



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra Elektroenergetiky

Využití phase-shift transformátorů v přenosových soustavách

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Jiří Helbich
Vedoucí práce: Ing. Jan Švec, Ph.D.

Praha 3.1.2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jiří Helbich**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Využití phase-shift transformátorů v přenosových soustavách**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište princip funkce phase-shift transformátorů včetně jejich konstrukce a dimenzování.
2. Zpracujte přehled instalovaných aplikací PST ve světě a jejich dopady na ES.
3. Vytvořte výpočetní model chodu sítě s phase-shift transformátory.
4. Proveďte analýzu vlivu PST na provozní stavy a veličiny v ES.

Seznam odborné literatury:

- [1] Acha, E., et al.: Power Electronic Control in Electrical Systems. Newnes Press, Oxford, 2002
- [2] Tlustý, J., a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, ČVUT v Praze, 2011
- [3] Winders, J.: Power transformers. CRC, 2002, ISBN 0824707664

Vedoucí: Ing. Jan Švec, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 6. 2. 2014

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Švecovi Ph.D. za cenné rady a pomoc při vypracování diplomové práce. Také děkuji své rodině za velkou podporu při studiu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 3.1.2015

.....

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem transformátorů s regulací fáze na výkonové toky a jiné veličiny v elektrizačních soustavách. Zaměřuje se na podrobný popis PST transformátorů, jejich principu, konstrukce a využití. Vyhodnocení vlivu transformátorů s regulací fáze je provedeno pomocí simulace chodu přenosových soustav střední Evropy. Výpočetní program byl vytvořen v prostředí Matlab a je založen na Newton-Rhapsonově metodě.

Klíčová slova

Newton-Rhapsonova metoda, přenosová soustava, transformátor s regulací fáze, výkonové toky

Abstract

This thesis deals with the effect of the phase shifting transformers on the power flows in electrical networks. It aims on the precise description of their working principle, structure and application. The evaluation of their impact is performed by means of the simulation of central european transmission networks. To accomplish this, the program based on the Newton-Rhapson algorithm has been made.

Keywords

Newton-Rhapson algorithm, transmission network, phase shifting transformer, power flows

Obsah

Seznam obrázků	v
Seznam symbolů	vii
Seznam zkratk	viii
1 Úvod	1
2 Cíl práce	3
3 Transformátor s regulací fáze	4
3.1 Přenos výkonu po vedení	4
3.2 Vliv PST na výkonové toky	5
3.2.1 Zatížený transformátor	8
3.3 Případy vhodné pro využití PST	9
3.3.1 Zapojení více transformátorů	13
3.4 Konstrukce PST	13
3.4.1 Jednojádrová konstrukce	13
3.4.2 Dvojúdrová konstrukce	14
3.4.3 Transformátory s polovodičovou regulací napětí	15
3.4.4 Návrh vinutí transformátorů	16
3.4.5 Odbočková regulace napětí	17
3.5 Požadovaný výkon PST	18
4 Transformátory s regulací fáze v jiných zemích	21
4.1 Texas - USA	22
4.2 Meeden - Nizozemsko	22
4.3 Divača - Slovinsko	23
4.4 Rondissone - Itálie	23
4.5 Foggia a Villanova - Itálie	24
4.6 La Praz- Francie	25
4.7 Wissington, Norfolk - Spojené království	26
5 Modelování prvků elektrické soustavy	27
5.1 Vedení	28
5.2 Transformátory	29
5.2.1 Dvojvinuťové transformátory	29
5.2.2 Transformátory s regulací fáze	32
5.2.3 Generátory	33
5.2.4 Odběry	33
5.2.5 Sériová kompenzace	33
5.2.6 Paralelní kompenzace	34

6	Ustálené výkonové toky	35
6.1	Definice ustálených výkonových toků	35
6.2	Výkonové toky a jejich omezení	35
6.2.1	Výkonové toky na vedení	36
6.2.2	Výkonové toky na transformátorech	36
6.2.3	Výkonové toky na PST	37
6.2.4	Sériová kompenzace	37
6.2.5	Paralelní kompenzace	38
6.3	Způsoby řešení	38
6.3.1	Gauss-Seidelova metoda	38
6.3.2	Newton-Rhapsonova metoda	39
6.3.3	Decoupled power flow	41
6.3.4	Fast decoupled	42
7	Výpočetní model	44
7.1	Newton	44
7.2	Data	44
7.3	Pocodhady	45
7.4	Maticice	45
7.5	Vykony	45
7.6	Jakobi	46
7.7	Noveodhady	48
7.8	Vystupy	48
8	Simulace výkonových toků v ES	49
8.1	Prvotní zatížení	51
8.2	Vysoké zatížení	52
8.3	Zařazení polských PST	52
8.4	Test N-1 kritéria	55
8.5	Zařazení PST transformátorů do rozvodny Hradec Východ	55
8.5.1	Zařazení transformátorů se symetrickou regulací do rozvodny Hradec Východ	57
8.5.2	Zařazení transformátorů s nesymetrickou regulací do rozvodny Hradec Východ	60
8.5.3	Transformátory se symetrickou regulací při výpadku vedení 430	63
8.5.4	Transformátor s nesymetrickou regulací při výpadku vedení 430	66
9	Závěr	69
	Použitá literatura	70
A	Schématá přenosových sítí použitých v simulaci	72
A.1	Přenosová soustava ČR	73
A.2	Přenosová soustava 50Hertz a TenneT	74
A.3	Upravená přenosová soustava Rakouska	75
A.4	Upravená přenosová soustava Slovenska	75
A.5	Upravená přenosová soustava Polska	76
A.6	Upravená přenosová soustava Maďarska	76
B	Obsah příloženého CD	77

Seznam obrázků

Obr. 1	Plán odstavení JE v Německu	1
Obr. 2	Srovnání plánovaných a skutečných toků mezi 50Hertz a ČEPS	2
Obr. 3	Princip funkce PAR transformátoru	5
Obr. 4	Princip funkce QB transformátoru	6
Obr. 5	Změna toku činného výkonu pro různý zátěžný úhel	7
Obr. 6	Změna toku jalového výkonu pro různý zátěžný úhel	7
Obr. 7	Možnosti regulace úhlu α pod zatížením	8
Obr. 8	Zapojení PST pro paralelní vedení	9
Obr. 9	Rozdělení činného výkonu mezi dvě paralelní vedení	10
Obr. 10	Rozdělení jalového výkonu mezi dvě paralelní vedení	11
Obr. 11	Zapojení PST mezi dvěma elektrickými soustavami	11
Obr. 12	Srovnání toků činného výkonu pro stavy bez regulace	12
Obr. 13	Srovnání toků jalového výkonu pro stavy bez regulace	12
Obr. 14	Symetrický PST s jedním jádrem	13
Obr. 15	Nesymetrický PST s jedním jádrem	14
Obr. 16	Delta-hexagonální zapojení	14
Obr. 17	Zapojení symetrické regulace	15
Obr. 18	Zapojení nesymetrické regulace	15
Obr. 19	SPS transformátor s PWM řízením	16
Obr. 20	Řízení napětí fáze a	16
Obr. 21	Uspořádání vinutí	17
Obr. 22	Ochrana vinutí	18
Obr. 23	Dimenzování částí PST	20
Obr. 24	PST instalované v evropských přenosových soustavách	21
Obr. 25	Hexagonální PST v Texasu	22
Obr. 26	PST Meeden	23
Obr. 27	PST Divača	23
Obr. 28	PST Rondissone	24
Obr. 29	PST Foggia-Villanova	24
Obr. 30	PST La Praz a jeho parametry	25
Obr. 31	PST ve Wissingtonu, Norfolk	26
Obr. 32	π - článek modelující elektrické vedení	28
Obr. 33	Zjednodušený model transformátoru	30
Obr. 34	Admitanční model transformátoru	30
Obr. 35	Náhrada trojvinutového transformátoru	31
Obr. 36	Model generátoru	33
Obr. 37	Model odběru	33
Obr. 38	Kompenzační sériová cívka	34
Obr. 39	Kompenzační sériový kondenzátor	34
Obr. 40	Typy shuntů a) reaktor, b) kondenzátor	34

Obr. 41	Typy uzlů pro řešení ustálených výkonových toků	35
Obr. 42	Křivky závislosti činného a jalového výkonu na úhlu	42
Obr. 43	Výstup programu do příkazového okna v Matlabu	48
Obr. 44	Důležité mezistátní profily pro neplánované toky	50
Obr. 45	Schéma části české přenosové soustavy	51
Obr. 46	Toky na mezistátních profilech při prvotním zatížení	51
Obr. 47	Toky na mezistátních profilech při vysokém zatížení	52
Obr. 48	Umístění polských PST	53
Obr. 49	Hodnoty polských PST použité v simulaci	53
Obr. 50	Toky při instalaci polských PST	54
Obr. 51	Toky při vyřazení vedení Hradec-Chrást	55
Obr. 52	Umístění českých PST	55
Obr. 53	Hodnoty českých PST použité v simulaci	56
Obr. 54	Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem	57
Obr. 55	Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech	58
Obr. 56	Vliv regulačního úhlu PAR α na velikost napětí v rozv. H. a R.	59
Obr. 57	Vliv regulačního úhlu PAR α na úhel napětí v rozv. H. a R.	59
Obr. 58	Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem	60
Obr. 59	Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech	61
Obr. 60	Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozv. H. a R.	62
Obr. 61	Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozv. H. a R.	62
Obr. 62	Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem	63
Obr. 63	Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech	64
Obr. 64	Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozv. H. a R.	64
Obr. 65	Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozv. H. a R.	65
Obr. 66	Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem	66
Obr. 67	Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech	67
Obr. 68	Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozv. H. a R.	67
Obr. 69	Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozv. H. a R.	68

Seznam symbolů

α	Regulační úhel PST	$^{\circ}$
β	Úhel úbytku napětí na impedanci zatíženého PST	$^{\circ}$
δ	Fázový úhel napětí	$^{\circ}$
ε	Odchylka od požadované hodnoty při load flow výpočtech	$^{\circ}$
θ	Úhel admitance	$^{\circ}$
$\cos\varphi$	Účinník	-
B, b	Susceptance	S, pu
G, g	Svod	S, pu
I, i	Elektrický proud	A, pu
I_0	Proud naprázdno	A
\mathbf{J}	Jakobiho matice	-
P, p	Činný výkon	W, pu
P_0	Ztráty transformátoru naprázdno	W
P_k	Ztráty transformátoru nakrátko	W
Q, q	Jalový výkon	VAR, pu
R, r	Elektrický odpor	Ω , pu
S, s	Zdánlivý výkon	VA, pu
T	Reálný převod transformátoru	-
t	Komplexní převod transformátoru	-
U, u, V	Elektrické napětí	V, pu
u_k	Poměrné napětí nakrátko	%
X, x	Reaktance	Ω , pu
Y, y	Admitance	S, pu
Z, z	Impedance	Ω , pu

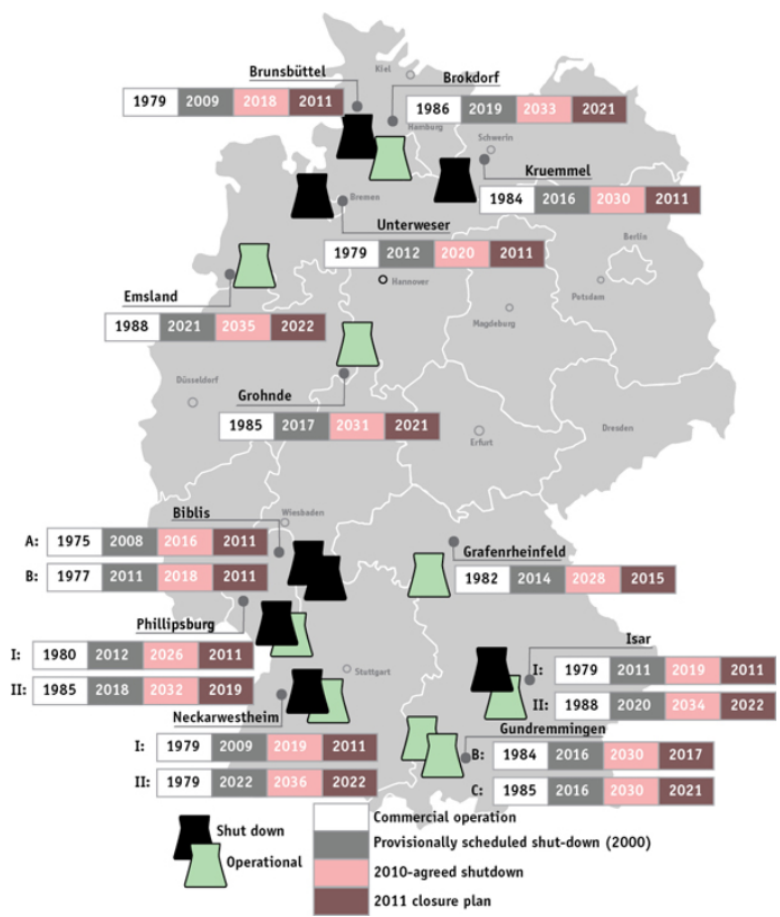
Seznam zkratk

APG	Austrian Power Grid
ČEPS	Česká přenosová soustava
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ES	Elektrizační soustava
EWIS	European Wind Integration Study
FACTS	Flexible AC transmission system
NR	Newton-Rhapsonova metoda
PAR	Phase Angle Regulator
PS	Přenosová soustava
PSE	Polskie Sieci Elektroenergetyczne
PST	Phase Shifting Transformer
QB	Quadrature Booster
SEPS	Slovenská elektrizačná prenosová sústava
SPS	Static Phase Shifter
TSO	Transmission System Operator
UPFC	Unified Power Flow Controller

Kapitola 1

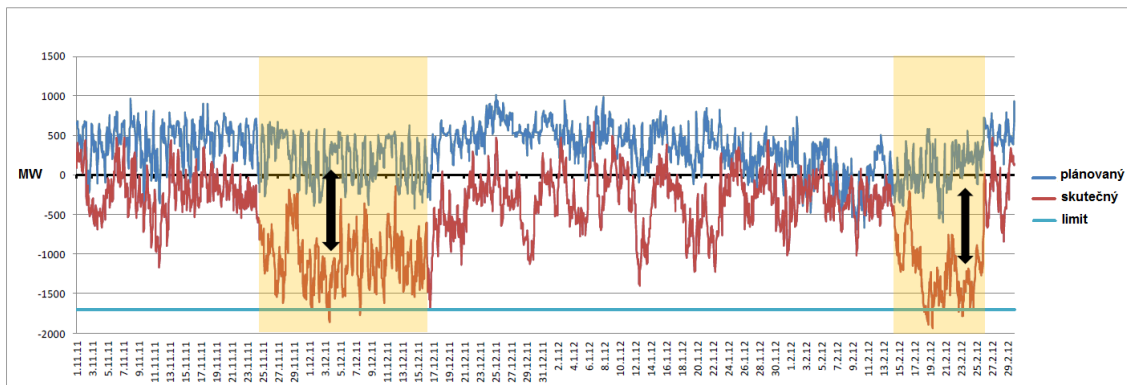
Úvod

Jedním z důsledků liberalizace obchodu s elektřinou v Evropě byl vznik německo-rakouské obchodní zóny, kde jsou nasmlouvané výkonové toky často neúměrné přenosovým kapacitám vedení a mají rostoucí trend. Proto se mnohdy uzavírají jinými cestami, než se očekávalo, a působí problémy v okolních přenosových soustavách. To můžeme vysvětlit pomocí Kirchhoffových zákonů - elektrický proud (a tím i výkon) "teče" cestou nejmenšího odporu. Tak se stává, že díky kombinaci faktorů, jako jsou velká poptávka po elektrické energii v Bavorsku, Rakousku nebo např. v jižní a jihovýchodní Evropě, větrné farmy na severu Německa, odstavení některých německých jaderných elektráren (1) a prozatím nedostatečná kapacita německé přenosové soustavy, velká část výkonu neteče opticky nejkratší cestou z místa výroby do místa spotřeby, ale protéká také Českou republikou, Polskem, Slovenskem, Maďarskem a státy Beneluxu.



Obr. 1 - plán odstavení JE v Německu[18]

Tyto neplánované výkonové toky (angl. loop flows) ohrožují stabilitu přenosových soustav a v nejhorším případě by mohly vést až k tzv. blackoutu, tedy kaskádovitému pádu velké části elektrické sítě postiženého státu (či států), což s sebou nese nejen obrovské hospodářské škody, ale i potenciální ohrožení lidského zdraví. V období mezi polovinou listopadu 2011 a únorem 2012 byla kvůli velké poptávce po elektrině na jihu (Rakousko, Balkán) a její výrobě na severu Evropy (německé větrné elektrárny) soustavně přetěžovaná česká přenosová soustava. V tomto období dosahovaly tranzitní toky v soustavě ČEPS velikostí až kolem 3500 MW a konkrétně na vedení mezi sítěmi ČEPS a 50HzT (východní Německo) téměř 2000 MW, tedy o 260 MW více, než je pracovní limit přeshraničního vedení. Docházelo k porušení N-1 kritéria, což znamená, že v případě výpadku jakéhokoliv prvku takto zatížené soustavy by už nebylo možné udržet parametry soustavy v požadovaných mezích a mohlo by dojít až k blackoutu.



Obr. 2 - Srovnání plánovaných a skutečných toků mezi soustavami 50Hertz a ČEPS[19, str. 30]

Provozovatelé přenosových soustav mají několik možností, jak své soustavy proti neplánovaným tokům chránit. Pomínu-li dispečerské zásahy, tak se jako nejjednodušší prevence výpadků může na první pohled jevit výstavba nových přenosových vedení. Bohužel se však ukazuje, že zejména po administrativní a právní stránce se jedná o velký problém a není tak možné očekávat, že by výstavba vedení v horizontu několika let vyřešila problémy přenosových soustav. Rekonstrukce vedení, tedy výměna stávajících vodičů za vodiče s větším průměrem nebo přidání paralelního vedení, také není vždy vhodná, protože po dobu rekonstrukce musí být linka odpojena z provozu a navíc se zvyšují nároky na stožár, který nemusí být na vyšší zátěž dimenzován. Mezi další možnosti patří využití zařízení FACTS (Flexible AC transmission system), jako např. UPFC (Unified Power Flow Controller), ty jsou ale většinou příliš drahé a ve světě jsou zatím užívány jen zřídka. V posledních desetiletích se naopak jako vhodné řešení jeví transformátory s regulací fáze. Protože si většina států sousedících s Německem, jako např. Belgie, Nizozemí a Francie své přenosové soustavy už pomocí těchto transformátorů chrání, jsou dále zvyšovány nároky na českou a polskou přenosovou soustavu. Z toho důvodu podal jak český (ČEPS), tak polský (PSE) provozovatel přenosové soustavy ve spolupráci s východoněmeckým provozovatelem (50Hertz) objednávku na tyto transformátory. Česká strana umístí celkem čtyři PST do rozvodny Hradec s parametry 420/420 kV, 850 MVA a regulační úhel $\alpha \pm 30^\circ$ a 65 polohami odboček. Na každé z vedení č. 445 a 446 Hradec-Röhrsdorf budou umístěny paralelně dva PST. Společně s nimi instaluje 50Herzt dva PST do rozvodny Röhrsdorf. PST se jmenovitým výkonem 1200 MVA, jmenovitým napětím 410 kV a regulací $\pm 20^\circ$ s 65 polohami odboček, budou moci optimalizovat výkonové toky v německé soustavě a pomáhat českým PST.[6]

Kapitola 2

Cíl práce

Cílem této diplomové práce je vyhodnotit vliv transformátorů s regulací fáze na důležité provozní stavy a veličiny v elektrizační soustavě. Zaměřil jsem se zejména na PST, které budou instalovány v rozvodně Hradec. Jak ukazují mnohé studie, např. EWIS[15], a praktické zkušenosti s provozem PST, ovlivňují tyto transformátory nejen soustavu země, která je provozuje, ale často také soustavy okolních států. V diplomové práci vycházím z reálné situace. Simulace jsou prováděny na modelu sítě střední Evropy, který obsahuje přenosové soustavy ČEPS, 50hertz, TenneT (oba Německo) a zjednodušené modely přenosových soustav PSE (Polsko), MAVIR (Maďarsko), SEPS (Slovensko) a APG (Rakousko). Při návrhu PST do simulace jsem vycházel ze smluv o koupi a provozu PST mezi společnostmi ČEPS, a.s., TAMINI TRASFORMATORI srl, PSE S.A. a 50Hertz.

Aby bylo možné splnit výše uvedené úkoly, je třeba nejprve popsat principy funkce jednotlivých typů PST, jejich konstrukční provedení a možnosti použití a také sestavit dostatečně přesný výpočetní model chodu sítě tak, aby měla práce vypovídací hodnotu.

Kapitola 3

Transformátor s regulací fáze

Transformátor s regulací fáze (zkráceně PST – z anglického Phase shifting transformer) je zařízení sloužící ke změně toků činných a/nebo jalových výkonů v elektrických soustavách. Využití nachází zejména při přerozdělování toků (proudů) na paralelních vedeních kvůli jejich efektivnějšímu využití a při regulaci výkonových toků mezi vzájemně propojenými přenosovými soustavami. Umístěny bývají do jedné napěťové hladiny v jednom z uzlů vedení tak, aby se maximalizoval jejich účinek. Abychom porozuměli funkci PST, je nutné nejprve vysvětlit zákonitosti přenosu výkonu po elektrickém vedení.

3.1 Přenos výkonu po vedení

Přenos výkonu je dán impedancí vedení a velikostí a fází napětí na jeho koncích. Vzhledem k tomu, že impedance vedení je dána především reaktivní složkou, můžeme rezistanci zanedbat, protože vzniklá odchylka od reality bude minimální. Vztah pro přenos činného a jalového výkonu je odvozen dále.

Impedance vedení a její fázový posun:

$$\mathbf{Z} = R + jX, R \ll X \quad (3.1)$$

$$\varphi_Z = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (3.2)$$

Napětí v každém uzlu se skládá z amplitudy a fáze. Pro další výpočty je výhodné popsat napěťový fázor pomocí Eulerova vzorce a funkcí sinus a cosinus. Napětí na začátku vedení můžeme označit jako U_S (source – zdroj) a na konci jako U_L (load – odběr).

$$\mathbf{U}_S = U_S(\cos(\delta_S) + j\sin(\delta_S)) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{U}_L = U_L(\cos(\delta_L) + j\sin(\delta_L)) \quad (3.4)$$

Proud tekoucí vedením se určí z rozdílu napětí na jeho začátku a konci a je nepřímo úměrný impedanci vedení.

$$\mathbf{I} = \frac{U_S \cos(\delta_S) - U_L \cos(\delta_L) + j(U_S \sin(\delta_S) - U_L \sin(\delta_L))}{\mathbf{Z}} \quad (3.5)$$

Po zanedbání rezistance upravíme rovnici následovně:

$$\mathbf{I} = \frac{U_S \sin(\delta_S) - U_L \sin(\delta_L) - j(U_S \cos(\delta_S) - U_L \cos(\delta_L))}{X} \quad (3.6)$$

Vedení se předpokládá jako bezeztrátové, proto výkon na konci vedení spočítáme jako násobek napětí v koncovém uzlu a komplexně sdružené hodnoty proudu.

$$S_L = U_L \mathbf{I}^* = \frac{U_L U_S}{X} \sin(\delta_S - \delta_L) - j \frac{U_L^2}{X} + j \frac{U_L U_S}{X} \cos(\delta_S - \delta_L) \quad (3.7)$$

Činný výkon je dán jako reálná část zdánlivého výkonu:

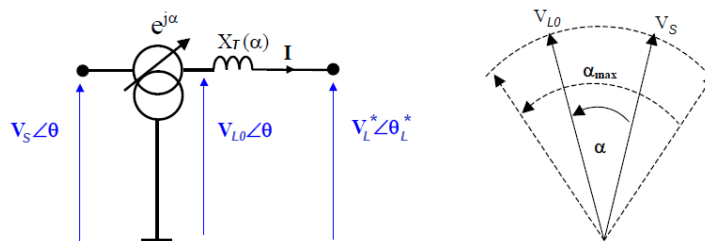
$$P_L = P_S = \frac{U_S U_L}{X} \sin(\delta_S - \delta_L) \quad (3.8)$$

Jalový výkon získáme z imaginární části zdánlivého výkonu:

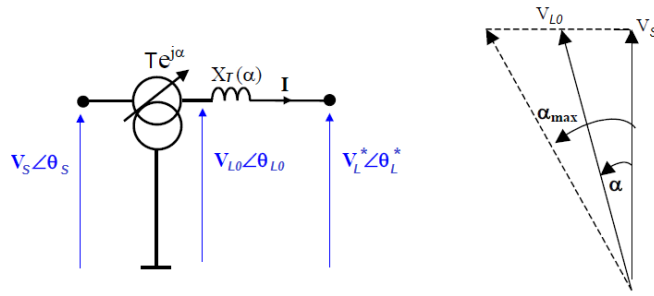
$$Q_L = \frac{U_S U_L}{X} \cos(\delta_S - \delta_L) - \frac{U_L^2}{X} \quad (3.9)$$

3.2 Vliv PST na výkonové toky

Protože elektrická vedení mají převážně induktivní charakter, změnou amplitudy napětí by došlo ke větší změně jalového výkonu, než činného (při nulovém zatížení by se činný výkon nezměnil vůbec). Chceme-li výrazně ovlivnit i výkon činný, musíme změnit fázový posun mezi napětími. Takto se dají rozevírat nebo zavírat "nůžky" mezi fázory obou napětí a ovlivňovat i jejich amplituda. Podle těchto schopností se rozlišují dva typy PST – se symetrickou regulací fáze (neboli PAR - Phase angle regulator), kde se mění jen úhel mezi napětími (obr. 3), a s nesymetrickou regulací fáze (QB - Quadrature booster), kde se mění i amplituda napětí (obr. 4).



Obr. 3 - Princip funkce PAR transformátoru [7, str. 6]



Obr. 4 - Princip funkce QB transformátoru [7, str. 8]

Je-li PST přidán do systému, vstoupí do rovnic reaktance transformátoru a regulační úhel α . Po dosazení obou veličin získáme finální vztah popisující chování systému s připojeným PST. Jedná-li se o transformátor se symetrickou regulací (PAR), vypadají výsledné vztahy takto:

$$P_L = \frac{U_L U_S}{X + X_T} \sin(\alpha + \delta_S - \delta_L) \quad (3.10)$$

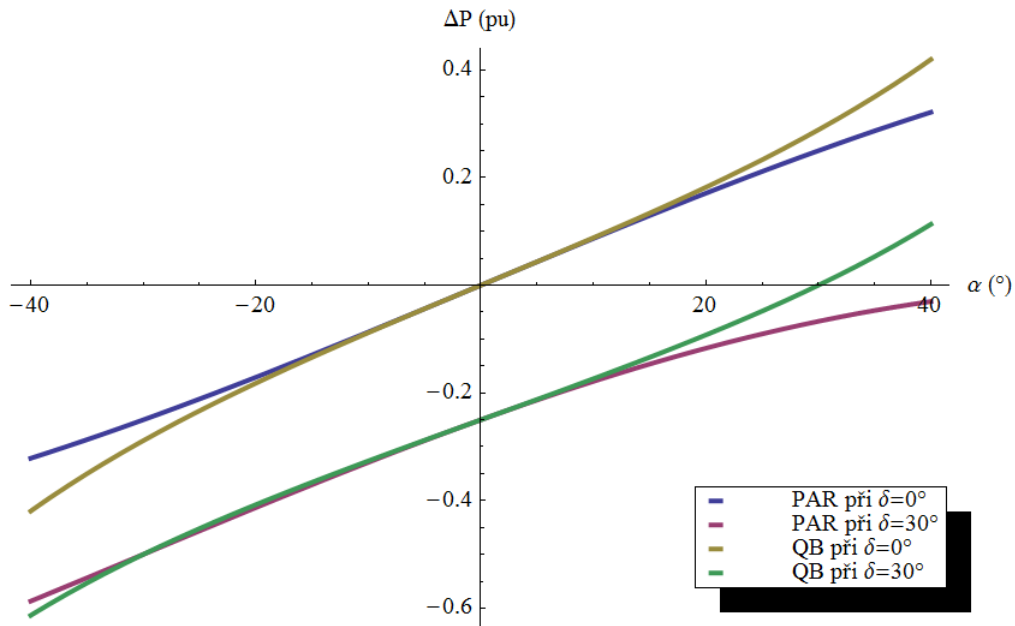
$$Q_L = \frac{U_L U_S}{X + X_T} \cos(\alpha + \delta_S - \delta_L) - \frac{U_L^2}{X + X_T} \quad (3.11)$$

Pro transformátor s nesymetrickou regulací jsou výkonové vztahy obdobné, ale vzhledem k tomu, že se mění nejen fáze, ale i amplituda napětí na výstupní straně transformátoru, objeví se ve jmenovateli člen $\cos(\alpha)$, tedy:

$$P_L = \frac{U_L U_S}{(X + X_T) * \cos(\alpha)} \sin(\alpha + \delta_S - \delta_L) \quad (3.12)$$

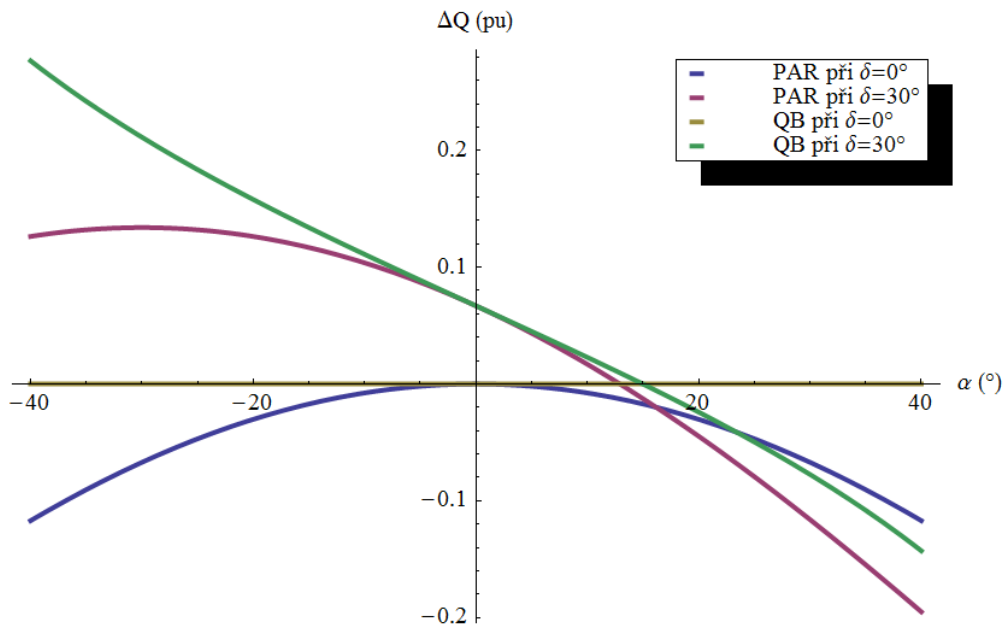
$$Q_L = \frac{U_L U_S}{(X + X_T) * \cos(\alpha)} \cos(\alpha + \delta_S - \delta_L) - \frac{U_L^2}{X + X_T} \quad (3.13)$$

Obrázek č.5 ukazuje, jak velký vliv mají PAR a QB na změnu činného výkonu na elektrickém vedení (pro zjednodušení předpokládáme U_S, U_L a $X = 1$). Křivky zobrazují rozdíl činného výkonu na vedení s PST proti výkonu bez použití PST. Zobrazeny jsou dva typy zatížení: $\delta = \delta_S - \delta_L = 0^\circ$, kdy je činný výkon před použitím PST nulový, a $\delta = 30^\circ$, kdy je činný výkon rovný 0,5 pu. Předpokládá se, že se δ s regulací PST nebude měnit. Vidíme, že PST sníží vlivem své impedance tok v poměru součtu impedance vedení a PST ku samotné impedanci vedení (pro $X = 1$ a $X_T = 1$ při $\delta = 30^\circ$ bude ΔP 0,25 pu). Pro menší zatížené úhly se PST dokáže i přesto se zvyšováním regulačního úhlu α dostat nad původní tok činného výkonu a výrazně jej překročit. Naopak při velkém zatížení vedení ($\delta = 30^\circ$) jej dokáže překonat jen QB transformátor, který nemění jen α , ale i amplitudu napětí.



