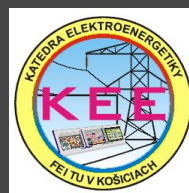


Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky



Možnosti regulácie tokov výkonov v elektrizačných sústavách

EnergoFutura 2010

Ľubomír Beňa

MOŽNOSTI REGULÁCIE TOKOV VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

číslo projektu:

1/0166/10 Vedecká grantová agentúra MŠV VaŠ SR a SAV (VEGA)

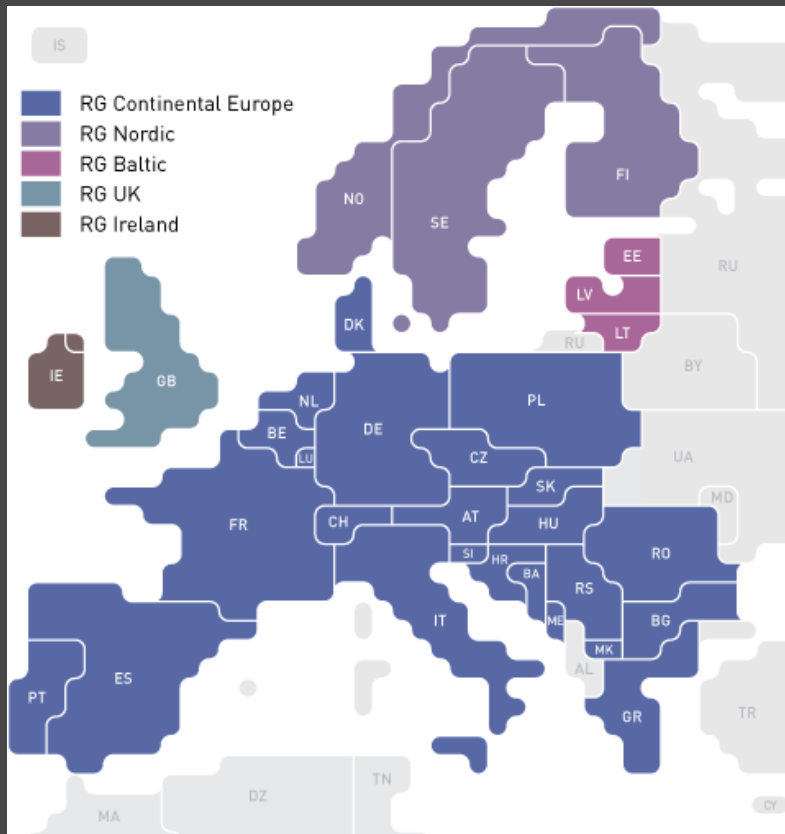
názov projektu:

Výskum možností eliminácie kritických stavov elektrizačnej sústavy SR

doba riešenia: 2010 – 2011

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

ENTSO-E - Európska sieť prevádzkovateľov prenosových sústav pre elektrinu



ENTSO-E: 42 PPS z 34 krajín Európy

Regionálne skupiny:

- UCTE (24 krajín),
- Nordel (Nórsko, Švédsko, Fínsko),
- UKTSOA (Veľká Británia),
- BALTSO (baltické štáty),
- ATSOI (Írsko a Severné Írsko).

Cieľ ENTSO-E: prijatie technicko-organizačných opatrení na zabezpečenie spoľahlivosti prevádzky Európskeho energetického prenosového systému vzhľadom na prebiehajúce procesy dané politikou EÚ:

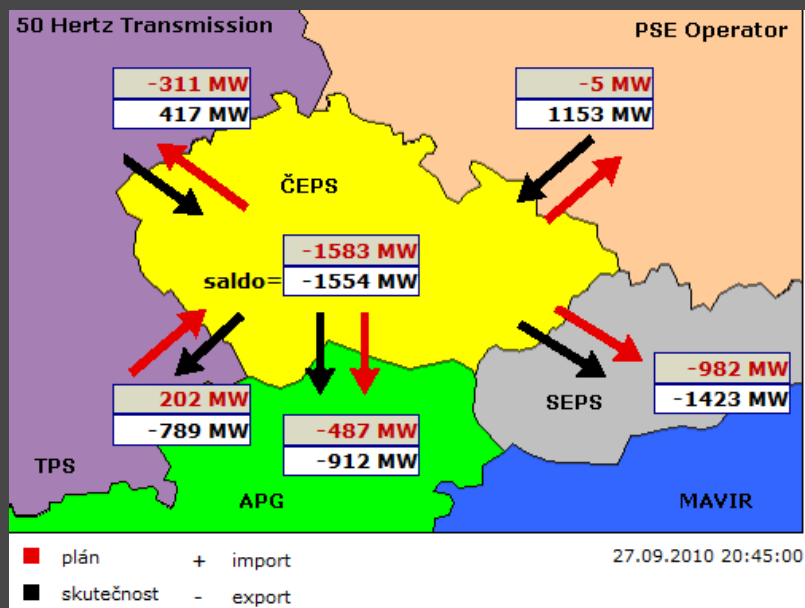
- liberalizácia trhu s elektrinou v rámci Európy,
- podpora obnoviteľných zdrojov.

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.1 Úzke miesta v sieťach

Nástupom liberalizácie trhu s elektrinou:

- ⇒ **rastie obchodné využitie el. sietí**, na čo neboli v minulosti koncepčne budované
 - vnútroštátne (zabezpečenie vlastných dodávok energie)
 - medzinárodné (vzájomná výpomoc v prípade porúch, vzájomné výmeny a tranzit elektrickej energie boli realizované dlhodobými kontraktmi s presne definovaným plánom)
- ⇒ obchodné požiadavky často prevyšujú kapacitné možnosti sietí
- ⇒ vznikajú značné rozdiely medzi fyzikálnymi a obchodnými tokmi el. energie



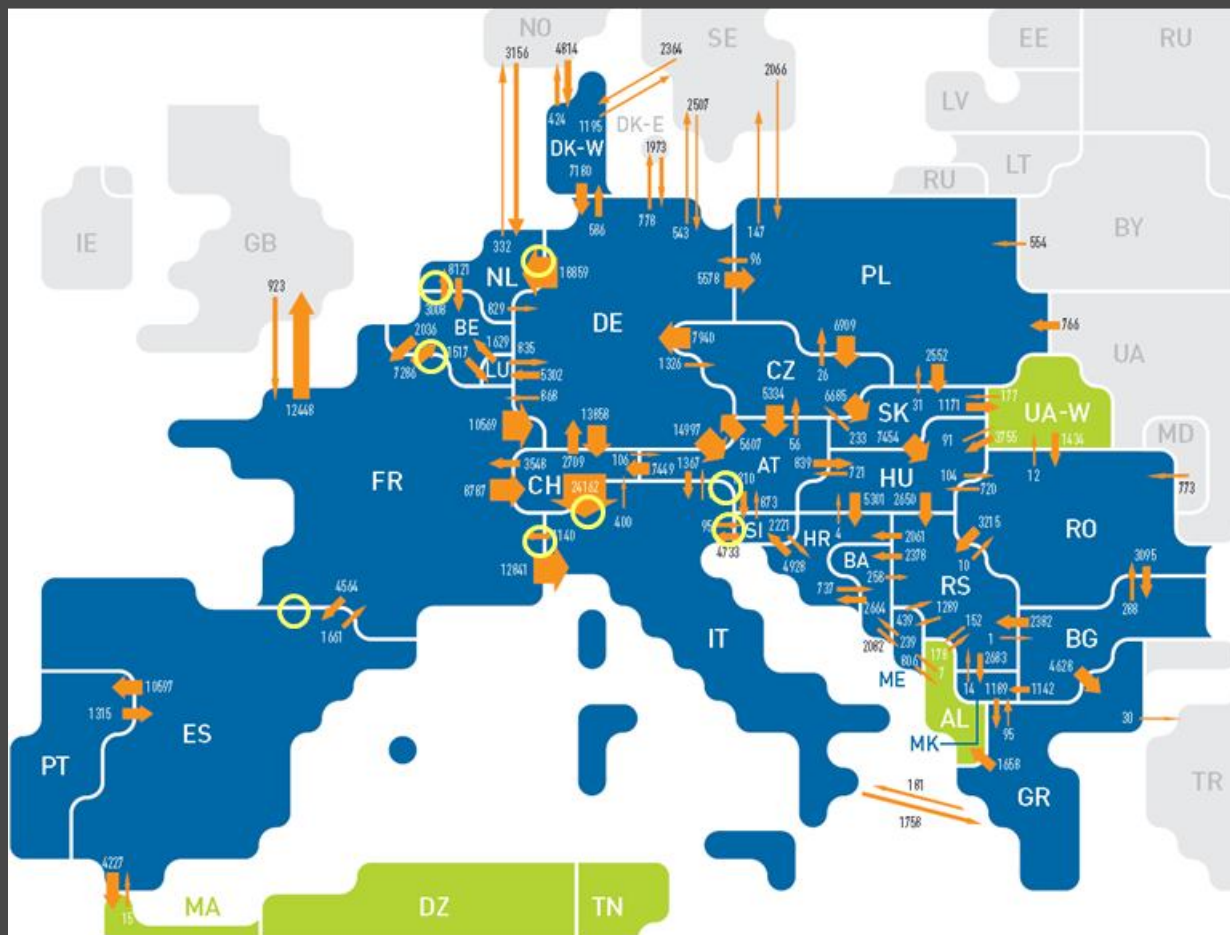
Rozdiely medzi fyzikálnymi a obchodnými tokmi v prenosovej sústave (on-line system DAMAS)

