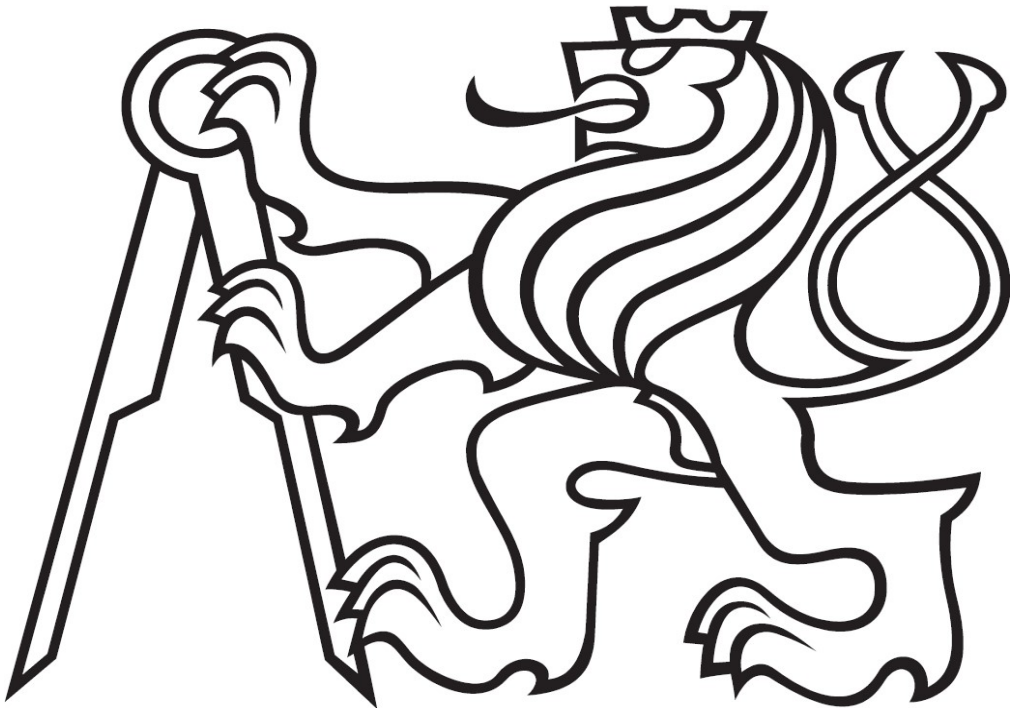
# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

## Fakulta elektrotechnická



# Bakalářská práce

2018

Ondřej Hladík

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektroenergetiky**


# Modelování PST transformátoru


**Květen 2018** **Bakalant: Ondřej Hladík**

**Vedoucí práce: Ing. Ladislav Musil, Ph.D.**

## Čestné 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.

Datum: …….. Podpis bakalanta: ……..

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hladík** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457213**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Modelování PST transformátoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Simulation of PST Transformers**

Pokyny pro vypracování:

1) Seznamte se základy technologie a teorie modelování přenosových transformátorů
2) Seznamte se základy technologie PST
3) Seznamte se s technologií a modelováním přenosové soustava v ČR a Evropě
4) Ve vybraném simulačním programu navrhněte model PST, s jehož pomocí by bylo možné studovat vliv PST na přenosovou síť.

Seznam doporučené literatury:

[1] Doc. Ing. Petr Voženílek a kol.: "ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE", 2015, ČVUT, Praha, ISBN 978-80-01-04875-7
[2] Tlustý, J., a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, Praha, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04940-2
[3] Ing. René Honiš a kol.: PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY, ISBN 978-80-905392-3-5
[4] James H. Harlow: Electric power transformer engineering, USA, 2004, CRC PRESS, ISBN 0-8493-1704-5,
[5] Phase Shift Transformers Modelling, ENTO-E, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Ladislav Musil, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

| Ing. Ladislav Musil, Ph.D.<br>podpis vedoucí(ho) práce | podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.<br>podpis děkana(ky) |
|---|---|---|

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. Datum převzetí zadání

Podpis studenta



© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

## Poděkování:

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Musilovi, Ph. D. za jeho odbornou pomoc při práci. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za vytvoření výborných podmínek pro studium a za jejich podporu jak při studiích, tak při psaní této práce.

## Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá PST transformátory a jejich modelováním. První část popisuje obecně teorii transformátorů. Další část zařazuje PST transformátory mezi prvky FACTS a věnuje se jednotlivým druhům. Dále jsou popsány samotné PST transformátory, jejich funkce, druhy a praktická využití v Evropě a ve světě. Ve zkratce je popsána česká a evropská přenosová soustava a příčiny a důsledky instalace PST v Hradci. Samotné modelování transformátorů je provedeno v programu MATLAB Simulink. Postupně je popsán model přenosového a tří PST transformátorů. Výsledkem práce jsou poznatky vyplývající z modelů a přiložené simulace.



## Klíčová slova:

PST, fázový posun, model, simulace transformátoru, MATLAB, Simulink



## Abstract:

This bachelor thesis deals with phase-shifting transformers and the simulation of them. The first part describes the theory of transformers in general. The second part places the PST transformers FACTS elements and deals with particular types. Furthermore, the PST transformers description includes their functions, types and practical applications in Europe and the world. There is a brief description of the Czech and European transmission system, the causes and consequences of the PST installation in Hradec, Czech Republic.

The special transformer modeling itself is done in the MATLAB Simulink program.

Simulation of three different PST's and the model of transmission transformer are gradually described. The result of this bachelor thesis are the findings ensuing from the models and the attached simulations.



## Key words:

Phase-shifting transformer, simulation, transformer, MATLAB, Simulink

# Obsah

**OBSAH** ..... **1**

**1. ÚVOD** ..... **3**

**2. TRANSFORMÁTORY** ..... **4**

2.1 TRANSFORMÁTOR OBECNĚ ..... 4
2.2 KONSTRUKCE ..... 4
2.3 ZÁKLADNÍ PRINCIP ..... 5
2.4 MATEMATICKÝ POPIS ..... 5
2.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA ..... 6
2.6 FÁZOROVÝ DIAGRAM ..... 8
2.7 CHOD NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO ..... 8
2.8 TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY ..... 9
2.9 ZAPOJENÍ VINUTÍ ..... 10
2.10 TRANSFORMÁTORY V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ..... 11
2.11 OCHRANY TRANSFORMÁTORŮ ..... 11

**3. FACTS** ..... **12**

3.1 FACTS OBECNĚ ..... 12
3.2 BSC, BSR ..... 12
3.3 TCSC ..... 12
3.4 SVC ..... 13
3.5 SSSC ..... 13
3.6 STATCOM ..... 13
3.7 UPFC ..... 13
3.8 HVDC ..... 13

**4. PST TRANSFORMÁTORY** ..... **14**

4.1 PST OBECNĚ ..... 14
4.2 PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE ..... 14
4.3 VÝKONY S PST NA VEDENÍ ..... 15
4.4 ZMĚNA REAKTANCE PST ..... 16
4.5 TYPY PST ..... 16
4.6 PHASE ANGLE REGULATOR ..... 19
4.7 QUADRATURE BOOSTER ..... 19

**5. PST V EVROPĚ A VE SVĚTĚ** ..... **20**

5.1 SLOVINSKO ..... 20
5.2 USA – NEVADA A ARIZONA ..... 21
5.3 FOGGIA - ITÁLIE ..... 21
5.3 ČESKÁ REPUBLIKA – HRADEC ..... 22

**6. PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČR A EU** ..... **24**

6.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY ..... 24
6.2 PROPOJENÁ PŘENOSOVÁ SOUSTAVA EVROPY ENTSO-E ..... 25

**7. PŘÍČINY A DŮSLEDKY INSTALACE PST** ..... **27**

**8. MODELOVÁNÍ V ELEKTROENERGETICE** ..... **28**

8.1 OBECNĚ ..... 28
8.2 MATLAB SIMULINK A POWERSYSTEM BLOCKSET ..... 28
8.3 ZÁKLADNÍ BLOKY ..... 29
*8.3.1 POWERGUI* ..... *29*
*8.3.2 Three-Phase Source* ..... *29*
*8.3.3 Distributed Parameter Line* ..... *29*

*8.3.4 Series RLC Load* ... *30*
*8.3.5 Three-Phase Transformer (Two Windings)* ... *30*
*8.3.6 Three-Phase OLTC Phase Shifting Transformer Delta-Hexagonal (Phasor Type)* ... *31*
8.4 MODELOVÁNÍ PŘENOSOVÉHO TRANSFORMÁTORU ... 32
*8.4.1 Model* ... *32*
*8.4.2 Parametry Simulace* ... *33*
*8.4.3 Použité vzorce* ... *33*
*8.4.4 Topologie modelu* ... *33*
*8.4.5 Parametry modelu* ... *33*
*8.4.6 Výpočet napětí nakrátko transformátoru* ... *33*
*8.4.7 Výpočet zkratového výkonu a proudu* ... *34*
*8.4.8 Naměřené hodnoty* ... *34*
8.5 MODELOVÁNÍ DELTA-HEXAGONÁLNÍHO PST TRANSFORMÁTORU ... 35
*8.5.1 Model* ... *35*
*8.5.2 Parametry Simulace* ... *36*
*8.5.3 Sledované veličiny* ... *37*
*8.5.4 Závěr/výsledek simulace* ... *38*
8.6. MODELOVÁNÍ SYMETRICKÉHO DVOUJÁDROVÉHO PST TRANSFORMÁTORU ... 39
*8.6.1 Model* ... *39*
*8.6.2 Parametry Simulace* ... *41*
*8.6.3 Výsledky simulace* ... *42*
*8.6.4 Sledované veličiny* ... *43*
8.7. MODELOVÁNÍ ASYMETRICKÉHO DVOUJÁDROVÉHO PST TRANSFORMÁTORU ... 44
*8.7.1 Model* ... *44*
*8.7.2 Parametry Simulace* ... *45*
*8.7.3 Výsledky simulace* ... *46*
*8.7.4 Sledované veličiny* ... *47*

**7. ZÁVĚR** ... **48**

**8. ZDROJE** ... **50**

**9. SEZNAM ZKRATEK** ... **51**

**10. SEZNAM OBRÁZKŮ** ... **52**

**11. SEZNAM SYMBOLŮ** ... **53**

# 1. Úvod

V září letošního roku (2017) byly společností ČEPS slavnostně spuštěny čtyři PST transformátory (Phase Shifting Transformers) v rozvodně Hradec u Kadaně. Vyrobila je italská firma TAMINI TRANSFORMATORI srl. Dva z nich už naší elektrickou soustavu chránily od ledna letošního roku, zatímco druhá dvojice mohla být spuštěna až později kvůli závadě na jednom z nich. Pracují po dvojicích paralelně na dvou přenosových linkách 400 kV mezi ČR a Německem. Německá firma 50Hertz, zajišťující přenosovou soustavu v několika spolkových zemích, se zavázala k výstavbě 2 PST transformátorů na jejich straně v rozvodně Röhrsdorf. Celková investice se pohybuje kolem 1,6 miliard korun. Je to jedna z největších investic skupiny ČEPS za poslední roky. Návratnost je ale výborná – měsíčně by měl ČEPS ušetřit až desítky milionů korun.

Důvodů k jejich výstavbě je několik. Zvýšená poptávka po elektrické energii, volný trh s elektrickou energií, obnovitelné zdroje energie OZE a v neposlední řadě odklon od jaderné energie v sousední Spolkové republice Německo vedou k nechtěnému jevu známému jako „kruhové proudy“ nebo „přetoky výkonu“ a následnému přetěžování naší přenosové soustavy. Tento jev symbolizuje rozdíl mezi nasmlouvanými toky výkonu a jejich reálnými fyzikálními toky. Německo v posledních letech přechází k OZE v podobě velkých větrných farem na severu jejich státu. Nestálost obnovitelných zdrojů vede k nárazovým tokům výkonu, který neteče nejkratší možnou cestou ale cestou nejmenšího odporu. Česká přenosová soustava patří do skupiny ENTSO-E (The European Network of Transmission Systém Operators for Electricity). Je tedy povinována otevřít soustavu svým sousedům. To samozřejmě nevede jen k nevýhodám. Jsme součástí volného trhu s elektřinou, při menších výpadcích jsme jištěni okolními sousedy. Bohužel přetěžování soustav v podobě okruhových proudů může v nejhorším případě zapříčinit až výpadek ve velkém rozsahu tzv. Blackout.

Řešení je několik. Ze stránky právní nemá dispečer širokou možnost zásahu do přetoků výkonů. Výstavba dalších přenosových vedení je drahá a z pohledu problémů s výkupy pozemků velice administrativně náročná. Moderní prvky FACTS (Flexible AC Transmission System) pro dynamickou a rychlou reakci na podnět jsou výborné, ale dražší než klasická řešení. Proto se česká strana stejně jako belgická, francouzská a polská rozhodla pro PST transformátory. Základní parametry těchto transformátorů jsou 420/420 kV, 850 MVA s rozsahem regulace $\alpha = \pm 30°$ a 65 polohami odboček.

Budoucnost evropského přenosového kolosu je jasná. Povede k výstavbě akumulačních rezervních stanic, výstavbě evropské supersítě pravděpodobně stejnosměrného charakteru, instalaci moderních prvků FACTS a k příklonu k obnovitelným zdrojům elektrické energie.

# 2. TRANSFORMÁTORY

## 2.1 Transformátor obecně

Transformátor je elektrický netočivý stroj. Jeho vynález datujeme ke konci 19. století, kdy trojice maďarských průkopníků Bláthy, Déri a Zipernowsky ověřila experimentálně a později dokonce komerčně jeho funkci při mezinárodní výstavě v Budapešti v roce 1885. O jeho zlepšení se zasadili Lucien Gaulard, Sebastian Ferranti a v USA William Stanley. Transformátor funguje na principu elektromagnetické indukce objevené roku 1831 Michaelem Faradayem. Hlavním účelem tohoto stroje je zvyšování a snižování střídavého napětí při stálé frekvenci.

Zvýšení napětí a snížení proudu vede ke snížení ztrát při přenášení výkonu na velké vzdálenosti. Transformátory jsou tedy zásadními a nepostrádatelnými prvky pro přenos a rozvod elektrické energie. Mimo využití v přenosové a distribuční soustavě používáme transformátory také v elektronice (radiokomunikace a telekomunikace, spínané zdroje), napájení (usměrňovačů, indukčních pecí) a v měřicí technice (měřicí transformátory proudu a napětí).

Výkony transformátorů se můžou lišit od jednotek VA po MVA. Napětí se liší od jednotek V po kV. Velikosti výkonu odpovídají rozměry samotného stroje. To může být limitujícím faktorem při dopravě. Největší transformátory se dopravují po řece či železnici z důvodu jejich vysoké hmotnosti. [1]

## 2.2 Konstrukce

Všechny výkonové transformátory mají tři hlavní části: vinutí, magnetický obvod a nádobu.

Vinutí: Nejčastěji vyrobeno z mědi v podobě plochých vodičů. Tyto vodiče jsou skládány do žádaného průměru technikou zvanou přesmyknutí. Jednotlivé vodiče se od sebe izolují transformátorovým papírem, jehož izolační schopnosti vzrostou, když se napustí minerálním olejem v nádobě. Každá fáze má nejméně dvě vinutí, která jsou magneticky spřažena. Vinutí mohou být válcová (vinutí tvoří válec kolem jádra), či desková (cívky primáru a sekundáru se kolem jádra střídají). [1]

Magnetický obvod: Složen z elektrotechnických plechů válcovaných za studena (snížení ztrát vířivými proudy) o tloušťce mezi 0,25 až 0,35 mm. Jeho účelem je vést hlavní magnetický tok. Magnetický obvod lze rozdělit na jádra s vinutím a magnetické spojky. Lze jej složit několika způsoby. První způsob, takzvané přeplátování, je výhodnější kvůli nižším ztrátám. Při skládání

natupo vytvoříme v obvodu vzduchovou mezeru, vedoucí naopak ke zvýšení ztrát rozptylovými toky. Důležitější je dělení na jádrovou a plášťovou konstrukci. [1]

U jádrového typu jsou jednotlivá vinutí rovnoměrně rozdělena na jednotlivá jádra, zatímco u plášťového typu jsou vinutí na vnitřním jádře a tok se uzavírá postranními jádry, obvykle o polovičním průřezu.

Nádoba: Slouží u výkonových transformátorů k ochraně zařízení před vnějšími vlivy, tak i k prevenci vytečení oleje do okolí. 2 účely transformátorového minerálního oleje jsou izolace a chlazení stroje. Nádoba musí zamezit průsaku vlhkosti dovnitř z důvodu možné degradace a následného zhoršení vlastností minerálního oleje. V zahraničí se používají i syntetické oleje, které mají lepší dielektrické vlastnosti, ale jsou zdravotně závadné. U nás jsou tyto oleje zakázané. U transformátorů velkých výkonů je oběh oleje nucen čerpadly. Pomocným prvkem je konzervátor, který zamezuje styku hladiny oleje se vzduchem a umožňuje vyrovnat teplotní změnu objemu oleje. Další důležitý prvek je tlakový ventil, vyrovnávající tlaky, které se můžou kvůli zkratům v transformátoru vytvořit. [1]

## 2.3 Základní princip

Maxwell-Faradayův zákon o indukovaném napětí známe ve tvaru:

$$-e = u_i = \frac{d\psi}{dt} = N\frac{d\phi}{dt} \tag{2.1}$$

Kde $e$ je elektromotorické napětí, $u_i$ je indukované napětí, $\psi$ je spřažený magnetický tok, $N$ je počet závitů a ϕ je celkový magnetický tok. Vzorec vysvětlujeme následovně. Pokud na primární vinutí přiložíme střídavé napětí, začne se v magnetickém obvodu indukovat magnetický tok. Primární vinutí je magneticky spřaženo se sekundárním. Časovou změnou ϕ (časová derivace) se v sekundárním vinutí indukuje napětí úměrné počtu závitů a magnetickému toku.

## 2.4 Matematický popis

Pro zjednodušení uvažujeme 1-fázový transformátor s 2 vinutími. Primární a sekundární vinutí jsou navinutá na 1 společném jádře, stejném magnetickém obvodu.

Primární vinutí je napájeno střídavým napětím $u_1$ a proud $i_1$ v zadaném okamžiku roste. V magnetickém obvodu roste magnetický tok $\phi_1$, jeho směr můžeme určit pomocí pravidla pravé ruky. Ve výstupním vinutí se indukuje napětí, jež se snaží (podle Lencova zákona) zabránit příčině svého vzniku. Proud $i_2$ tedy vytváří magnetický tok $\phi_2$, který působí proti toku $\phi_1$.

