



Ostrovní provoz BlackOut

Ivan Petružela



Osnova

- **Frekvenční plán**
- **Ostrovní provoz**
- **Frekvenční kolaps v rovině (f,P)**
- **Obnovení frekvence pomocí frekvenčního odlehčování**
- **PpS Ostrovní provoz**
- **BlackOut Itálie**
- **BlackOut USA**



Bilanční rovnice ES

- V každý časový okamžik musí být v ES udržována rovnováha mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

$$\vec{S}_v(t) = \vec{S}_s(t) + \vec{S}_z(t) + \vec{S}_a(t)$$

- Obecná pohybová rovnice rotující hmotnosti je dána vztahem

$$J \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = M_h - M_b$$

- kde je

J – moment setrvačnosti roztočených hmot

B – součinitel tlumení

ω – úhlová rychlost

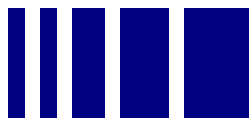
M_h – hnací moment, který je úměrný výkonu turbín

M_b – brzdny moment, který je úměrný zatížení ostrovní soustavy (výkonu spotřebičů)

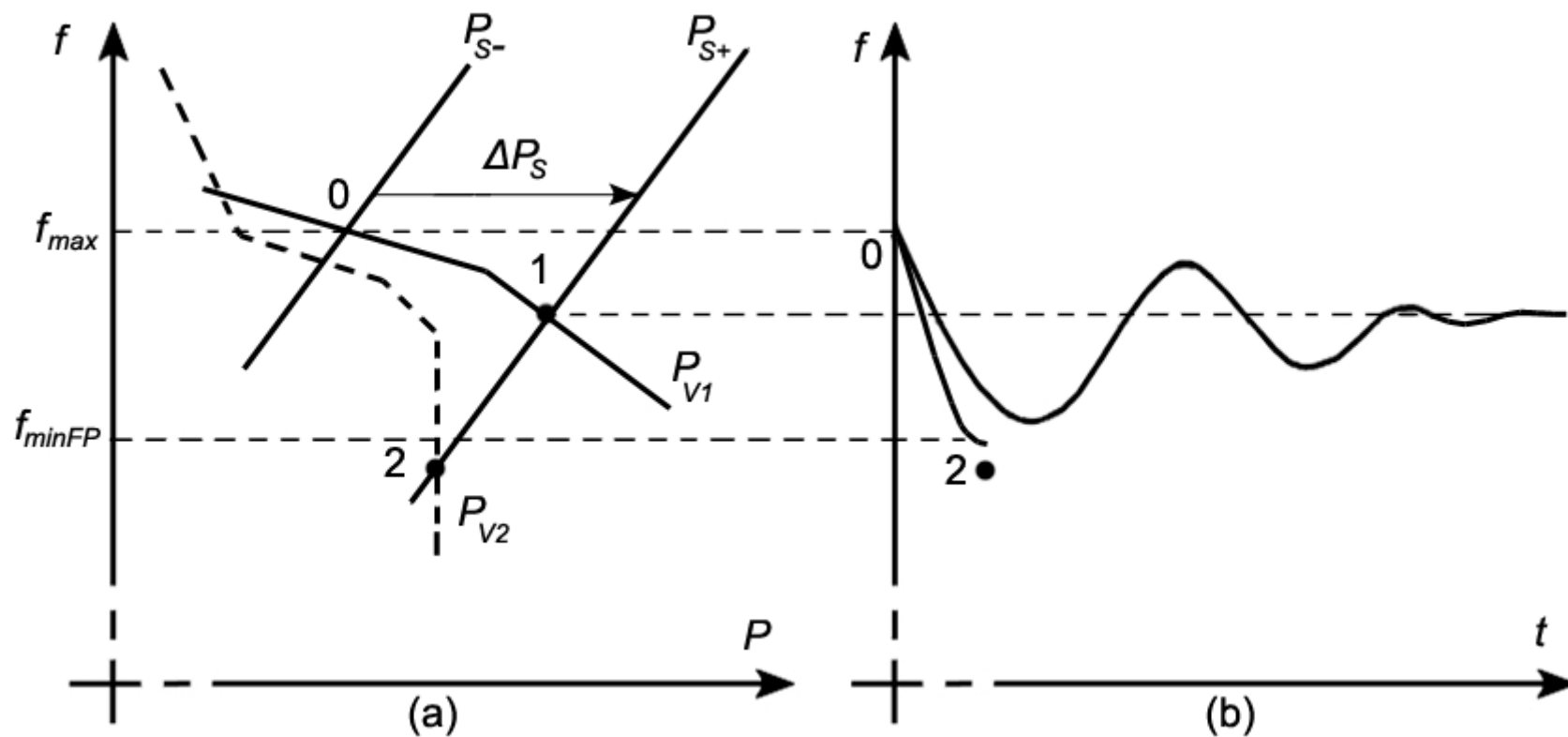


Ostrovní provoz

- **Frekvenční kolaps**
 - Pokud se pracovní bod ES bude nacházet v blízkosti P_{max} (tj. bude nedostatek točivé rezervy), výkonová rovnováha se s velkou pravděpodobností neobnoví a nastane frekvenční kolaps. K tomu může dojít, jestliže některé bloky nedokážou přejít do ostrovního provozu. Tuto situaci ukazuje následující graf.
- Při vzniku deficitní ostrovní soustavy se zátěž zvětšila o ΔP_S , tj. přechodová charakteristika přešla z P_{S-} na P_{S+}). V prvním případě, při dostatečné točivé rezervě, je nový ustálený stav v bodě 1 (průsečíku charakteristik P_{S-} a P_{V1}). Frekvence ostrovní soustavy se ustálí.
- V případě výpadků bloků se statická charakteristika výroby změní z P_{V1} na P_{V2} a ustálený stav bude v bodě 2. Protože tento bod leží pod f_{minFP} , nemůže být dosaženo ustáleného stavu. Při této hodnotě se elektrárny působením ochran odpojí od sítě a nastává tzv. blackout.



Ostrovní provoz





Frekvenční plán

- Frekvenční plán je přílohou č.3 vyhlášky MPO č. 219/2001 Sb.
- Tento frekvenční plán je rozpracován dále do podrobnějších ustanovení v provozní instrukci ČEPS PI 620-6 „Frekvenční plán“
- Obsahem této PI jsou „ruční“ a automatické činnosti, které při vybočení kmitočtu od normálních hodnot mají za cíl:
 - zamezit pádu kmitočtu do hodnot kdy působí systémové automatické frekvenční odlehčování (SAFO)
 - klesá-li dále kmitočet, tak působením SAFO a lokálním automatickým odlehčováním (LAFO) zamezit poklesu kmitočtu do nebezpečných hodnot pro energetická zařízení a udržet části ES v ostrovním provozu
 - nejsou-li předchozí opatření úspěšná, pak zajistit včasné odpojení elektráren do provozu na vlastní spotřebu a tím umožnit rychlou obnovu provozu ES
 - zamezit vzrůstu kmitočtu do nebezpečných hodnot pro energetická zařízení a udržet části ES v ostrovním provozu
 - nejsou-li opatření úspěšná, pak zajistit včasné odpojení elektráren do provozu na vlastní spotřebu a tím umožnit rychlou obnovu provozu ES



Frekvenční plán

- Jednotlivé úrovně kmitočtu, kdy startují jednotlivá opatření, byly stanoveny z pásma normálního kmitočtu ($50,00 \pm 0,2$ Hz) z hlediska provozu propojené soustavy UCTE, kdy běžné výpadky zdrojů (do 3000 MW) jsou eliminovány primární regulací zdrojů a kmitočtem neopustí uvedené pásmo.
 - pro nižší a vyšší kmitočty pak z povolených hodnot kmitočtů pro provoz jednotlivých typů zdrojů, jak byly známy v období připojování ES ČR k UCPTE (18.10.1995)



Frekvenční plán

- Jednotlivá opatření při poklesu kmitočtu:
- 49,8 Hz
 - odpojení bloků od centrálního regulátoru
 - je zajištěno současně s přepnutím do otáčkové regulace (ROP) přepnutí do ROP
 - odpojení sekundární regulace od ARN
- 49,8 – 49,2 Hz
 - u PVE automatické, postupné (s klesajícím kmitočtem) odpojování jednotek z čerpadlového provozu (ČP) a najíždění jednotek do generátorového provozu (GP)
 - v EDST (Dlouhé Stráně) je instalována automatika podle projektu, zajišťující postupné (s klesajícím kmitočtem) odepínání z ČP a najíždění do GP
 - v EDA (Dalešice) je jednoduché vypínání z ČP všech jednotek při stejném kmitočtu $f = 49,8$ Hz – připravit návrh na postupné (s klesajícím kmitočtem) vypínání a posléze i automatiku na postupné najíždění do GP
- 49,0 – 48,1 Hz
 - systémové automatické frekvenční odepínání spotřeby (SAFO)
 - výše 50% z celkové spotřeby ES stanovena UCTE rozdělení do 4 stupňů
 - (49,0 – 48,7 – 48,4 – 48,1 Hz) koordinováno v rámci CENTREL
 - realizace je prováděna v distribučních společnostech
 - v distribučních společnostech jsou realizována i lokální automatická frekvenční odlehčování spotřeby (LAFO)
- 48,0 – 47,5 Hz
 - postupné odpojování elektráren (PPE, JE, UE) od sítě na provoz na vlastní spotřebu



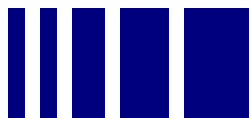
Frekvenční plán

- **Jednotlivá opatření při vzrůstu kmitočtu**
- **50,2 Hz**
 - odpojení bloků od centrálního regulátoru
 - přepnutí do otáčkové regulace (ROP)
 - odpojení sekundární regulace od ARN
- **51,5 – 53,0 Hz**
 - postupné odpojování PVE, PPE, JE a UE na provoz na vlastní spotřebu

