

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Ing. Jiří Ptáček

**REGULACE TOKŮ VÝKONŮ V PROPOJENÝCH
ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH**

POWER FLOW CONTROL IN INTERCONNECTED
POWER SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Studijní obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Michal Kolcun, Ph.D.

Prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.

Ing. Petr Modlitba, CSc.

Datum obhajoby: 24. 3. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace toků výkonu, exporty, tranzity elektrické energie, mezistátní přenosy výkonu, prostředky pro regulaci toků výkonů, transformátory s příčnou regulací, simulační modely ES, metodika výběru lokalit, provoz transformátorů s regulací úhlu, dopady regulace na transformátorech na ES, optimalizace návrhu, ekonomické zhodnocení.

KEYWORDS

Power flow, control, phase-angle regulator, phase shifting transformer, transmission line, interconnection, modelling, power system analyses, simulation, optimal location, investment, unscheduled power flow.

Místo uložení rukopisu: Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně
Údolní 53, Brno, 602 00

© Jiří Ptáček, 2004

ISBN 80-214-2656-X

ISSN 1213-4198

O B S A H

KLÍČOVÁ SLOVA	2
KEYWORDS	2
1 ÚVOD	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
4 SLOŽENÍ A FUNKCE TRANSFORMÁTORŮ S REGULACÍ FÁZE	9
5 ANALÝZA POMĚRŮ NA MEZISTÁTNÍCH PROFILECH ES ČR A ES SR	13
6 MODELOVÉ VYUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ V ES ČR A ES SR	14
7 INVESTIČNÍ NÁROČNOST A EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST	19
8 METODIKA NÁVRHU A STANOVENÍ PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORŮ PST	21
9 ZÁVĚRY PRÁCE	24
LITERATURA	28
CURRICULUM VITAE	30
ABSTRACT	31

1 ÚVOD

V současné době dochází k většímu využívání přenosových prvků v sítích na všech napěťových úrovních. V přenosové síti je to často spojeno se zvyšujícími se mezistátními výměnami elektrické energie. Provoz přenosových sítí ES ČR i ES SR je také v současnosti stále více ovlivňován dopady mezistátních výměn, než projevy obchodních případů na vnitřním trhu s elektřinou. Velikost i charakter přenášených výkonů vyvolává častou potřebu jejich regulace, především potřebu jejich omezování. K tomu je sice možné, ale jen v omezené míře, využít stávajících dispečerských prostředků. Z hlediska účinnosti nasazení je však nutno uvažovat o použití specializovaných prostředků pro regulaci toků výkonů.

Vyšší využívání přenosových prvků v podmínkách omezeného investičního rozvoje sítí vede výskytu nových úzkých míst a nebezpečných situací v provozu přenosových sítí. S rostoucími přenosy a výměnami rovněž vzrůstá nebezpečí neřízených kruhových toků, riziko přetěžování sítí a riziko zvýšené pravděpodobnosti výpadků. Potřebu regulovat toky výkonů v sítích podtrhuje i výskyt posledních velkých poruch, které se v propojených soustavách vyskytly a měly za následek velká omezení v zásobování.

Trend vedoucí k využívání specializovaných prostředků pro regulaci toků výkonů je vyvolán jak velkou dynamikou změn v přenosech, tak i značně zdoluhavými a problematickými procesy výstavby nových vedení přenosové sítě.

Technický přínos těchto zařízení je pro dispečerské složky vždy pozitivní. Nestandardní výroba a specializovaný charakter těchto zařízení však způsobuje jejich značnou investiční náročnost, která je omezujícím prvkem pro jejich větší rozšiřování.

Jedním z technicky velmi účinných zařízení pro regulaci toků výkonů v propojených soustavách je transformátor s příčnou regulací - Phase Shifting Transformer (PST). S ohledem na jeho nasazení v západní Evropě i na relativně příznivější cenu vůči zařízením založeným na výkonové elektronice lze očekávat i jeho potenciální využití v ES ČR a ES SR. Proto byla tato disertační práce na problematiku s tím spojenou zaměřena.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce a její zaměření navazuje na činnosti prováděné pro provozovatele přenosové sítě ČEPS, a.s. v oblasti problematiky omezení výkonů na mezistátním profilu Polsko-Morava, kde jsou rozpracovány konkrétní přístupy. Práce rovněž doplňuje spolupráci s oddělením síťových výpočtů provozovatele slovenské přenosové sítě SEPS, a.s. v oblasti výpočtů přenosových sítí.

Cílem zaměření disertační práce je širší pohled na problematiku regulace toků výkonů v el. sítích, teoretické rozpracování, stanovení metodických postupů

a zpracování simulačních modelů. Tato problematika není v ES ČR ani ES SR zatím komplexněji řešena ani analyzována. V evropském měřítku jsou zkušenosti pouze omezené z několika málo případů využití zařízení pro regulaci přenosů v ES.

Disertační práce byla zaměřena následujícími směry:

- Analýza vlastností a srovnání využitelnosti jednotlivých typů Phase Shifting Transformers
- Zpracování reálných simulačních výpočetních modelů Phase Shifting Transformers pro výpočty provozních režimů sítí
- Posouzení provozních situací a oblastí v ES ČR a ES SR, ve kterých je potenciálně vhodné uvažovat o využití transformátorů PST pro regulaci fáze
- Návrh a ověření metodiky na výběr optimálních lokalit umístění PST v sítích
- Provedení modelových výpočtů provozu sítí s využitím transformátorů s regulací fáze v PS ES ČR a ES SR pro posouzení jejich využitelnosti
- Návrh metodiky pro stanovení konkrétních parametrů transformátorů PST s ohledem na umístění v dané lokalitě
- Posouzení dalších provozních dopadů a souvislostí využití transformátorů PST v sítích
- Stanovení doporučení pro dispečerské využití transformátorů PST v provozu
- Ekonomické zhodnocení možnosti instalace a provozního využití PST v ES ČR, ES SR
- Shrnutí doporučení - přínosů i rizik pro možné využití PST v ES ČR a ES SR

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Provoz a dispečerské řízení elektrizačních soustav vždy na jedné straně požadují možnosti řízení toků v sítích, na druhé straně však spíše soustavně trpí nedostatkem těchto prostředků. V ES západní Evropy a USA se rozvoj soustav dopracoval k potřebě uplatňovat aktivní prvky pro řízení toků výkonů v sítích již dříve.

V ES ČR i ES SR byla přenosová soustava budována dlouhodobě koncepčně, avšak spíše za využití posilování a rozvoje propojení. Větší potřeba regulovat toky výkonu v sítích se v minulosti s ohledem na centrální řízení nevyskytovala. V současnosti se však tyto trendy výrazným způsobem mění a roste zájem a potřeba o aktivní řešení v oblasti regulace toků výkonů v sítích.

Současné trendy ve spolupráci elektrizačních soustav lze charakterizovat:

- Vzrůstají objemy mezistátních výměn elektrické energie (vývozy a tranzity).
- Roste počet přenosů na velké vzdálenosti v případě.
- Zvyšuje se provozní využití přenosových prvků, hlavně mezistátních vedení PS.
- Zvyšují se rozdíly mezi fyzikálními a obchodními toky el. energie s negativními dopady na ztráty.

- Existuje poměrně velká rozkolísanost i časové změny velikosti
- Provoz sítí se často přizpůsobuje (i nestandardními řešeními) obchodním případům.
- Při provozu se za těchto podmínek začínají v některých stavech již objevovat úzká místa v sítích, která mohou být i omezujícím faktorem pro zamýšlené obchodní výměny.
- Klasická řešení rozvoje sítí (odstraňující úzká místa), založená na posilování a budování nových vedení, se s ohledem na problémy se získáváním nových koridorů i v souvislosti s environmentálními problémy nejeví jako dostatečně rychlá

Proto se často hledají způsoby umožňující alespoň regionálně ovlivňovat negativní působení výše uvedených procesů na provoz přenosových sítí prostřednictvím cíleného ovlivňování toků výkonů v sítích. Hlavní důvody potřeby regulace toků výkonů lze shrnout následovně:

- Výskyt nových úzkých míst v sítích v souvislosti se zvyšujícími se výměnami el.energie a to hlavně mezistátními
- Přetěžování vedení v údržbových a neúplných stavech sítí
- Omezení rizika přetěžování vedení vnitřní sítě vlivem nevhodného provozu zdrojů (například velkých větrných parků)
- Rizika výpadků a přerušení zásobování v oblastech
- Omezení nevyžádaných obchodních případů (tranzitů)
- Optimalizace provozu přenosových sítí (ztráty činného výkonu)
- Nedostatečná účinnost klasických řešení rozvoje sítí
- Zamezení možnosti šíření velkých systémových poruch

Tyto důvody vedou jak ke snaze zkvalitnit dnešní dispečerské řízení, tak (častěji) ke snaze hledat technická řešení, která by zamezila negativním dopadům na spolehlivost zásobování. Kromě klasických řešení, založených na posilování sítí a rozvoji konfigurace, se stále více dostávají do popředí přístupy založené na instalaci technických zařízení, která umožní aktivně ovlivňovat toky výkonů v propojených sítích.

Pro ovlivňování toků činných výkonů v sítích lze částečně použít existující dispečerské prostředky, mezi které lze zahrnout:

- Ovlivnění provozu zdrojů (redispečink)
- Řízení spotřeby
- Změna topologie sítě
- Vyčlenění oblasti zásobování (ostrovní provoz odběrové oblasti)
- Vydělený provoz zdrojů (ostrovní provoz zdrojů)

Stávající prostředky pro ovlivňování toků výkonů v sítích jsou z hlediska svých schopností a použití v dnešních vzrůstajících potřebách nedostatečné a prakticky

málo použitelné. Jejich využití lze chápat jako doplňkové, nebo jako prostředky „poslední záchrany“ v případech, kdy jsou již všechny ostatní možnosti dispečerského řízení vyčerpány a existuje stále akutní potřeba ovlivnit (alespoň částečně) toky výkonů v sítích.

Jediný efektivní způsob je využití specializovaných prostředků mezi které (se zaměřením na toky činných výkonů) lze řadit:

- HVDC - stejnosměrný přenos.
- FACTS zařízení. Skupina těchto poměrně nových zařízení je poměrně široká. Všechna jsou založena na aplikacích výkonové elektroniky ve střídavých systémech, a to až na úrovni přenosové sítě. Mezi zařízení FACTS pro regulaci toků činných výkonů lze řadit:
 - Tyristorově řízenou sériovou kompenzaci
 - Univerzální regulátor výkonů
- Specializované transformátory pro regulaci toků výkonů. Jedná se o transformátory, které jsou svou konstrukcí uzpůsobeny pro možnosti využití pro regulaci toků výkonů v sítích. K tomuto se využívá principu úhlové regulace převodu na transformátorech. Tyto transformátory je možné dělit na dvě hlavní skupiny :
 - TPR – transformátory s příčnou regulací
 - PST – transformátory pro regulaci fáze (Phase Shifting Transformer)

Transformátory s příčnou regulací (TPR) spojují dvě rozdílné napěťové hladiny (nejčastěji 400 a 220 kV), využití jejich regulace pro přerozdělení toků výkonů je spíše doplňkovou funkcí. Jsou využívány v některých sousedních ES (Rakousko, Německo).