Obr. 5 - Změna toku činného výkonu pro různý zátěžný úhel

Další obrázek ukazuje opět vliv PAR a QB, ale tentokrát na změnu toku jalového výkonu na konci vedení proti toku bez PST. Opět se předpokládá, že U_S, U_L, X a $X_T = 1$. Zobrazeny jsou stejné dva typy zatížení, jako na předcházejícím obrázku: $\delta = 0^\circ$, kdy je jalový výkon před použitím PST nulový, a $\delta = 30^\circ$, kdy je jalový výkon rovný přibližně -0,13 pu. Jalový výkon je záporný vlivem reaktance vedení, takže se vrací zpět směrem k počátečnímu uzlu s PST, takže PST jej svou reaktancí zvýší o 0,065 pu. Čím vyšší bude zatížení vedení, tím větší bude se změnou α i změna jalového výkonu oproti stavu bez PST. Díky vlivu na amplitudu napětí bude jalový výkon více ovlivňovat QB transformátor. Zajímavostí je, že při nulovém zátěžném úhlu δ nebude mít QB na jalový tok vůbec žádný vliv, což vyplývá z rovnice 3.13.



Obr. 6 - Změna toku jalového výkonu pro různý zátěžný úhel

Změna impedance PST při regulaci

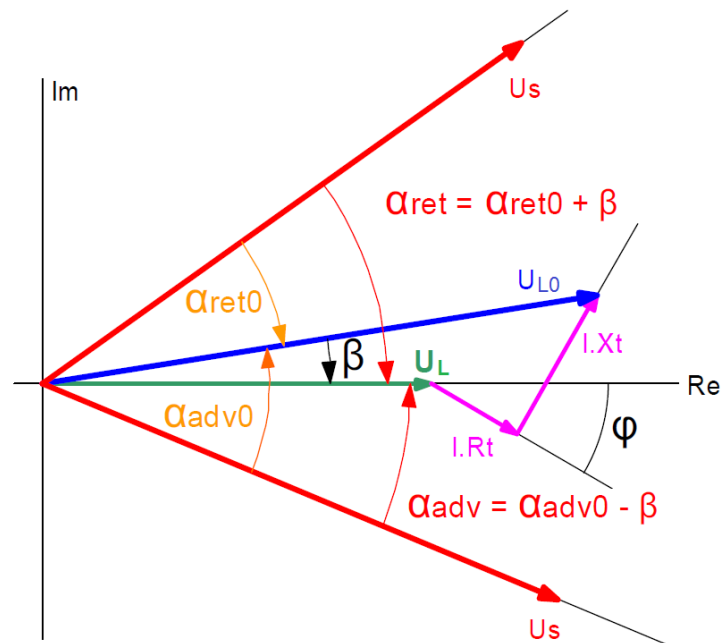
Se zvyšováním úhlu α se mění i impedance transformátoru. Pro orientační výpočty není nutné s touto změnou uvažovat, ale u přesných výpočtů je její zohlednění nezbytné. Závislost impedance na úhlu α se různí - záleží především na typu konstrukce PST. Pro závislost reaktance (dominantní složka impedance PST) dvoujádrových PST typu PAR (rovnice 3.14) i QB (rovnice 3.15) uvádí ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)[7, str. 6,8] vztahy:

$$X_{\alpha} = X_0 + (X_{\alpha_{max}} - X_0) * \left(\frac{\sin(\alpha/2)}{\sin(\alpha_{max}/2)} \right)^2 \quad (3.14)$$

$$X_{\alpha} = X_0 + (X_{\alpha_{max}} - X_0) * \left(\frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha_{max})} \right)^2 \quad (3.15)$$

3.2.1 Zatížený transformátor

Ve skutečnosti se impedance transformátoru neprojeví jen jako další složka impedance vedení, ale ovlivní i možnosti regulace úhlu α PST. Pro představu slouží následující schéma, kde je skutečný PST rozdělen na ideální transformátor, který mění jen úhel a jehož impedance je nulová, a na samostatnou impedanci PST Z_T (viz obr. 3). Napětí za ideálním transformátorem označíme jako U_{L0} a napětí za jeho impedancí jako U_L^* . To je proti U_{L0} menší o úbytek na impedanci PST. Na obr. 7 je zřetelné, že se tato "neideálnost" PST projeví na možnostech regulace úhlu.



Obr. 7 - Možnosti regulace úhlu α pod zatížením [9, str. 43]

Fázorový diagram ukazuje, jak se bude měnit nejvyšší možný regulační úhel α v případech, kdy napětí na odběrové straně U_L^* předbíhá napětí na zdrojové straně U_S (α se přičítá v kladném směru, angl. advanced), a naopak, kdy napětí U_S předbíhá U_L^* (α se od U_S odečítá, angl. retarded). Dimenzujeme-li PST, zajímá nás celkový regulační úhel mezi napětími U_S a U_L^* . Úhel β mezi napětími U_{L0} a U_L^* se v závislosti na svém směru buď přičítá, nebo odečítá od úhlu α (na schématu označený jako α_0).

Je-li α_0 záporný, bude záporný i β . Celkový úhel α se rovná jejich součtu (rovnice 3.16), takže nejvyšší možná hodnota α pro regulaci pod zatížením bude menší, než nejvyšší α naprázdno.

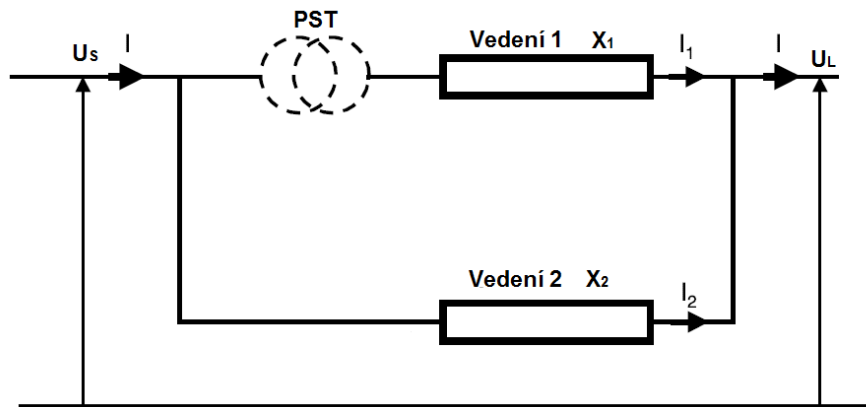
$$\alpha_{ret} = \alpha_{ret0} + \beta \quad (3.16)$$

Je-li α_0 kladný a β záporný, bude celkový úhel α rovný jejich rozdílu (rovnice 3.17) a α pod zatížením tak může být větší, než naprázdno.

$$\alpha_{adv} = \alpha_{adv0} - \beta \quad (3.17)$$

3.3 Případy vhodné pro využití PST

PST nachází využití v soustavách, kde je třeba regulovat/přerozdělovat výkonové toky na nerovnoměrně zatížených vedeních. Například může nastat situace, kde jednomu vedení hrozí přetížení (nebo už přetížené je), zatímco ostatní mohou být naopak zatížena jen málo. Neřešení tohoto problému by mohlo vést až k odpojení vedení od zbytku sítě kvůli bezpečnosti a následnému přetížení ostatních částí sítě a blackoutu.



Obr. 8 - Zapojení PST pro paralelní vedení [14, str. 4-3]

Situaci můžeme zjednodušit na příkladu dvou paralelních vedení. Uzel s napětím Předpokládá se, že zatímco velikost a fáze zdrojového napětí U_S je pevně daná, velikost a fáze napětí na konci vedení U_L se budou měnit v závislosti na výkonu tekoucím na konci vedení, který si tak můžeme představit jako odběr. Proudů a tedy i výkonů se rozdělí přímo úměrně impedanci (při zanedbání rezistance přímo úměrně reaktanci) vedení, jak ukazuje následující vztah pro proudový dělič:

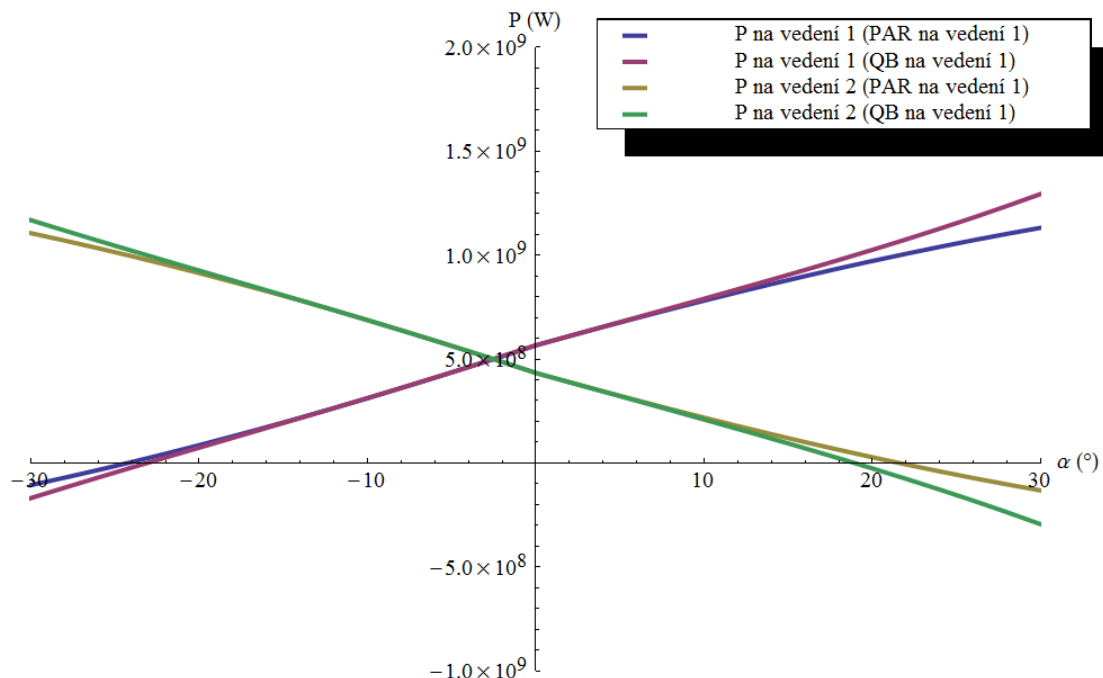
$$I_1 = I \frac{X_2}{X_1 + X_2} \quad (3.18)$$

$$I_2 = I \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (3.19)$$

Instalujeme-li PST na přetěžované vedení, zvýší se jeho impedance o impedanci transformátoru a dojde k poklesu výkonu na tomto vedení a naopak ke zvýšení na vedení bez PST. Pomocí úhlové regulace PST dokážeme toky na obou linkách úplně vyrovnat, případně dále regulovat pro větší zatížení druhého vedení.

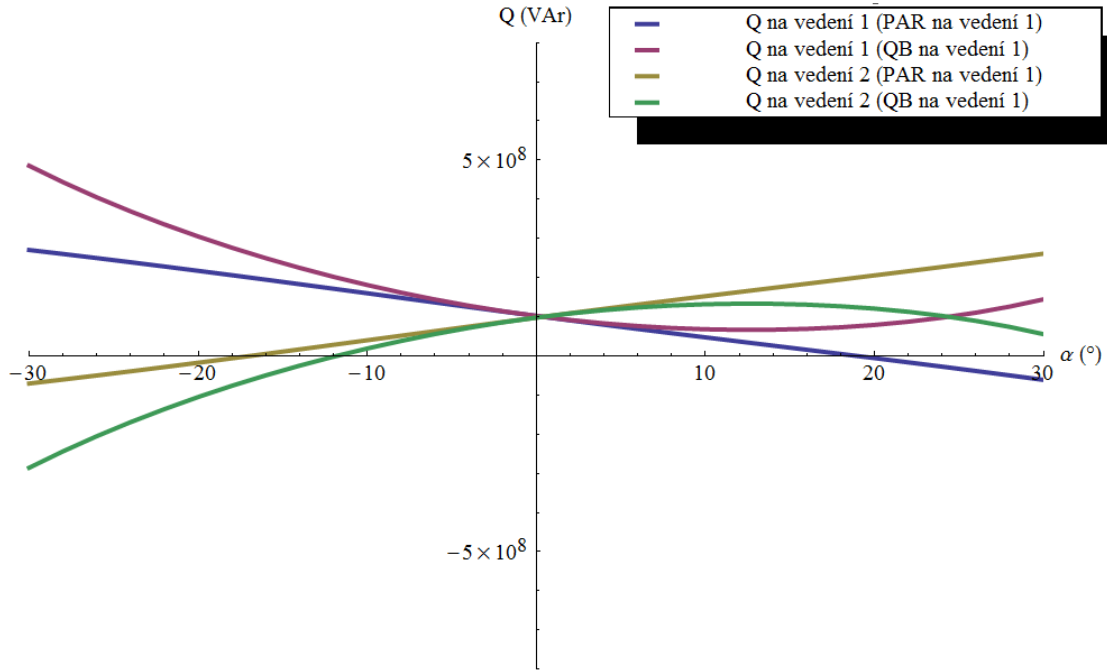
Celá situace je přehledně ukázána na obrázcích č. 9 a 10. Ty ukazují vliv jak transformátoru se symetrickou regulací (PAR), tak s nesymetrickou regulací (QB) na elektrickou síť tvořenou

odběrem 1000 MW činného a 200 MVA_r jalového výkonu a dvěma vedeními, které do odběru požadovaný výkon přivádějí. Schéma této sítě odpovídá obrázku 7. Impedance druhé linky je dvakrát větší, než u první. To může způsobit přetížení první linky, kterou teče dvojnásobný výkon, zatímco druhá pracuje zbytečně odlehčená. Umístíme-li PST (o jmenovitém výkonu 1000 MVA) na počátek prvního vedení, poklesne činný výkon vlivem impedance transformátoru, přesto bude o cca 150 MW stále větší než na druhém vedení. Nastavením regulačního úhlu -3° dojde k vyrovnání činných výkonů na obou vedeních. Dalším snižováním úhlu docílíme ještě většího odlehčení prvního vedení na úkor druhého. Naopak nastavením regulačního úhlu do kladných hodnot docílíme dalšího zatěžování první linky na úkor druhé. Při velkých úhlech α je změna výkonu výraznější u typu QB a opět dochází k otočení směru toku činného výkonu, tentokrát na druhém vedení.



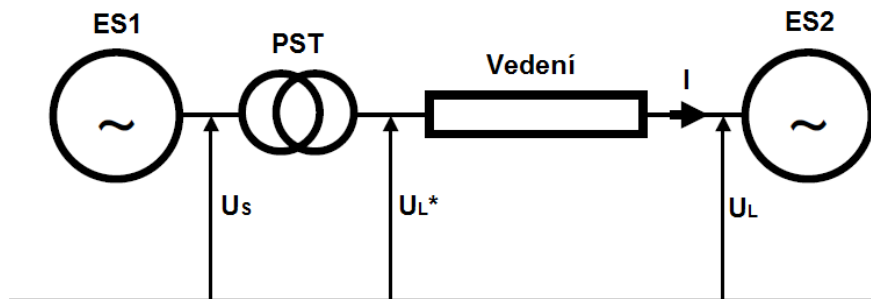
Obr. 9 - Rozdělení činného výkonu mezi dvě paralelní vedení

Toky jalového výkonu se chovají odlišně. Nastavením PST na -3° , kdy jsou vyrovnány činné výkony, dojde naopak k přerozdělení jalových toků oproti stavu bez PST (případně s nastaveným úhlem 0°). Tento rozdíl není velký a činí jen pár desítek MVA_r. Při další regulaci se ale začne podstatně zvyšovat, především u nesymetricky regulovaného PST. Pro kladné regulační úhly je situace odlišná. Zatímco se bude na prvním vedení činný výkon zvyšovat, jalový se bude snižovat, a na druhém vedení naopak. Od regulačního úhlu cca 12° se u QB transformátoru začne jalový výkon na prvním vedení zase zvyšovat, zatímco na druhém snižovat.



Obr. 10 - Rozdělení jalového výkonu mezi dvě paralelní vedení

Speciálním případem výše uvedeného je zapojení PST na vedení mezi dvěma samostatnými soustavami. Aby mohl mezi oběma soustavami téct např. velký činný výkon, je nutný i velký rozdíl ve fázovém úhlu napětích U_S a U_L na počátku a konci vedení, které obě soustavy spojuje.

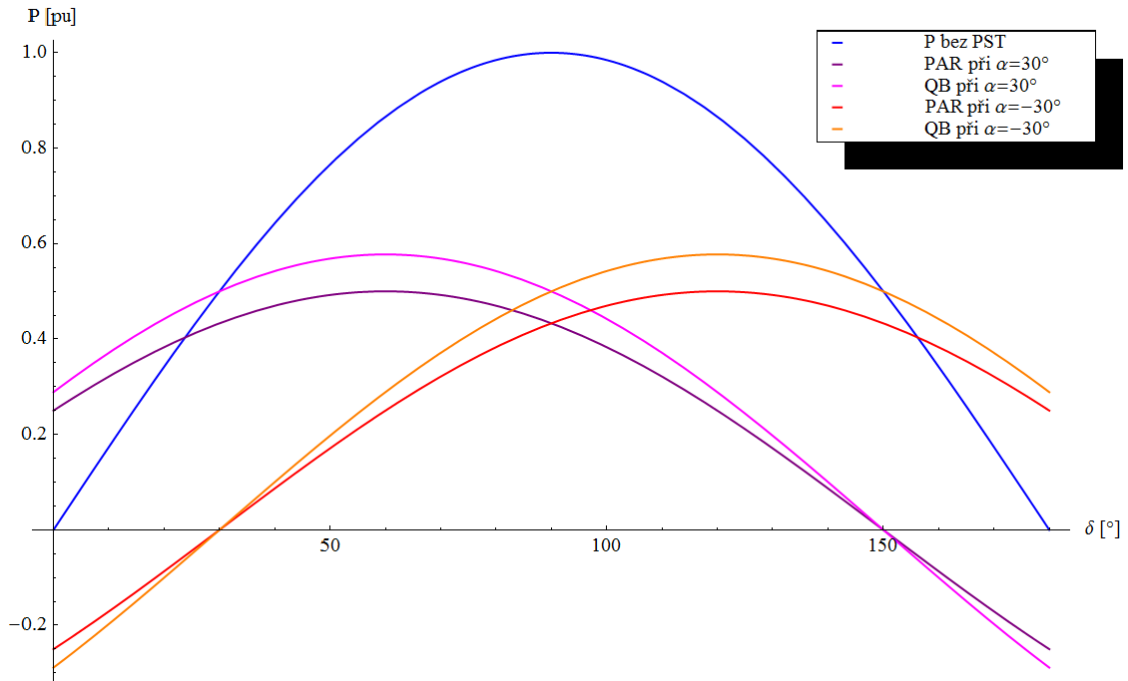


Obr. 11 - Zapojení PST mezi dvěma elektrickými soustavami[14, str. 4-4]

PST instalované na vedení přičte k existujícímu zátěžnému úhlu $\delta = \delta_S - \delta_L$ vlastní úhel α , čímž změní výkonový tok. Můžeme říct, že pro tok stejného činného výkonu nyní stačí menší zátěžný úhel. Velikost činného a jalového výkonu tak bude dána vztahy 3.10 a 3.11 pro transformátor se symetrickou regulací fáze a 3.12 a 3.13 pro transformátor s nesymetrickou regulací.

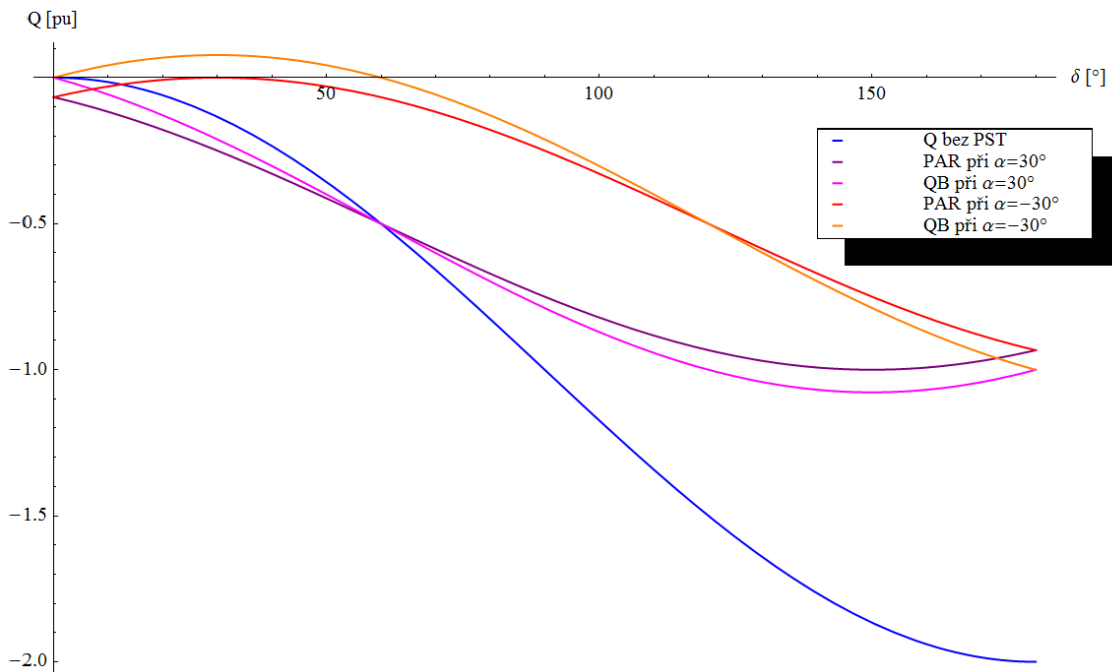
Obrázek 12 ukazuje srovnání přenášených výkonů v závislosti na zatížení vedení (reprezentováno zátěžným úhlem δ) pro stav bez PST a oba typy PST s nastaveným regulačním úhlem -30° a 30° , kde $U_S = U_L = 1pu$ a $X = X_T = 1pu$.

Vlivem impedance PST dojde u transformátoru se symetrickou regulací (PAR) k poklesu nejvyššího možného činného výkonu na vedení. Zato pro přenos činného výkonu o velikosti 0,3 pu, na který byl dříve nutný zátěžný úhel cca 20° , bude s PAR s $\alpha = 30^\circ$ stačit jen zátěžný úhel δ přibližně 6° , a s QB dokonce jen 1° .



Obr. 12 - Srovnání toků činného výkonu pro stavy bez regulace, s PAR a s QB

Regulaci činných výkonů je vhodné ukázat v kontextu se změnami jalového výkonu. Jak PAR, tak QB sníží maximální přenášený jalový výkon na vedení. Regulujeme-li na -30° , dojde k významnému omezení jalových toků, přičemž při zatíženích v rozmezí 20° až 40° dokáže PAR jalové toky úplně vyrušit, zatímco QB otočí jejich směr. Pro kladné regulační úhly bude přenášený jalový výkon většinou vyšší (δ do 60°) ve srovnání s výkonem přenášeným bez použití PST.



Obr. 13 - Srovnání toků jalového výkonu pro stavy bez regulace, s PAR a s QB

3.3.1 Zapojení více transformátorů

V některých případech je vhodné zapojit na vedení více transformátorů pracujících paralelně nebo sériově. Předpokládejme, že jsou všechny transformátory, ať už PST nebo SPS, stejného typu.

V případě paralelního zapojení dvou nebo více transformátorů je celkový fázový posun stejný jako fázový posun jediného PST. Celkovou impedanci se sníží a bude se rovnat převrácené hodnotě součtu admitancí jednotlivých transformátorů. Celkový výkon paralelně řazených PST se rovná součtu výkonů každého transformátoru.

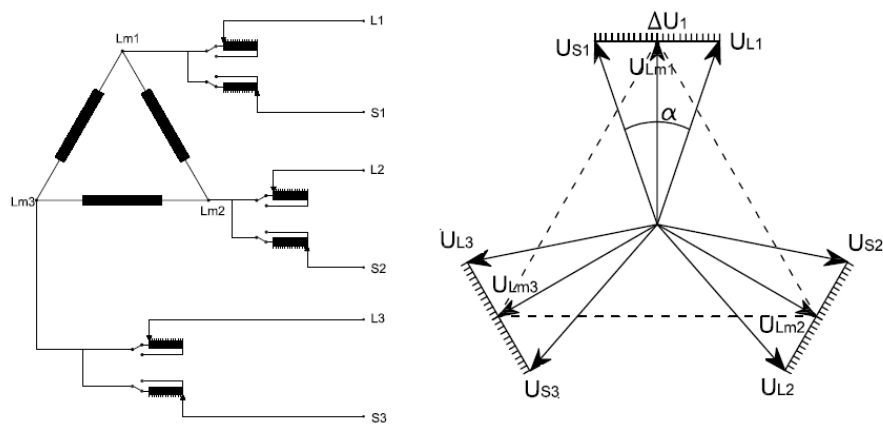
V sériovém zapojení platí, že se jak fázové posuny, tak impedance jednotlivých transformátorů sčítají, můžeme je tedy nahradit celkovým fázovým posunem a celkovou impedancí. Vzhledem k tomu, že všemi transformátory protéká stejný proud, je výkon sériové skupiny stejný jako výkon jednoho transformátoru.

3.4 Konstrukce PST

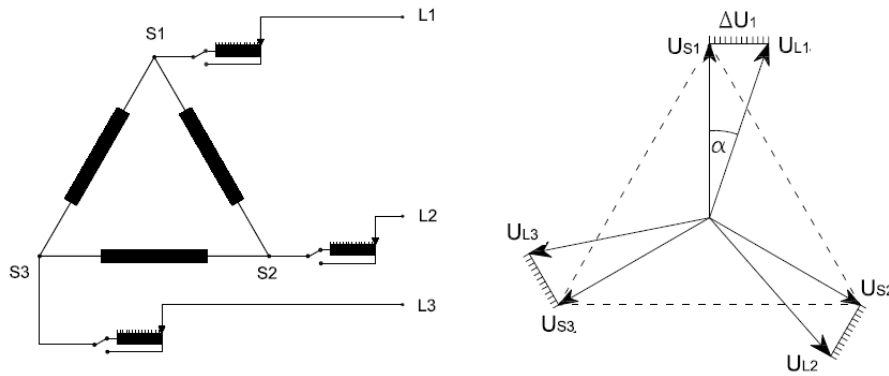
Princip funkce transformátoru s posunem fáze je v zásadě stejný pro všechny typy PST. Transformátor se skládá z budícího vinutí, na kterém je napětí sítě, a ze sériového vinutí, které slouží ke "vstřikování" regulujícího napětí do vedení. Přesto jsou zde určité rozdíly, které určují, pro jaké použití bude konkrétní transformátor využit. Jedná se zejména o napěťovou úroveň, velikost proudů a požadovaný rozsah fázové regulace.

3.4.1 Jednojádrová konstrukce

V sítích s nižším napětím (VN) a menším požadovaným regulačním úhlem α je vhodné použití konstrukce jen s jedním jádrem. Regulace fázového úhlu je dosaženo připojením budícího vinutí na střed sériového vinutí. Díky tomuto uspořádání se regulací mění jen úhel, nikoli napětí, takže se jedná o symetrickou regulaci (obr. 14). Proud protéká budícím vinutím zapojeným do trojúhelníku, dochází proto k posunu o 30° (např. vinutí mezi fázemi 2 a 3). Tento proud vytvoří magnetické pole, které indukuje napětí v sériovém vinutí, v tomto případě na vinutí fáze 1. Proti napětí této fáze je regulační napětí celkově fázově posunuto o 90° . Je možné použít jen jeden přepínač odboček na fázi (obr. 15), ale v tomto případě se bude se změnou úhlu měnit i amplituda napětí za transformátorem a rozsah úhlové regulace bude menší.

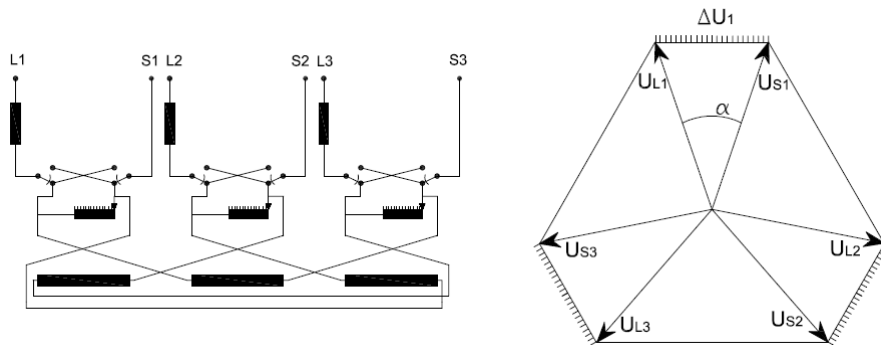


Obr. 14 - Symetrický PST s jedním jádrem[4, str. 3]



Obr. 15 - Nesymetrický PST s jedním jádrem[4, str. 2]

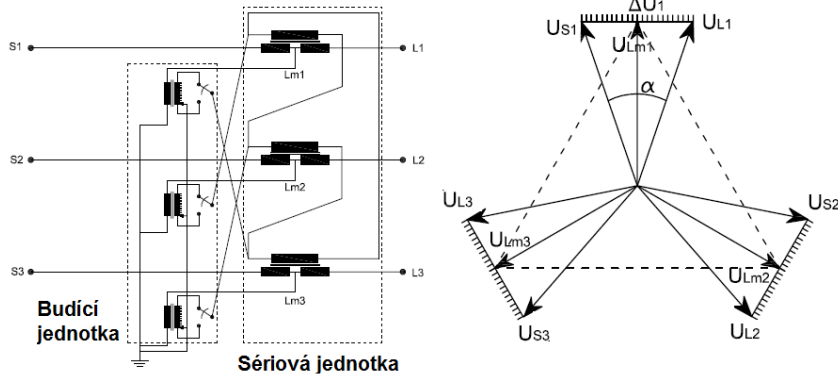
V tomto řešení jsou odbočky připojeny přímo na síť, a jsou tedy vystaveny velkému namáhání v případě přepnutí, zkratů atd. Protože při nulovém regulačním úhlu je reaktance jednojádrového transformátoru nulová, nebyl by zkratový proud nijak omezen. Z toho důvodu je vhodné na výstupní stranu PST připojit další impedanci. Výhodou je naopak jednoduchost a ekonomičnost konstrukce. Existují další varianty konstrukce s jedním jádrem, jako např. delta-hexagonální zapojení, které obsahuje jen jeden přepínač odboček a kde jsou budící a sériové vinutí zapojené na stejném sloupku jádra.