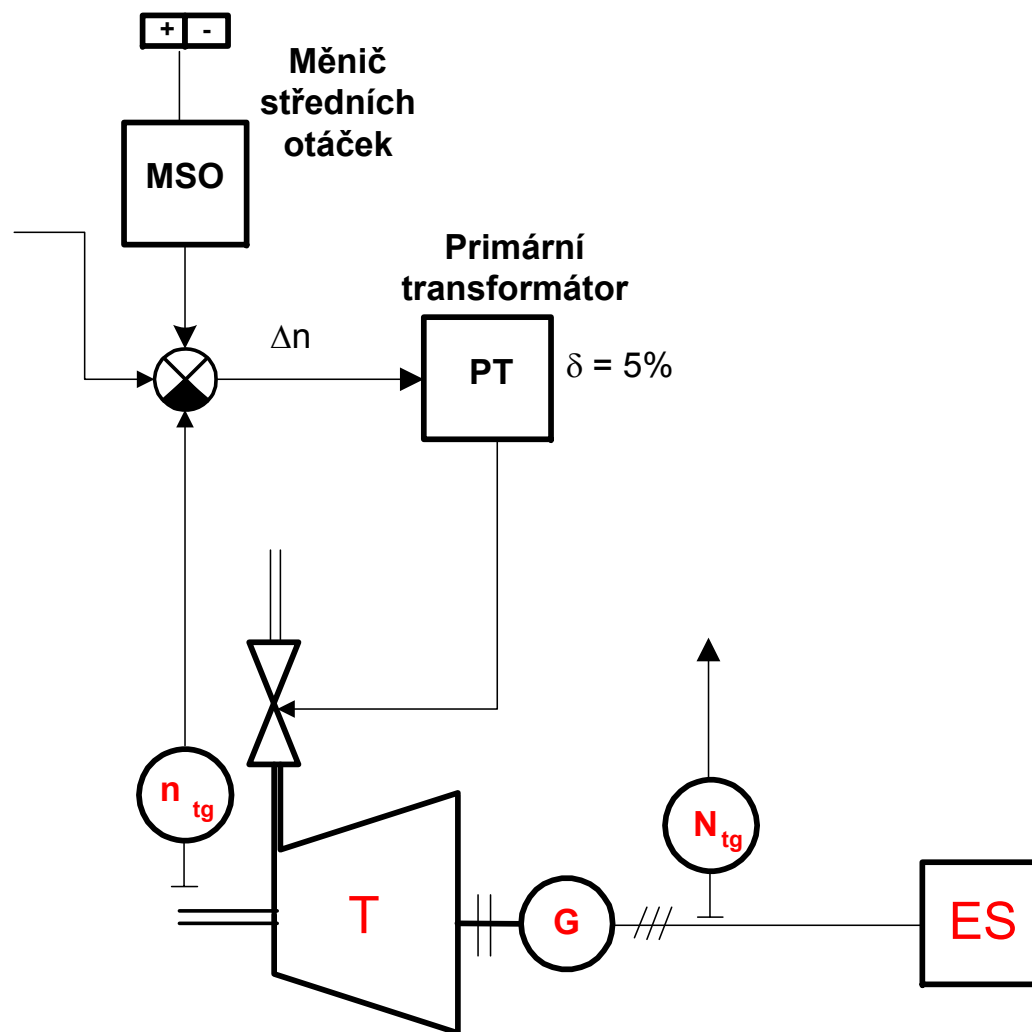


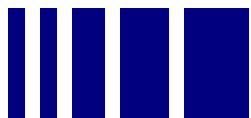
Ostrovní provoz

- V podmínkách liberalizace musí být většina procesů zajištěna smluvně a nutná technická pravidla definuje Kodex přenosové soustavy.
- V něm je ostrovní provoz uveden jako podpůrná služba s respektováním rozdílnosti realizace. Úpravy, které mají zabezpečit zvládnutí systémových poruch, byly v elektrárnách provedeny v 90. letech jako jeden z požadavků UCTE.
- Nemohly však být provedeny jednotně, protože jednotlivé výrobní bloky i použité řídicí systémy se liší. Přestože Kodex nedefinuje regulační schéma, zavádí pojem regulátor ostrovního provozu (ROP).
- Takové řešení není v UCTE standardní, používá se například termín regulátor frekvence (frequency control).