Srovnání základních vlastností a regulačních účinků uvedených prostředků je uvedeno v následující tabulce:

Typ prostředku pro regulaci toků činných výkonů v síti	Regulace toků P	Rozsah regulace P	Regulace U/Q	Rozsah reg. U/Q	Rychlost regulace	Plynulost regulace	Cena zařízení	Vhodnost pro ES ČR, SR
HVDC - přenos stejnosměrným proudem	Ano	požadovaný	Ne	-	vysoká	plynulá	značně vysoká	žádná
TCSC - tyristorově řízená sériová kompenzace	Ano	dostatečný	Ne	-	vysoká	plynulá	vysoká	využitelná
UPFC - Univerzální regulátor toků výkonů	Ano	značný	Ano	značný	vysoká	plynulá	extrémní	nehodná (ekonom.)
TPR - Transformátoru s příčnou regulací	částečně	omezený	Ano	dle zadání	nižší (minuty)	stupňovitá (odbočky)	dosažitelná	velmi nízká
PST - Transformátor pro regulaci fáze	Ano	značný	částečně	spíše malý	nižší (minuty)	stupňovitá (odbočky)	vysoká	velmi dobrá

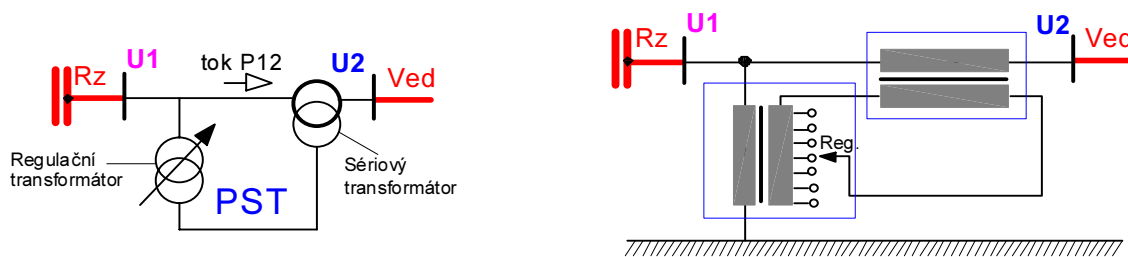
4 SLOŽENÍ A FUNKCE TRANSFORMÁTORŮ S REGULACÍ FÁZE

Transformátory s regulací fáze – Phase Shifting Transformer lze sumárně z technických hledisek charakterizovat následovně:

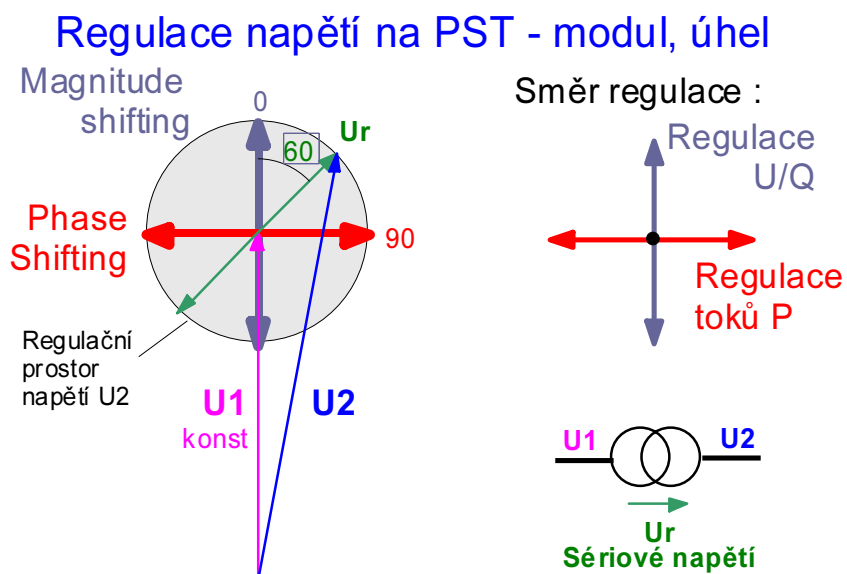
- Jsou umísťovány do jedné napěťové hladiny
- Nejčastěji jsou umísťovány přímo do vývodů vedení
- Jsou konstruovány hlavně pro regulaci toků činných výkonů
- Jejich výsledný regulační úhel dosahuje značných hodnot až $\pm 40^\circ$. (transformátory TPR jen max. cca $\pm 10^\circ$.)
- Regulace napětí je u těchto transformátorů spíše jen doplňující funkce

Transformátor PST je vždy složen z sériové a regulační jednotky. Vinutí sériové jednotky je celé umístěno přímo na napětí sítě (tedy např. na napětí 400 kV) a na tomto vinutí dochází k výslednému fázovému posunu – k vstupnímu/výstupnímu napětí je přidáváno fázově posunuté regulační napětí.

Složení Phase Shifting Transformer z jednotek



Při regulaci je možné dosáhnout vlivem modulu a úhlu přidavného regulačního napětí různých výsledných funkcí transformátoru:

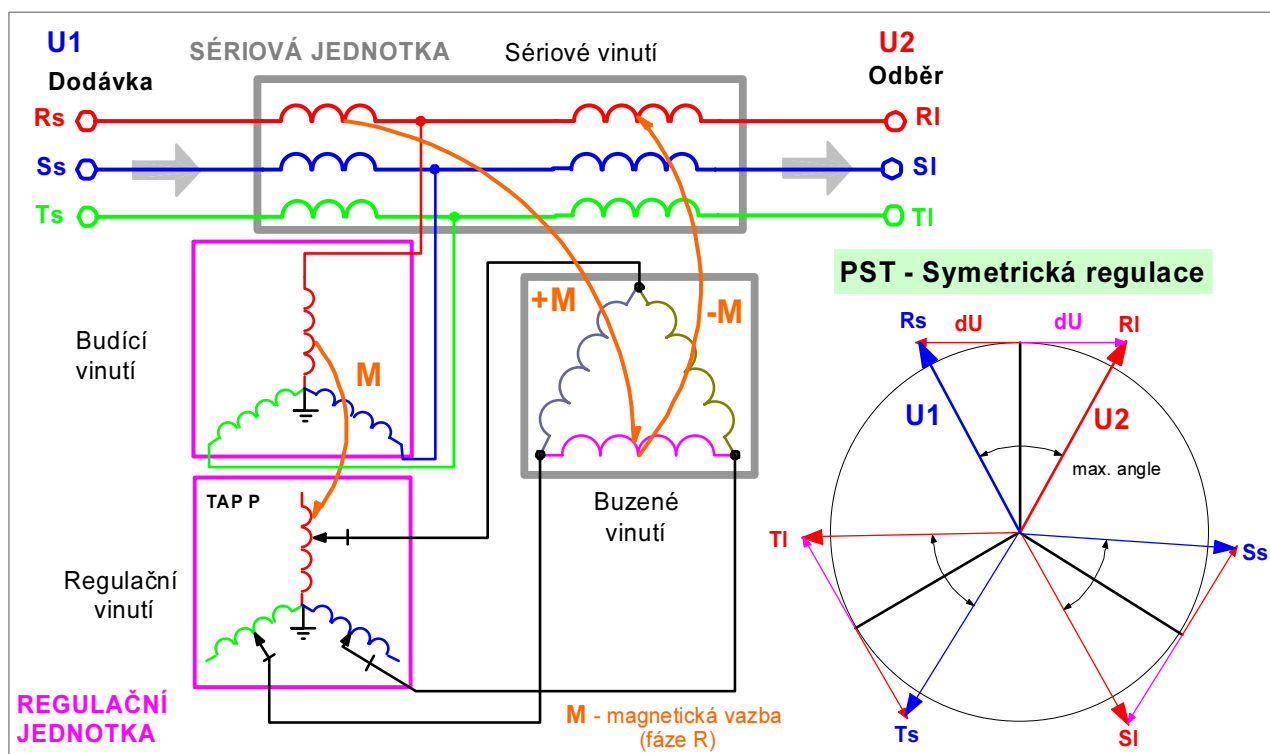


- Je-li přídavné napětí (U_r) ve fázi se vstupním/výstupním napětím, je měněn hlavně napěťový převod transformátoru. Jedná se o podélnou regulaci s převažujícím vlivem na toky jalového výkonu a napětí.
- Je-li přídavné napětí vůči vstupnímu/výstupnímu napětí otočeno o úhel (nejčastěji o 90°) je měněn úhlový převod transformátoru. Jedná se o příčnou regulaci s převažujícím vlivem na toky činného výkonu v síti.

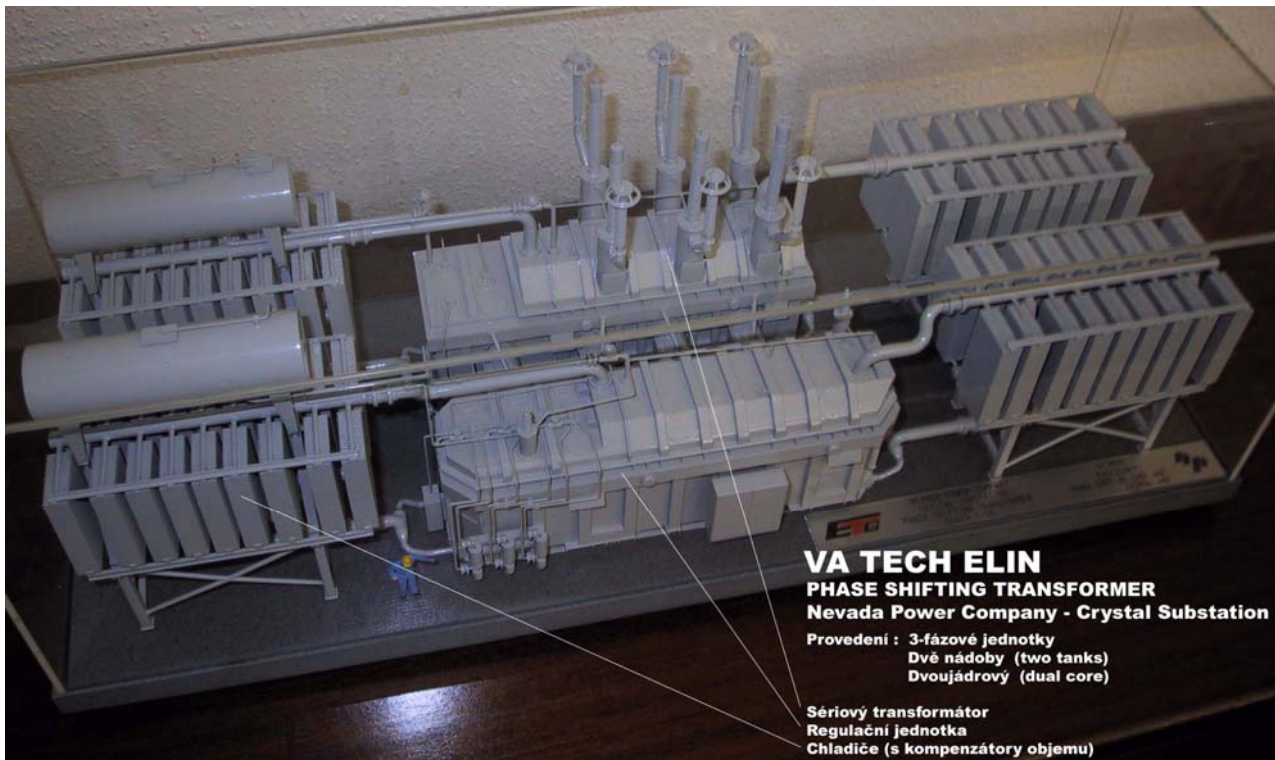
Z hlediska uspořádání vinutí transformátoru vychází konstrukce nejběžnějších transformátorů PST do přenosové sítě z požadavku symetrické regulace a omezení namáhání exponovaného přepínače odboček:

- sériová jednotka má vinutí rozdělené na dvě poloviny tak, aby přídavné napětí mohlo být symetricky přičítáno nebo odečítáno na obě strany
- u tohoto typu transformátoru není možné samostatně regulovat napětí (napěťový – podélný převod)
- regulační jednotka je napájena ze sériové jednotky a konstrukčně tvoří samostatnou část složenou z budícího a regulačního vinutí.