Obr. 16 - Delta-hexagonální zapojení[4, str. 3]

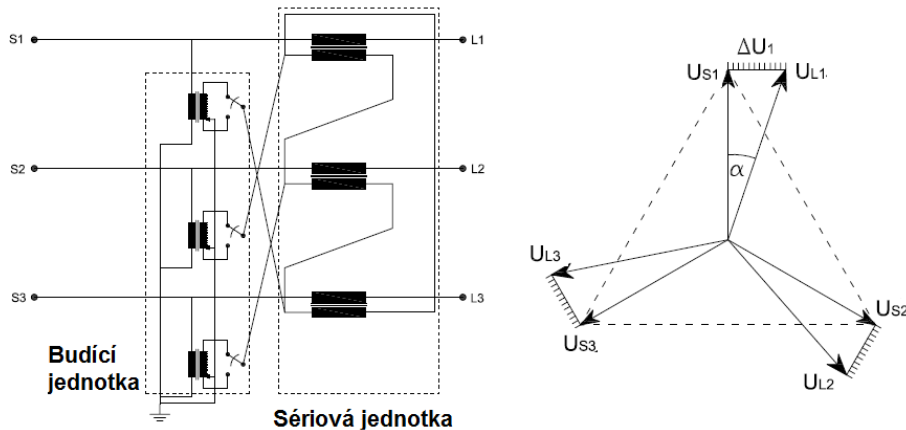
3.4.2 Dvujádrová konstrukce

Dvujádrový transformátor se skládá ze dvou jednotek, které mohou být v závislosti na výkonu transformátoru uloženy do jednoho nebo do dvou samostatných tanků. Na primárním vinutí budící jednotky se objeví síťové napětí. To je transformováno na sekundární stranu, kde je obvykle umístěn přepínač odboček. Sekundární vinutí budící jednotky je spojeno s primárním vinutím sériového transformátoru jiné fáze, opět tedy dochází k fázovému posunu o 90° proti napětí dané fáze. Regulační napětí se poté indukuje na sekundár sériového vinutí, který je přímo připojený na vedení. Obecně platí, že jedno z vinutí musí být zapojeno do trojúhelníku (obvykle primár nebo sekundár budícího nebo primár sériového), zbývající jsou zapojena do hvězdy. V případě transformátoru se symetrickou regulací je regulační napětí kolmé k napětí na budícím vinutí, které je mezi napětími na zdrojové U_S a odběrové U_L straně. Změnou úhlu α tak neovlivníme ani velikost napětí U_S , ani U_L .



Obr. 17 - Zapojení symetrické regulace [4, str. 5]

Budící vinutí transformátoru s nesymetrickou regulací je zapojeno přímo na zdrojovou stranu. Napětí indukované do sériového vinutí bude tedy posunuto o 90° přímo vzhledem ke zdrojovému napětí U_S , regulace tak nebude souměrná a bude se měnit i amplituda napětí U_L .

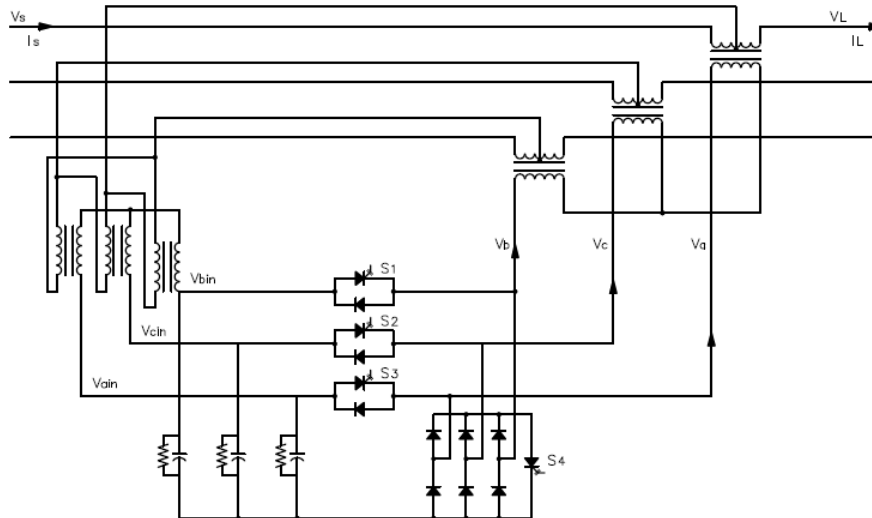


Obr. 18 - Zapojení nesymetrické regulace [4, str. 4]

PST se dvěma jádry se často využívá pro vysoké výkony a v systémech, kde je požadován velký regulační úhel. Další výhodou je, že odbočky se nacházejí na sekundárním vinutí budícího (hlavního) transformátoru, jsou tedy vystaveny nižšímu napětí a sníží se tak jejich cena. Impedanci transformátoru tvoří jak budící, tak i jeho sériová část. Protože impedance sériové části je konstantní a nezávislá na regulačním úhlu, je dvoujádrová konstrukce PST lépe chráněná vůči zkratům než konstrukce s jedním jádrem.

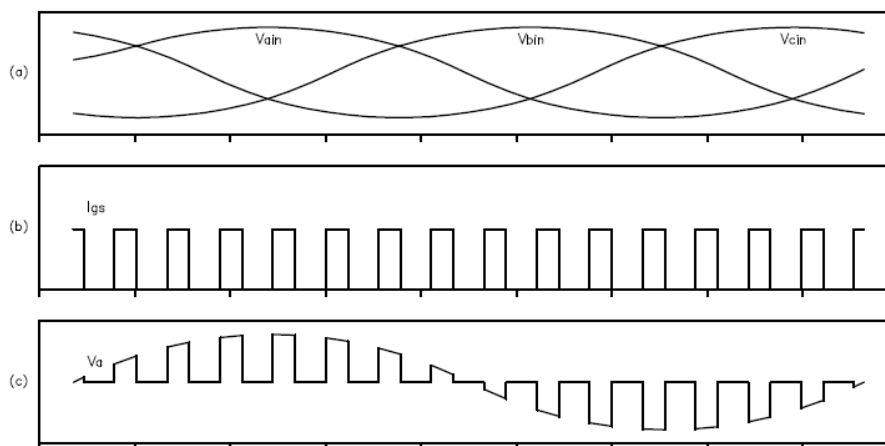
3.4.3 Transformátory s polovodičovou regulací napětí

Transformátory, jejichž napětí je regulováno pomocí výkonové elektroniky, označujeme jako tzv. static phase shifters (dále jen SPS). Nevýhodou regulace "vstříkovaného" napětí je nemožnost jeho rychlé regulace. Přepínače odboček jsou nastaveny na pevnou hodnotu, protože se počítá jen s regulací výkonu v ustáleném stavu, a přepnutí odboček není možné provést okamžitě. Nahradíme-li mechanické odbočky tyristorovými moduly, dosáhneme nejen plynulé regulace, ale i možnosti měnit regulační úhel transformátoru během přechodných jevů a tak je tlumit. V SPS transformátorech se používají buď klasické tyristory, nebo GTO tyristory, které jsou řízeny pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Rychlým spínáním vznikají vyšší harmonické složky, které se kompenzují LC filtrem.



Obr. 19 - SPS transformátor s PWM řízením[8, str. 2]

Předchozí obrázek ukazuje jednomodulový (tzn. jeden antiparalelní pár GTO-dioda na každou fázi) SPS transformátor. Napětí je regulováno tyristory S_1, S_2, S_3 , které jsou řízeny společným PWM signálem. Detail je znázorněn na následujícím obrázku. Pomocí PWM signálu je "nasekáno" napětí dané fáze (v tomto případě fáze a) a jeho efektivní hodnota je dána střídou PWM signálu. Napětí se dále filtruje a nakonec se indukuje na vedení sériovou jednotkou transformátoru.



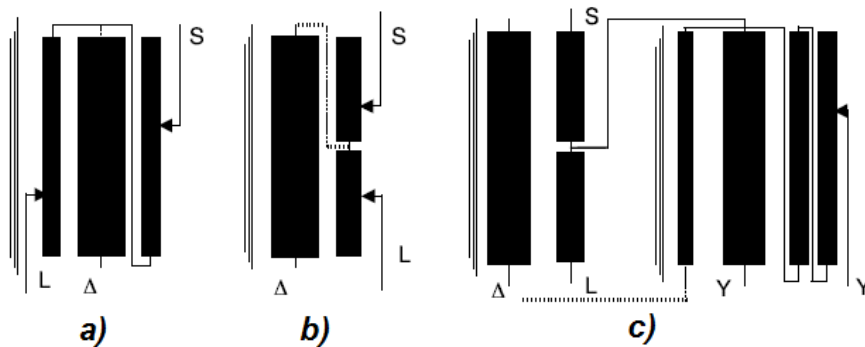
Obr. 20 - Řízení napětí fáze a[8, str. 3]

Tyristor S_4 zajišťuje, že nedojde k náhlému přerušení proudu tekoucího přes vypínaný tyristor, který se naopak uzavře přes diodový můstek a GTO S_4 . Řídicí PWM signál S_4 je přesně opačný k signálu řídicímu GTO jednotlivých fází, jsou-li tady GTO 1 až 3 vypnuty, GTO 4 je zapnut a naopak. Má-li transformátor přenášet vyšší výkony, může být jediný GTO na fázi nedostatečný. Tento problém se řeší použitím více GTO modulů na fázi v sérii. Toto řešení navíc omezuje harmonické průběhy vznikající při spínání.

3.4.4 Návrh vinutí transformátorů

V základu je návrh transformátoru s regulací úhlu velice podobný návrhu klasického výkonového transformátoru. Jeden z důležitých rozdílů se projevuje v uspořádání vinutí u PST se symetrickou regulací. Proud protékající primární a sekundární částí sériového vinutí mají rozdílný

fázový úhel, což v důsledku ovlivňuje mechanické síly působící na vinutí, elektrické ztráty a také např. i chování PST při zkratu. Na obrázku č. 21 vidíme, jak je uspořádáno vinutí u jednotlivých typů transformátorů.



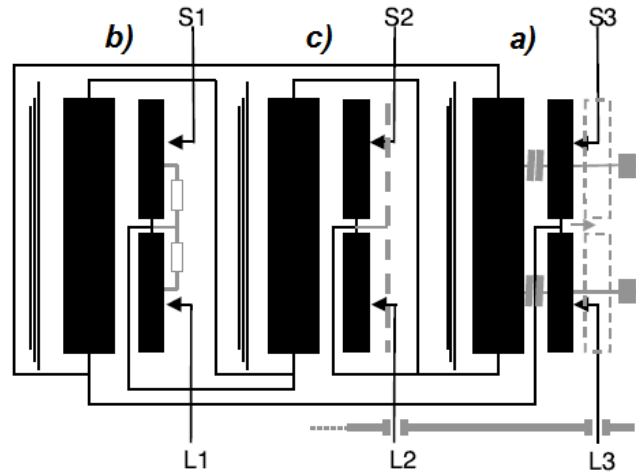
Obr. 21 - Uspořádání vinutí v a) jednojádrovém PST plášťového typu b) jednojádrovém PST jádrového typu c) dvoujádrovém PST[14, str. 4-12]

3.4.5 Odbočková regulace napětí

V klasickém PST transformátoru závisí velikost regulačního napětí na pozici odboček na sekundárním vinutí budícího transformátoru (tzv. On load tap changer - OLTC). Z principu této regulace plyne, že regulační úhel nemůže být nastaven na libovolnou hodnotu v povoleném rozmezí, ale mění se jenom po malých krocích, kdy má každý krok jednotky stupňů. Přepínání odboček vyžaduje určitý čas (až několik minut z nulového na vyšší regulační úhly) a kvůli napěťovému namáhání se ani nehodní pro rychlou regulaci napětí. Transformátory s OLTC tedy nemohou kompenzovat dynamické změny v elektrických soustavách.

Odbočky bývají umístěny na sériové (jednojádrový transformátor) nebo na budící části (sekundární vinutí u dvoujádrové konstrukce). Je nutné brát v úvahu, že odbočky budou u PST přepínány častěji než u klasických transformátorů. Počet odboček je většinou pevně dán výrobcem, pro ještě větší stupeň regulace se dají přepínače řadit sériově. Platí, že větší počet odboček zvyšuje cenu, naopak ale poklesne výkon na odbočku a regulace bude plynulejší.

Při návrhu OLTC musíme brát v potaz nejvyšší regulační napětí, tzn. napětí při nejvyšším možném fázovém úhlu, které se může na odbočkách objevit, a spínaný proud. Jedná-li se o jednojádrový transformátor, kde je OLTC připojené přímo k síti, musí se při dimenzování odboček navíc nutně počítat s poruchami v síti, jako jsou přepětí nebo zkraty. To vše zvyšuje nároky a tím i cenu OLTC. Dále je třeba si uvědomit, že přepětí vzniká i při přepínání (tedy rozpojení), kdy se na OLTC objeví potenciál daný potenciály přilehlých vinutí a vzájemnými kapacitami. Aby nedošlo k elektrickému výboji, bývají mezi vinutí vloženy ochranné statické štíty. Není-li to možné, bývají mezi budícím a regulačním vinutím umístěny rezistory, které spojují odbočková vinutí se stálým potenciálem.



Obr. 22 - a) vzájemné kapacity, b) ochranné rezistory, c) statický štít[14, str. 4-15]

3.5 Požadovaný výkon PST

Důležitou částí návrhu transformátoru s regulací fáze je stanovení požadovaného výkonu. Výkon přenášený po vedení a tedy i výkon tekoucí přes transformátor je dán vztahem:

$$S_N = 3U_f I \quad (3.20)$$

, ve kterém U_f představuje fázové napětí zdrojové strany transformátoru a I je fázový proud. Jmenovité fázové napětí na transformátoru se obvykle volí podle nejčastější hodnoty, která se v síti objevuje. Především ekonomická omezení často nedovolí volit jmenovitý výkon podle jmenovitého proudu vedení (často přesahující 2000 A) a proto je nutné zohlednit především předpokládané zatížení transformátoru. Využívání PST musí být co nejvíce efektivní. V případě jednojádrového PST je tento proud dále omezen jmenovitou zatížitelností přepínače odboček. PST dokáže vydržet až několikaminutové přetížení bez dopadu na životnost, což je výhodné především při přepínání odboček pro požadovanou velikost regulačního úhlu, kdy mohou transformátorem procházet větší výkony než při nastavení žádané regulace.

Následně můžeme určit výkon sériové a budící (jedná-li se o dvoujádrovou konstrukci) jednotky PST, který má zásadní vliv na jeho rozměry. Výkon sériové jednotky transformátoru je dán proudem na vedení a indukovaným (regulačním) napětím na sériovém vinutí. Z fázového diagramu (obr. 14 pro PAR a obr. 15 pro QB) je snadné jej vyjádřit pomocí celkového výkonu, který prochází PST, a regulačního úhlu.

Pro PST se symetrickou regulací platí:

$$S_s = 3\Delta UI = 3 * 2U_f \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) I = 2S_N \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.21)$$

a pro PST s nesymetrickou regulací:

$$S_s = 3\Delta UI = 3U_f \tan(\alpha) I = S_N \tan(\alpha) \quad (3.22)$$

Maximální regulační úhel se volí podle očekávaného způsobu využití PST. Pokud se např. bude transformátor používat především na omezování výkonových toků nebo naopak jen na jejich zvyšování, zajímá nás jeden směr regulace, zatímco pro druhý směr se můžeme spokojit s rozsahem nižším. Obecně platí, že zvyšováním regulačního rozsahu naroste i cena PST.

Dále musíme určit i požadovaný výkon budícího vinutí. U transformátoru s jedním jádrem je výpočet jednodušší. Jmenovitý výkon budícího vinutí b je dán trojnásobkem součinu napětí U_b a proudu I_b na fázi budícího vinutí:

$$S_b = 3U_b I_b \quad (3.23)$$

Budící napětí U_b PST se symetrickou regulací je na obrázku 14 popsáno jako U_{Lm} . Z obrázku odvodíme, že:

$$U_b = \sqrt{3}U_f \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.24)$$

Na obr. 15 vidíme, že se budící napětí QB rovná sdružené hodnotě fázového napětí U_f , takže platí:

$$U_b = \sqrt{3}U_f \quad (3.25)$$

Poté je třeba vypočítat proud protékající budícím vinutí. Ten je pro transformátor se symetrickou regulací dán jako:

$$I_b = \frac{\Delta U}{U_b} I \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.26)$$

Vztah pro PST s nesymetrickou regulací je podobný:

$$I_b = \frac{\Delta U}{U_b} I \quad (3.27)$$

Výsledný výkon pro PAR po dosazení veličin napětí a proudu tedy bude:

$$S_b = 3\Delta U I \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = S_N \sin(\alpha) \quad (3.28)$$

a pro QB:

$$S_b = 3\Delta U I = S_N \tan(\alpha) \quad (3.29)$$

Vidíme, že pro QB bude výkon na budícím vinutí shodný s výkonem sériového vinutí, zatímco u PAR bude budící výkon oproti sériovému o něco málo menší v závislosti na regulačním úhlu.

Výše uvedené hodnoty výkonů platí i pro dvoujádrové PST, ale díky jinému zapojení budícího vinutí (hvězda namísto trojúhelníku) zde budou jiné proudové a napěťové poměry. Pro jejich zjištění potřebujeme dopočítat i napětí a proudy na sekundáru budícího vinutí a na primáru sériového vinutí (obr. 23). Vyjdeme z častého zapojení budící jednotky Yy a sériové Dy. Důležité je znát jmenovitý proud odbočkové regulace, která se obvykle nachází na sekundárním vinutí budící jednotky. Sekundární vinutí budící jednotky a primární vinutí sériové jednotky jsou spolu spojeny přímo. Proud I_Δ protékající primárem sériové jednotky, zapojeným do trojúhelníku, tedy bude menší než proud na odbočkách I_{od} v poměru:

$$I_\Delta = \frac{I_{od}}{\sqrt{3}} \quad (3.30)$$

Napětí U_Δ na primárním vinutí sériové jednotky se pro QB vypočte z rovnosti výkonu na této jednotce:

$$U_\Delta = \frac{S_s}{I_\Delta} \quad (3.31)$$

Pro typ PAR se do vztahu přidá ještě cosinus poloviny regulačního úhlu, takže U_Δ PAR bude menší než U_Δ QB.

$$U_\Delta = \frac{S_s}{I_\Delta} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.32)$$

Napětí na sekundárním vinutí budící jednotky, tedy na odbočkách, bude:

$$U_{od} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (3.33)$$

Z rovnosti výkonů na budící jednotce už snadno vypočítáme výkon na primáru budícího vinutí:

$$I_b = \frac{I_{od} * U_{od}}{U_b} \quad (3.34)$$

Pro U_b platí vztahy 3.24 resp. 3.25. Dosazením se dostaneme ke stejným rovnicím, jako pro budící vinutí jednojádrového PST:

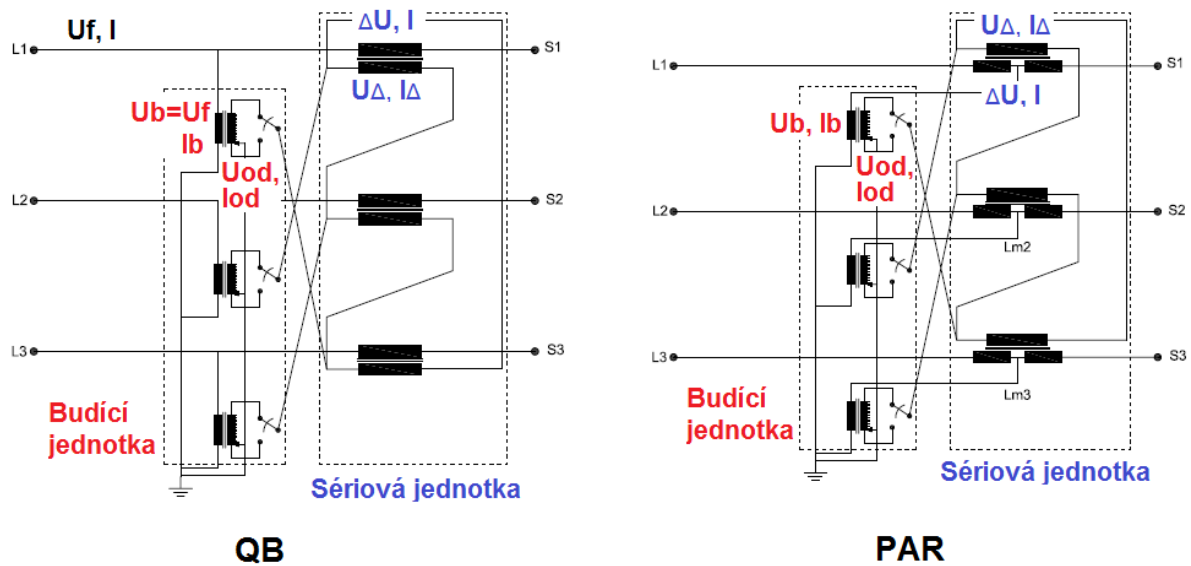
Pro typ PAR platí:

$$S_{\Delta} = S_N \sin(\alpha) \quad (3.35)$$

A pro typ QB:

$$S_{\Delta} = S_N \tan(\alpha) \quad (3.36)$$

Nyní už jsou známy napětí, proudy a výkony na všech hlavních částech PST. Pro přehlednost jsou zobrazeny na následujících schématech.

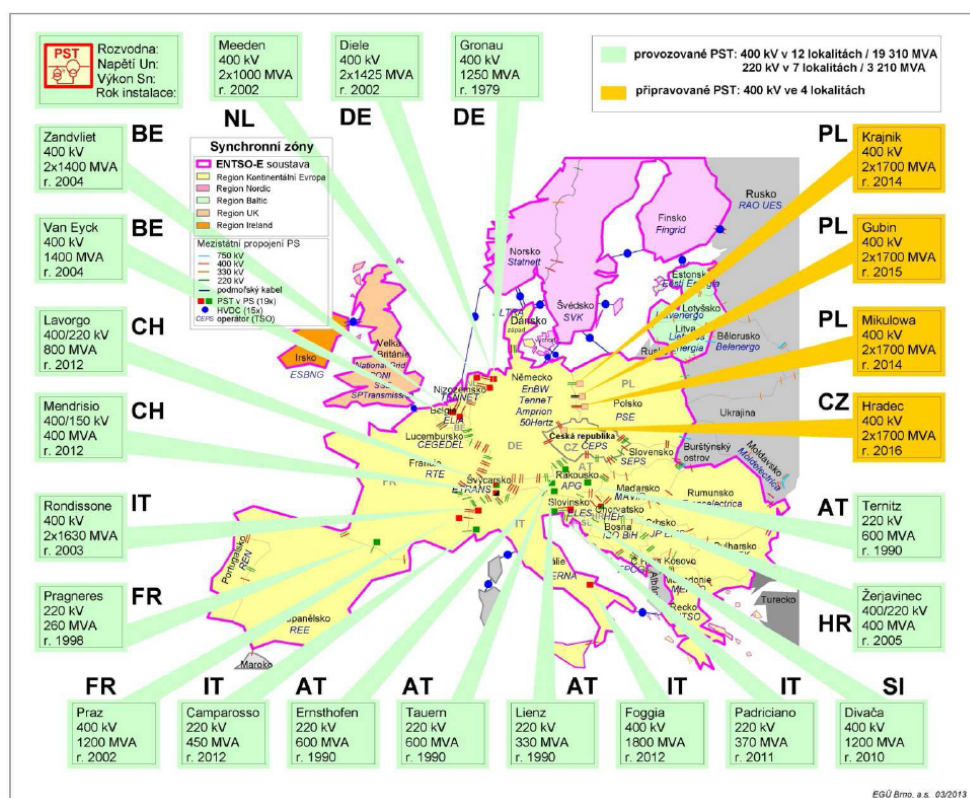


Obr. 23 - Dimenzování částí PST[4, str. 4,5]

Kapitola 4

Transformátory s regulací fáze v jiných zemích

Transformátory s regulací fáze jsou dnes používány prakticky v celém světě. S počtem jejich instalací vede Evropa, kde je najdeme např. ve Spojeném království, Francii, Belgii, Nizozemsku, Itálii, Švýcarsku, Rakousku, Slovinsku nebo Chorvatsku, a Spojené státy americké, ale najdeme je i v Japonsku, Kanadě, Austrálii a jinde. Zatímco v Evropě jsou používány především pro řízení toků výkonů na přeshraničních vedeních, jinde slouží především k odlehčování přetěžovaných linek a ke zvýšení přenosové kapacity elektrické soustavy. PST jsou instalovány především v přenosových soustavách na hladinách až přes 500 kV, ale příklad Británie ukazuje, že mohou být dobře využitelné i v distribučních soustavách. U jmenovitých výkonů je rozptyl ještě větší. Od malých PST s výkonem v řádu desítek MVA, přes "standardní" dvoujádrové transformátory s výkonem několik stovek MVA, až po zařízení s výkonem přes 2000 MVA (např. QB v Británii s výkonem 2750 MVA)



Obr. 24 - PST instalované v evropských přenosových soustavách[12, str. 14]

4.1 Texas - USA

Kvůli regulaci výkonu v přenosové soustavě Texasu, která je spravována společností ERCOT (Electric Reliability Council of Texas), instalovala společnost AEP (American Electric Power) celkem pět jednojádrových hexagonálních PST. Jejich úkolem je co nejvíce zefektivnit využívání stávajících vedení, dokud nebude postaveno nové 345 kV vedení. Provozovatel si od hexagonálního uspořádání, kde jsou tři budící a tři sériová vinutí zapojeny do šestiúhelníku, slibuje ekonomičtější provoz ve srovnání s jinými typy PST.

Typ regulace	symetrická
Konstrukce	jádrová
Zapojení vinutí	hexagonální
Průchozí výkon S_n (MVA)	150
Jmenovité napětí U_n (kV)	138

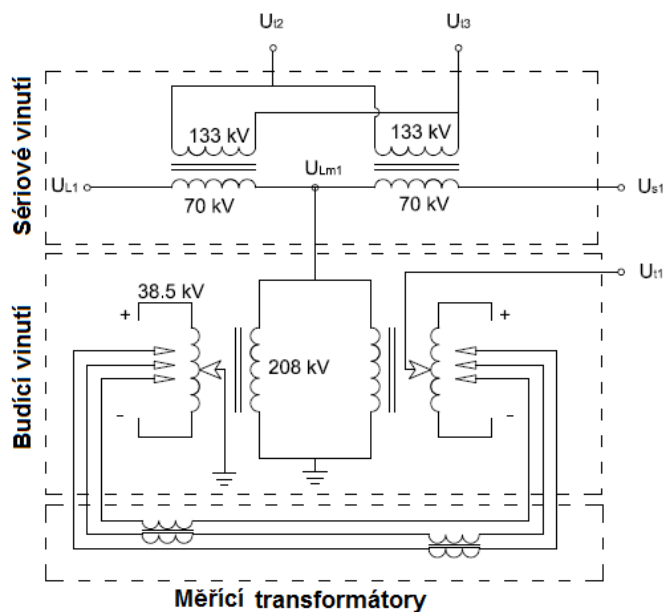


Obr. 25 - Hexagonální PST v Texasu a) parametry b) umístění v rozvodně [20, str. 1]

4.2 Meeden - Nizozemsko

Nizozemí má pět vedení, která jej spojují s okolními státy. Jižní část státu je osídlena hustěji než severní, takže docházelo k přetěžování jižních mezinárodních spojení, především vedení Maasbracht-Rommerskirchen/Siersdorf, které spojuje Nizozemsko s Německem. Severní vedení Meeden-Diele naopak zůstávalo zatížené jen málo. Z toho důvodu se TenneT (nizozemský provozovatel přenosové soustavy) rozhodl k instalaci dvou PST v rozvodně Meeden, aby se výkonové toky na severu a jihu země vyrovnaly, díky čemuž navíc dojde k navýšení celkových přenášených výkonů mezi Nizozemím a Německem. Transformátory byly objednány v roce 2000 u firmy Smit transformers. Jedná se o dvoujádrovou konstrukci se symetrickou regulací (PAR). Bylo zvoleno uspořádání, kdy je v jedné nádobě jedná fáze budící i sériové jednotky, dohromady se tedy PST skládá ze tří nádob. Každá nádoba obsahuje jednofázový sériový transformátor o výkonu 213 MVA, jednofázový budící transformátor o výkonu 202 MVA a dva měřící transformátory proudu.

Typ regulace	symetrická
Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon S_n (MVA)	1000
Jmenovité napětí U_n (kV)	380
Typ chlazení	ONAN
Regulační úhel bez zátěžení ($^\circ$)	37.2
Regulační úhel při zátěžení ($^\circ$)	30
Počet kroků regulace	± 16
Poměrné napětí nakrátko (%)	<12



Obr. 26 - PST Meeden a) parametry b) schéma[44, str. 5]

4.3 Divača - Slovinsko

Přenosová síť Slovinska je napojena na okolní síť Chorvatska, Rakouska a Itálie. Kvůli nedostatku elektrické energie na italské straně bývalo především spojení Divača - Redipuglia (Itálie) přetěžováno. Slovinská strana proto objednala u společnosti Siemens dvoujádrový symetrický transformátor s regulací fáze o jmenovitém výkonu 1200 MVA. Ten slouží pro zajištění větší bezpečnosti slovinské přenosové soustavy a vyhnutí se potenciálnímu riziku velkého výpadku.

Typ regulace	symetrická
Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon S_n (MVA)	1200
Jmenovité napětí U_n (kV)	400
Typ chlazení	ONAN/ONAF
Regulační úhel bez zátěžení ($^\circ$)	± 40
Počet kroků regulace	± 17
Poměrné napětí nakrátko (%)	20,6



Obr. 27 - a) Parametry PST Divača b) Umístění v rozvodně[21]

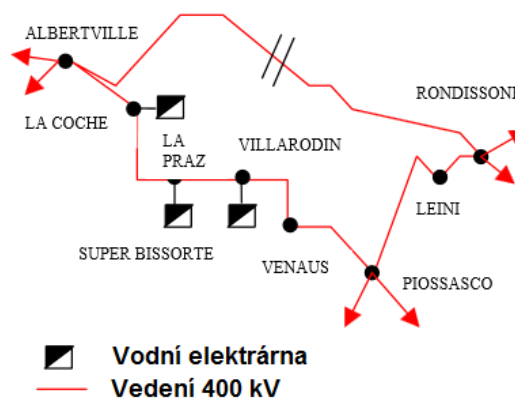
4.4 Rondissone - Itálie

Severoitalská přenosová síť je tvořena osmi 400 kV, osmi 220 kV a jedním 132 kV vedením. Ty vytvářejí tři koridory - Itálie/Francie, Itálie/Švýcarsko a Itálie/Slovinsko. Teoreticky

je možné, aby celkový výkon přenášený v těchto koridorech dosahoval 12 GW, ale ve skutečnosti je celková kapacita vedení díky nerovnoměrnému rozložení toků jen zhruba poloviční.

Z toho důvodu instaloval italský provozovatel PS Terna na 380 kV zdvojené vedení mezi Rondissone (Itálie) a Albertville (Francie) dva PST (jeden na každé vedení). Byl zvolen PST s nesymetrickou regulací (typ Quadrature Booster) od firmy ABB. Jedná se o dvoujádrovou konstrukci. Kromě lepšího rozložení toků na mezistátních vedeních slouží transformátor také pro kompenzování případného výpadku vedení mezi Itálií a Švýcarském (důvod blackoutu, který postihl prakticky celou Itálii v roce 2003) zvýšeným odběrem přes Albertville a odlehčení 220 kV vedením.

Typ regulace	nesymetrická
Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon Sn (MVA)	1630
Jmenovité napětí Un (kV)	400
Jmenovitý proud In (A)	2353
Regulační úhel bez zátěžení (°)	18
Regulační úhel při zátěžení (°)	12
Počet kroků regulace	33
Poměrné napětí nakrátko (%)	<13,5



Obr. 28 - a) Parametry PST Rondissone b) Přehraní spojení Itálie a Francie[22, str. 2]

4.5 Foggia a Villanova - Itálie

V roce 2012 vyrobila společnost Tamini pro italského provozovatele přenosové soustavy TERNA celkem čtyři PST. Dva byly umístěny do rozvodny Foggia a dva do rozvodny Villanova. Jedná se o dvoujádrové PAR transformátory, které se díky svému průchozímu výkonu 1800 MVA zařadily mezi největší na světě. Jejich cílem je optimalizovat výkonové toky ve střední části Itálie.

Typ regulace	symetrická
Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon Sn (MVA)	1800
Jmenovité napětí Un (kV)	400
Jmenovitý proud In (A)	2598
Typ chlazení	ODAF
Regulační úhel bez zátěžení (°)	±17,5
Počet kroků regulace	±33
Poměrné napětí nakrátko (%)	11



Obr. 29 - a) Parametry PST Foggia-Villanova b) Umístění v rozvodně Villanova[23, str. 7]

4.6 La Praz- Francie

PST postavené firmou Alstom se nachází na lince La Praz-Villarodin. Transformátor usnadňuje přenos výkonu z vodních elektráren La Coche, Super Bissorte a Villarodin dále do Itálie, která je velkým importérem elektrické energie. Jedná se o dvoujádrovou konstrukci se dvěma nádobami, první pro budící transformátor a druhou pro sériový transformátor.

Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon S_n (MVA)	1081
Jmenovité napětí U_n (kV)	400
Typ chlazení	ODAF
Regulační úhel bez zátěžení (°)	± 10
Regulační úhel při zátěžení (°)	-14,5 až +5
Počet kroků regulace	33
Poměrné napětí nakrátko (%)	<13,5



Obr. 30 - PST La Praz a jeho parametry[22, str. 3]

4.7 Wissington, Norfolk - Spojené království

Jak už bylo zmíněno, transformátory s regulací fáze mohou být instalovány i v distribučních sítích. Jedním z těchto případů je umístění QB transformátoru do rozvodné stanice ve Wissingtonu se síťovým napětím 33 kV. Účelem instalace je efektivnější vyvedení výkonu z elektrárny patřící společnosti British Sugar. Výkon je z ní dále do soustavy přenášen pomocí tří vedení, která jsou ale díky rozdílné impedanci nerovnoměrně zatěžována. PST zajišťuje vyšší přenos přes linku s nejvyšší impedancí, což dovoluje navýšit celkovou kapacitu vedení až o 10 MW a tím i zvýšit výkon, který elektrárna dodává do sítě. Transformátor byl postaven australskou společností Wilson Transformer Company Pty Ltd.

Typ regulace	nesymetrická
Konstrukce	dvoujádrová
Průchozí výkon S_n (MVA)	30
Jmenovité napětí U_n (kV)	33
Jmenovitý proud I_n (A)	524,9
Typ chlazení	ONAN
Regulační úhel bez zátěže (°)	±15
Počet kroků regulace	19



Obr. 31 - PST ve Wissingtonu, Norfolk a) parametry b) při zkouškách v Austrálii[25, str. 6]

Kapitola 5

Modelování prvků elektrické soustavy

Aby bylo možné simulovat elektrickou soustavu v ustáleném stavu, musíme vhodně vyjádřit všechny její prvky, a to systémem rovnic. Tyto rovnice vycházejí z jednoduchého modelu daného prvku soustavy, který je ekvivalentní složitému zařízení, jež nahrazuje. Model by měl být co nejjednodušší, aby nedocházelo k příliš časově náročným výpočtům, zároveň ale nesmí být zjednodušen tak moc, že by výpočty ztratily požadovanou přesnost. Za nejvhodnější model většiny prvků soustavy (vedení, transformátory,...) se považuje tzv. π - článek, tedy model s podélnou impedancí spojující dva uzly a jednou příčnou impedancí mezi každým uzlem a zemí. Pro zjednodušení výpočtů často zavádíme místo impedancí admittance a používáme systém poměrných jednotek (angl. per unit - pu), kde jsou veličiny poděleny svými vztažnými (angl. base) hodnotami. Pro admittance bude platit:

$$Y_B(\Omega) = \frac{S_B}{(U_B)^2} \quad (5.1)$$

$$y(pu) = \frac{Y}{Y_B} \quad (5.2)$$

Y představuje skutečnou hodnotu admittance, Y_B vztažnou hodnotu admittance, S_B vztažnou hodnotu zdánlivého výkonu a U_B vztažnou hodnotu sdruženého napětí. Vztažné hodnoty výkonu a napětí můžeme zvolit jakékoliv, ale musím být stejné v celé elektrické soustavě. Dále je vhodné vyjádřit i poměrný proud:

$$I_B(A) = \frac{S_B}{U_B} \quad (5.3)$$

$$i = \frac{I}{I_B} \quad (5.4)$$

poměrné napětí:

$$u = \frac{U}{U_B} \quad (5.5)$$

a poměrné výkony:

$$s(pu) = \frac{S}{S_B} \quad (5.6)$$

$$p(\text{pu}) = \frac{P}{S_B} \quad (5.7)$$

$$q(\text{pu}) = \frac{Q}{S_B} \quad (5.8)$$

Takto upravené veličiny usnadní výpočty na následujících stránkách.

5.1 Vedení

Pro sestavení modelu přenosového vedení je nutné znát jeho čtyři parametry. Ty závisí nejen na typu použitých vodičů, ale i na jejich geometrickém uspořádání. Veličiny jsou uvedeny v poměrných jednotkách (pu), jsou tedy dány poměrem jejich skutečné hodnoty a vztažné impedance (popř. admitance). Jedná se o:

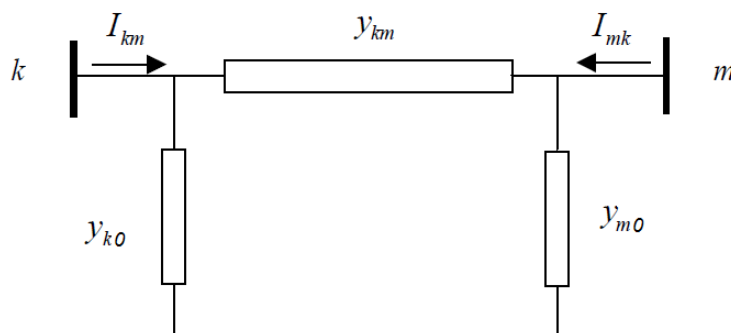
r - činný odpor mezi začátkem a koncem vedení

x - induktivní reaktance mezi začátkem a koncem vedení

g - svod mezi vedením a zemí

b - susceptance (převrácená hodnota reaktance) mezi vedením a zemí

Z výše uvedených parametrů se sestaví π - článek nahrazující pro výpočty skutečné elektrické vedení.



Obr. 32 - π - článek modelující elektrické vedení[16, str. 7]

Uzly pojmenujeme k a m . Admitance π - článku se rovnají součtům podélných resp. příčných parametrů:

$$y_{km} = \frac{1}{r_{mk} + jx_{mk}} \quad (5.9)$$

$$y_{k0} = g_{k0} + jb_{k0} \quad (5.10)$$

$$y_{m0} = g_{m0} + jb_{m0} \quad (5.11)$$

Bude-li se jednat o homogenní vedení, kde jsou jeho parametry rozprostřeny po celé délce rovnoměrně, bude platit, že:

$$y_{k0} = y_{m0} = \frac{1}{2 * (g + jb)} \quad (5.12)$$

Známe-li admitance a napětí na obou koncích vedení, vyjádříme z nich proudy a poté i výkony. Na obrázku 32 vidíme, že proud tekoucí z jednoho uzlu do druhého je roven součtu proudu, který teče přes admitanci y_{km} , a shuntového proudu tekoucího přes admitanci mezi uzlem a zemí.

$$i_k = y_{km} * (u_k - u_m) + y_{k0} * u_k \quad (5.13)$$

$$i_m = y_{km} * (u_m - u_k) + y_{m0} * u_m \quad (5.14)$$

Obě rovnice je výhodné zapsat v maticové formě:

$$\begin{pmatrix} i_k \\ i_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{km} + y_{k0} & -y_{km} \\ -y_{km} & y_{km} + y_{m0} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_k \\ u_m \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Bude-li matice admitancí symetrická a prvky na diagonále se budou rovnat, bude symetrické i vedení.

5.2 Transformátory

V elektrických soustavách se objevuje několik typů transformátorů. Kromě klasických dvouvinuťových najdeme i trojvinuťové transformátory, transformátory s regulací fáze nebo například HVDC transformátory. Platí, že tyto všechny typy mohou být modelovány jako ideální transformátor (tedy beze ztrát) s převodem t a π -článek, který se skládá z jedné podélné a dvou příčných admitancí. Podélná admitance reprezentuje činné ztráty v mědi a rozptylovou reaktanci vinutí. Příčná admitance reprezentuje činné ztráty naprázdno a induktivní magnetizační proud. Vzhledem k tomu, že podélná admitance je mnohem větší než příčná, můžeme příčnou admitanci v jednodušších modelech zanedbat.

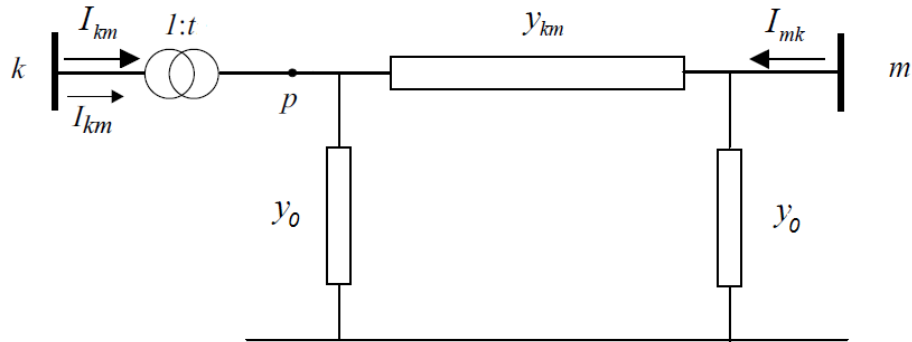
5.2.1 Dvojvinuťové transformátory

Běžné síťové transformátory (řadí se zde i autotransformátory) mají reálný napěťový převod, který pro větší přehlednost označím jako T . Je-li t převod zahrnující i fázový posuv, můžeme psát, že v běžném transformátoru platí:

$$t = T * (\cos(\alpha) + j * \sin(\alpha)) \quad (5.16)$$

, kde je fázové posunutí α způsobené transformátorem rovno nule, takže $t = T$. T je roven poměru napětí za ideálním transformátorem, které můžeme označit jako u_p , a napětí před ideálním transformátorem, což je síťové napětí v uzlu k . To znamená, že:

$$T = \frac{u_p}{u_k} \quad (5.17)$$



Obr. 33 - Zjednodušený model transformátoru[16, str. 7]

Na ideálním transformátoru nebudou výkonové ztráty, bude tedy platit, že součet zdánlivého výkonu tekoucího z uzlu k do p a výkonu tekoucího naopak se rovná nule:

$$s_k + s_p = 0 \quad (5.18)$$

$$u_k * i_k^* + u_p * i_{pk}^* = 0 \quad (5.19)$$

$$-\frac{i_k^*}{i_{pk}^*} = \frac{u_p}{u_k} = T \quad (5.20)$$

Poté sestavíme proudové rovnice pro admitanční π -článek. Pro uzel p bude platit:

$$i_{pm} = -i_{pk} = y_{km} * (u_p - u_m) + y_0 * u_p \quad (5.21)$$

Ze vztahu 5.17 dosadíme za u_p napětí u_k a proudy i_{pm} a i_{pk} nahradíme podle vztahu 5.20. Tím dostaneme:

$$i_k = T^2 * (y_{km} + y_0) * u_k - T * y_{km} * u_m \quad (5.22)$$

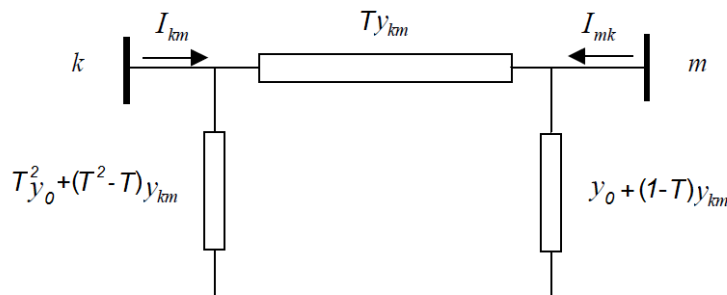
Pro uzel m bude platit:

$$i_m = (y_{km} + y_0) * u_m - T * y_{km} * u_k \quad (5.23)$$

Výše uvedené rovnice zapíšeme maticově:

$$\begin{pmatrix} i_k \\ i_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^2 * (y_{km} + y_0) & -T * y_{km} \\ -T * y_{km} & y_{km} + y_0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_k \\ u_m \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

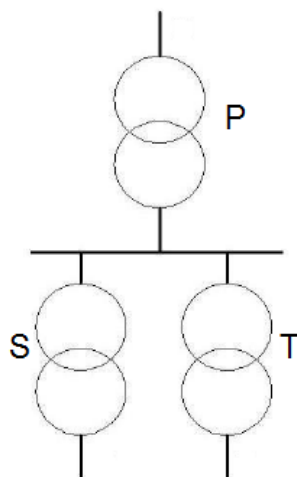
Tím, že jsme se v rovnicích zbavili uzlu p , můžeme transformátor vyjádřit jen jako admitanční π -článek spojující uzly k a m .



Obr. 34 - Admitanční model transformátoru[16, str. 7]

Trojvinařové transformátory

Modelování trojvinařových transformátorů je složitější než u dvouvinařových. Existuje několik přístupů, jak jej provést. Jednou z možností je rozdělit trojvinařový transformátor na tři dvouvinařové, které jsou zapojeny do hvězdy (je možné i zapojení do trojúhelníku).



Obr. 35 - Náhrada trojvinařového transformátoru (P-primární, S-sekundární, T-terciární)[28, str. 2]

Každý ze tří transformátorů se skládá z převodu a admitance. U primárního transformátoru se převod uvažuje jako 1:1. Admitanční model jednotlivých transformátorů zjistíme stejně jako u dvouvinařového. Jen je nutné uvažovat způsob měření štítkových hodnot trojvinařového transformátoru. Napětí nakrátko pro primární a sekundární vinutí se měří při zkratovaném sekundárním vinutí a rozpojeném terciárním (pro další kombinace analogicky). Budou tedy splňovat rovnost:

$$u_{k12} = z_1 + z_2 \quad (5.25)$$

$$u_{k13} = z_1 + z_3 \quad (5.26)$$

$$u_{k23} = z_2 + z_3 \quad (5.27)$$

Veličiny z_1, z_2, z_3 jsou poměrné impedance nakrátko jednotlivých vinutí trojvinařového transformátoru. V náhradním modelu reprezentují podélné impedance jednotlivých náhradních transformátorů. Jejich hodnotu potom zjistíme dosazením:

$$z_1 = \frac{u_{k12} + u_{k13} - u_{k23}}{2} \quad (5.28)$$

$$z_2 = \frac{u_{k12} + u_{k23} - u_{k13}}{2} \quad (5.29)$$

$$z_3 = \frac{u_{k13} + u_{k23} - u_{k12}}{2} \quad (5.30)$$

Příčná admitance reprezentující magnetizační ztráty a ztráty naprázdno bude jen u primárního transformátoru.

Ve výsledku tedy dostaneme tři π -články propojené v jednom uzlu.

5.2.2 Transformátory s regulací fáze

Při sestavování modelu transformátoru s regulací fáze postupujeme podobně jako v případě dvouvinutového transformátoru. Opět jej zjednodušíme na ideální transformátor následovaný admitancemi. Na rozdíl od běžných transformátorů je ovšem u PST převod t komplexní.

$$t = T e^{j\alpha} \quad (5.31)$$

$$t = \frac{u_p}{u_k} \quad (5.32)$$

$$s_k + s_p = 0 \quad (5.33)$$

$$u_k * i_k^* + u_p * i_{pk}^* = 0 \quad (5.34)$$

$$-\frac{i_k^*}{i_{pk}^*} = \frac{u_p}{u_k} = t \quad (5.35)$$

$$-\frac{i_k}{i_{pk}} = t^* \quad (5.36)$$

Sestavíme proudové rovnice:

$$i_{pm} = -i_{pk} = y_{km} * (u_p - u_m) + y_0 * u_p \quad (5.37)$$

Zbavíme se stejně jako u dvouvinutových transformátorů veličin s indexem uzlu p jejich nahrazením pomocí uzlu k :

$$i_k = T^2 * (y_{km} + y_0) * u_k - t^* * y_{km} * u_m \quad (5.38)$$

Pro uzel m bude platit:

$$i_m = (y_{km} + y_0) * u_m - t * y_{km} * u_k \quad (5.39)$$

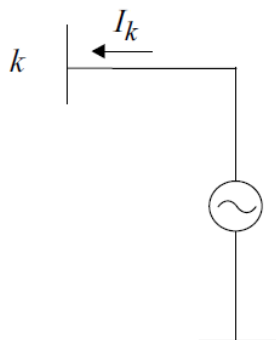
Maticový zápis vypadá následovně:

$$\begin{pmatrix} i_k \\ i_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^2 * (y_{km} + y_0) & -t^* * y_{km} \\ -t * y_{km} & y_{km} + y_0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_k \\ u_m \end{pmatrix} \quad (5.40)$$

Výše uvedená matice není symetrická, z toho vyplývá, že není možné sestavit čistě admitanční π -článek modelující PST.

5.2.3 Generátory

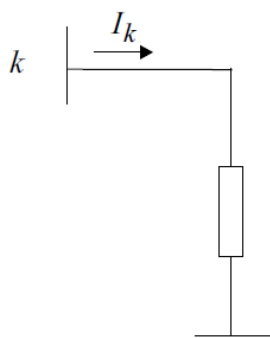
Generátor se dá považovat za prvek vstřikující proud/výkon do uzlu, k němuž je připojen. Tento výkon se během statické analýzy považuje za konstantní - generátor je řízen. Velikost napětí v uzlu ovlivňuje hlavně jalový výkon, který do něj generátor vstřikuje. Zato fázový úhel ovlivňuje činný výkon díky induktivnímu charakteru vedení. Ve výpočetních modelech se výkon dodávaný generátorem udává přímo jako jeden z uzlových parametrů.



Obr. 36 - Model generátoru[16, str. 18]

5.2.4 Odběry

Odběr je charakterizován proudem odtékajícím z uzlu, ke kterému je připojen. Obvykle bývá umístěn v nižších napěťových hladinách (distribuční sítě), může být ale umístěn i v přenosových sítích (např. některé přečerpávací elektrárny v čerpadlovém režimu). Většinou bývá odběr zadán pomocí požadovaného činného a jalového výkonu, i když jej můžeme zadat i pomocí své impedance (popř. admitance) nebo odebíraného proudu. Ve výpočetních modelech se stejně jako výkon generátoru udává i odběr jako uzlový parametr.



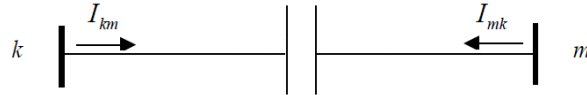
Obr. 37 - Model odběru[16, str. 18]

5.2.5 Sériová kompenzace

Cívky nebo kondenzátory zapojené do série s elektrickým vedením se používají pro kompenzaci parametrů vedení. Sériová indukčnost je vhodná pro omezení zkratových proudů, sériová kapacita zase pro snížení jalových ztrát na vedení.



Obr. 38 - Kompenzační sériová cívka



Obr. 39 - Kompenzační sériový kondenzátor

Pro oba typy zařízení platí jednoduchý vztah pro proud, který jimi protéká:

$$i_k = jb * (u_k - u_m) \quad (5.41)$$

$$i_m = jb * (u_m - u_k) \quad (5.42)$$

, kde b je susceptance, tedy imaginární část y_{km})

Maticové vyjádření:

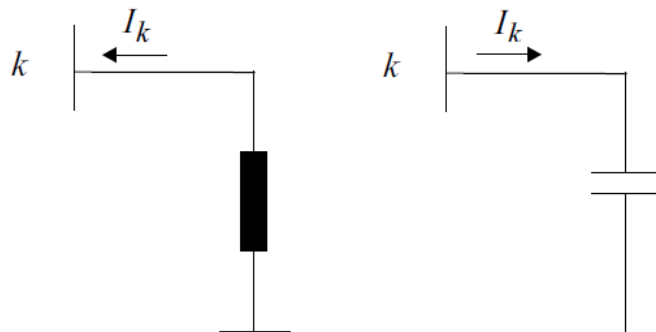
$$\begin{pmatrix} i_k \\ i_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} jb & -jb \\ -jb & jb \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_k \\ u_m \end{pmatrix} \quad (5.43)$$

5.2.6 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace (shunt) se používají jak pro zvýšení napětí (kondenzátory) v uzlu, ve kterém jsou instalovány, tak i pro snížení napětí (reaktory) jako prevence Ferrantiho jevu. Velikost napětí ovlivňuje jalový výkon, který je dodáván nebo odebírán z uzlu a tak odlehčuje nebo naopak zatěžuje elektrické vedení dodávající do uzlu požadovaný výkon. Proud bude dán jako:

$$i_k = y_{kshunt} * u_k \quad (5.44)$$

Výkon je úměrný komplexně sdružené hodnotě proudu, v případě shuntu, tzn. jalový výkon, tedy poteče opačným směrem než proud.



Obr. 40 - Typy shuntů a) reaktor, b) kondenzátor[16, str. 17]

Kapitola 6

Ustálené výkonové toky

Určení výkonových toků a jiných veličin v elektrických soustavách je důležité nejen pro jejich provoz, ale i rozvoj. Umožní předvídat proudové a napěťové poměry, úzká místa, optimální umístění nových vedení, zdrojů nebo odběrů elektrické energie a další. Tvoří nedílnou součást návrhu PST do stávající elektrizační soustavy.

6.1 Definice ustálených výkonových toků

Řešení ustálených výkonových toků, tedy takových, kdy neprobíhají přechodné jevy a nedochází ani k poruchám (zkrat, zemní spojení, odpojení vedení/zařízení), a kde jsou fáze zatíženy rovnoměrně a nemění se frekvence, sestává ze systému nelineárních algebraických rovnic, které spojují podmínky rovnosti popř. nerovnosti. Tyto podmínky jsou definovány pomocí Kirchhoffových zákonů a omezení, jako např. nejvyšší přípustné zatížení generátorů nebo v případě PST největší/nejmenší regulační úhel. V zásadě se počítá se čtyřmi uzlovými proměnnými:

P_k - činný výkon v uzlu k

Q_k - jalový výkon v uzlu k

U_k - napětí v uzlu k

δ_k - úhel napětí v uzlu k

Každý uzel je obvykle určen dvěma známými proměnnými a zbylé dvě se musí dopočítat. Podle těchto proměnných definujeme jednotlivé typy uzlů. Ty uvádí následující tabulka.

Typy uzlů	Znamé veličiny	Neznámé veličiny
Generátorový	P, U	Q, δ
Odběrový	P, Q	U, δ
Bilanční (slack/swing)	U, δ	P, Q

Obr. 41 - Typy uzlů pro řešení ustálených výkonových toků

Uzel může být samozřejmě určen i více proměnnými (např. P, Q, U generátorový uzel), ale není to obvyklé. Bilanční uzel má dvě hlavní funkce. Stanovuje referenční napěťový úhel (obvykle jej volíme 0°) a navíc udržuje rovnováhu mezi dodávaným a odebíraným výkonem tak, že kompenzuje ztráty, které jsou předem neznámé. Ve většině případů je bilanční uzel jen jeden, ale není to pravidlem[16, str. 32][17, str. 180].

6.2 Výkonové toky a jejich omezení

Z prvního Kirchhoffova zákona vychází, že suma všech proudů vytékajících z uzlu a vtékajících do něj je rovna 0. Protože výkony v uzlu získáme vynásobením komplexně sdružených proudů v uzlu uzlovým napětím, budu výše uvedený zákon platit i pro výkony, tedy:

$$P_k = \sum_{m=1}^n P_{km} \quad (6.1)$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^n Q_{km} \quad (6.2)$$

, kde P_{km} a Q_{km} jsou činné a jalové výkony na jednotlivých větvích modelované soustavy. Tyto výkony jsou odvozeny v následujících podkapitolách.

6.2.1 Výkonové toky na vedení

Výkony definujeme vzhledem k uzlu k . Vtahy pro uzel m budou obdobné. Vyjdeme-li z rovnice 5.22, kterou komplexně sdružíme a vynásobíme uzlovým napětím, dostaneme rovnice zdánlivých výkonů pro uzel k elektrického vedení. Vztahy jsou psány v poměrných jednotkách.

$$s_k = u_k^2 * y_{km} * e^{-j\varphi_{km}} + u_k^2 * y_0 * e^{-j\varphi_0} - u_k * u_m * y_{km} * e^{j(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km})} \quad (6.3)$$

Reálná složka zdánlivého výkonu dá činný výkon:

$$p_k = u_k^2 * y_{km} * \cos(-\varphi_{km}) + u_k^2 * y_0 * \cos(-\varphi_0) - u_k * U_m * y_{km} * \cos(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.4)$$

, a imaginární složka určuje jalový výkon:

$$q_k = u_k^2 * y_{km} * \sin(-\varphi_{km}) + u_k^2 * y_0 * \sin(-\varphi_0) - u_k * U_m * y_{km} * \sin(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.5)$$

6.2.2 Výkonové toky na transformátorech

Postup je obdobný jako u vedení. Vzhledem k tomu, že převod T je vztažen k jednomu z uzlů, je pro tento uzel nutné přepočítat admitance, takže se rovnice pro počáteční uzel k a konečný uzel transformátoru m budou právě převodem lišit. Proudové tekoucí do uzlů k a m jsou dány maticí 5.24. Vztah pro zdánlivý výkon, který z nich odvodíme, je:

$$s_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * e^{-j\varphi_{km}} + T^2 * u_k^2 * y_0 * e^{-j\varphi_0} - T * u_k * u_m * y_{km} * e^{j(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km})} \quad (6.6)$$

$$s_m = u_m^2 * y_{km} * e^{-j\varphi_{km}} + u_m^2 * y_0 * e^{-j\varphi_0} - T * u_k * u_m * y_{km} * e^{j(\delta_m - \delta_k - \varphi_{km})} \quad (6.7)$$

Činné výkony potom budou:

$$p_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * \cos(-\varphi_{km}) + T^2 * u_k^2 * y_0 * \cos(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \cos(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.8)$$

$$p_m = u_m^2 * y_{km} * \cos(-\varphi_{km}) + u_m^2 * y_0 * \cos(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \cos(\delta_m - \delta_k - \varphi_{km}) \quad (6.9)$$

a jalové výkony:

$$q_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * \sin(-\varphi_{km}) + T^2 * u_k^2 * y_0 * \sin(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \sin(\delta_k - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.10)$$

$$q_m = u_m^2 * y_{km} * \sin(-\varphi_{km}) + u_m^2 * y_0 * \sin(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \sin(\delta_m - \delta_k - \varphi_{km}) \quad (6.11)$$

6.2.3 Výkonové toky na PST

Vztahy pro výkony na PST jsou po odvození velmi podobné vztahům pro klasické transformátory s tím rozdílem, že se zde bude vyskytovat i regulační úhel α . Stejně jako u běžných transformátorů se budou i zde rovnice pro uzly k a m lišit převodem.

$$s_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * e^{-j\varphi_{km}} + T^2 * u_k^2 * y_0 * e^{-j\varphi_0} - T * u_k * u_m * y_{km} * e^{j(\delta_k + \alpha - \delta_m - \varphi_{km})} \quad (6.12)$$

$$s_m = u_m^2 * y_{km} * e^{-j\varphi_{km}} + u_m^2 * y_0 * e^{-j\varphi_0} - T * u_k * u_m * y_{km} * e^{j(\delta_m - \alpha - \delta_k - \varphi_{km})} \quad (6.13)$$

Činné výkony budou:

$$p_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * \cos(-\varphi_{km}) + T^2 * u_k^2 * y_0 * \cos(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \cos(\delta_k + \alpha - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.14)$$

$$p_m = u_m^2 * y_{km} * \cos(-\varphi_{km}) + u_m^2 * y_0 * \cos(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \cos(\delta_m - \alpha - \delta_k - \varphi_{km}) \quad (6.15)$$

Jalové výkony budou:

$$q_k = T^2 * u_k^2 * y_{km} * \sin(-\varphi_{km}) + T^2 * u_k^2 * y_0 * \sin(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \sin(\delta_k + \alpha - \delta_m - \varphi_{km}) \quad (6.16)$$

$$q_m = u_m^2 * y_{km} * \sin(-\varphi_{km}) + u_m^2 * y_0 * \sin(-\varphi_0) - T * u_k * u_m * y_{km} * \sin(\delta_m - \alpha - \delta_k - \varphi_{km}) \quad (6.17)$$

6.2.4 Sériová kompenzace

Sériovou kompenzací si můžeme představit jako model vedení bez admitancí k zemi. Podélná admitance bude mít buď indukční, nebo kapacitní charakter.

Výkony na sériové tlumivce budou vypadat takto:

$$p_k = -u_k * u_m * |b| * \cos(\delta_k - \delta_m + \frac{\pi}{2}) \quad (6.18)$$

$$q_k = u_k^2 * |b| - u_k * u_m * |b| * \sin(\delta_k - \delta_m + \frac{\pi}{2}) \quad (6.19)$$

Na sériovém kondenzátoru budou vypadat takto:

$$p_k = -u_k * u_m * |b| * \cos(\delta_k - \delta_m - \frac{\pi}{2}) \quad (6.20)$$

$$q_k = -u_k^2 * |b| - u_k * u_m * |b| * \sin(\delta_k - \delta_m - \frac{\pi}{2}) \quad (6.21)$$

6.2.5 Paralelní kompenzace

Pro jalový výkon na shuntové tlumivce platí:

$$q_k = u_k^2 * |b| \quad (6.22)$$

a pro shuntový kondenzátor:

$$q_k = -u_k^2 * |b| \quad (6.23)$$

6.3 Způsoby řešení

Toky výkonů v elektrických soustavách často není možné řešit analyticky. Řešení proto obvykle sestává z několika iterací, během kterých jsou postupně zpřesňovány odhady hledaných veličin až do nalezení řešení, které nejlépe odpovídá realitě. Existuje několik různých metod. Ty se od sebe liší nejen způsobem výpočtu, ale i jeho časovou náročností, přesností, konvergencí k požadovaným hodnotám nebo vhodností pro aplikaci v daném modelu soustavy. V následujících odstavcích jsou uvedeny nejčastěji používané metody řešení výkonových toků v elektrických sítích.

6.3.1 Gauss-Seidelova metoda

Gauss-Seidelova metoda je nejstarší a také matematicky nejjednodušší. Na druhé straně ovšem může mít problémy s konvergencí ke správnému výsledku. Základní úvaha je následující. Mějme funkci:

$$f(x) = 0 \quad (6.24)$$

Z této rovnice vyjádříme hledaný kořen x funkcí $g(x)$:

$$x = g(x) \quad (6.25)$$

Vyjádřená x představuje nový odhad této proměnné pro novou iteraci, takže:

$$x^{i+1} = g(x^i) \quad (6.26)$$

Podmínkou ukončení výpočtu je nalezení takového x , pro které platí, že jeho rozdíl od předchozí iterace je menší než dovolená odchylka ε , tedy:

$$|x^{i+1} - x^i| \leq \varepsilon \quad (6.27)$$

Aplikujeme-li Gauss-Seidelovu metodu na výpočet ustálených výkonových toků, postupujeme obdobně. Vyjdeme z rovnice 6.1 pro celkový výkon v uzlu (např. k), který je podle prvního Kirchhoffova zákona roven nule. Z něj vyjádříme vztahy pro neznámé uzlové veličiny - napětí a jeho fázový úhel (dohromady komplexní číslo):

$$\mathbf{u}_k^{i+1} = \frac{\frac{p_k - jq_k}{\mathbf{u}_k^{*i}} + \sum_{m=1, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km} * \mathbf{u}_m^i}{\sum_{m=0, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km}} \quad (6.28)$$

Pro všechny neznámé se zvolí počáteční odhady, pro jednoduchost obvykle v poměrných jednotkách (pu) - odhad neznámých napětí bude 1 pu a odhad úhlu napětí 0° . Tyto odhady představují nultou iteraci. Podle rovnice 6.28 vypočteme první iteraci a srovnáme rozdíl komplexních napětí mezi nultou a první iterací. Je-li větší než požadovaná hodnota, vypočteme druhou iteraci atd. Je-li naopak menší, budou tato komplexní napětí hledanými hodnotami a můžeme z nich vypočítat přenášené činné a jalové výkony:

$$p_k^{i+1} = \operatorname{Re}[\mathbf{u}_k^{*i} (\mathbf{u}_k^i \sum_{m=0, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km} - \sum_{m=1, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km} * \mathbf{u}_m^i)] \quad (6.29)$$

$$q_k^{i+1} = -\operatorname{Im}[\mathbf{u}_k^{*i} (\mathbf{u}_k^i \sum_{m=0, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km} - \sum_{m=1, m \neq k}^n \mathbf{Y}_{km} * \mathbf{u}_m^i)] \quad (6.30)$$

6.3.2 Newton-Rhapsonova metoda

Newton-Rhapsonova metoda je oproti Gauss-Seidelově matematicky komplikovanější a jednotlivé iterace kvůli nutnosti provádět inverzi Jakobiho matice (popsána dále) trvají déle. Na druhou stranu ale mnohem rychleji a snáze konverguje, což je pro výpočty rozsáhlých sítí velmi důležité.

