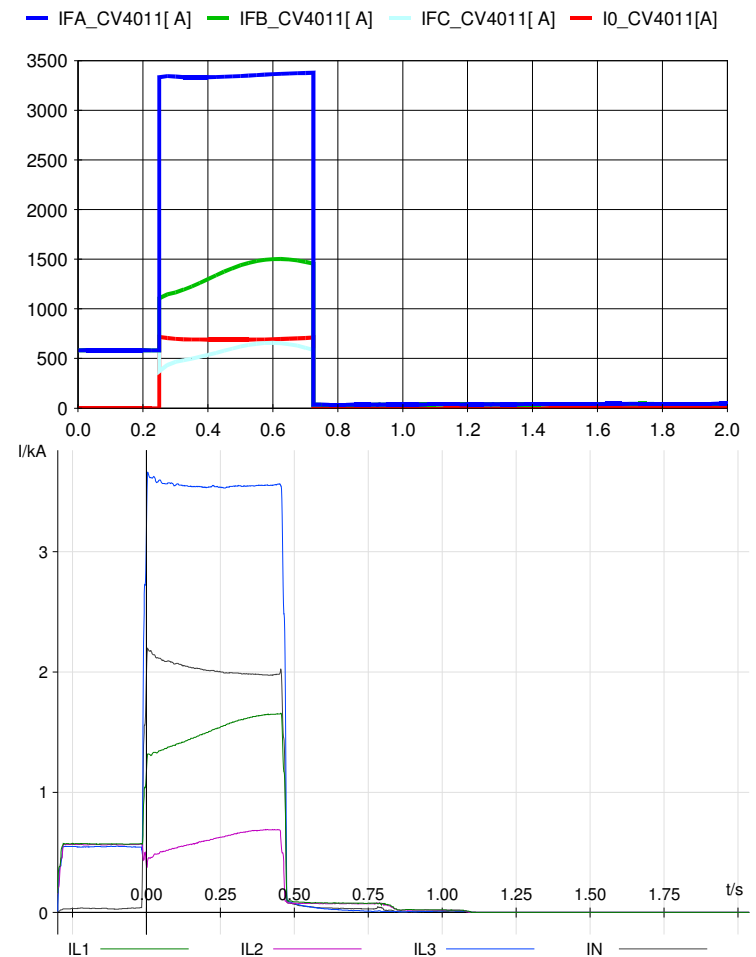


Dvojitý dvoufázový zkrat na

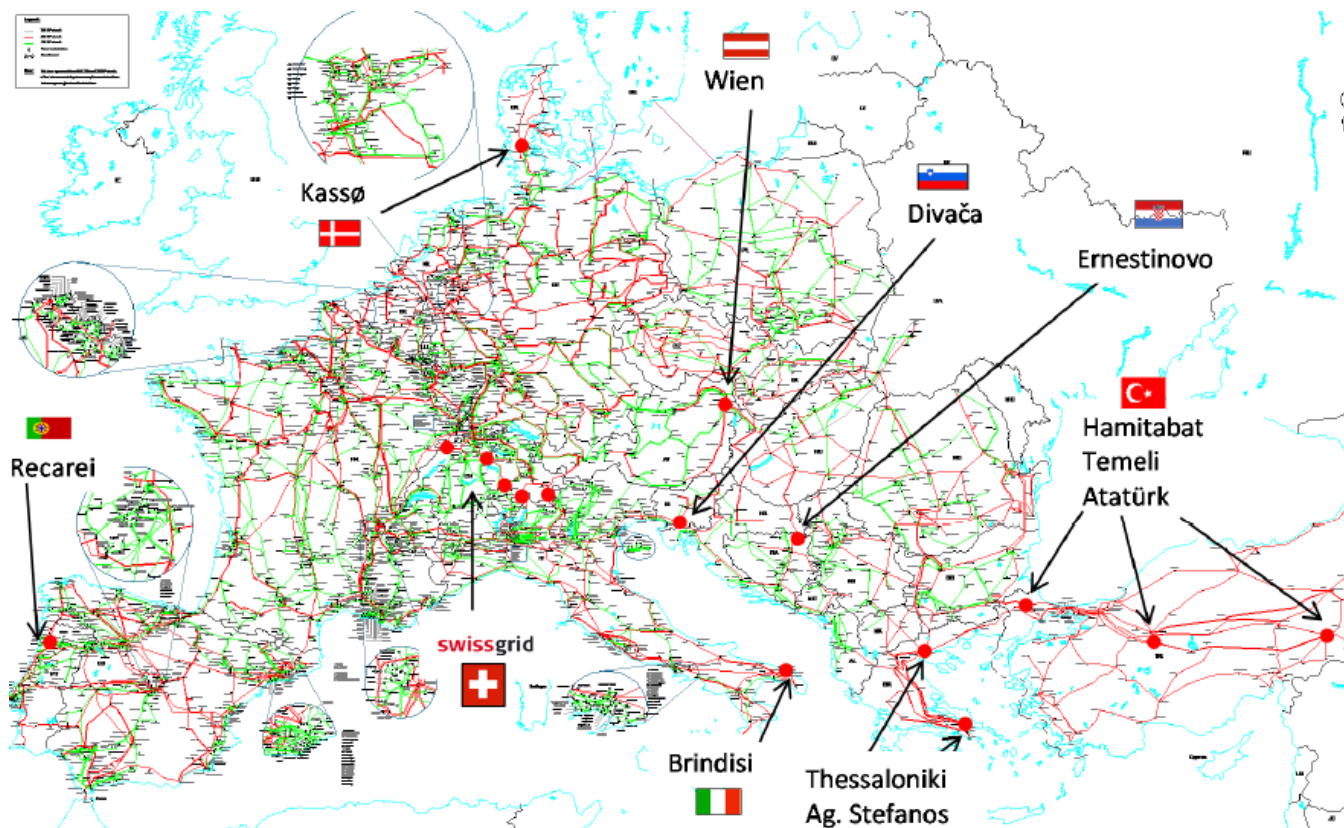


Simulac
e

Měření