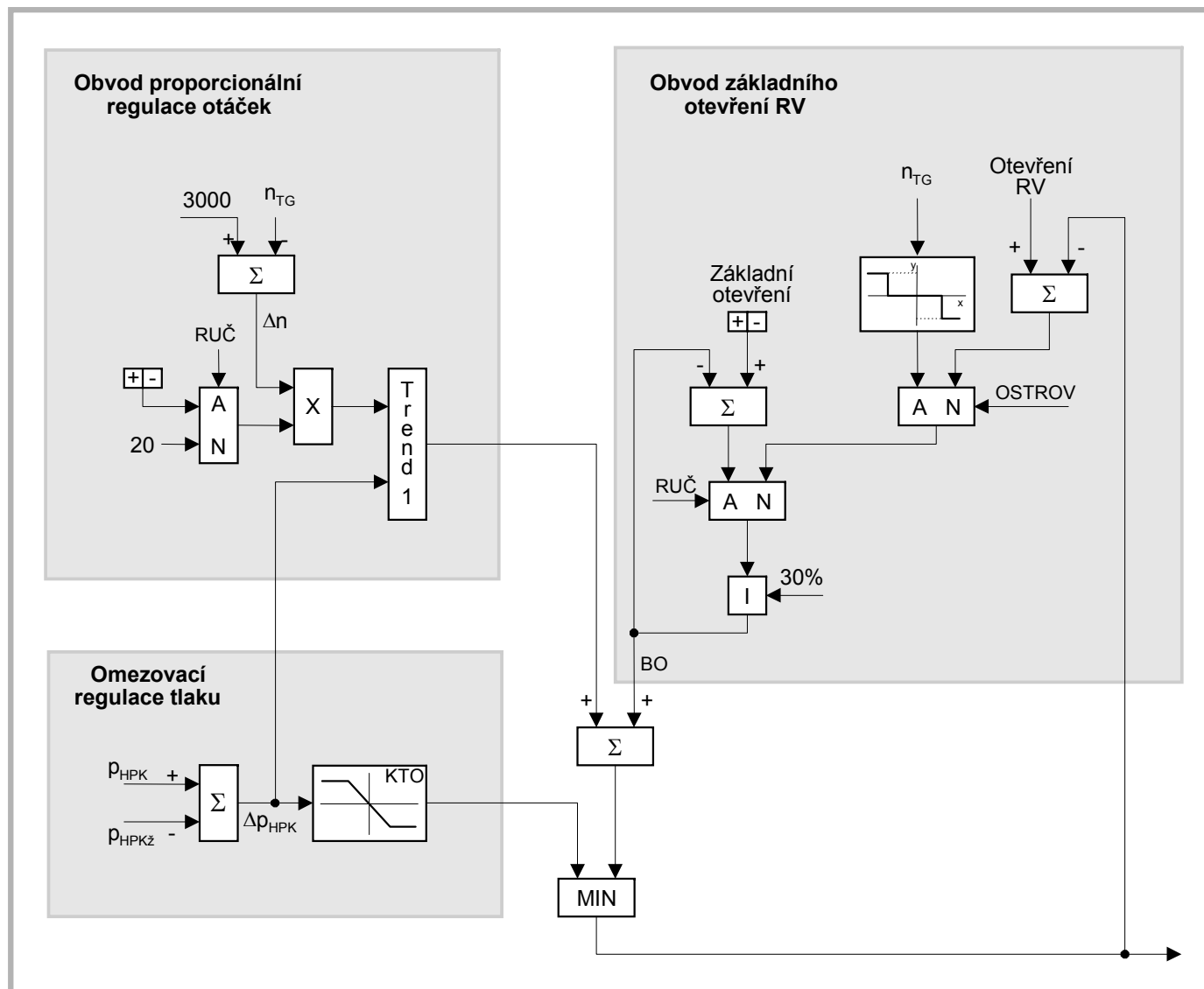


Blokové schéma otáčkové regulace turbíny





Blokové schéma regulátoru ostrovního provozu



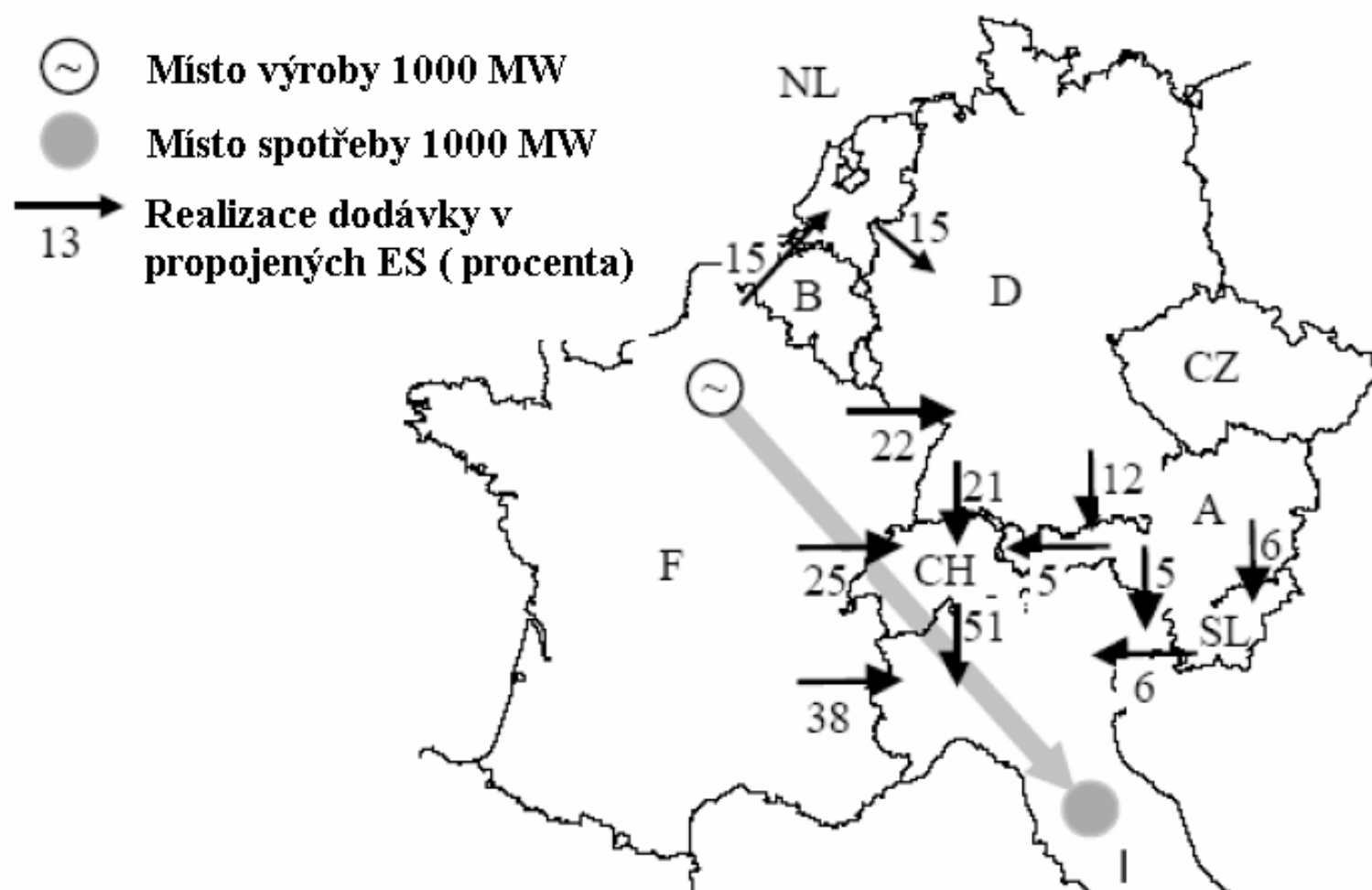


Ostrovní provoz

- Zjednodušené regulační schéma je na obr. Polohy dvojstavového přepínače jsou značeny A (podmínka splněna) / N (podmínka nesplněna). Většinou se jedná o samostatnou část regulátoru turbíny, která je tvořena třemi nebo více obvody. Jsou to:
 - obvod základního otevření (BO basic opening) regulačních ventilů - zde se může měnit základní otevření ručně na žádanou hodnotu, nebo automaticky, kdy se ROP snaží změnou výkonu TG vrátit otáčky do povoleného pásma
 - proporcionální regulátor otáček - zde se odchylka otáček násobí konstantou zesílení. Její velikost (výchozí hodnota je 20) může obsluha měnit v ručním režimu. Rychlost změny tohoto signálu je v případě nízkého tlaku páry v hlavním parním kolektoru (pHPK) omezována v bloku Trend 1.
 - obvod omezení výkonu TG - zde korektor tlaku ostrova (KTO) omezuje výkon TG především při nízkém tlaku páry p_{HPK}
- Výstupní signál regulátoru ostrovního provozu je vytvářen superpozicí signálů uvedených obvodů. Přičemž signál z regulátoru otáček může být omezen výstupem větve omezovací regulace ROP od nízkého tlaku páry před turbínou.
- Digitální řídicí systém na rozdíl od hydraulického regulátoru dokáže přesně a rychle splnit všechny požadavky. Rychlé omezení výkonu TG má za následek snížení točivé rezervy v ostrovní soustavě a zvyšuje pravděpodobnost frekvenčního kolapsu.