Schéma zapojení vinutí takového transformátoru spolu s fázorovým diagramem je uvedeno na následujícím obrázku:



Příklad konkrétního provedení transformátoru PST 672 MVA s regulačním rozsahem $\pm 36^\circ$ (USA) je uveden na následujícím obrázku:



Regulace toků výkonů v sítích transformátory PST:

Transformátory PST nejsou zdrojem žádného výkonu, pouze přerozdělují tekoucí výkon mezi paralelními přenosovými cestami. PST se umísťují nejčastěji přímo do vývodů vedení z rozvodny. Výkon je regulací PST buď z vedení vytlačován na jiná vedení, nebo je naopak z jiných vedení nabírán. To se provádí s ohledem na dispečerské i obchodní potřeby v dané oblasti.

Činný výkon P_{12} přenášený obecně vedením mezi uzly 1 a 2 je přímo úměrný napětí U_1, U_2 , rozdílu zátěžných úhlů δ_1, δ_2 a nepřímo úměrný výsledné reaktanci (impedanci) X_v vedení:

$$P_{12} = \frac{U_1 \times U_2}{X_v} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.1)$$

Je-li tedy do vývodu vedení umístěn Phase Shifting Transformer, tak přenášený výkon P_{12}'' je pak možné (rámcově) popsat rovnicí:

$$P_{12}'' = P_{12} + \Delta P = \frac{U_1 \times U_2}{X_v + \Delta X} \sin(\delta_1 - \delta_2 + \Delta\delta) \quad (4.2)$$

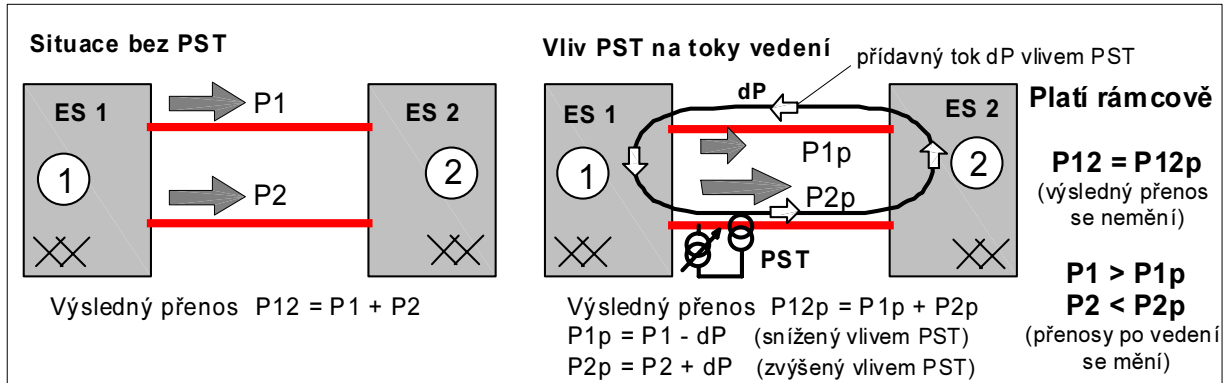
kde: ΔX je přídavná reaktance PST ve vývodu

$\Delta\delta$ je regulační úhel PST, který je pro účinnost ovlivnění toků rozhodující.

ΔP je přídavný tok výkonu vlivem regulace PST

Vliv regulace sériového transformátoru na přerozdělení toků mezi paralelními přenosovými cestami dvou ES je možné dobře demonstrovat:

Ovlivnění toků po vedeních vlivem Phase Shifting Transformer

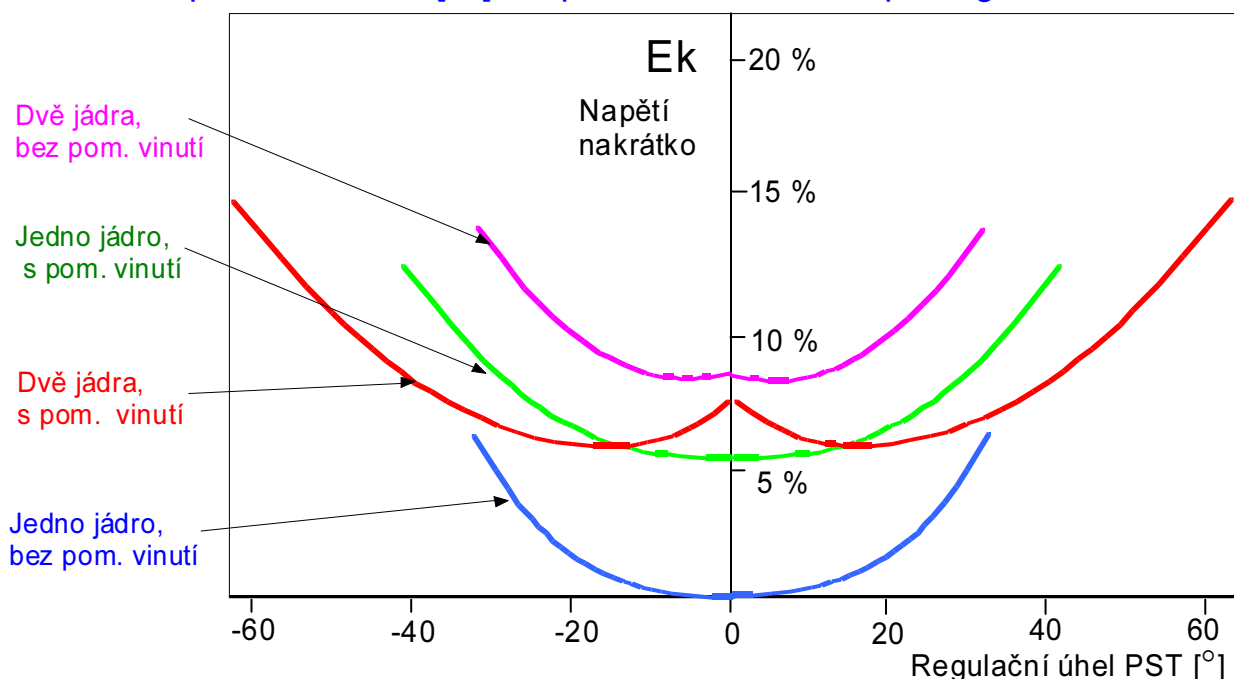


Souhrnně lze formulovat hlavní okolnosti a důvody pro instalaci transformátorů PST v sítích následovně:

- Transformátory PST jsou instalovány většinou na mezistátních a mezisystémových vedeních v přenosové síti
- převažující významnější toky výkonů větších objemů v dané oblasti a to jedním směrem
- využití PST v neúplných stavech přenosové sítě v oblasti, kdy by již docházelo k riziku výpadků vlivem překračování dovolených zatížitelností
- zabezpečení vyvedení výkonů z větších zdrojů v oblasti do přenosové sítě bez negativního dopadu na provoz sítě
- snaha provozovatelů přenosové sítě ovlivňovat fyzikální toky v systému za účelem zabezpečení obchodních případů (tranzity, exporty)

Při modelování transformátorů PST v simulačních programech a konkrétních výpočtech jejich využití je nutné také respektovat výraznou závislost parametrů PST na nastavení aktuální odbočky:

Závislost parametru E_k [%]- napětí nakrátko PST při regulaci odboček

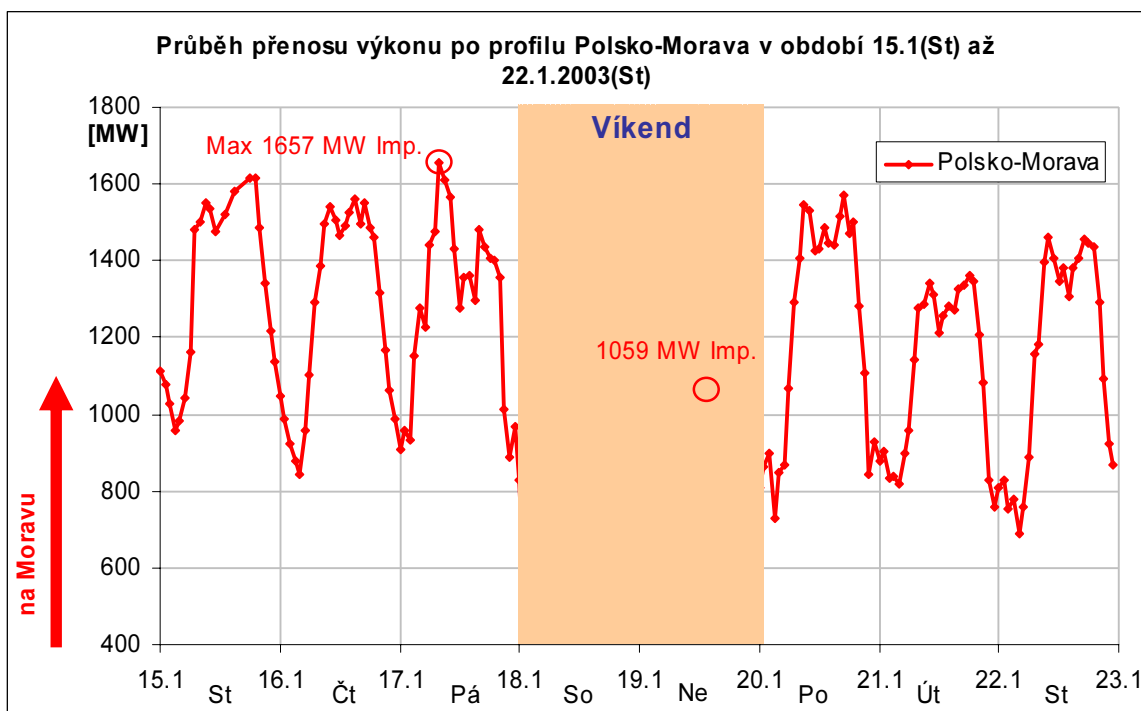


5 ANALÝZA POMĚRŮ NA MEZISTÁTNÍCH PROFILECH ES ČR A ES SR

Byly detailně analyzovány časové průběhy přenášených výkonů na hlavních mezistátních profilech ES ČR i ES SR. Vstupní údaje vycházejí z dispečerských měření na úrovni PS. Analýza provozních poměrů byla zaměřena na následující aspekty:

- celkový objem přenesené energie daným profilem,
- převažující směr přenášené energie,
- maximální a charakteristické přenášené výkony,
- časový výskyt toků - přenášených výkonů,
- srovnání reálně přenášených výkonů a dovolené proudové zatížitelnosti jednotlivých vedení,
- přenášený jalový výkon vedeními a napěťové poměry v oblasti,
- umístění zdrojů a charakter PS v příhraniční oblasti mezistátního profilu.

Příklad průběhů přenosů na profilu Morava – Polsko je uveden na následujícím obrázku:



Výsledně lze vhodnost mezistátních profilů ES ČR z hlediska výskytu situací charakteristických pro využití transformátorů PST hodnotit následovně:

- mezistátní profil Polsko - Morava - výrazná charakteristika pro užití PST, vysoké přenášené objemy, vysoká tranzitní funkce, omezení při neúplných stavech
- mezistátní profil Morava - Rakousko - částečná charakteristika pro užití PST, dochází k omezování přenosů, v současnosti řešeno omezeními na straně Rakouska (TPR, rozpadová automatika, omezení z důvodů neúplné PS v ES Rakouska)

- mezistátní profily Morava – Slovensko - nevhodný pro regulaci toků, dostatečný počet vedení PS, nedochází k omezení
- profil Čechy – Německo – výrazná funkce pro zabezpečení exportů, poměrně malá tranzitní funkce, není třeba omezovat přenosy ze strany ČR, v případě potřeby navýšení je možné vydělovat zdroje do vedení
- pro profily je charakteristické výrazné kolísání přenosů s víkendovými změnami.