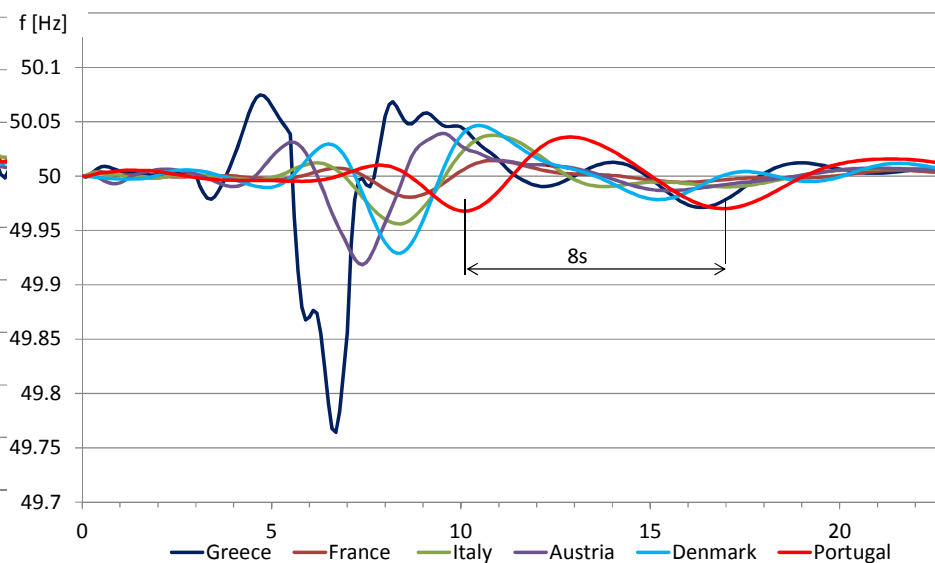
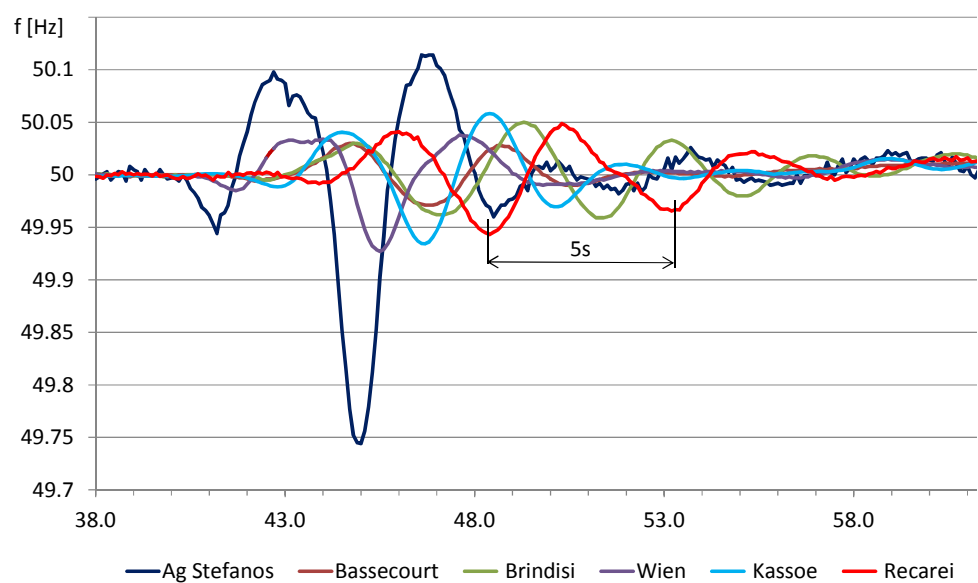


Jednofázový přípojnicový zkrat

