

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Řízení napětí a činného/jalového výkonu v elektrizačních  
soustavách s použitím transformátorů s přepínačem odboček**

**autor:**

**Bc. Jakub Slivoně**

**2013**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub SLIVONĚ**  
Osobní číslo: **E11N0132P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Řízení napětí a činného/jalového výkonu v elektrizačních soustavách s použitím transformátorů s přepínačem odboček**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V této práci komplexně obsáhnete problematiku řízení napětí, činného a jalového výkonu v elektrizační soustavě, zejména však:


1. zpracujte teoretický základ k řešení chodu soustavy (admitanční matice, Gauss-Seidelova metoda, Newton-Raphsonova metoda, jalové meze v PU uzlech, ad.)
2. zpracujte možnosti modelování transformátorů s přepínačem odboček pro V/P/Q regulaci v Gauss-Seidelově a v Newton-Raphsonově metodě dle dostupné literatury
3. vytvořte program ve vhodném prostředí (Matlab, či jiné) se začleněním obou numerických metod s nejvýkonnějšími algoritmy pro transformátory s přepínačem odboček
4. proveďte simulace na sítích různého typu (distribuční, přenosové), rozsahu (malé, rozsáhlé) i složitosti s ohledem na regulaci napětí, činného a jalového výkonu, s důrazem na numerickou stabilitu, rychlost a přesnost výpočtu. Testové sítě budou k dispozici.
5. vzhledem k současným trendům v oblasti Smart Grids nastudujte a proveďte simulaci řízení napětí v rozsáhlejší distribuční soustavě s aplikací jak transformátorů s přepínačem odboček tak i kondenzátorových baterií, distribuovaných zdrojů energie, ad.
6. V závěru vyhodnoťte chování použitých logik a algoritmů pro řízení napětí, činného a jalového výkonu pomocí transformátorů s přepínačem odboček a zhodnoťte potenciál tohoto přístupu v současných i budoucích elektrizačních sítích v České republice.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. Grainger, J. J. and Stevenson, W.D. : Power System Analysis, McGraw-Hill, 1994, ISBN 0-07-061293-5
2. Exposito, A.G., Conejo, A. J. and Canizares, C.: Electric Energy Systems - Analysis and Operation, CRC Press, 2009, ISBN 978-0-8493-7365-7
3. Gross, C. A.: Power System Analysis - 2nd edition, John Wiley & Sons, 1986, ISBN 0471862061
4. Crow, M.: Computational Methods for Electric Power Systems, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-1352-X
5. Cutsem, T.V. and Vournas, C. : Voltage Stability of Electric Power Systems, Springer, 2008, ISBN 978-0-7923-8139-6

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Veleba**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá řešením chodu elektrizačních soustav se začleněním transformátorů s přepínači odboček pod zatížením pro U/Q/P regulaci. Jsou představeny metodiky a algoritmy pro modelování výše uvedeného problému v numerických metodách Gauss-Seidel a Newton-Raphson v prostředí MATLAB 7.1. Důraz byl kladen na všestrannost použití vytvořených programů, tj. pro řešení libovolně velké elektrizační soustavy vč. optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů pro co nejlepší splnění daných cílových U/Q/P ve vybraných uzlech/linkách sítě. K ověření správnosti a funkčnosti použitých algoritmů bylo testováno široké spektrum sítí různého rozsahu a výsledky byly porovnány s jiným, nezávislým softwarem. Je také předvedena praktická ukázka využití programů pro simulaci řízení napětí ve vybrané distribuční soustavě. V závěru práce jsou jednotlivé přístupy k modelování regulačních transformátorů vyhodnoceny a je diskutován potenciál jejich dalšího využití v elektrizační soustavě České republiky.

## **Klíčová slova**

provoz elektrizačních soustav, metoda uzlových napětí, řešení chodu soustavy, metoda Gauss-Seidel, metoda Newton-Raphson, regulační transformátor pod zatížením, přepínač odboček.

## **Abstract**

This thesis deals with load flow analysis of electric power systems with included on-load tap changing (OLTC) transformers for V/Q/P control. Methodologies and algorithms are presented for modeling the above problem using Gauss-Seidel and Newton-Raphson methods in MATLAB 7.1. Main emphasis was placed on versatility of created programs, i.e. for solving an arbitrarily large power system incl. optimal tap settings for meeting the V/Q/P targets in selected buses/branches. Wide range of test power systems was tested to verify the performance of the algorithms, results were compared with another, independent software. Practical use of programs is demonstrated when voltage control in the chosen distribution network is simulated. Individual approaches for modeling OLTC transformers are assessed along with their potentials for further use in electric power system of Czech Republic.

## **Keywords**

power system operation, node voltage method, load flow analysis, Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method, on-load tap-changing transformer, tap changer.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální (výpočetní program MATLAB 7.1 (R14) - školní verze).

V Plzni, dne 6.5.2013

Jakub Slivoně

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Janu Velebovi za odborné vedení, konzultace, zapůjčenou literaturu a poskytnutí dostatku testových sítí s jejich výsledky pro finální porovnání. Také děkuji panu M. Vykoupilovi a společnosti ČEZ, a.s. za poskytnutou exkurzi, materiály a odbornou pomoc.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 MATEMATICKÝ MODEL ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....</b>	<b>12</b>
1.1 MATEMATICKÝ MODEL VEDENÍ .....	13
1.2 MATEMATICKÝ MODEL DVOJVINUŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU .....	13
1.2.1 Odvození parametrů náhradního modelu .....	14
1.3 MATEMATICKÝ MODEL TROJVINUŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	16
1.4 KOMPENZAČNÍ PRVKY .....	17
1.5 PŘEVOD FYZIKÁLNÍCH VELIČIN DO POMĚRNÝCH JEDNOTEK.....	18
<b>2 ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU SOUSTAVY.....</b>	<b>18</b>
2.1 METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ.....	19
2.2 ZÁKLADNÍ TYPY UZLŮ SOUSTAVY.....	20
2.3 UZLOVÁ ADMITANČNÍ MATICE.....	20
2.3.1 Začlenění transformátorů .....	22
2.3.2 Začlenění kompenzačních prvků.....	23
<b>3 NUMERICKÉ METODY .....</b>	<b>23</b>
3.1 GAUSS-SEIDEL (GS) .....	24
3.1.1 Jalové meze PU uzlů .....	25
3.1.2 Úpravy GS metody.....	26
3.2 NEWTON-RAPHSON (NR) .....	27
3.2.1 Jalové meze PU uzlů .....	29
3.2.2 Úpravy NR metody .....	30
3.3 VÝSTUPY – VZORCE PRO VÝPOČET.....	32
<b>4 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY .....</b>	<b>34</b>
4.1 OPTIMÁLNÍ VÝPOČET ODBOČEK V ŘEŠENÍ SOUSTAVY .....	35
4.2 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY V GS METODĚ .....	36
4.2.1 Metoda kontinuální – se zaokrouhlením (OLTC 1).....	37
4.2.2 Metoda kontinuální – bez zaokrouhlení (OLTC 1 bez „round“) .....	40
4.2.3 Metoda diskrétní - přepínání po krocích (OLTC 2).....	41
4.3 REGULAČNÍ TRANSFORMÁTORY V NR METODĚ.....	43
<b>5 PROGRAMY VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU V MATLABU .....</b>	<b>49</b>
5.1 ZADÁNÍ.....	49
5.2 VLASTNÍ PROGRAMY – OVLÁDÁNÍ .....	51
5.3 APLIKACE PROGRAMŮ - VÝPOČET CHODU SOUSTAVY .....	52
5.4 APLIKACE PROGRAMŮ – VÝPOČET CHODU SOUSTAVY S REGULACÍ U/P/Q .....	56
5.4.1 GS metoda.....	56
5.4.2 NR metoda .....	59
<b>6 PŘÍPADOVÁ STUDIE .....</b>	<b>61</b>
6.1 SIMULACE ŘÍZENÍ NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ .....	62
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>69</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$\bar{Y}_{ik}, \bar{Z}_{ik}$	(S, $\Omega$ )	podélná admitance, podélná impedance větve mezi uzly $i$ a $k$
$\bar{Y}_{ik0}$	(S)	příčná admitance větve mezi uzly $i$ a $k$
$R_{ik}, X_{ik}$	( $\Omega$ )	činný odpor, reaktance větve mezi uzly $i$ a $k$
$G_{ik0}, B_{ik0}$	(S)	svod, kapacitní susceptance mezi uzly $i$ a $k$
$U_k, u_k$	(V, %)	velikost napětí, procentní napětí transformátoru nakrátko
$Z_k, X_k, R_k$	( $\Omega$ )	impedance, reaktance, odpor transformátoru nakrátko
$\Delta P_k$	(W)	ztrátový výkon transformátoru nakrátko
$I_o, i_o$	(A, %)	proud, procentní proud naprázdno
$\bar{Y}_0$	(S)	příčná admitance transformátoru
$X_m, B_m$	( $\Omega, S$ )	magnetizační reaktance, susceptance
$G_{Fe}, R_{Fe}$	(S, $\Omega$ )	konduktance, fiktivní odpor magnetického obvodu
$\bar{Y}_{sh}, \bar{B}_{sh}$	(S)	admitance, kapacitní susceptance kompenzačního prvku
$Q_c$	(VAr)	jalový výkon dodávaný kompenzačním prvkem
$S_v, U_v$	(VA, V)	vztažný zdánlivý výkon, vztažné napětí
$\bar{p}$	(-)	komplexní převod transformátoru
$I_i, \bar{I}_i$	(A)	velikost, fázor injektovaného proudu do uzlu $i$
$I_k, \bar{I}_k$	(A)	velikost, fázor injektovaného proudu do uzlu $k$
$U_i, \bar{U}_i$	(V)	velikost, fázor uzlového napětí v uzlu $i$
$U_k, \bar{U}_k$	(V)	velikost, fázor uzlového napětí v uzlu $k$
$P_i, Q_i$	(W, VAr)	injektovaný činný, jalový výkon do uzlu $i$
$\bar{A}, \bar{Z}$		admitanční resp. impedanční matice soustavy
$\theta_i, \theta_k$	( $^\circ$ )	úhel napětí v uzlu $i$ , v uzlu $k$
$\bar{I}_{ik}, \bar{I}_{ki}$	(A)	větvový proud mezi uzly $i$ a $k$ , mezi uzly $k$ a $i$
$\bar{A}_{ii}, \bar{A}_{ik}$	(S)	prvek v admitanční matici na pozici $ii$ , na pozici $ik$
$\bar{U}_{fi}, \bar{U}_{fk}, \bar{U}_{fj}$	(V)	fázory fázových ulových napětí v uzlech $i, k, j$
$\bar{I}_{ik}'$	(A)	fázor proudu vtékajícího do uzlu $k$
$\bar{U}_i^{(p)}, \bar{U}_k^{(p)}$	(V)	fázory uzlových napětí v uzlech $i, k$ v $(p)$ iteraci
$\bar{U}_i^{(p-1)}, \bar{U}_k^{(p-1)}$	(V)	fázory uzlových napětí v uzlech $i, k$ v $(p-1)$ iteraci
$j$		komplexní imaginární jednotka
$\bar{U}_{i\_p\u00f1v}$	(V)	fázor uzlového napětí v uzlu $i$ před zahájením výpočtu
$\varepsilon$		konvergenční odchylka výpočtu
$Q_{min}, Q_{max}$	(VAr)	dolní, horní mez jalového výkonu
$M$		rozdílový vektor jalových mezí
$n0$		vektor pozic nenulových prvků v admitanční matici
$[m]$		rozdílový „mismatch“ vektor
$[Jac]$		„Jacobi“ matice
$[\Delta]$		přírůstkový „correction“ vektor
$\Delta P^{(p-1)}, \Delta Q^{(p-1)}$	(W, VAr)	vektor úbytku činného, jalového výkonu v $(p-1)$ iteraci
$H, N, J, L$		submatice Jacobiho matice
$\Delta\theta^{(p)}, \Delta U^{(p)}$	(rad, V)	přírůstek úhlu, velikosti napětí v $p$ iteraci
$\theta_{ik}, \theta_{ki}$	(rad)	rozdíl úhlů napětí v uzlech $i$ a $k$ , v uzlech $k$ a $i$
$G_{ik}, B_{ik}$	(S)	reálná, imaginární část podélné impedance
$\Delta, m$		přírůstkový, rozdílový vektor
$\bar{S}_{ref}$	(VA)	komplexní zdánlivý výkon injektovaný v referenčním uzlu
$\bar{U}_{ref}$	(V)	fázor napětí v referenčním uzlu

$\bar{A}_{ref_i}$	(S)	i-tý prvek admitanční matice v řádku referenčního uzlu
$P_{ik}, Q_{ik}$	(W, VAr)	činný, jalový výkon tekoucí od uzlu $i$ směrem k uzlu $k$
$P_{ki}, Q_{ki}$	(W, VAr)	činný, jalový výkon tekoucí od uzlu $k$ směrem k uzlu $i$
$P_{sh_i}, Q_{sh_i}$	(W, VAr)	činný, jalový výkon dodaný kompenzátorem
$\alpha$	(°)	úhel převodu transformátoru
$\Delta P_{ik}, \Delta Q_{ik}$	(W, VAr)	činné, jalové ztráty ve větvích
$\Delta P, \Delta Q$	(W, VAr)	činné, jalové ztráty celé sítě
$P_{G_i}, Q_{G_i}$	(W, VAr)	činné, jalové výkony injektované do uzlu $i$
$P_{L_i}, Q_{L_i}$	(W, VAr)	činné, jalové výkony odebírané zátěží v uzlu $i$
$P_{sh_i}, Q_{sh_i}$	(W, VAr)	činné, jalové výkony dodávané, odebírané kompenzátorem
$U_n$	(V)	jmenovité napětí
$U_{cilk_i}, Q_{cilk_i}, P_{cilk_i}$	(U, VAr, W)	cílové napětí, protékající jalový, činný výkon
$t_{ik}$	(pu)	velikost převodu regulačního transformátoru
$\alpha_{ik}$	(rad, °)	úhel převodu regulačního transformátoru
$n_t$	(-)	počet kroků přepnutí velikosti převodu
$\Delta t_{ik}$	(pu)	krok velikosti převodu regulačního transformátoru
$\Delta \alpha_{ik}$	(rad, °)	krok úhlu převodu regulačního transformátoru
$n_\alpha$	(-)	počet kroků úhlu převodu regulačního transformátoru
$d$	(pu)	„deadband“ pásmo necitlivosti regulačního transformátoru
$\Delta UQP$	(-)	sumární kvadratická odchylka regulačních transformátorů

Pozn.: Většinu veličin lze počítat také v tzv. poměrných jednotkách (pu – „per units“), jejich přepočet je uveden v této práci.