- ⇒ riziko lokálneho preťažovania sietí, vznik tzv. **úzkych miest**

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.1 Úzke miesta v sieťach

V Európe sa úzke miesta nachádzajú celoročne a celodenne hlavne na profiloch:



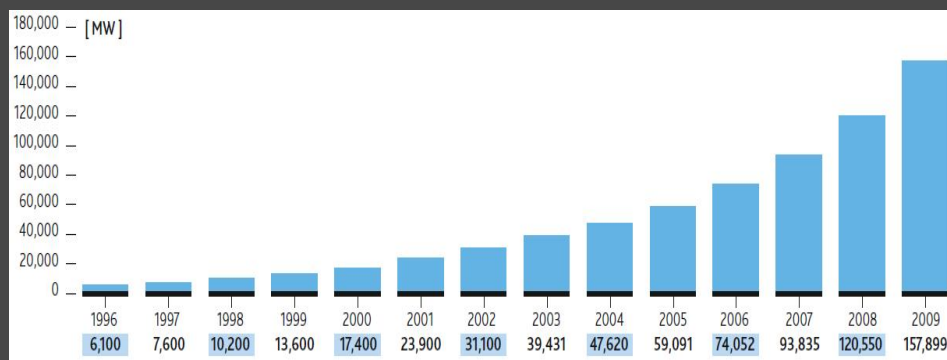
○ úzke miesta

Medzištátne výmeny elektriny v GWh

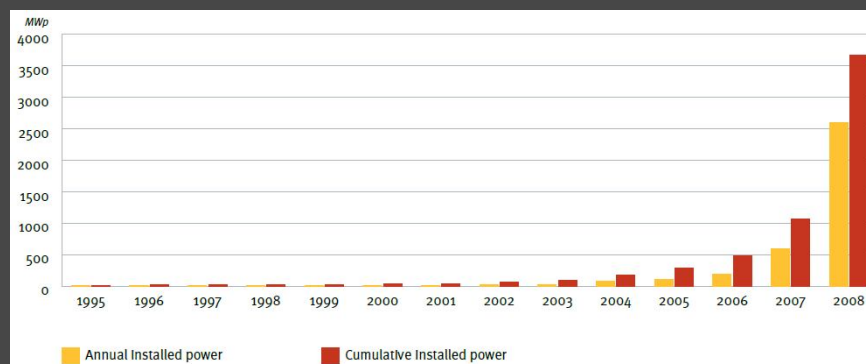
1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.2 Vplyv prevádzky obnoviteľných zdrojov na toky výkonov v ES

V súvislosti s politikou EÚ (cieľ: 20-20-20) – prudký nárast obnoviteľných zdrojov



Vývoj inštalovaného výkonu VTE vo svete



Vývoj inštalovaného výkonu FVE vo svete

Zdroje s časovo premenlivou a ťažko predikovateľnou výrobou zvyšujú nároky na riadenie prevádzky ES:

⇒ **regulačný výkon** na zaistenie vyrovnanej bilancie medzi spotrebou a výrobou elektriny v reálnom čase v regulačnej oblasti

V podmienkach SR - hlavný dôvod dočasného pozastavenia do konca roka 2011 vydávať kladné stanoviská SEPS, a. s., pre účely získania osvedčenia od MH SR na výstavbu FVE aj VTE (doteraz dostali kladné stanovisko od SEPS, resp. distrib. spoločností FVE o celkovom výkone cca 700 MW).

Osvedčenie nie je potrebné:

- pre FVE, ktoré sú umiestnené na budove s celkovým inštalovaným výkonom do 100 kW,
- pre VTE do 1 MW.

⇒ **riziko preťaženia prenosových prvkov** v oblastiach so silnou koncentráciou VTE

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.2 Vplyv prevádzky obnoviteľných zdrojov na toky výkonov v ES

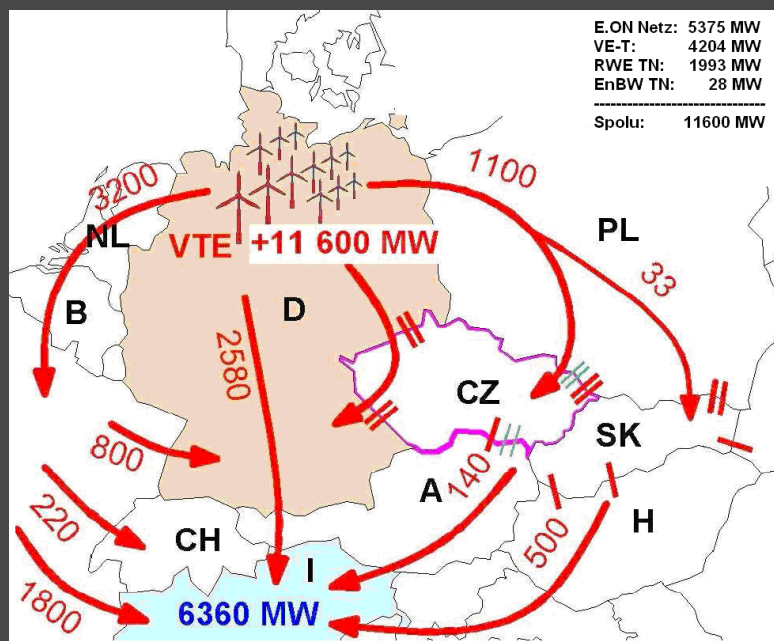
Nemecko - cca 1/3 inštal. výkonu Európy (cca 26 GW z cca 76 GW)

Vysoká výroba energie v týchto elektrárňach spôsobuje:

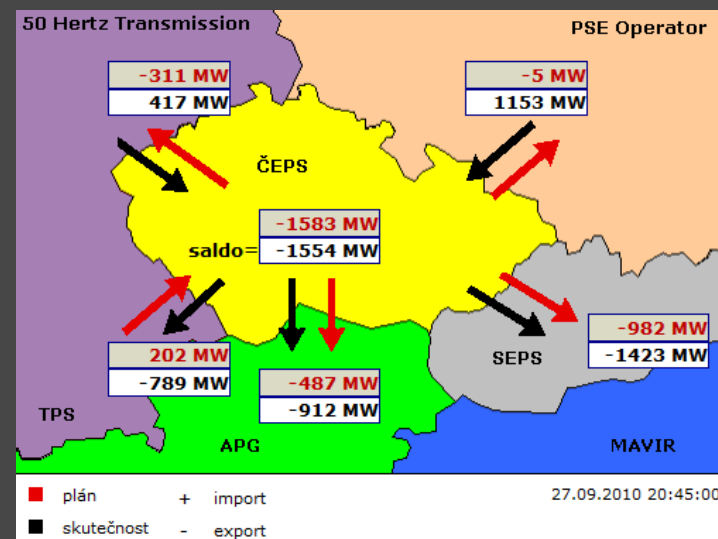
- silné tranzitné toky naprieč nemeckou sústavou (v smere S–J),
- silné paralelné kruhové toky cez okolité sústavy (NL, B, FR; PL, CZ, SK, ...)