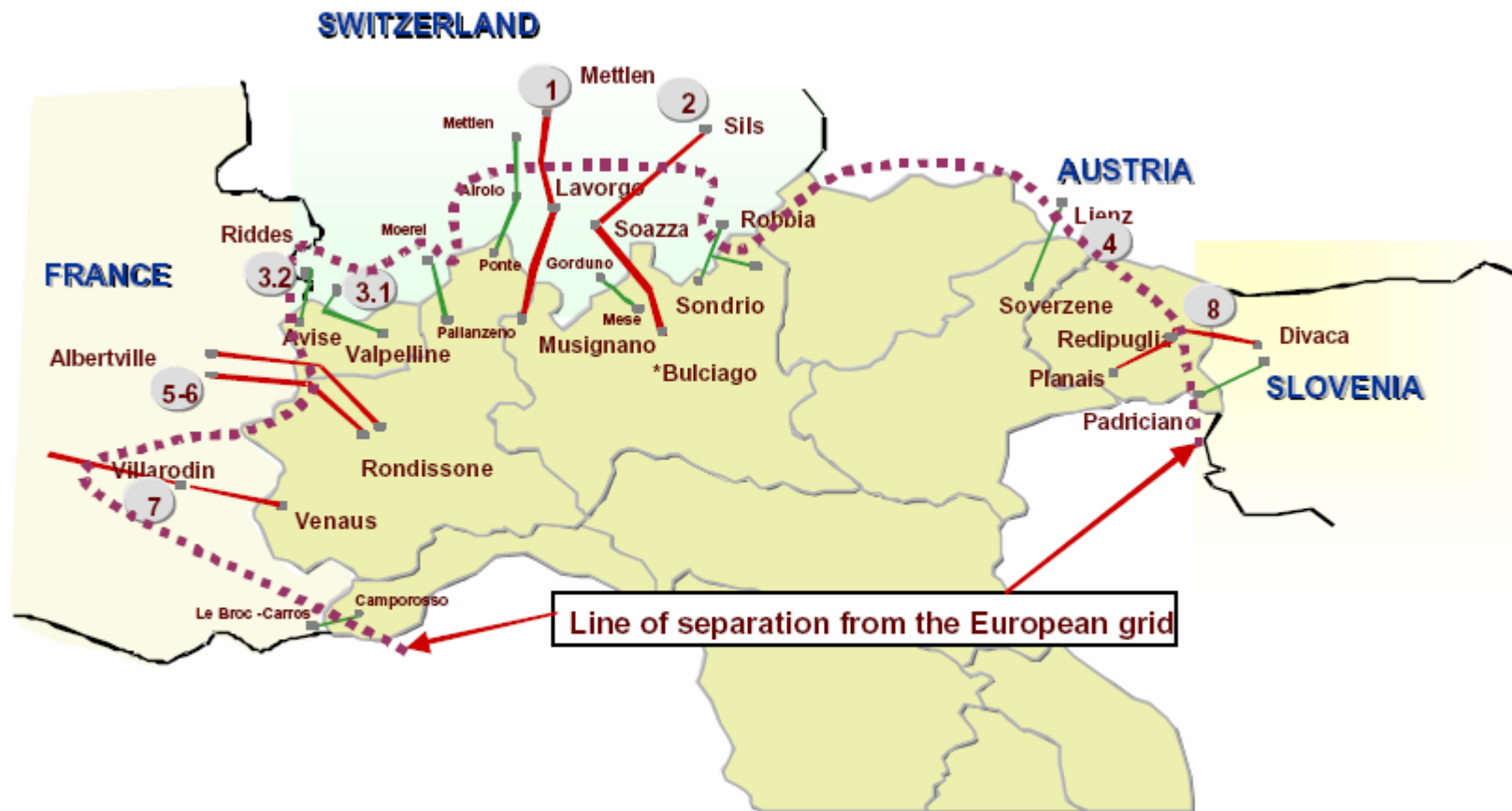


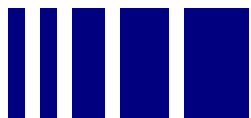
Black out Itálie



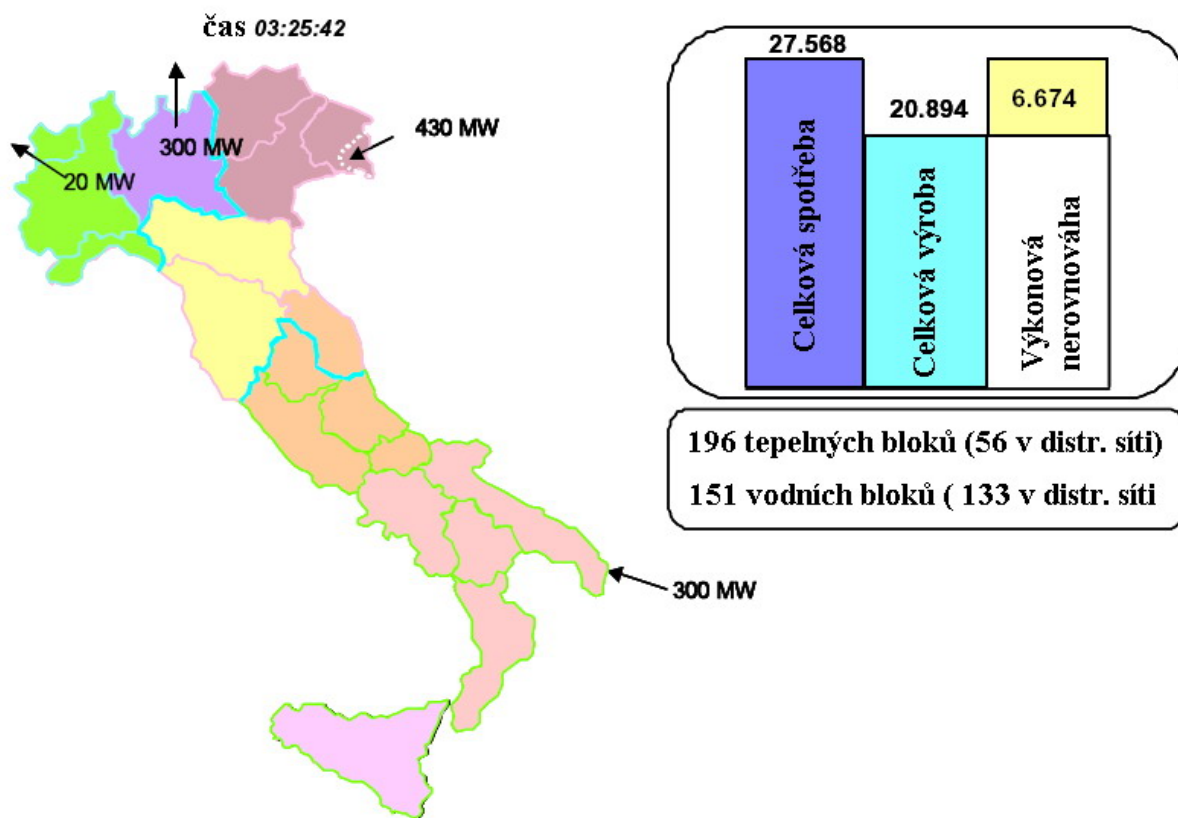


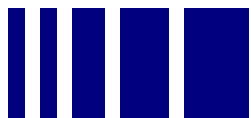
Black out Itálie



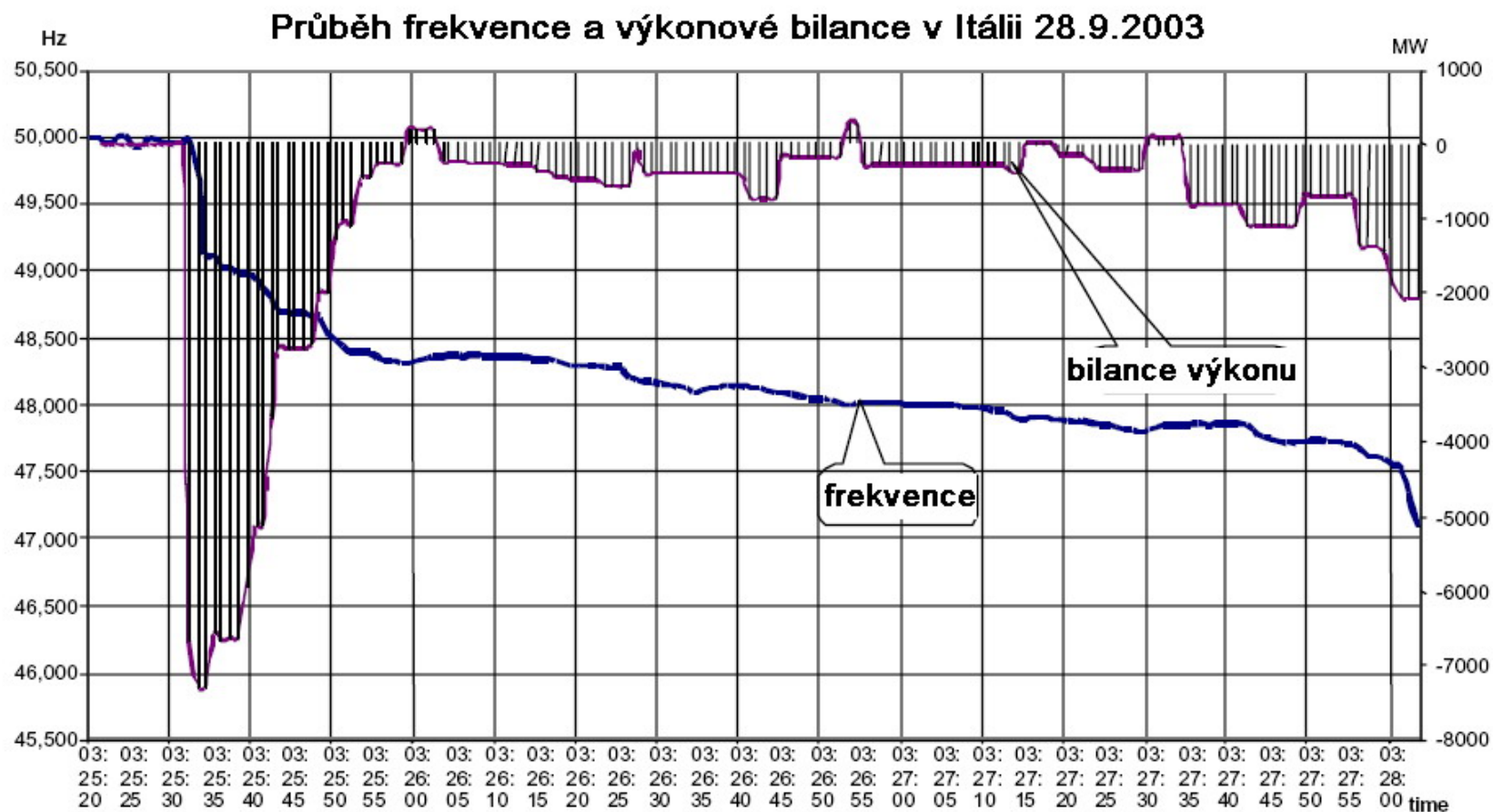


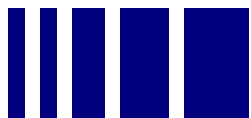
Black out Itálie