ČR	Česká republika
DT	distribuční transformátor
$DXT_1, DXT_2$	dělicí hodnota pro úhly napětí, velikosti napětí
elseif	logická funkce „jestliže jinak“
for	cyklus využívaný v programování
GS	metoda Gauss-Seidel
HRT	hladinový regulátor transformátoru
if	logická funkce „když“
m-file	typ souboru programu Matlab
n	celkový počet uzlů soustavy
nn	nízké napětí
$n_{PQ}$	počet PQ uzlů
$n_{PU}$	počet PU uzlů
NR	metoda Newton-Raphson
odch	odchylka výpočtu
OZE	obnovitelné zdroje energie
OLTC	Regulační transformátory s přepínačem odboček pod zatížením
PST	transformátory s příčnou regulací (phase-shiftery)
pu	poměrné jednotky (per units)
round	matematická funkce – zaokrouhlení na nejbližší celé číslo
run	příkaz programu Matlab
vn	vysoké napětí
while	logická smyčka

## Úvod

Elektrizační soustavy byly vybudovány pro dopravu elektrické energie ve směru výroba - přenos - rozvod - spotřeba. Stávající regulační transformátory s přepínačem odboček pod zatížením sledují jen své bezprostřední okolí a nezohledňují napět'ové/výkonové poměry v celé soustavě. V posledních letech dochází k rapidnímu nárůstu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Výroba je závislá na počasí, ročním období a denní době. Kombinace zmíněných faktů tak stále více narušuje bezpečnost a stabilitu elektrizačních soustav. Proto je v práci řešen chod soustavy vč. optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů jako jedna z možných cest ke snížení těchto rizik.

V Evropě jsou momentálně největším problémem větrné farmy na severu Německa (cca 25 GW) a nedostatečné propojení ze severu na jih. Dále je to rostoucí počet distribuovaných obnovitelných zdrojů elektrické energie. Nárůst takových zdrojů je patrný také v České republice, kde byla výstavba fotovoltaických elektráren dotována. V konečném důsledku jsou stávající tranzitní přenosová vedení přetěžována. Jedná se zejména o přenosová vedení Polska, České republiky a Rakouska. Dochází také k ohrožení kvality elektrické energie u spotřebitele. Zejména z hlediska kvality napětí (přepětí, podpětí).

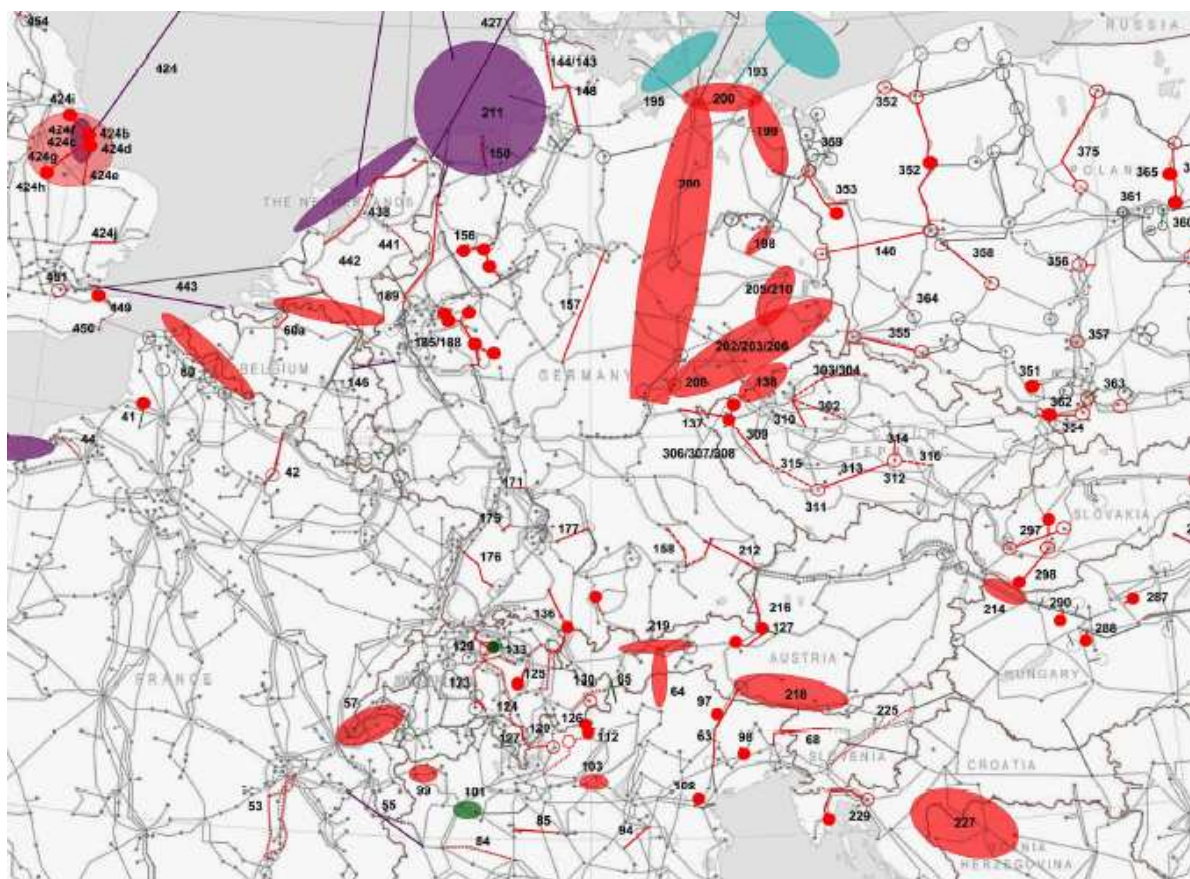
Z hlediska nebezpečných přeshraničních toků činného výkonu je nutné nasazovat zařízení schopná regulovat jejich velikost. Oblíbeným řešením jsou ekonomicky výhodnější transformátory s příčnou regulací – tzv. phase-shiftery. Tyto stroje jsou již nainstalovány např. na severu Polska a v Itálii. Chrání také přenosové soustavy Nizozemska, Belgie a Lucemburska. Mnoho dalších států zvažuje jejich nasazení (vč. ČR).

Řešením s ohledem na distribuované obnovitelné zdroje může být výměna distribučních transformátorů s pevným přepínačem odboček za říditelné transformátory s přepínačem odboček za provozu. Jejich řízení bude zřejmě výhodné řešit centrálně, pro větší účinnost regulace spolu s řízením dalších transformátorů v celé soustavě. Jedná se sice o cenově nákladnou úpravu sítě, ale možná v budoucnu nebude jiná cesta.

Cílem této diplomové práce je vytvořit program pro řešení chodu soustavy dle známých metod. Do těchto výpočtů je zahrnut optimální výpočet odboček všech regulačních transformátorů s ohledem na napět'ové/výkonové poměry v soustavě, příp. je vybrán z více přístupů ten nejvhodnější. Dále je program doplněn o výpočty dalších výstupů, díky kterým se získá přehled o celé vyřešené soustavě. Využití programu je ukázáno shrnutím testovaných sítí a na příkladu distribuční soustavy s OZE. V závěru práce jsou vyhodnoceny jednotlivé přístupy k modelování transformátorů s přepínačem odboček.

## 1 Matematický model elektrizační soustavy

Elektrizační soustava je ve vyspělých zemích světa rozsáhlou soustavou tzv. kybernetického typu. Standardně se rozděluje na páteřní přenosovou soustavu a dílčí distribuční soustavy, kde jsou všechny sítě navzájem propojené. Soustavy jednotlivých států jsou synchronně spojené do větších celků. Hlavním úkolem každé elektrizační soustavy je dodávat požadované množství elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby. Přitom se zajišťuje dodávka ve stanovené kvalitě, v požadovaném čase, minimalizují se dopady na životní prostředí, minimalizují se náklady a zajišťuje se bezpečnost provozu.



Obr. 1-1 Kritická místa propojených sítí střední Evropy – dlouhodobý plán, převzato z [11]

červ. body – nové rozvodny, červ. oblasti – studované oblasti 400 kV, červ. linky - posilovaná vedení,  
zelené oblasti – studované oblasti 220 kV, modré a fialové oblasti – větrné farmy

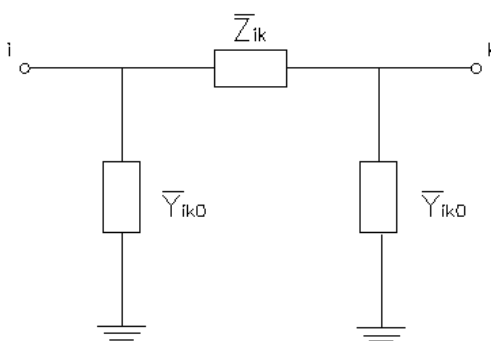
Na Obr. 1-1 jsou označeny kritické oblasti v propojených přenosových soustavách střední a severní Evropy, kterých se týkala studie v [11]. Jak bylo řečeno již v úvodu této práce problémy stability a bezpečnosti přenosu je třeba řešit plošně. Posílení ke zvýšení stability zahrnuje nové rozvodny, vedení nebo změny zařízení (např. phase-shifting transformátory).

Aby bylo možné nalézt kritické oblasti (příp. jednotlivé uzly soustavy) z hlediska technického, je nutné vyřešit danou elektrickou síť numerickým výpočtem. Pro numerické řešení chodu soustavy je potřeba nejprve vytvořit matematické náhradní schéma sítě.

To znamená vytvořit náhradní schémata jednotlivých prvků (vedení, transformátory, kompenzační prvky atd.). Právě odvozením a stručným popisem náhradních modelů prvků se dále zabývá tato kapitola.

## 1.1 Matematický model vedení

Elektrické vedení v elektrizační soustavě je často nahrazováno náhradním  $\pi$ -článkem, který je v ideálním případě symetrický. Ve zjednodušeném modelu  $\pi$ -článku na Obr. 1.1-1 jsou zahrnuty prvky podélné impedance a příčné admitance.



Obr. 1.1-1 Náhradní matematický model vedení

Podélná impedance vedení  $Z_{ik}$  je složena z odporu  $R_{ik}$  a reaktance  $X_{ik}$ . Příčná admitance vedení  $Y_{iko}$  je tvořena kapacitní susceptancí  $B_{iko}$  a svodem  $G_{iko}$ . Jednotlivé hodnoty těchto parametrů jsou zadány. Případné zjednodušení je dáno zadáním jednotlivých testových sítí diplomové práce (viz Kap. 5.1). Jedná se buď o orientační hodnoty, které korespondují s daným typem vedení a napěťovou hladinou. Nebo jsou to hodnoty naměřené v reálném provozu dané sítě.

V této práci nahrazuji jednotlivá vedení pomocí admitanční matice (viz Kap. 2). Proto ještě podélnou impedanci přepočítám na podélnou admitanci:

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{1}{\bar{Z}_{ik}} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} \text{ (S)} \quad (1.1-1)$$

Pro příčné prvky platí:

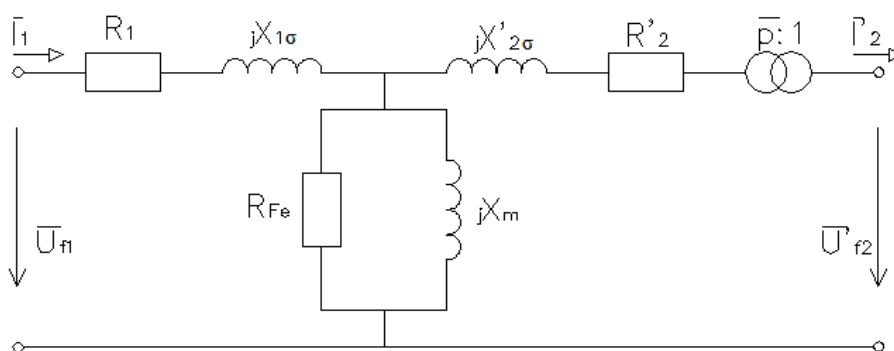
$$\bar{Y}_{iko} = \frac{G_{iko} + jB_{iko}}{2} \text{ (S)} \quad (1.1-2)$$

## 1.2 Matematický model dvojvinut'ového transformátoru

Každý elektrický stroj musí být vybaven výrobním štítkem se základními údaji. Transformátor není výjimkou, jeho základní štítkové údaje jsou nutné také pro matematický model. Jedná se o zapojení vinutí stroje vč. hodinového čísla, velikost napětí  $U_n$  vč. regulačních odboček, převod stroje  $p$ , jmenovitý výkon  $S_n$ , procentní napětí nakrátko  $u_k$ ,

procentní proud naprázdno  $i_o$ , ztráty nakrátko  $\Delta P_k$  a ztráty naprázdno  $\Delta P_0$ .

Transformátor ve větvi mezi uzly  $i$  a  $k$  elektrizační soustavy umožňuje změnu parametrů elektrické energie v jím propojených uzlech. Pro modelování dvojvinutového transformátoru se standardně využívá náhrady v podobě T-článku. Prvky na výstupní straně se přepočítávají na vstupní stranu a označují se čárkou v horním indexu. Tento přepočet znázorňuje zařazení ideálního transformátoru s komplexním převodem  $\bar{p}$  do výstupní větve schématu.



Obr. 1.2-1 Náhradní matematický model dvojvinutového transformátoru (T-článek)

Obě vinutí jsou ve schématu reprezentována svými odpory  $R_1$ ,  $R_2$  a rozptylovými reaktancemi  $X_{1\sigma}$ ,  $X_{2\sigma}$ . K vytvoření elektromagnetického pole uvnitř transformátoru je zapotřebí magnetizačního proudu a odpovídajícího spotřebovaného jalového výkonu. Tyto ztráty jsou reprezentovány právě magnetizační reaktancí  $X_m$ , jinak označované jako magnetizační susceptance  $B_m$ . Činné ztráty magnetického obvodu jsou představovány ve schématu fiktivním odporem železa  $R_{Fe}$ , jinak označovaného jako konduktance  $G_{Fe}$ .