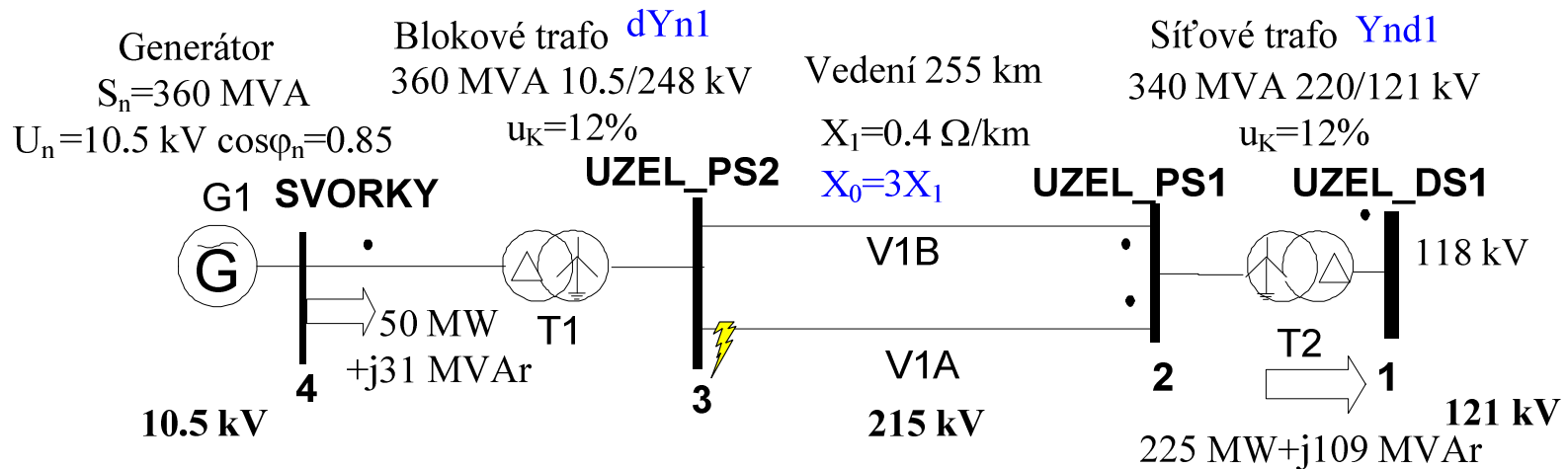


Měření

Simulace



Vytvoření vlastního projektu z výchozího chodu sítě standardního projektu NEW/SMIB-HAJ