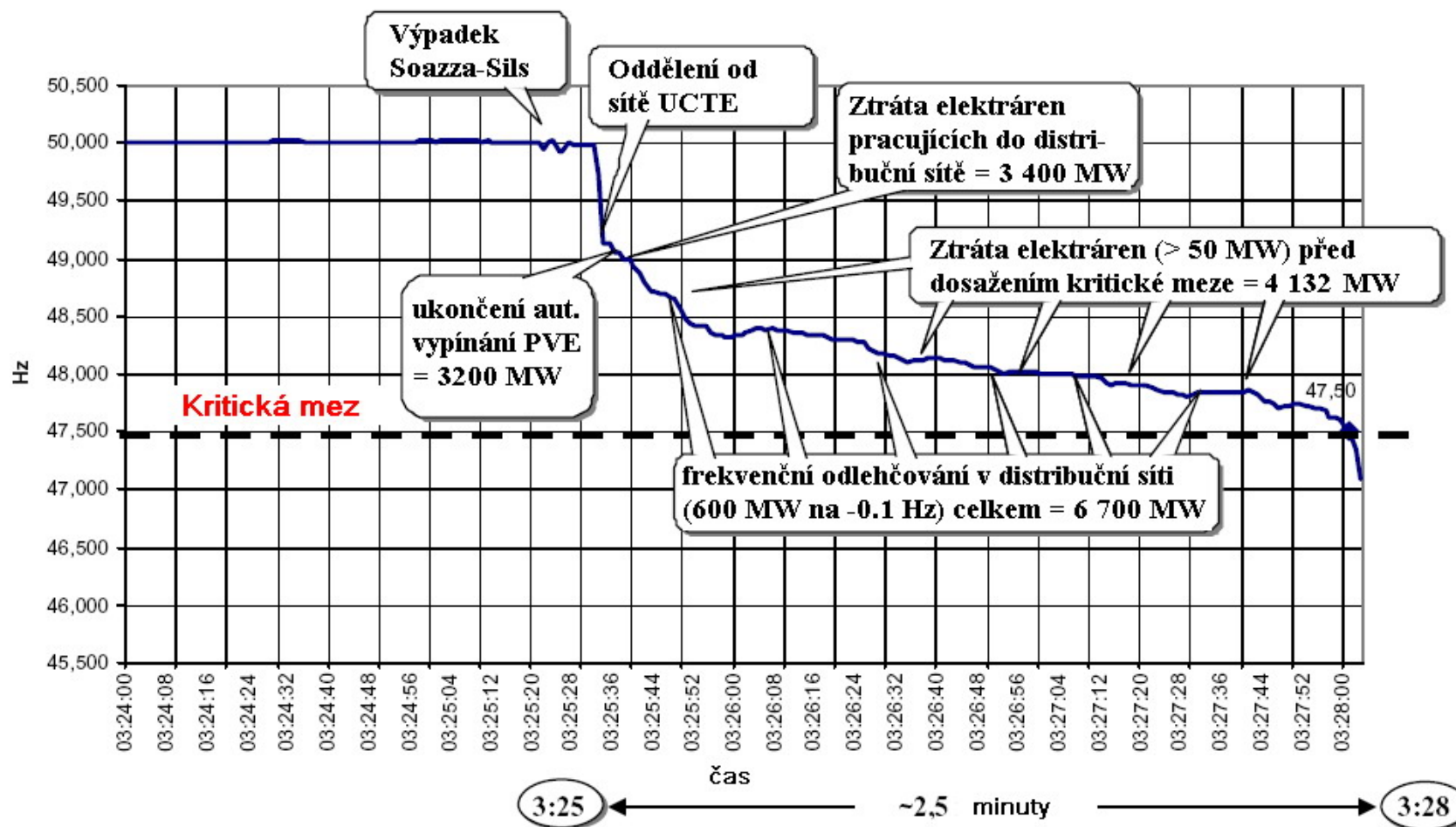


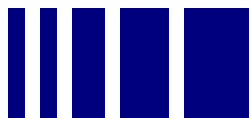
Black out Itálie





Black out Itálie





Black out Itálie

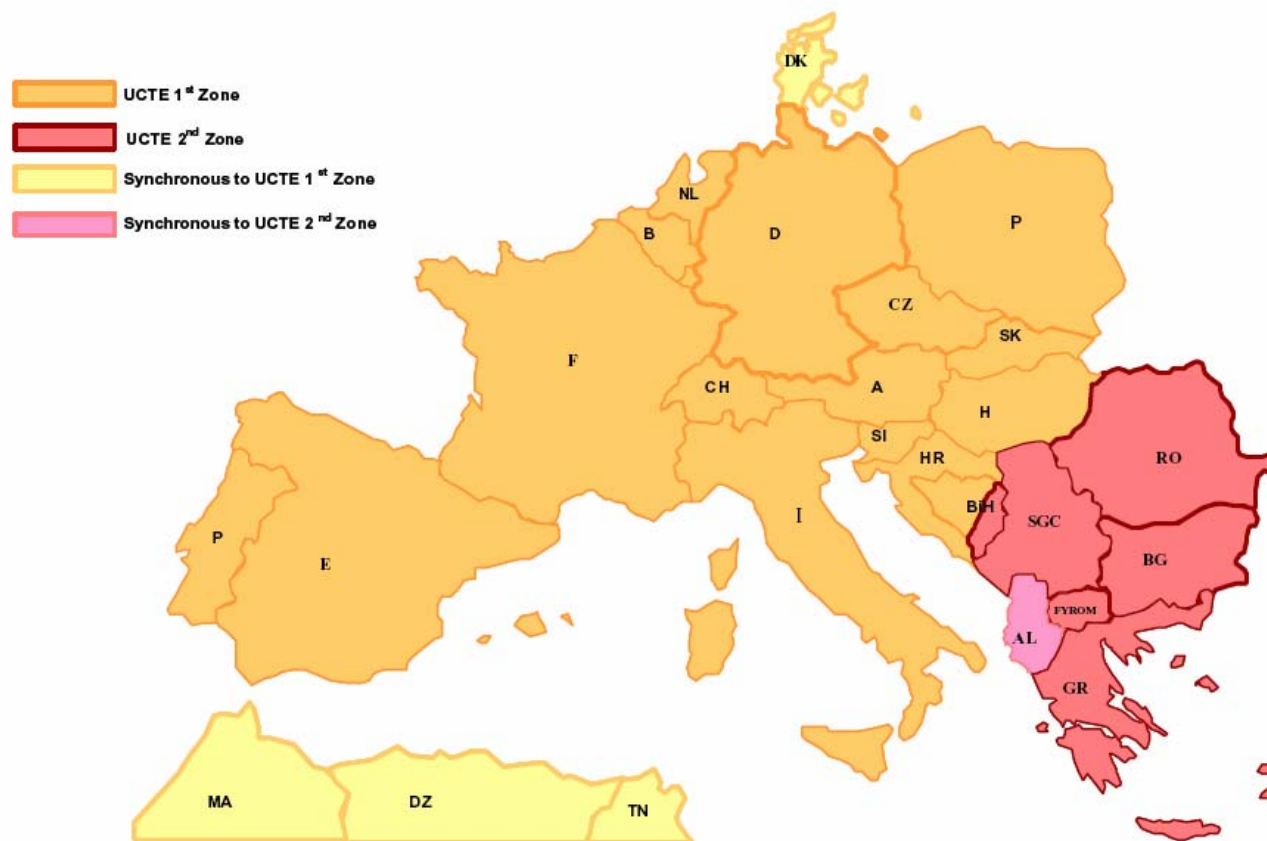
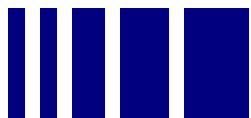
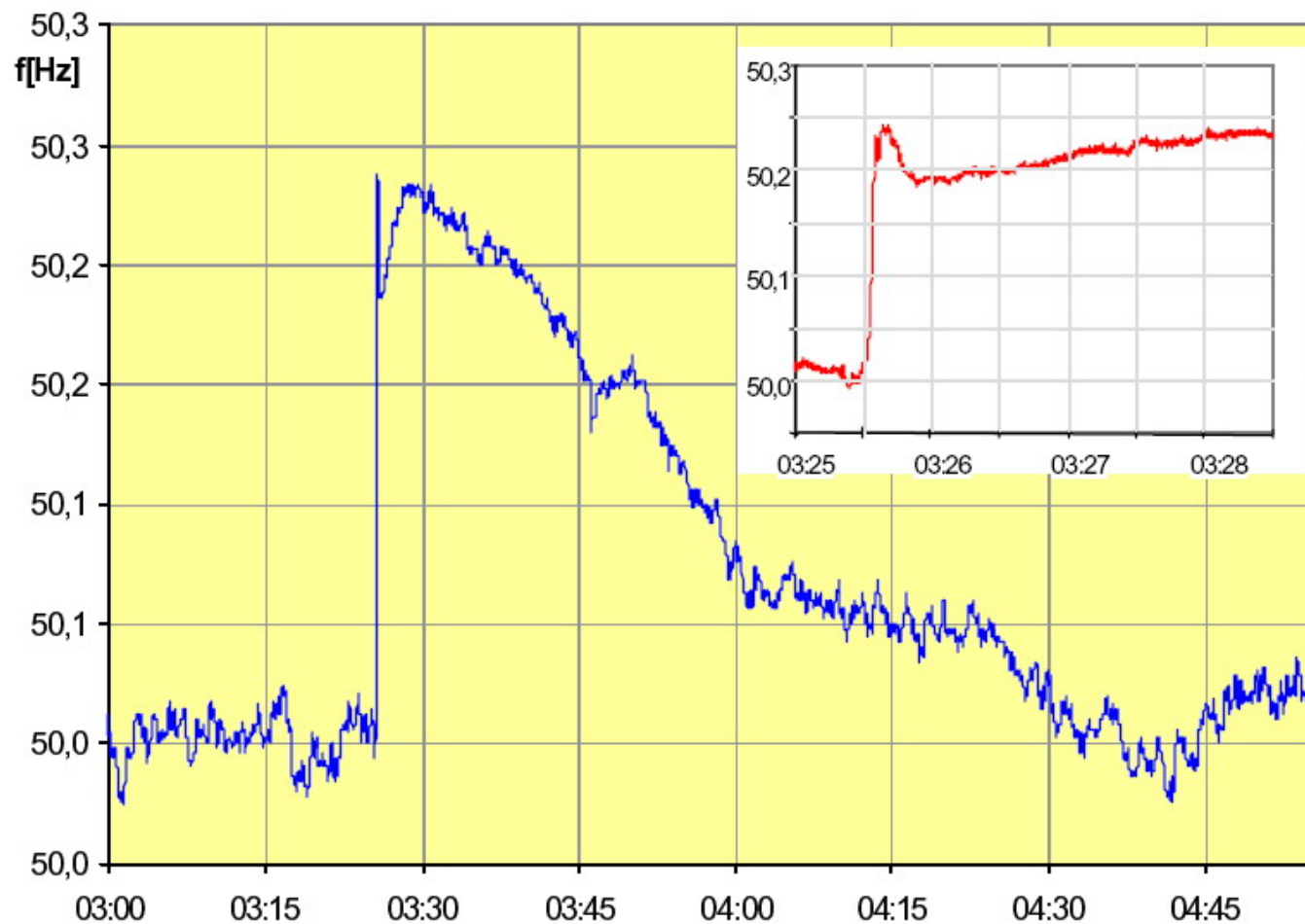
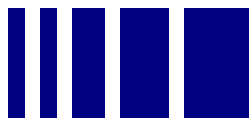