### 1.2.1 Odvození parametrů náhradního modelu

Podélné parametry se určí ze stavu transformátoru nakrátko. Výstupní vinutí je zkratováno a na vstup je přivedeno napětí nakrátko  $U_k$ , které vyvolává na výstupu jmenovitý proud  $I_n$ . Oba příčné parametry lze zanedbat vzhledem k velikosti zkratového proudu.

Pro určení celkové impedance  $Z_k$  musíme znát napětí nakrátko:

$$U_k = Z_k I_n \quad u_{k(\%)} = \frac{U_k}{U_n} 100 = \frac{Z_k I_n}{Z_n I_n} 100 \rightarrow Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n} (\Omega) \quad (1.2-1)$$

Rezistanci nakrátko lze vypočítat ze jmenovitých ztrát nakrátko:

$$R_k = \Delta P_k \left( \frac{U_n}{S_n} \right)^2 (\Omega) \quad (1.2-2)$$

Poté jednoduše reaktance nakrátko bude:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} (\Omega) \quad (1.2-3)$$

Z předešlých hodnot se určí jednotlivé prvky takto:

$$R_1 \cong R_2' = \frac{1}{2} R_k (\Omega) \quad X_{1\sigma} \cong X_{2\sigma}' = \frac{1}{2} X_k (\Omega) \quad (1.2-4)$$

Příčné parametry se určují ze stavu transformátoru naprázdno, kdy je výstupní vinutí rozpojeno a transformátor je napájen jmenovitým napětím  $U_n$ . Obvodem pak protéká proud naprázdno  $I_0$ .

Pro určení parametrů náhradního modelu je třeba určit proud naprázdno:

$$I_0 = Y_0 U_n (A) \quad i_0(\%) = \frac{I_0}{I_n} 100 = \frac{Y_0 U_n}{Y_n U_n} 100 \rightarrow Y_0 = \frac{i_0}{100} \frac{S_n}{U_n^2} (S) \quad (1.2-5)$$

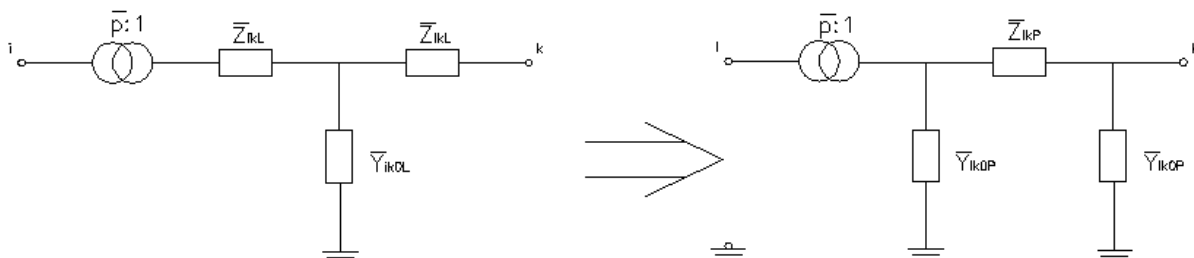
Ze jmenovitých ztrát naprázdno se určí fiktivní konduktance  $G_{Fe}$  a odpor železa  $R_{Fe}$ :

$$G_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{U_n^2} (S) \quad R_{Fe} = \frac{1}{G_{Fe}} (\Omega) \quad (1.2-6)$$

Magnetizační susceptanci  $B_m$  a reaktanci  $X_m$  lze vypočítat takto:

$$B_m = \sqrt{Y_0^2 - G_{Fe}^2} (S) \quad X_m = \frac{1}{\sqrt{Y_0^2 - G_{Fe}^2}} (\Omega) \quad (1.2-7)$$

Tento T-článek přepočítám na  $\pi$ -článek, aby byly větve numerického výpočtu s transformátory modelovány stejným náhradním modelem jako větve vedení. Výsledný náhradní model a přepočítané vztahy jsou uvedeny níže (transfigurace hvězdy na trojúhelník).



**Obr. 1.2-2 Přepočet T-článeku dvojinutového transformátoru na  $\pi$ -článek**

Přepočet na Obr. 1.2-2 je již ve zjednodušené podobě (pouze  $Z_{ik}$  a  $Y_{iko}$ ) a jeho topologie odpovídá zadání pro výpočetní program této diplomové práce. To znamená, že u vstupního uzlu  $i$  je zapojen ideální transformátor s komplexním převodem  $\bar{p}$ . U výstupního uzlu  $k$  je připojen náhradní  $\pi$ -článek. Následuje vyjádření prvků náhradního modelu a přepočet podélné impedance  $\bar{Z}_{ik}$  na podélnou admitanci  $\bar{Y}_{ik}$ .

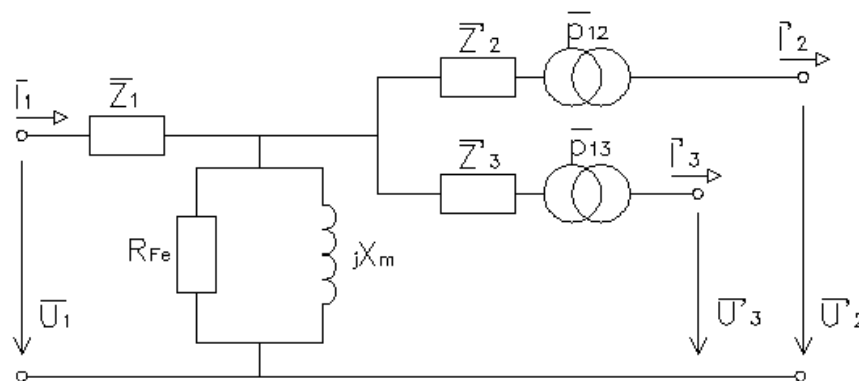
$$\bar{Z}_{ikL} = R_1 + jX_{\sigma 1} = R_2' + jX_{\sigma 2}' (\Omega) \rightarrow \bar{Z}_{ikP} = R_k + jX_k \cong 2\bar{Z}_{ikL} (\Omega) \quad (1.2-8)$$

$$\bar{Y}_{ikL} = \frac{1}{\bar{Z}_{ikL}} (S) \rightarrow \bar{Y}_{ikP} = \frac{1}{\bar{Z}_{ikP}} (S)$$

$$\bar{Y}_{ikOL} = G_{Fe} - jB_m \rightarrow \bar{Y}_{ikOP} = \frac{G_{Fe} - jB_m}{2} (S) \quad (1.2-9)$$

### 1.3 Matematický model trojvinut'ového transformátoru

Pro modelování trojvinut'ového transformátoru platí stejné fyzikální vztahy jako u dvojvinut'ového. Vstupní vinutí je to, které má nejvyšší jmenovitý výkon a terciální vinutí je vinutí s nejnižším jmenovitým výkonem. Opět jako u dvojvinut'ových se přepočítávají hodnoty z výstupních vinutí na vstupní, což znázorňují ideální transformátory v modelu.



Obr. 1.3-1 Náhradní schéma pro modelování trojvinut'ového transformátoru.

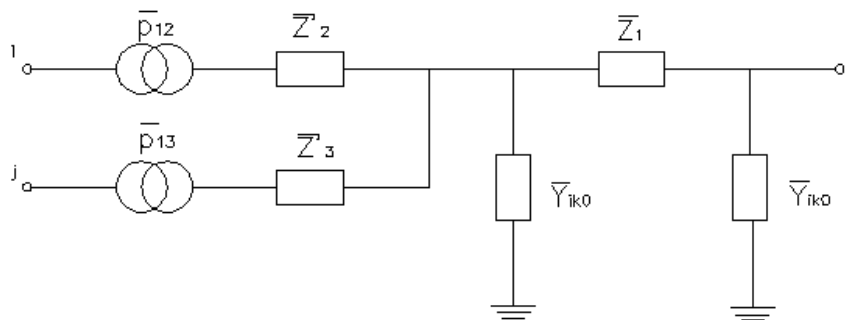
Z Obr. 1.3-1 je jasné, že se nejedná o známý T-článek nebo  $\pi$ -článek, které lze použít pro modelování sítí nebo dvojvinut'ových transformátorů. Impedance  $\bar{Z}_1$ ,  $\bar{Z}_2$  a  $\bar{Z}_3$  samozřejmě reprezentují jednotlivá vinutí jejich odpory a rozptylovými reaktancemi, proto platí:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_{1\sigma} \quad \bar{Z}_2 = R_2 + jX_{2\sigma} \quad \bar{Z}_3 = R_3 + jX_{3\sigma} \quad (1.3-1)$$

K výpočtům je nutné znát jednotlivá napětí, ztráty a napětí nakrátko mezi dvojicemi vinutí. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny na štítku stroje. Uvádí se zde také jednotlivé výkony  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  a  $S_{n3}$ , se kterými je nutné počítat. Všechny tři hodnoty jsou nutné, jestliže jednotlivé veličiny vinutí nejsou přepočítány na vstupní stranu. Pokud jsou hodnoty přepočítány, potom se postupuje pouze se jmenovitým výkonem vstupního vinutí  $S_{n1}$ , který bývá největší.

Trojvinut'ový transformátor se modeluje pomocí dvou dvojvinut'ových transformátorů a jednoho vedení. Proto zde nebudu uvádět odvození pro náhradní model, toto je uvedeno např. v [1], [2] a [8]. Dvojvinut'ové transformátory jsou na Obr. 1.3-1 reprezentovány impedancemi  $\bar{Z}_2$ ,  $\bar{Z}_3$  a komplexními převody  $\bar{p}_{12}$  a  $\bar{p}_{13}$ . Při použití modelu z Kap. 1.2.1 zanedbáme příčné větve u obou náhradních modelů dvojvinut'ového transformátoru. Náhradní model vedení použijeme pro podélnou impedanci  $\bar{Z}_1$  a společnou příčnou větev trojvinut'ového transformátoru  $R_{Fe}, X_m$  resp.  $G_{Fe}, B_m$ . Rozdělení na dílčí modely s respektováním zadání této diplomové práce (u vstupních uzlů jsou zapojeny ideální transformátory, u výstupního uzlu je připojen náhradní  $\pi$ -článek) přehledně popisuje následující schéma.





Obr. 1.3-2 Matematický model trojvinutového transformátoru

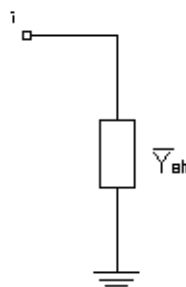
Fiktivní uzel trojvinutového transformátoru je zahrnut do množiny uzlů sítě, ve kterých se řeší chod soustavy. Je ještě nutno přepočítat jednotlivé impedance z Obr. 1.3-2 na admittance a vyjádřit příčnou větev transformátoru ( $\pi$ -článek):

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{\bar{Z}_1} (S) ; \bar{Y}_2 = \frac{1}{\bar{Z}_2} (S) ; \bar{Y}_3 = \frac{1}{\bar{Z}_3} (S) \quad (1.3-2)$$

$$\bar{Y}_{ik0} = \frac{G_{Fe} - jB_m}{2} (S) \quad (1.3-3)$$

#### 1.4 Kompenzační prvky

Náhradní matematický model kompenzačního prvku představuje konstantní příčná admittance připojená do uzlu soustavy. Kompenzátozem může být kondenzátor nebo induktor. Oba budou v numerickém řešení této diplomové práce uvažovány. Rozdílem při jejich výpočtu je, že kondenzátory jsou uvažovány kladně „+“ a induktory záporně „-“. Náhradní matematický model a příčná admittance kompenzátozu jsou uvedeny níže.



Obr. 1.4-1 Náhradní matematický model kompenzátozu

Kompenzátozu je možno zadávat buď přímo susceptancemi  $B_{sh}$  a konduktancemi  $G_{sh}$  (konduktance  $G_{sh}$  jsou většinou zanedbány) nebo dodávaným či odebíraným činným a jalovým výkonem, kde činný výkon bude většinou roven nule. To znamená, že uvažujeme ideální kompenzátozu a lze tedy psát:

$$\bar{Y}_{sh} = j \frac{Q_c}{U_n^2} \cong jB_{sh} (S) \quad (1.4-1)$$

Paralelní kondenzátory se využívají ke kompenzaci účinníku v sítích vn, nn a také ke zvyšování napětí v sítích vvn. Jedná se tedy o dodávku jalového výkonu. Paralelní indukty se využívají pro kompenzaci kapacitního jalového výkonu v sítích vvn u málo zatížených vedení. Jde naopak o spotřebič jalového výkonu. Nadřazené soustavy jsou často také modelovány jako příčné uzlové prvky  $G_{sh}$  a  $B_{sh}$ , tím se modeluje jejich připojení k síti s dodávkou nebo odběrem činného a jalového výkonu.

## 1.5 Převod fyzikálních veličin do poměrných jednotek

V této práci budou zadané hodnoty v poměrných jednotkách (pu) nebo se do nich přepočítají. Numerické výpočty budou také počítány v poměrných jednotkách. Použití poměrných jednotek přináší celou řadu výhod oproti fyzikálním jednotkám. Např. dojde k eliminaci rozdílných napěťových hladin, rozdílných velikostí převodů transformátorů. Jmenovitý převod transformátorů bude vždy roven jedné a jejich impedance v poměrných jednotkách vyjadřuje procentní úbytek napětí na této impedanci při jmenovitém zatížení. Výsledné hodnoty programu vztažené ke jmenovitým budou přehlednější.