Hájek Př.4-4 $x_d' = 0.235$ $T_m = 5.95 \text{ s}$ (na S_n)

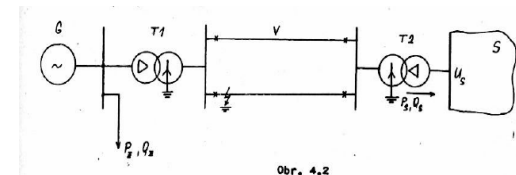
Hájek Př.4-5 $x_d = 1.4$ $x_q = 0.8$ $x_d' = 0.235$ $T_{d0}' = 5 \text{ s}$ $T_m = 5.95 \text{ s}$ (na S_n)

4 - 5

Uvažujeme stejnou část elektrizační soustavy jako v předchozím příkladu - viz obr. 4.2. Určete mezní vypínací čas pro dvoufázový zemní zkrat na začátku jednoho z přenosových vedení. Uvažujte přítomnost činnosti regulace buzení. Alternátor je s vyniklými póly a bez tlumiče. Průběh indukovaného elektromotorického napětí U_f je exponenciální. Strop budicího napětí je 2,5, časová konstanta buzení je $T_f = 0,35 \text{ s}$. Ohmické odpory a kapacity vedení zanedbejte. Parametry prvků systému přepočítané na základ $S_V = 255 \text{ MVA}$, $U_V = 215 \text{ kV}$ jsou:

$$G: \quad x_d = 1,188, \quad x_q = 0,679, \quad x_d' = 0,199, \quad x_2 = 0,139$$

$$T_m = 10,98 \text{ s}, \quad T_{d0}' = 5 \text{ s}$$



V síti sítě na obr. 4.2 vznikl na začátku jednoho z vedení tvrdý dvoufázový zemní zkrat. Alternátor dodává do sítě výkon $P_2 = 225 \text{ MW}$, $\cos \varphi_2 = 0,9$. Napětí sítě je tvrdé $U_2 = 118 \text{ kV}$. Vnitřní transformátorů mají uzemněný nulový bod. Jednotlivé prvky mají následující parametry:

Generátor:	$S_n = 360 \text{ MVA}$	$x_d' = 0,235$
	$U_n = 10,5 \text{ kV}$	$x_2 = 0,139$
	$\cos \varphi_n = 0,85$	$T_m = 5,95 \text{ s}$
Transformátor T1:	$S_n = 360 \text{ MVA}$	
	$u_K = 12\%$	
	$U_1 = 10,5 \text{ kV}$	
	$P_1 = 248 \text{ kV}$	
Transformátor T2:	$S_n = 340 \text{ MVA}$	
	$u_K = 12\%$	
	$U_2 = 220 \text{ kV}$	
	$P_2 = 121 \text{ kV}$	
Vedení:	$l = 255 \text{ km}$	
	$X_l = 0,4 \Omega/\text{km}$	
	$X_0 = 3X_l = 1,2 \Omega/\text{km}$	
Zátěž:	$P_2 = 225 \text{ MW}$	
	$\cos \varphi_2 = 0,9$	

Určete maximální možnou dobu pro vypnutí zkratu. Zanedbejte činné odpory a zatížení vedení během poruchy. Uvažujte $U_f' = \text{konst.}$ během celého přechodného děje. Výpočet proveďte v poměrných jednotkách, kde $S_V = 255 \text{ MVA}$
 $U_V = 215 \text{ kV}$