⇓ (neplánované prenosy)

riziko preťaženia prvkov alebo nedodržanie N-1 kritéria



Dopad výrazného zvýšenia výroby VTE na prenosy v smere S–J dňa 11.11.2004 o 19.00 hod

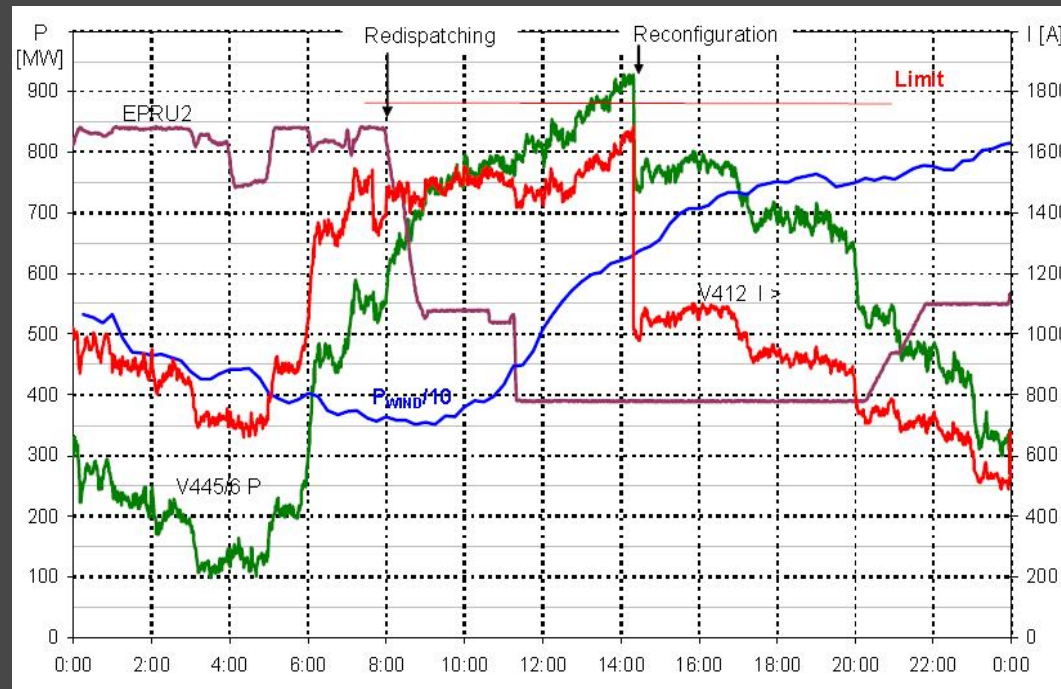
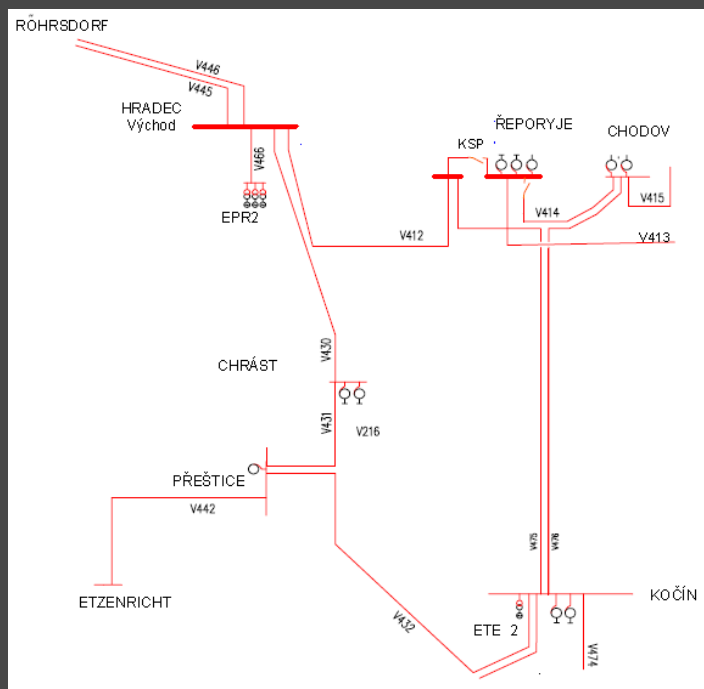


Pozn.: v českej prenosovej sústave, je zrejma súvislosť medzi nárastom rozdielov zobchodovaných a skutočných tokov a nárastom výkonu veterných elektrární v Nemecku

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.2 Vplyv prevádzky obnoviteľných zdrojov na toky výkonov v ES

- kvôli zamedzeniu preťažovania vedení, ČEPS musí používať neštandardné nástroje operatívneho riadenia (napr. **redispečing zdrojov, rekonfigurácia siete**)



Situácia výroby a tokov výkonov elektriny pri zvýšenej výrobe veterných elektrární v Nemecku dňa 19.11.2008

- z dlhodobého hľadiska nepostačujúce riešenie (predpoklad nárastu výkonu VTE v Nemecku do roku 2020 na cca 50 000 MW)

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.3 Riešenie problému preťažovania vedení

Riešenie problému preťažovania vedení (vzniku úzkych miest):

- ⇒ zvyšovanie prenosovej kapacity existujúcich, resp. výstavba nových vedení
 - zdĺhavý a náročný proces (ekonomické, ekologické hľadisko)
- ⇒ zavedenie špecializovaných prostriedkov na reguláciu tokov výkonov

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.1 FACTS zariadenia na reguláciu tokov výkonov

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System - pružný striedavý prenosový systém)

- systémy na báze výkonovej elektroniky zabezpečujúce rýchlu, presnú a plynulú reguláciu parametrov ES

Základné rozdelenie FACTS:

- sériové
- paralelné
- kombinované (sériovo-paralelné)

Riadené parametre:

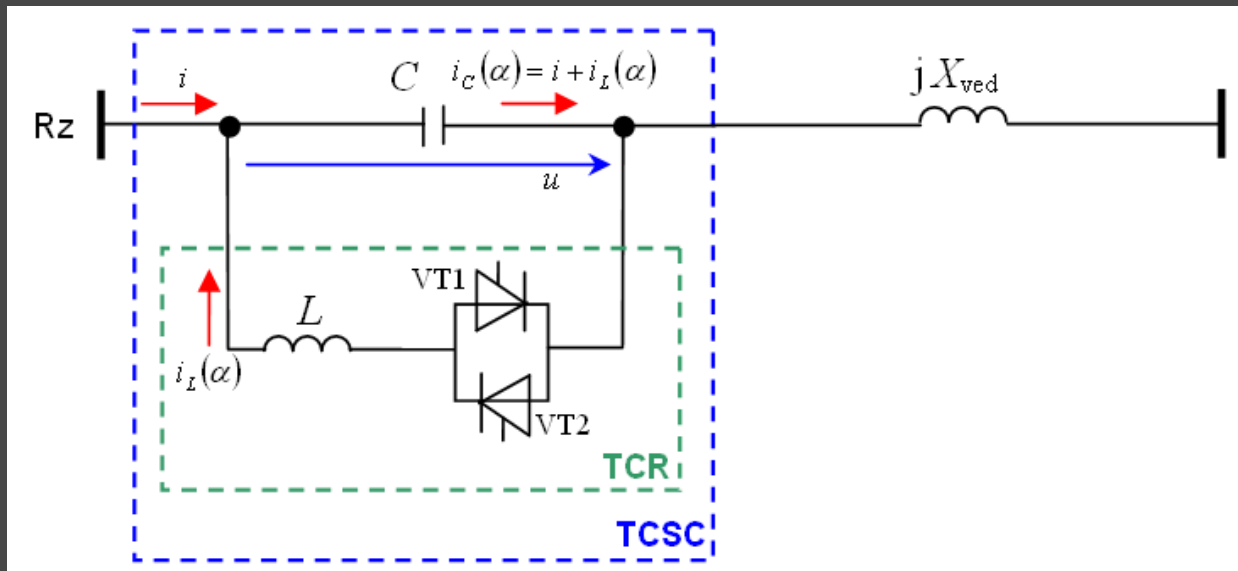
1. FACTS regulujúce pozdĺžnu impedanciu (TCSC, TSSC)
2. FACTS injektujúce napätie v sérii s kompenzovaným vedením (SSSC)
3. FACTS regulujúce priečnu admitanciu (SVC)
4. FACTS injektujúce prúd paralelne s kompenzovaným napätím (STATCOM)
5. Kombinované (napr. UPFC – kombinácia SSSC a STATCOM)

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.1 FACTS zariadenia na reguláciu tokov výkonov

2.1.1 TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor

- zapája sa do série s vedením, tok P sa ovplyvňuje zmenou X prenosovej cesty
- kondenzátor, ku ktorému je paralelne pripojená tyristorom riadená tlmivka (TCR)



$$P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{ved}} \cdot \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