Mezistátní profily ES SR lze z pohledu možného využití pro PST charakterizovat:

- Slovensko – Morava - situaci není třeba řešit regulací výkonů
- Slovensko - Maďarsko - výrazná charakteristika situací pro PST – výrazné zapojení do tranzitů, do exportů, omezení při neúplných stavech, vyvedení velkých zdrojů do PS v blízkosti profilu
- Slovensko - Polsko - částečná charakteristika pro PST – profil, který se výrazně účastní tranzitních funkcí
- Slovensko - Ukrajina - nevhodné pro použití PST, neboť nejsou zatím dosahovány přenosy, které by bylo potřebné regulovat

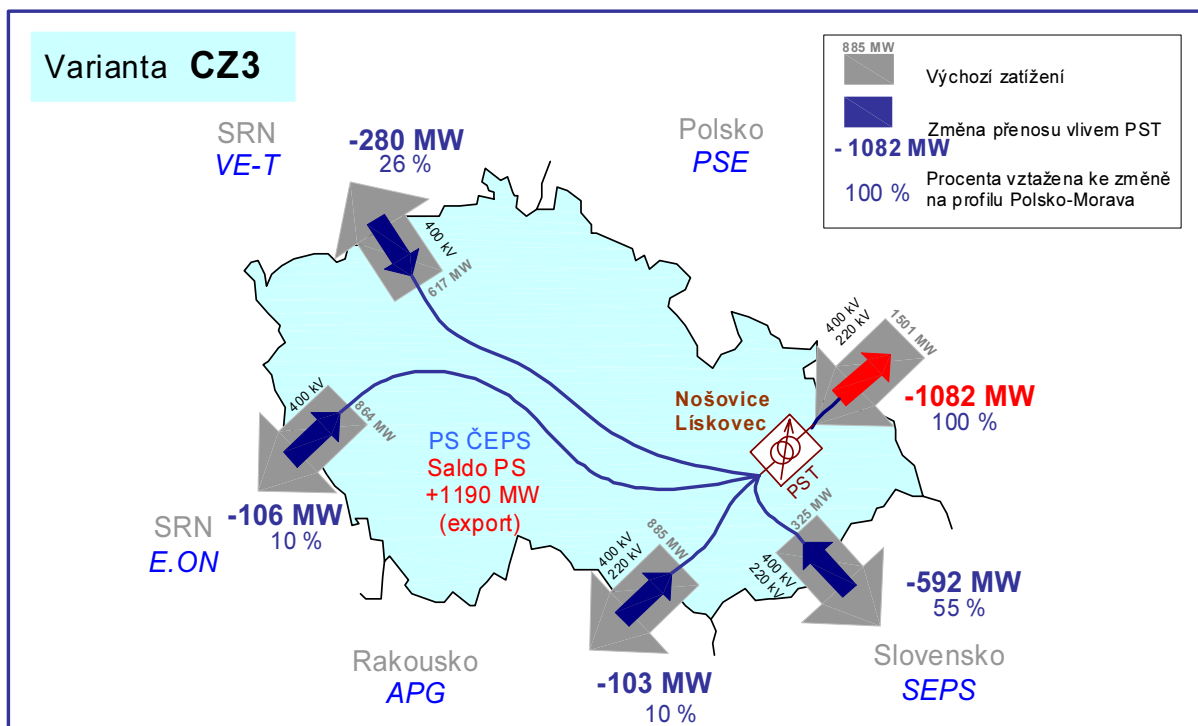
6 MODELOVÉ VYUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ V ES ČR A ES SR

Pro výpočetní analýzu možného využití transformátorů s příčnou regulací byly navrženy 4 varianty umístění transformátorů v ES ČR (CZ1,2,3,4) a 3 varianty umístění v ES SR (SK1,2,3). Volba variant vycházela z rozborů poměrů na mezistátních vedení i dispozičních možnostech v oblasti.

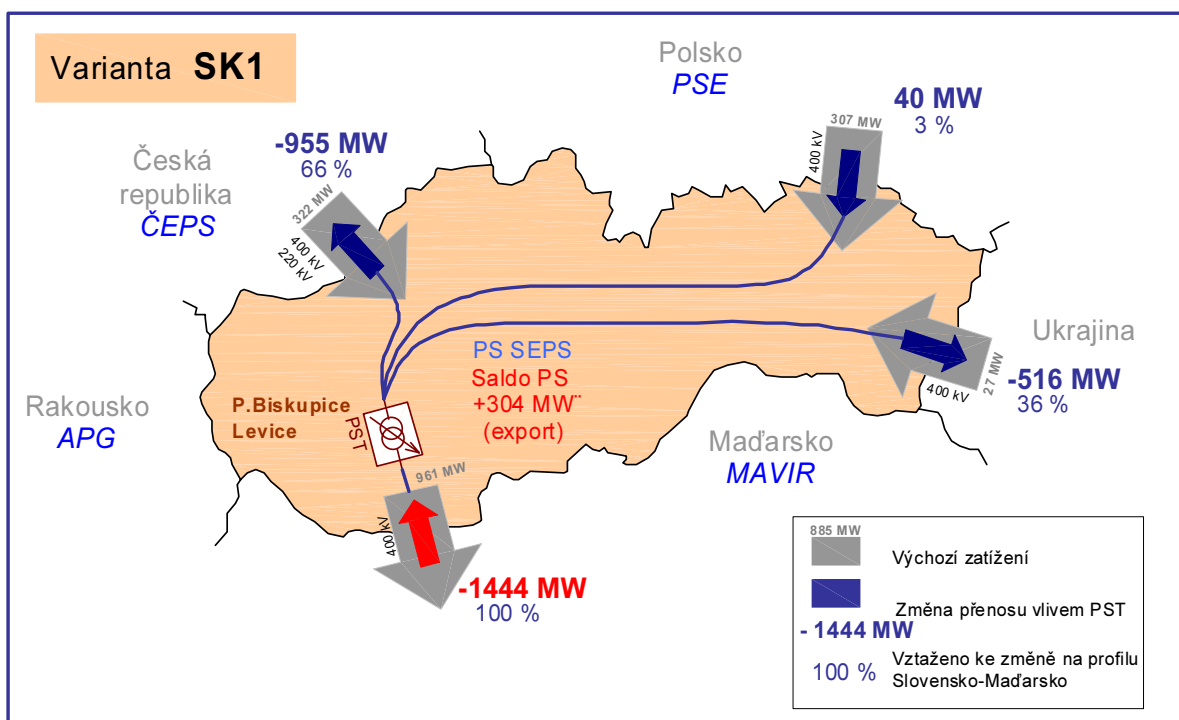
Modelové výpočty byly zaměřeny na posouzení hlavních okolností možností využití transformátorů PST a TPR v ES ČR a ES SR. Byly provedeny následující skupiny cíleně zaměřených výpočtů:

- Výchozí režimy provozu ES ČR, SR bez využití PST, TPR a posouzení vlivu jejich zapojení do systému (bez nastavené regulace)
- Dopady mezního využití regulace na PST (TPR) na toky po mezistátních profilech ES ČR i ES SR
- Posouzení regulačních účinků PST (TPR) na toky po mezistátních profilech CENTREL
- Prověření regulace na PST (TPR) na tranzity přes ES střední Evropy
- Využití PST pro řešení poruchových a mimořádných stavů v přenosové síti
- Režimy a využití PST s ohledem na obchodní případy
- Posouzení dopadu PST (TPR) na velikosti ztrát v PS ČR, SR a sousedních elektrizačních soustavách
- Ztráty činného, jalového výkonu a úbytky napětí na PST při provozu
- Výsledné regulační účinky PST (TPR) na mezistátní profily ES ČR a ES SR a zhodnocení variant
- Provozní souvislosti nasazení PST v elektrizační soustavě

Výrazný regulační účinek transformátorů PST při omezování přenosů přes mezistátní profily pro varianty CZ3 a SK1 je uveden v následujících obrázcích:

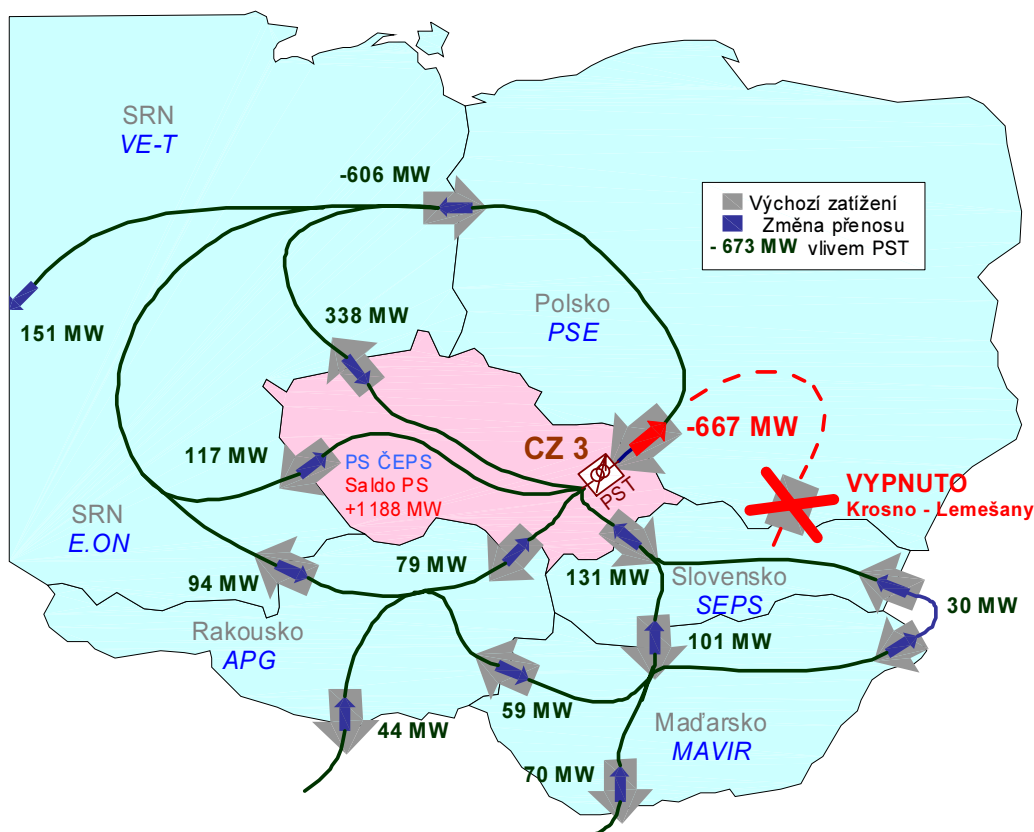


Regulační účinek PST na zatěžování mezistátních profilů ES ČR - var. CZ 3



Regulační účinek PST na zatěžování mezistátních profilů ES SR - var. SK 1

Regulační účinek PST v přenosové síti je výrazně spjat s propojením sousedních ES. Při vypínání mezistátních profilů v sousedních ES regulační účinek PST výrazněji klesá:



Změna toků po mezistátních profilech vlivem vypnutí vedení PL-SK (Krosno - Lemešany)