Rovnice můžeme psát následovně [1]:

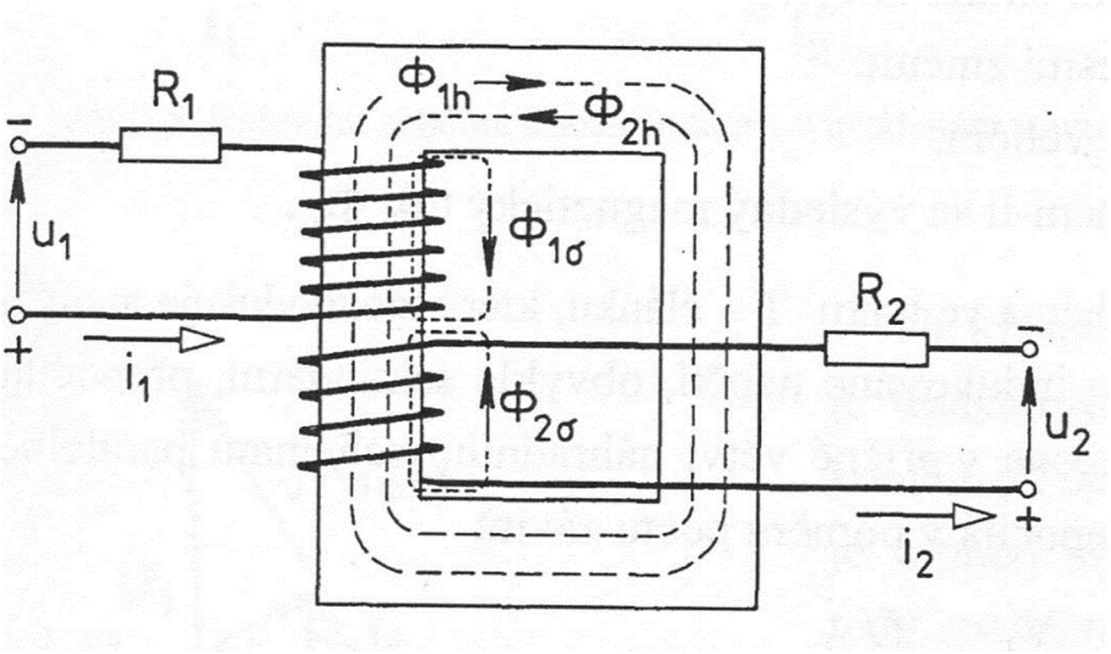
$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \tag{2.2}$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \tag{2.3}$$

Celkový magnetický tok se rozdělí na hlavní složky ($\phi_{1h}$ a $\phi_{2h}$, procházející magnetickým obvodem) a na rozptylové složky ($\phi_{1\sigma}$ a $\phi_{2\sigma}$, procházející rozptylovými cestami). Výsledný magnetický tok se bude rovnat $\phi_\mu = \phi_{1h} + \phi_{2h}$. Rozptylové toky navzájem nezabírají. Rovnice po úpravě píšeme ve tvarech [1]:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + u_{i1} \tag{2.4}$$

$$u_2 = -R_2 i_2 - L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + u_{i2} \tag{2.5}$$




*Obr. 1 – Magnetické toky transformátoru [1, str. 47]*

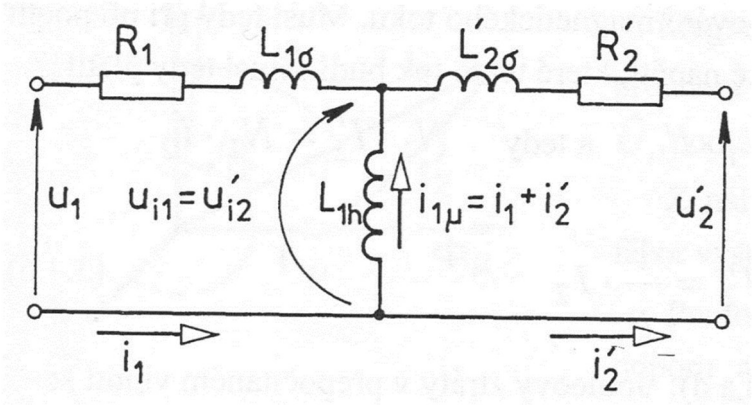
## 2.5 Náhradní schéma

K popisu transformátoru a dalších elektrických strojů se používá jejich náhradní schéma. Je to kombinace pasivních (odpory, indukčnosti) a aktivních prvků přibližně odpovídajících reálnému fungování stroje. Vstupní vinutí je napájeno harmonickým napětím s danou frekvencí. Pro indukovaná napětí můžeme zjednodušeně psát [1]:

$$U_{i1} = 4{,}44 f_1 N_1 \phi_{max} \tag{2.6}$$

$$U_{i2} = 4{,}44 f_1 N_2 \phi_{max} \tag{2.7}$$

Můžeme také přejít do komplexního zobrazení jednotlivých veličin – fázory. Derivace se nahradí násobením jω.




*Obr. 2 – Náhradní schéma transformátoru [1, str. 47]*

Důležitým krokem je přepočet parametrů sekundárního vinutí. Pokud splníme 4 podmínky přepočtu.

1) Nahrazení sekundárního vinutí vinutím se stejným počtem závitů jako to primární.

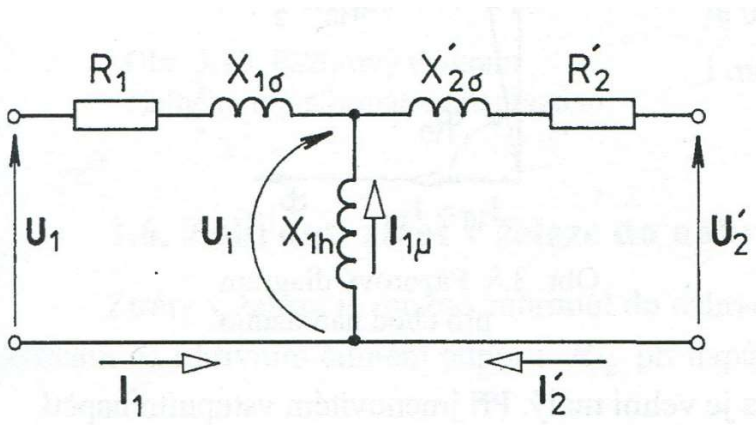
2) Při přepočtu se nesmí ovlivnit primární strana stroje.

3) Nesmí se změnit energetické poměry ve stroji.

4) Nesmí se změnit úhly mezi fázory veličin.

Můžeme definovat:

| | | |
|---|---|---|
| Převod | $p = N_1/N_2 = U_{i1}/U_{i2}$ | (2.8) |
| Přepočet napětí | $U'_{i2} = U_{i1} = p * U_{i2}$ | (2.9) |
| Přepočet proudů | $I'_2 = I_2/p$ | (2.10) |
| Přepočet impedancí | $R'_2 = p^2 * R_2$, $X'_{2\sigma} = p^2 * X_{2\sigma}$ | (2.11) |



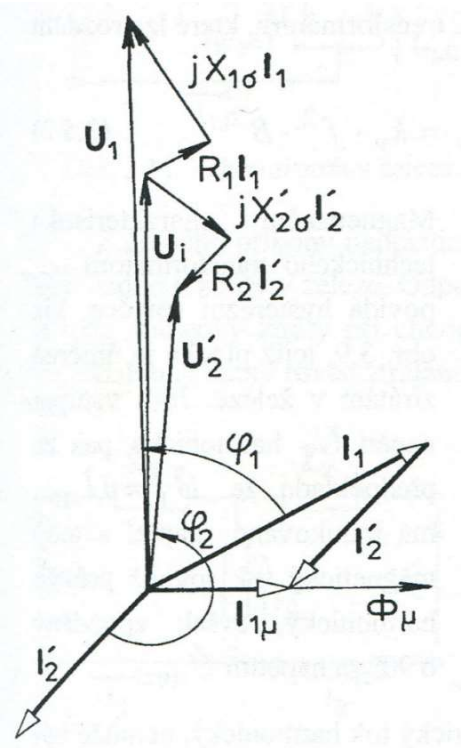

*Obr. 3 – Náhradní schéma transformátoru [1, str. 49]*

$$\hat{U}_1 = R_1\hat{I}_1 + jX_{1\sigma}\hat{I}_1 + \hat{U}_i \quad (2.12)$$

$$\hat{U}_2 = R_2\hat{I}_2 + jX_{2\sigma}\hat{I}_2 + \hat{U}_i \quad (2.13)$$

## 2.6 Fázorový diagram

Fázorovým diagramem rozumíme vynesení fázorů napětí a proudů v komplexní Gaussově rovině pro transformátor. Předpokladem je zátěž na sekundární straně transformátoru. Proto je fázor $I_1$ zpožděn za napětím $U_1$ o úhel $\phi_1$. Postupně vyneseme magnetický tok, magnetizační proud, indukované napětí. Přičítáním úbytků napětí lze sestrojit napětí $U'_2$. [1]




*Obr. 4 – Fázorový diagram [1, str. 49]*

## 2.7 Chod naprázdno a nakrátko

Chod naprázdno – výstupní svorky transformátoru jsou bez zatížení. Výstupní proud je nulový. Pak platí:

$$\hat{U}_{10} = R_1\hat{I}_{10} + jX_{1\sigma}\hat{I}_{10} + \hat{U}_{i0} \tag{2.14}$$

$$\hat{U}_{20} = \hat{U}_{i0} \tag{2.15}$$

Magnetizační proud se shoduje se vstupním proudem, je zpožděn o 90°za vstupním napětím naprázdno a je velice malý. Při jmenovitém vstupním napětí se rovná cca 5 % jmenovitého proudu. [1]

Měřením naprázdno lze zjistit ztráty naprázdno, často zvané ztráty v železe. Ty dělíme na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. První zmíněné ztráty jsou způsobeny střídavým přemagnetováním magnetických dipólů. Ty se střídavě natáčejí podle intenzity pole a vznikají

ztráty teplem. Snížení těchto ztrát se docílí tak, že složíme obvod z elektrotechnických anizotropních (směrově orientovaných) křemíkových plechů válcovaných za studena. Druhé zmíněné jsou zapříčiněné indukovaným napětím, které se v magnetickém obvodu snaží vytvořit ztrátový proud. Vzniku těchto proudů se zabrání poskládáním magnetického obvodu ze vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů. [1]

Chod nakrátko – vstupní vinutí je napájeno a výstupní vinutí je zkratováno. Zkratováním sekundárního vinutí dosáhneme toho, že příčnou větev můžeme z náhradního schématu úplně vypustit a počítáme jen s impedancemi na větvi podélné. Měříme takzvané ztráty v mědi. Průchodem proudu vznikají ve vinutích Joulovy ztráty. Důležitou veličinou je napětí nakrátko, které definujeme jako napětí na primáru při zkratovaném sekundáru, kdy vinutím teče jmenovitý proud. [1]

## 2.8 Trojfázové transformátory

Hlavní dělení 3-fázových transformátorů je podle konstrukce jejich magnetického obvodu.

S NEZÁVISLÝM MAGNETICKÝM SYSTÉMEM

Spojíme-li předem určené části primárního a sekundárního vinutí tři jednofázových transformátorů, vznikne trojfázový transformátor s nezávislým magnetickým systémem. Jeho výhody jsou: jednotlivé magnetické toky se navzájem neovlivňují a doprava jednotlivých částí je mnohem jednodušší než doprava velkého celku. Výhodou může být jednoduchá výměna při poruše. Nevýhodou je určitě spotřeba většího množství materiálu než v kompaktním transformátoru se závislým systémem. [1]

SE ZÁVISLÝM MAGNETICKÝM SYSTÉMEM

Nejpoužívanější způsob konstrukce trojfázových transformátorů. Na rozdíl od předchozího stylu konstrukce jsou všechny vinutí na jednom magnetickém obvodu. Zpočátku se vycházelo ze tří spojených jednofázových transformátorů vůči sobě otočených o 120°. Při elektrické a magnetické symetrii jsou tři fáze souměrné a ve společném prostředním jádře neteče žádný proud – můžeme ho tedy vynechat. Tento způsob by byl prostorově nevýhodný, proto se všechny tři jádra položí do jedné roviny. Dochází k magnetické nesymetrii, která je však zanedbatelně malá. [1]

## 2.9 Zapojení vinutí

Tři základní zapojení vinutí na vstupu a výstupu jsou do hvězdy, do trojúhelníka a do lomené hvězdy. Velkým písmenem značíme stranu s vyšším napětí a malým písmenem stranu s nižší hladinou napětí. [1]

ZAPOJENÍ DO HVĚZDY

Máme jen dvě možnosti zapojení. Do nulového uzlu spojíme vývody U0, V0, W0 nebo vývody U1, V1, W1. U výkonových transformátorů je to nejvýhodnější zapojení na straně vyššího napětí. S pomocí nulového bodu získáme jak fázové, tak sdružené napětí. Proudy protékající vinutími jsou shodné s proudy síťovými. [1]

$$U_{UV} = \sqrt{3}U_U \tag{2.16}$$

$$S = 3U_U I_U = \sqrt{3}U_{UV} I_U \tag{2.17}$$

SPOJENÍ DO TROJÚHELNÍKA

Spojení provádíme tak, že konec U1 propojíme se začátkem cívky V0, poté V1 se začátkem W0 a dále stejným způsobem. Zjistíme, že jsou možné čtyři způsoby zapojení. Fázové a sdružené napětí si odpovídají. [1]

$$I_{UV} = \sqrt{3}I_U \tag{2.18}$$

$$S = 3U_U I_U = \sqrt{3}I_{UV} U_U \tag{2.19}$$

SPOJENÍ DO LOMENÉ HVĚZDY

Má vyvedený nulový uzel. Použití pro vyrovnání nesouměrnosti jednofázového zatížení trojfázového transformátoru. Vinutí každé fáze se rozdělí na dvě poloviny. Poloviny sousedních fázích spojíme do série ale v opačné polaritě. Fázové napětí je dáno součtem napětí na polovinách vinutí. [1]

$$U_{UZ} = \left(\frac{U_U}{2} + \frac{U_W}{2}\right)\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}U_U \tag{2.20}$$

## 2.10 Transformátory v přenosové soustavě

Transformátory jsou nedílnou součástí každé přenosové soustavy. Propojují buď různé napěťové hladiny 400 kV a 220 kV, nebo propojují soustavu přenosovou se soustavou distribuční. Obvyklé jsou autotransformátory, u kterých nejsou primární a sekundární vinutí galvanicky oddělená. Terciární vinutí je využito pro připojení kompenzačních tlumivek nebo pro připojení transformátorů zajišťujících vlastní spotřebu rozvoden. Pomocí přepínače odboček lze upravovat převod transformátorů za chodu. V české soustavě s můžeme setkat s transformátory, které jsou složeny ze čtyř jednofázových jednotek, kdy je jedna jednotka v záloze. Používáme taky převážně podélné systémové transformátory, u kterých je napětí na výstupu ve fázi s napětím na vstupu. Na vedení V445 a V446 byly postaveny PST transformátory. [3]

Základní technické údaje transformátorů používaných v české přenosové soustavě:

Transformátory 400/220 kV – 500 MVA – převod 400/231 $\pm$ 6 x 1,48 % / 34 kV

Transformátory 400/110 kV – 350,330,250 MVA – 400/121 $\pm$ 8 x 1,5 % / 10,5 kV

Transformátory 220/110 kV – 200 MVA – převod 230/121 $\pm$ 6 x 2 % / 10,5 kV

Zapojení vinutí: Yna-d, YNynd – síťové transformátory 400,220,110 kV [3]

## 2.11 Ochrany transformátorů

Ochran transformátorů v přenosové soustavě je několik typů založených na různých fyzikálních principech. Rozdílové ochrany zjednodušeně porovnávají vstupní a výstupní veličiny a kontrolují, jestli nedošlo k poruše vevnitř transformátoru – zkrat na vinutí a podobně. Nadproudové ochrany jsou většinou instalovány na primární vinutí a chrání proti zkratovým proudům. Buchholzovo relé chrání transformátor proti nepředpokládaným nárůstům tlaku oleje v nádobě. Tyto přetlaky mohou nastat při zkratech na vinutích. Podobnou funkci jako Buchholzovo relé plní také přetlakové ventily. Ty jsou obvykle na nádobě transformátoru a přepínači jednotlivých fází. Kostrová ochrana transformátoru (Chevallerova ochrana) vypíná transformátor, pokud se na kostře objeví napětí. Distanční ochrana chrání transformátor před zkratem ve vývodu ze sekundáru. [3]

*Obr. 5 – Trojfázový systémový transformátor [3, str. 34]*

# 3. FACTS

## 3.1 FACTS Obecně

PST transformátory patří mezi takzvaná FACTS zařízení. FACTS je zkratka pro Flexible Alternating Current Transmission System. Jedná se o systém zařízení pro střídavý přenos. Vhodnou kombinací statických regulátorů a výkonové elektroniky získáme systém schopný regulovat a řídit přenosovou schopnost systému. FACTS dělíme na systémy sériové, paralelní a kombinované. PST řadíme mezi kombinované FACTS. [2]

## 3.2 BSC, BSR

Anglická zkratka pro spínané kondenzátory a tlumivky. Připojujeme je paralelně za účelem dodávky a odběru jalového výkonu. Sériově mají vliv na impedanci přenosové linky. Systém je připojen spínacím zařízením, které dává flexibilitu operátorovi. [2]

## 3.3 TCSC

Systém se skládá ze sériově připojené paralelní kombinace kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky. Můžeme s ní regulovat kapacitní reaktance pro základní harmonickou. Výsledná reaktance je určená řídicím úhlem tyristorů. Tok výkonu je také ovlivněn celkovou reaktancí TCSC. V případě, že ventily naplno uzavřeme, stává se ze systému pevná kapacita. [2]

## 3.4 SVC

SVC je kombinace kondenzátorů BSC, tyristorově spínaných kondenzátorů TSC, tyristorově spínaných tlumivek TSR a tyristorově řízených tlumivek TCR. Tuto kombinaci nazýváme statický Var kompenzátor. SVC je paralelně připojena k soustavě přes zvyšovací transformátor. Reaktanční prvky dodávají nebo odebírají jalový výkon. SVC dynamicky stabilizuje napětí, zlepšuje stabilitu systému, vyrovnává dynamické zatížení a podporuje napětí v ustáleném stavu. [2]

## 3.5 SSSC

SSSC znamená statický synchronní sériový kompenzátor. Pomocí trojfázového měniče s vypínatelnými součástkami dokáže dodávat či odebírat jalový výkon. Přídavný transformátor vstřikuje sériově napětí $U_T$, které je řídicím parametrem. SSSC dokáže dynamicky řídit výkonové toky, tlumit elektromechanické oscilace, zlepšovat napěťovou a úhlovou stabilitu. [2]