Fig 4.1: First and second synchronous zones of UCTE



Black out Itálie





Black out Itálie

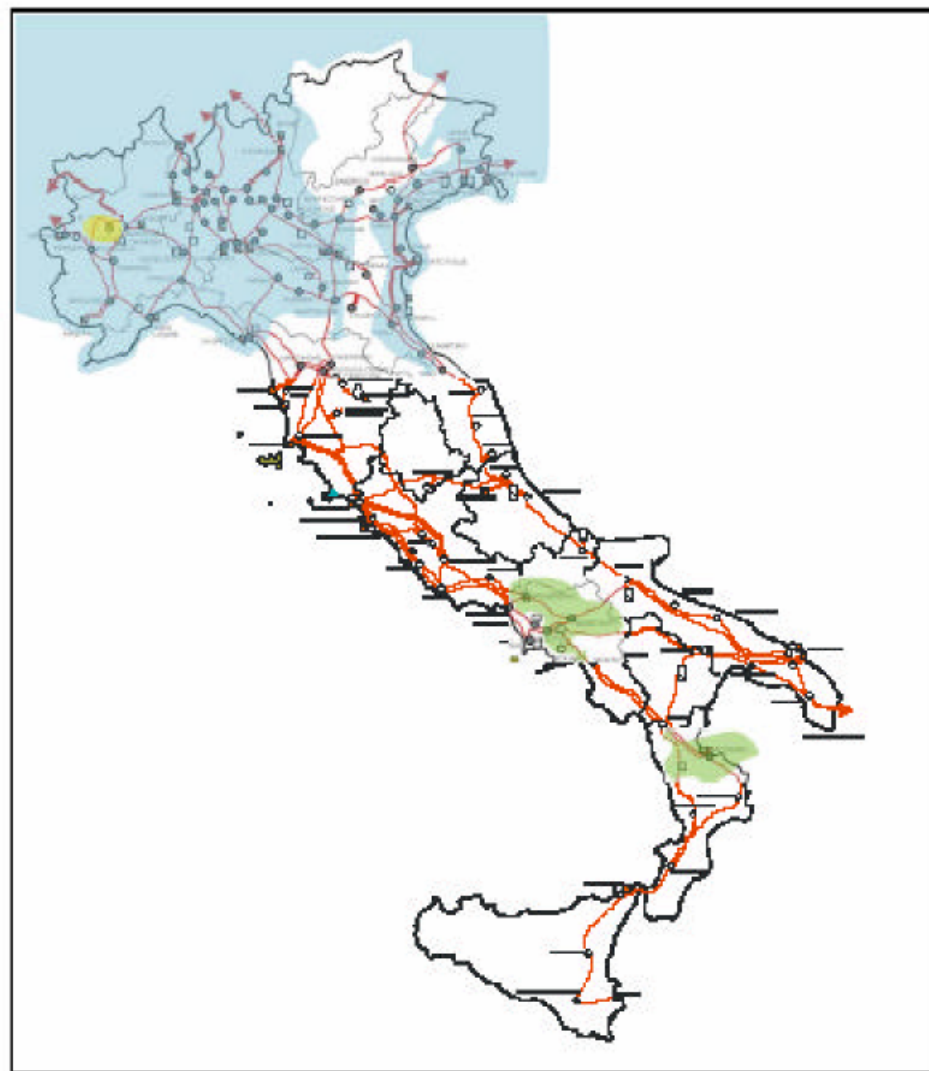
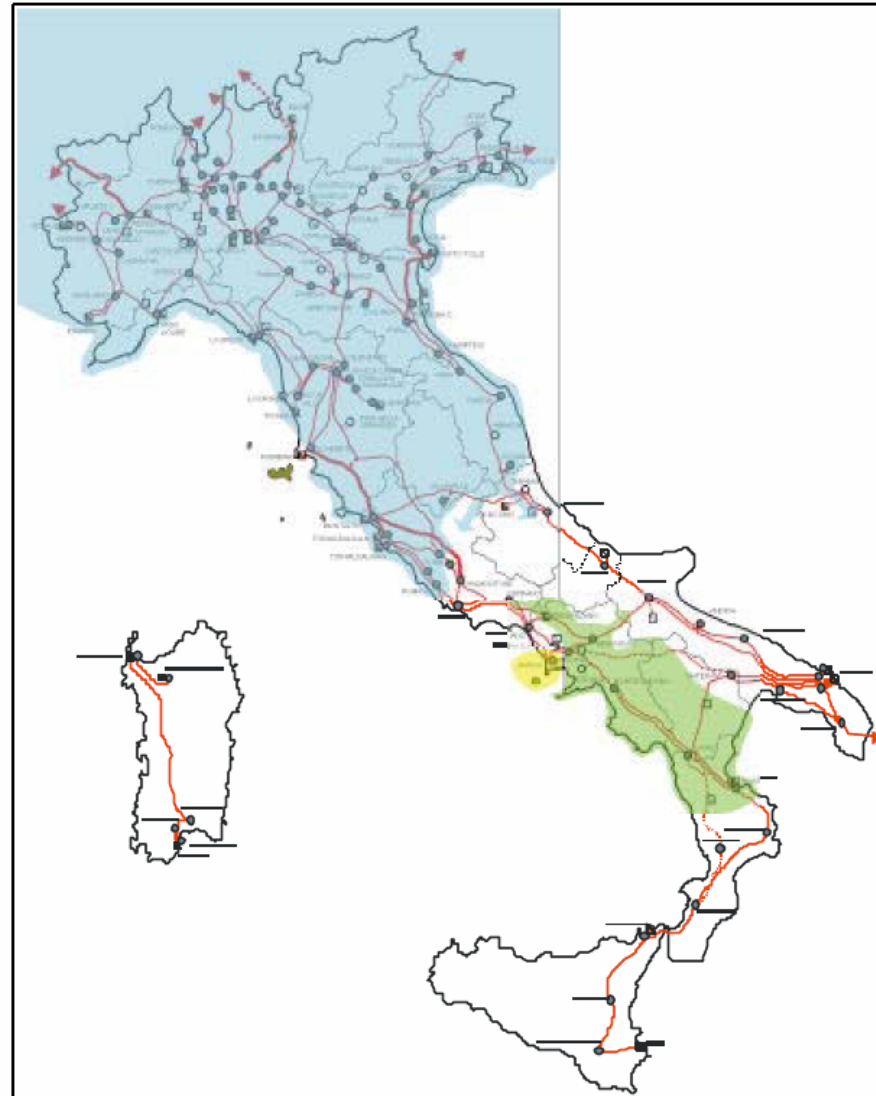
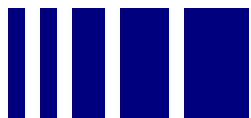