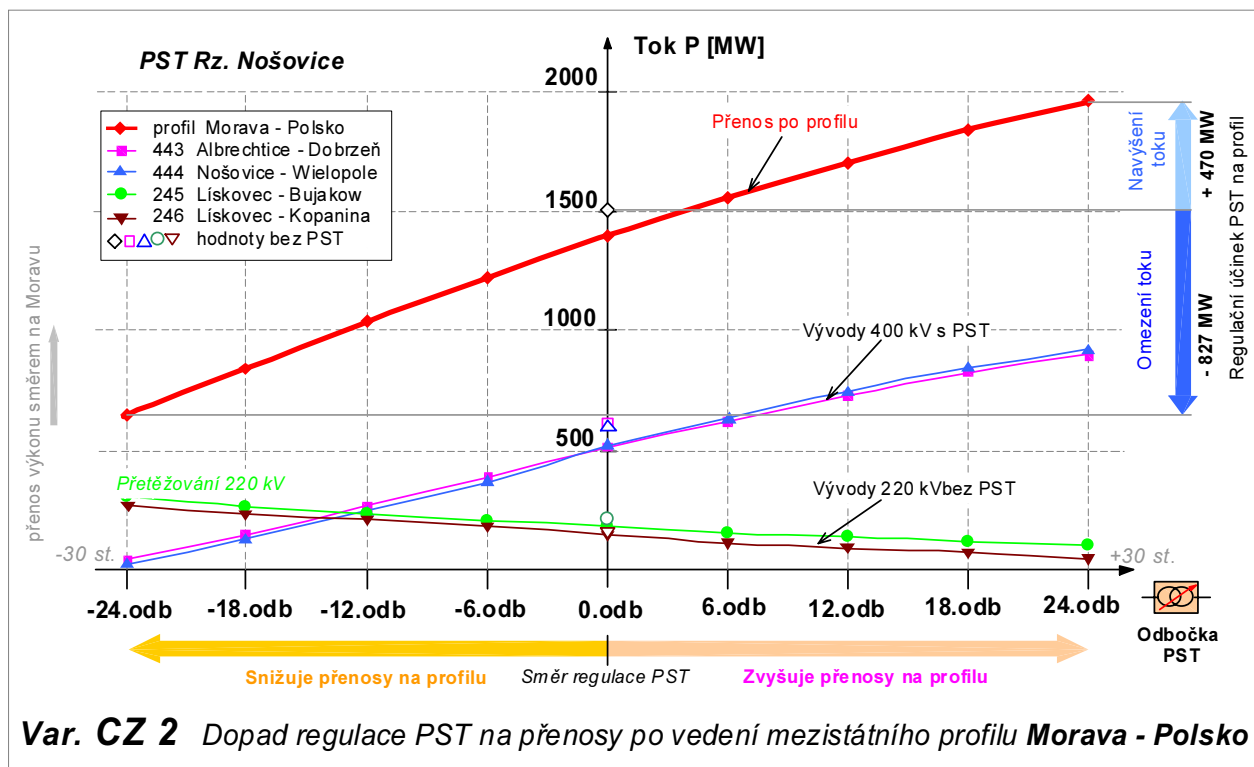
Regulačních schopností transformátorů PST je možné využít nejen pro dispečerské řešení provozu, ale i pro zabezpečení podmínek k realizaci obchodních případů. Nejčastějším obchodním případem je požadavek výrobce elektřiny (skupiny výrobců) na zabezpečení realizace přídavného exportu.

Simulačně byly prověřovány možnosti zvýšení obchodních kapacit na profilu Čechy – Německo a Slovensko – Maďarsko s využitím PST. Příklad užití PST na profilu Morava – Polsko pro uvolnění přenosů na Německo je uveden v následující tabulce:

Zvýšení kapacit na profilu Čechy - Německo pro zvýšení možnosti exportů z ES ČR na západ s využitím regulace na PST v oblasti profilu Morava - Polsko (varianta CZ 3)

Provozní stav	Provozní režim na profilu Polsko - Morava - posloupnost stavů s nárůstem zatížení a regulací PST	Export z ES ČR (saldo)	Zatížení profilu Polsko - Morava	Zatížení profilu Čechy - E.ON	Zatížení profilu Čechy - VEAG	Celkový přenos po profilech na Německo	Zatížení profilu Morava - Rakousko	Tranzit přes PS ČR
Stav 1	Výchozí stav přenosů	+1183 MW	-2007 MW	928 MW	598 MW	1526 MW	1056 MW	2148 MW
Stav 2	Snížení přenosů (tranzitů) regulací PST (CZ 3)	+1188 MW	-1272 MW	858 MW	413 MW	1271 MW	988 MW	1425 MW
Stav 3	Zvýšení exportu z PS ČEPS směrem do Německa o 400 MW	+1585 MW	-1248 MW	974 MW	566 MW	1540 MW	1052 MW	1381 MW

Určující pro posuzování využitelnosti transformátorů PST je hledisko dosaženého regulačního účinku v oblasti. Příklad využitelnosti PST na regulaci poměrů na profilu Morava – Polsko pro variantu CZ2 je uveden v následujícím obrázku:

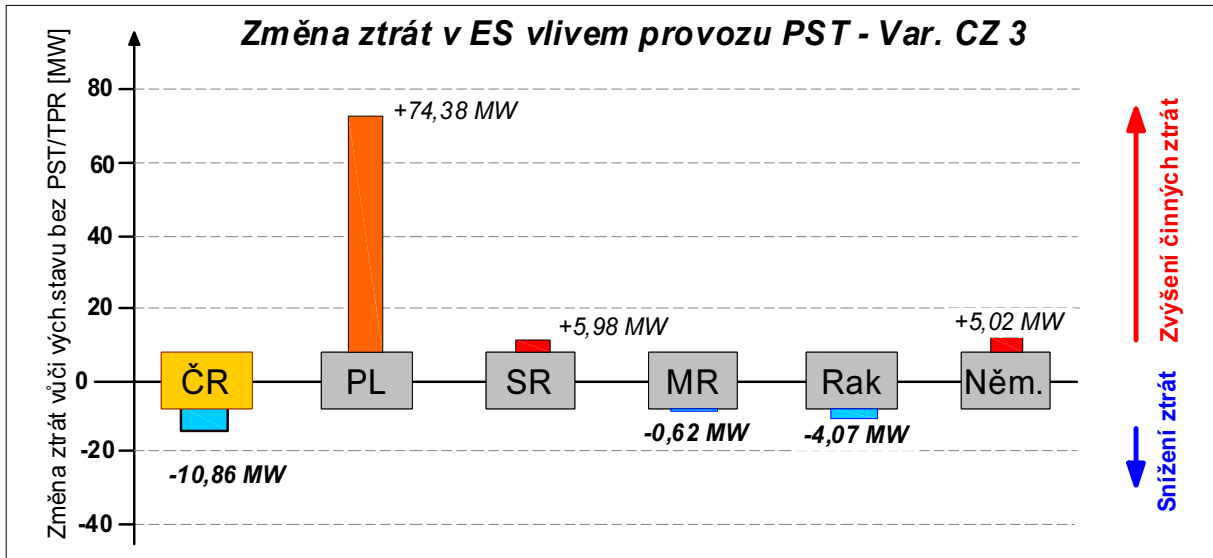


Z průběhů je patrný jak poměrně velký regulační účinek (cca 800 MW pro omezení toků), tak i riziko přetěžování systému 220 kV při velkých regulačních úhlech PST.

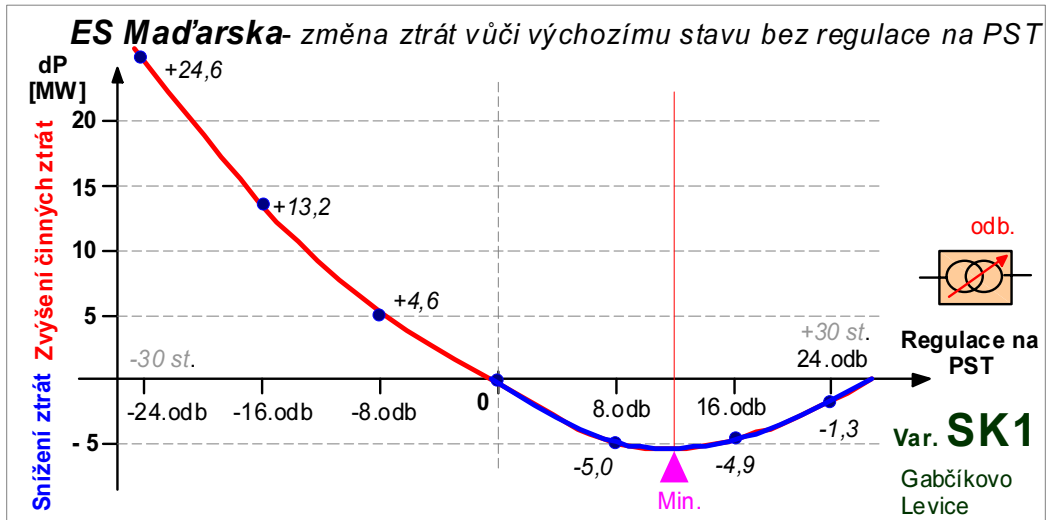
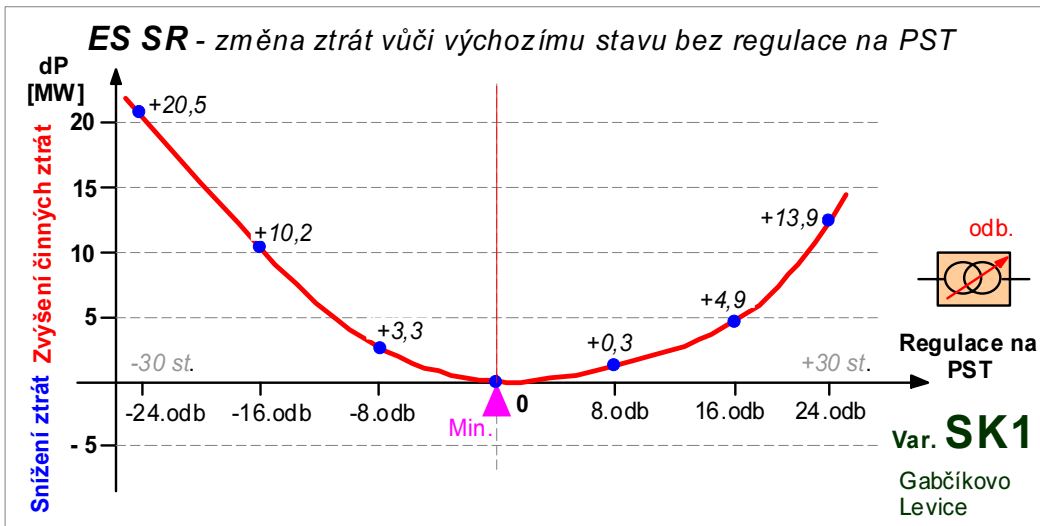
Regulace na transformátorech s příčnou regulací je spjata s velkými změnami toků výkonů v propojených sítích a také s dopadem na ztráty činných výkonů. Hledisko činných ztrát je velmi důležité pro ekonomické posuzování efektivnosti případné instalace finančně náročných transformátorů PST (TPR) do přenosové sítě.

Regulace na PST může způsobovat v některých ES snížení ztrát (hlavně vlivem redukce tranzitů), v jiných ES však dochází k výraznému navýšení ztrát. Situace se snížením ztrát v ES ČR a současným zvýšením ztrát v Polsku vlivem regulace PST je uvedena v následujícím obrázku.

Vlivem přídavných toků vynucených regulací na PST, které se uzavírají v propojeném systému, dochází z hlediska celkových ztrát v ES vždy k navýšení činných ztrát. Tyto přídavné ztráty se v jednotlivých ES neprojevují rovnoměrně. Minimum změny ztrát nenastává v jednotlivých ES současně. V následujících příkladech průběhů je vynesena změna ztrát vůči výchozímu stavu bez regulace na PST:



Z průběhů je patrné, že při regulaci na PST není možné dosáhnout regionálního optima ztrát (vůči jedné ES), ne soustavového optima.