## 3.6 STATCOM

STATCOM neboli statický synchronní kompenzátor se podobá SSSC v tom, že používá trojfázový měnič VSC, vazební transformátor a stejnosměrnou větev. Podobá se SVC, ale jeho pracovní charakteristiky jsou lepší. Oproti SVC nevyžaduje tolik prostoru. Vlastní jalový výkon je dodáván měničem. STATCOM dokáže dodávat jalový proud v celém svém rozsahu. Jalový proud je jeho řídicím parametrem. Účelem STATCOM je dynamicky stabilizovat napětí, zlepšit stabilitu systému, vyrovnat dynamické zatížení, podpořit napětí v ustáleném režimu a zlepšit kvalitu elektrické energie. [2]

## 3.7 UPFC

UPFC neboli univerzální regulátor výkonových toků je kombinací paralelního a sériového transformátoru. Tyto transformátory jsou propojeny měniči VSCC se stejnosměrným meziobvodem s kondenzátorem. UPFC jsou využívány pro nezávislé řízení činného a jalového výkonu. Systém dokáže zároveň řídit až 4 parametry ovlivňující tok výkonu po vedení, a to napětí na začátku a na konci vedení, reaktanci vedení a úhel mezi fázory napětí. Reguluje napětí, řídí výkonové toky a zlepšuje stabilitu. Systém může pracovat v několika režimech. Režimy jsou různé pro regulaci napětí, sériovou kompenzaci, fázové řízení a řízení výkonových toků. [2]

## 3.8 HVDC

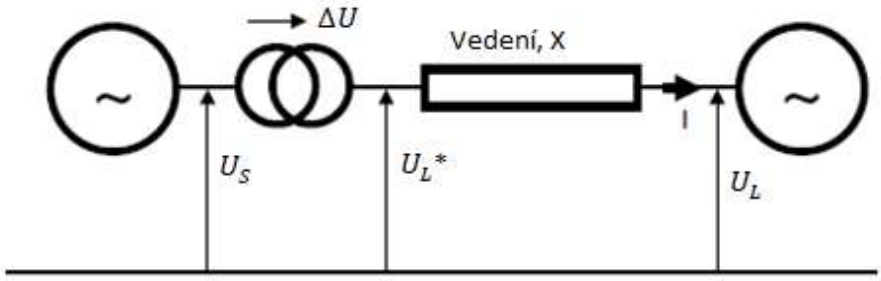
HVDC je anglická zkratka pro High voltage direct current. Jedná se tedy o vysokonapěťový stejnosměrný přenos. HVDC je alternativou ke klasickým FACTS. Se stejnosměrným přenosem se setkáváme hlavně v přenosech na velké vzdálenosti nebo v propojeních nesynchronních soustav. V Evropě se jedná hlavně o podvodní kabely spojující nesynchronní zóny ENTSO-E. Topologicky se HVDC skládá ze dvou VSC měničů. Jeden pracuje jako usměrňovač a druhý jako střídač. Systém má několik různých konfigurací. První takzvaná back-to-back je zajímavá tím, že jsou měniče v jedné

rozvodně a neexistuje žádné stejnosměrné vedení. Jednopólový systém je propojen jen jedním vodičem. Jedná se hlavně o podmořské kabely. Dvoupólový systém je v zásadě složen ze dvou jednopólových systémů. Poslední je systém s více rozvodnami. Stejnosměrné vedení lze vést až 800 km venkovními vedeními a více než 50 km kabely. [2]

# 4. PST TRANSFORMÁTORY

## 4.1 PST Obecně

Transformátory s regulací fáze (PST zkratka pro Phase-shifting transformers) jsou využívány hlavně na přenosových vedeních pro regulaci toků činných a jalových výkonů. PST obvykle nemění velikost napětí, ale mění fázový rozdíl mezi napětími na konci vedení. V poslední době se začala tato zařízení stavět na propojeních dvou vzájemně oddělených přenosových soustav. [2]




*Obr. 6 – PST transformátor mezi 2 soustavami [4, str. 87]*

## 4.2 Přenos elektrické energie

Přenos elektrické energie po vedení je popsán impedancí vedení Z a rozdílem mezi napětím zdroje $U_S$ a napětím na konci vedení, napětí zátěže $U_L$. (S anglicky source zdroj, L load zátěž) Píšeme:

$$Z = R + jX \tag{4.1}$$

Kde Z je impedance, R rezistance a X reaktance. Reaktance je řádově větší než rezistance, a proto můžeme rezistanci zanedbat. [4]

Napětí zátěže a výroby:

$$U_S = U_S(\cos\varphi_S + j\sin\varphi_S) \tag{4.2}$$

$$U_L = U_L(\cos\varphi_L + j\sin\varphi_L) \tag{4.3}$$

$$\Delta U = U_S - U_L \tag{4.4}$$

Proud protékající vedením pak:

$$I = \frac{U_S\cos\varphi_S - U_L\cos\varphi_L + j(U_S\sin\varphi_S - U_L\sin\varphi_L)}{X} \tag{4.5}$$

Zdánlivý výkon spočítáme násobením napětí v uzlu a komplexně sdruženého proudu:

$$S_L = \frac{U_L U_S}{X}\sin(\varphi_S - \varphi_L) - j\frac{U_L^2}{X} + j\frac{U_L U_S}{X}\cos(\varphi_S - \varphi_L) \tag{4.6}$$

Činný výkon je reálnou částí zdánlivého výkonu:

$$P_L = P_S = \frac{U_L U_S}{X}\sin(\varphi_S - \varphi_L) \tag{4.7}$$

Jalový výkon je imaginární částí zdánlivého výkonu:

$$Q_L = -\frac{U_L^2}{X} + \frac{U_L U_S}{X}\cos(\varphi_S - \varphi_L) \tag{4.8}$$

## 4.3 Výkony s PST na vedení

Pokud použijeme na vedení transformátor se symetrickou regulací fáze PAR, vstoupí do rovnic reaktance samotného transformátoru a samozřejmě regulační úhel. [4]

$$P_L = \frac{U_L U_S}{X+X_T}\sin(\alpha + \varphi_S - \varphi_L) \tag{4.9}$$

$$Q_L = -\frac{U_L^2}{X+X_T} + \frac{U_L U_S}{X+X_T}\cos(\alpha + \varphi_S - \varphi_L) \tag{4.10}$$

Pro transformátor s nesymetrickou regulací fáze se vztahy změní o změnu amplitudy napětí.

$$P_L = \frac{U_L U_S}{(X+X_T)*\cos\alpha}\sin(\alpha + \varphi_S - \varphi_L) \tag{4.11}$$

$$Q_L = -\frac{U_L^2}{(X+X_T)*\cos\alpha} + \frac{U_L U_S}{(X+X_T)*\cos\alpha}\cos(\alpha + \varphi_S - \varphi_L) \tag{4.12}$$

## 4.4 Změna reaktance PST

Při regulaci, tj. zvyšování úhlu α, se mění pro různé typy PST jejich reaktance. Podle ENTSO-E platí pro PAR [5]:

$$X(\alpha) = X(0) + \left(X(\alpha_{max}) - X(0)\right)\left(\frac{\sin(\alpha/2)}{\sin(\alpha_{max}/2)}\right)^2 \tag{4.13}$$

Pro Quadrature Booster [5]:

$$X(\alpha) = X(0) + \left(X(\alpha_{max}) - X(0)\right)\left(\frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha_{max})}\right)^2 \tag{4.14}$$

## 4.5 Typy PST

Pro různé druhy zapojení či technických problémů existuje mnoho druhů PST transformátorů. Základní rozdělení je podle počtu jader – jednojádrová a dvoujádrová konstrukce.

Jednojádrová konstrukce je výhodnější z pohledu ekonomiky a její jednoduchosti. OLTC (on load tap changers), neboli odbočky pod zátěží, jsou přímo vystaveny všem přepětím a zkratům. Napětí na jednu odbočku a odpovídající proud jsou určeny specifikami samotného transformátoru. Zkratová impedance se liší od nuly do maxima, takže se s ní nedá počítat při snižování zkratových proudů. Tato konstrukce je vhodná pro sítě s nižším napětím (VN) a pro menší regulační úhel alfa.

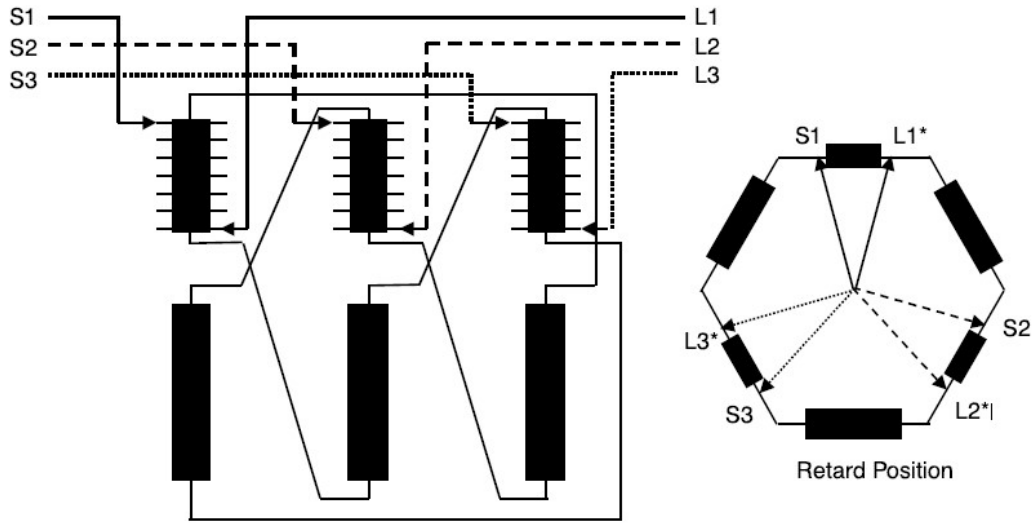
Jednojádrovou konstrukci lze rozdělit na symetrické, nesymetrické a delta-hexagonální řešení. Při symetrickém zapojení ovlivňuje tok výkonu pouze regulační úhel alfa. Při nesymetrickém je ovlivněn poměr napětí zdroje a zátěže, který navíc ovlivňuje tok výkonu. [4]

Dvoujádrová konstrukce se obvykle skládá ze sériové a paralelní (hlavní) jednotky. Pro nižší napěťové hladiny jsme schopni obě jednotky složit do jedné nádoby. Pro větší výkony a napětí musí být jednotky ve dvou oddělených nádobách. Výhodou dvounádobového řešení je jednodušší nastavení proudu a napětí regulačního vinutí. Zkratová impedance je sumou impedance hlavní a sériové jednotky. Jelikož je impedance sériové jednotky konstantní a nezávislá na fázovém posuvu, může se PST sám chránit proti zkratům. [4]

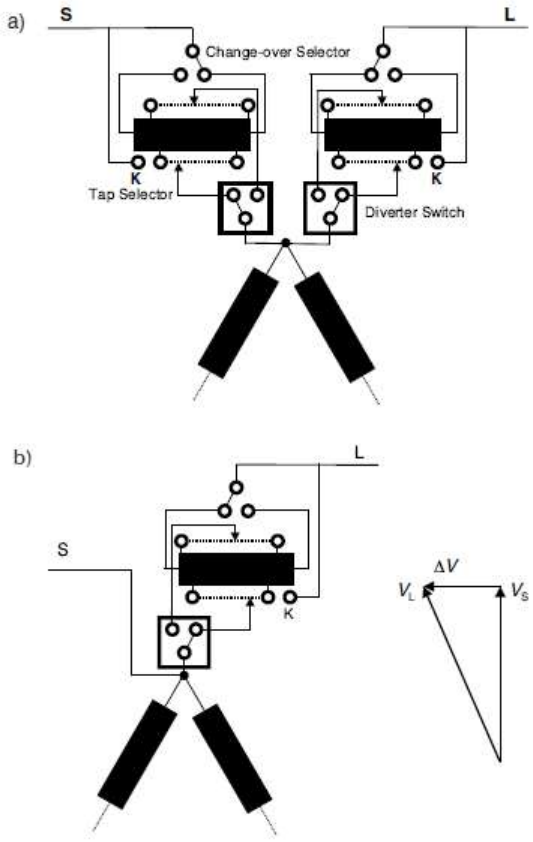
Princip fungování dvoujádrového PST je následující. Na primárním vinutí paralelního transformátoru se objeví napětí. To se indukuje na sekundární vinutí, zde je přepínač odboček. Sekundární vinutí paralelní jednotky je spojeno s primárním vinutím sériové jednotky ale v jiné

fázi. Napětí se dále indukuje na sekundární vinutí, které je zapojeno ve vedení. Je obvyklé, že jedno vinutí je do trojúhelníka a zbytek do hvězdy. [4]

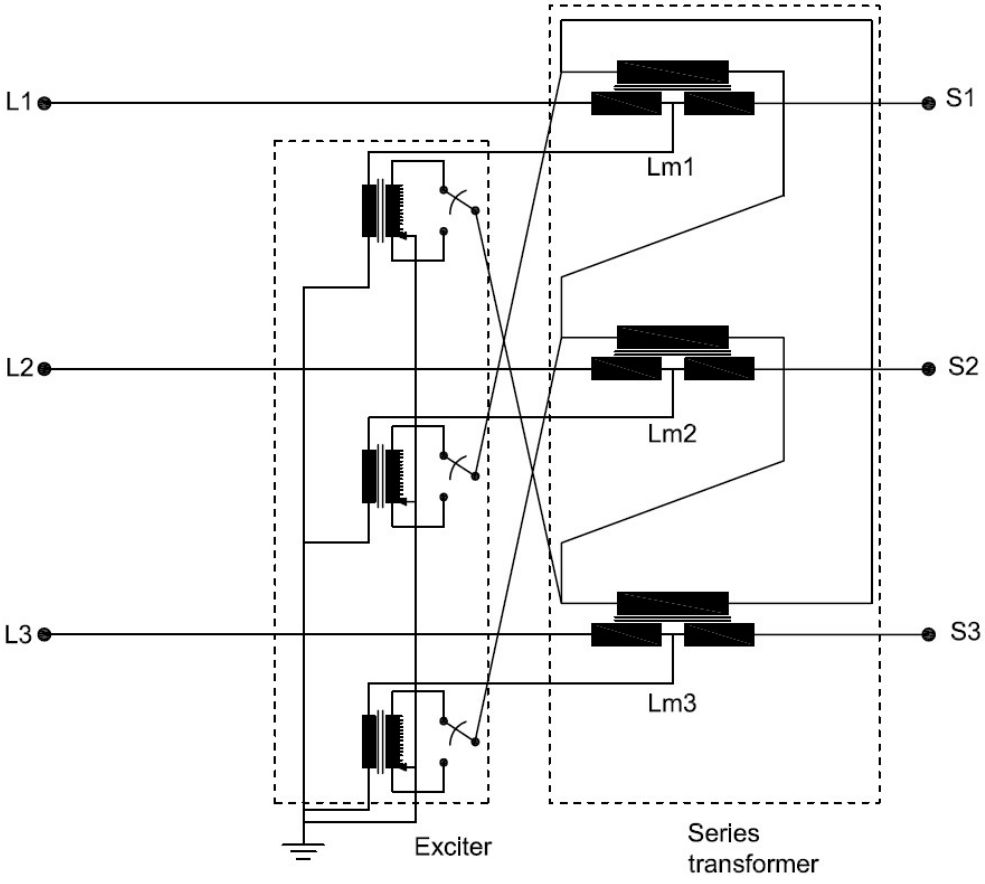
V praxi je volba druhu PST závislá na mnoha faktorech a požadavcích zákazníka. Mezi hlavní faktory patří celkový průchozí výkon a potřebný fázorový posun, velikost napětí, zkratové vlastnosti připojeného systému, dopravní omezení a OLTC specifika. [4]



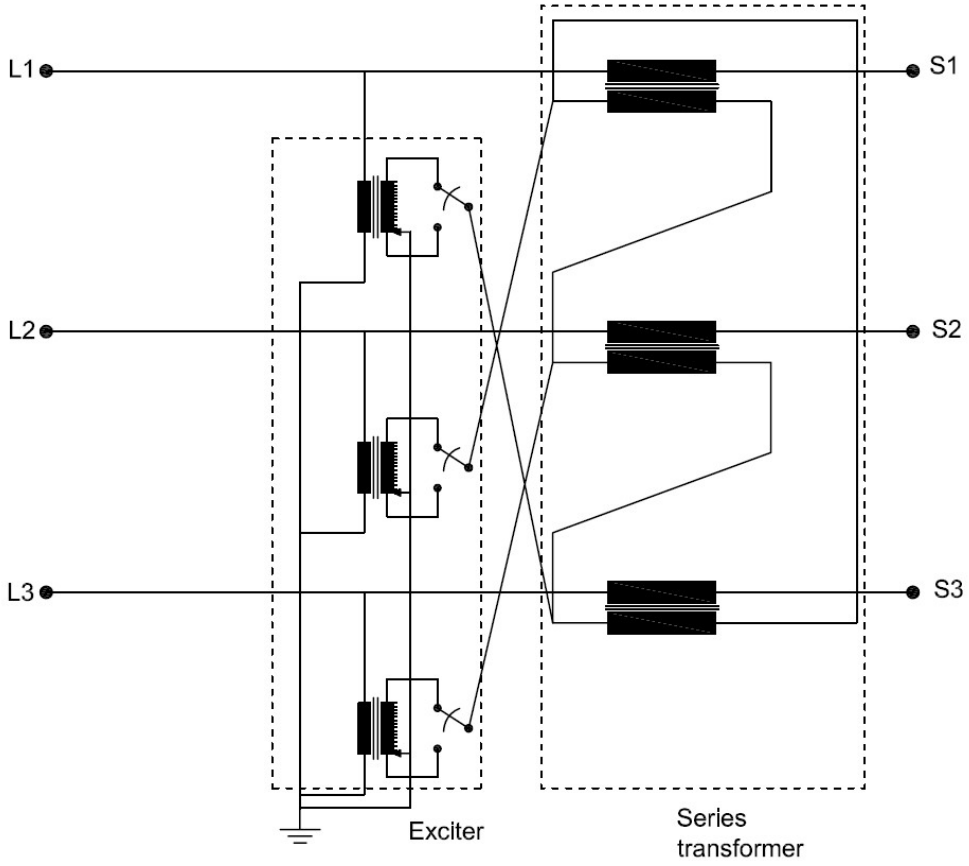

*Obr. 7 – delta-hexagonální zapojení [4, str. 94]*




*Obr. 8 – Jednojádrové PST transformátory se symetrickým a nesymetrickým zapojením [4, str. 93]*



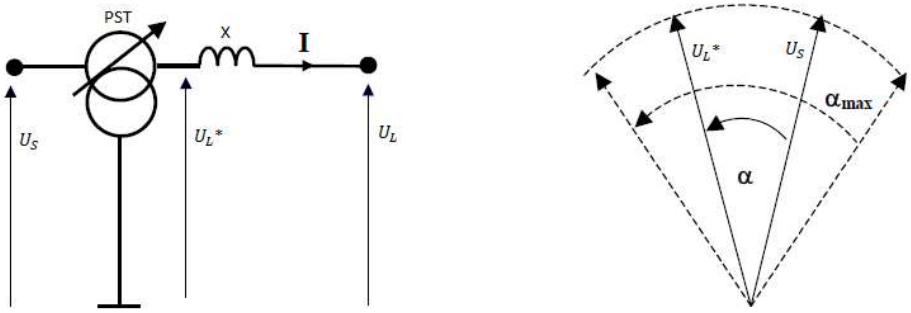

*Obr. 9 – Dvoujádrový symetrický PST transformátor [12, str. 6]*




*Obr. 10 – Dvoujádrový asymetrický PST transformátor [12, str. 5]*

## 4.6 Phase Angle Regulator

Phase Angle regulator je anglický název pro symetrické PST transformátory. Jedná se o konstrukčně složitější možnost než QBT. Amplitudy vstupního a výstupního napětí jsou stejné. Mění se pouze fázový posun mezi těmito dvěma napětími. Fázový posun lze realizovat pomocí změny magnetického obvodu či tyristorově řízené jednotky.