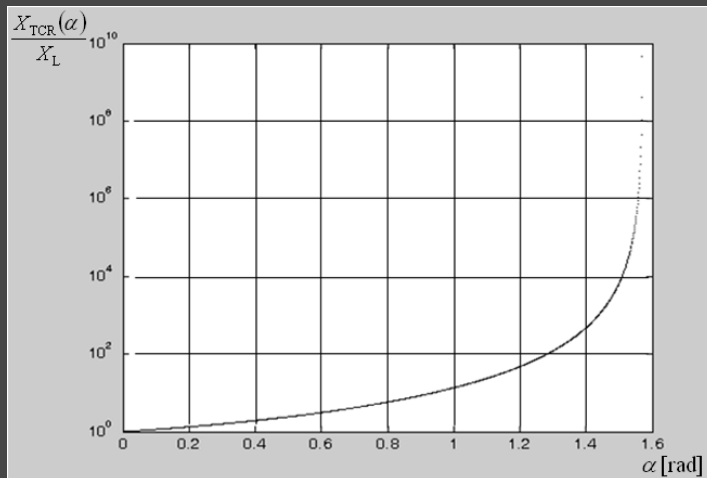
2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.1 FACTS zariadenia na reguláciu tokov výkonov

2.1.1 TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor

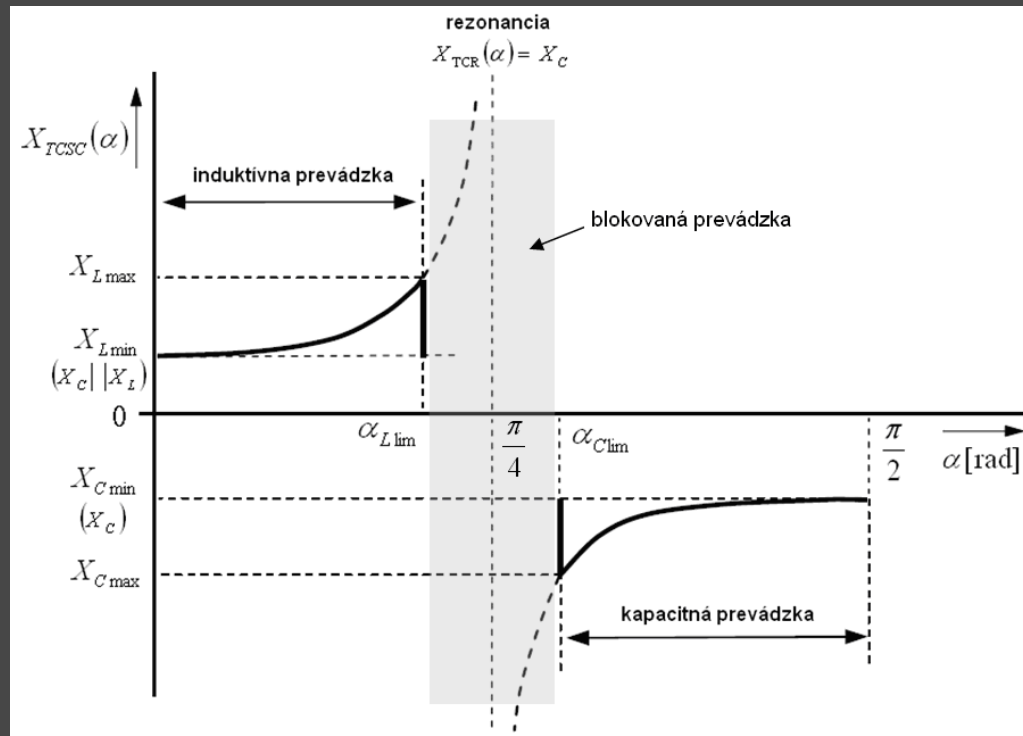
Celková reaktancia TCSC:

$$\bar{X}_{TCSC}(\alpha) = \frac{\bar{X}_C \cdot \bar{X}_{TCR}(\alpha)}{\bar{X}_{TCR}(\alpha) + \bar{X}_C} = \frac{-jX_C \cdot jX_{TCR}(\alpha)}{jX_{TCR}(\alpha) - jX_C} = j \frac{X_C \cdot X_{TCR}(\alpha)}{X_C - X_{TCR}(\alpha)}$$



$$X_{TCR}(0) = X_L$$

$$X_{TCR}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \infty$$



Prevádzkový diagram TCSC (vplyv riadiaceho uhla α na celkovú reaktanciu)

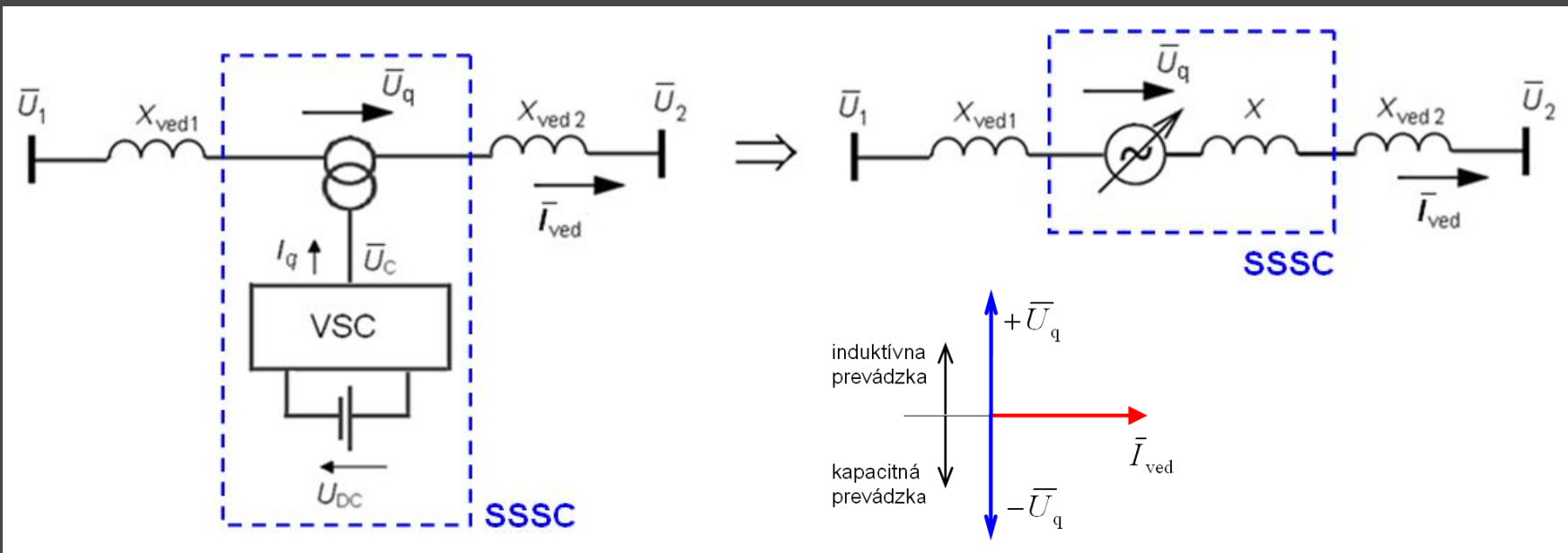
- efektívna (rýchla, presná a plynulá) regulácia činného výkonu

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.1 FACTS zariadenia na reguláciu tokov výkonov