Princip metody je následující. Vycházíme z vektoru funkcí \bar{f} se svými vektory proměnných x . Ty tvoří systém algebraických rovnic, který můžeme zapsat jako:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (6.31)$$

Tento systém rovnic linearizujeme pomocí Taylorovy řady (postup je zjednodušen na jednu rovnici s jednou proměnnou):

$$f(x) = f(x^i + \varepsilon^i) \quad (6.32)$$

, kde ε^i je odchylka i -tého odhadu od správného řešení:

$$\varepsilon^i = x - x^i \quad (6.33)$$

Vztah 6.32 můžeme dále upravit podle pravidel Taylorova rozvoje a ten linearizujeme, takže zůstanou jen první dva členy rozvoje a namísto ε^i bude ve vztahu figurovat Δx^i , který představuje rozdíl mezi proměnnými dvou po sobě následujících iterací:

$$f(x) = f(x^i) + f'(x^i) * \Delta x^i = 0 \quad (6.34)$$

Ve skutečnosti (např. v elektrické síti) je více funkcí než jen jedna a každá z nich obsahuje více než jednu proměnnou. Rovnici č. tedy upravíme na tvar:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^i + \Delta \mathbf{x}^i) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^i) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^i) * \Delta \mathbf{x}^i = 0 \quad (6.35)$$

Jakobiho matice \mathbf{J} je maticí parciálních derivací jednotlivých funkcí podle jejich proměnných a vypadá takto:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (6.36)$$

Aby bylo možné odhady dále zpřesnit, musí se z rovnice 6.35 získat vektor rozdílů mezi iteracemi $\Delta \mathbf{x}^i$. Rovnici 6.35 tedy upravíme do tvaru:

$$\Delta \mathbf{x}^i = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^i) * \mathbf{f}(\mathbf{x}^i) \quad (6.37)$$

a z něj zjistíme nový odhad proměnných:

$$x^{i+1} = x^i + \Delta x^i \quad (6.38)$$

Zde vidíme slabinu Newton-Rhaponovy metody. V každé iteraci se musí provádět inverze Jakobiho matice, což zpomaluje výpočetní dobu jedné iterace oproti ostatním metodám výpočtu výkonových toků v soustavách.

Konkrétně pro výpočty ustálených výkonových toků v elektrických soustavách bude Newton-Rhaponova metoda vypadat takto. Vektor proměnných \mathbf{x} se bude skládat ze dvou vektorů - napětí a úhlů v uzlech:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \delta \\ \mathbf{u} \end{pmatrix} \quad (6.39)$$

Funkcemi jsou činné a jalové výkony v jednotlivých uzlech:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{p}(x) \\ \Delta \mathbf{q}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}(x) - \mathbf{p} \\ \mathbf{q}(x) - \mathbf{q} \end{pmatrix} \quad (6.40)$$

Jakobiho matici můžeme složit ze čtyř menších podmatic. První tvoří všechny parciální derivace činných výkonů podle úhlu, druhou podle napětí. Třetí tvoří všechny derivace jalových výkonů podle úhlů a čtvrtou podle napětí, takže výsledná Jakobiho matice bude vypadat takto:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{U}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \delta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{U}} \end{pmatrix} \quad (6.41)$$

Jednotlivé podmatice jsou čtvercové (mají stejný počet řádků a sloupců), takže čtvercová bude i Jakobiho matice.

6.3.3 Decoupled power flow

V přenosových soustavách pozorujeme silnou závislost mezi činným výkonem a napěťovým úhlem a také mezi jalovým výkonem a velikostí napětí v uzlu. To můžeme demonstrovat na rovnicích pro výkonové toky na zjednodušeném modelu vedení (zanedbá se rezistace a shunty).

$$p_{km} = \frac{u_k u_m}{x} \sin(\delta_{km}) \quad (6.42)$$

$$q_{km} = -\frac{u_k^2}{x} + \frac{u_k u_m}{x} \cos(\delta_{km}) \quad (6.43)$$

K prokázání výše popsaných závislostí je možné použít citlivostní analýzu:

$$\frac{\partial p_{km}}{\partial \delta_k} = \frac{u_k u_m}{x} \cos(\delta_{km}) \quad (6.44)$$

$$\frac{\partial p_{km}}{\partial u_k} = \frac{u_m}{x} \sin(\delta_{km}) \quad (6.45)$$

$$\frac{\partial q_{km}}{\partial \delta_k} = \frac{u_k u_m}{x} \sin(\delta_{km}) \quad (6.46)$$

$$\frac{\partial q_{km}}{\partial u_k} = \frac{2u_k - u_m \cos(\delta_{km})}{x} \quad (6.47)$$

Po dosazení $\delta_{km} = 0$ dostaneme:

$$\frac{\partial p_{km}}{\partial \delta_k} = \frac{u_k u_m}{x} \quad (6.48)$$

$$\frac{\partial p_{km}}{\partial u_k} = 0 \quad (6.49)$$

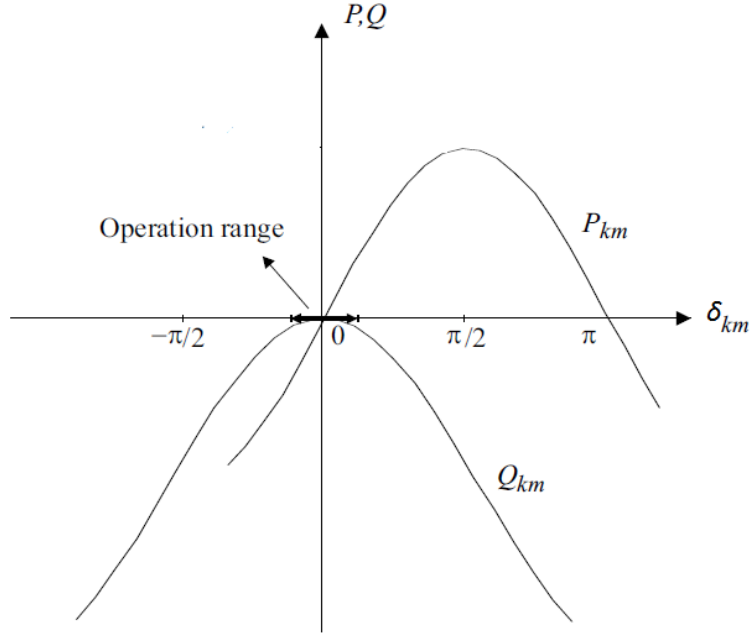
$$\frac{\partial q_{km}}{\partial \delta_k} = 0 \quad (6.50)$$

$$\frac{\partial q_{km}}{\partial u_k} = \frac{2u_k - u_m}{x} \quad (6.51)$$

Na těchto výrazech vidíme, že pro malé napěťové úhly bude závislost činného výkonu na napětí prakticky nulová, stejně tak bude nulová i závislost jalového výkonu na úhlu. Vzhledem k tomu, že napěťové úhly bývají v elektrických sítích malé, můžeme toho využít a upravit Jakobihu matici z Newton-Rhaponovy metody a tím zrychlit dobu výpočtu.

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \delta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{u}} \end{pmatrix} \quad (6.52)$$

S rostoucím napěťovým úhlem jsou ovšem vazby mezi činným výkonem/napětím a jalovým výkonem/úhlem silnější a při výpočtu chodu sítě bude potřeba více iterací proti Newton-Rhaponově metodě a mohou nastat i problémy s konvergencí.



Obr. 42 - Křivky závislosti činného a jalového výkonu na úhlu[16, str. 47]

Využijeme-li upravené Jakobiho matice podle 6.52, můžeme ji rozdělit na dvě rovnice bez vzájemné vazby:

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \delta} * \Delta \delta^i + \Delta \mathbf{p}(\delta^i, \mathbf{u}^i) = 0 \quad (6.53)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial u} * \Delta u^i + \Delta \mathbf{q}(\delta^{i+1}, \mathbf{u}^i) = 0 \quad (6.54)$$

Vidíme, že ve druhé rovnici tak můžeme počítat s proměnnou $i + 1$ iterace, která se zjistí z první rovnice, což urychluje výpočet.

Decoupled metoda se tedy hodí především pro méně zatížené sítě, kde se budou napěťové úhly pohybovat v jednotkách stupňů. V takovém případě dokáže i přes větší množství iterací oproti Newton-Rhaponově metodě nalézt správné řešení rychleji.

6.3.4 Fast decoupled

Velmi často používanou metodou je tzv. fast decoupled. Tento způsob vychází z výše popsané metody decoupled, ale předpokládá další zjednodušení Jakobiho matice tak, aby nebylo nutné během každé iterace provádět znovu její inverzi. Fast decoupled vychází z podmínek, kdy platí:

$$u_k^2 \approx u_k, b_{(k,k)} \gg q_k, \delta_k \approx \delta_k \text{ a } u_m \approx 1$$

, kde u_k a u_m je poměrná napětí (v pu) v uzlech k a m

δ_k a δ_m jsou úhly napětí v uzlech k a m

$b_{(k,k)}$ je vlastní susceptance uzlu k (v admitanční matici jsou zanedbány rezistance)

q_k je poměrný jalový výkon v uzlu k

Aplikujeme-li tyto podmínky na parciální derivace činných a jalových výkonů v Jakobiho matici, dostaneme:

$$\frac{\partial p_k}{\partial \delta_k} = -u_k b_{(k,k)} \quad (6.55)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial \delta_m} = -u_k b_{(k,m)} \quad (6.56)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial u_k} = -u_k b_{(k,k)} \quad (6.57)$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial u_m} = -u_k b_{(k,m)} \quad (6.58)$$

Z těchto parciálních derivací můžeme složit dvě rovnice podle vzoru z decoupled metody:

$$\mathbf{B}' * \Delta \delta^i + \Delta \mathbf{p}(\delta^i, \mathbf{u}^i) / \mathbf{u}^i = 0 \quad (6.59)$$

$$\mathbf{B}'' * \Delta u^i + \Delta \mathbf{q}(\delta^{i+1}, \mathbf{u}^i) / \mathbf{u}^i = 0 \quad (6.60)$$

Vzhledem k tomu, že imaginární části admitanční matice (susceptance) jsou konstanty, které nezávisí na aktuálních odhadech napětí a úhlu, bude jejich inverzní matice v každé iteraci stejná. Stačí tedy, když je inverze Jakobiho matice provedena v celém výpočtu jen jednou, což jej opět značně urychlí (ale opět zpomalí konvergenci). Z toho důvodu se metoda fast decoupled používá především pro řízení sítí a výpočty v reálném čase.

Kapitola 7

Výpočetní model

Výpočetní model přenosových sítí zemí střední Evropy jsem naprogramoval v prostředí MathWorks Matlab, které je vhodné pro rychlé matematické výpočty a v mém případě především pro práci s rozsáhlými vektory a maticemi. Pro přehlednost je program rozdělen do několika částí - tzv. m-file. Každý m-file obsahuje určitý úsek zdrojového kódu, který je zaměřen na specifickou úlohu, např. na čtení externích dat, výpočet admitanční matice atd. Program jsem sestavil tak, aby dokázal úspěšně zpracovat jakákoli data (upravená do požadovaného formátu) v relativně krátkém čase (zlomky až jednotky sekund), tedy za předpokladu, že jsou obecně řešitelná Newton-Rhapsonovou metodou. V následujících několika odstavcích jednotlivé m-fily představím. Jedná se o - Newton, Data, Pocodhady, Matice, Vykony, Jakobi, Noveodhady a Vystupy. Zdrojový kód programu je součástí CD přiloženého k diplomové práci. Při tvorbě programu jsem vycházel z materiálů Ing. Jana Špetlíka, Ph.D.[32]

7.1 Newton

M-file Newton (podle metody Newton-Rhapson) je načten jako první a slouží především ke čtení ostatních m-filů v určeném pořadí, hlídá případné překročení maximálního počtu iterací, zjišťuje celkový čas výpočtu funkcí "cputime" na začátku a konci výpočtu a hlídá, mohou-li už být výsledky z poslední iterace považovány za konečné, tedy správné s určitou dovolenou odchylkou od skutečné hodnoty. Neustálé opakování výpočtu, dokud není dosaženo požadované odchylky (popř. dokud nepřeteče počítadlo iterací), zajišťuje cyklus "while".

7.2 Data

M-file Data zajišťuje čtení vstupních dat, která obsahují vše důležité k výpočtu ustáleného chodu elektrické sítě. V mém případě jsou vstupní (externí) data uložena ve formátu "xlsx" programu Microsoft Excel. Tento formát jsem zvolil z důvodu přehledu a snadné orientace ve velkém množství dat a jejich jednoduššímu upravování, zvýrazňování atd. ve srovnání s dalšími možnostmi (např. formát "txt"). V případě potřeby by samozřejmě nebyl problém první řádky m-file souboru upravit pro čtení jiného formátu.

Vstupní data jsem kvůli přehlednosti rozdělil do čtyř souborů. Soubor "uzlym" (tedy uzlymatlab) obsahuje čísla všech uzlů dané elektrické sítě, jejich jmenovité napětí (v kV), poměrné napětí (v pu) a typ uzlu, tedy odběrový (PQ=1), generátorový (PU=2) a swing (popř. bilanční/slack=3). V souboru "odber" jsou uloženy všechny uzly s nenulovou spotřebou výkonu. Zadáno je číslo uzlu a odebíraný činný a jalový výkon. Soubor "genm" (generátory-matlab) obsahuje data týkající se generátorů (popř. kompenzace-tzn. shuntů). Uvedena jsou čísla uzlů, jejich dodávaný činný výkon a napětí v poměrných jednotkách.

Poslední soubor "vetvem" (větve-matlab) obsahuje veškerá data týkající se prvků mezi dvěma uzly, takže obsahují vedení, klasické transformátory, phase-shifting transformátory a případně

i sériovou kompenzací. Ze souboru se postupně čtou a ukládají čísla větví, čísla počátečního a koncového uzlu, hodnoty činného odporu, reaktance a susceptance (reprezentující příčné parametry prvku soustavy, u vedení kladná - kapacitní, u transformátoru záporná-induktivní). Tyto parametry jsou vztaheny ke koncovému uzlu. Dále je čten převod prvku (pro vedení nutně 1) mezi primárem (počáteční uzel) a sekundárem (koncový uzel). Převod je vztahen k počátečnímu uzlu. Jako poslední se čtou sloupce regulace a výkonového limitu. Sloupec regulace značí, jestli jsou prvky úhlově regulovatelné, což je možné vysvětlit i tak, že se během každé iterace mění jejich admitance. 0 znamená žádnou regulaci, 1 znamená symetricky regulovaný PST (PAR) a 2 znamená nesymetrický PST (QB). Výkonový limit určuje, jestli bude daný prvek přetížen a pro PST určuje činný výkon, na jehož hodnotu bude PST omezovat výkonový tok, takže je důležitý pro určení úhlu PST. Nakonec jsou do proměnných uložena čísla uzlů s phase shiftery a jsou definovány defekty, tedy požadované výkony v uzlech (popř. větvích pro PST), pro které jsou dopočítávána napětí, jejich úhly a úhly PST.

7.3 Pochody

Soubor "Pochody", tedy počáteční odhady, složí k definování indexů pro jednotlivé typy uzlů a k nastavení počátečních odhadů proměnných poměrného napětí u , napěťových úhlů δ a úhlů PST α . Pro napětí se volí 1 (v pu) a pro úhly 0, což obvykle představuje nejlepší počáteční odhady pro dobrou konvergenci výpočtu. Poté se u PU a swing uzlů nastaví kontrolované napětí, které se z definice těchto uzlů nebude během jednotlivých iterací měnit. Jako poslední se definují vektory pro korekce proměnných, které budou pro první iteraci nulové.

7.4 Matice

Soubor matice slouží k vytvoření admitanční matice, na které stojí výpočty v dalších modulech. Nejprve je nutné vypočítat admitanci prvků větví a přepočítat ji k primárnímu uzlu dané větve.

Následně se počítají prvky admitanční matice. Samotná admitanční matice je symetrická a regulární o rozměrech počet uzlů \times počet uzlů. Od první do poslední jsou čteny jednotlivé větve a podle svého počátečního a koncového uzlu ukládány na příslušná místa v matici. Prvky mimo diagonálu jsou obvykle tvořeny admitancemi jediné větve z výjimkou paralelních vedení, která se vyskytují především na mezistátních profilech. Prvky na diagonále jsou tvořeny součtem všech větví, které se stýkají v daném uzlu. Výpočty těchto prvků se liší v závislosti na tom, tvoří-li danou větev symetrický PAR (přidá se odhad úhlu α), klasický transformátor nebo vedení (α je vždy 0, takže exponenciální funkce bude rovna jedné), nebo nesymetrický QB transformátor. V takovém případě se bude s každým novým odhadem regulačního úhlu měnit i absolutní hodnota převodu. Navíc je nutné zohlednit změnu impedance PST s regulačním úhlem. Tyto průběhy jsem odvodil ze vztahů 3.14 a 3.15 a z obvyklých průběhů závislosti impedance na úhlu α . [7, str. 6,7,8][9, str. 57]

Takto se sestaví kompletní admitanční matice, která se ale musí při každé iteraci kvůli novým odhadům regulačních úhlů PST vypsát znovu. Nakonec je výhodné zadefinovat si některé pomocné proměnné pro práci s maticí, které slouží k výpočtům uzlových výkonů.

7.5 Vykony

Po vytvoření admitanční matice se načte soubor "Vykony". Ten slouží k výpočtu činných a jalových výkonů v uzlech nebo na určité větvi (PST) díky odhadům proměnných. Pro větší přehlednost jsou nejprve definovány absolutní hodnota a úhel admitance. Také jsou vytvořeny

proměnné "UhelVetve" a "rozdiluhlu", které počítají rozdíly mezi uzlovými úhly a úhlem admitance. Proměnné "Uzk" a "napadm" mezi sebou násobí uzlová napětí, případně ještě velikost admitance větve.

V následujícím cyklu "for" jsou počítány jednotlivé uzlové činné a jalové výkony. Cyklus probíhá postupně po prvcích admitanční matice. Vede-li např. do uzlu více větví, skládá se celkový výkon v tomto uzlu z dílčích výkonů, které se počítají pomocí aktuálního prvku admitanční matice. Uvedu příklad: při výpočtu výkonů z admitanční matice není třeba rozlišovat mezi různými typy prvků (vedení, PST,...), protože všechny proměnné, které od sebe tyto prvky odlišují (převod, regulační úhel), jsou už obsaženy v prvcích admitanční matice. Výkony se tedy spočítají jako:

$$p_k = u_k \sum_{m=1}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \quad (7.1)$$

$$q_k = u_k \sum_{m=1}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \quad (7.2)$$

, kde θ je úhel admitanční matice.

V každém cyklu se přičte (shodují-li se počáteční a/nebo koncové úhly) výkon (násobek proměnných "napadm * COS/SIN") daný určitým prvkem admitance k uzlovému výkonu, který byl spočtený ve dřívějších iteracích cyklu.

Vzhledem k tomu, že výkony pro PST transformátory nejsou uzlové, ale důležitý je jen tok dané větve s PST, tak jsem pro tyto výkony zavedl vlastní for cyklus. V tom se od prvního až do posledního čtou jednotlivé větve s phase-shifterem. Na těchto větvích počítám jen činné výkony, které jsou na rozdíl od jalových na PST regulované. Pro přehlednost jsou opět vytvořeny pomocné proměnné pro výpočty úhlových rozdílů - "cstheta a csroz".

Jako poslední jsou v m-filu spočítány hodnoty defektů činných a jalových výkonů v uzlech a činných výkonů na větvích s PST, a to srovnáním výkonů spočítaných v aktuální iteraci a těch zadaných ve vstupních datech.

7.6 Jakobi

Další krok spočívá ve vytvoření Jakobiho matice parciálních derivací jednotlivých výkonů podle proměnných napětí, úhlů δ a regulačních úhlů α . Výsledná matice se bude skládat ze čtyř podmatic, každá o velikosti počet uzlů x počet uzlů. Podmatice **H** obsahuje derivace všech činných výkonů v uzlech podle uzlového úhlu δ . Zbylé podmatice mají stejné rozměry. Podmatice **M** obsahuje derivace jalových výkonů podle δ , **N** je matice derivací činných úhlů podle napětí v uzlech a matici **L** tvoří derivace jalových výkonů podle napětí v uzlech. Jakobiho matice tedy bude vypadat takto:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

V cyklu "for" jsou postupně čteny prvky admitanční matice, které slouží k výpočtům derivací příslušných výkonů, pomocí nichž se vytvoří podmatice **H**, **M**, **N** a **L**. Diagonální prvky matic vypadají následovně:

$$\begin{aligned} H_{k,k} &= \frac{\partial p_k}{\partial \delta_k} = -u_k \sum_{m \neq k}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \\ &= -q_k + u_k^2 * \mathbf{y}_{(k,k)} * \sin(-\theta_{(k,k)}) \end{aligned} \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned}
 M_{k,k} &= \frac{\partial q_k}{\partial \delta_k} = u_k \sum_{m \neq k}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \\
 &= p_k - u_k^2 * \mathbf{y}_{(k,k)} * \cos(-\theta_{(k,k)})
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
 N_{k,k} &= \frac{\partial p_k}{\partial u_k} = 2u_k * \mathbf{y}_{(k,k)} * \cos(-\theta_{(k,k)}) + \sum_{m \neq k}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \\
 &= p_k / u_k + u_k * \mathbf{y}_{(k,k)} * \cos(-\theta_{(k,k)})
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\begin{aligned}
 L_{k,k} &= \frac{\partial q_k}{\partial u_k} = 2u_k * \mathbf{y}_{(k,k)} * \sin(-\theta_{(k,k)}) + \sum_{m \neq k}^n u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \\
 &= q_k / u_k + u_k * \mathbf{y}_{(k,k)} * \sin(-\theta_{(k,k)})
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Rovnice pro nediagonální prvky jsou jednodušší, vztahují se totiž jen k jedné větvi (která může případně nahrazovat paralelní vedení):

$$H_{k,m} = \frac{\partial p_k}{\partial \delta_m} = u_k u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \tag{7.8}$$

$$N_{k,m} = \frac{\partial p_k}{\partial u_m} = u_k \mathbf{y}_{(k,m)} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \tag{7.9}$$

$$M_{k,m} = \frac{\partial q_k}{\partial \delta_m} = -u_k u_m \mathbf{y}_{(k,m)} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \tag{7.10}$$

$$L_{k,m} = \frac{\partial q_k}{\partial u_m} = u_k \mathbf{y}_{(k,m)} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{(k,m)}) \tag{7.11}$$

V dalším cyklu se počítají derivace související s PST, to znamená derivace výkonů v uzlech podle regulačního úhlu α a derivace výkonů kontrolovaných PST podle všech proměnných. Pro tyto derivace je nutné vytvořit nové podmatice, které Jakobiho matici doplní. Těmito podmaticemi jsou " \mathbf{H}_{pst} " a " \mathbf{N}_{pst} ", kde je regulovaný činný výkon derivován podle δ a podle napětí u . Matice mají stejný počet řádků, jako je v síti PST, a počet sloupců odpovídá celkovému počtu uzlů. Pak " \mathbf{E}_{alfa} " a " \mathbf{F}_{alfa} ", kde jsou naopak činné resp. jalové výkony v uzlu derivovány podle regulačních úhlů. Počet řádků odpovídá počtu uzlů, počet sloupců počtu PST. Nakonec v podmatici " \mathbf{E}_{pst} " jsou na diagonále derivace výkonů PST podle vlastních regulačních úhlů α , zatímco nediagonální prvky jsou nulové. Jedná se tedy o symetrickou matici s rozměry počet PST x počet PST. Rozšířená Jakobiho matice potom bude vypadat takto [10, str. 3]:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{E}_{alfa} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{F}_{alfa} \\ \mathbf{H}_{pst} & \mathbf{N}_{pst} & \mathbf{E}_{pst} \end{pmatrix} \tag{7.12}$$

Nakonec je vhodné upravit počet řádků a sloupců každé podmatice tak, aby zbyly pouze relevantní proměnné, např. se vyřadí derivace podle swingového a generátorových napětí, která jsou pevně daná a za běhu programu se nemění.

7.7 Noveodhady

Tento m-file se zabývá vytvořením nových odhadů stavových proměnných. Toho docílí podle rovnice 6.37. Nejprve se musí vypočítat inverzní Jakobiho matice, což je mimochodem dobrý test funkčnosti Newton-Rhapsonovy metody, protože při chybě ve výše uvedených rovnicích a algoritmech nebo při nešťastném nastavení prvků elektrické soustavy má inverzní Jakobiho matice tendenci být úplně nebo téměř singulární a ukazuje špatné výsledky (navíc obvykle přeteče počítání iterací), na což Matlab upozorňuje.

Po získání vektorů korekcí všech relevantních proměnných se tento vektor rozdělí na napětí u , úhly δ a regulační úhly α , tak aby se korekce mohly přičíst k předcházejícím odhadům proměnných, čímž vzniknou nové, přesnější, odhady.

7.8 Vystupy

Je-li nalezeno správné řešení, zbývá už jen vypsát výstupy, které se ukládají do externích textových souborů. Proměnné "Uuhel" a "Vykon" slouží k uložení uzlových napětí, úhlů a činných a jalových výkonů do formátu "txt". Newton-Rhapsonova metoda ale nepočítá s výkony na jednotlivých větvích (kromě phase-shifterů), takže se musí spočítat právě v tomto m-filu. tyto výkony jsem počítal jen v jednom směru, vždy od počátečního uzlu ke koncovému a počítal jsem je "oklikou" přes proudy, které jsem využil jako další užitečný výstup programu. Pro proud tekoucí z uzlu k do uzlu m platí vztah 5.38, činné a jalové výkony se potom získají násobením komplexní hodnoty proudu uzlovým napětím.

Newton-Rhapsonova metoda zjistí regulační úhel α v reálných číslech. To ale v praxi není možné, protože úhel je nespojitě nastavován pomocí odboček, u kterých obvykle platí, že jedna odbočka posune regulační úhel o 1 až 2°. Proto jsem při výpočtech výkonových toků pro výstupní data přistoupil k zaokrouhlení regulačního úhlu na nejbližší přirozené číslo, což ovlivní výsledné toky na PST a tím i na okolních větvích nanejvýš o jednotky procent.

Pro rychlou kontrolu výsledků a konvergence metody je v samotném příkazovém okně Matlabu vypisován výsledný regulační úhel PST ("reguhel"), celkové ztráty v síti (v MW, uvedeno pod "ans"), počet iterací ("iter") a čas nutný k výpočtu ("timek").

```
reguhel =
    20
    20

ans =

 697.8918

iter =

    7

timek =

 3.9312
```

Obr. 43 - Výstup programu do příkazového okna v Matlabu (pro vysoké zatížení se dvěma PST v Polsku)

Kapitola 8

Simulace výkonových toků v ES

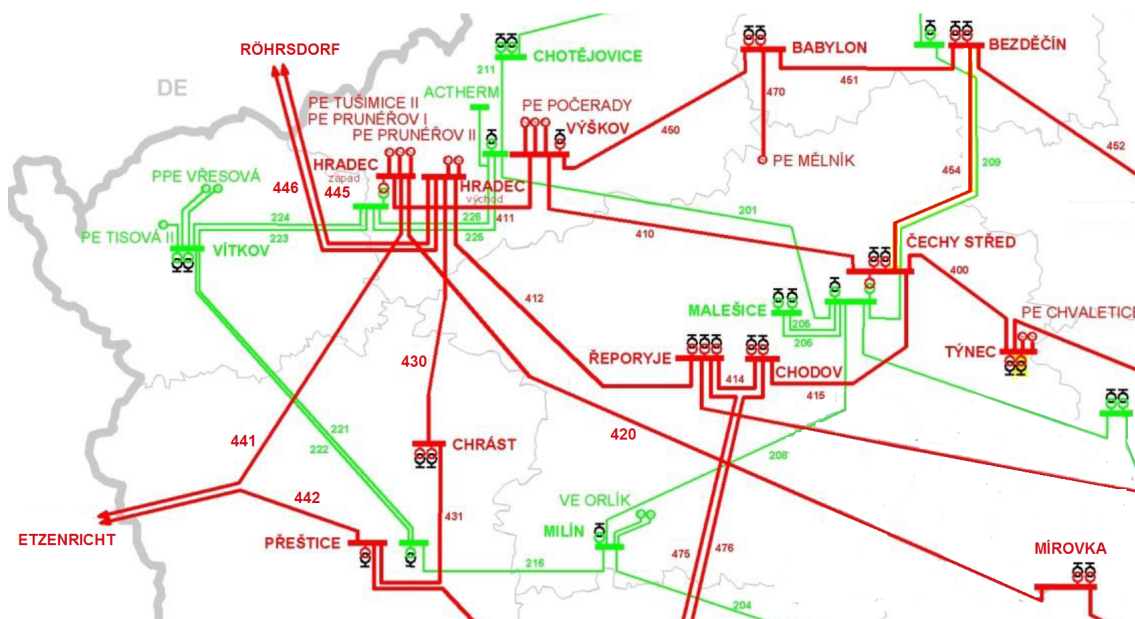
Abych ukázal vliv PST na výkonové toky a jiné veličiny v soustavě, vybral jsem si model střeoevropské přenosové soustavy, která obsahuje přenosovou soustavu České republiky (ČEPS), Německa (50Hertz a TenneT) a zjednodušené soustavy Slovenska (SEPS), Polska (PSE), Rakouska (APG) a Maďarska (MAVIR). Schémata všech přenosových soustav jsou uvedena v příloze. Zjednodušení jsem provedl tak, aby v každé zemi zůstalo jen asi kolem deseti hlavních uzlů, které spojují vedení 400 kV, která se převážně podílí na přenosu v neupravené síti, a svými parametry by měly přibližně respektovat skutečnost. Velikost dodávaného/odebíraného výkonu je zachována s tím, že jsou jednotlivé zdroje a odběry soustředěny do hlavních uzlů. Celý model se skládá z téměř 700 uzlů a téměř 1000 větví a obsahuje především takové generátory a odběry, které se podílejí na přenosu výkonů po vedeních nejvyššího napětí. Model proto zanedbává některé zdroje a odběry, které běžně tvoří část brutto výroby/spotřeby elektrické energie. Data mají reálný základ, jedná se o jeden konkrétní stav přenosové soustavy. Vzhledem k tomu, že byla data s příponou "raw" ve formátu výpočetního programu společnosti Siemens PSS/E v.29, bylo je nejprve nutné upravit tak, aby mohly být načteny mým programem v Matlabu.

Elektrickou síť jsem simuloval při různých situacích tak, abych mohl otestovat jejich vliv na provoz ES. Začal jsem simulací sítě takové, jaká byla v původním datovém souboru bez dalších změn (kromě zjednodušení sítí Rakouska, Slovenska, Polska a Maďarska). Poté jsem simuloval scénář s velkým výkonem větrných elektráren na severu Německa a zároveň velkým odběrem v Rakousku a JV Evropě. Z této situace jsem vycházel i pro ty další - PST na hranicích Polska a Německa omezující nejvyšší přenos přes německo-polskou hranici na zhruba 2500 MW, test N-1 kritéria a nakonec vliv instalace PST na vedení Hradec-Röhrsdorf.