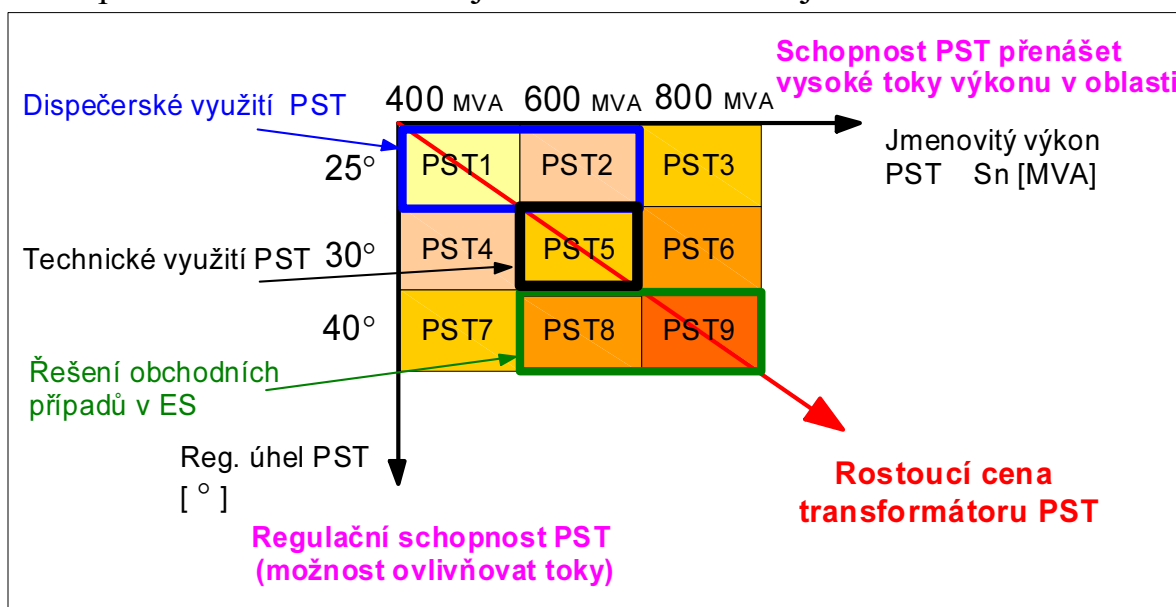


7 INVESTIČNÍ NÁROČNOST A EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST

Pro posouzení potenciálního využití transformátorů PST v elektrizační soustavě je nutné provést rovněž ekonomické posouzení, které není možné oddělit od technického řešení. Výpočty ekonomické efektivity jsou však při rozhodování o velikosti a typu investice do PS naprosto nezbytné.

Investiční náročnost řešení PST

Na výslednou cenu PST do přenosové sítě mají největší vliv dva hlavní parametry transformátoru – jmenovitý výkon [MVA] a regulační schopnost PST (regulační úhel PST [°]). Čím větší transformátor s větším požadovaným reg. úhlem je požadován, tím se také výrazně zvyšuje jeho cena. Oba parametry, obzvláště při vysokých přenášených výkonech, jsou pro ekonomické řešení spolu výrazně svázané. Parametrizace parametrů z hlediska ceny s ohledem na potenciální využití v oblasti profilu Polsko – Morava je uvedena na následujícím obrázku.



Parametrizace požadavků na PST z hlediska stanovení ceny transformátoru

Hlavní investiční složky řešení PST tvoří:

- Nákup specializovaných transformátorů PST s požadovanými parametry, vyrobenými na zakázku u renomovaného (evropského) výrobce.

Zde je struktura ceny následující:

Výroba specializovaného PST	cca 8 800 € / 1 MVA Sinst PST	(88 %)
Doprava PST na místo (Rz)	cca 1 080 € / 1 MVA Sinst	(11%)
Montáž PST v Rozvodně	cca 133 € / 1 MVA Sinst	(1 %)
celkem výrobce	cca 10 013 € / 1 MVA Sinst	(100 %)

Například pro konkrétní transformátor PST 600 MVA / reg. 30 ° činí cena 6 010 000 € za 1 ks (cca 198.000,- mil. Kč).

b) Úprava zařízení rozvoden pro potřeby instalace PST

Zde se jedná o výstavbu specializovaných polí v rozvodnách přenosové sítě. Jestliže cena jednoho průměrného pole v Rz. 400 kV činí cca 2,2 – 2,5 mil. € / pole (70 – 80 mil. Kč / pole), pak cena pole pro PST činí cca cca 3,1 – 3,7 mil. € / pole (100 – 120 mil. Kč / pole).

c) Ostatní složky projektu

Tyto složky činí projekční a analytické činnosti, úpravy dispečerského řízení, ASDŘ, vypořádání pozemků činí u velkých investic v Rz. přenosové sítě cca 5 - 10 % celkové ceny řešení.

Srovnání investiční náročnosti instalace transformátorů PST s jinými alternativními řešeními v přenosové síti

Cena vlastního transformátoru PST tedy ve srovnání se standardním transformátorem do PS činí 160 % jeho ceny (při jejich shodné velikosti).

Při srovnání náročnosti řešení PST s výstavbou nového vedení v přenosové síti je možné konstatovat že investiční náročnost jednoduchého vedení 400 kV délky cca 80 km včetně nových polí v Rzl činí cc 870 mil. Kč. Investiční náročnost řešených variant CZ2, SK1, SK2 činí cca 750 – 800 mil. Kč. Řešení PST není možné technicky přímo srovnávat s výstavbou nového vedení (regulační schopnost pro dispečerské využití, doba projekce a výstavby, problémy s koridory), je však možné konstatovat, že výstavba nového vedení PS je investičně blízká (srovnatelná) s řešením přenosových schopností pomocí transformátorů PST.

Při srovnání investiční náročnosti PST s realizací zařízení FACTS (UPFC) založené na aplikaci výkonové elektroniky lze vyjít z investiční náročnosti FACTS do PS která činí cca 40 000 – 70 000 € / 1 MVA Sinst. Ve srovnání s realizací transformátorů PST v ceně cca 10 000 € / 1 MVA Pinst je cena technicky velmi

Z ekonomického srovnání finanční náročnosti je patrné, že řešení PST je s ohledem na svoje regulační schopnosti a využitelnost plně konkurenceschopné řešení ve srovnání s klasickými řešeními (rozvoj topologie PS) a na rozdíl od řešení FACTS je ekonomicky dosažitelné.

Posouzení realizace projektu PST do přenosové sítě z hlediska výnosů

Ekonomické přínosy z využití PST plynou hlavně z těchto okolností jejich provozu a využití: - možná úspora ztrát v přenosové síti
- zvýšení obchodních příležitostí subjektů
- zvýšení provozní spolehlivosti provozu oblasti

Např. pro variantu CZ3 činí investiční náročnost 1294 mil. Kč, což činí (při životnosti 25 let) hodnotu odpisů cca 52 mil. Kč ročně. Tuto hodnotu je nutné

posuzovat z hlediska potenciálních ročních výnosů při provozu PST. S ohledem na umístění PST do exponovaných mezistátních profilů lze očekávat provozní využití cca 2000 hod. ročně.

Úsporu ztrát v přenosové síti lze ve variantě CZ3, kde činí až cca 11 MW, a při nákupní ceně elektřiny na úrovni přenosové sítě ve velikosti cca 1000 Kč /MWh určit na částku cca 22 000 000 Kč / rok.

Zvýšení obchodních příležitostí vlivem PST lze odvodit od redukce tranzitů třetích stran a uvolnění obsazených kapacit mezistátních proků pro vývozy. Toto uvolnění činí cca 100 – 300 MW možných přídatných exportů z ES ČR. Při respektování přínosu PST pro zabezpečení těchto obchodů (které by bez PST nebylo možné realizovat) činí cca 10 % ceny přídatných realizovaných obchodů je možné očekávat výnosy cca 20 000 000 Kč / rok.

Zvýšení provozní spolehlivosti PS v oblasti vlivem PST se projeví výrazně. Ocenění tohoto vlivu není však možné přímo spočítat. V provozu ho bude možné určit na základě rozborů poruchovosti za delší období. Lze předpokládat, že PST za dobu své životnosti zamezí několika těžkým poruchám.

Očekávané výnosy vlivem využití PST v oblasti lze uvažovat i bez započtení ocenění zvýšení spolehlivosti ve výši cca 22 + 20 = 42 mil. Kč ročně, což je již srovnatelné s hodnotou odpisů 52 mil. Kč ročně.

Při respektování vyšší kvality dispečerského řízení a dopadu na zvýšenou spolehlivost provozu přenosové sítě vlivem PST je možné považovat instalaci PST za ekonomicky zdůvodnitelnou.

8 METODIKA NÁVRHU A STANOVENÍ PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORŮ PST

Transformátory PST jsou specializovaná zařízení s velkými finančními nároky, která se vyrábí jednotlivě podle předem požadovaných parametrů. Parametry transformátorů musí být stanoveny technicky efektivně a ekonomicky přijatelně, neboť nevhodné požadavky na transformátory PST mohou vést buď k nesplnění technických požadavků provozu, nebo k ekonomicky neefektivnímu řešení.

Volba typu transformátoru PST

I když je transformátorů PST vyráběna velká řada typů, s ohledem na technickou efektivitu řešení, provozní zkušenosti, charakter ES hraničních profilů ES ČR i ES SR a také ekonomickou náročnost řešení je výběr typu PST zjednodušen (omezen). Jako nejvhodnější je možné považovat následující hlavní typovou specifikaci transformátoru PST:

- příčná regulace 90°
- symetrická regulace
- regulace pod zatížením
- regulace oběma směry

- dvě samostatná jádra
- bez regulace napětí
- PST složené ze 2 jednotek (sériové a regulační)

Určení jmenovitého napětí transformátoru PST

Jmenovité napětí PST je potřebné stanovit statistickým rozborem výskytů napětí v místě instalace, a to za delší časové období. Důležitým parametrem pro výrobce je rovněž účinník přenosu za provozu PST. Nižší účinník zhoršuje regulační schopnost a výkon přenášený transformátorem.

Stanovení potřebné velikosti – jmenovitého výkonu PST [MVA]

Parametr požadovaného jmenovitého výkonu vychází z následujících okolností – transformátor PST by měl být dostatečně využíván (nesmí být předimenzován), transformátor PST nesmí být dlouhodobě provozně přetěžován (poddimenzován).

Situaci komplikuje skutečnost, že výkony procházející vývodem s PST provozně značně kolísají, že se mění v čase s charakterem spolupráce soustav a hlavně ta okolnost, že PST svým působením dokáže výrazně ovlivnit (regulovat) výkony, které přes něho procházejí.

Hlavní metodické doporučení pro volbu jmenovitého výkonu lze shrnout:

- Jmenovitý výkon PST ve vývodu mezistátního vedení není ekonomicky únosné stanovovat dle dovolené maximální zatížitelnosti vedení/vývodu.
- Jmenovitý výkon PST je potřebné stanovit s ohledem na provozní toky, které se v oblasti vyskytují a budou se i pesimisticky vyskytovat ve výhledu. Výskyt těchto toků je třeba analyzovat na základě měření a výpočtů.
- Jmenovitý výkon PST je rovněž třeba stanovit s ohledem na regulační účinky transformátoru (na požadovaný regulační úhel).
- Není nezbytné ani ekonomické dimenzovat PST na zvládnutí všech provozních toků, které se v místě instalace PST mohou vyskytovat. Některé situace, které se vyskytují provozně zřídka je možné řešit krátkodobým přetížením PST (s využitím jeho regulačního rozsahu, či provozního režimu by-passu).

Určení velikosti regulačního úhlu PST [°]

Regulační úhel PST je parametr, který výrazně určuje jeho využitelnost a regulační vliv na přenášené toky výkonu v oblasti. Z hlediska výrobců je zvládnutá technologie PST s regulačními úhly do velikosti cca 25 – 40°, přičemž cena s rostoucím reg. úhlem výrazně narůstá.

Metodicky lze pro volbu regulačního úhlu doporučit:

- Regulační úhel je třeba stanovit dle výchozích požadavků na účinnost regulace, která je deklarována dispečerskými požadavky v oblasti (přetěžování vedení, řešení poruchových stavů) a obchodními požadavky (regulace celkových přenosů na profilu, omezení tranzitů, navýšení exportů).

- S ohledem na výrobně zvládnutý rozsah regulačních úhlů PST se doporučuje stanovit cca 3 modelové rozsahy reg. úhlu PST (odstupňované po cca 5°) a výpočetně prověřit jejich regulační účinky na všech předem připravených provozních situacích (sestavě provozních stavů).
- Následně se doporučuje vyloučení technicky málo efektivních řešení. Zbylá efektivní řešení je nutné posoudit také ekonomicky a zjistit rozdíl ekonomických hledisek (nákladů a výnosů) mezi variantami.