2.1.2 SSSC - Static Synchronous Series Compensator

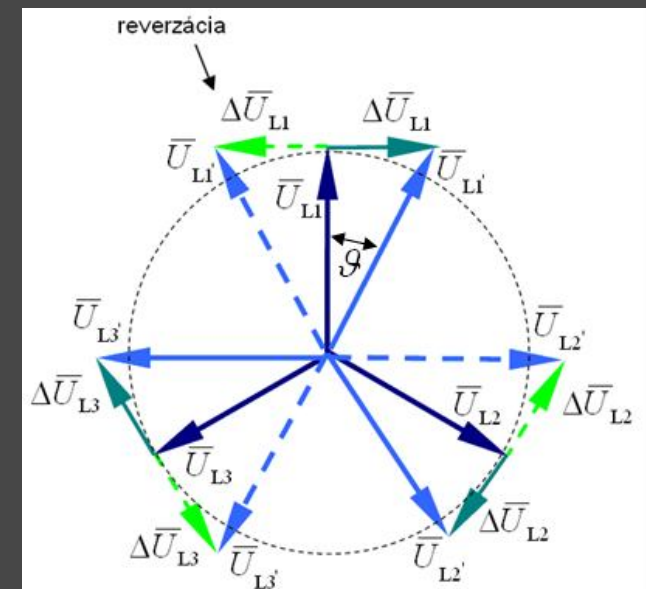
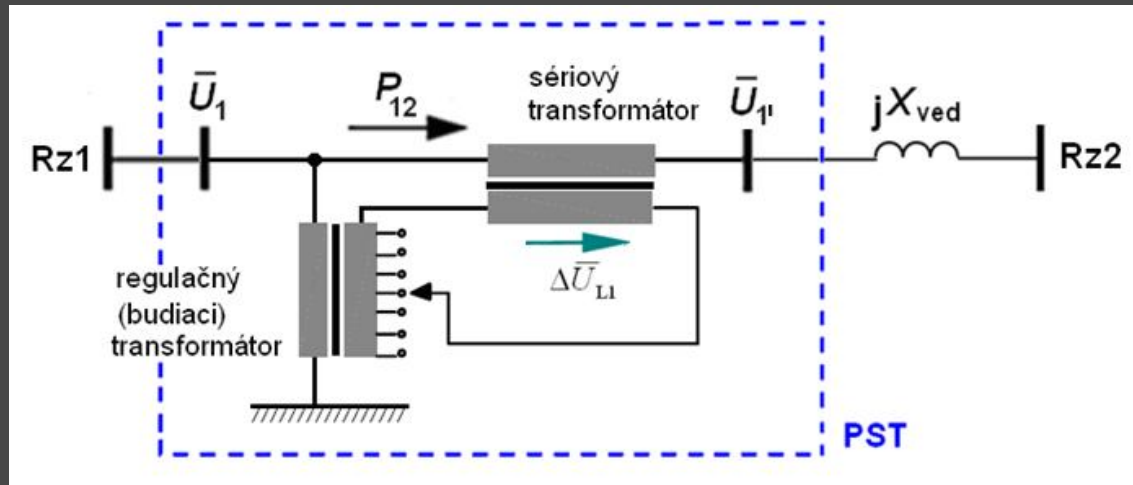
- princíp regulácie toku P spočíva v injektovaní riadeného striedavého napätia \bar{U}_q do série s vedením, ktoré je fázovo posunuté oproti prúdu tečúceho vedením o $\pm 90^\circ$
- SSSC sa teda spáva ako regulovateľná L alebo C v sérii s vedením, ktorá mení tok P zmenou pozdĺžnej impedancie vedenia (podobne ako TCSC),
- základom SSSC je VSC (Voltage Source Converter) – napät'ový 3-fáz. menič, ktorý umožňuje regulovať veľkosť a fázu výstupného napätia \bar{U}_C .



2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.2 Transformátory s uhlovou reguláciou - PST (Phase Shifting Transformers)

- zariadenia s výrazným regulačným vplyvom,
- ekonomicky prístupnejšie oproti FACTS
- umiestňujú sa v rozvodni do vývodu vedenia



- princíp regulácie toku P spočíva v regulácii uhla medzi vstupným a výstupným napätím transformátora

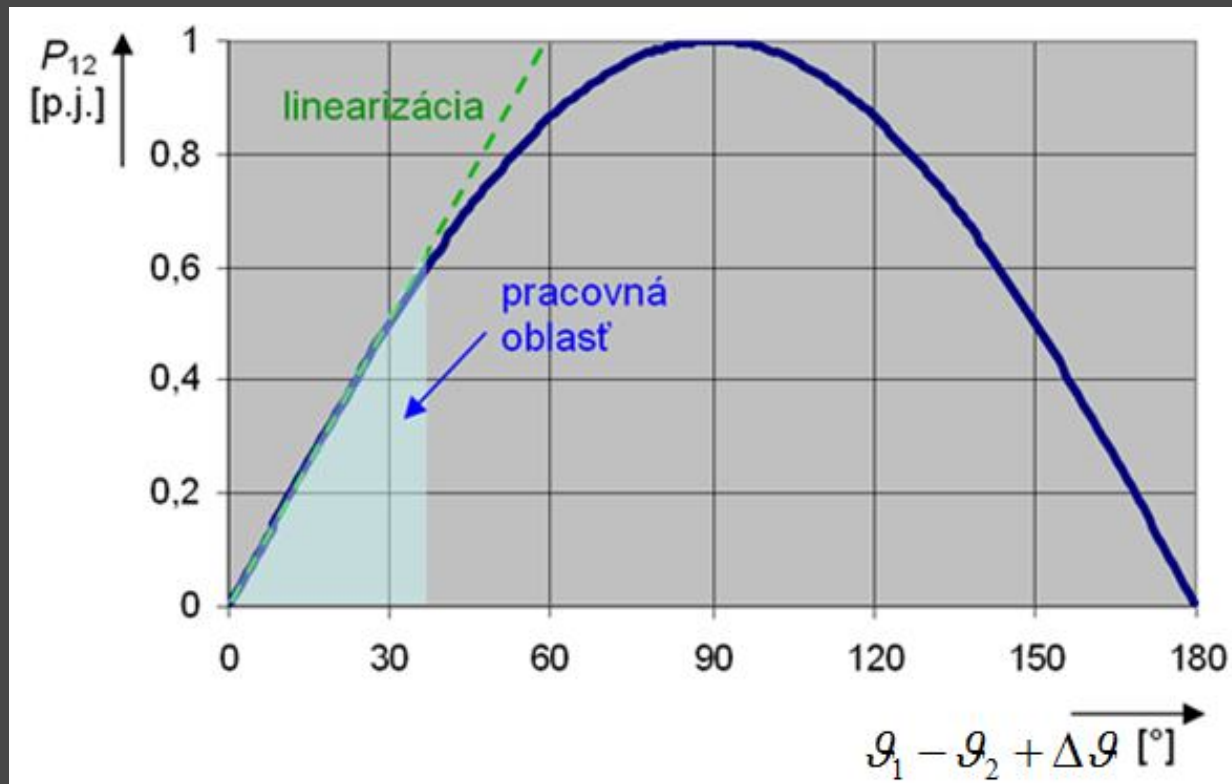
$$P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{ved}}} \cdot \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad P'_{12} = P_{12} \pm \Delta P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{ved}} + \Delta X} \cdot \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2 + \Delta \vartheta)$$

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.2 Transformátory s uhlovou reguláciou - PST (Phase Shifting Transformers)

- maximálny regulačný rozsah PST je cca 30° až 40°

$$P'_{12} = P_{12} \pm \Delta P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{ved}} + \Delta X} \cdot \sin(\vartheta_1 - \vartheta_2 + \Delta \vartheta)$$



Závislosť prenášaného výkonu od regulačného uhla PST

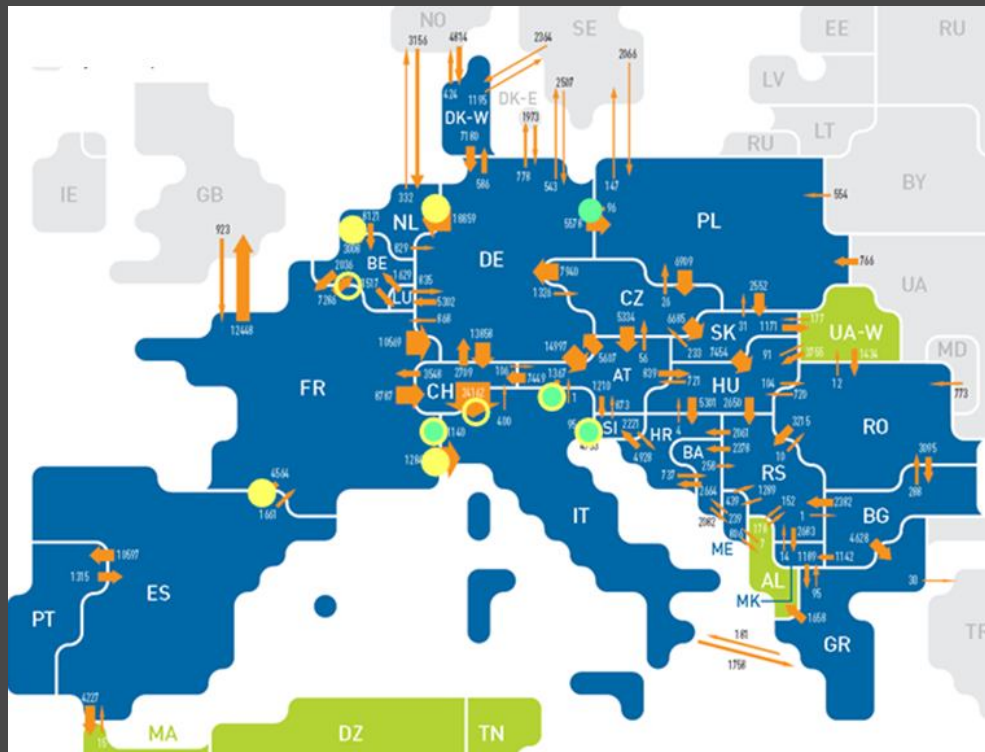
2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.2 Transformátory s uhlovou reguláciou - PST (Phase Shifting Transformers)