Figure 2.8: End of Stage 1



Black out Itálie





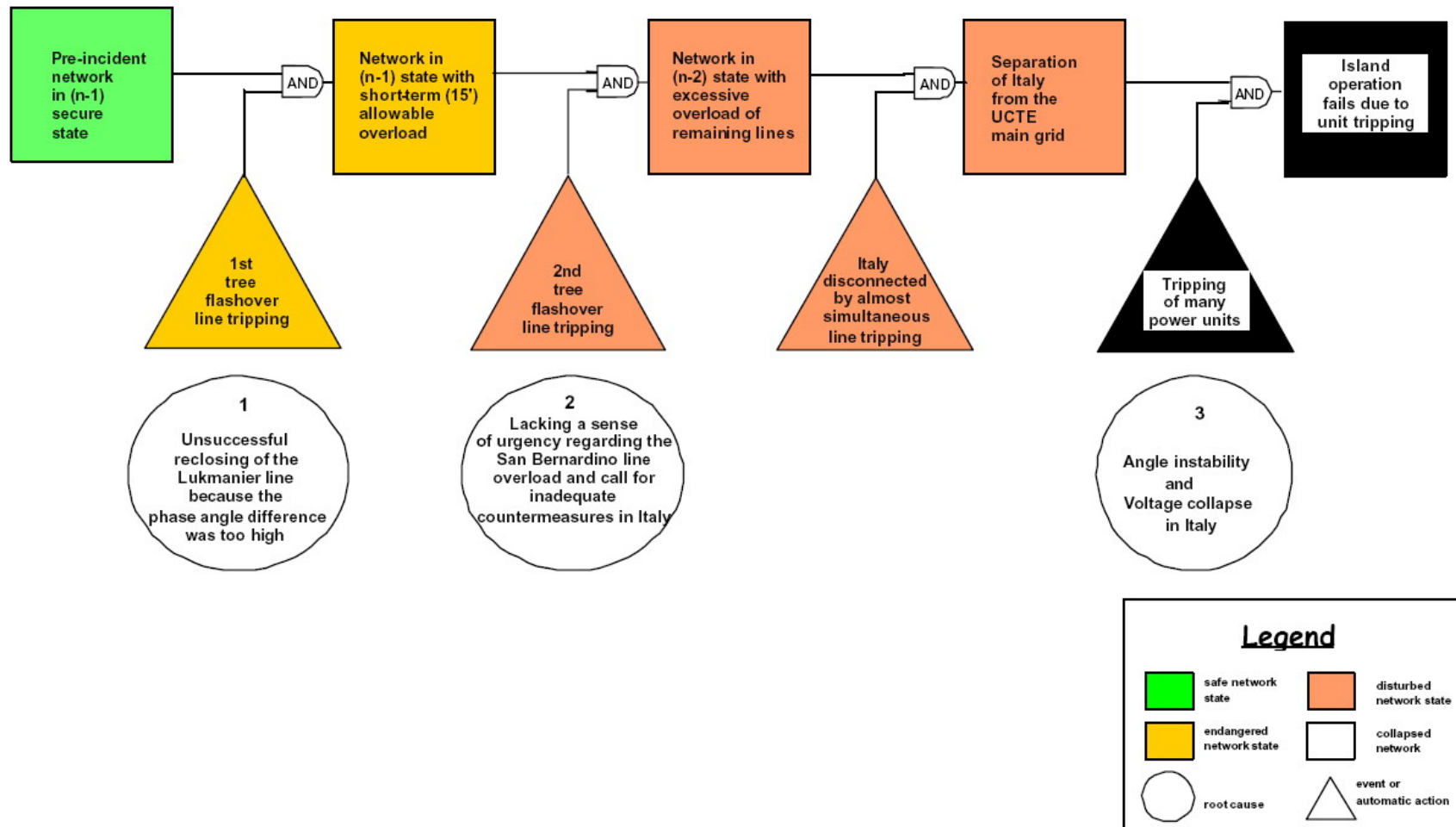
Black out Itálie

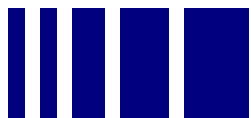




Black out Itálie

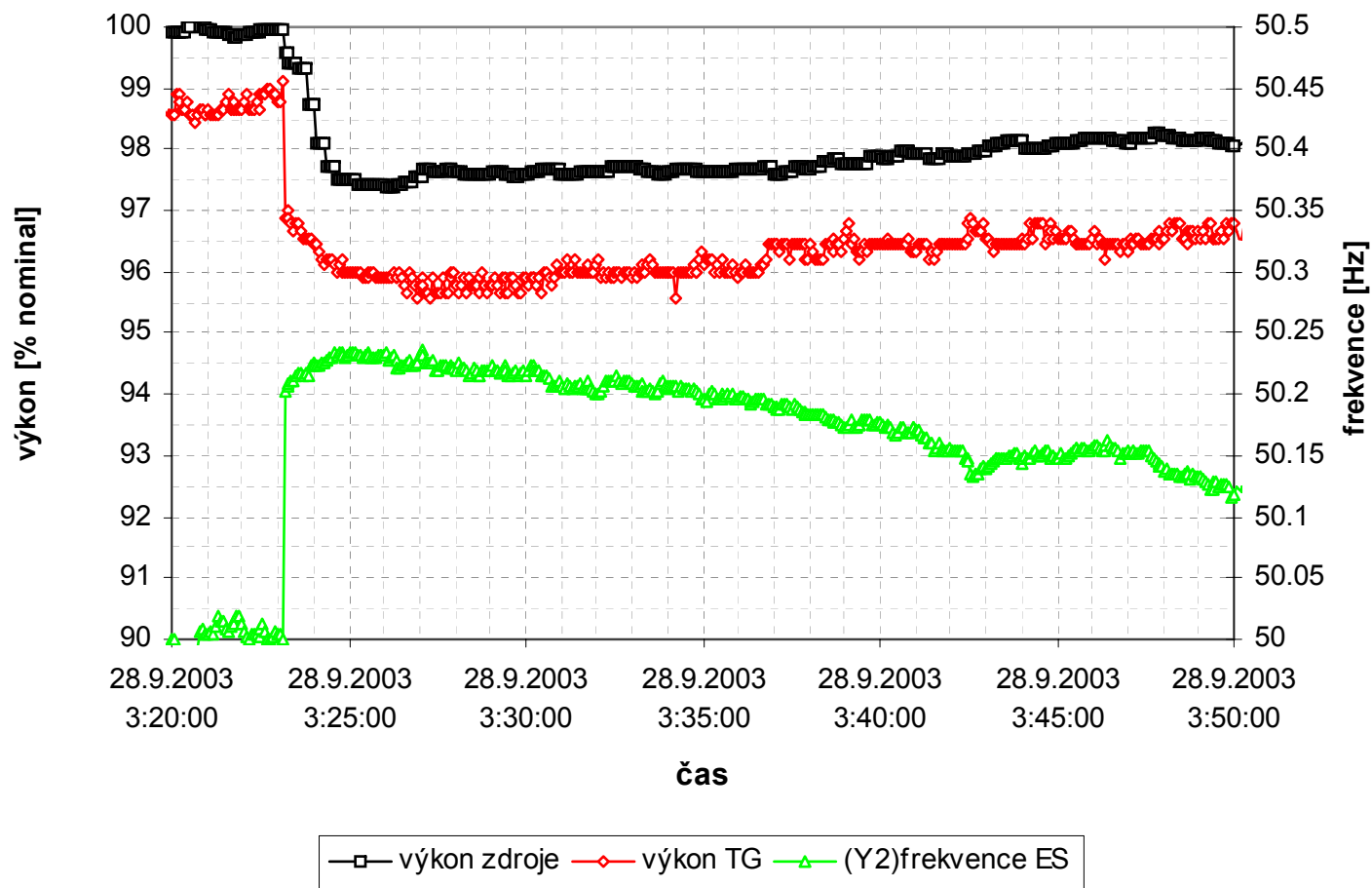
Network state overview & root causes

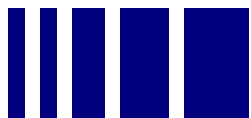




Black out Itálie

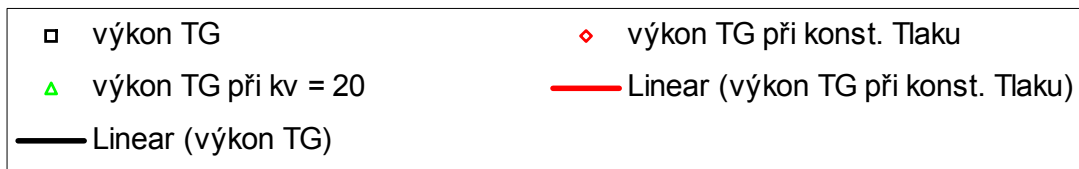
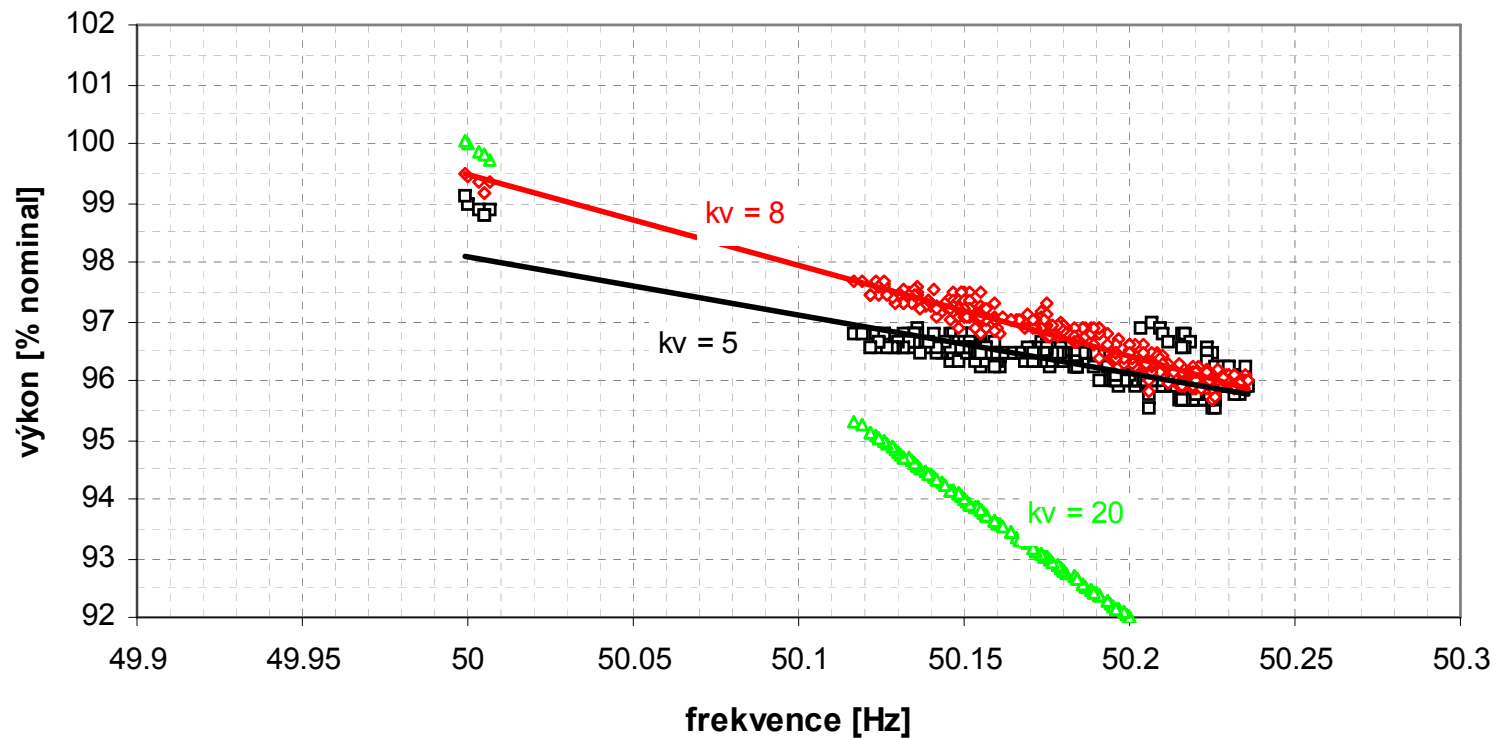
Odezva bloku na systémovou poruchu ES





Black out Itálie

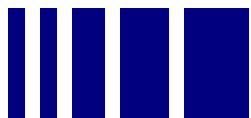
P-f charakteristika bloku české elektrárny