Převod výkonů  $S$  (obdobný přepočet bude také pro výkony  $P$  a  $Q$ ), sdružených napětí  $U$ , proudů  $I$ , impedancí  $Z$  a admitancí  $Y$  do poměrných jednotek je následující:

$$s = \frac{S}{S_v} (pu) \quad u = \frac{U}{U_v} (pu) \quad i = \frac{I}{I_v} (pu) \quad (1.5-1,2,3)$$

$$z = Z \frac{S_v}{U_v^2} (pu) \quad y = Y \frac{U_v^2}{S_v} (pu) \quad (1.5-4,5)$$

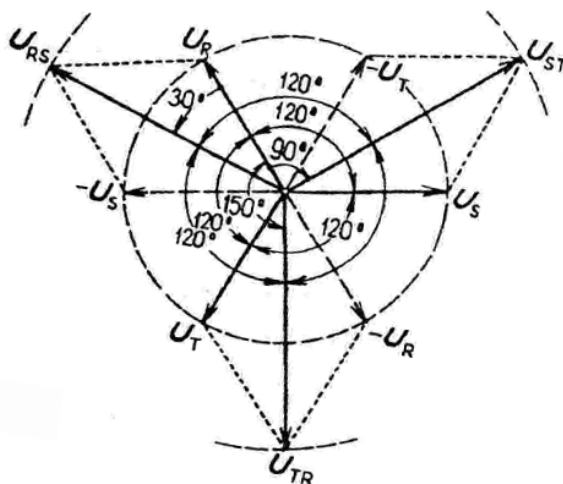
Vztažné napětí  $U_v$  a vztažný výkon  $S_v$  jsou vždy dány. Při numerických výpočtech v této diplomové práci jsou napětí vztahována k vlastním jmenovitým hodnotám (viz Kap. 5.1). Těchto vztažných napětí je tedy stejný počet jako napěťových hladin ve výpočtu. Vztažný výkon je vždy pouze jeden s hodnotou 100 MVA.

## 2 Řešení ustáleného chodu soustavy

Znalost řešení chodu soustavy je důležité v souvislosti s plánováním a výstavbou nových sítí. Stejný význam má toto řešení pro stávající síť ke zjištění jejich nejlepších provozních nastavení. Ustálený chod soustavy znamená, že základní provozní parametry jsou konstantní. Při změnách provozních parametrů se ustálený chod naruší a vzniká přechodný děj, po jeho odeznění vzniká nový ustálený stav. Ustálený chod můžeme popsat soustavou algebraických nelineárních rovnic, které nelze počítat analyticky.

Elektrizační soustavu nahradíme jednotlivými uzly a větvemi mezi nimi. Z předchozí kapitoly vyplynulo, že každá větev je matematicky modelována náhradními modely s pasivními parametry. Pasivní parametry jsou součástí zadání této diplomové práce. Větve představují jednotlivá vedení a transformátory. Do uzlů se zapojují kompenzační prvky a nadřazené sítě. Základním výsledkem řešení chodu soustavy je velikost napětí v každém uzlu, úhel napětí v každém uzlu a jalové a činné výkony injektované do uzlů. Z těchto hodnot a znalosti náhradních modelů větví získáme činné a jalové výkonové toky všemi větvemi sítě. Výsledkem budou také výkony dodané (odebrané) kompenzátoři v uzlech. Pro hodnocení ekonomičnosti provozu je dobré znát ještě činné a jalové ztráty v jednotlivých větvích, příp. celé sítě. Mohou se získat ještě další veličiny, které lze dodatečně dopočítat ze základních výstupů.

Souměrné, trojfázové, sinusové sítě jsou základním předpokladem pro řešení ustálených stavů. Díky tomu mohou využít symbolicko-komplexní metody a fázorů pro aktivní i pasivní prvky. Dále předpokládám lineární pasivní parametry. Celou soustavu tedy lze převést na jednofázový obvod, získat výsledky a tyto budou platit i pro ostatní fáze (pouze pootočený o  $120^\circ$  resp.  $-120^\circ$ ). Nutnou podmínkou řešitelnosti chodu soustavy bude správné označení všech uzlů soustavy (pozn. autora: popis základních uzlů soustavy je v Kap. 2.2). Tím dosáhnou stejného počtu rovnic jako vypočítávaných neznámých.



Obr. 2-1 Fázorový diagram trojfázové souměrné soustavy (fázová i sdružená napětí), [1]

## 2.1 Metoda uzlových napětí

V této diplomové práci budu k řešení chodu soustavy využívat metodu uzlových napětí, která je vhodnější pro výpočet pomocí PC. Jiné metody k řešení, jako např. metoda smyčkových proudů nejsou pro zadání diplomové práce příliš vhodné. Výhodami metody uzlových napětí jsou zejména nižší počet rovnic a snazší výpočet s modelováním převodu

a změn převodu regulačních transformátorů. Příčné parametry náhradních modelů lze snadno respektovat (nezvýší se počet neznámých a rovnic) a tím zpřesnit výpočet.

Neznámými této metody jsou uzlová napětí s příslušnými úhly napětí a injektované uzlové proudy s příslušnými úhly. Pro injektované veličiny do uzlů (proudy, výkony) platí následující znaménková dohoda: vstupují-li do uzlu - brány kladně „+“, vystupují-li z uzlu - brány záporně „-“.

## 2.2 Základní typy uzlů soustavy

Každý uzel soustavy reprezentuje odběrné místo, rozvodnu, část nadřazené soustavy, blokovou rozvodnu elektrárny apod. Uzel je vždy reprezentován velikostí uzlového napětí  $U_i$ , velikostí úhlu uzlového napětí  $\theta_i$ , injektovaným činným výkonem do uzlu  $P_i$  a injektovaným jalovým výkonem do uzlu  $Q_i$ . Z těchto hodnot jsou vždy před výpočtem dvě známé (startovní hodnoty) a zbylé dvě jsou kompletně dopočítány. Vzájemný vztah uzlových veličin lze psát:

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3}U_i^*} \quad (2.2-1)$$

Základními typy uzlů soustavy jsou:

PU uzel – předem definovaný činným výkonem  $P_i$  a velikostí napětí  $U_i$ . V praxi se jedná o uzel s výrobou  $P_i$ , kde se reguluje velikost napětí  $U_i$  pomocí změny vyráběného jalového výkonu (velikost jalového výkonu je udržována v daných mezích). Jalový výkon  $Q_i$  a úhel uzlového napětí  $\theta_i$  se dopočtou

PQ uzel – předem definovaný činným výkonem  $P_i$  a jalovým výkonem  $Q_i$ . V praxi se jedná o odběrový uzel, kde není možná regulace napětí. Většina uzlů v elektrizační soustavě je typu PQ. Velikost napětí  $U_i$  a úhel napětí  $\theta_i$  se dopočtou.

U $\theta$  uzel – také známý jako referenční uzel. Je předem definovaný velikostí napětí  $U_i$  a úhlem napětí  $\theta_i$ . Pro řešení musí být zadán alespoň jeden referenční uzel, aby bylo možné síť řešit. Pro tento uzel nejsou definovány žádné výpočtové rovnice. Bývá jím PU uzel s největším zdrojem v dané elektrizační soustavě nebo připojená zahraniční soustava. Napětí a úhel tohoto uzlu jsou použity jako počáteční odhad pro výsledná napětí a úhly ostatních uzlů v iteračních metodách. Dopočítává se činný  $P_i$  a jalový  $Q_i$  výkon, oba respektují celkové ztráty sítě.

## 2.3 Uzlová admitanční matice

Matematické modely jednotlivých zařízení (pasivních prvků) jsem popsal v předchozí kapitole a nyní se zaměřím na jejich společnou reprezentaci v rozsáhlých sítích. Modelování

soustav s mnoha prvky se pro numerické řešení provádí pomocí uzlové admitanční  $\bar{A}$  nebo uzlové impedanční  $\bar{Z}$  matice. Pro jejich složení je navíc zapotřebí znát vstupní a výstupní uzly ( $i, k$ ) jednotlivých prvků soustavy. Pokud má síť  $n$  uzlů, poté budou obě matice ( $\bar{A}$  i  $\bar{Z}$ ) čtvercové a vždy o rozměru  $n \times n$ . Platí, že  $\bar{U}$  je vektor uzlových sdružených napětí a  $\bar{I}$  je vektor injektovaných proudů do uzlů. Lze tedy obecně psát:

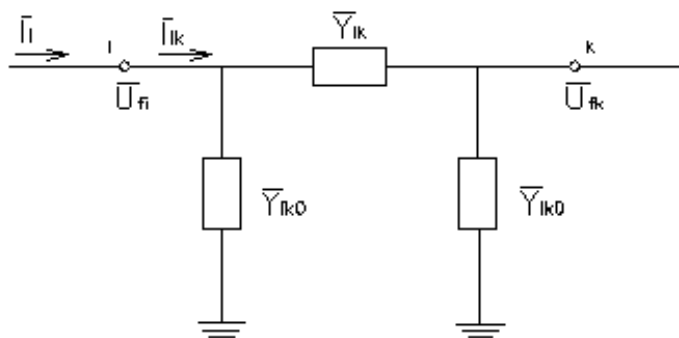
$$\sqrt{3}\bar{I} = \bar{A} \cdot \bar{U} \quad \text{pro admitanční matici} \quad (2.3-1)$$

$$\bar{U} = \sqrt{3} \cdot \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad \text{pro impedanční matici} \quad (2.3-2)$$

Uzlová impedanční matice  $\bar{Z}$  je vhodná pro řešení poruchových stavů v elektrizačních soustavách. Impedanční matice neobsahuje nulové prvky (nulová impedance = zkrat), není diagonálně dominantní a vliv každé impedance větve ovlivní ostatní členy matice. Impedanční matici lze získat inverzí admitanční matice. Při změnách topologie sítě se impedanční matice přepočítává na admitanční matici, ta se upraví a poté se opět převádí na impedanční matici. Proto jí v této diplomové práci nebudu používat.

Uzlová admitanční matice  $\bar{A}$  je vhodnější pro řešení ustálených (provozních) stavů, protože se snadno přepočítává v případě změny konfigurace sítě. Je charakteristická svou řídkostí, kdy obsahuje nulové prvky pro nespojené uzly (pro více než 100 uzlů v síti bývá řídkost více než 90%). Pokud budou v síti vedení a transformátory s nulovým úhlem převodu, bude admitanční matice symetrická.

V Kap. 1 jsem záměrně matematicky popsal všechny prvky pomocí příčných a podélných admítancí. Dále se budu zabývat pouze uzlovou admitanční maticí a provedu její odvození s uvažováním jednoho vedení v soustavě s  $n$  uzly dle [6].



Obr. 2.3-1 Větev s vedením v soustavě pro odvození základní admitanční matice

Větvový proud mezi uzly  $i$  a  $k$  lze popsat:

$$\bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi}\bar{Y}_{ik0} + (\bar{U}_{fi} - \bar{U}_{fk})\bar{Y}_{ik} = \bar{U}_{fi}(\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik} \quad (2.3-3)$$

Rozepsání řádku vztahu 2.3-1 pro  $i$ -tý uzel (řádek):

$$\bar{I}_i = \bar{A}_{i1}\bar{U}_{f1} + \dots + \bar{A}_{ii}\bar{U}_{fi} + \dots + \bar{A}_{ik}\bar{U}_{fk} + \dots + \bar{A}_{in}\bar{U}_{fn} \quad (2.3-4)$$

Injektovaný proud  $\bar{I}_i$  do uzlu  $i$  se rovná součtu proudů vytékajících z uzlu. Kombinací se vztahem 2.3-3 získáme:

$$\bar{I}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \bar{U}_{fk} \bar{Y}_{ik} \quad (2.3-5)$$

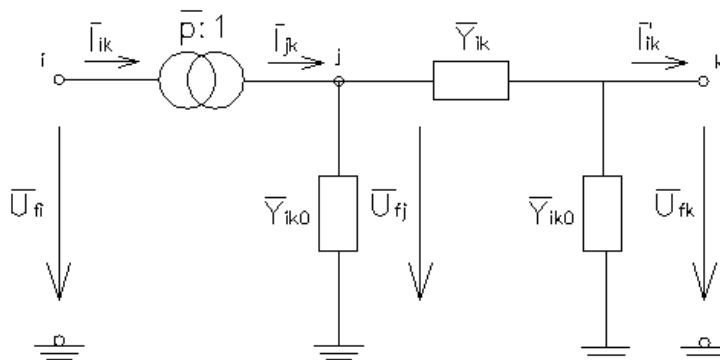
Ze vztahů 2.3-4 a 2.3-5 pro prvky matice  $\bar{A}_{ii}$  a  $\bar{A}_{ik}$  vyplývá:

$$\bar{A}_{ii} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) \quad \bar{A}_{ik} = -\bar{Y}_{ik} \quad (2.3-6)$$

Obě rovnice 2.3-6 platí obecně pro naplnění admitanční matice pouze pro zahrnutí vedení. Úprava této základní admitanční matice o další již dříve namodelované prvky následuje v podkapitolách.

### 2.3.1 Začlenění transformátorů

Nyní máme uzlovou admitanční matici složenu pouze z vedení. Všechny ostatní prvky jsou ale momentálně nulové a je nutné matici upravit. Na následujícím Obr. 2.3-2 je mezi uzly  $i$  a  $k$  zapojen transformátor s topologií dle zadání diplomové práce a komplexním převodem  $\bar{p} : 1$ . V obvodu je přidán fiktivní uzel  $j$  kvůli lepší přehlednosti vztahů.



Obr. 2.3-2 Náhradní schéma transformátoru pro začlenění do admitanční matice

Proudy  $\bar{I}_{ik}$  a  $\bar{I}'_{ik}$  lze odvodit z náhradního schématu  $\pi$ -článku z Obr. 2.3-2 v závislosti na napětí v uzlech. Výsledné vztahy jsou podobné vztahům např. v [6], ale kvůli změně topologie a převodu v této podkapitole uvedu celý postup odvození.