Využitie PST

Cieľ:

- zabrániť preťažovaniu vedení redukcíou ich prenášaného výkonu
- zvýšiť kapacitu prenosu na cezhraničnom profile (výkon z preťažených vedení sa presmeruje na nevyužívané vedenia na profile)
- dodržať $N-1$ kritérium (predchádzanie prekročenia bezpečnostných limitov pri poruchových stavoch)



- realizované PST
- plánované PST

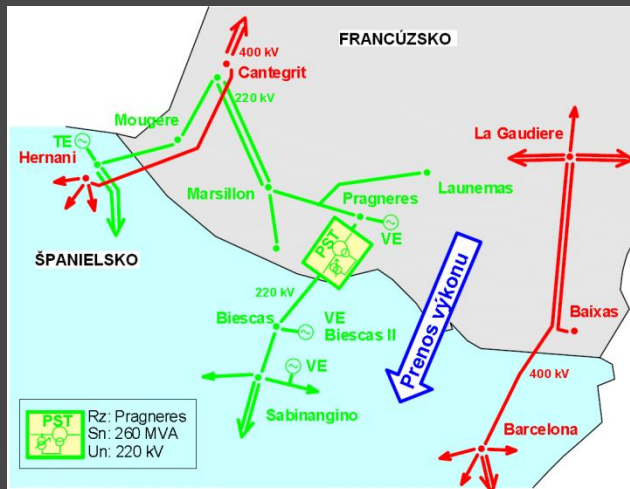
PST na úzkych profiloch v Európe

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.2 Transformátory s uhlovou reguláciou - PST (Phase Shifting Transformers)

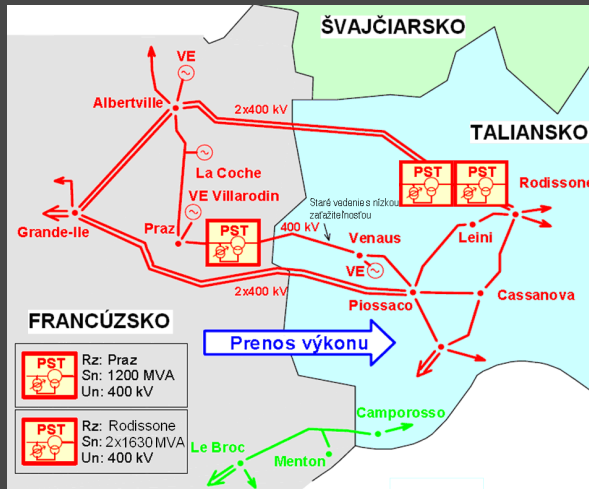
Inštalované PST

- profil Francúzsko – Španielsko



PST Pragneres, 260 MVA, 220 kV,
-35/+ 40°, 18 odbočiek, 1988

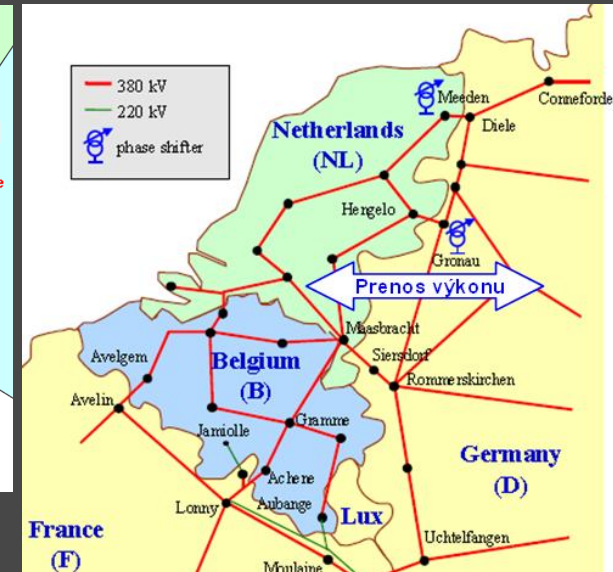
- profil Francúzsko – Taliansko



PST Praz, 1200 MVA, 400 kV,
-15/+ 15°, 33 odb., 2002

2 x PST Rondissone, 2x1630 MVA,
400 kV, -18/+ 18°, 33 odb., 2003

- profil Nemecko – Holandsko



PST Gronau, 1039 MVA, 400 kV
-12/+ 12°, 37 odb.

2 x PST Meeden, 2x1000 MVA, 400 kV
-37/+ 37°, 33 odb., 2002

- profil Belgicko – Holandsko
PST Zandvielt, 1400 MVA, 400 kV
-25/+ 25°, 2008

2 x PST Van Eyck, 2 x 1400 MVA,
400 kV, -25/+ 25°, 2008

- profil Taliansko – Slovinsko
PST Padricano, 220 kV, 2008

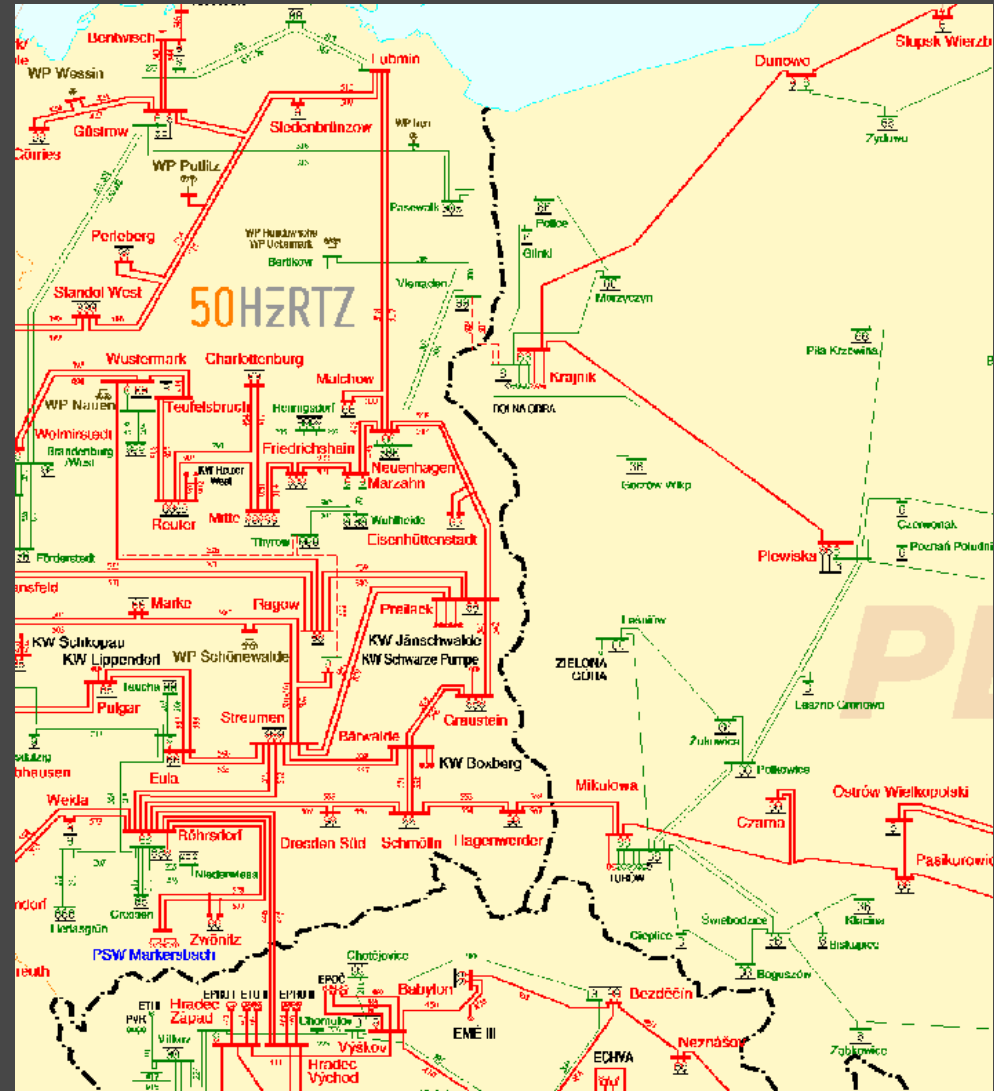
2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.2 Transformátory s uhlovou reguláciou - PST (Phase Shifting Transformers)