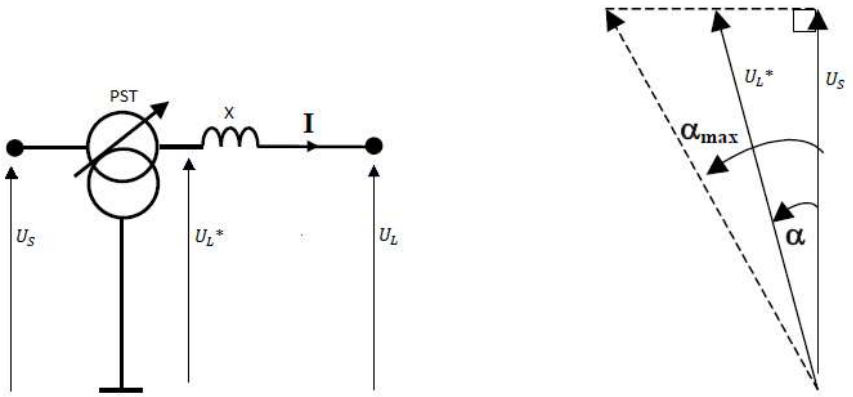



*Obr. 11 – Phase Angle Regulator [5, str.6]*

## 4.7 Quadrature Booster

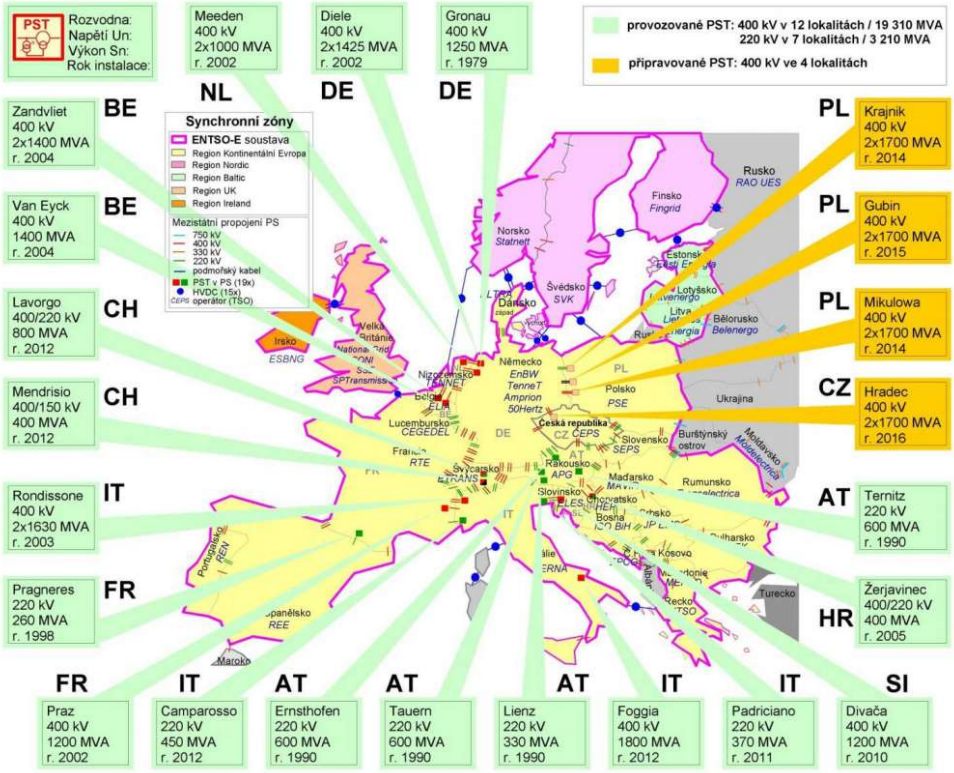
Quadrature Booster je zažité označení asymetrického PST transformátoru v západních zemích. Obvykle se jedná o kombinaci výkonového nebo autotransformátoru s PST transformátorem. PST může být jak jednojádrový, tak dvoujádrový. Je napájen z regulované strany výkonového transformátoru. V tomto uspořádání je fázor výstupního napětí možno ovlivňovat ve čtyřkvadrantovém směru. Můžeme tedy měnit jak fázi, tak velikost fázoru.

Pro malé velikosti vstřikovaného napětí je fázový posun přímo úměrný vstřikovanému napětí a amplituda zůstává téměř stejná. Pro větší vstřikovaná napětí dojde k větší změně amplitudy uzlového napětí $U_L$*.




*Obr. 12 – Quadrature Booster [5, str.8]*

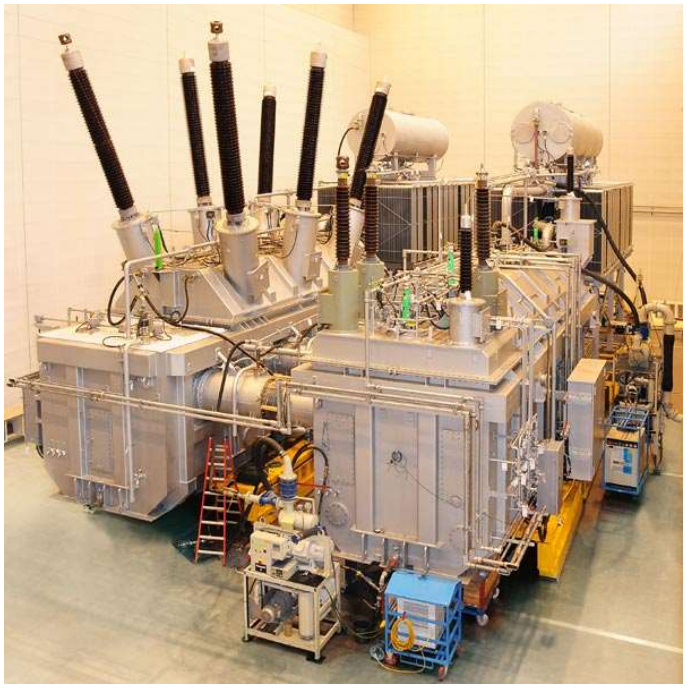
# 5. PST V EVROPĚ A VE SVĚTĚ




*Obr. 13 – PST v Evropě [7]*

## 5.1 Slovinsko

600 MVA PST transformátor z produkce Siemens pro Slovinskou přenosovou síť. Výzvou pro konstruktéry byl úhel regulace $\pm 40°$ na 32 odboček. Byly vyrobeny 2 jednotky. [7]



*Obr. 14 – PST Slovinsko [7]*

## 5.2 USA – Nevada a Arizona

4 PST pro SRP Arizona a NPC Nevada o parametrech 650 MVA, $\pm 24°$ a 525 kV. [8]

*Obr. 15 – PST Arizona [8]*

## 5.3 Foggia - Itálie

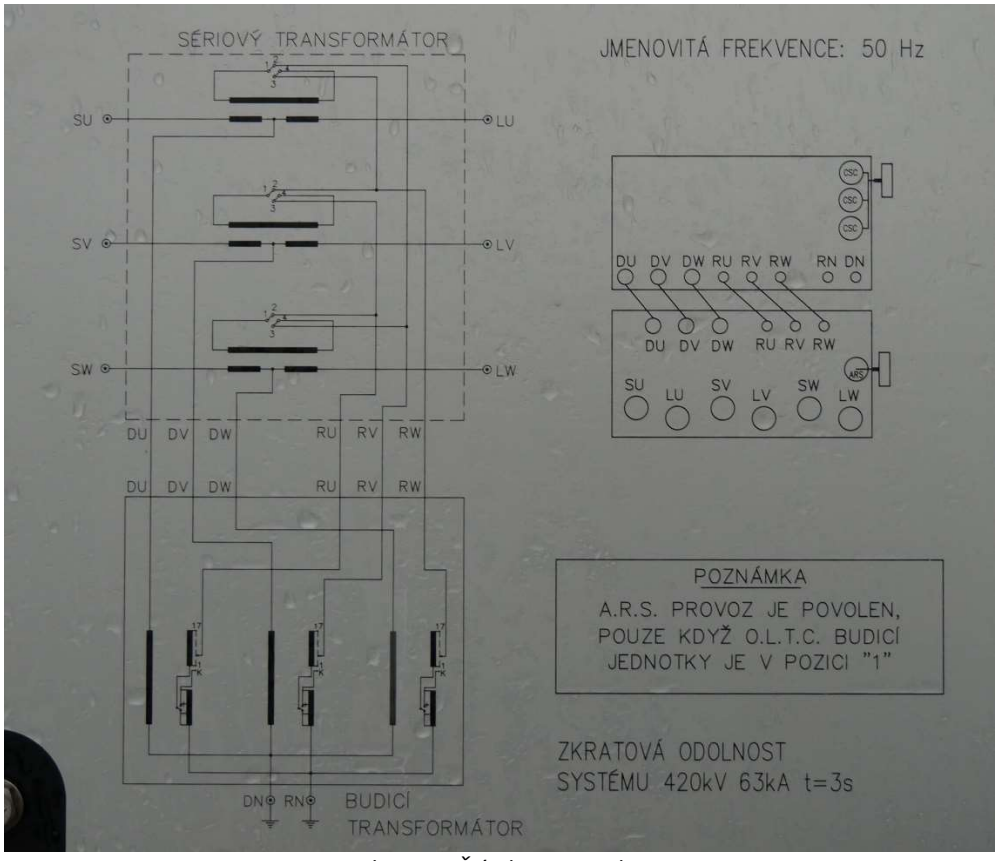
Domácí společnost TAMINI vyrobila pro italskou přenosovou společnost Terna s.r.o. 4 jednotky obřích PST transformátorů. Výkon 1800 MVA, napěťová hladina 400 kV, 35 odboček. [9]

*Obr. 16 – PST Terna [9]*

## 5.3 Česká republika – Hradec

4 PST se základními parametry 420/420 kV, 850 MVA s rozsahem regulace $\alpha = \pm 30°$ a 65 polohami odboček.

*Obr. 17 – PST Hradec*

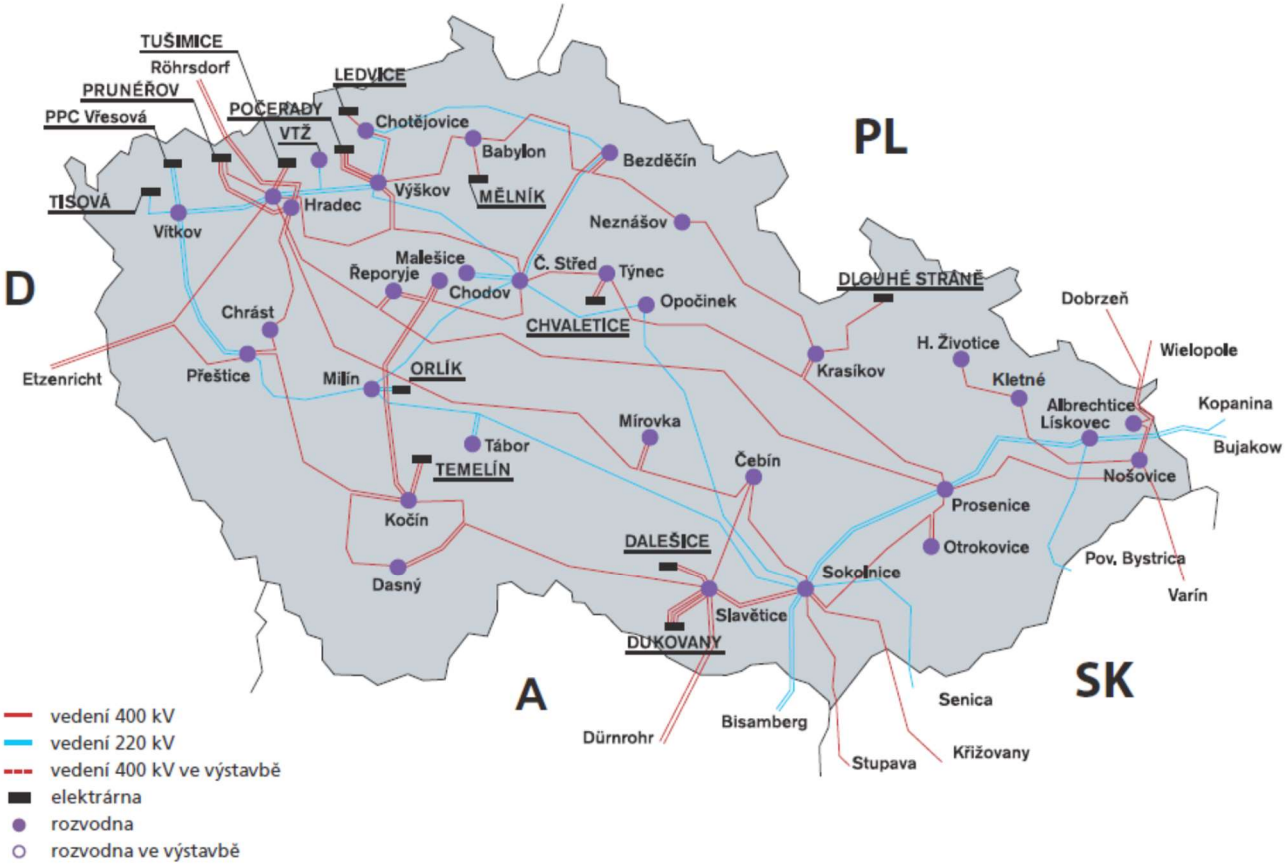



*Obr. 18 – Štítek PST Hradec*

| A.R.S. | O.L.T.C. BUDICÍ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Pozice 1 | Pozice | Předvolič | Volič | Posun úhlu bez zatížení $\alpha_0$ (°) | Zl% vztaženo na 850 MVA |
| | 33 | | 17 | 30,034 | 16,00 |
| | 32 | | 16 | 29,136 | 15,86 |
| | 31 | | 15 | 28,235 | 15,62 |
| | 30 | | 14 | 27,329 | 15,71 |
| | 29 | | 13 | 26,420 | 15,28 |
| | 28 | | 12 | 25,508 | 15,16 |
| | 27 | | 11 | 24,593 | 14,95 |
| | 26 | | 10 | 23,674 | 14,85 |
| | 25 | | 9 | 22,752 | 14,65 |
| | 24 | + | 8 | 21,828 | 14,54 |
| | 23 | | 7 | 20,900 | 14,36 |
| | 22 | | 6 | 19,969 | 14,27 |
| | 21 | | 5 | 19,036 | 14,11 |
| | 20 | | 4 | 18,101 | 14,03 |
| | 19 | | 3 | 17,163 | 13,88 |
| | 18 | | 2 | 16,222 | 13,82 |
| připojení: 1–2 a 3–4 | 17c | | 1 | 15,280 | 13,67 |
| | 17b | | K | 15,280 | 13,67 |
| + | 17a | | 17 | 15,280 | 13,67 |
| | 16 | | 16 | 14,335 | 13,50 |
| | 15 | | 15 | 13,388 | 13,33 |
| | 14 | | 14 | 12,440 | 13,21 |
| | 13 | | 13 | 11,489 | 13,06 |
| | 12 | | 12 | 10,538 | 12,95 |
| | 11 | | 11 | 9,584 | 12,84 |
| | 10 | − | 10 | 8,630 | 12,74 |
| | 9 | | 9 | 7,674 | 12,64 |
| | 8 | | 8 | 6,717 | 12,57 |
| | 7 | | 7 | 5,759 | 12,49 |
| | 6 | | 6 | 4,801 | 12,43 |
| | 5 | | 5 | 3,841 | 12,37 |
| | 4 | | 4 | 2,881 | 12,34 |
| | 3 | | 3 | 1,921 | 12,31 |
| | 2 | | 2 | 0,961 | 12,30 |
| | 1 | | 1 | 0,000 | 12,29 |

| A.R.S. | O.L.T.C. BUDICÍ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Pozice 2 | Pozice | Předvolič | Volič | Posun úhlu bez zatížení $\alpha_0$ (°) | Zl% vztaženo na 850 MVA |
| | 33 | | 17 | −30,034 | 16,00 |
| | 32 | | 16 | −29,136 | 15,86 |
| | 31 | | 15 | −28,235 | 15,62 |
| | 30 | | 14 | −27,329 | 15,71 |
| | 29 | | 13 | −26,420 | 15,28 |
| | 28 | | 12 | −25,508 | 15,16 |
| | 27 | | 11 | −24,593 | 14,95 |
| | 26 | | 10 | −23,674 | 14,85 |
| | 25 | | 9 | −22,752 | 14,65 |
| | 24 | + | 8 | −21,828 | 14,54 |
| | 23 | | 7 | −20,900 | 14,36 |
| | 22 | | 6 | −19,969 | 14,27 |
| | 21 | | 5 | −19,036 | 14,11 |
| | 20 | | 4 | −18,101 | 14,03 |
| | 19 | | 3 | −17,163 | 13,88 |
| | 18 | | 2 | −16,222 | 13,82 |
| připojení: 1–3 a 2–4 | 17c | | 1 | −15,280 | 13,67 |
| | 17b | | K | −15,280 | 13,67 |
| − | 17a | | 17 | −15,280 | 13,67 |
| | 16 | | 16 | −14,335 | 13,50 |
| | 15 | | 15 | −13,388 | 13,33 |
| | 14 | | 14 | −12,440 | 13,21 |
| | 13 | | 13 | −11,489 | 13,06 |
| | 12 | | 12 | −10,538 | 12,95 |
| | 11 | | 11 | −9,584 | 12,84 |
| | 10 | − | 10 | −8,630 | 12,74 |
| | 9 | | 9 | −7,674 | 12,64 |
| | 8 | | 8 | −6,717 | 12,57 |
| | 7 | | 7 | −5,759 | 12,49 |
| | 6 | | 6 | −4,801 | 12,43 |
| | 5 | | 5 | −3,841 | 12,37 |
| | 4 | | 4 | −2,881 | 12,34 |
| | 3 | | 3 | −1,921 | 12,31 |
| | 2 | | 2 | −0,961 | 12,30 |
| | 1 | | 1 | −0,000 | 12,29 |

*Obr. 19 – Odbočky PST Hradec*




*Obr. 20 – Přenosová soustava ČR [3, str. 20]*

# 6. Přenosová soustava ČR a EU

## 6.1 Přenosová soustava České republiky

Elektrizační soustavu ČR lze rozdělit na tři důležité, vzájemně propojené části: výrobu elektrické energie, přenosovou a distribuční soustavu. PST transformátory jsou samozřejmě součástí přenosové soustavy. Tato soustava obsahuje přenosové páteřní linky 400 a 220 kV a rozvodny. Jejím základním posláním je vyvedení elektrického výkonu z velkých tzv. systémových elektráren a přesun tohoto výkonu do nižších distribučních sítí o hladině 110 kV. Současně má za úkol propojit naší přenosovou soustavu s okolními partnerskými státy. Provozovatel přenosové soustavy je jen jeden a je jím společnost ČEPS a.s. Společnost ČEPS vlastní licenci udělenou Energetickým regulačním úřadem dle Energetického zákona. [3]

Do přenosové soustavy patří také mnoho prvků měření, řízení a regulace. Mnoho z těchto činností se provozuje na elektrických stanicích. Ty dělíme podle jejich účelu na transformovny, rozvodny a měnírny. Elektrická stanice se může skládat z několika rozvoden různých napětí. Jsou to velice důležité uzly přenosové soustavy. Jejich účelem je propojení částí vedení či pomocí transformátorů propojení přenosové soustavy se soustavou distribuční. [3]

V České Republice můžeme nalézt 33 elektrických stanic. 4 z nich propojují sítě 400 a 220 kV. 32 propojuje přenosovou s distribuční soustavou. 10 vyvádí výkon z elektráren. Rozvodny jsou obvykle venkovního provedení, ale výjimečně jsou zapouzdřené v ochranném izolačním médiu $SF_6$. [3]

Soustava je provozována tak, aby splňovala kritérium N-1. Tato schopnost znamená, že soustava dokáže pracovat v normálním stavu i po výpadku 1 prvku soustavy. To může být část vedení, transformátor či rozvodna.