Komplexní převod, resp. napětí  $\bar{U}_{fj}$  vyjádřím jako:

$$\frac{1}{\bar{p}} = \frac{\bar{U}_{fj}}{\bar{U}_{fi}} \rightarrow \bar{U}_{fj} = \frac{1}{\bar{p}} \bar{U}_{fi} \quad (2.3-7)$$

Pro komplexní výkony ideálního transformátoru platí:

$$3\bar{U}_{fi} \bar{I}_{ik}^* = 3\bar{U}_{fj} \bar{I}'_{jk}^* \quad (2.3-8)$$

Následují matematické úpravy vztahu 2.3-8, za použití vzorce 2.3-7 a vyjádřením proudu  $\bar{I}_{jk}$  z uzlových napětí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{fi}\bar{I}_{ik}^* &= \frac{1}{\bar{p}}\bar{U}_{fi}\left((\bar{U}_{fj}-\bar{U}_{fk})\bar{Y}_{ik}+\bar{U}_{fj}\bar{Y}_{ik0}\right)^* \\ \bar{I}_{ik}^* &= \frac{1}{\bar{p}}\left(-\bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik}+\frac{1}{\bar{p}}\bar{U}_{fi}\bar{Y}_{ik}+\frac{1}{\bar{p}}\bar{U}_{fi}\bar{Y}_{ik0}\right)^*\end{aligned}\quad (2.3-9)$$

$$\bar{I}_{ik} = \left|\frac{1}{\bar{p}}\right|^2 \bar{U}_{fi}(\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) - \frac{1}{\bar{p}^*} \bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik}$$

Proud  $\bar{I}_{ik}'$  vyjádřím následovně:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{ik}' &= (\bar{U}_{fj}-\bar{U}_{fk})\bar{Y}_{ik}-\bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik0} \\ \bar{I}_{ik}' &= \frac{1}{\bar{p}}\bar{U}_{fi}\bar{Y}_{ik}-\bar{U}_{fk}(\bar{Y}_{ik}+\bar{Y}_{ik0})\end{aligned}\quad (2.3-10)$$

Výsledná úprava admitanční matice je poté jednoduchá:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ik} \\ \bar{I}_{ik}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +\left|\frac{1}{\bar{p}}\right|^2(\bar{Y}_{ik}+\bar{Y}_{ik0}) & -\frac{1}{\bar{p}^*}\bar{Y}_{ik} \\ \frac{1}{\bar{p}}\bar{Y}_{ik} & -(\bar{Y}_{ik}+\bar{Y}_{ik0}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{fi} \\ \bar{U}_{fk} \end{bmatrix}\quad (2.3-11)$$

Admitanční matice se upravuje pouze ve čtyřech prvcích ( $ii$ ,  $ik$ ,  $ki$ ,  $kk$ ), úprava 2.3-11 je znázorněním úpravy právě pro tyto prvky. Pro pozdější začlenění regulačních transformátorů, kde se bude měnit převod je toto velmi výhodné. Budou se měnit pouze čtyři (resp. tři) prvky admitanční matice.

### 2.3.2 Začlenění kompenzačních prvků

O kompenzátorech jalového výkonu pojednává Kap. 1.4. Zapojují se vždy do příslušného uzlu  $i$  elektrizační soustavy. Úprava uzlové admitanční matice tedy bude vždy provedena v její hlavní diagonále:

$$A_{ii_{nové}} = A_{ii_{staré}} + \bar{Y}_{sh}\quad (2.3-12)$$

## 3 Numerické metody

Z předešlých kapitol známe náhradní modely jednotlivých prvků elektrizační soustavy ve tvaru  $\pi$ -článku a postup vytvoření uzlové admitanční matice  $\bar{A}$ . V zadání jednotlivých sítí k řešení pomocí numerického výpočtu jsou zadané jednotlivé typy uzlů a všechny potřebné parametry prvků elektrizační soustavy. Přímý (analytický) postup řešení chodu soustavy je

uveden např. v [1] na str. 329-331. Obecný postup zde nebudu popisovat a zaměřím se přímo na metody Gauss-Seidel a Newton-Raphson, pomocí nichž budou sítě v této diplomové práci řešeny. U každé z nich budou uvedeny výhody, nevýhody a možnosti použití.

Numerické řešení se získává iterativním procesem, tzn. popsáním neznámých v daných uzlech řešené sítě a jejich výpočtem v jednotlivých krocích. Každý celý krok výpočtu se nazývá iterace a po každé iteraci jsou všechny neznámé veličiny vyčísleny a použity pro další iteraci, nebo již v průběhu dané iterace. Iterace se opakují, dokud není splněno konvergenční kritérium pro přesnost výsledků a zastavení výpočtu.

### 3.1 Gauss-Seidel (GS)

Gauss-Seidel metoda se začala využívat ve 20. století. Jednalo se o výpočty pomocí prvních počítačů, které byly velmi zdoluhavé. I dnes lze tuto metodu využívat na moderních PC, ale výpočet je stále poměrně dlouhý. Zvláště pak pro rozsáhlé sítě větší než 1000 uzlů. Jejimi hlavními výhodami jsou snadný matematický model, malé změny v jednotlivých iteracích (bezpečné dosažení výsledku) a nízké výpočtové nároky vztahované na jednu iteraci. Nevýhodami jsou práce s komplexními čísly, závislost počtu iterací na velikosti sítě, pouze lineární rychlost konvergence a již zmíněná dlouhá doba výpočtu.

Gauss-Seidel metoda zrychluje původní Gauss metodu pro numerické řešení elektrizačních soustav. O původní Gauss metodě pojednává [4] na str. 291-295. Nepoužívala vypočtené neznámé v dané iteraci ihned pro další výpočet tak jako Gauss-Seidel metoda. Aktualizovala totiž všechny hodnoty neznámých až po skončení celé iterace, což bylo výrazně pomalejší. Kompletní matematické odvození je uvedeno např. v [1] na str. 335-342.

Následuje vyjádření finálních vztahů potřebných pro numerické řešení této diplomové práce. Pokud za  $p$  označíme číslo iterace a  $n$  je počet uzlů, pak lze zapsat výpočet napětí v nereferenčním uzlu  $i$  následovně:

$$\bar{U}_i^{(p)} = \frac{1}{\bar{A}_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^{(p)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p)} - \sum_{k=i+1}^n \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p-1)} \right) \quad (3.1-1)$$

Pro PU uzly je nutné ještě před výpočtem napětí (dle 3.1-1) řešit jejich neznámý jalový výkon, který je bilancí mezi vyráběným  $Q_{Gi}$  a odebíraným výkonem  $Q_{Li}$  v těchto uzlech:

$$Q_i^{(p)} = -Im \left\{ \bar{U}_i^{*(p-1)} \left( \sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p)} - \sum_{k=i}^n \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p-1)} \right) \right\} = Q_{Gi}^{(p-1)} + Q_{Li} \quad (3.1-2)$$

V PU uzlech se napětí udržuje na konstantní hodnotě, i když se jalový výkon mění. Proto se provádí tzv. „scaling proces“ napětí, který zachovává původní velikost napětí a mění



pouze úhel napětí:

$$\bar{U}_i^{(p)} = U_{i_{p\underline{uv}}} \frac{\bar{U}_{i_{vyp}}^{(p)}}{\left| \bar{U}_{i_{vyp}}^{(p)} \right|} \quad (3.1-3)$$

Ještě je nutné nastavit podmínky (konvergenční kritéria), při kterých bude soustava vyřešena s určitou přesností. Pokud by výpočet divergoval a nemohl tak dosáhnout výsledků, je nutné nadefinovat maximální počet iterací, při jehož dosažení bude výpočet zastaven. V této diplomové práci budou numerické výpočty prováděny s konvergenční odchylkou  $\varepsilon = 1e - 8$ . Maximální počet iterací pro metodu Gauss-Seidel bude záviset na počtu uzlů řešené sítě, ale obecně lze nastavit hodnotu 30 000 (pro síť do 1000 uzlů, distribuční soustavy nebo paprskové sítě). Konvergenční kritéria jsou následující:

$$\max_i \frac{|U_i^{(p)} - U_i^{(p-1)}|}{U_i^{(p-1)}} \leq \varepsilon \quad \text{a} \quad \max_i \left| \theta_i^{(p)} - \theta_i^{(p-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (3.1-4)$$

### 3.1.1 Jalové meze PU uzlů

Pro PU uzly jsou v zadání této diplomové práce uvedeny meze jalového výkonu. Tyto uzly nahrazují elektrárenské uzly, takže je zde možná regulace jalového výkonu. Regulace dodávaného jalového výkonu udržuje konstantní napětí v uzlu. Regulovat může elektrárna pouze ve fyzických mezích (pro každou elektrárnu dáno PQ diagramem). Pokud dojde k překročení horní nebo dolní meze, bude porušena podmínka konstantního napětí. PU uzel se změní na PQ uzel a hodnota jalového výkonu bude rovna překročené mezi. Základní logika jalových mezí je popsána např. v [2].

Pro numerické řešení metodou Gauss-Seidel použiji dvě upravené logiky, uvedené v [9]. První logika bude hledat rozdíl mezi maximální  $Q_{max}$  nebo minimální  $Q_{min}$  mezí a aktuální hodnotou jalového výkonu  $Q_i$ . Tento rozdíl se zapíše do vektoru  $M$  a druhá logika bude v  $M$  vyhledávat maximální hodnotu překročení jalové meze. Poté se uzel s maximálním překročením jalové meze přepne na PQ. Tento postup zajistí minimální počet přepnutých PU uzlů. Vyhledávání a přepínání uzlů nebude aktivní po celou dobu výpočtu, ale pouze při přiblížení konvergence k řešení. Pro sepnutí logiky jalových mezí jsem nastavil moment, kdy odchylka výpočtu bude mít hodnotu stonásobku konvergenční odchylky ( $1e-6$ ). Obě logiky tedy budou sepnuty za podmínky - *if*  $odch \leq zvolena\_odchylka \cdot 100$ . Zde *odch* označuje aktuální odchylku výpočtu v příslušné iteraci a *zvolena\_odchylka* je nastavená konvergenční odchylka  $\varepsilon$ .

Logika pro naplnění vektoru  $M$ :

```

if  $Q_i < Q_{min}$ 
     $M_i = Q_{min} - Q_i$ 
elseif  $Q_i > Q_{max}$ 
     $M_i = Q_i - Q_{max}$ 
end
    
```

(3.1-5)

Logika pro vyhledání maximálního překročení meze a přepnutí uzlů:

```

if  $M_i == \max(M) \ \& \ Q_i < Q_{min}$ 
     $Q_i = Q_{min}$  ; a přepne se uzel PU na PQ
elseif  $M_i == \max(M) \ \& \ Q_i > Q_{max}$ 
     $Q_i = Q_{max}$  ; a přepne se uzel PU na PQ
end
    
```

(3.1-6)

Jedná se o pomalou (opatrnou) logiku, která přepne trvale na PQ ten PU uzel, který nejvíce překračuje své meze. To ovlivní i ostatní porušující uzly, které se mohou příznivě srovnat nebo budou přepnuty později.

### 3.1.2 Úpravy GS metody

Jak již bylo zmíněno, numerický výpočet metodou Gauss-Seidel je sice spolehlivý, ale velmi pomalý. Toto je hlavní nevýhodou, proto jsem výpočet oproti obecným vztahům optimalizoval a snažil se jej zrychlit. Hlavním cílem následujících úprav je snížit výpočtovou dobu a počet iterací základních algoritmů pro řešení soustav.

První úprava vedla k odstranění cyklů „for“ nutných pro načítání  $k$ -prvků ve výpočtech napětí a jalového výkonu (3.1-1 a 3.1-2). Jedná se o úpravu výpočtu dvou sum použitých u obou vztahů a jejich přizpůsobení této úpravě. Sumy jsou sloučeny v jednu a počítají se všechny prvky, včetně prvků  $A_{ii}$ , v jednom cyklu „for“. Takto upravená suma je násobením řádku nenulových prvků admitanční matice  $A_{(i,n0)}$  s vektorem napětí  $U_{(n0)}$ . Vektor napětí  $U_{(n0)}$  obsahuje pouze prvky odpovídající nenulovým pozicím prvků admitanční matice.

Zápis sumy je následující:

$$\sum_{i=1}^n \bar{A}_{(i,n0)} \bar{U}_{n0} \quad (3.1-7)$$

Touto novou sumou jsou vhodně nahrazeny sumy ve vzorcích 3.1-1 a 3.1-2. Takto upravené výpočty vrací výsledné hodnoty stejné. Rychlost výpočtu výrazněji naroste.

Výpočet je pro vyšší rychlost rozdělen tak, že se počítají hodnoty pro PQ uzly a PU uzly

odděleně. Oba výpočty na sebe samozřejmě navazují. Díky tomu jsem v algoritmu zredukoval použití logik „if“ pro výpočet jalových výkonů a napětí.

Další úpravou je použití akceleračního koeficientu  $\alpha$  dle [9]. Tato velmi jednoduchá úprava je použita pro akceleraci všech vypočítávaných napětí. Použitím dosáhnou až 70% snížení počtu iterací. Akceleračnímu koeficientu lze nastavit hodnoty  $1 \div 2$ . Při nastavení dolní meze nebude metoda Gauss-Seidel akcelerována a při nastavení horní meze bude metoda vždy divergovat. Pro každou řešenou síť je nutné volit vhodný akcelerační koeficient. Pokud budeme počítat neznámé síť, je nutné otestovat správné nastavení, které bude vyhovující. V této diplomové práci s ohledem na regulační transformátory volím spíše konzervativní přístup a hodnotu nastavuji na  $\alpha=1,4$ . V případě divergence je nutné hodnotu  $\alpha$  snížit.

Akcelerované napětí lze vypočítat:

$$\bar{U}_{iakc}^{(p)} = \bar{U}_i^{(p-1)} + \alpha \left( \bar{U}_i^{(p)} - \bar{U}_i^{(p-1)} \right) \quad (3.1-8)$$

### 3.2 Newton-Raphson (NR)

Tato numerická metoda pro řešení chodu soustavy má složitější matematický postup než předchozí Gauss-Seidel metoda. I přes tuto skutečnost se metoda využívá více ať už ve své základní podobě nebo v modifikacích. Rychlost konvergence je kvadratická, tedy velmi rychlá (do deseti iterací). Dalšími výhodami jsou nezávislost počtu iterací na velikosti sítě, krátká výpočtová doba a práce pouze s reálnými čísly. Největšími nevýhodami jsou již zmíněný komplikovaný matematický model, počet iterací se může zvýšit při zahrnutí jalových mezí PU uzlů a regulačních transformátorů. Problémy výpočtu mohou nastávat u sítí velmi zatížených nebo řídců propojených, potom je nutné metodu dále upravovat pro danou síť.

Matematické odvození obecného výpočtu a nasazení této metody pro výpočty ustálených chodů sítě jsou popsány např. v [1] na str. 342-356. Tímto odvozením se nebudu zabývat a dále vyjádřím finální vztahy potřebné pro numerická řešení této diplomové práce.