Plánované PST v Európe

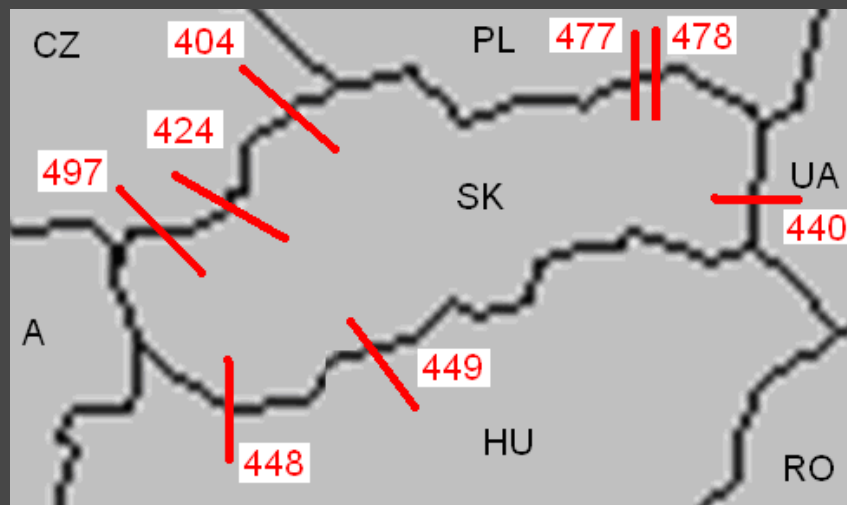
(podľa "Ten-Year Network Development Plan 2010-2020")

- profil Francúzsko – Taliansko
PST Comporosso, 220 kV
- profil Rakúsko – Taliansko
PST Lienz-Soverzene, 220 kV
- profil Taliansko – Slovinsko
PST Divaca, 400 kV
- profil Poľsko – Nemecko
do r. 2013:
 - prechod z 220 kV na 400 kV (Krajnik - Vierraden)
 - inštalácia: PST Krajnik a PST Mikulovaočakáva sa:
 - zníženie kruhových tokov z Nemecka do Poľska a do Čiech, resp. aj Slovenska
 - zvýšenie bezpečnosti dodávky (N-1 kritérium)
 - zvýšenie prenosovej kapacity D-PL profilu kvôli obchodným výmenám



3. APLIKÁCIA PST NA REGULÁCIU TOKOV ČINNŇNÝCH VÝKONOV NA CEZHRAŇIČNÝCH VEDENIACH PS SR

- model prenosových sústav v rámci UCTE v programe PSLF zo dňa 29.11.2007 v čase 12.30 hod.
- model obsahoval: 5784 uzlov (z toho 982 generatorických, 3262 záťažných), 7798 vedení, 1102 transformátorov.
- PST bol nasadzovaný jednotlivo do všetkých cezhraničných vedení 400 kV



vedenie		P [MW]	profil	P [MW]
V440	V. Kapušany-Mukačevo	-153,190	SK-UA	-153,190
V448	Gabčíkovo-Győr	-422,935	SK-HU	-588,095
V449	Levice-Göd	-165,160		
V477	Lemešany-Krosno	304,728	SK-PL	609,456
V478	Lemešany-Krosno	304,728		
V424	Križovany-Sokolnice	126,277	SK-CZ	937,030
V497	Stupava-Sokolnice	223,314		
V404	Varín-Nošovice	502,496		
V270	P. Bystrica-Lískovec	57,161		
V280	Senica-Sokolnice	27,782		

Saldo [MW]	Straty vo vedeniach 220 kV, 400 kV a transformátoroch [MW]
805,201 (import)	23,228

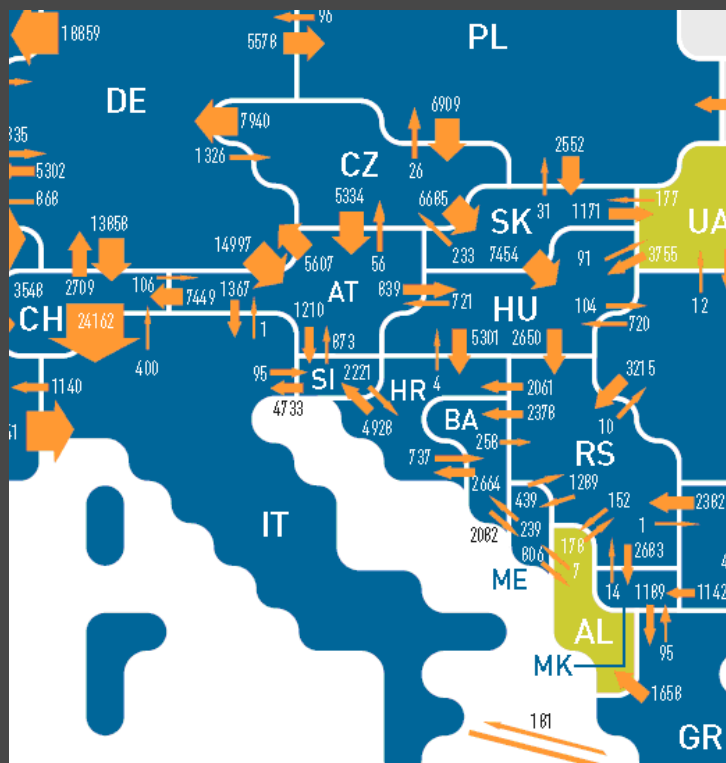
„+“ tok energie do ES SR
 „-“ tok energie z ES SR.

3. APLIKÁCIA PST NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV NA CEZHRANIČNÝCH VEDENIACH PS SR

Podrobnejšia analýza nasadenia PST do profilu SK-HU (najviac zaťažený profil PS SR)

Hlavný dôvod silného zaťaženia profilu:

- zdrojovo silne deficitná južná časť Európy (IT, HU, HR, AT, GR) – tranzit v smere S-J
- veľká časť exportu z PL: cez PL-CZ-SK-HU profil
z CZ: cez CZ-SK-HU profil



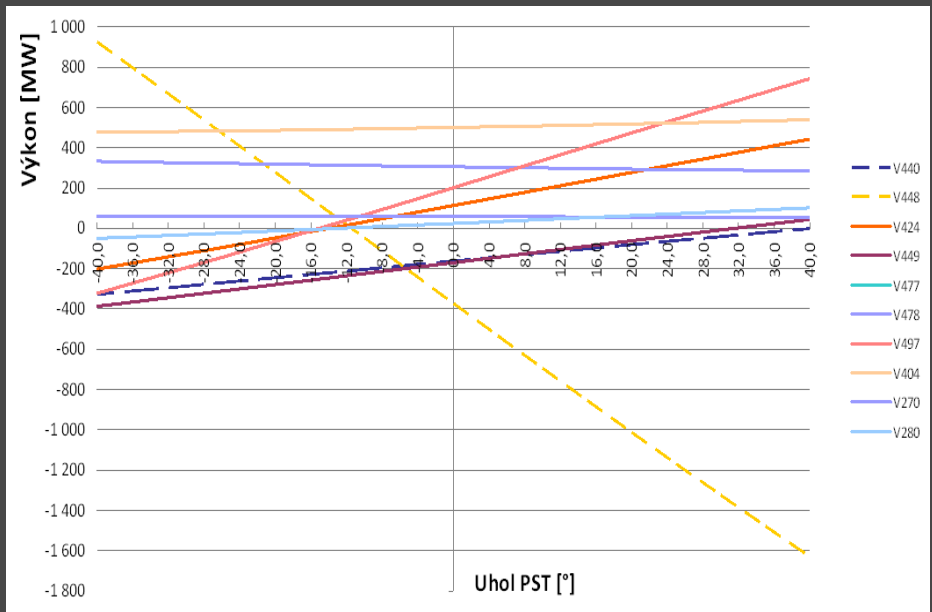
bilancia	AT	BA	BE	BG	CH	CZ	DE	DK_W	ES	FR	GR	HR
2008	5505	-1 650	10 475	-5 344	-31	-11 462	-22 450	-1 035	-10 591	-46 319	5 611	6 578
2007	6912	-601	6 660	-4 463	-893	-16 145	-19 115	-1 773	-5 302	-55 105	4 355	6 343
bilancia	HU	IT	LU	ME	MK	NL	PL	PT	RO	RS	SI	SK
2008	3905	39 890	4 355	1 894	2 717	15 741	-683	9 282	-4 433	562	-1 594	525
2007	3984	46 153	3 959	2 650	2 483	17 582	-5 355	7 329	-2 086	275	426	1 726

Ročné bilancie výmen v GWh

SK-HU profil - potenciálne najvhodnejší v prípade uvažovania nasadenia PST v PS SR.