Z provedených výpočtů se ukazuje, že v podmínkách ES ČR a ES SR je regulační úhel PST pod cca 20° spíše nedostatečný a nebyl by schopný v místě instalace zabezpečit komplexní řešení provozních problémů. V oblasti profilu Morava-Polsko je možné regulační úhel cca 30° považovat za již dostatečný pro řešení všech provozních situací. Plného účinku pro obchodní využití je dosaženo až při regulačním úhlu PST cca 35°.

Stanovení požadavku na velikost ztrát naprázdno D_{p0} a nakrátko D_{pK} transformátoru PST jako ekonomické hledisko

V případě stanovení těchto parametrů se jedná o technicko ekonomický výpočet optimalizace investičních a provozních nákladů s ohledem na vzájemnou vazbu možného zvýšení investičních a očekávaného snížení provozních nákladů.

Kriteriální funkce $F(x)$ tvoří minimalizace části investičních nákladů v souvislosti s parametry d_{p0} , d_{pK} (nárůstu ceny PST při kvalitnějším provedení) spolu s úsporami provozních nákladů (nižší ztráty na PST při provozu). Hledá se tedy taková velikost a poměr ztrát d_{p0} a d_{pK} , aby se zvýšené investiční náklady výsledně zhodnotily úsporou nákladů na ztráty při provozu. Kriteriální funkci lze vyjádřit:

$$F(x) = \text{Min} ((N_i - N_x) + \Sigma(N_p - N_y)) \quad /p_1, p_2 \quad (8.1)$$

kde: $F(x)$ je vyjádřena v [Kč]

N_i - investiční náklady na PST při výchozích (standardních) hodnotách ztrát poměru d_{p0} a d_{pK} v [Kč]

N_x - investiční náklady na PST při jiných (optimalizovaných) hodnotách parametrů d_{p0} , d_{pK} v [Kč]

N_p - provozní náklady na ztráty při výchozích hodnotách ztrát d_{p0} , d_{pK} (za dobu ekonomické životnosti transformátoru)

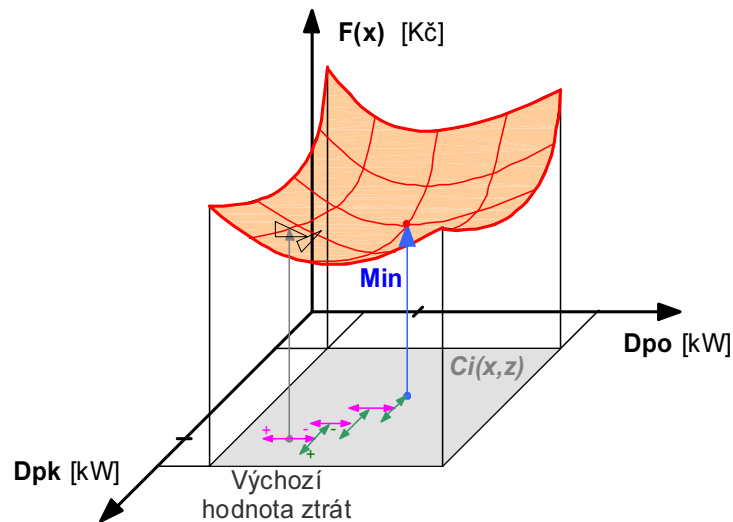
N_y - provozní náklady na ztráty při jiných hodnotách d_{p0} , d_{pK} (za dobu ekonomické životnosti)

Σ - součet nákladů přes dobu ekonomické životnosti PST (25 let)

$/p_1$ - parametr provozu – roční časové využití PST [hodin/rok]

$/p_2$ - parametr provozu – průměrné výkonové využití (zatížení) PST [MW]

Vzájemná vazba parametrů D_{p0} a D_{pK} a přístup řešení Gradientní metodou je naznačena na následujícím obrázku:



Z dosažených výsledků a metodických doporučení lze uvést :

- Zvýšení nákladů na kvalitnější zařízení PST činí cca 2-12 mil. Kč, možná úspora provozních nákladů za dobu ekonomické životnosti činí 2-20 mil. Kč, z hlediska celkového hodnocení velmi záleží na očekávané době využití a zatěžování PST.
- Pro očekávané vysoké využití PST cca 4200 hodin ročně je v každém případě vhodné volit PST s menšími ztrátami naprázdno dPo. Při vyšších přenášených tocích (450 MW) se již vyplatí investovat také do jednotky s nižšími ztrátami nakrátko dPk. Úspora za dobu životnosti PST bude činit cca 10 mil. Kč.
- Při nižších přenášených výkonech (cca 250 MW) jsou náklady na investice do ztrát dPo, dPk vyšší než provozní úspora a tato investice se již ekonomicky nevyplatí.

9 ZÁVĚRY PRÁCE

Cíle disertace a jejich splnění

Analýza vlastností a srovnání využitelnosti jednotlivých typů Phase Shifting Transformers

V této části byly analyzovány všechny hlavní typy transformátorů s příčnou regulací a provádělo se srovnání jejich vlastností z pohledu využitelnosti v přenosové síti. Rovněž byly analyzovány okolnosti využití a praktické zkušenosti s provozem těchto transformátorů jak v sousedních ES, tak i v evropském a světovém pohledu.

Zpracování reálných simulačních výpočetních modelů Phase Shifting Transformers pro výpočty provozních režimů sítí

Pro účely analýz technické a ekonomické vhodnosti zařízení je signalizována potřeba použití dostatečně přesných a velkých simulačních modelů přenosových sítí a rovněž také požadavek na zpřesnění modelu vlastních transformátorů s příčnou regulací ve výpočetních programech. Byl zpracován detailní model transformátorů

PST, který byl implementován do programu pro výpočet chodu sítě GLF/AES. Vytvořený simulační model transformátorů PST byl diskutován s provozovateli přenosových sítí.

Posouzení provozních situací a oblastí v ES ČR a ES SR vhodných pro užití transformátorů pro regulaci fáze

Měřené hodnoty průběhů toků výkonů na všech mezistátních vedeních ES ČR a ES SR byly analyzovány, a to s ohledem na potenciální výskyt situací vhodných pro využití transformátorů s regulací fáze. Hodnocení el. poměrů na profilech bylo diskutováno s dispečerskou složkou řízení. Na závěr bylo provedeno souhrnné zhodnocení vhodnosti potenciálního využití transformátorů s příčnou regulací v jednotlivých mezistátních profilech ES ČR a ES SR.

Návrh metodiky pro výběr optimálních lokalit umístění PST v sítích

Potřeba regulace toků na vybraných mezistátních profilech je v podmínkách ES ČR i ES SR nejlépe řešena umístěním PST přímo do vývodů mezistátních vedení, přitom je vždy nutné respektovat dispoziční možnosti v hraničních rozvodnách.

Provedení modelových výpočtů provozu sítě s využitím transformátorů s regulací fáze v PS ES ČR a ES SR za účelem posouzení jejich potřebnosti a využitelnosti

Byly provedeny modelové výpočty využití PST (a TPR) v charakteristických i extrémních provozních stavech ES. Výpočty byly hodnoceny z více různých hledisek, přičemž nebyl sledován jen vliv instalovaných transformátorů na danou ES (ČR nebo SR), ale také na sousední spolupracující soustavy. Výsledky výpočtů byly předány provozovatelům přenosových soustav.

Návrh metodiky pro stanovení konkrétních parametrů transformátorů PST s ohledem na umístění v dané lokalitě

Byla sestavena souhrnná metodika pro určení hlavních technických parametrů transformátorů PST s ohledem na konkrétní použití v dané oblasti přenosové sítě. Dle této metodiky je možné stanovit technické parametry pro jednání s výrobcem a specifikaci požadovaných parametrů pro výběrové řízení.

Posouzení dalších dopadů na provoz sítě v souvislosti s využitím transformátorů PST v sítích

Při modelových výpočtech i analýzách byly sledovány nejen hlavní okolnosti využití transformátorů v přenosové síti, ale také další související provozní vlivy. Tyto provozní vlivy se jeví v některých hlediscích i jako negativní a omezující. V případě realizace transformátorů PST v PS bude nutné řešit rovněž dopady na provoz distribučních sítí 110 kV.

Ekonomické zhodnocení možnosti instalace a provozního využití PST v ES ČR a ES SR

Bylo zpracováno ekonomické zhodnocení možnosti instalace transformátorů PST, a to jak z nákladového hlediska, tak i z pohledu možných ekonomických přínosů. Tímto výpočtem byly rovněž pro provozovatele PS určeny ekonomické meze, ve kterých se bude případný projekt realizace transformátorů PST pohybovat.

Shrnutí doporučení pro možné využití PST v ES ČR a ES SR

Na základě provedených výpočtů a analýz jsou v této práci formulována výsledná doporučení pro potenciální využití transformátorů s příčnou regulací v ES ČR i ES SR. Doporučení směřují do oblasti metodické, do stanovení požadovaných parametrů transformátorů i do očekávaného využití při řízení elektrizačních soustav.

Lze konstatovat, že většinu cílů disertační práce se podařilo předloženým řešením v požadovaném rozsahu splnit. V oblasti návrhu možných variant umístění PST se projevil větší vliv provozních hledisek a omezení než možného metodického přístupu. Modelové výpočty vlivů PST na provoz ES bylo (pro možné zobecnění závěrů) nutno provést ve větším rozsahu, než se původně předpokládalo.

Dosažené technické výsledky a doporučení

Rozbory aktuálních el. poměrů v ES ukázaly zvyšující se potřebu regulace toků v přenosových sítích. Mezistátní profily Morava – Polsko (ES ČR) a Slovensko – Maďarsko (ES SR) vykazují již v současnosti charakteristiku a provozní stavy, ve kterých by bylo potřebné provádět regulace toků výkonů v oblasti.

Stávající prostředky v oblastech neumožňují dostatečnou regulaci toků výkonů. Pro řešení bude možné využít specializované prostředky, ze kterých se transformátor s příčnou regulací Phase Shifting Transformer ukazuje jako výrazně efektivní řešení. Z ekonomického hlediska je jeho realizaci možno, na rozdíl od zařízení založených na aplikaci výkonové elektroniky, považovat za dosažitelnou.

Transformátory PST bude v případě jejich realizace možné využít jak pro operativní řízení zatěžování vedení, řešení poruchových stavů, omezení ztrát, tak i pro řešení obchodních případů – omezení tranzitů a zabezpečení možnosti zvýšení exportů z ES.

Přínosy disertační práce

Za hlavní přínosy disertační práce lze z hlediska praktické využitelnosti považovat:

- Zpracování simulačních modelů sítí Střední Evropy vhodných pro výpočty využití transformátorů PST pro regulaci toků na mezistátních vedeních. Simulační modely propojených evropských sítí byly v tomto rozsahu (s respektováním stávajících provozovaných transformátorů s příčnou regulací) pro analýzu el. poměrů v ES ČR a ES SR použity poprvé.

- Zpracování detailního modelu transformátoru PST do výpočetního programu GLF/AES umožňuje zadávání konkrétních provozovaných typů transformátorů i provedení souvisejících výpočtů s cílem určit požadované parametry pro výrobce transformátorů. Za nový prvek řešení je možné považovat možnost analyzovat chování transformátorů PST v přímé vazbě na parametry transformátorů, které jsou udávány jejich hlavními evropskými výrobci.

- Zpracování modelových výpočtů vlivu využití transformátorů PST a TPR v podmínkách ES ČR a ES SR na chod PS v souvislosti s analýzou očekávaných přínosů i rizik jejich provozu. Z hlediska provedených výpočtů a analýz je novým přínosem, použitelným pro další možná řešení, komplexní vyhodnocení vlivů transformátorů PST na el. poměry v přenosové síti ES ČR a ES SR a jejich srovnání s transformátory TPR.