Základní algoritmus pro řešení chodu soustavy má následující tvar:

$$[m] = [Jac] \cdot [\Delta] \quad (3.2-1)$$

V rovnici 3.2-1 veličina  $m$  představuje rozdílový „mismatch“ vektor,  $Jac$  nahrazuje Jacobiho matici a  $\Delta$  je přírůstkový „correction“ vektor. Následuje rozepsání základního algoritmu a popis jednotlivých proměnných:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & N^{(p-1)} \\ J^{(p-1)} & L^{(p-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ U^{(p-1)} \end{bmatrix} \quad (3.2-2)$$

Rozdílový vektor představují úbytky činného a jalového výkonu v jednotlivých uzlech.

Pro PQ uzly je zapotřebí úbytku činného i jalového výkonu, pro PU uzly se dopočítává pouze úbytek činného výkonu. Rozměr rozdílového vektoru je tedy  $(2 n_{PQ} + n_{PU})$ .

Úbytky výkonů se spočítají následovně:

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.2-3)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.2-4)$$

V této kapitole platí, že  $G_{ik}$  je reálná část prvku admitanční matice na pozici  $ik$ ,  $B_{ik}$  je imaginární část prvku admitanční matice na pozici  $ik$ . V dalších vzorcích budou prvky  $G_{ii}$ ,  $B_{ii}$  reprezentovat reálnou, resp. imaginární část prvku admitanční matice na pozici  $ii$ .

Pro rozdíl úhlů uzlových napětí v uzlech  $i$ ,  $k$  lze zapsat:

$$\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k \quad (3.2-5)$$

Jacobiho matice je symetrická ve struktuře, velmi řídká a silně diagonálně dominantní, právě to je zárukou rychlé konvergence (i divergence). Obsahuje čtyři submatice o rozměrech  $H (n_{PQ}+n_{PU}; n_{PQ}+n_{PU})$ ,  $N (n_{PQ}+n_{PU}; n_{PQ})$ ,  $J (n_{PQ}; n_{PQ}+n_{PU})$  a  $L (n_{PQ}; n_{PQ})$ .

Následují vztahy pro jednotlivé prvky submatic ve zjednodušené podobě, tak jak jsou použity v programu této diplomové práce:

$$H_{ii} = -\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} U_i^2 \quad (3.2-6)$$

$$H_{ik} = -\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = U_i U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.2-7)$$

$$N_{ii} = -U_i \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} = U_i \frac{\partial P_i}{\partial U_i} = P_i + G_{ii} U_i^2 \quad (3.2-8)$$

$$N_{ik} = -U_k \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_k} = U_k \frac{\partial P_i}{\partial U_k} = U_i U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.2-9)$$

$$J_{ii} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} U_i^2 \quad (3.2-10)$$

$$J_{ik} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -N_{ik} \quad (3.2-11)$$

$$L_{ii} = -U_i \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} = U_i \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = Q_i - B_{ii} U_i^2 \quad (3.2-12)$$

$$L_{ik} = -U_k \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_k} = U_k \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} = H_{ik} \quad (3.2-13)$$

Ještě před výpočtem prvků  $H_{ii}$  je nutné znát jalový výkon v PU uzlech, tento výpočet se v programu provádí ještě před startem výpočtové smyčky a poté se aktualizuje pro jalové

meze PU uzlů v každé iteraci:

$$Q_i^{(p-1)} = U_i^{(p-1)} \sum_{k=1}^n U_k^{(p-1)} (G_{ik} \sin \theta_{ik}^{(p-1)} - B_{ik} \cos \theta_{ik}^{(p-1)}) = Q_{Gi}^{(p-1)} + Q_{Li} \quad (3.2-14)$$

Ze známého rozdílového vektoru a Jacobiho matice lze vyjádřit přírůstkový vektor  $\Delta$ :

$$[\Delta] = [Jac] \setminus [m] \quad (3.2-15)$$

Prvky přírůstkového vektoru se použijí k aktualizaci úhlů a velikostí napětí v uzlech:

$$\theta_i^{(p)} = \theta_i^{(p-1)} + \Delta \theta_i^{(p)} \quad (3.2-16)$$

$$U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + \frac{\Delta U_i^{(p)}}{U_i^{(p-1)}} U_i^{(p-1)} \quad (3.2-17)$$

Opět je nutné nastavit podmínky, při kterých bude soustava vyřešena s určitou přesností. Konvergenční odchylka je stejná jako u metody Gauss-Seidel, tj.  $\varepsilon = 1e^{-8}$ . Maximální počet iterací lze nastavit na 25. Konvergenční kritérium metody Newton-Raphson je následující:

$$\max_i \left| \frac{\Delta P}{\Delta Q} \right| \leq \varepsilon \quad (3.2-18)$$

### 3.2.1 Jalové meze PU uzlů

Obecný význam jalových mezí je uveden již v Kap. 3.1.1. Pro numerické řešení metodou Newton-Raphson použijí opět upravené logiky, uvedené v [9]. První logika vyhledá uzly, které překračují maximální  $Q_{max}$  nebo minimální  $Q_{min}$  mez jalového výkonu. Zde zapíše hodnotu jalového výkonu  $Q_i$  dané meze a přepne uzel PU na PQ. Druhá logika je tzv. zpětná, protože navrací některé PQ uzly zpět na PU. Pokud se PU uzel přepne na PQ pro překročení maximální meze jalového výkonu a zároveň by napětí  $U_i$  v uzlu mělo vyšší hodnotu než napětí původně nastavené  $U_{pův_i}$ , potom se při přepnutí sníží napětí a tím i jalový výkon pod příslušnou mez. V takovém případě lze zpětně přepnout PQ uzel na PU. Podobně tato logika funguje i při překročení minimální meze jalového výkonu a poklesu napětí pod  $U_{pův_i}$ . Ještě je nutné zajistit, aby maximální a minimální meze jalových výkonů nebyly stejné. Obě logiky pracují v každé iteraci.

Logika pro zápis jalového výkonu  $Q_i$  dané meze a přepnutí uzlů PU na PQ:

$$\begin{aligned} & \text{if } Q_i < Q_{min} \\ & \quad Q_i = Q_{min} ; \text{ a přepne se uzel PU na PQ} \\ & \text{elseif } Q_i > Q_{max} \\ & \quad Q_i = Q_{max} ; \text{ a přepne se uzel PU na PQ} \\ & \text{end} \end{aligned} \quad (3.2-19)$$

Zpětná logika pro přepnutí PQ uzlu zpět na PQ:

*if*  $typ_i = PQ \ \& \ typ_{oi} = PU \ \& \ Q_{min} \neq Q_{max}$

*if*  $(Q_i = Q_{min} \ \& \ U_i < U_{p\u016fv}_i) \ || \ (Q_i = Q_{max} \ \& \ U_i > U_{p\u016fv}_i)$

$U_i = U_{p\u016fv}_i$  ; a přepne se uzel PQ na PU

(3.2-20)

*end*

*end*

Zde  $typ_i$  označuje aktuální typ uzlu,  $typ_{oi}$  označuje původně zadaný typ uzlu.

### 3.2.2 Úpravy NR metody

Numerický výpočet metodou Newton-Raphson je již v základní podobě dostatečně rychlý, jak je uvedeno v [9]. Není tedy třeba jej akcelarovat ke snížení počtu iterací nebo výpočtového času. U této metody jsem se snažil o její stabilizaci i pro silně zatížené sítě nebo řídice propojené sítě.

Konvergence (také stabilita) metody NR je závislá na počátečním odhadu napětí v PQ uzlech. Zpřesnění zadaných hodnot napětí v PQ uzlech správným směrem jsem po testech více možností dosáhl přidáním výpočtu startovních hodnot metodou Fast-decoupled Newton-Raphson (viz např. [1]). Výpočet proběhne pouze jednou a je umístěn ještě před výpočtovou smyčkou klasické NR metody. S novými hodnotami je dále počítáno s lepší stabilitou bez případné divergence. Počáteční odhad metodou Fast-decoupled NR využívá silnou závislost mezi jalovým výkonem a velikostí napětí a mezi činným výkonem a úhlem napětí. Zanedbává nevýrazné závislosti mezi činným výkonem a velikostí napětí a mezi jalovým výkonem a úhlem napětí. Z toho vyplývá, že submatice  $N$  a  $J$  jsou zanedbány a výpočty velikostí a úhlů napětí jsou oddělené. Základní iterační algoritmus této oddělené metody je následující:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & 0 \\ 0 & L^{(p-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ \frac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}} \end{bmatrix} \quad (3.2-21)$$

Dále jsem využil následujících zjednodušení - úhlový posun  $\theta_{ik}$  je blízký nule a ve vzorcích 3.2-3 až 3.2-14 lze tedy uvažovat  $\cos\theta_{ik}$  roven jedné a  $\sin\theta_{ik}$  roven nule. Zanedbal jsem také prvky  $G_{ik}$  oproti  $B_{ik}$  a  $Q_i$  oproti  $B_{ii}$ . Prvky submatic  $H$  a  $L$  lze potom spočítat:

$$\begin{aligned} H_{ii} &= L_{ii} = -B_{ii}U_{ii}^2 \\ H_{ik} &= L_{ik} = -B_{ik}U_iU_k \end{aligned} \quad (3.2-22)$$

V literatuře se zjednodušená submatice  $H$  nahrazuje maticí  $B'$  a submatice  $L$  se nahradí

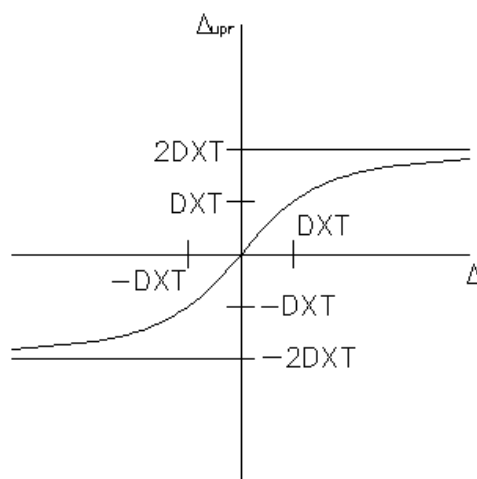
maticí  $B''$ . Poté lze zapsat základní iterační algoritmus Fast-Decoupled NR metody:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\Delta P^{(p-1)}}{U^{(p-1)}} \right] &= [B'^{(p-1)}] \cdot [\Delta \theta^{(p)}] \\ \left[ \frac{\Delta Q^{(p-1)}}{U^{(p-1)}} \right] &= [B''^{(p-1)}] \cdot [\Delta U^{(p)}] \end{aligned} \quad (3.2-23)$$

Ve své práci využívám pouze výpočtu velikostí napětí v PQ uzlech a počítám je pouze jednou iterací. Vzhledem k tomuto faktu lze zanedbat vliv napětí ve vzorcích 3.2-22. Matici  $B''$  pro výpočet poté беру jako záporně vzatou imaginární část admitanční matice  $A$ . Tento přístup je rychlý a pro lepší počáteční odhad k dosažení konvergence postačuje. Rozdílové vektory  $\Delta P$  a  $\Delta Q$  jsou počítány dle 3.2-3, 3.2-4.

Výpočet metodou NR jsem testoval také s počátečním odhadem startovních hodnot velikostí a úhlů všech napětí pomocí 50 iterací Gauss-Seidel výpočtu. Od této metody jsem upustil, protože pro malé sítě nebylo téměř potřeba počítat po odhadu GS metodou dále s NR metodou. Naopak pro velké sítě byl odhad 50 iteracemi GS ještě poměrně nepřesný. Větší počet iterací by zbytečně prodlužoval celkový výpočet NR metody. Další mnou testovanou metodou odhadu počátečních napětí v PQ uzlech byl přístup uvedený v [6] na str. 91 až 93. Jednalo se o výpočet úhlů napětí ve všech uzlech kromě referenčního. Tento přístup jsem vyhodnotil také jako nedostatečný. Oba tyto přístupy jsou součástí dat této diplomové práce, každý v samostatném „m-file“ Matlabu.

Další úpravou ke stabilizaci této metody je využití upraveného přírůstkového vektoru  $\Delta_{upr}$  při aktualizaci velikosti napětí a úhlů napětí. Tento upravený přírůstkový vektor se bude měnit v závislosti na původním korekčním vektoru  $\Delta$  (viz Obr. 3.2-1). Používají se dvě meze (tzv. dělící hodnoty),  $DXT_1$  pro úhly napětí a  $DXT_2$  pro velikosti napětí. Následuje vysvětlení a postup úpravy přírůstkového vektoru.



Obr. 3.2-1 Závislost přírůstkového vektoru na upraveném přírůstkovém vektoru

Pokud bude absolutní hodnota přírůstkového vektoru menší než zvolená mez  $DXT$ , nebude se přírůstkový vektor upravovat. Při překročení meze  $DXT$  se velikost přírůstkového vektoru ořízne s využitím funkce  $\text{signum}$ . Dle [9] jsou hodnoty dělících mezí  $DXT_1=0,3$  a  $DXT_2=0,2$ . V programu této diplomové práce jsou v kombinaci s Fast-Decoupled NR počátečním odhadem velikostí napětí v PQ uzlech a skladbou programu spolehlivější hodnoty  $DXT_1=0,38$  a  $DXT_2=0,14$ .

Úprava aktualizace 3.2-16 pro úhly napětí v uzlech:

*if*  $|\Delta_i| < DXT_1$

$$\theta_i^{(p)} = \theta_i^{(p-1)} + \Delta\theta_i^{(p)}$$

*elseif*  $|\Delta_i| \geq DXT_1$

$$\theta_i^{(p)} = \theta_i^{(p-1)} + \left( 2\text{sign}(\Delta_i)DXT_1 - \frac{DXT_1^2}{\Delta_i} \right)^{(p)}$$

(3.2-24)

*end*

Zde  $\Delta_i$  označuje hodnotu původního přírůstkového vektoru pro úhel napětí v uzlu  $i$ .

Úprava aktualizace 3.2-17 pro velikosti napětí v uzlech:

*if*  $|\Delta_{i+n}| < DXT_2$

$$U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + \frac{\Delta U_i^{(p)}}{U_i^{(p-1)}} U_i^{(p-1)}$$

*elseif*  $|\Delta_{i+n}| \geq DXT_2$

$$U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + \left( 2\text{sign}(\Delta_{i+n}) \frac{DXT_2}{U_i^{(p-1)}} - \frac{DXT_2^2}{\Delta_{i+n}(U_i^{(p-1)})^2} \right) U_i^{(p-1)}$$

(3.2-25)

*end*

Zde  $\Delta_{i+n}$  označuje hodnotu původního přírůstkového vektoru pro velikost napětí v uzlu  $i$ .