Předpokládaný vývoj PS ČR do roku 2025: z dostupných informací je jasné, že hladina 220 kV nebude dále rozvíjena a možná bude časem přestavěna na 400 kV.

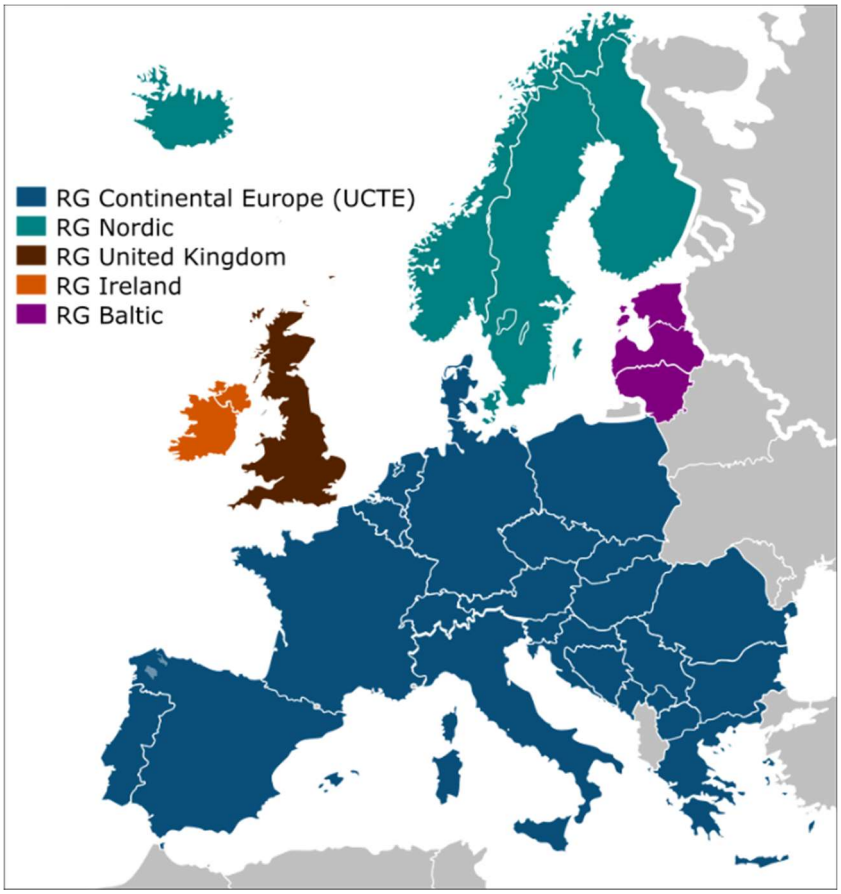
## 6.2 Propojená přenosová soustava Evropy ENTSO-E

Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny, anglicky ENTSO-E tj. European Network of Transmission Systém Operators for Electricity, je společnost spojující 43 operátorů přenosových soustav z 36 států po celé Evropě. Založeno roku 2008 je ENTSO-E nástupcem ETSO. Deklarace o vytvoření byla podepsána 27. června 2008 v Praze. Do chodu vešla 1. června 2009. Impulz k založení přišel ze strany Evropské unie, která zjistila nedostatečnou integraci trhů s elektřinou mezi několika členskými státy.

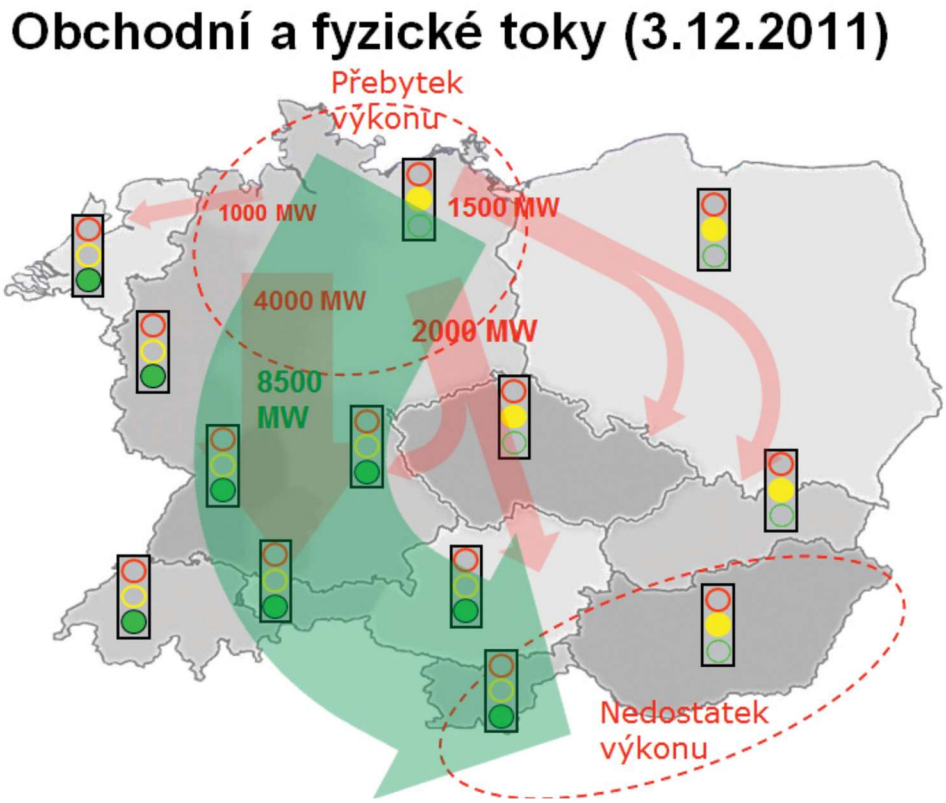
Mezi hlavní cíle ENTSO-E podle jejich stránek patří snaha o vyšší kooperaci mezi státy napříč Evropou, dále implementace politiky energií EU, integrace obnovitelných zdrojů elektrické energie a kompletace vnitřního trhů s energiemi. Tento společný trh by měl stát na pilířích přístupné, udržitelné a spolehlivé dodávky elektřiny. Česká republika stejně jako naši bezprostřední sousedé jsou součástí tohoto spolku.

Celková plocha ENTSO-E je rozdělena do pěti takzvaných synchronních zón a dva izolované státy (Kypr a Island). Tyto zóny jsou propojeny přes přenosové soustavy jednotlivých států. Společnou charakteristikou těchto zón je synchronní frekvence 50 Hz pro celou zónu. Výhodou těchto zón je dosažení vysokých potenciálních výrobních výkonů, vzájemná výpomoc v případě nouzových stavů či přetoky výkonů do částí s vysokou spotřebou a nízkou výrobou – dojde k ekonomičtějšímu provozu. Jednotlivé zóny jsou navzájem propojeny stejnosměrnými propojkami. Presidentem je v současné době Ben Voorhorst, viceprezident Hervé Laffaye.

Shrnutí: tento systém propojuje 41 operátorů z 34 zemí Evropy. Obsluhuje více než 532 milionů zákazníku pomocí více jak 300 tisíc kilometrů vedení.




*Obr. 21 – Synchronní zóny ENTSO-E*




*Obr. 22 – Přetoky výkonu ze severního Německa [3, str. 48]*

# 7. Příčiny a důsledky instalace PST

Hlavní příčinou instalace PST jsou přetoky výkonu. K tomuto fenoménu v přenosových soustavách dochází několik posledních let. Vedlo k němu několik faktorů.

Odklon Německé spolkové republiky od jaderné energetiky do roku 2022. Tento politický krok měl být původně v roce 2010 odložen o dalších 12 let. 11. března 2011 došlo k jaderné havárii v japonské Fukušimě. Německá vláda přikázala ihned odstavit 8 ze 17 aktivních reaktorů postavených v letech před rokem 1981. Již 30. března 2011 přišla Německá vláda s obnovou plánu na odstavení všech jaderných elektráren do roku 2022. Dalším bodem programu bylo zvýšení podílu obnovitelných zdrojů elektřiny z tehdejších 17 % na 35 %.

Náhrada jaderných elektráren vyšla Německo velice draho. Přechod zpět k uhelným elektrárnám by se mohl zdát kontraproduktivní v německé snaze snížit produkci $CO_2$. Vláda začala podporovat obnovitelné zdroje, a to se jasně projevilo na portfoliu výrobců elektřiny. V roce 2018 mají větrné a fotovoltaické elektrárny zaujímat až 42 % celkové výroby elektrické energie.

Obnovitelné zdroje elektřiny (OZE) jsou další příčinou vzniků přetoků výkonu přes ČR. Tyto zdroje mají nespolehlivou dodávku a v případě kladných klimatických podmínek se Německo stává silně exportním státem.

V neposlední řadě naší situaci ztížila instalace PST transformátorů v Polsku na hranici s Německem. Jsou to rozvodny Krajnik (2x1700 MVA), Gubin (2x1700 MVA) a Mikulowa (2x1700 MVA). Tyto PST omezují přetoky výkonu přes Polsko a tím ještě zhoršují situaci u nás.

Důsledkem omezení přetoků výkonů je snížení přetížení české přenosové soustavy. V některých případech se jedná až o desítky procent menší zatížení na určitých linkách. Pokud by nedošlo k omezení těchto přetížení, mohlo by v nejhorším případě dojít až k blackoutu.

# 8. Modelování v elektroenergetice

## 8.1 Obecně

Modelování v elektroenergetice je zásadním nástrojem při vývoji, výstavbě i provozu elektrizačních soustav. Pomocí modelů lze předcházet předpokládaným i skutečným poruchovým stavům. Analytické metody většinou tyto problémy nejsou schopny sledovat. Jejich zjednodušené podmínky a předpoklady mohou vést k nepřesnostem a chybám. Analytický výpočet bývá zdlouhavý a složitý. Při změně parametru pak musíme počítat od začátku. Model je reprezentací reálného systému. Je možno upravovat na něm parametry, změny konfigurace systému a vyzkoušet poruchové stavy, jež by byly ve skutečnosti neproveditelné. [10]

Modelů je celá řada. Možné dělení je na univerzální a speciální, stejnosměrné a střídavé, statické a dynamické. Speciální model reprezentuje část nebo prvek soustavy. Speciální modely používají dispečeři. Síť řídí podle změny konfigurace či parametrů soustavy. Univerzální model má nastavitelné parametry tak, aby mohl představovat libovolnou soustavu. Statické modely řeší ustálené stavy ať už normální, či poruchové. Dynamické modely reprezentují stavy přechodné. [10]

## 8.2 MATLAB Simulink a Powersystem Blockset

MATLAB je nástroj a zároveň programovací jazyk uvedený na trh v roce 1984. Developerem a vlastníkem je firma MathWorks, Inc. se sídlem v americkém Naticku. MATLAB je obsáhlý a rigorózní nástroj pro matematické operace s maticemi, funkcemi, rovnicemi apod. Simulink je oblíbenou nadstavbou MATLABU. Slouží ke grafickému programování modelů a simulací dynamických systémů ve velké škále oborů. V obsáhlých knihovnách bloků můžeme nalézt modely z hydrodynamiky, termodynamiky slabo a silnoproudé elektrotechniky a dalších. Simulink je úzce propojen s MATLABEM a využíván širokou inženýrskou komunitou. Studenti ČVUT mají možnost volně stáhnout licencovaný MATLAB verze 2018a.

Powersystem Blockset je knihovna bloků a analyzačních nástrojů pro modelování a simulace výkonových elektroenergetických systémů. Knihovna obsahuje bloky elektrických zdrojů, transformátorů, vedení, výkonové elektroniky, elektrických strojů a měřících zařízení. Dříve známý pod názvem SimPowerSystems je Powersystem Blockset výborným nástrojem pro simulaci dynamických modelů přenosových soustav, FACTS a dalších. Parametry se dají zadat přímo, či z konzole MATLAB, výsledky měření se dají okamžitě zobrazit a model se dá propojit s prvky jiných knihoven. Powersystem Blockset je vyvíjen firmou TEQSIM International s podporou přední energetické firmy Hydro-Québec, zajišťující výrobu a přenos elektrické energie v Québecu.

## 8.3 Základní bloky

### 8.3.1 POWERGUI

Graphical user interface, uživatelské grafické rozhraní, dovoluje uživateli používat nástroje pro analýzu modelu. Obsahuje tři možné metody řešení obvodu:

1) Continuous (průběžná metoda), využívající proměnný krok řešení (solver)

2) Diskrétní s fixním krokem řešení

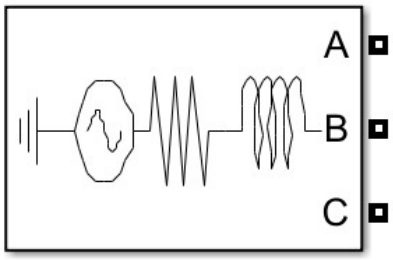
3) Fázorová metoda

Dále poskytuje možnost řešení statických stavů, změnu počátečních podmínek, nastavení toků výkonů, zobrazení frekvenčních charakteristik a hysterezních smyček. Blok POWERGUI musí být obsažen v každém modelu.

*Obr. 23 – Značka PowerGUI*

### 8.3.2 Three-Phase Source

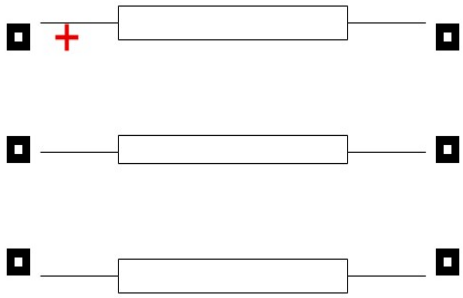
Blok implementuje trojfázový zdroj napětí s vnitřní RL impedancí. Tři vnitřní zdroje zapojeny do hvězdy se středem uzemněným nebo přístupným k dalšímu zapojení. Vnitřní odpor a induktance mohou být přímo zadány svými hodnotami. Dále zadáváme napětí fáze-fáze, fázorový úhel fáze A, frekvenci zdroje a zapojení (Y, Yn, Yg).




*Obr. 24 – Značka Three-Phase Source*

### 8.3.3 Distributed Parameter Line

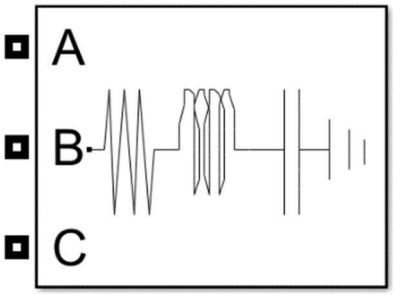
Blok reprezentuje N-fázové rozprostřené vedení se soustředěnými ztrátami. Model je založen na Bergeronově metodě putující vlny. Vedení je charakterizováno zkratovou impedancí a fázovou rychlostí. Zadáváme počet fází, frekvenci pro specifikaci parametrů RLC, odpor, indukčnost a kapacitu na kilometr. V neposlední řadě musíme zadat délku vedení v kilometrech.



*Obr. 25 – Značka Distributed Parameter Line*

### 8.3.4 Series RLC Load

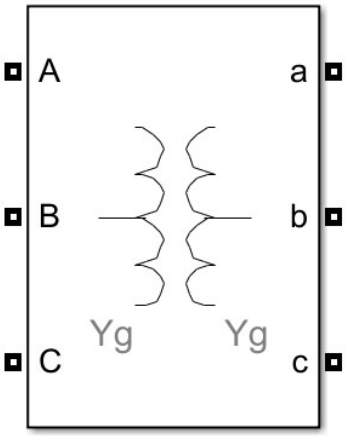
Blok implementuje model lineární zátěže jako kombinaci R L C prvků v sérii. Na specifikované frekvenci představuje konstantní impedanci. Zadáváme nominální napětí, frekvenci, výkon P, induktivní a kapacitní jalový výkon.