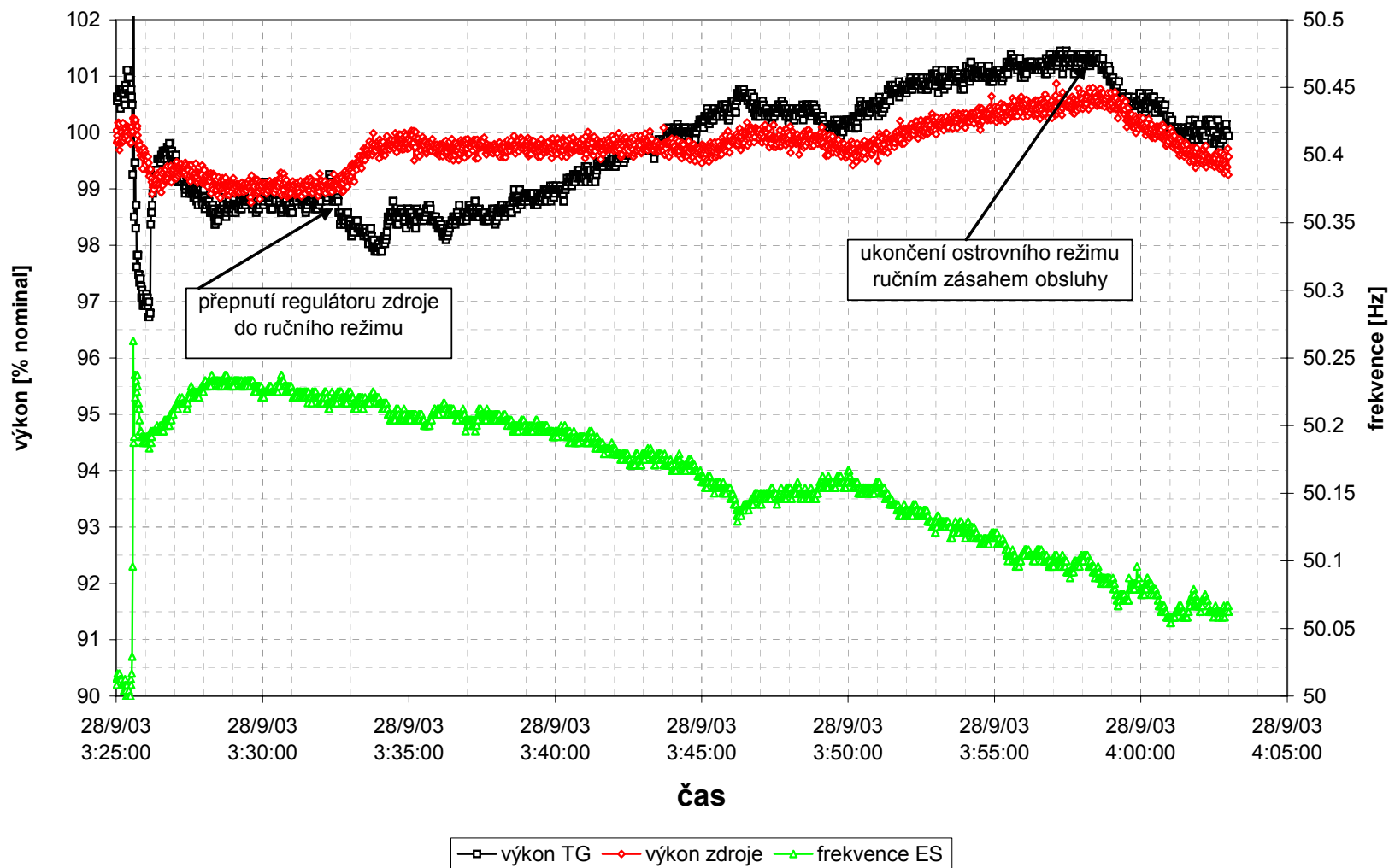
Black out Itálie

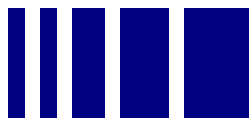
- Na grafu je odezva bloku s digitálním řídicím systémem na poruchu v ES. Vlivem nárůstu frekvence došlo při hodnotě 50,2 Hz k přechodu bloku do ostrovního provozu a ke snížení výkonu TG o 4 %. Očekávaná hodnota změny výkonu při proporcionální regulaci o zesílení 20 je 9 %. Protože se uplatňují omezovací funkce ROP, výkon TG se vrací na 99 %. V čase 3:32 přepnula obsluha regulátor primárního zdroje do ručního režimu, aby zabránila snížení jeho výkonu. Tím došlo k otevření ventilu přepouštěcích stanic do kondenzátoru a ke snížení tlaku páry. To se projevilo poklesem výkonu TG na 98 %. Dál se již výkon TG měnil v důsledku snižování frekvence ES. Proporcionální regulátor otáček zvyšoval výkon TG až na výchozí hodnotu. Té však dosáhl již při zvýšené frekvenci 50,15 Hz. Protože mohlo dojít k nárůstu výkonu TG nad 100 %, obsluha elektrárny (po dohodě s dispečerem) ručním zásahem ukončila ostrovní režim.



Ostrovní provoz

Odezva bloku s digitálním regulátorem ostrovního provozu na systémovou poruchu ES

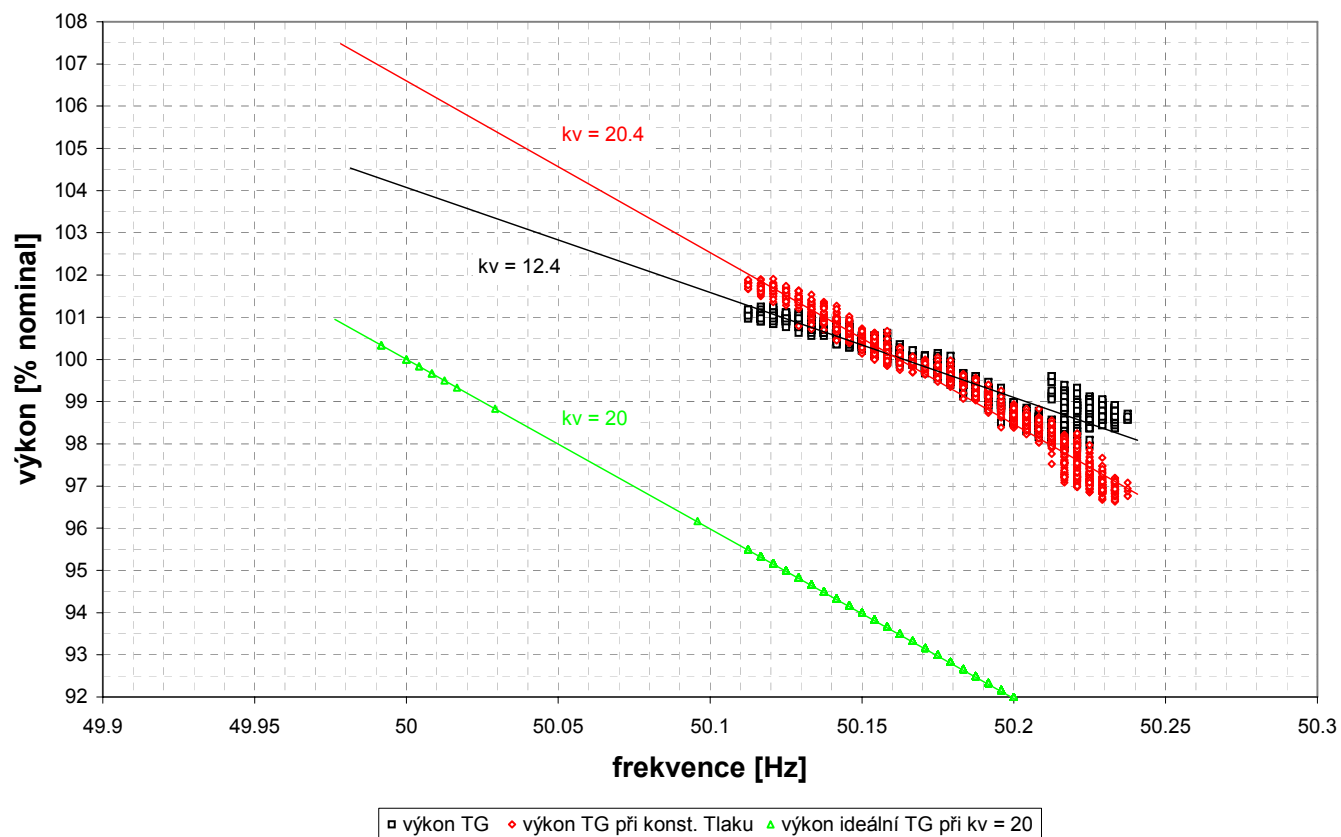




Black out Itálie

- Skutečné zesílení proporcionálního regulátoru můžeme určit ze statické charakteristiky. Z charakteristiky je vidět, že zesílení TG bylo 12,4 (statika 8 %). Po provedení korekce výkonu TG na konstantní tlak v HPK je zesílení 20,4 (statika 4,9 %), což odpovídá požadované hodnotě. U obou křivek byl nominální výkon dosažen při frekvenci 50,15 Hz.

P-f charakteristika bloku s digitálním regulátorem ostrovního provozu





Black out Itálie

- Příčina odlišného chování TG v porovnání s proporcionální regulací otáček o zesílení 20 spočívá v obvodu základního otevření. Ten také zajišťuje naplnění požadavku Kodexu, aby přechod bloku do režimu ROP byl klidný (pokud možno bez nárazu výkonu). Z tohoto důvodu se nesmí skokově změnit výstup regulátoru ostrovního provozu (součet signálu proporcionálního regulátoru otáček a signálu obvodu základního otevření). To je umožněno tím, že výstup ROP sleduje aktuální hodnotu otevření regulačních ventilů. Protože frekvence ES je v okamžiku přechodu bloku do ostrovního provozu 50,2 Hz, je i výstup proporcionální větve v tomto okamžiku 8 %. Aby byl splněn požadavek Kodexu, dochází ke skokovému zvýšení hodnoty základního otevření ROP.
- Tím dochází k posuvu statické charakteristiky a ke změně žádané hodnoty otáček (frekvence ES). Přitom to je z hlediska principu provozu v izolované soustavě nesprávná činnost. Daný blok se v důsledku toho podílí na regulaci ostrova menší měrou. Při rychlém návratu frekvence na nominální hodnotu (jak tomu bylo například v USA) by rychlým otevřením regulačních ventilů došlo ke zvýšení výkonu TG nad nominální hodnotu a k zapůsobení ochran bloku.



Black out USA

- Na obr. je zachycen časový průběh frekvence v oblastech Ontario a New York v době vzniku ostrovní soustavy.
- V 16:10:50 se působením ochrany, která rozpojila devět 230kV propojovacích linek, oddělila soustava Ontaria od západní části New Yorku. Velké ontarijské zdroje Beck a St. Lawrence zůstaly připojeny k soustavě New Yorku, takže frekvence v soustavě Ontaria klesla pod 59,3 Hz . Došlo k zapůsobení prvního stupně frekvenčního odlehčení (12 %) a pokles frekvence se v této oblasti zmírnil.
- Mezitím v oblasti New York vzrostla frekvence až na 63,4 Hz (o více než 5 %) a nadfrekvenční ochrany odpojily pět jaderných elektráren. V důsledku výkonového deficitu nastal pokles frekvence i v této oblasti. V čase 16:10:56 se frekvence obou oblastí sblížily a došlo k opětovnému zapnutí tří 230kV linek. Ontario se znovu připojilo k soustavě New Yorku.
- Přetrvávající velký nedostatek výkonu v oblasti Ontaria však způsobil pokles frekvence pod 58,8 Hz a zapůsobení druhého stupně frekvenčního odlehčení (19 %). Frekvence obou oblastí se na chvíli stabilizovala v okolí nominální hodnoty.
- V 16:11:10 opět došlo k vypnutí tří propojovacích linek a oblast Ontaria se oddělila definitivně. Frekvence v přebytkové ostrovní soustavě New Yorku se stabilizovala, frekvence v deficitní oblasti Ontaria klesala až pod 57 Hz, kdy došlo k odpojení Ontaria také od oblasti Michiganu.
- Následoval frekvenční kolaps soustavy (blackout) a přerušení dodávky 22 500 MW, které postihlo i tak velká města, jako je Toronto, Hamilton a Ottawa.



Black out USA

Frequency Separation Interior Ontario and Northern New York