- Zpracování metodiky návrhu parametrů transformátorů PST zahrnující obecná kritéria a doporučení využitelná pro konkrétní návrh transformátoru s příčnou regulací při jeho zapojení do přenosové sítě a také způsob určení parametrů transformátorů pro jednání s výrobcí. V metodické části je zcela původní sestavení komplexně zaměřené metodiky na návrh transformátoru PST s ohledem na jeho parametry a umístění do PS.

- Ekonomické zhodnocení efektivnosti instalace transformátorů PST do lokalit exponovaných vedení mezistátních profilů přenosových sítí.

Doporučení k dalšímu pokračování výzkumu

V oblasti teoretické se bude v navazujících pracích vhodné zaměřit na optimalizaci regulačních algoritmů pro dispečerské využití transformátorů PST s ohledem na technické i obchodní využití transformátorů a jejich zahrnutí do výpočetních programů. Rovněž bude vhodné zpracovat a ověřit simulační modely PST pro potřeby provádění výpočtů dynamického chování soustav s respektováním vlivů PST. V oblasti praktické se doporučuje prověření potřebnosti regulace toků výkonů v PS po připojení ES zemí bývalého SNS k UCTE, prověření změn zkratových poměrů vlivem připojení PST a dopadu na nastavení ochran a automatik jak ve vnější síti, tak na chránění samotného zařízení PST.

Využitelnost řešení v praxi

Výsledky disertační práce byly využity v technických studiích EGÚ Brno, a.s. zpracovaných pro provozovatele přenosové sítě ČEPS, a.s. ([18], [19], [20]). Některé výsledky byly publikovány v odborných časopisech ([21]) a na odborných konferencích zaměřených na elektroenergetiku ([22], [23]).

Výsledky provedených výpočtů a analýz byly prezentovány řídicímu managementu společnosti ČEPS, a.s. Poznatky zaměřené na ES SR byly prezentovány pracovníkům SEPS, a.s. a SE, a.s. Technická zjištění byla diskutována s pracovníky útvarů rozvoje i dispečinků provozovatelů el. sítí. O dosažené poznatky projeví též zájem pracovníci výzkumných a projekčních organizací, se kterými byly vedeny konzultace.

Zpracované simulační modely i metodické závěry uvedené v disertační práci budou využity v navazujících technických studiích a analýzách, jejichž obsahem bude problematika transformátorů s příčnou regulací.

LITERATURA

- [1] CHRISTL, N.: "Advanced Series Compensation (ASVC) with thyristor controlled impedance", 14/37/38-05, CIGRE, 1992
- [2] HOLMBERG, D.: "The Stode thyristor controlled series capacitor", paper 14-105, CIGRE, 1998
- [3] RENZ, B.A.: "World's first Unified Power Flow Controller on the AEP system", paper 14-107, CIGRE, 1998
- [4] SEITLINGER, W.: "Phase Shifting Transformers Discussion of Specific Characteristics", paper 12-306, CIGRE 1998
- [5] GAMPENRIEDER, R.: "Load-flow control in EHV networks Feasibility study on the possibilities of application of FACTS elements in the German power system", paper 14-110, CIGRE 1998
- [6] BLADOW, J., MONTOYA, A.: „Experiences with parallel EHV Phase Shifting Transformers“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6, No.3., July 1991
- [7] HAN, Z.X.: „Phase shifter and power flow control“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No.10, October 1982
- [8] BAKER, R., GUTH, G.: "Control algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power systems", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No.9, September 1982
- [9] TZIOUVARAS, D., JIMENEZ, R.: „Protecting a 138 kV phase shifting transformer, EMTP modelling and model power systém testing“, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA, 20020905, SEL 2002
- [10] SWEENEY, R., STEWART, G.: „The specification and control of the phase shifting transformers for the endanced interconnection between Northern Ireland and The republic of Ireland“, paper 14-118, CIGRE 2002
- [11] PATERNI, P. VITET S., BENA M. YOKOYAMA A.: „Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.14, No.1, February 1999
- [12] ACHA, E., AMBRIZ-PÉREZ, H., FUERTE-ESQUIVEL, C.: „Advanced transformer control modelling in an optimal power flow using Newton's method“, *IEEE Transactions on power systems*, Vol.15, No.1, February 2000
- [13] MIHALIČ, R., ŽUNKO, P.: „Phase-shifting transformer with fixed phase between terminal voltage and voltage boost: tool for transient stability margin enhacement“, *IEE Proceedings –Gener.Transm.Distr.*, Vol.142, No.3, May 1995
- [14] LI, N., EDWIN, K.W.: „Optimal phase angles of booster transformers in HV and EHV in power systems“, *IEE Proceedings –Gener.Transm.Distr.*, Vol.142, No.2, March 1995
- [15] YOUSSEF, R.D.: „Phase shifting transformers in load flow and short-circuit analysis: modelling and control“, *IEE Proceedings-C*, Vol.140, No.4, July 1993
- [16] LEE, K., POON, K.: „Statistical switching overvoltage analysis of the first B.C.Hydro phase shifting transformer using the electromagnetic transient program“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.5, No.4, November 1990
- [17] CASTRO, R., PINTO, J.: „Feasibility study on the application of FACTS technologies to enhance the operation of the Portugese transmission systém in a scenario with renewable energy sources“, paper 15-118, CIGRE 2002

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ ZAMĚŘENÝCH NA PROBLEMATIKU REGULACE TOKŮ VÝKONŮ

- [18] PTÁČEK, J., MODLITBA, P., MENDEL, T.: „Možnosti regulace toků výkonů na profilu Polsko – Morava s využitím zařízení PST (Phase Shifting Transformer)“, *Technická studie EGÚ Brno, a.s., 150 stran., Brno - říjen 2002*
- [19] PTÁČEK, J., MODLITBA, P., MENDEL, T., DAŇEK, Z., DVOŘÁK, M.: „Stanovení technických parametrů Phase Shifting Transformer pro využití na profilu Polsko – Morava – Etapa 1 – umístění do Rz. Nošovice“, *Technická studie EGÚ Brno, a.s., 139 stran, Brno - únor 2003*
- [20] PTÁČEK, J., MODLITBA, P.: „Executive Summary k projektu instalace Phase shifting Transformer do PS ČEPS, a.s. v oblasti profilu Morava-Polsko“, *Technická studie EGÚ Brno, a.s., 18 stran, Brno duben 2003*
- [21] PTÁČEK, J., HALUZÍK, E.: „Regulace toků činných výkonů v propojených sítích“, - *Časopis EE, 9, 2003, č. 2, str. 16-19.*
- [22] PTÁČEK, J.: „Využití Phase Shifting Transformer k regulaci toků výkonů“, - *příspěvek na doktorandskou konferenci „Současnost energetiky“ – Ústav elektroenergetiky FEI VUT Brno, červen 2003*
- [23] PTÁČEK, J., MODLITBA, P.: „Regulace toků činných výkonů v přenosových sítích“, *příspěvek na II. Mezinárodní vědecké symposium Elektroenergetika, 12 stran, Stará Lesná 16.9.2003, Slovenská republika*

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ Z OBORU ELEKTRICKÝCH SÍTÍ

- [24] J.Ptáček: „Modelování vedení přenosové sítě ve výpočtech ustálených stavů sítě“, *příspěvek na konferenci studentské tvůrčí činnosti STUDENT EEICT 2002, 3/2002 [D]*
- [25] Ing. Jiří Jež a kolektiv: „Očekávaný provoz ES ČR v období přechodu k tržnímu prostředí a nástupu konkurence mezi výrobními podniky“, *Energie 11,12/99, 1/2000*
- [26] K.Máslo, J.Ptáček, P.Modlitba: „Preventivní řízení bezpečnosti ES, korekční zásahy k eliminaci nebezpečných stavů v sítích“, *Seminář Sledování a řízení bezpečnosti provozu, Praha, 29.2.2000*
- [27] P.Modlitba, J.Ptáček : „Electric network equivalents and their calculation by using a module of the GLF/AES program“, *1st meeting of the CIGRE TF 38-02-18, Baden, Switzerland, september 1997*
- [28] J.Ptáček, P.Modlitba, P.Švejnar, K.Witner : „Řešení napětových poměrů při poruchách v přenosové síti“, *Svět energetiky 1-2, Praha 1996*
- [29] P.Modlitba, J.Ptáček: „Expertní systém pro optimalizaci návrhu kompenzačních prostředků do elektrické sítě“, *Energetika č. 5, Praha 1991*
- [30] P.Modlitba, J.Ptáček : „Vazba přenosové sítě 220 kV a 400 kV na síť 110 kV z hlediska bilance jalového výkonu“, *seminář ČVTS, Brno 1991*
- [31] P.Modlitba, P.Pavlinec, J.Ptáček, F.Kozák : „Statický tyristorově řízený kompenzátor jalového výkonu“, *Elektrotechnický obzor č.4, Praha 1990*

CURRICULUM VITAE

Jméno: Jiří Ptáček
Narozen: 15. 7. 1964 ve Zlíně
Zaměstnání: EGÚ Brno, a.s., výzkumný pracovník
E-mail: jiri.ptacek@egubrno.cz
Telefon: 602 571 193

Dosažené vzdělání:

1978 – 1982 Gymnázium Holešov
1982 – 1987 FE VUT Brno – ve studijním oboru elektroenergetika
2001 – 2003 FE VUT Brno – distanční doktorské studium

Odborná praxe:

1988 – 1992 Výzkumný energetický ústav, s.p.
1992 – 1996 EGÚ Energetický ústav Brno, a.s. – odbor přenosových sítí
1997 – 2003 EGÚ Brno, a.s. – sekce provozu a rozvoje elektrizační soustavy

Jazykové znalosti:

anglický jazyk, ruský jazyk

Účast na řešení projektů

Funkční zařazení na pracovišti – výzkumný a vývojový pracovník

Od roku 1995 jako odpovědný pracovník ucelených projektů v oblasti elektrických sítí

Řešení konkrétních technických projektů pro provozovatele sítí: ČEPS, a.s., Slovenská elektrizační přenosová soustava, a.s., rozvodné podniky REAS v ČR i SR.

Účast na řešení koncepčních i analytických projektů pro státní instituce: Energetický regulační úřad, Operátor trhu s elektřinou, Ministerstvo průmyslu a obchodu

Zaměření řešených projektů:

- Provoz přenosové sítě a distribučních sítí,
- Rozvoj přenosové sítě a rozvoj distribučních sítí 110 kV, rozvoj transformačních vazeb, mezistátní propojení ES, vyvádění nových zdrojů do el.sítí
- Řízení provozu ES, spolupráce jednotlivých soustav, vazba přenosových sítí na distribuční síť, dispečerské řízení
- Regulace toků výkonů v sítích, regulace napětí, optimalizace provozu

ABSTRACT

Power flow control in interconnected power systems

At present, transmission elements are more widely used in networks of all voltage levels. At the transmission network level this is often connected with increasing inter-state exchanges of electricity. The magnitude and character of power being transmitted result in the necessity of its control, i.e. obviously reduction.

Some new means for controlling the power flows – both specialized transformers and devices based on semiconductor elements can be mainly used for this purpose.

Specialized transformers are usually based on the phase shifting principle and are controlled by the tap changer. The thesis is especially devoted to the analysis of circumstances and possibilities of implementing the phase shifting transformers in the Czech and the Slovak Power systems.

The existing situation on the inter-state profiles of the Czech and the Slovak power systems is analyzed with regard to the appropriateness of installing phase shifting transformers. A methodology of designing these transformers to be installed in the transmission network and of determining their parameters has been elaborated and is described in the thesis.

Calculations of a model utilization of phase shifting transformers in chosen locations are carried out and the impacts of these transformers on the operation of the network are assessed from a complex point of view.

Both technical and commercial aspects of using the power flow control by means of phase shifting transformers are evaluated and circumstances important from the dispatcher's point of view are also investigated. Basing on the performed calculations and analyses, a recommendation is formulated in conclusion of the thesis concerning the future possible utilization of phase shifting transformers in the Czech and the Slovak power systems.