Pro začlenění jalových mezí PU uzlů a pozdějšímu přidání regulačních transformátorů jsem musel obecnou NR metodu ještě více upravit. Pro tento účel bylo nutné upravit rozdílový vektor  $m$  a Jacobiho matici  $Jac$ . Při přepínání PU uzlů na PQ se totiž mění rozměr rozdílového vektoru a admitanční matice.

### 3.3 Výstupy – vzorce pro výpočet

Vyřešením ustáleného chodu soustavy pomocí jedné z výše uvedených metod dostaneme základní výsledky v podobě velikosti sdružených napětí v každém uzlu a příslušný úhel napětí. Dále jsou vypočítány jalové výkony v jednotlivých PU uzlech. Pro lepší představu o chování celé soustavy se z těchto základních hodnot dopočítávají další, které platí



i při pozdějším zahrnutí regulačních transformátorů. V této kapitole popíší finální vztahy použité v programu diplomové práce, které jsou uvedeny v [7].

Výpočet injektovaného komplexního výkonu v referenčním uzlu:

$$\bar{S}_{ref} = \bar{U}_{ref} \sum_{i=1}^n \bar{A}_{ref_i}^* \bar{U}_i^* \quad (3.3-1)$$

Platí, že  $_{ref}$  označuje příslušný prvek napětí nebo číslo řádku admitanční matice referenčního uzlu. Injektovaný činný výkon  $\bar{P}_{ref}$  je reálná část  $\bar{S}_{ref}$  z rovnice 3.3-1, injektovaný jalový výkon  $\bar{Q}_{ref}$  je imaginární část  $\bar{S}_{ref}$ .

Proud injektovaný do jednotlivých uzlů se vypočítá dle již zmíněného vzorce 2.2-1. Přehled o dění v elektrizační soustavě získáme výpočtem výkonových větrových toků ve všech větvích. Odvození pro výpočet zdánlivých výkonových toků je v [5] na str. 212. Finální vztahy pro výpočet činných a jalových výkonových toků ve větvích (od uzlu  $i$  do  $k$ ) jsou následující:

$$\begin{aligned} P_{ik} &= (G_{ik} + G_{ik0})U_i^2 - U_i U_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \\ Q_{ik} &= -(B_{ik} + B_{ik0})U_i^2 + U_i U_k [B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) - G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \end{aligned} \quad (3.3-2)$$

Pro větve s transformátory je nutné uvažovat jejich komplexní převody  $\bar{p}$ . Dle dané topologie transformátorů budou vztahy vypadat takto:

$$\begin{aligned} P_{ik} &= (G_{ik} + G_{ik0})U_i^2 \left| \frac{1}{\bar{p}} \right|^2 - U_i U_k \left| \frac{1}{\bar{p}} \right| [G_{ik} \cos(\theta_{ik} - \alpha) + B_{ik} \sin(\theta_{ik} - \alpha)] \\ Q_{ik} &= -(B_{ik} + B_{ik0})U_i^2 \left| \frac{1}{\bar{p}} \right|^2 + U_i U_k \left| \frac{1}{\bar{p}} \right| [B_{ik} \cos(\theta_{ik} - \alpha) - G_{ik} \sin(\theta_{ik} - \alpha)] \end{aligned} \quad (3.3-3)$$

Ve vztazích 3.3-3 parametr  $\alpha$  označuje úhel převodu. Obdobným způsobem lze uvažovat také výkonové toky v opačném směru (od uzlu  $k$  do  $i$ ). Úhel převodu se uvažuje opačný a platí, že  $\sin \theta_{ki} = -\sin \theta_{ik}$ .

$$\begin{aligned} P_{ki} &= (G_{ik} + G_{ik0})U_k^2 - U_i U_k \left| \frac{1}{\bar{p}} \right| [G_{ik} \cos(\theta_{ki} + \alpha) + B_{ki} \sin(\theta_{ki} + \alpha)] \\ Q_{ki} &= -(B_{ik} + B_{ik0})U_k^2 + U_i U_k \left| \frac{1}{\bar{p}} \right| [B_{ik} \cos(\theta_{ki} + \alpha) - G_{ik} \sin(\theta_{ki} + \alpha)] \end{aligned} \quad (3.3-4)$$

Jalové přenášené výkony jsou závislé na velikosti napětí a činné přenášené výkony jsou závislé na velikosti rozdílu úhlů napětí. V praxi se používají spíše zjednodušené vztahy:

$$\begin{aligned} P_{ik} &= \frac{U_i U_k}{X_{ik}} \sin(\theta_i - \theta_k) \\ Q_{ik} &= \frac{U_i}{X_{ik}} (U_k \cos(\theta_i - \theta_k) - U_i) \end{aligned} \quad (3.3-5)$$

Proudy tekoucí ve větvích jsou popsány již v rovnici 2.3-3, pomocí výkonových toků je

lze vyjádřit takto:

$$I_{ik} = \frac{\sqrt{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}}{\sqrt{3}U_i} \text{ obdobně } I_{ki} = \frac{\sqrt{P_{ki}^2 + Q_{ki}^2}}{\sqrt{3}U_k} \quad (3.3-6)$$

Činné a jalové ztráty v jednotlivých větvích:

$$\Delta P_{ik} = P_{ik} + P_{ki} \quad (3.3-7)$$

$$\Delta Q_{ik} = Q_{ik} + Q_{ki}$$

Jalový výkon, příp. činný výkon dodaný kompenzátozem zapojeným v uzlu  $i$  do sítě:

$$Q_{sh_i} = B_{sh} U_i^2 \quad P_{sh_i} = -G_{sh} U_i^2 \quad (3.3-8)$$

Činné a jalové ztráty celé sítě:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n (P_{G_i} + P_{L_i} + P_{sh_i}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n \Delta P_{ik} \quad (3.3-9)$$

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n (Q_{G_i} + Q_{L_i} + Q_{sh_i}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n \Delta Q_{ik}$$

## 4 Regulační transformátory

Regulační transformátory mají nezastupitelnou úlohu v elektrizační soustavě. Díky své regulovatelnosti pomáhají udržovat velikost napětí v příslušných mezích ( $\pm 5, \pm 10 \% U_n$ ). Spolu s regulací napětí dochází také k regulaci jalového výkonu. Nejlevnější a nejjednodušší řešení řízení napětí a jalového výkonu u transformátorů je pomocí přepínače odboček, který se umístí přímo na vstupní či výstupní vinutí transformátoru. Jedná se o řízení napětí v podélném směru. Posledními stroji v české elektrizační soustavě ve směru ke spotřebě, které jsou standardně schopné regulovat napětí a jalový výkon pod zatížením jsou transformátory 110 kV/vn nejčastěji s odbočkami  $\pm 8 \times 2 \% U_n$  nebo  $\pm 8 \times 2,5 \% U_n$  s osazeným hladinovým regulátorem. Pro řízení činného výkonu a toku energie (v souběžných vedeních, i jinde) se používají phase-shiftery nebo transformátorové kaskády – tzv. příčné řízení. Řízení činného výkonu není tak rozšířené jako klasické přepínače odboček. Nicméně v dnešní situaci v energetice je nutné na vybraných místech nasazovat i tyto stroje. Zejména pak v soustavách s nainstalovanými velkými zdroji OZE. Můžeme díky nim ochránit vedení, dokonce celou soustavu před přetížením a dlouhodobým výpadkem. Posledním typem regulace je tzv. „šikmé řízení“, které umožňuje řídit velikost převodu i úhel převodu. Jedná se o společné řízení velikosti napětí, jalového a činného výkonu jedním strojem nebo kombinací strojů.

Naprostá většina (co do počtu kusů) transformátorů v provozu v energetických sítích jsou malé distribuční transformátory s pevným převodem. Je u nich použit přepínač odboček bez zatížení. Takže se u každého v beznapěťovém stavu může převodový poměr měnit podle změn délky vedení a poměrů v síti, kterou transformátor napájí. U nových strojů je pro klasické snižování napětí (tj. v městských a příměstských sítích) nejčastěji použito jednoduchého přepínače odboček bez zatížení na vstupním vinutí  $\pm 2 \times 2,5 \% U_n$ .

V této kapitole se budu věnovat modelování regulačních transformátorů do již funkčních programů pro řešení ustáleného chodu soustavy v GS i NR metodě. Díky tomu bude později možné vyřešit elektrizační soustavy včetně optimálního nastavení odboček všech regulačních transformátorů. Jejich nastavení bude s ohledem na změny napětí/výkonových toků v síti. Jedná se tedy o odlišný přístup oproti dnešní praxi, kde regulační transformátory s přepínačem odboček pod zatížením sledují jen své bezprostřední okolí a nezohledňují napěťové/výkonové poměry v celé soustavě. Vzhledem k vývoji elektrizačních soustav v posledních letech bude možná již brzy takový přístup vyžadován. Zejména pak v distribučních soustavách s výrobou z OZE a zapojenými regulačními transformátory pro řízení napětí, resp. ve „Smart Grid“ sítích.

#### 4.1 Optimální výpočet odboček v řešení soustavy

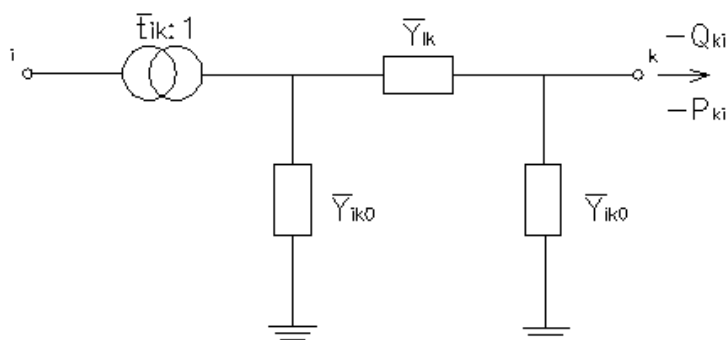
Obecně lze říci, že přístupů k modelování regulačních transformátorů je více. V této diplomové práci uvažuji pro všechny přístupy určitá zjednodušení, která jsou uvedena níže.

Prvním zjednodušením je přístup k paralelnímu chodu transformátorů pro regulaci napětí. Program vyhodnotí, který transformátor je hlavní. Ten bude vypočítáván a ostatní transformátory v paralelním chodu nastavují stejné odbočky. Toto je v souladu s podmínkami paralelního chodu transformátorů (nebude protékat vyrovnávací proud). Rozlišení transformátorů v zadání sítí do programu je dle čísla řízeného uzlu – pro hlavní transformátor je zapsáno kladně, pro ostatní transformátory v paralelním chodu záporně (viz Kap. 5.1). U transformátorů pro regulaci jalového/činného výkonu není paralelní chod uvažován.

Dále uvažuji pouze oddělená řízení napětí, jalového nebo činného výkonu. Každý transformátor slouží pouze k jednomu typu řízení. Takto budou rozděleny jednotlivé logiky také v samotném programu u všech testovaných metod. Požadavek na řízení jedné nebo více z těchto veličin je součástí zadání každé sítě. Např. regulační transformátor pro řízení toku činného výkonu umožňuje pouze řízení úhlu převodu. V praxi jsou nasazovány i phase-shiftery, které umožňují tzv. „šikmé řízení“ – řízení velikosti i úhlu převodu jedním strojem. Tato možnost smíšeného řízení je tedy v programech vyloučena.

Posledním zjednodušením je zanedbání změn pasivních parametrů regulačního transformátoru při změnách převodu nebo úhlu převodu. Bez tohoto zjednodušení by byl výpočtový program velice komplikovaný a pomalý. Výstupní hodnoty by byly teoreticky přesnější, ale v praxi se stejně nasazují regulační transformátory s určitou chybou již ve vlastní konstrukci – pásmo necitlivosti, časová zpoždění přepínačů atd. Takže lze změnu pasivních parametrů zanedbat.

Náhradní model transformátoru jsem odvodil v Kap. 1.2 dle zadaných vstupních dat diplomové práce. Následující Obr. 4.1-1 modelu transformátoru ukazuje ideální transformátor s převodem  $\bar{t}_{ik}: 1$  u uzlu  $i$ , podélná admitance  $\bar{Y}_{ik}$  a příčná admitance  $\bar{Y}_{ik0}$  transformátoru jsou u uzlu  $k$ . Uzel  $k$  (resp. výkon tekoucí z uzlu  $k$ ) je tedy regulační a bude ovlivňován změnou převodu. Toto uspořádání je důležité pro správné popsání a odvození vzorců v následujících kapitolách.



Obr. 4.1-1 Náhradní schéma regulačního transformátoru

Pro regulační transformátory k řízení napětí nebo jalového výkonu je převod  $\bar{t}_{ik}$  reálným číslem – mění se velikost převodu  $t_{ik}$ , jehož startovní hodnoty jsou nastaveny u většiny sítí na 1 pu. Úhel převodu  $\alpha_{ik}$  je u většiny sítí po celou dobu výpočtu  $0^\circ$ . U regulačního transformátoru pro řízení činného výkonu je převod imaginárním číslem - mění se úhel převodu  $\alpha_{ik}$ , jehož startovní hodnoty jsou u většiny sítí nastaveny na  $0^\circ$ . Velikost převodu  $t_{ik}$  je u většiny sítí nastavena na 1 pu.

## 4.2 Regulační transformátory v GS metodě

Metodu Gauss-Seidel rozšířím o výpočet optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů přidáním příslušných logik a vztahů. Jejich zapojení do výpočtu bude, podobně jako u jalových mezí, až při přiblížení konvergence k nastavené požadované odchylce výpočtu. Tím se zajistí, že aktuální hodnoty napětí, toků činného a jalového výkonu z probíhajícího výpočtu potřebné pro regulační transformátory budou již poměrně přesným výsledkem. Podmínka sepnutí logik tedy bude -  $if\ odch \leq zvolena\_odchylka \cdot 100$ .