*Obr. 26 – Značka Series RLC Load*

### 8.3.5 Three-Phase Transformer (Two Windings)

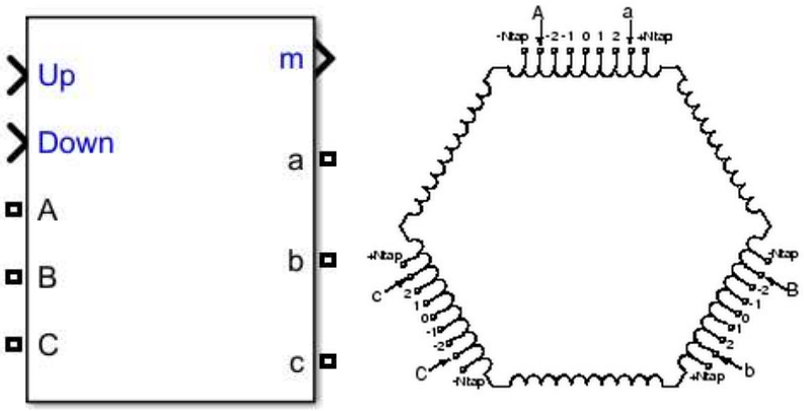
Tento blok obsahuje model trojfázového transformátoru složeného ze tří jednofázových transformátorů. Odpory a indukčnosti primárního a sekundárního vedení jsou zadány v poměrných jednotkách pu. Oboje vinutí může být zapojeno do hvězdy, hvězdy s přístupným nulovým bodem, uzemněné hvězdy, D1 a D11.




*Obr. 27 – Značka Three-Phase Transformer*

### 8.3.6 Three-Phase OLTC Phase Shifting Transformer Delta-Hexagonal (Phasor Type)

Blok na obrázku modeluje trojfázový PST transformátor s OLTC. Do modelového přenosového systému vnáší fázový posun. Tento fázový posun mezi fázory napětí způsobí omezení toku výkonu na vedení. Jedná se o fázorový model. Delta-hexagonální uspořádání se skládá ze tří párů vinutí propojených do hexagonální konfigurace.




*Obr. 28 a 29 – Značka a vnitřní uspořádání PST Delta-Hexagonal*

Fázový posun je určen nastavenou odbočkou (tap) podle vzorce:

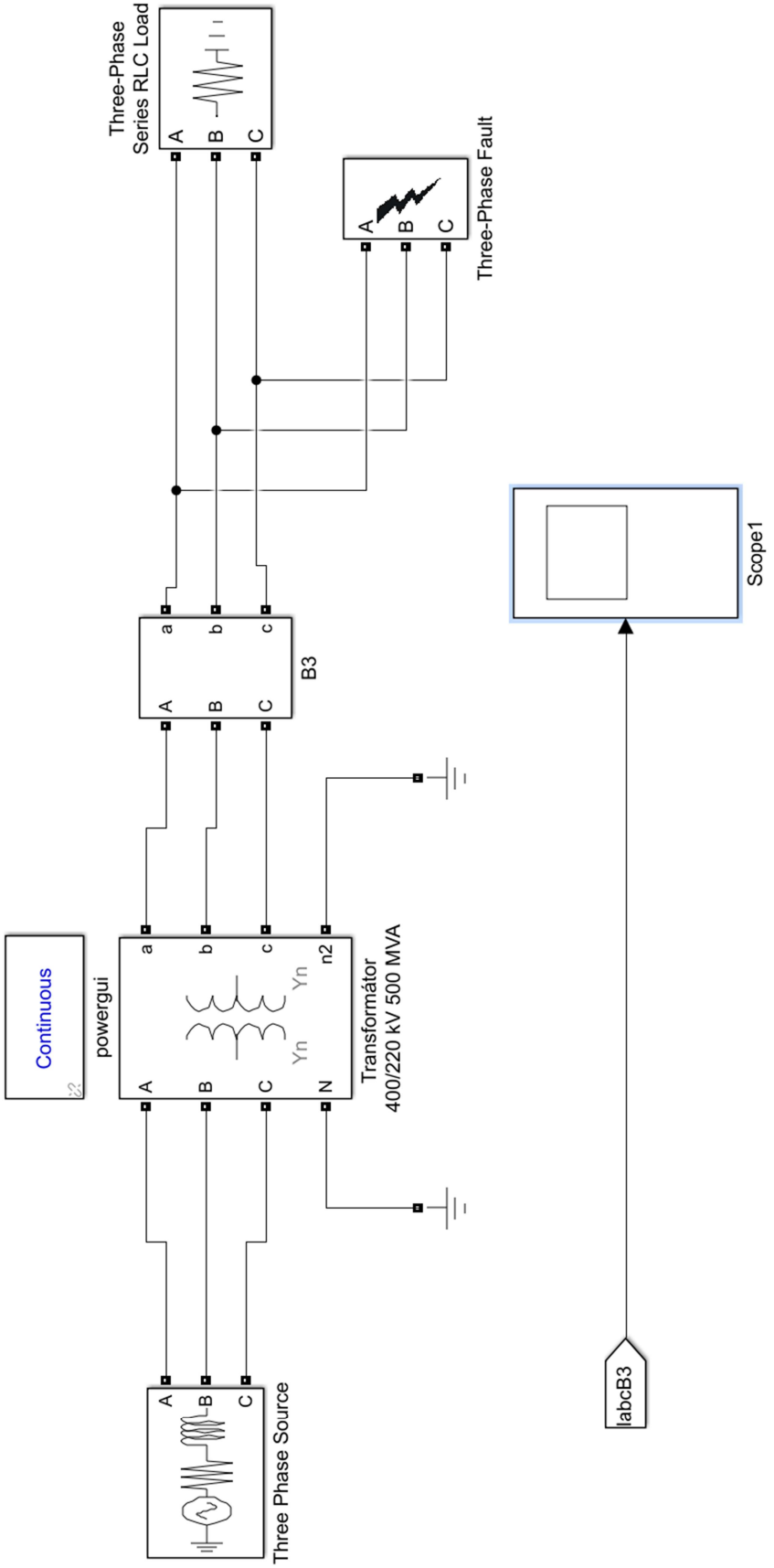
$$\psi = 2 * \tan^{-1}\left(\frac{-k}{\sqrt{3}}\right) \tag{8.1}$$

Kde ψ symbolizuje fázový posun mezi vstupním napětím $U_{ABC}$ a výstupním napětím $U_{abc}$. Fázový posun se pohybuje mezi -60° a +60° stupni. N je pozice odbočky a k je relativní pozice odbočky, kterou spočítáme podle vzorce: $k = N/N_{tap}$.

*Obr. 30 – Graf závislosti relativní pozice odbočky (k) a fázového posunu (ψ)*

## 8.4 Modelování přenosového transformátoru

### 8.4.1 Model




*Obr. 31 – Model přenosového transformátoru*

### 8.4.2 Parametry Simulace

Nastavení simulace

| | |
|---|---|
| Typ simulace: | Continuous (průběžná) |
| Čas začátku simulace: | 0,0 s |
| Čas konce simulace: | 0,02 s |

Nastavení solveru

| | |
|---|---|
| Typ solveru: | Variable-step (proměnlivý krok) |
| Solver: | ode23tb |

Trojfázový zdroj

| | |
|---|---|
| Konfigurace: | Y – grounded (uzemněná hvězda) |
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Fázorový posun fáze A: | 0° |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Trojfázový zkratový výkon: | 500 MVA |
| Poměr X/R: | 10 |

Trojfázový přenosový transformátor

| | |
|---|---|
| Zapojení primárního vinutí: | Yn |
| Zapojení sekundárního vinutí: | Yn |
| Nominální výkon: | 500 MVA |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Primární vinutí: | 400 kV |
| Sekundární vinutí: | 220 KV |

Trojfázová RLC sériová zátěž

| | |
|---|---|
| Konfigurace: | Y – grounded (uzemněná hvězda) |
| Sdružené napětí: | 220 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Činný výkon: | 10 MW |

### 8.4.3 Použité vzorce

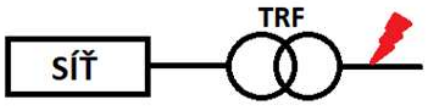
Reaktance transformátoru

$$x_T = u_k * \frac{S_v}{S_{nT}} \tag{8.2}$$

Reaktance soustavy

$$x_S = \frac{S_v}{S_{ks}} \tag{8.3}$$

### 8.4.4 Topologie modelu




*Obr. 32 – Topologie modelu*

### 8.4.5 Parametry modelu

Síť $S_{ks}$ = 2000 MVA

Transformátor $S_{nT}$ = 500 MVA $u_k$ = nezadáno

### 8.4.6 Výpočet napětí nakrátko transformátoru

Víme, že poměrné napětí nakrátko $u_k$ se rovná poměrné impedanci nakrátko $z_k$. Pro poměrnou impedanci nakrátko platí:

$$z_{1k} = \frac{Z_{1k}}{Z_{1N}} \tag{8.4}$$

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} \tag{8.5}$$

Kde $U_{1N}$ je jmenovité napětí a $I_{1N}$ je jmenovitý proud.
Pro jmenovitý proud platí:

$$I_{1N} = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{500*10^6}{\sqrt{3}*400*10^3} = 721\ A \quad (8.6)$$

Jmenovitá impedance:

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{\frac{400*10^3}{\sqrt{3}}}{721} = 320\ \Omega \quad (8.7)$$

Impedance nakrátko je součtem $R_1$, $L_1$, $R_2$ a $L_2$
$R_1$ = 0,64 Ω
$L_{1\sigma}$ = 0,08 H
$X_{1\sigma}$ = 2π * 50 * 0,08 = 25
$R_2$ = 0,19 Ω
$L_{2\sigma}$ = 0,02 H
Přepočet parametrů sekundárního vinutí na primár pomocí p.

$$R_2{}' = p^2 * R_2 \quad (2.11)$$

$$X_{2\sigma}{}' = p^2 * X_{2\sigma} \quad (2.11)$$

$R_2'$= 0,19 * (400/220)$^2$ = 0,62 Ω
$X_{2\sigma}'$= 0,02 * 2π * 50 * (400/220)$^2$ = 20,7 Ω
Celková impedance nakrátko:
$Z_{1k} = Z_1 + Z_2$ = 0,64 +j25 + 0,19 +j20,7 = 0,83 + j45,7 Ω
Reálnou část můžeme zanedbat a poměrnou impedanci dopočteme:

$$z_{1k} = \frac{Z_{1k}}{Z_{1N}} = \frac{45{,}7}{320} = 0{,}14\ (-)$$

Potom poměrné napětí nakrátko $u_k$ = 0,14.

### 8.4.7 Výpočet zkratového výkonu a proudu

Zvolíme vztažný výkon $S_v$ = 500 MVA a vztažné napětí (napětí v místě zkratu) $U_v$ = 220 kV.
Náhradní reaktance soustavy bude:

$$x_S = \frac{S_v}{S_{ks}} = \frac{500}{2000} = 0{,}25$$

Reaktance transformátoru:

$$x_T = u_k * \frac{S_v}{S_{nT}} = 0{,}14 * \frac{500}{500} = 0{,}14$$

Vypočtená celková náhradní reaktance:

$$x_{vyp} = x_s + x_T = 0{,}25 + 0{,}14 = 0{,}39$$

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3}*U_v} = \frac{500*10^6}{\sqrt{3}*220*10^3} = 1312\ A \quad (8.8)$$

Počáteční rázový zkratový proud:

$$I''_{k0} = k * \frac{I_v}{x_{vyp}} = 1{,}7 * \frac{1312}{0.39} = 5718\ A \quad (8.9)$$

Počáteční rázový zkratový výkon:

$$S''_{k0} = \sqrt{3} * U_v * I''_{k0} = \sqrt{3} * 220 * 10^3 * 5718 = 2{,}17\ MVA \quad (8.10)$$

### 8.4.8 Naměřené hodnoty

Ustálená hodnota proudu při zkratu $I_{zk}$ = 4500 A. Jedná se o maximální hodnotu. Abychom mohli vypočtenou a změřenou hodnotu porovnat musíme změřenou hodnotu vynásobit vysokonapěťovým koeficientem k.

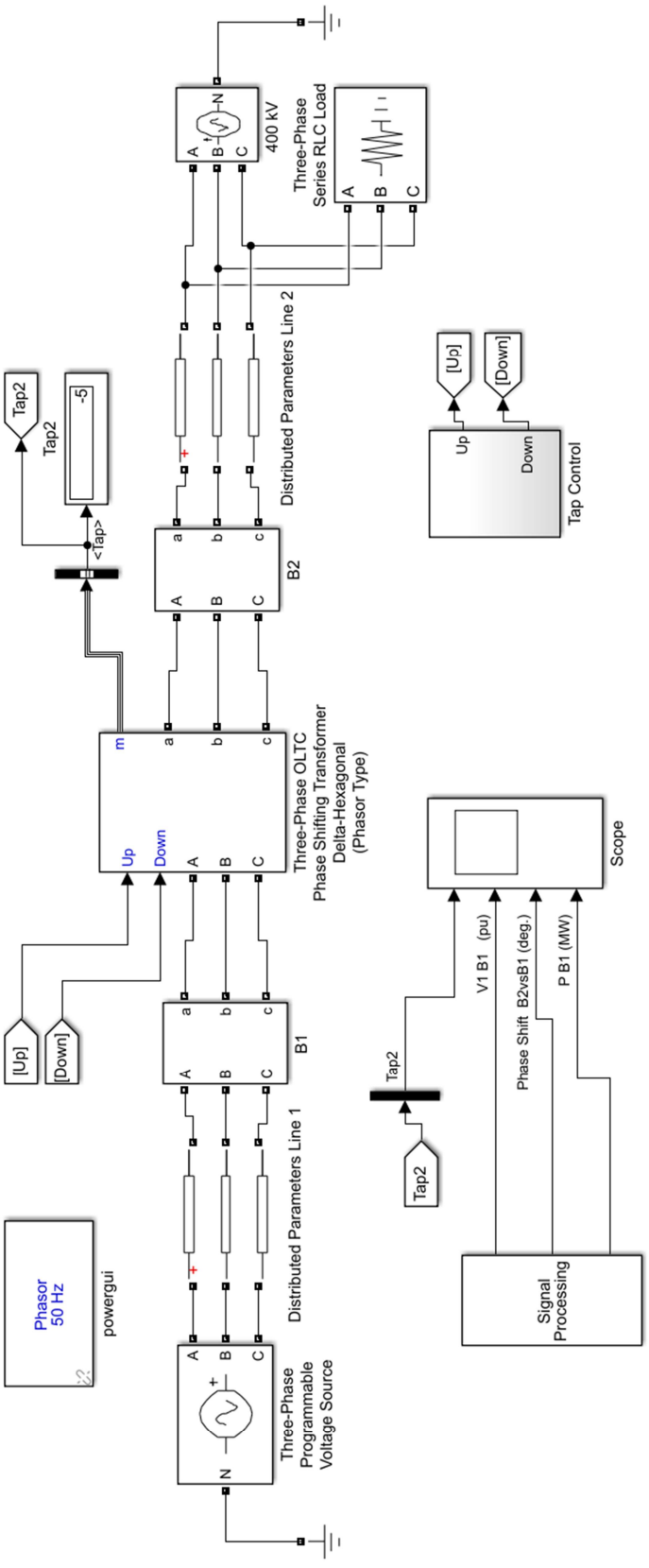
$$I'_{zk} = I_{zk} * k = 4500 * 1{,}7 = 7650\ A$$

Abychom přešli na efektivní hodnoty musíme výsledek podělit odmocninou ze dvou.

$$I''_{zk} = \frac{I'_{zk}}{\sqrt{2}} = \frac{7650}{\sqrt{2}} = 5400\ A$$

## 8.5 Modelování Delta-hexagonálního PST transformátoru

### 8.5.1 Model




*Obr. 33 – Model PST transformátoru*

### 8.5.2 Parametry Simulace

Nastavení simulace

| | |
|---|---|
| Typ simulace: | Fázorová |
| Čas začátku simulace: | 0,0 s |
| Čas konce simulace: | 50 s |

Nastavení solveru

| | |
|---|---|
| Typ solveru: | Variable-step (proměnlivý krok) |
| Solver: | ode23tb |

Trojfázové zdroje

| | |
|---|---|
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |

Vedení s rozprostřenými parametry 400 kV (dvakrát)

| | |
|---|---|
| Počet fází: | 3 |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Rezistance na jednotku délky: | 0,04 Ω/km |
| Induktance na jednotku délky: | 0,954*10^-3 |
| Kapacitance na jednotku délky: | 12,73*10^-9 |
| Délka linky: | 100 km |

Trojfázový PST delta-hexagonální transformátor (fázorový typ)

| | |
|---|---|
| Nominální výkon: | 800 MVA |
| Nominální napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Odpor při maximální odbočce: | 5*10^-3 pu |
| Rozptylová reaktance při max. odbočce: | 0,15 pu |
| Počet odboček na polovinu vinutí: | 10 |
| Počáteční odbočka: | 0 |
| Čas selekce odbočky: | 2,9 s |

Trojfázová RLC sériová zátěž

| | |
|---|---|
| Konfigurace: | Y – grounded (uzemněná hvězda) |
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Činný výkon: | 400 MW |

Přepínání odboček

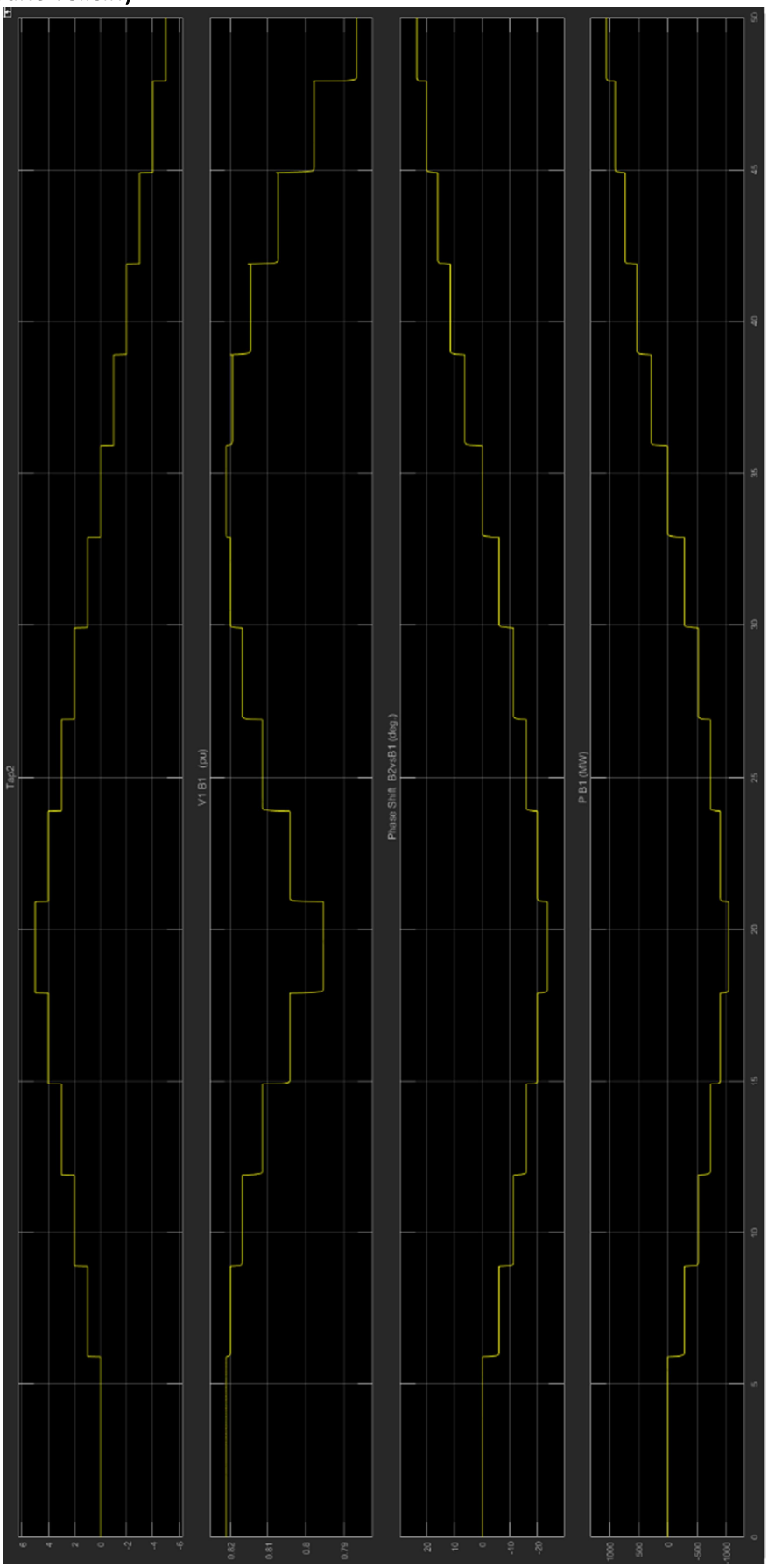
Generátor pulzů

| | |
|---|---|
| Amplituda: | 1 |
| Perioda: | 3 s |
| Šířka pulzu: | 5 % periody |

Generátor schodů

| | |
|---|---|
| Časy schodu UP: | 0 a 16 s |
| Časy schodů DOWN: | 0,17 a 47 s |

### 8.5.3 Sledované veličiny




*Obr. 34 – Naměřené průběhy*

### 8.5.4 Závěr/výsledek simulace

První sledovaný průběh ukazuje přepínání jednotlivých odboček. Průběh je jednoduchý a oboustranný, z 0 zvyšujeme po jedné do 5 a zpět do 0. Stejně postupujeme do záporných odboček.