Profil	Vedení	Rozvodny
DE-CZ	445	Hradec-Röhrsdorf
	446	Hradec-Röhrsdorf
CZ-DE	441	Hradec-Etzenricht
	442	Přeštice-Etzenricht
DE-PL	407	Vierraden-Krajnik
	408	Vierraden-Krajnik
	567	Hagenwerder-Mikulowa
	568	Hagenwerder-Mikulowa
DE-AT	258	Pleinting-St.Peter
	230	Simbach-St.Peter
	231	Simbach-St.Peter
	256	Pirach-St.Peter
	233	Altheim-St.Peter
	234	Altheim-St.Peter
	415	Krün-Westirol
	416	Krün-Westirol
PL-CZ	443	Dobrzeń-Albrechtice
	444	Wielopole-Nošovice
CZ-AT	243	Sokolnice-Dürnröhr
	244	Sokolnice-Dürnröhr
	437	Slavětice-Dürnröhr
	438	Slavětice-Dürnröhr

Obr. 44 - Důležité mezistátní profily pro neplánované výkonové toky

Pro lepší orientaci jsem přidal schéma části přenosové soustavy České republiky, které obsahuje rozvodny a vedení, o kterých se budu zmiňovat při popisu situací uvedených dále.

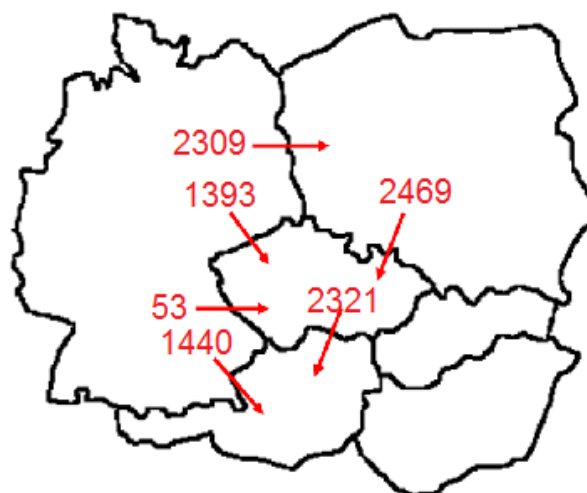


Obr. 45 - Schéma části české přenosové soustavy[26, str. 65]

8.1 Prvotní zatížení

Jako "prvotní zatížení" jsem označil situaci, která vychází z takové výkonové bilance, jaká je v původním datovém souboru. Přenosová soustava není příliš zatížená, větrné elektrárny v Německu nedodávají žádný výkon.

Profil	Činný výkon (MW)
DE-CZ	1393,22
CZ-DE	-52,53
DE-PL	2308,77
DE-AT	1439,83
PL-CZ	2468,81
CZ-AT	2321,3



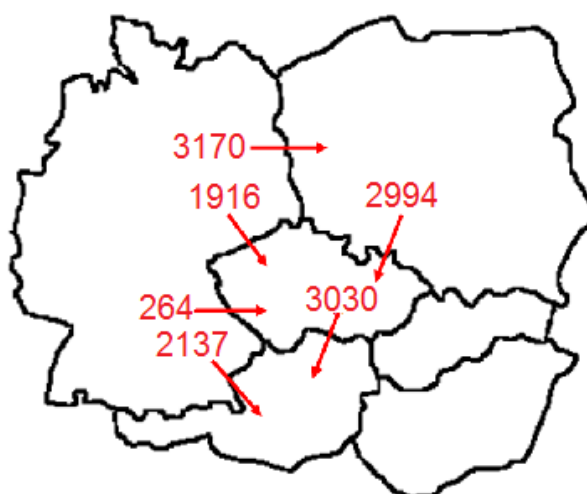
Obr. 46 - Toky na mezistátních profilech při prvotním zatížení[27]

Z Německa do Česka teče zhruba 1400 MW přes rozvodnu v Hradci a dalších asi 53 MW teče do Česka z Etzenrichtu. Největší část výkonu teče z Německa do Polska, 2309 MW, a skoro tatáž část prochází z Polska do ČR a z ní do Rakouska. Dá se tedy říct, že v této situaci hrají neplánované výkonové toky značnou roli. Zatížení na vedeních, přes která prochází výkon z Německa na Rakousko, tedy vedení 420 Hradec-Mírovka a 430 Hradec-Chrást je na 63 resp. 66 %, takže přetížení nehrozí. Na profilu Polsko-Česko-Rakousko je nejvíce zatíženo vedení 417 Otrokovice-Sokolnice, a to na necelých 74%.

8.2 Vysoké zatížení

Scénář "Vysoké zatížení" vychází z prvotního zatížení. Zatímco tam byly výkony větrných elektráren v síti 50Hertz (Nauen, Randowhöhe, Putlitz, Wessin, Iven) nulové, ve "Vysokém zatížení" dodává každá elektrárna do sítě 500 MW (celkem tedy 2500 MW), což odpovídá zvýšenému odběru v Rakousku o 2000 MW a v JV Evropě o 500 MW. V takovém případě jsou neplánované toky mnohem větší.

Profil	Činný výkon (MW)
DE-CZ	1915,55
CZ-DE	-264,27
DE-PL	3169,8
DE-AT	2137,4
PL-CZ	2994
CZ-AT	3030,2

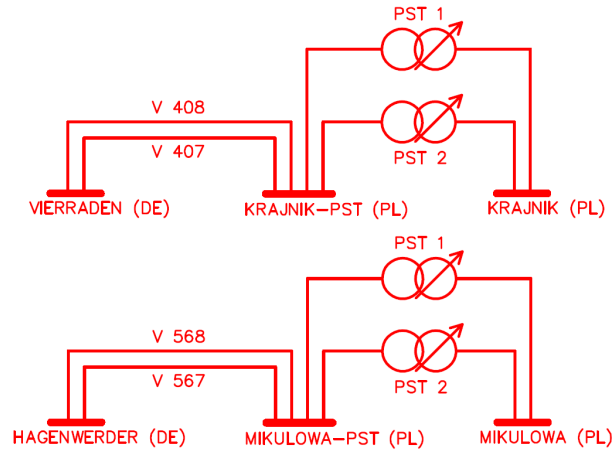


Obr. 47 - Toky na mezistátních profilech při vysokém zatížení

Vidíme, že přeshraniční toky dosahují o stovky MW vyšších hodnot než v předcházejícím případě. Na dvou profilech (Česko-Rakousko a Německo-Polsko) je dokonce překonána hodnota 3000 MW. Přes rozvodnu Hradec nyní teče cca 1900 MW a na téměř 3000 MW se zvedly i toky z Polska na Nošovice a Albrechtice. S tím se zvýšilo i zatížení na vedeních 420 (82 %) a 430 (85 %). Naopak zajímavý je velký pokles zatížení na vedení 417 (22 %), který způsobil větší odběr v JV Evropě přes linku Nošovice-Varín (Slovensko).

8.3 Zařazení polských PST

Díky velkým neplánovaným tokům se rozhodl polský operátor PSE provést rekonstrukci vedení Krajnik-Vierraden z 220 kV na 400 kV a také umístit phase-shifting transformátory do rozvodu Krajnik a Mikulowa. Ty by měly zabránit zvýšení toků z Německa nad zhruba 2500 MW. Tím pádem se ale necelých 700 MW, které už nemohou téct přes Polsko, musí uzavřít přes Česko a Německo. Tato simulace vychází se stejné situace jako při "Vysokém zatížení", jediným rozdílem je instalace celkem čtyř PST v rozvodnách Krajnik (dva PST kvůli dvojitému vedení Krajnik-Vierraden) a Mikulowa (dva PST kvůli dvojitému vedení Mikulowa-Hagenwerder).



Obr. 48 - Umístění polských PST

Při návrhu parametrů těchto PST jsem vycházel ze zdrojů [9, str. 57][11][12, str. 14]. Tyto parametry nutně nemusí být stejné jako u skutečných transformátorů (dokončení se předpokládá v letech 2015 a 2017), nicméně by měly být velmi podobné.

S_N (MVA)	U_N (kV)	α_{MAX} (°)	u_k (%)	P_k (kW)	P_o (kW)	i_o (%)
850	400	± 30	10	820	220	0,06

Obr. 49 - Hodnoty polských PST použité v simulaci

Z této tabulky je snadné spočítat parametry PST tak, aby byly použitelné v simulaci - tedy podélné prvky větve - činný odpor R a reaktanci X - a příčný prvek - reluktanci B .

$$R = R_k = P_k * \frac{U_N^2}{S_N^2} = 820 * 10^3 * \frac{(400 * 10^3)^2}{(850 * 10^6)^2} = 0,182\Omega \quad (8.1)$$

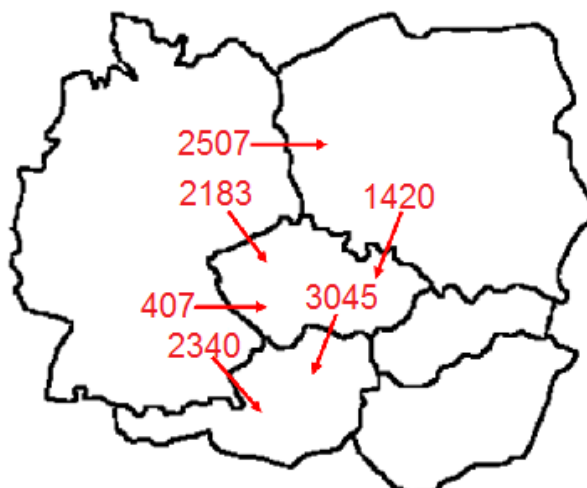
$$Z_k = u_k * \frac{U_N^2}{S_N} = 0,1 * \frac{(400 * 10^3)^2}{(850 * 10^6)} = 18,8235\Omega \quad (8.2)$$

$$X = X_k = \sqrt{Z_k^2 - R^2} = \sqrt{18,8235^2 - 0,182^2} = 18,8227\Omega \quad (8.3)$$

$$B = \frac{\sqrt{(i_o * S_N)^2 - P_o^2}}{U_N^2} = \frac{\sqrt{(0,0006 * 850 * 10^6)^2 - (220 * 10^3)^2}}{(400 * 10^3)^2} = 2,87\mu S \quad (8.4)$$

Po přidání těchto PST do výpočetního modelu vyjdou mezinárodní toky činných výkonů následovně:

Profil	Činný výkon (MW)
DE-CZ	2183,45
CZ-DE	-406,88
DE-PL	2506,6
DE-AT	2339,9
PL-CZ	1419,5
CZ-AT	3044,9



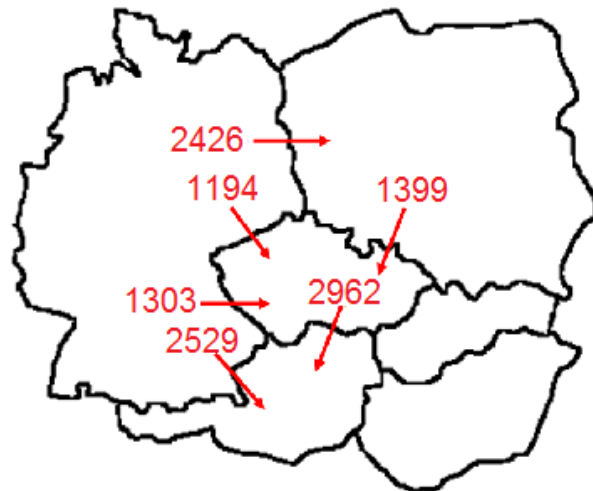
Obr. 50 - Toky při instalaci polských PST

V tabulce můžeme vidět, že omezení toků přes Polsko na zhruba 2500 MW si vynutilo další zvýšení na profilech Česko-Německo (cca +270 MW) a Německo-Rakousko (cca + 200 MW). Toky z Česka do Rakouska se změnily jen minimálně (cca + 15 MW) a profil Česko-Polsko byl výrazně odlehčen (cca - 1575 MW). Zatížení dvou linek, které se nejvíce podílejí na přenosu výkonu do Rakouska - tedy vedení 420 a 430, se dostalo až na 91,8 % resp. 95,3 %. Takto vysoké zatížení je pro soustavu velmi nevýhodné z hlediska plnění N-1 kritéria, což je ukázáno dále.

8.4 Test N-1 kritéria

Situace, kdy jsou vedení velmi zatížená, jsou obzvláště nebezpečné z hlediska plnění N-1 kritéria. Výpadek důležitého prvku by mohl způsobit přetížení dalších prvků a následně kaskádovou reakci jejich ochran a následný blackout. Při testu N-1 kritéria jsem vycházel z největšího zatížení české přenosové soustavy, které nastává při výše uvedeném scénáři "Zařazení polských PST". Nejzatíženějším vedením je vedení 430 Hradec-Chrást (95,3 %), které je součástí jednoho ze dvou koridorů přenášejících výkon z Německa do Rakouska přes ČR. Dá se očekávat, že jeho vyřazením ze simulace dojde nejen k větším tokům do Rakouska přes německou soustavu, ale především k přetížení druhého koridoru z Německa na Rakousko přes Česko, hlavně vedení 420 Hradec-Mírovka.

Profil	Činný výkon (MW)
DE-CZ	1194,3
CZ-DE	-1303
DE-PL	2425,6
DE-AT	2528,96
PL-CZ	1398,8
CZ-AT	2962

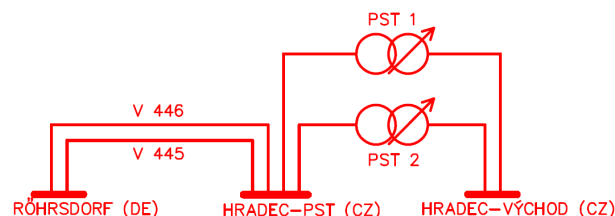


Obr. 51 - Toky při vyřazení vedení Hradec-Chrást

Zatímco toky související s Polskem zůstaly téměř beze změn, díky výpadku vedení se téměř dvakrát snížily toky přes Hradec, což se projevilo zvýšením přenosů na profilu Německo-Rakousko a také "obejitím" vedení Hradec-Chrást přes rozvodnu Etzenricht směrem na Přeštice a Mírovku přes Hradec. Vedení 420 Hradec-Mírovka je přetíženo o 20 %, jeho zatížení činí 1562 MW, zatímco na profilu Německo-Česko přes Hradec teče jen 1194 MW.

8.5 Zařazení PST transformátorů do rozvodny Hradec Východ

Do rozvodny Hradec Východ jsem zařadil dva transformátory PST, každý na jedno vedení, které mají za úkol omezovat výkonové toky z Německa přes ČR a odlehčit tak českým vedením.



Obr. 52 - Umístění českých PST

Při návrhu těchto transformátorů jsem vycházel z objednávky společnosti ČEPS a.s. [13] a z tabulky [9, str. 57], abych mohl přibližně určit parametry transformátoru. Pro potřeby simulace se tak jedná o skoro stejné transformátory, jako jsem použil v Polsku, tedy:

S_N (MVA)	U_N (kV)	α_{MAX} (°)	u_k (%)	P_k (kW)	P_o (kW)	i_o (%)
850	420	± 30	10	820	220	0,06

Obr. 53 - Hodnoty českých PST použité v simulaci

$$R = R_k = P_k * \frac{U_N^2}{S_N^2} = 820 * 10^3 * \frac{(420 * 10^3)^2}{(850 * 10^6)^2} = 0,2\Omega \quad (8.5)$$

$$Z_k = u_k * \frac{U_N^2}{S_N} = 0,1 * \frac{(420 * 10^3)^2}{(850 * 10^6)} = 20,753\Omega \quad (8.6)$$

$$X = X_k = \sqrt{Z_k^2 - R^2} = \sqrt{18,8235^2 - 0,182^2} = 20,752\Omega \quad (8.7)$$

$$B = \frac{\sqrt{(i_o * S_N)^2 - P_o^2}}{U_N^2} = \frac{\sqrt{(0,0006 * 850 * 10^6)^2 - (220 * 10^3)^2}}{(420 * 10^3)^2} = 2,61\mu S \quad (8.8)$$

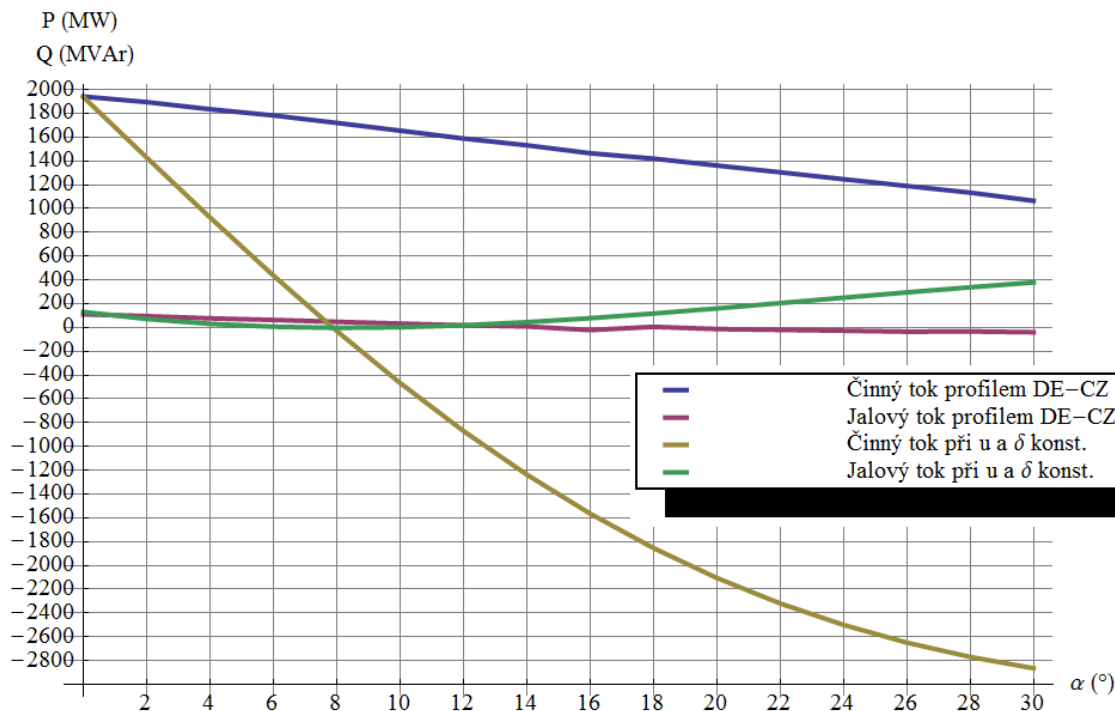
V následujících kapitolách jsem provedl simulaci těchto PST ve dvou provedeních -se symetrickou (PAR) a nesymetrickou (QB) regulací - při vysokém zatížení soustavy s PST v Polsku bez a s odpojeným vedením Hradec-Chrást. Grafy jsem vytvořil interpolací hodnot získaných ze simulace.

8.5.1 Zařazení transformátorů se symetrickou regulací do rozvodny Hradec Východ

Transformátor se symetrickou regulací je první ze dvou možných instalací PST v rozvodně Hradec-Východ. Jeho výhodou by měl být menší vliv na jalové toky proti QB transformátoru.

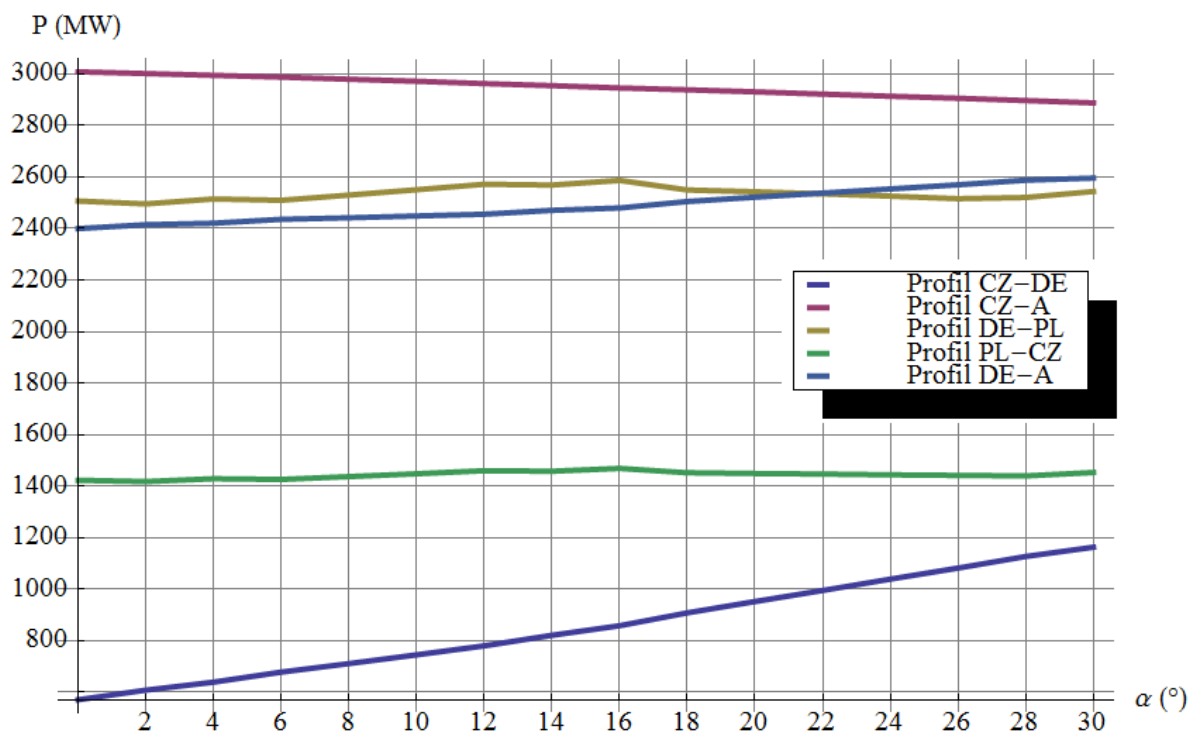
První graf ukazuje vliv regulačního úhlu α na toky činného i jalového výkonu na profilu Röhrsdorf(DE)-Hradec(CZ), tedy na vedeních 445 a 446. Pro srovnání jsem přidal i teoretické průběhy podle vztahů 3.10, 3.11, 3.12 a 3.13, které se často objevují v literatuře [14, str. 6].

Srovnání skutečných a teoretických průběhů ukazují především u činných výkonů velký rozdíl. Zatímco teorie předpokládá neměnné velikosti a úhly napětí v počátečním a koncovém uzlu, ve skutečnosti se tyto veličiny podstatně mění (alespoň v případě, pokud nejsou jinak regulovány), což ukazuje obr. 51. V simulaci dokázaly PST snížit činné toky na vedeních 445 a 446 až na 1065 MW (tedy cca 532,5 MW na jeden PST) z počátečních 1942 MW. Tím kleslo i zatížení důležitých vedení - vedení 420 (Hradec-Mírovka) z 86% na 68% a vedení 430 (Hradec-Chrást) z 83% na 36%. V praxi by bylo nutné počítat s omezením regulace PST pod zátěží. Úhel β (viz obr. 7) je pro vyšší regulační úhly něco málo přes 6° - pro $\alpha = 24^\circ$ je $\beta 6, 34^\circ$, takže by regulační úhel neměl přesáhnout 24° , aby nedošlo k přetížení transformátoru.



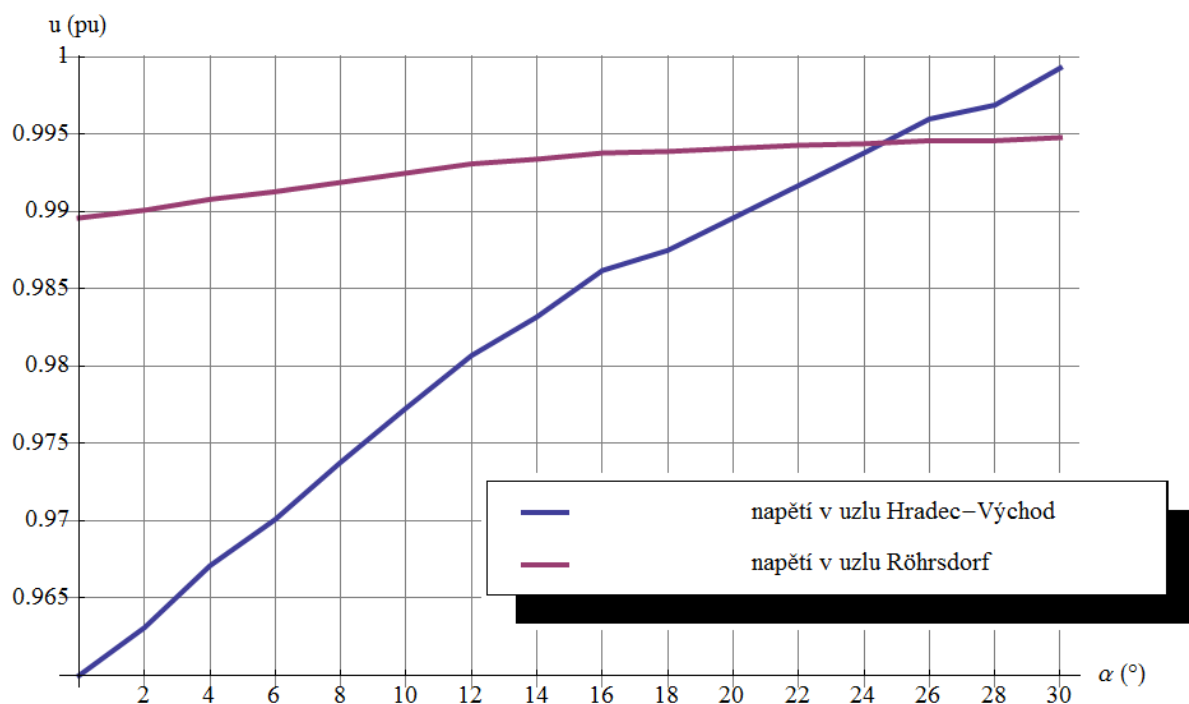
Obr. 54 - Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem

Obr. 55 ukazuje vliv regulačního úhlu α transformátorů v Hradci na výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech. Toky ve směru Německo-Polsko jsou omezeny polskými PST na zhruba 2500 MW. Díky tomu zůstává i tok Polsko-Česko víceméně konstantní. Část výkonů, která nemůže téct přes Hradec-Röhrsdorf, "přeteče" na JZ spojení Česka s Německem, takže ve výsledku se toky Česko-Rakousko a tedy i celkové toky přes českou přenosovou soustavu sníží jen velmi málo. V praxi by se k dalšímu odlehčení české soustavy využil např. redispečink. S "blokovanou" cestou přes Polsko a omezenou přes Česko se tak toky zvýší na profilu Německo-Rakousko.

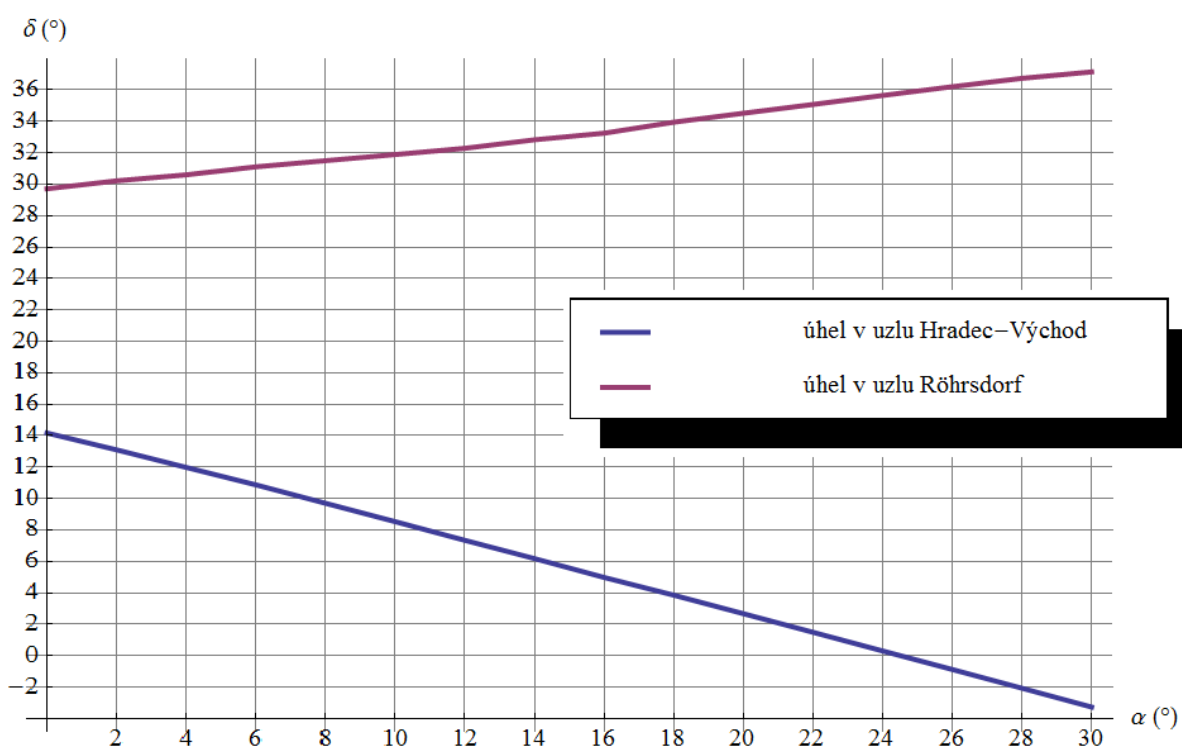


Obr. 55 - Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech

Další obrázky ukazují změny velikostí a úhlů napětí v rozvodnách Hradec-Východ a Röhrsdorf. Napětí, především v Hradci, se zvyšováním úhlu α roste a mezi napěťovými úhly se rozevírají "nůžky". Ke změnám těchto veličin dochází vlivem změn výkonových toků díky regulaci PST. Rozdíl obou úhlů je vždy dán součtem regulačního úhlu α a úhlu β , který je dán úbytkem napětí na impedanci PST.