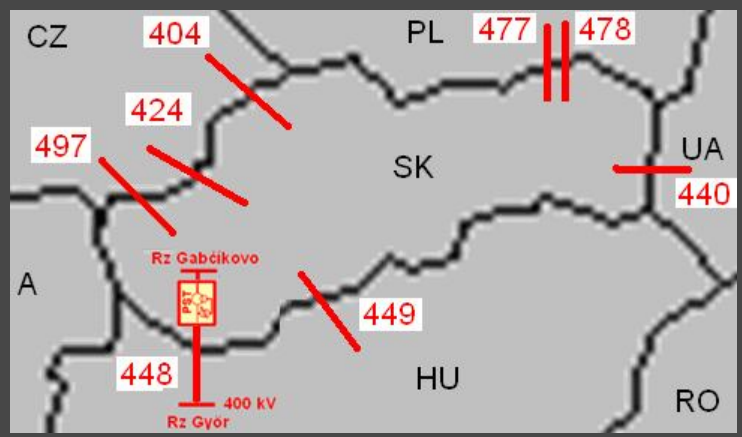
3. APLIKÁCIA PST NA REGULÁCIU TOKOV ČINNŇNÝCH VÝKONOV NA CEZHRANIČNÝCH VEDENIACH PS SR

Nasadenie PST do vedenia V448 na profile SK-HU



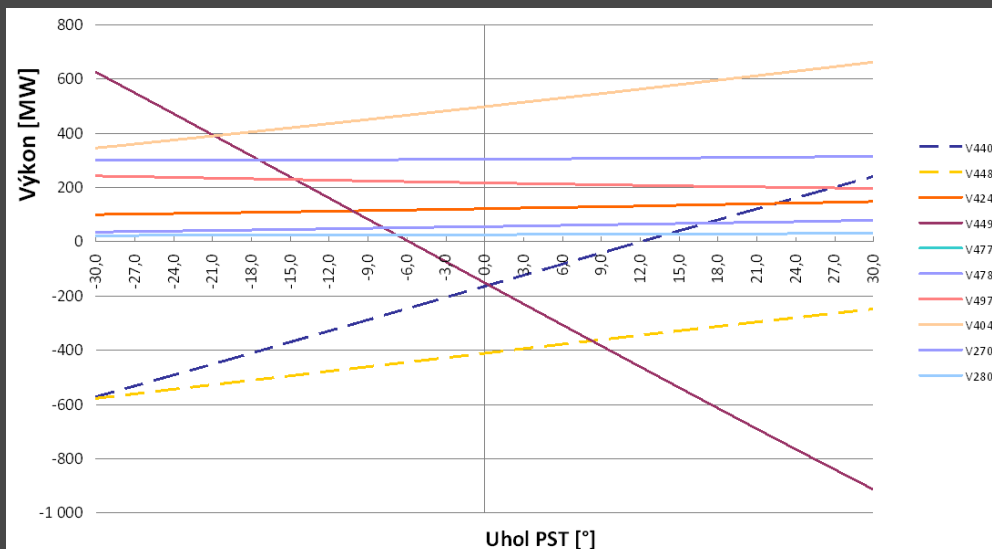
vedenie		regulačný vplyv [MW/°]
V440	V. Kapušany-Mukačevo	4,077
V448	Gabčíkovo-Győr	-31,914
V449	Levice-Göd	5,392
V477	Lemešany-Krosno	-0,604
V478	Lemešany-Krosno	-0,604
V424	Križovany-Sokolnice	8,055
V497	Stupava-Sokolnice	13,311
V404	Varin - Nošovice	0,777
V270	P. Bystrica-Liskovec	-0,035
V280	Senica-Sokolnice	1,888

Vplyv regulácie PST na toky cezhraničných vedení



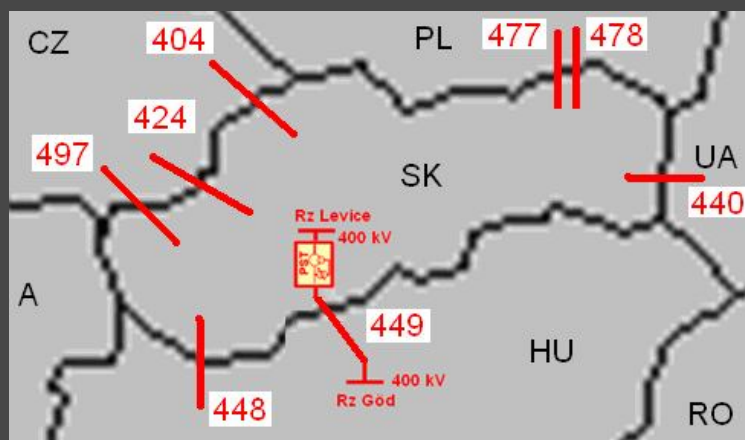
3. APLIKÁCIA PST NA REGULÁCIU TOKOV ČINN�의NÝCH VÝKONOV NA CEZHRAŇIČNÝCH VEDENIACH PS SR

Nasadenie PST do vedenia V449 na profile SK-HU



vedenie		regulačný vplyv [MW/°]
V440	V. Kapušany-Mukačevo	13,478
V448	Gabčíkovo-Győr	5,472
V449	Levice-Göd	-25,562
V477	Lemešany-Krosno	0,253
V478	Lemešany-Krosno	0,253
V424	Križovany-Sokolnice	0,801
V497	Stupava-Sokolnice	-0,770
V404	Varin - Nošovice	5,260
V270	P. Bystrica-Liskovec	0,715
V280	Senica-Sokolnice	0,138

Vplyv regulácie PST na toky cezhraničných vedení



Výsledky modelovania potvrdili výraznú schopnosť PST regulovať výkonové toky na medzištátnych profiloch.

Investície, ako sú špecializované prostriedky na reguláciu tokov výkonov vyžadujú podrobnú analýzu ich vplyvu aj na okolité ES s výhľadom na jej plán rozvoja (vývoj zdrojovej časti, spotreby, konfigurácia ES) na niekoľko rokov dopredu.

4. ZÁVER

Vzhľadom na súčasné trendy v oblasti elektroenergetiky:

- nárast spotreby elektrickej energie,
- vytváranie jednotného trhu s elektrinou (rastúce požiadavky na obchodné využitie sietí),
- nárast obnoviteľných zdrojov,

regulácia tokov výkonov je jedným z riešení ako:

- **napomôcť k predchádzaniu vzniku nepriaznivých situácií v prevádzke ES,**
- **zvýšiť obchodné využitie medzinárodných profilov** (možnosť zvýšenia importov/exportov do/z ES).

ĎAKUJEM ZA POZORNOSŤ

Ľubomír Beňa
Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach
Mäsiarska 74

E-mail: lubomir.bena@tuke.sk

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.4 Veľké výpadky zásobovania elektrickou energiou

Štát	Dátum výpadku	Doba výpadku	Počet osôb bez prúdu, resp. veľkosť výpadku	Oblasti postihnuté výpadkami
USA	14. august 2003	42 hodín	50 mil.	5 štátov na severovýchode USA, juhovýchod Kanady zd
Slovinsko	27. august 2003	–	–	– zd
Veľká Británia	28. august 2003	0,5 hodiny	0,5 mil.	Časti Londýna, metro, železnica v
Dánsko, Švédsko	23. september 2003	2 hodiny	4 mil.	Dánsko – ostrovy Sjaeland, Bornholm Švédsko – južná časť v
Taliansko	28. september 2003	29 hodín	57 mil.	celé Taliansko v
Grécko	12. júl. 2004	5 hodín	výpadok zaťaženia 4500 MW	Južné Grécko za
Rusko	24.-25. máj 2005	20 hodín	výpadok zaťaženia 3500 MW	Moskva
Indonézia	18. august 2005	7 hodín	100 mil.	Indonézske ostrovy Java a Bali v
Česká republika (stav núdze)	25. júl 2006	8 hodín	obmedzenie spotreby 600 MW regulačnými stupňami	Česká republika za
Systémová porucha v UCTE	4. november 2006	2 hodiny	15 mil.	Nemecko, Francúzsko, Taliansko, Belgicko, Rakúsko, Španielsko a Portugalsko v

- prvotná príčina výpadku (výpadok zdroja, nárast zaťaženia, skrat na vedení),
- následný **výpadok dôležitých prepojovacích vedení z dôvodu preťaženia**,
- dominový efekt výpadkov vedení s dopadom na celú oblasť.
- veľké ekonomické a spoločenské dopady.

⇒ potvrdenie potreby **posilňovania elektrických sietí** prípadne **zavádzania prostriedkov na reguláciu tokov výkonov**

2. ŠPECIALIZOVANÉ PROSTRIEDKY NA REGULÁCIU TOKOV ČINNÝCH VÝKONOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

2.3 Overenie vplyvu regulácie tokov výkonov pomocou PST na jednoduchom modeli ES