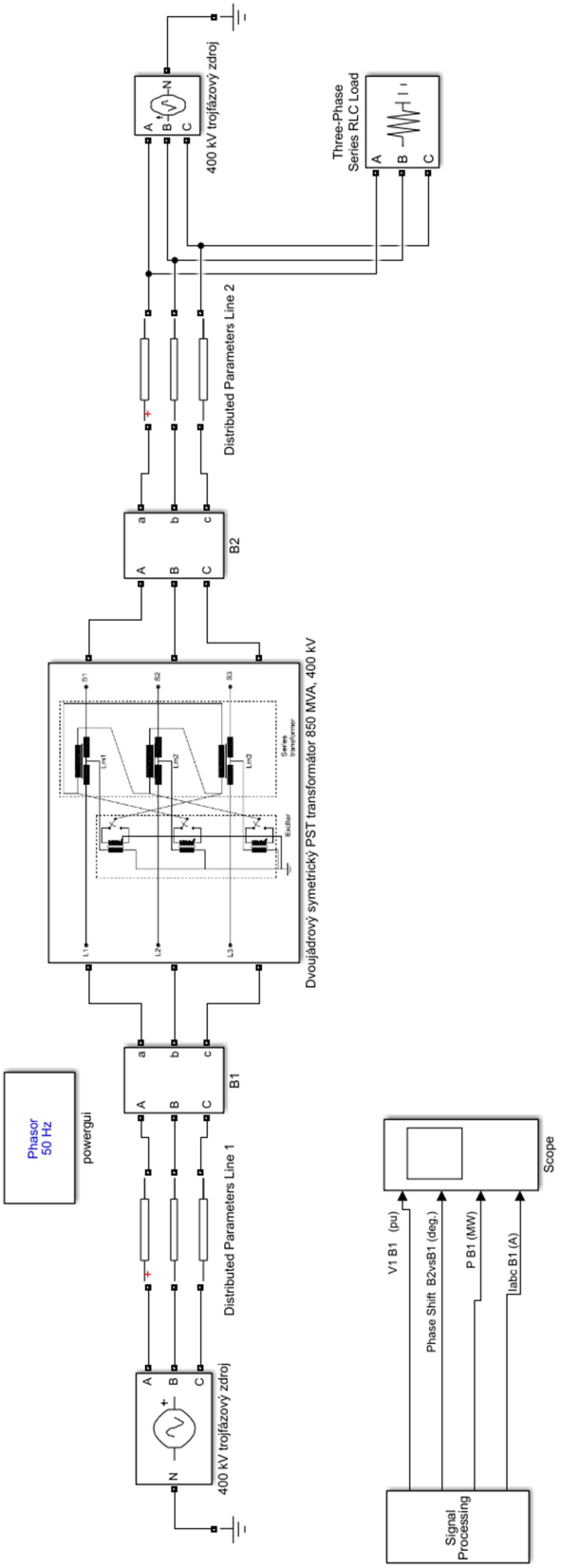
Druhý průběh ukazuje pokles napětí na trojfázovém měřícím bloku B1, který je umístěný před PST transformátor na levé straně. Průběh je zobrazen v poměrných jednotkách.

Asi nejdůležitější je třetí zobrazený průběh. Jedná se o fázový posun mezi napětími na měřicích blocích B1 a B2, tedy před a za PST transformátorem. Pozorujeme fázový rozdíl až 25°, potažmo -25°. Odbočce č.5 odpovídá fázový rozdíl -25°. Opak platí pro odbočku č.-5.

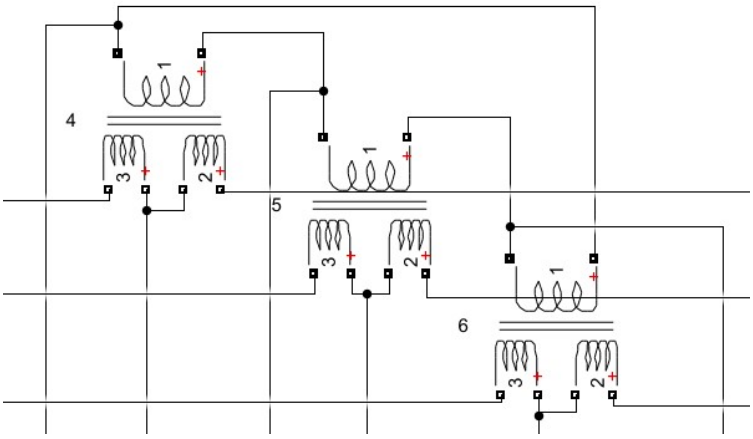
Čtvrtý průběh ukazuje změny toku výkonu. Extrém dosahuje až 1000 MW změnu toku v jednom i druhém směru.

## 8.6. Modelování symetrického dvoujádrového PST transformátoru

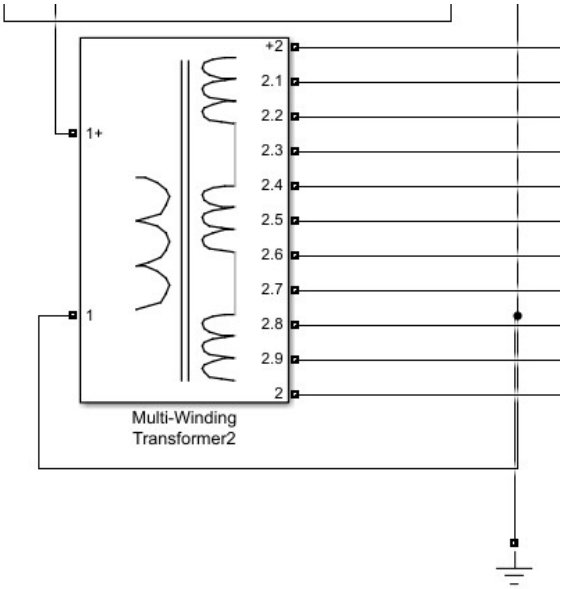
### 8.6.1 Model



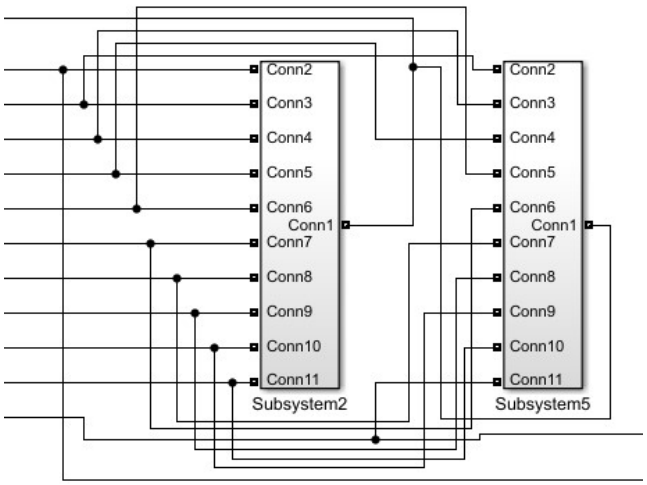

*Obr. 35 – Model symetrického dvoujádrového PST*



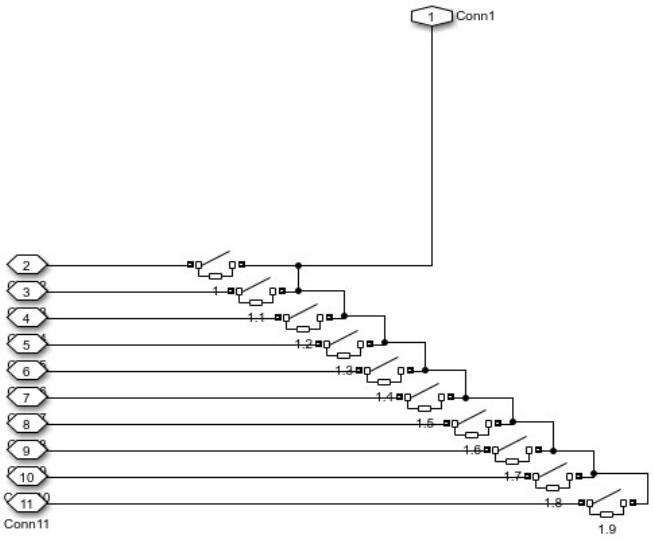

*Obr. 36 – Sériový transformátor symetrického PST*




*Obr. 37 – Jedna ze tří jednofázových jednotek paralelního transformátoru symetrického PST*




*Obr. 38 – Přepínače odboček pro kladný a záporný fázový posun*




*Obr. 39 – Vnitřní uspořádání přepínače odboček*

### 8.6.2 Parametry Simulace

Nastavení simulace

| | |
|---|---|
| Typ simulace: | Fázorová |
| Čas začátku simulace: | 0,0 s |
| Čas konce simulace: | 200 s |

Nastavení solveru

| | |
|---|---|
| Typ solveru: | Variable-step (proměnlivý krok) |
| Solver: | ode23tb |

Trojfázový zdroj (dvakrát)

| | |
|---|---|
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |

Vedení s rozprostřenými parametry 400 kV (dvakrát)

| | |
|---|---|
| Počet fází: | 3 |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Rezistance na jednotku délky: | 0,04 Ω/km |
| Induktance na jednotku délky: | 0,954*10^-3 |
| Kapacitance na jednotku délky: | 12,73*10^-9 |
| Délka linky: | 100 km |

Trojfázová RLC sériová zátěž

| | |
|---|---|
| Konfigurace: | Y – grounded (uzemněná hvězda) |
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Činný výkon: | 100 MW |

Jednofázové transformátory sériového transformátoru (třikrát)

| | |
|---|---|
| Nominální výkon: | 850 MVA |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Nominální napětí primárního vinutí: | 400 kV |
| Nominální napětí sekundárního vinutí: | 400 kV |

| | |
|---|---|
| Odpor primárního vinutí: | 0,376 Ω |
| Indukčnost primárního vinutí: | 0,0479 H |
| Odpor poloviny sekundárního vinutí: | 0,188 Ω |
| Indukčnost poloviny sekundárního vinutí: | 0,0239 H |

Odbočkové jednofázové transformátory paralelního transformátoru (třikrát)

| | |
|---|---|
| Počet odboček: | 9 (rovnoměrně rozprostřené) |
| Nominální výkon: | 850 MVA |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Nominální napětí primárního vinutí: | 400 kV |
| Nominální napětí sekundárního vinutí: | 400 kV |
| Odpor primárního vinutí: | 0,376 Ω |
| Indukčnost primárního vinutí: | 0,0479 H |
| Odpor sekundárního vinutí: | 0,188 Ω |
| Indukčnost sekundárního vinutí: | 0,0239 H |

### 8.6.3 Výsledky simulace

Model byl složen ze základních prvků podle obrázku číslo 9. Z obrázku lze jasně vysledovat topologii a zapojení jednotlivých vinutí transformátorů, ale výrobce neposkytne přesné údaje o napěťových poměrech či výkonech jednotlivých jednofázových transformátorů. Proto je důležité brát simulaci s určitým odstupem a brát jí pouze jako model základních principů, na kterých PST v praxi fungují.

Simulace je nastavena na 200 sekund. Z toho prvních 5 sekund je transformátor spínači odpojen a dvě sítě v podobě zdroje a vedení jsou propojeny napřímo. Dále je každých pět sekund připojena další odbočka a odpojena předchozí. Po 100 sekundách se spínače přepnou do takové polohy, aby se indukovalo napětí na sekundáru paralelní jednotky v opačném směru. Tím se změní směr phase shiftu a odpovídající směr toku výkonu.

První měřenou veličinou je velikost napětí před PST transformátorem (měřicí bod B1) v poměrných jednotkách. Můžeme pozorovat, že se velikost napětí snižuje až na ¾ svojí původní velikosti. Je to dáno zpětnou vazbou paralelního transformátoru. Napětí musí paralelní jednotka odebrat, aby ho mohla do sériové znovu přidat, a tak vzniknul fázorový posun.

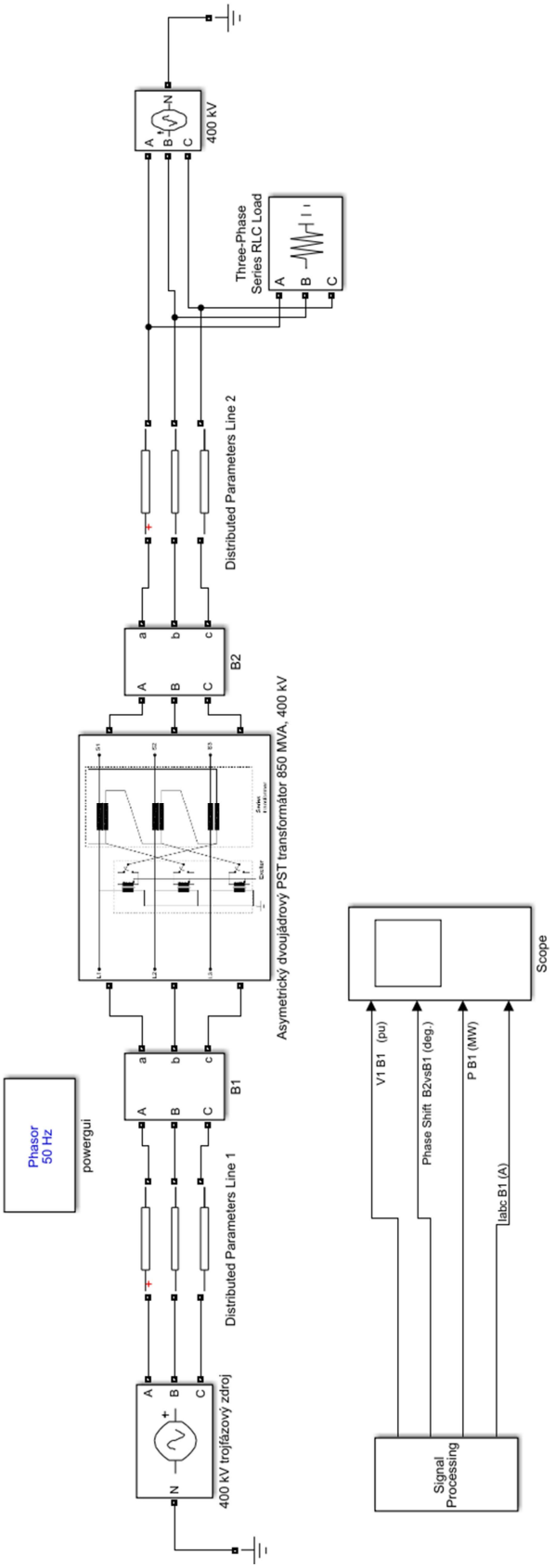
Samotný phase shift je zobrazen ve druhém grafu. Ve svém maximu dosahuje až 22° a při nejvyšší odbočce překvapivě mírně poklesne. Třetí graf zobrazuje výkon procházející měřicím bodem B1. Nejvyššímu phase shiftu 22° odpovídá výkon o 875 MW. Poslední graf ukazuje průchod proudu v místě B1.