Obr. 56 - Vliv regulačního úhlu PAR α na velikost napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

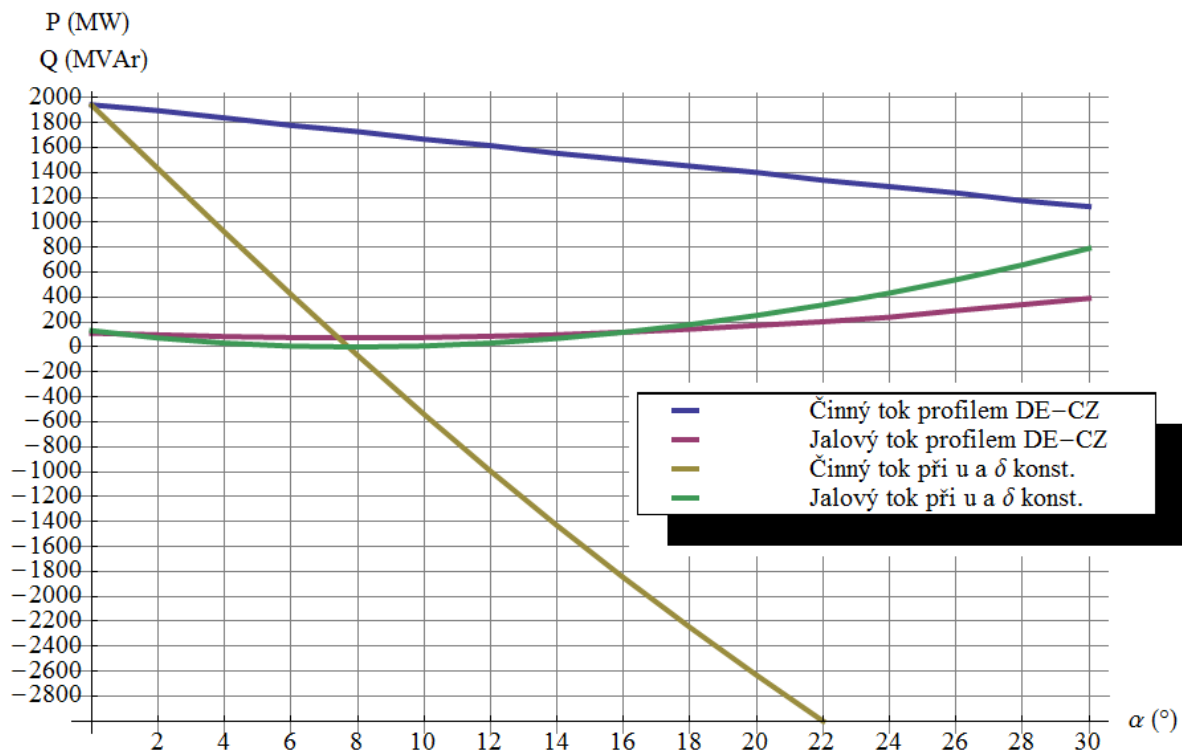


Obr. 57 - Vliv regulačního úhlu PAR α na úhel napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

8.5.2 Zařazení transformátorů s nesymetrickou regulací do rozvodny Hradec Východ

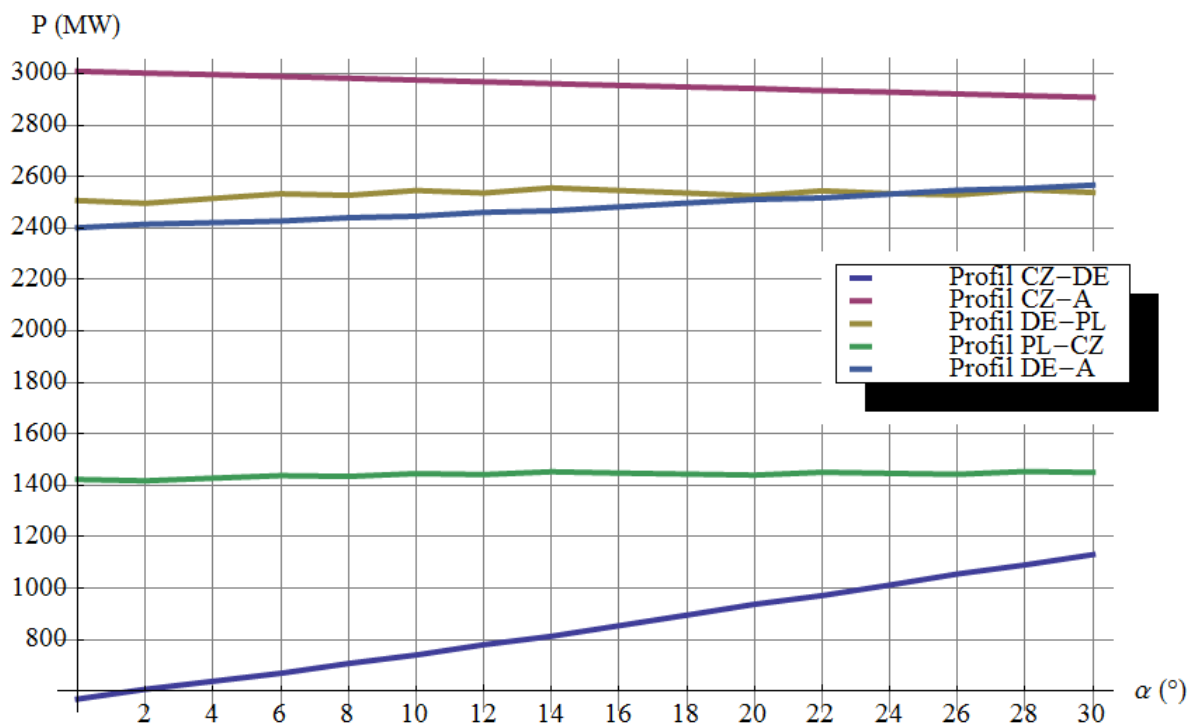
Transformátor s nesymetrickou regulací je další možností v rozvodně Hradec-Východ. Má větší vliv na jalový výkon, zato by ale měl výrazněji ovlivňovat i výkon činný.

Následující obrázek ukazuje výkonové toky profilem Röhrsdorf-Hradec (vedení 445 a 446). Činný tok zjištěný ze simulace se velmi podobá činnému výkonu při použití PAR transformátoru, rozdíl je jen 61 MW a to ve prospěch PAR. Naopak u jalových výkonů se potvrdil velký rozdíl, pro $\alpha = 30^\circ$ je rozdíl 430 MVar. Rozdíl mezi simulovanými a teoretickými výkony rychle roste se zvyšováním α . Stejně jako s PAR transformátorem bude i QB ovlivňováním výkonových toků v soustavě měnit i fázy napětí v uzlech Hradec a Röhrsdorf.



Obr. 58 - Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem

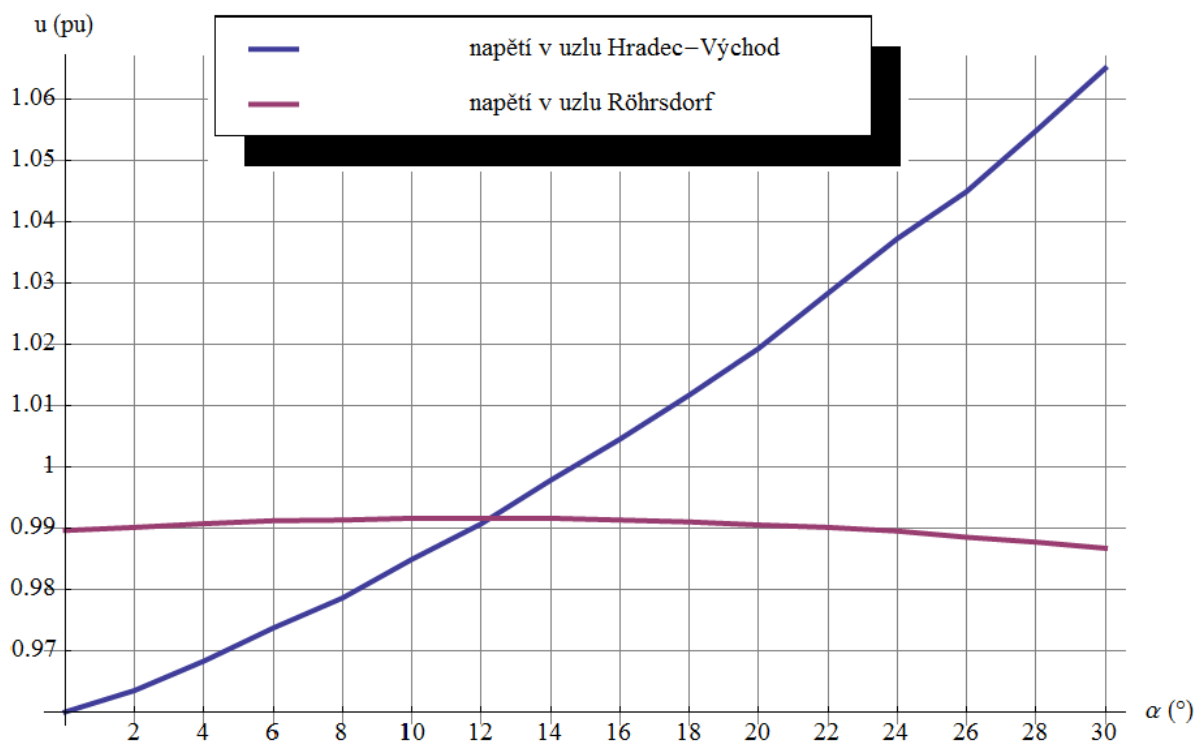
Díky větším jalovým tokům vzrostlo proti regulaci s PAR zatížení důležitých vedení směrem na Rakousko. Při regulačním úhlu $\alpha = 30^\circ$ je zatížení vedení 420 72% (na počátku bylo 83%) a u vedení 430 36% (z původních 86%). Ve skutečnosti by bylo nutné stejně jako v případě PAR transformátoru zohlednit regulaci pod zatížením reprezentovanou úhlem β , který je pro celý rozsah regulace mezi 5° a 8° . Pro vysoké regulační úhly, např. $\alpha = 24^\circ$ je $\beta = 5,9^\circ$, takže zvyšování regulačního úhlu nad 24° by vedlo k přetížení PST.



Obr. 59 - Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech

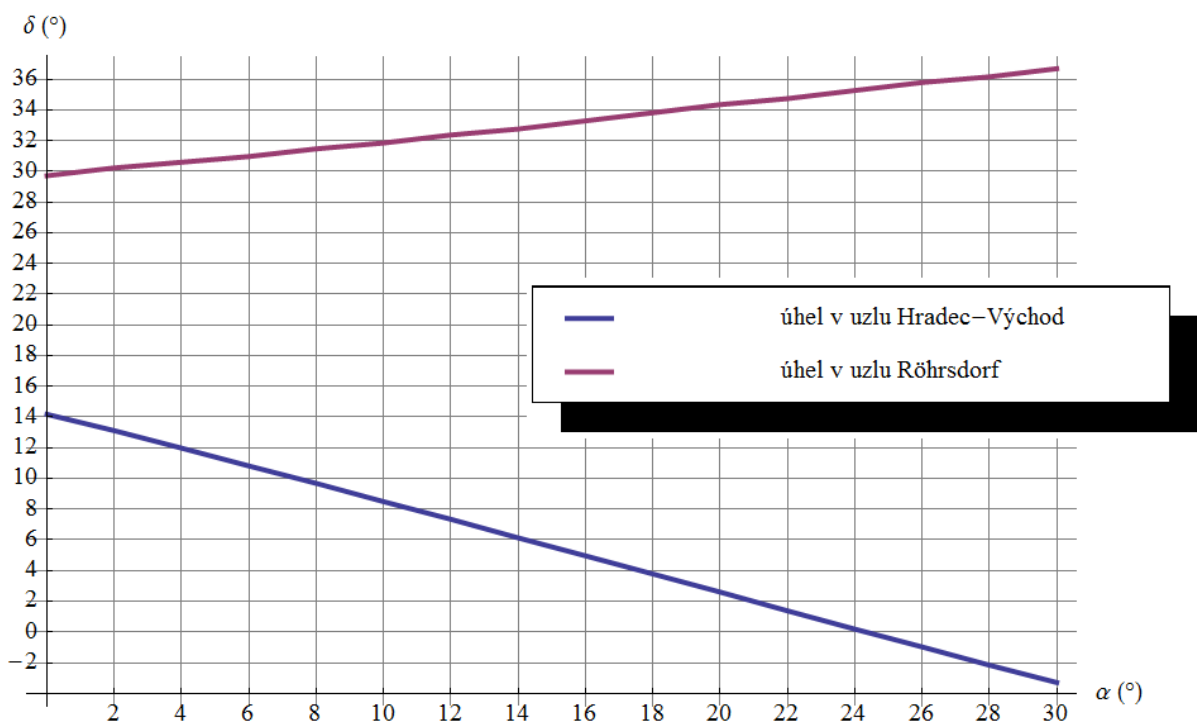
Ve srovnání s toky ovlivněnými PAR transformátorem jsou u QB patrné větší toky přes Česko (i když jen o několik desítek MW pro nejvyšší α) a s tím se opět o sníží toky přes jiné přeshraniční vedení. Určitý vliv má i regulace toků na Polsko-německém profilu, kde činný výkon kolísá okolo 2500 MW, ale ne stejně jako v simulaci s PAR.

Obrázky 60 a 61 opět ukazují změny velikostí a úhlů napětí v rozvodnách Hradec-Východ a Röhrsdorf. Zatímco napětí v uzlu Röhrsdorf se mění jen málo, u napětí v uzlu Hradec-Východ je znát vliv principu regulace QB transformátoru, takže napětí roste až k 1,07 pu, což je rozdíl zhruba 7 setin pro $\alpha = 30^\circ$ oproti regulaci s PAR.



Obr. 60 - Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

Oba úhly se mění prakticky stejně jako s PAR transformátorem.



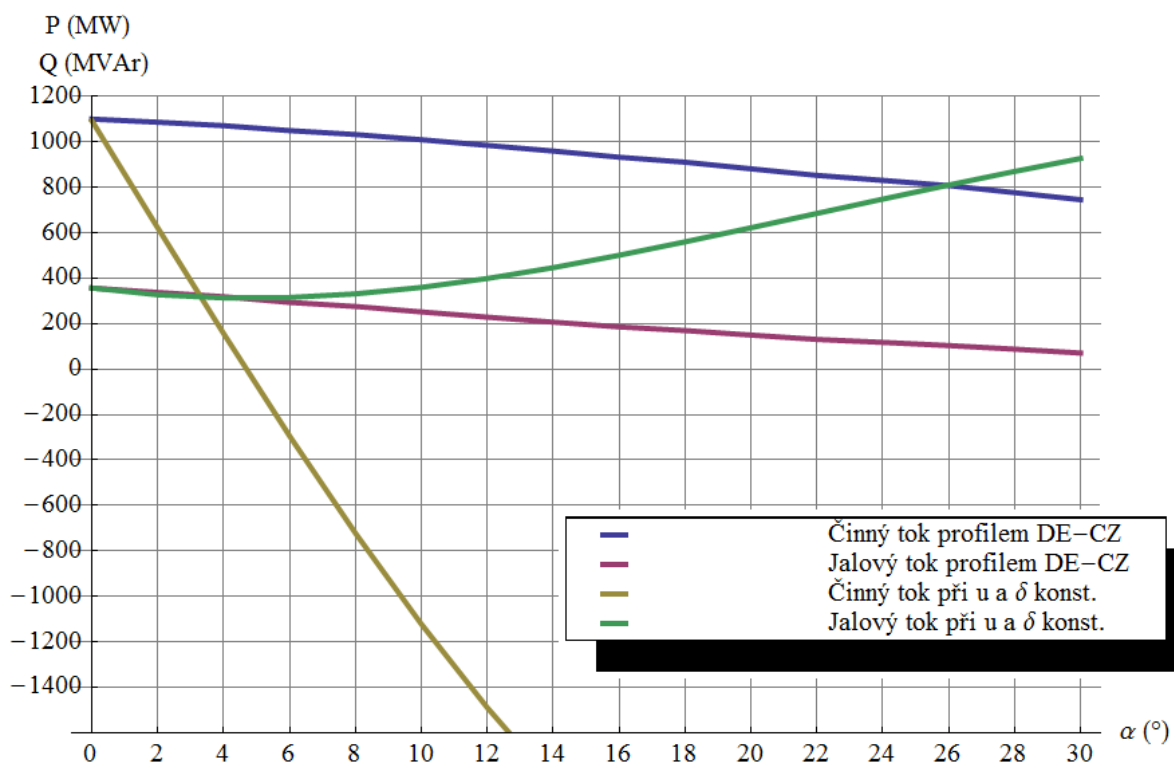
Obr. 61 - Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

8.5.3 Transformátory se symetrickou regulací při výpadku vedení 430

Tato kapitola ukazuje výsledky simulace ustáleného stavu přenosové soustavy ve střední Evropě při výpadku vedení č. 430 Hradec Východ-Chrást a instalaci dvou PST typu PAR v rozvodně Hradec Východ. Výpadek způsobí zvýšení celkové impedance přenosové soustavy Česka, přesto ale dojde k přetížení vedení 420 z Hradce do Mírovky. Úkolem PAR transformátoru je toto přetížení omezit.

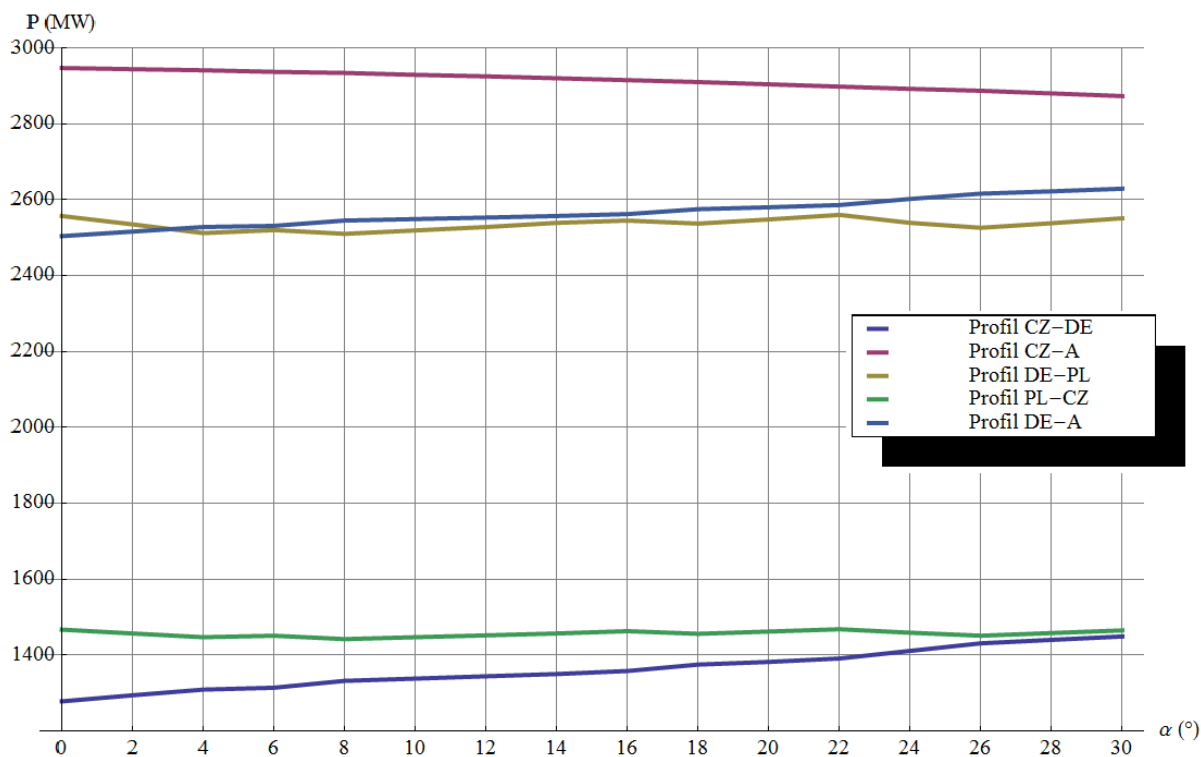
Na obrázku 62 vidíme simulovanou i teoretickou změnu výkonových toků na profilu Röhrsdorf-Hradec. Velmi výhodné je, že nedochází jen ke snižování přenášeného činného, ale i jalového výkonu. Úhel β mezi 4,3 až 4,4 ° pro nejvyšší regulační úhly opět způsobí omezení nejvyššího úhlu α na 24 popř. 26 °. Při tak vysokém α poklesne zatížení vedení 420 z původních 120% na konečných 85 % a nedochází ani k přetěžování žádného dalšího vedení.

Rozsah hodnot na svislé ose jsem omezil tak, aby mohly vyniknout simulované průběhy.



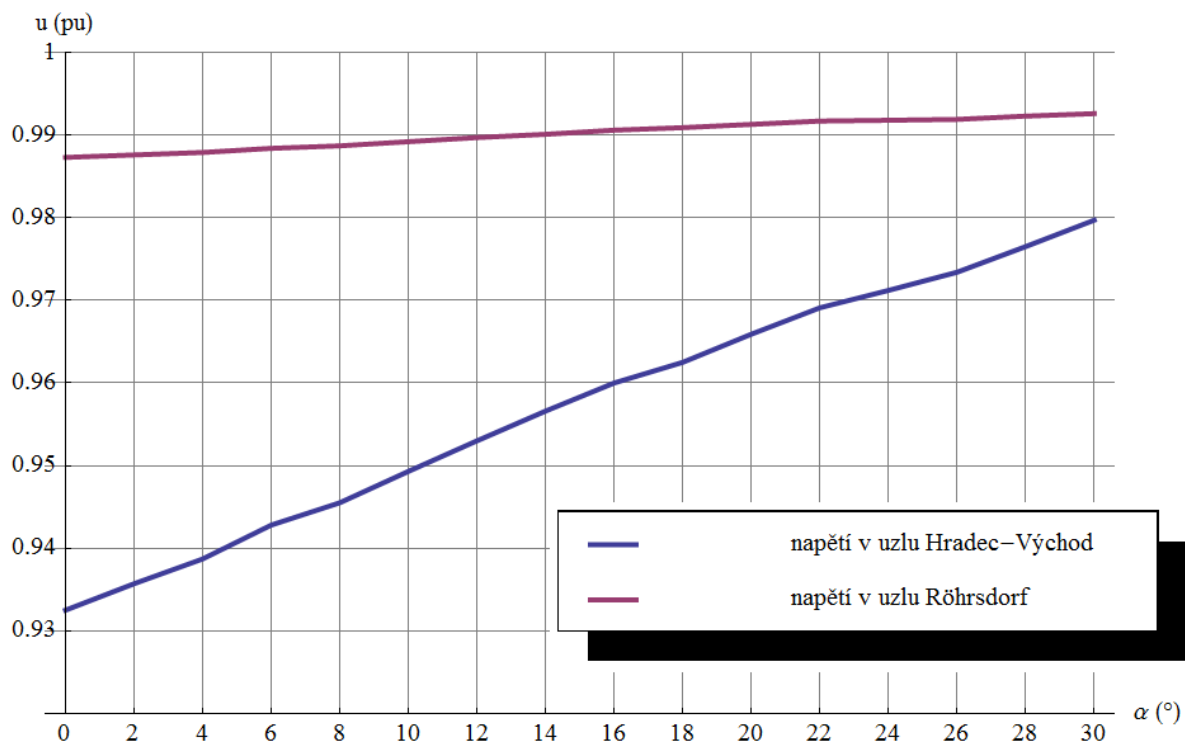
Obr. 62 - Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem

Toky na ostatních mezinárodních vedeních se chovají podobně, jako v předcházejících případech. Výkon přenášený z Česka do Rakouska díky "uzavírání" koridoru Röhrsdorf-Hradec s rostoucím α pomalu klesá, zato toky z Německa do Česka přes Etzenricht (opět v absolutní hodnotě) a z Německa do Rakouska pomalu rostou.

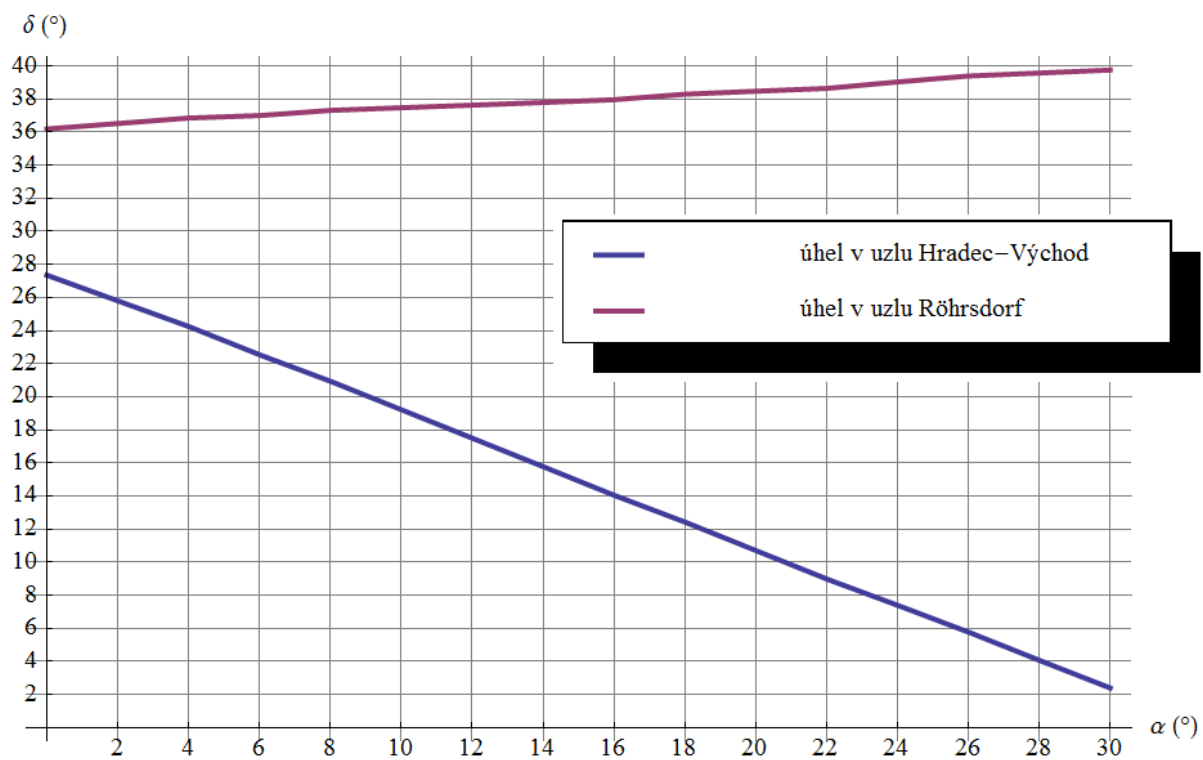


Obr. 63 - Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech

Napětí i úhly v rozvodnách Hradec Východ a Röhrsdorf mají přirozeně podobné průběhy jako ty pro PAR s vedením 430 v provozu. Rozdíl ve velikostech je dán jen rozdílnými výkonovými toky v obou případech.



Obr. 64 - Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf



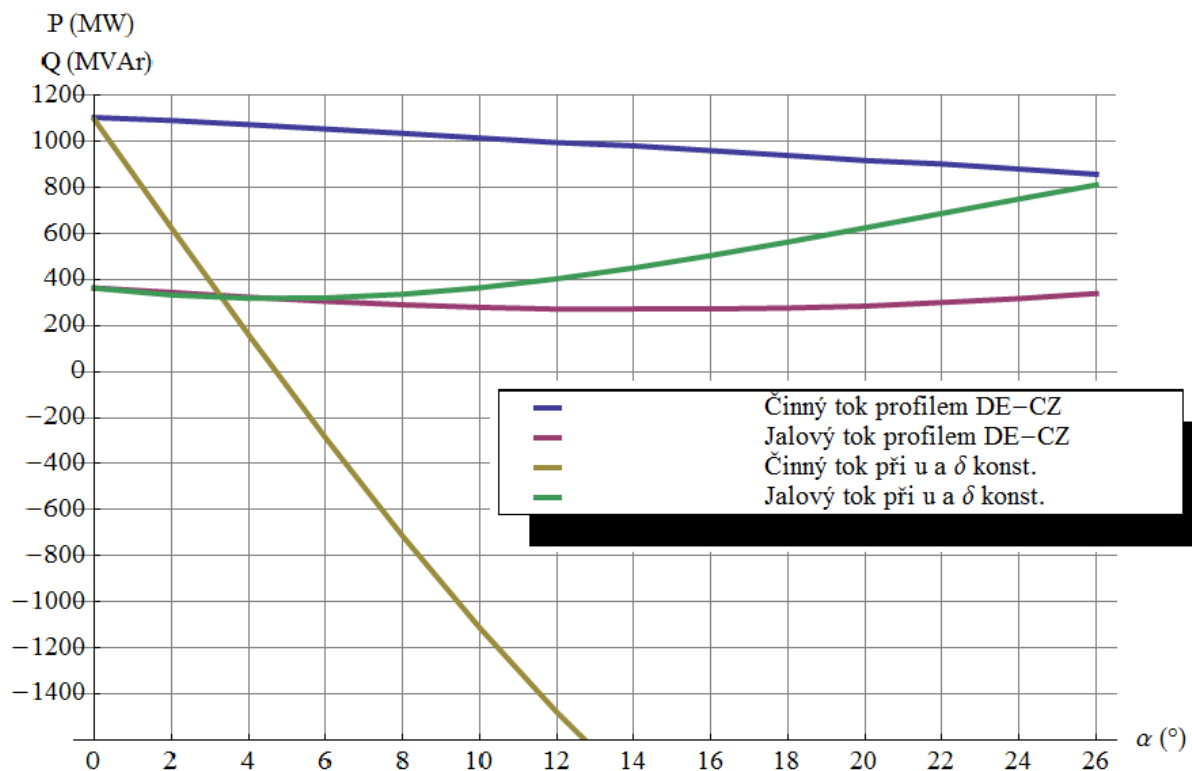
Obr. 65 - Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

8.5.4 Transformátor s nesymetrickou regulací při výpadku vedení 430

Poslední simulací je vliv umístění QB transformátorů do rozvodny Hradec na výkonové toky při výpadku vedení 430. Zajímavé je hlavně srovnání s předcházející simulací, kdy byly ve stejné situaci testovány PAR transformátory. Simulace přestala konvergovat pro regulační úhly α nad 26° , ale vzhledem k tomu, že pro tento úhel je $\beta 4^\circ$, tak by regulace nad 26° ve skutečnosti nebyla vhodná.

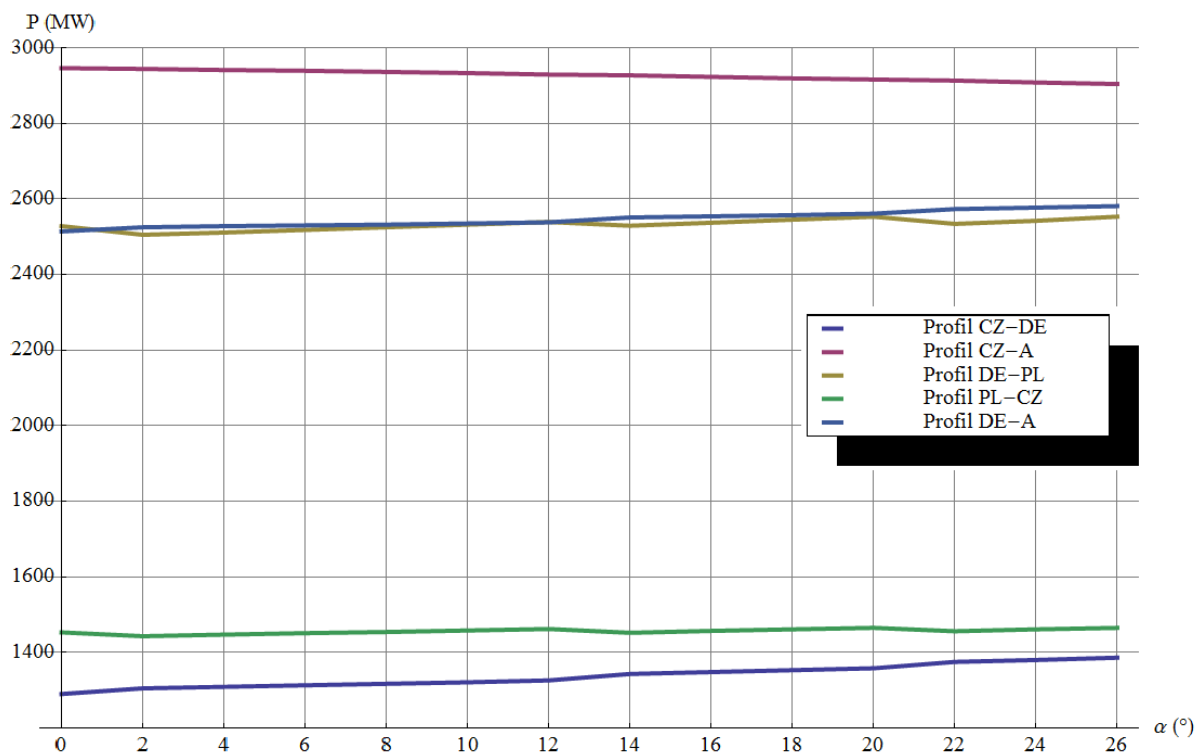
Na obrázku 66 vidíme, že QB nedokázal snížit činný výkon na úroveň PAR (rozdíl 50 MW při $\alpha = 26^\circ$) a jalový výkon je proti regulaci s PAR také vyšší (rozdíl 236 MVar při $\alpha = 26^\circ$). Z původních 120 % se zatížení vedení 420 snížilo na 90 %, což je stále o 5 % více než při regulaci s PAR transformátory.

Stejně jako v předcházející kapitole jsem musel omezit svislou osu grafu tak, aby byly dobře viditelné simulované průběhy.



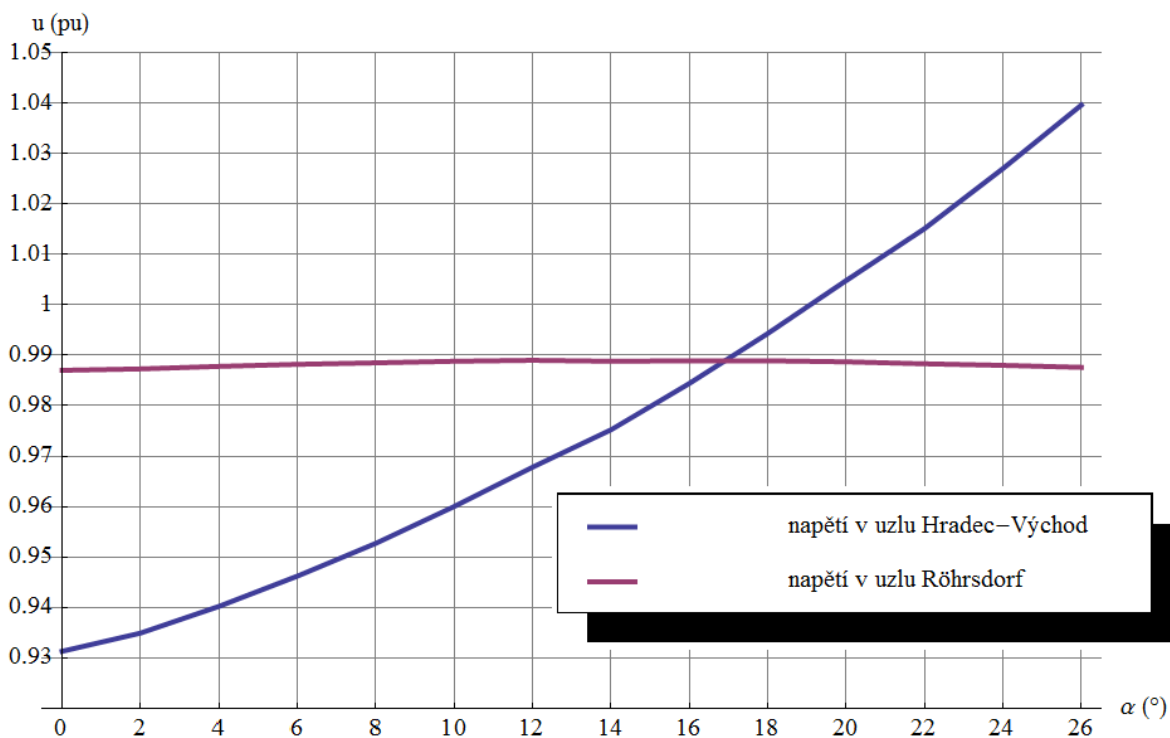
Obr. 66 - Výkonové toky mezi Hradcem a Röhrsdorfem

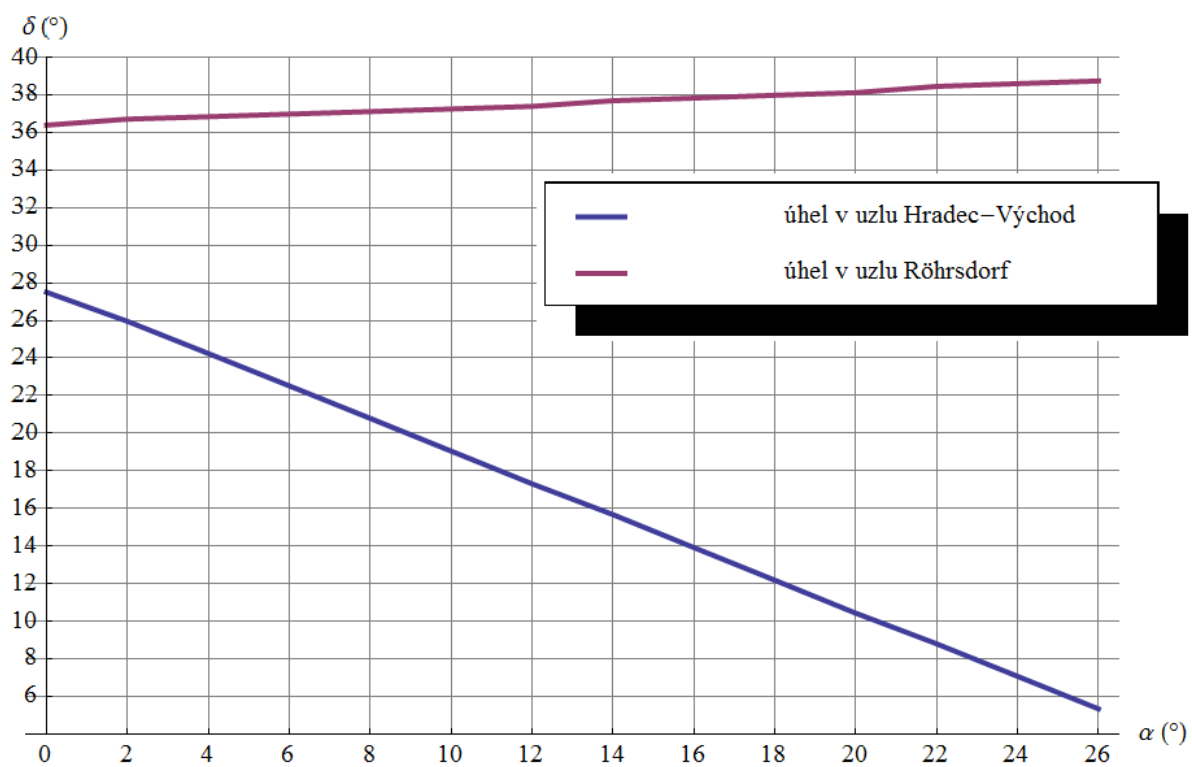
Pro toky na zbývajících mezistátních profilech platí stejné závěry jako u situace s QB bez výpadku vedení 430. Vlivem menší regulace výkonů přes Hradec-Röhrsdorf bude na česko-rakouském profilu větší přenášený výkon a tím bude i menší část činného výkonu na profilu Německo-Rakousko.



Obr. 67 - Výkonové toky na ostatních mezinárodních profilech

Vliv regulace s QB transformátory se proti PAR opět liší výrazným růstem napětí v uzlu Hradec Východ až na 1,04 pu při $\alpha = 26^\circ$, zatímco velikost napětí v Röhrsdorfu zůstává přibližně konstantní. Graf napěťových úhlů se velmi podobá tomu s PAR transformátory.


 Obr. 68 - Vliv regulačního úhlu QB α na velikost napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf



Obr. 69 - Vliv regulačního úhlu QB α na úhel napětí v rozvodnách Hradec a Röhrsdorf

Kapitola 9

Závěr

Diplomovou práci jsem rozdělil do několika kapitol, které řeší problematiku transformátorů s regulací fáze od teoretických základů až po jejich simulaci v elektrické soustavě.

Začal jsem popisem dvou základních typů PST - se symetrickou (PAR) a nesymetrickou (QB) regulací, jejich předpokládaným vlivem na výkonové toky a další veličiny, konstrukčním provedením a možnostmi využití. Koncept výkonových transformátorů s regulací fáze je znám už desítky let a na světě je jich postaveno a úspěšně využíváno velké množství, proto jsem uvedl několik případů PST z jiných zemí. Jejich využití bývá obvykle velmi podobné - PST umístěné na jedno z paralelních vedení vhodně rozloží výkonové toky, což vede k rovnoměrnějšímu zatížení, snížení ztrát a zvýšení celkové přenosové kapacity. Stejně dobře se PST používají i pro regulaci toků na mezistátních vedeních, čímž jsem se zabýval dále.

Abych byl schopen prověřit schopnosti PST regulovat výkonové toky na přeshraničních vedeních, musel jsem nejprve vhodně upravit data přenosových sítí a především sestavit výpočetní program. Program počítá výkonové toky a uzlové veličiny pomocí Newton-Raphsonovy metody, která je přesná a k nalezení řešení obvykle nepotřebuje velký počet iterací. Zdrojový kód programu je napsaný v prostřední MathWorks Matlab, které se pro matematické a inženýrské výpočty používá velmi často.

V poslední části diplomové práce jsem se zaměřil na simulaci ustálených výkonových toků v propojených přenosových soustavách střední Evropy a posouzení vlivu PST transformátorů na jejich chod. Postupně jsem provedl simulaci několika situací, ve kterých se střeoevropská soustava nachází. Nejdříve byla soustava zatížena jen málo, to se ale změnilo, když jsem simuloval kombinaci zvýšení výkonu dodávaného ze severoněmeckých větrných elektráren a zároveň zvýšeného odběru elektrické energie v nesoběstačném Rakousku a v jihovýchodní Evropě. V tomto případě se zatížení některých vedení v české soustavě zvýšilo na více než 80% a při instalaci PST do polských rozvodů Krajník a Mikulowa dosahuje zatížení až k 95 %. V případě výpadku důležitého prvku soustavy by při tak vysokém zatížení mohlo dojít ke kaskádovitému pádu soustavy. Před takovým výpadkem se můžeme ochránit instalací vlastních PST. Proto jsem provedl simulaci umístění obou typů PST do rozvodny Hradec. S těmito transformátory byly testovány dvě situace - vysoké zatížení soustavy s PST v Polsku a ten stejný případ s výpadkem vedení 430 Hradec-Chrást. V obou případech se projevila schopnost PAR i QB transformátorů výrazně měnit výkonové toky a pomoci tak odlehčit přenosovou síť. Výhodnější variantou se ukázal typ PAR, protože dokázal více omezit činný i jalový výkon na vedení 445 a 446 Hradec-Röhrsdorf. Při výpadku vedení 430 se mu podařilo snížit zatížení vedení 420 Hradec-Mírovka o 35%, takže už nedocházelo k jeho přetěžování. QB transformátor omezoval činný výkon podobně, ale díky velké změně amplitudy napětí v uzlu Hradec došlo k nežádoucímu navýšení jalových výkonů, který by v praxi bylo nutné dále kompenzovat.

Celkově se tedy transformátory s regulací fáze ukázaly být vhodným řešením pro omezení neplánovaných výkonových toků, které v dnešní době zatěžují přenosové soustavy mnoha evropských zemí.

Použitá literatura

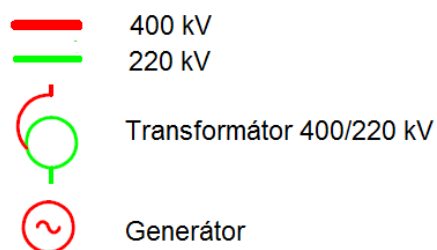
- [1] Acha, E., a kol.: Power Electronic Control in Electrical Systems, Oxford, Newness Press, 2002
- [2] Tlustý, J., a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, Praha, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04940-2
- [3] Winders, J.: Power transformers, New York USA, CRC Press, 2002, ISBN 0-8247-0766-4
- [4] Verboomen, J., a kol.: Phase Shifting Transformers: Principles and Applications, TU Delft, KU Leuven
- [5] Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A.: Transformer Engineering Design, Technology and Diagnostics, USA, CRC Press, 2013, ISBN 978-1-4398-5377-1
- [6] Transformátory s řízeným posuvem fáze do roku 2016, Technický týdeník(online), z: < <http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/transformatory-s-rizenym-posuvem-faze-do-roku-201627203.html> >
- [7] Phase Shift Transformers Modelling, ENTSO-E, 28. květen 2014
- [8] Lopes, L.A.C., Joos, G.: A PWM Quadrature Booster Phase-Shifter for FACTS, Montreal, Canada, říjen 1996
- [9] Ptáček, J.: Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách, Brno, FEKT VUT, 2004
- [10] Acha, E.: A Newton Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks, University of Glasgow, Skotsko UK, listopad 1997
- [11] Agreement between Polish (PSE) and German (50Hertz) transmission system operators on phase shifting transformers, PSE/50Hertz, Varšava/Berlín, březen 2014
- [12] Pokluda, M.: Phase Shifting Transformers, ČEPS, a.s., Harrachov, září 2013
- [13] Věstník veřejných zakázek, Ministerstvo pro místní rozvoj ČR, z: < <http://www.vestnikverejnychzakazek.cz/en/Form/Display/499235> >
- [14] Harlow, J.H.: Electric power transformer engineering, USA, CRC Press, 2012, ISBN 978-1-4398-5629-1
- [15] European Wind Integration Study, ENTSO-E Premises, Brusel, 2010
- [16] Andersson, G.: Modelling and Analysis of Electric Power Systems, ETH Zürich, březen 2004
- [17] Singh, L.P.: Advanced Power System Analysis and Dynamics, New Age International Limited, Delhi, 2006, ISBN 81-224-1732-9
- [18] Germany's Energy Transition Experiment, POWER (online), z: < <http://www.powermag.com/germanys-energy-transition-experiment/?pagenum=2> >
- [19] Position of ČEPS, MAVIR, PSE Operator and SEPS regarding the issue of bidding zones definition, březen 2012
- [20] Innovative Phase-Angle Control Helps AEP Optimize Power Flow on Transmission Grid, AEP, Texas USA

- [21] Successful connection of the Divača Phase Shifting Transformer into the 400kV Transmission Network, IBE, leden 2011,
z: < <https://www.ibe.si/en/news/Pages/Novica35.aspx> >
- [22] Taisne, J.P., a kol.: Les missions du Gestionnaire du Réseau de transport: intérêt pour de nouveaux matériels, RTE / Centre National d'Expertise du Réseau
- [23] Iuliani, V., a kol.: New Phase Shifting Transformers in the Italian transmission network, CIGRE, Paříž, 2014
- [24] Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2014 - 2023, ČEPS, a.s., listopad 2013
- [25] Manhangwe, G., a kol.: The Design, Manufacture and Operation of a 33kV Quadrature Booster, UK Power Networks, UK
- [26] Postupný vývoj přenosové soustavy ČEPS, EGÚ Brno, září 2013
- [27] Blank Digital Map of Europe (online),
z: < <http://www.youreuropemap.com/index.html> >
- [28] Pangonilo, V.: MVA Method for 3-Winding Transformer, PEE RPEQ, duben 2011
- [29] Scott, B., Alsac, O.: Fast Decoupled Load Flow, Power Systems Laboratory, Manchester, UK
- [30] Glavic, M., Alvarado, F.L.: An extension of Newton–Raphson power flow problem, University of Liege, University of Wisconsin-Madison
- [31] Výukové materiály k předmětu Přenos a rozvod elektrické energie od Ing. Jana Švece, Ph.D.(online), FEL ČVUT,
z: < <http://www.powerwiki.cz/wiki/PRE> >
- [32] Výukové materiály k předmětu Řízení elektroenergetických soustav od Ing. Jana Špetlíka, Ph.D.(online), FEL ČVUT,
z: < <https://www.powerwiki.cz/wiki/RES> >
- [33] Schémy siete(online), SEPS,
z: < <http://www.sepsas.sk/seps/SchemaSiete.asp?kod=17> >

Příloha A

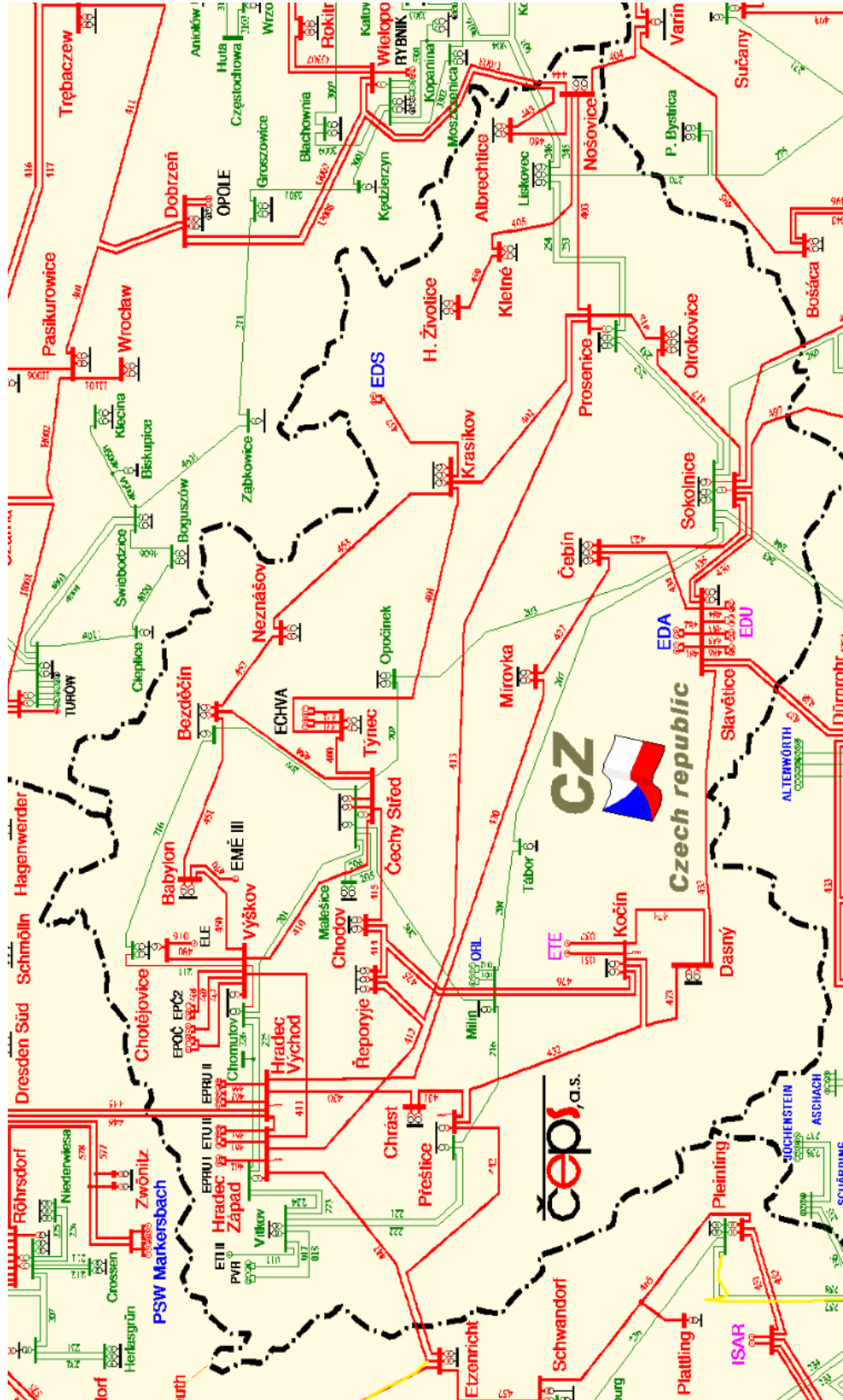
Schémata přenosových sítí použitých v simulaci

Legenda

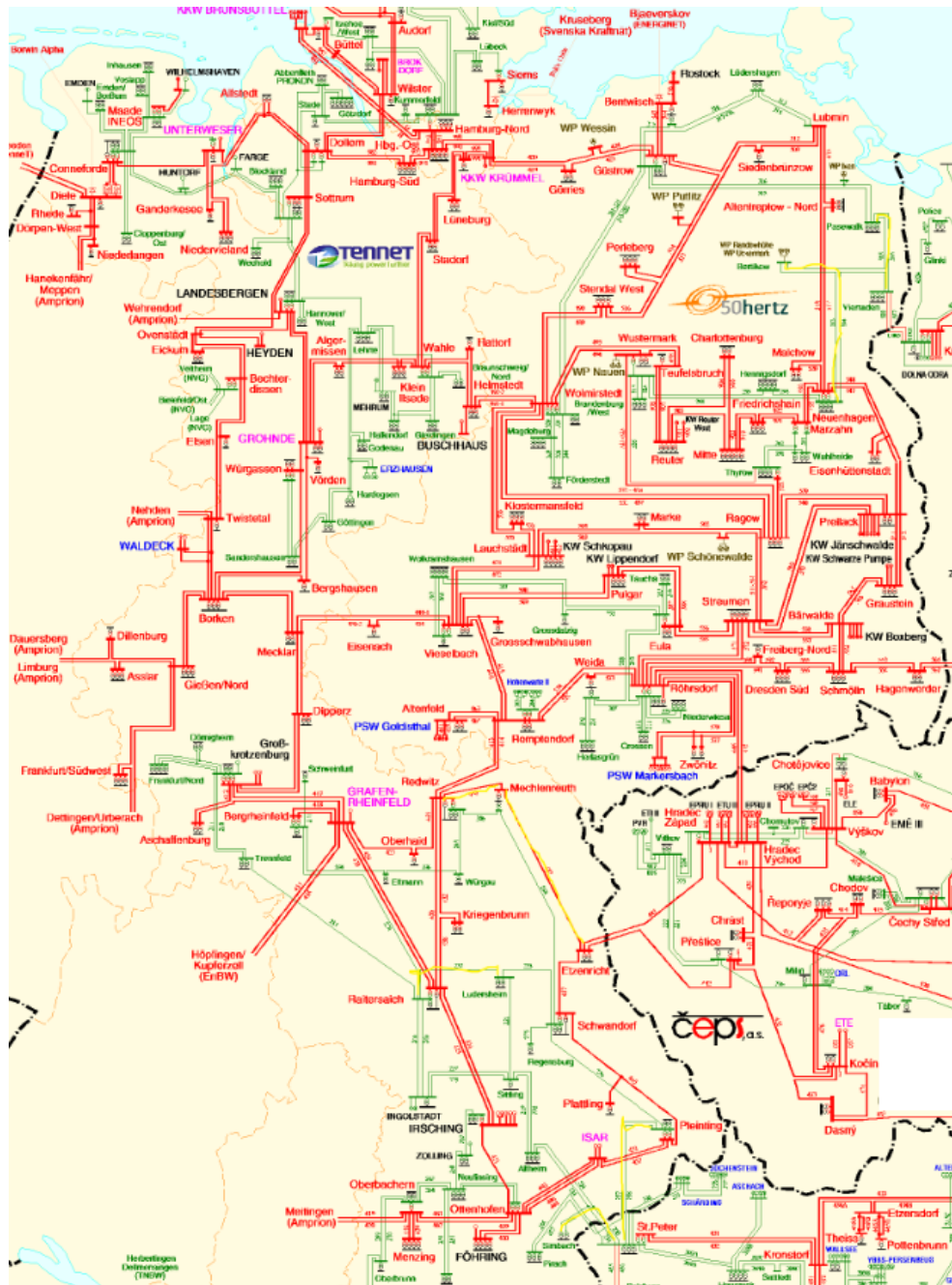


Schémata přenosových sítí České republiky a Německa (50Hertz a TenneT) jsem převzal ze stránek slovenského TSO SEPS.[33]

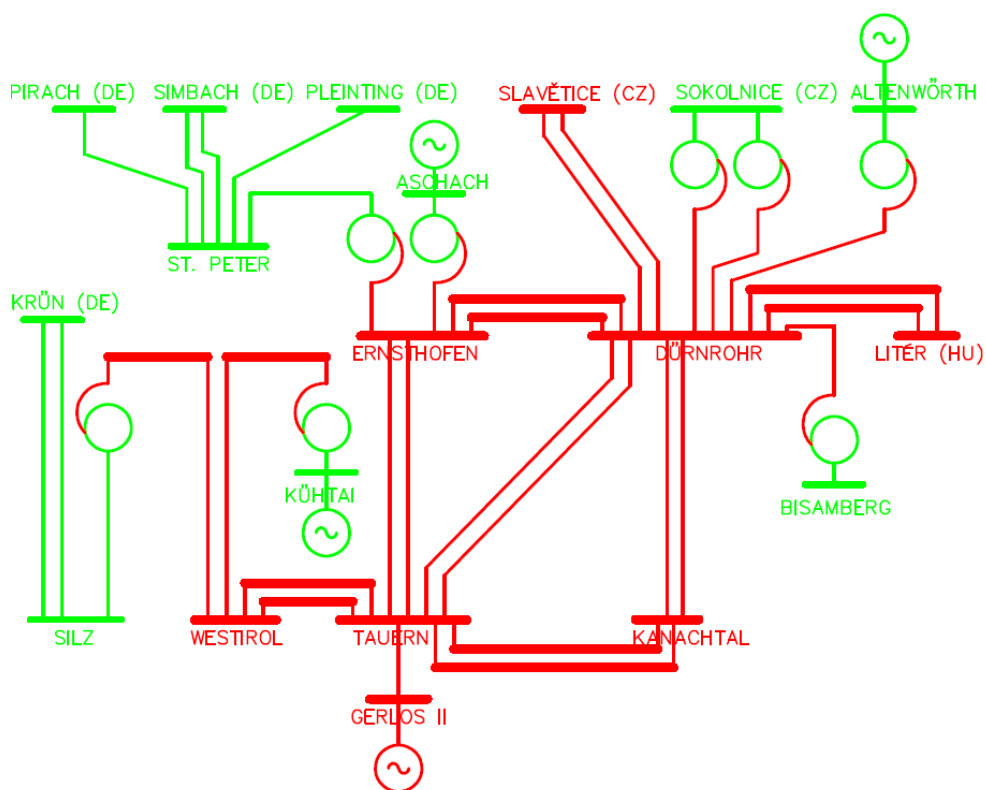
A.1 Přenosová soustava ČR



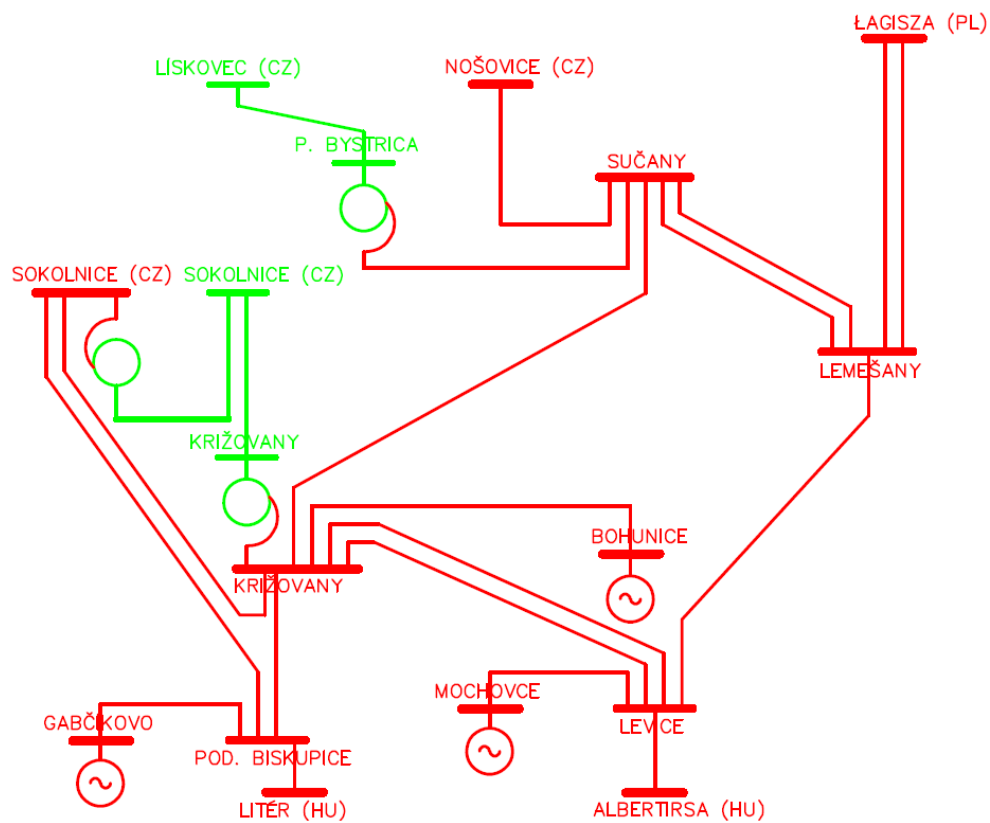
A.2 Přenosová soustava 50Hertz a TenneT



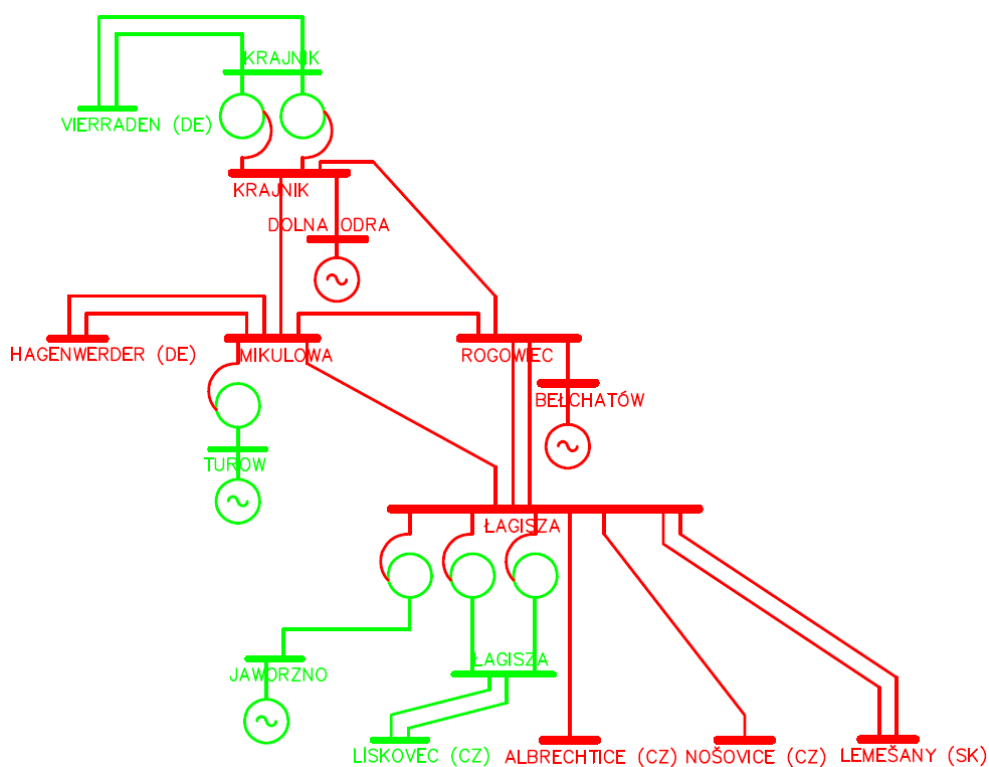
A.3 Upravená přenosová soustava Rakouska



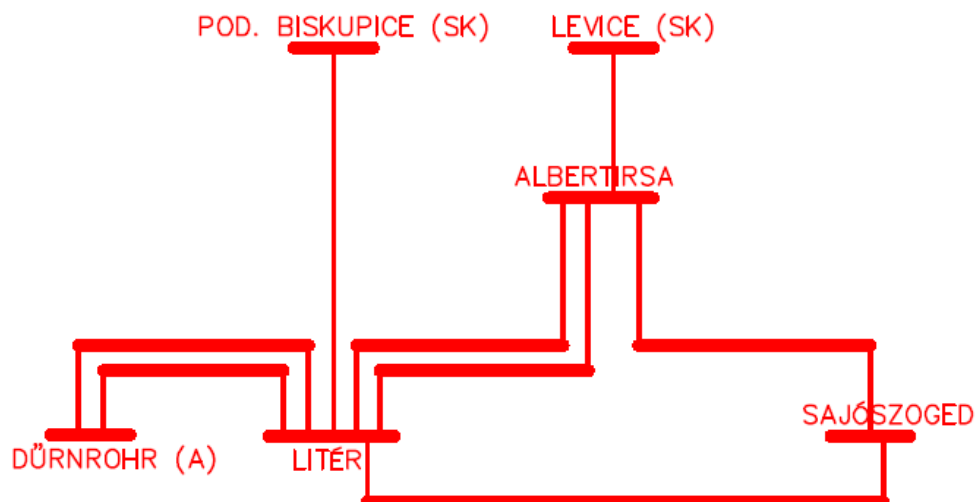
A.4 Upravená přenosová soustava Slovenska



A.5 Upravená přenosová soustava Polska



A.6 Upravená přenosová soustava Maďarska



Příloha B

Obsah přiloženého CD

Diplomová práce ve formátu PDF

Zdrojový kód diplomové práce v prostředí LaTeX

Zdrojový kód programu pro výpočet výkonových toků

Newton.m

Data.m

Pocodhady.m

Matice.m

Vykony.m

Jakobi.m

Noveodhady.m

Vystupy.m