### 8.6.4 Sledované veličiny

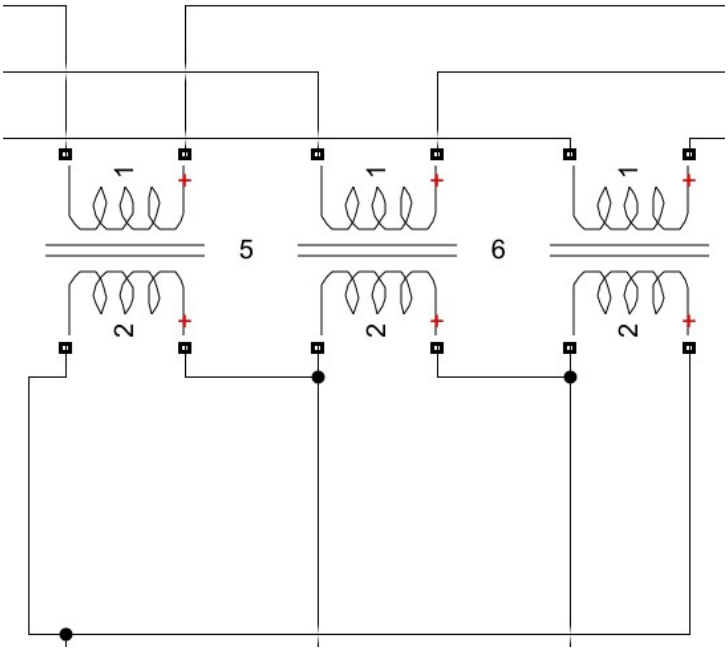
*Obr. 40 – Sledované veličiny symetrického PST*

## 8.7. Modelování asymetrického dvoujádrového PST transformátoru

### 8.7.1 Model




*Obr. 41 – Model asymetrického dvoujádrového PST*




*Obr. 42 – Sériový transformátor asymetrického PST*

### 8.7.2 Parametry Simulace

Nastavení simulace

| | |
|---|---|
| Typ simulace: | Fázorová |
| Čas začátku simulace: | 0,0 s |
| Čas konce simulace: | 200 s |

Nastavení solveru

| | |
|---|---|
| Typ solveru: | Variable-step (proměnlivý krok) |
| Solver: | ode23tb |

Trojfázový zdroj (dvakrát)

| | |
|---|---|
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |

Vedení s rozprostřenými parametry 400 kV (dvakrát)

| | |
|---|---|
| Počet fází: | 3 |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Rezistance na jednotku délky: | 0,04 Ω/km |
| Induktance na jednotku délky: | 0,954*10^-3 |
| Kapacitance na jednotku délky: | 12,73*10^-9 |
| Délka linky: | 100 km |

Trojfázová RLC sériová zátěž

| | |
|---|---|
| Konfigurace: | Y – grounded (uzemněná hvězda) |
| Sdružené napětí: | 400 kV |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Činný výkon: | 100 MW |

Jednofázové transformátory sériového transformátoru (třikrát)

| | |
|---|---|
| Nominální výkon: | 850 MVA |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Nominální napětí primárního vinutí: | 400 kV |
| Nominální napětí sekundárního vinutí: | 400 kV |
| Odpor primárního vinutí: | 0,376 Ω |
| Indukčnost primárního vinutí: | 0,0479 H |
| Odpor poloviny sekundárního vinutí: | 0,376 Ω |
| Indukčnost poloviny sekundárního vinutí: | 0,0479 H |

Odbočkové jednofázové transformátory paralelního transformátoru (třikrát)

| | |
|---|---|
| Počet odboček: | 9 (rovnoměrně rozprostřené) |
| Nominální výkon: | 850 MVA |
| Frekvence: | 50 Hz |
| Nominální napětí primárního vinutí: | 400 kV |
| Nominální napětí sekundárního vinutí: | 400 kV |
| Odpor primárního vinutí: | 0,376 Ω |
| Indukčnost primárního vinutí: | 0,0479 H |
| Odpor sekundárního vinutí: | 0,188 Ω |
| Indukčnost sekundárního vinutí: | 0,0239 H |

### 8.7.3 Výsledky simulace

Model byl složen ze základních prvků podle obrázku číslo 10. Znovu byla použita stejná topologie, ale napěťové převody a výkony jednotlivých transformátorů jsou čistě akademické.

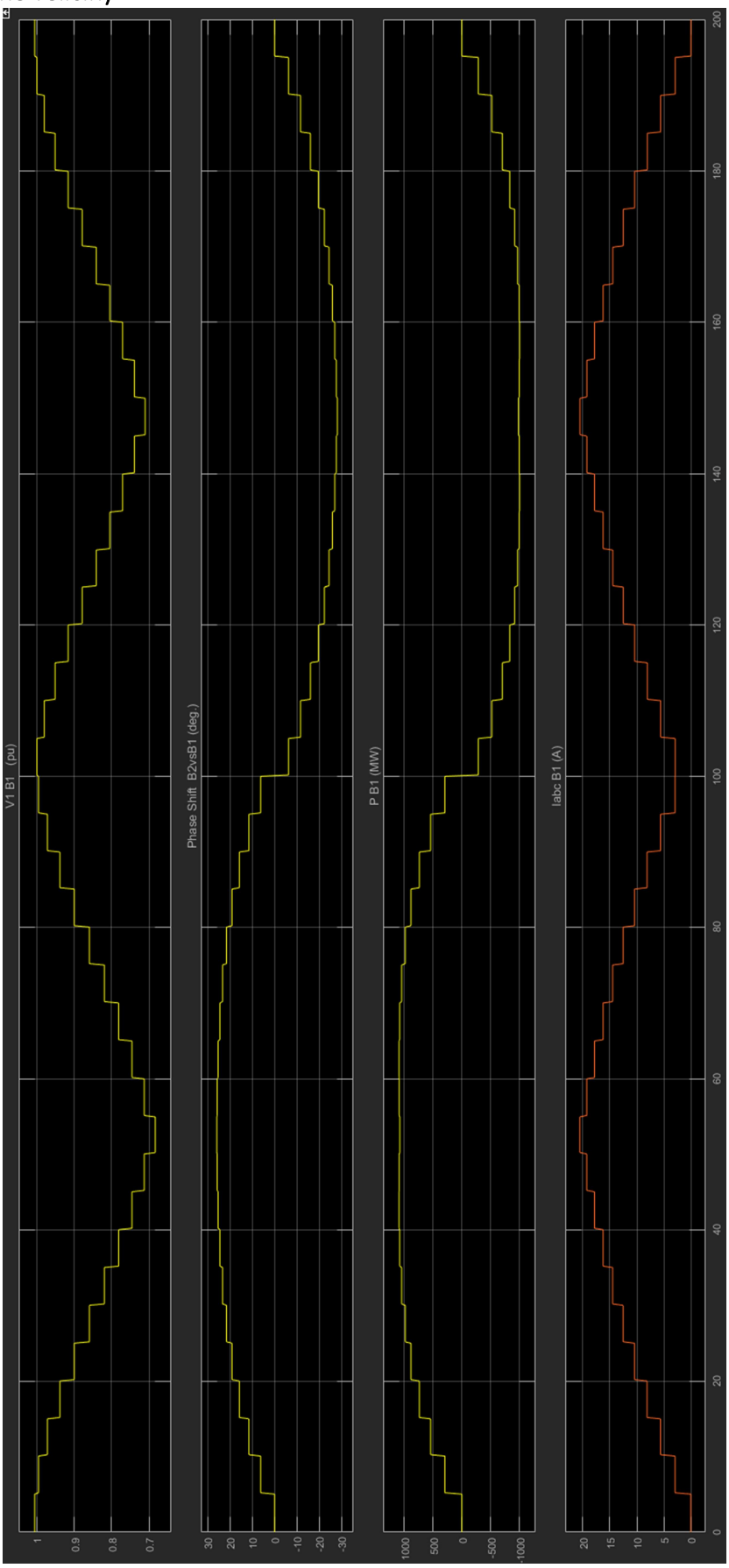
Simulace znovu běží 200 sekund a přepínání odboček na sekundárním vinutí paralelního transformátoru probíhá úplně stejně jako u symetrického uspořádání. Topologie samotného modelu se nemění. Dva zdroje a dvoje vedení reprezentují dvě přenosové sítě propojené zprvu napřímo, po 5 sekundách PST transformátorem.

Na průběhu napětí v bodě B1 pozorujeme podobný propad jako v předchozím modelu. Jedná se znovu o zpětnou vazbu paralelního transformátoru, který napětí odebere, aby ho v sériovém znovu přidal.

Phase shift jako nejdůležitější veličina vystoupal v tomto případě až na 26° jak do plusu, tak do mínusu. Oproti symetrickému vyšel asymetrický PST u fázorového posunu lépe. Nepozorujeme žádný propad při nejvyšší odbočce. Phase shiftu 26° odpovídá podle třetího průběhu tok výkonu o 1000 MW. Poslední průběh znovu ukazuje proud bodem měření B1.

Průběhy u asymetrického PST vyšly obecně lépe a odpovídají rozšířenějšímu využití právě asymetrických PST ve světě a EU.

### 8.7.4 Sledované veličiny




*Obr. 43 – Sledované veličiny*

# 7. Závěr

Bakalářská práce se dá rozdělit na dvě hlavní části, a to teoretickou a praktickou. V první ze dvou jmenovaných částí se čtenář může seznámit se základní teorií transformátorů. Jmenovitě je zde popsán základní princip fungování transformátorů, jejich matematický popis a z něj vycházející náhradní schéma a fázorový diagram. Zvláštní pozornost je věnována trojfázovým přenosovým transformátorům, jejich využití a základním parametrům v české přenosové soustavě. V další části je vysvětlen pojem FACTS a rozdělení prvků FACTS do skupin. PST transformátory, které jsou popsány v další části, obecně patří mezi pasivní prvky FACTS. Ve zkratce jsou zde popsány různé prvky FACTS a jejich použití pro přenosové soustavy.

PST transformátory se stávají stále důležitějším systémem na linkách propojujících dvě různé přenosové soustavy například dvou sousedících států. V kapitole číslo čtyři je obecně vysvětlen jejich funkční princip. Ten je také popsán matematickými rovnicemi. Hlavní myšlenkou je vnesení fázorového posunu mezi dvěma napětími. Fázorový posun odpovídá přenesenému jalovému a činnému výkonu. Pomocí nastavení odboček může tedy operátor jednoduše korigovat přetok výkonu mezi dvěma soustavami. Popsány jsou jednotlivé typy PST transformátorů, jejich odlišnosti ve funkci a konstrukci. Jako příklady z praxe jsou poskytnuty fotky a parametry již existujících PST v Evropě a ve světě. V krátkosti je popsána česká a evropská přenosová síť, která úzce souvisí se samotnou funkcí PST transformátorů. Poslední kapitolou teoretické části je shrnutí faktů, které vedly ke vzniku přetoků výkonů, které jsou definovány výše v textu.

Praktická část začíná seznámením s modelováním v elektroenergetice a jeho důležitostí pro praxi. Pro modelování zadaných transformátorů byl po doporučení vedoucím práce zvolen program, licencovaný pro FEL ČVUT, MATLAB Simulink a jeho rozšíření pro elektroenergetiku a výkonovou elektroniku Powersystem Blockset. Popsány jsou základní bloky, ze kterých jsou složeny samotné modely.

Hlavním výstupem bakalářské práce jsou jednotlivé modely transformátorů. Postupně jsou představeny modely přenosového transformátoru, jednojádrového PST v delta-hexagonálním zapojení, dvoujádrového symetrického a asymetrického PST. Pro ověření výsledků simulace přenosového transformátoru se základními parametry 500 MVA, 400/220 kV, byl vypočítán zkratový proud a výkon. Zkratový proud spočítaný přes náhradní reaktance a zkratový proud změřený osciloskopem ve stejném místě se lišily o 400 A. To lze přisoudit nepřesnému dopočtu náhradních reaktancí transformátoru.

Jednojádrový PST delta-hexagonální transformátor byl vybrán z předpřipravených modelů rozšíření Powersystem Blockset. Oproti dalším modelům není složen ze základních prvků. Má však jednodušší ovládání odboček, které je realizované skrz signály Simulink. Přiloženy jsou výsledné průběhy několika nejdůležitějších veličin a parametry simulace.

Dvoujádrové PST transformátory jsou složeny ze základních prvků. Jejich topologie, či uspořádání byla převzata ze zdroje č.12. Hodnoty napěťových převodů či výkonů jednotlivých prvků jsou neveřejné informace. Na paralelní části jsou pro jednotlivé fáze použity jednofázové odbočkové transformátory. Na sériové části jsou pak použity neodbočkové transformátory. Přepínání odboček je realizováno automaticky přes spínače, kdy je každých 5 sekund přepnuta další odbočka. Výsledky simulací jsou přiloženy pro průběhy důležitých veličin jako je phase shift nebo výkonový tok. Lépe z obou simulací vyšel asymetrický PST, který je v praxi používanější variantou.

Všechny přiložené modely mají svá omezení pro další použití. Nejsou reálným vyobrazením transformátorů. Magnetická jádra transformátorů nejsou saturovatelná. Modely slouží pouze pro omezené simulace nízkofrekvenčních situací. Topologie PST modelů je jednoduchá a představuje propojení dvou soustav. Pro použití ve složitějších případech by musely být přehodnoceny parametry jednotlivých jednofázových transformátorů.

Obecně jsou PST transformátory pro operátory přenosových soustav vysokou počáteční investicí, která by se měla vrátit. Ochrana vlastní přenosové soustavy před přetoky výkonů z cizích soustav se postupně stala za poslední roky prioritou operátorů. Můžeme tedy předpokládat nárůst počtu PST transformátorů a pokračování v jejich dalším vývoji.

Výsledkem této bakalářské práce je jednak teoretický rozbor zadaného problému, ale hlavně přiložené modely a výsledky z nich vyplývající.

# 8. Zdroje


[1] Doc. Ing. Petr Voženílek a kol.: „ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE“, 2015, ČVUT, Praha, ISBN 978-80-01-04875-7

[2] Tlustý, J., a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, Praha, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04940-2

[3] Ing. René Honiš a kol.: PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY, ISBN 978-80-905392-3-5

[4] James H. Harlow: Electric power transformer engineering, USA, 2004, CRC PRESS, ISBN 0-8493-1704-5

[5] Phase Shift Transformers Modelling, ENTSO-E, 2014

[6] TSCNET Services GmbH, Dostupné z: https://www.tscnet.eu/psts-at-mikulowa-ready-for-use/ [vid. 7. dubna 2018]

[7] Pokluda, M.: Phase Shifting Transformers, ČEPS, a.s., Harrachov, září 2013

[8] James McIver, SIEMENS Energy, Inc., Phase Shifting Transformers – Principles, Design Aspects and Operation, Dostupné z: http://w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/events/Documents/Transformer%20Technical%20Seminar_Spring%202016/2-7_May%2025_McIver_Phase%20Shifter%20Principles.pdf [vid. 7. dubna 2018]

[9] Tamini Trasformatori S.r.l., Dostupné z: http://www.tamini.it/product-focus/phase-shifting-transformers-pst [vid. 7. dubna 2018]

[10] Prof. Ing. Ladislav Reiss a kol.: Teoretická Elektroenergetika 1, 1977, Bratislava, ALFA

[11] User’s Guide, SimPowerSystems for Use with Simulink, Hydro-Québec, TransÉnergie Technologies, Version 3, 2003

[12] Jody Verboomen a kol.: „Phase Shifting Transformers: Principles and Applications“, 2005, TU Delft, KU Leuven, Nizozemsko, ISBN 90-78205-02-4

# 9. Seznam zkratek

| | |
|---|---|
| ČEPS | Česká energetická přenosová soustava |
| PST | Phase shifting transformer |
| OZE | Obnovitelné zdroje elektrické energie |
| ENTSO-E | European Network of Transmission System Operators for Electricity |
| FACTS | Flexible Alternating Current Transmission System. |
| OLTC | On load tap changers |
| PAR | Phase angle regulator |
| QBT | Quadrature booster |

# 10. Seznam obrázků


| | | |
|---|---|---|
| Obr. 1 | Magnetické toky transformátoru | [1, str. 47] |
| Obr. 2 | Náhradní schéma transformátoru | [1, str. 47] |
| Obr. 3 | Náhradní schéma transformátoru | [1, str. 49] |
| Obr. 4 | Fázorový diagram | [1, str. 49] |
| Obr. 5 | Trojfázový systémový transformátor | [3, str. 34] |
| Obr. 6 | PST transformátor mezi 2 soustavami | [4, str. 87] |
| Obr. 7 | Delta-hexagonální zapojení | [4, str. 94] |
| Obr. 8 | Jednojádrové PST transformátory | [4, str. 93] |
| Obr. 9 | Dvoujádrový symetrický PST transformátor | [12, str. 6] |
| Obr. 10 | Dvoujádrový asymetrický PST transformátor | [12, str. 5] |
| Obr. 11 | Phase Angle Regulator | [5, str. 6] |
| Obr. 12 | Quadrature Booster | [5, str. 8] |
| Obr. 13 | PST v Evropě | [7] |
| Obr. 14 | PST Slovinsko | [7] |
| Obr. 15 | PST Arizona | [8] |
| Obr. 16 | PST Terna | [9] |
| Obr. 17 | PST Hradec | |
| Obr. 18 | Štítek PST Hradec | |
| Obr. 19 | Odbočky PST Hradec | |
| Obr. 20 | Přenosová soustava ČR | [3, str. 20] |
| Obr. 21 | Synchronní zóny ENTSO-E | |
| Obr. 22 | Přetoky výkonu ze severního Německa | [3, str. 48] |
| Obr. 23 | Značka PowerGUI | |
| Obr. 24 | Značka Three-Phase Source | |
| Obr. 25 | Značka Distributed Parameter Line | |
| Obr. 26 | Značka Series RLC Load | |
| Obr. 27 | Značka Three-Phase Transformer | |
| Obr. 28 | Značka PST Delta-Hexagonal | |
| Obr. 29 | Vnitřní uspořádání PST Delta-Hexagonal | |
| Obr. 30 | Graf závislosti relativní pozice odbočky (k) a fázového posunu (ψ) | |
| Obr. 31 | Model přenosového transformátoru | |
| Obr. 32 | Topologie modelu | |
| Obr. 33 | Model PST transformátoru | |
| Obr. 34 | Naměřené průběhy | |
| Obr. 35 | Model symetrického dvoujádrového PST | |
| Obr. 36 | Sériový transformátor symetrického PST | |
| Obr. 37 | Jedna ze tří jednofázových jednotek paralelního transformátoru symetrického PST | |
| Obr. 38 | Přepínače odboček pro kladný a záporný fázorový posun | |
| Obr. 39 | Vnitřní uspořádání přepínače odboček | |
| Obr. 40 | Sledované veličiny symetrického PST | |
| Obr. 41 | Model asymetrického dvoujádrového PST | |
| Obr. 42 | Sériový transformátor asymetrického PST | |
| Obr. 43 | Sledované veličiny | |

# 11. Seznam symbolů

| | | |
|---|---|---|
| e | Indukované elektromotorické napětí | [V] |
| $u_i$ | Indukované napětí | [V] |
| ψ | Spřažený magnetický tok | [Wb] |
| N | Počet závitů cívky | [-] |
| ϕ | Magnetický tok | [Wb] |
| U, u | Napětí | [V] |
| R | Elektrický odpor | [Ω] |
| I, i | Elektrický proud | [A] |
| L | Indukčnost | [H] |
| f | Frekvence | [Hz] |
| X | Reaktance | [Ω] |
| S | Zdánlivý výkon | [VA] |
| Z | Impedance | [Ω] |
| φ | Fázový úhel napětí | [°] |
| P | Činný výkon | [W] |
| Q | Jalový výkon | [VAr] |
| α | Regulační úhel PST | [°] |
| $Z_v$ | Vztažná impedance | [Ω] |
| $U_k$ | Napětí nakrátko transformátoru | [-] |
| $S_{nT}$ | Výkon transformátoru | [VA] |
| $S_{ks}$ | Trojfázový zkratový výkon soustavy | [VA] |