Všechny potřebné hodnoty pro výpočet s regulačními transformátory jsou již obsaženy v zadání všech vypočítávaných sítí, konkrétně v matici M1 (viz Kap. 5.1). Je vždy zadána hodnota, na kterou regulují –  $U_{cíl}$ ,  $P_{cílki}$  nebo  $Q_{cílki}$ , resp. jejich maximální a minimální meze. Velikost napětí se reguluje ve výstupním uzlu, ke kterému je připojen transformátor nebo v uzlu vzdáleném za transformátorem. Činný a jalový výkon jsou regulovány v příslušné větvi sítě s transformátorem. Aktuální velikost napětí v řízeném uzlu se zjišťuje probíhajícím numerickým výpočtem. Činný a jalový výkon tekoucí ve větvi s transformátorem je nutné dopočítat v okamžiku sepnutí logiky transformátorů.

Pro metodu výpočtu Gauss-Seidel jsem prostudoval a namodeloval tři metody, které popíši v následující části práce. Každý přístup má své předpokládané výhody a nevýhody, které budou v následujících kapitolách potvrzeny nebo vyvráceny. Před jejich vlastním spuštěním v programu je nutné hlídat, které transformátory jsou regulační a jaký je aktuální stav odchylky výpočtu v každé iteraci. Tím se předejde zbytečnému spínání logik, které by prodlužovalo výpočet.

#### 4.2.1 Metoda kontinuální – se zaokrouhlením (OLTC 1)

Tato metoda zařazení algoritmů regulačních transformátorů do výpočtu je podrobně popsána v [3]. Bude se zde zaokrouhlovat na celé číslo větší počet kroků přepnutí regulačních transformátorů v jedné iteraci. Mělo by se tedy jednat o rychlou metodu. Následuje popis skladby programu této metody pro jednotlivé druhy regulačních transformátorů.

Výpočet optimálního nastavení regulačních transformátorů pro řízení napětí bude v celých násobcích kroku  $\Delta t_{ik}$ . Pokud budeme řídit napětí  $U_i$  v uzlu  $k$ , pak pro počet kroků platí:

$$n_t = \text{round} \left[ \frac{U_k^{(p)} - U_{cíl_k}}{U_k^{(p)} \Delta t_{ik}} \right] \quad (4.2-1)$$

Funkce „round“ naznačuje zaokrouhlení kroku přepínání  $n_t$  na celý násobek kroku  $\Delta t_{ik}$  při každé změně převodu. Když bude aktuální vypočítané napětí  $U_k$  v řízeném uzlu nižší než  $U_{cíl}$ , sníží se převod  $t_{ik}$ . Toto tvrzení platí pro danou konfiguraci transformátoru z Obr. 4.2-1. Cílové napětí  $U_{cíl_k}$  se předem dopočte na střední hodnotu mezi maximální a minimální mezí cílového napětí, které jsou zadány:

$$U_{cíl_k} = \frac{U_{max_k} + U_{min_k}}{2} \quad (4.2-2)$$

Dále ve výpočtu generuji novou velikost převodu  $t_{ik}$  regulačního transformátoru:

$$t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} + n_t \Delta t_{ik} \quad (4.2-3)$$

Poté je nutná kontrola mezi regulačního transformátoru a případné nastavení maximální nebo minimální meze, pokud by byla překročena:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } t_{ik}^{(p)} \leq t_{ik_{min}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik_{min}} \\
 & \text{elseif } t_{ik}^{(p)} \geq t_{ik_{max}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik_{max}} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.2-4}$$

Po této korekci je nutné upravit příslušné prvky admitanční matice regulačních transformátorů. Převod se převede do komplexního tvaru a poté bude postup úpravy admitanční matice stejný pro všechny typy regulace. Proto je úprava uvedena až na konci popisu celé této metody – vzorce 4.2-16 a 4.2-17.

Výpočet optimálního nastavení regulačních transformátorů k řízení jalového výkonu souvisí v praxi s předchozí regulací napětí. Ale jak již bylo řečeno, zde uvažují regulaci obou veličin odděleně. Pro jalový výkon  $-Q_{ki}$  tekoucí ve větvi s transformátorem dopočtu jeho aktuální hodnotu z velikosti převodu  $t_{ik}$  a úhlu převodu  $\alpha_{ik}$  následovně:

$$-Q_{ki} = (B_{ik} + B_{ik0})U_k^2 - \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \tag{4.2-5}$$

Řízený jalový výkon vytéká z uzlu  $k$ , proto je nutné „-“. Cílová hodnota jalového výkonu  $Q_{cíl_{ki}}$ , který má protékat větví s transformátorem je definována:

$$Q_{cíl_{ki}} = \frac{Q_{max_{ki}} + Q_{min_{ki}}}{2} \tag{4.2-6}$$

Tato hodnota cílového výkonu je uvažována jako vytékající z uzlu  $k$ . Není tedy brána záporně jako aktuální hodnota.

Počet kroků přepínače odboček se určí následovně:

$$n_t = \text{round} \left[ \frac{-Q_{ki}^{(p)} - Q_{cíl_{ki}}}{\frac{\partial (-Q_{ki}^{(p)})}{\partial t_{ik}} \Delta t_{ik}} \right] \tag{4.2-7}$$

Opět zde dochází k zaokrouhlení „round“ kroku v jednotlivých iteracích. Parciální derivaci protékajícího jalového výkonu jsem odvodil ze vzorce 4.2-5 pro obecný případ:

$$\frac{\partial (-Q_{ki})}{\partial t_{ik}} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}^2} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \tag{4.2-8}$$

Nyní je nutné dopočítat novou velikost převodu regulačního transformátoru:

$$t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} - n_t \Delta t_{ik} \tag{4.2-9}$$

Stejně jako u regulace napětí používám logiku pro nastavení maximální a minimální meze přepínače v případě překročení dle známého vzorce 4.2-4. Po finální změně velikosti převodu je nutné upravit prvky admitanční matice, obdobně pro všechny typy regulace - vzorce 4.2-16 a 4.2-17.

Výpočet optimálního nastavení regulačních transformátorů pro regulaci činného výkonu je dosažen změnou úhlu převodu  $\alpha_{ik}$ . Aktuální hodnota protékajícího činného výkonu  $-P_{ki}$  ve větvi mezi uzly  $i$  a  $k$ :

$$-P_{ki} = -(G_{ik} + G_{ik0})U_k^2 + \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ki} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.2-10)$$

Cílová hodnota  $P_{cíl_{ki}}$  je vypočítána předem obdobně jako v předchozích případech řízení:

$$P_{cíl_{ki}} = \frac{P_{max_{ki}} + P_{min_{ki}}}{2} \quad (4.2-11)$$

Poté analogicky pro počet kroků úhlu převodu:

$$n_\alpha = \text{round} \left[ \frac{-P_{ki}^{(p)} - P_{cíl_{ki}}}{\frac{\partial (-P_{ki}^{(p)})}{\partial \alpha_{ik}} \Delta \alpha_{ik}} \right] \quad (4.2-12)$$

Stejně jako v předchozích dvou případech, dojde k zaokrouhlení „round“ kroku úhlu převodu na celé číslo již při jeho výpočtu. Činný výkon tekoucí ve větvi s transformátorem jsem parciálně derivoval podle úhlu převodu  $\alpha_{ik}$  pro obecný případ:

$$\frac{\partial (-P_{ki})}{\partial \alpha_{ik}} = \frac{U_i U_k}{\alpha_{ik}} [-G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.2-13)$$

Nastavení nového úhlu převodu:

$$\alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik}^{(p-1)} - n_\alpha \Delta \alpha_{ik} \quad (4.2-14)$$

Kontrola překročení mezi přepínače odboček:

$$\begin{aligned} \text{if } \alpha_{ik}^{(p)} &\leq \alpha_{ik_{min}} \\ &\alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik_{min}} \\ \text{elseif } \alpha_{ik}^{(p)} &\geq \alpha_{ik_{max}} \\ &\alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik_{max}} \end{aligned} \quad (4.2-15)$$

end

Nyní je nutné změny převodů ze všech typů regulací zavést do příslušných prvků transformátorů v admitanční matici. Uvedl jsem, že úpravy admitanční matice provádím společně pro všechny regulační transformátory v dané iteraci po výpočtu všech výše zmíněných velikostí převodů nebo úhlů převodů.

Z obecného vztahu 2.3-11 pro začlenění transformátorů vyplývá, že dojde k ovlivnění pouze tří prvků admitanční matice pro každý regulační transformátor zapojený mezi uzly  $i$ ,  $k$ . Nejprve se odečtou původní hodnoty tří prvků admitanční matice  $A_{ii}$ ,  $A_{ik}$  a  $A_{ki}$  jednotlivých transformátorů s admitancemi  $\bar{Y}_{ik}$ ,  $\bar{Y}_{ik0}$ . Zde uvažují původní komplexní převod  $\bar{p}$ :

$$\begin{bmatrix} A_{ii} - \left| \frac{1}{\bar{p}} \right|^2 (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) & A_{ik} + \frac{1}{\bar{p}^*} \bar{Y}_{ik} \\ A_{ki} + \frac{1}{\bar{p}} \bar{Y}_{ik} & A_{kk} \end{bmatrix} \quad (4.2-16)$$

Poté je nutné přičíst do těchto pozic v admitanční matici admitance transformátorů  $\bar{Y}_{ik}$ ,  $\bar{Y}_{ik0}$  zpět s aplikovanými novými komplexními převody  $\bar{t}_{ik}$ :

$$\begin{bmatrix} A_{ii} + \left| \frac{1}{\bar{t}_{ik}} \right|^2 (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) & A_{ik} - \frac{1}{\bar{t}_{ik}^*} \bar{Y}_{ik} \\ A_{ki} - \frac{1}{\bar{t}_{ik}} \bar{Y}_{ik} & A_{kk} \end{bmatrix} \quad (4.2-17)$$

Změnou admitanční matice  $A$  dojde ke změnám napětí, činných a jalových toků. V další iteraci budou již tyto změny aplikovány. Při dalším přiblížení výpočtu konvergence se opět sepnou logiky pro jalové meze a regulační transformátory. Proběhne výpočet s novými hodnotami a případně se provede další úprava převodu nebo úhlu převodu.

U této metody OLTC1 zařazení algoritmů regulačních transformátorů jsem přidal do původního programu nejprve výpočet nastavení regulačních transformátorů, změnu admitanční matice. Až poté jsou uvažovány jalové meze PU uzlů, které v případě překročení mezí přepnou PU uzly na PQ uzly. Během výpočtu nepřepínám regulační transformátory na fixní. Pokud bych tak učinil, bylo by nutné v případě navrácení napětí, jalového nebo činného výkonu zpět do příslušných mezí znovu přepínat transformátory na regulační. Takový přístup je zřejmě také možný, ale bylo by nutné vytvořit další logiku pouze pro tento přístup. Z hlediska fungování algoritmů pro regulační transformátory v této metodě to nebylo nutné. Pokud je přepínač odboček na své horní nebo dolní mezi a regulovaná veličina se vrátí do svých mezí, pak správně zareaguje i regulační transformátor – je stále regulační a hlídá aktuální hodnoty v kontrolovaných uzlech/větvích.

#### 4.2.2 Metoda kontinuální – bez zaokrouhlení (OLTC 1 bez „round“)

Tato metoda je pouze úpravou předchozí metody OLTC 1. Použité výpočty a algoritmy jsou stejné. Pouze zde nepoužívám zaokrouhlování „round“ na celé číslo při výpočtech počtu kroků. Počet kroků velikosti převodu  $n_t$  nebo úhlu převodu  $n_\alpha$  tedy nejsou celistvým násobkem kroku velikosti převodu  $\Delta t_{ik}$  nebo velikosti kroku úhlu převodu  $\Delta \alpha_{ik}$ . Po ukončení výpočtu je v případě potřeby pro praktické využití s klasickými přepínači odboček nutné tyto



hodnoty ručně zaokrouhlit ve výstupních datech – provádí obsluha programu. V případě nasazení např. distribučních transformátorů schopných regulovat napětí pomocí výkonové elektroniky je naopak tento přístup výhodný. Dojde totiž k větší přesnosti nastavení hodnot vzhledem k cílovým hodnotám.

Očekávaná vyšší přesnost nastavení regulačních transformátorů bude zcela jistě dosažena. Během testů bylo oproti předchozí metodě nutné upravit hlídání jalových mezí versus regulační transformátory. Pokud budou jalové meze zcela vypnuté, pak je přesnost nastavení regulačních transformátorů značná (až  $1e-18$ ). Ovšem celkově se jedná pouze o přibližné výsledky celé sítě, právě protože nejsou aktivní omezení jalových výkonů v PU uzlech. Zpracoval jsem tedy ještě rozhodovací logiku mezi sepnutím logik regulačních transformátorů nebo jalových mezí na základě překročení stanovených mezí. Pokud bude maximální překročení mezí regulačního transformátoru větší než maximální překročení jalových mezí, sepne se logika pro změny admitanční matice regulačních transformátorů a naopak. Tento rozhodovací proces u některých sítí způsobil pokles přesnosti nastavení regulačních transformátorů a prodloužení doby výpočtu, ale výsledky chodu soustavy již odpovídají.

### 4.2.3 Metoda diskrétní - přepínání po krocích (OLTC 2)

Následuje metoda s odlišným přístupem k přepínání odboček. Její rychlost nebude zřejmě tak vysoká jako u předchozích metod. V praktickém využití regulačních transformátorů jsou tyto stroje pomalé a mění svůj převod o jeden krok v daném čase spínání. To se děje pouze pokud je řízená veličina rozdílná od aktuální naměřené hodnoty s uvažováním tzv. „*deadband*“ – pásmo necitlivosti regulačního transformátoru. Rychlost přepnutí z jedné odbočky na další je obvykle 5 sekund. K tomuto časovému zpoždění se ještě záměrně přidává další zpoždění k potlačení chybných spínání při přechodných dějích v elektrizační soustavě. Kompletní popis včetně časového spínání odboček je uveden v [12].

Protože se v této práci věnuji pouze výpočtu optimálního nastavení odboček, lze časová zpoždění přepínače zanedbat. V této metodě je počítáno s pásmem necitlivosti  $d$  regulačního transformátoru. Jde o pásmo necitlivosti, které respektuje chyby měření a nastavení veličiny. Pásmo necitlivosti  $d$  je v praxi standardně nastaveno na dvojnásobek kroku přepnutí, v práci jej tak také uvažuji.

Tato diskrétní metoda změní velikost převodu nebo úhel převodu pouze o jeden krok  $\Delta t_{ik}$ ,  $\Delta \alpha_{ik}$  v jedné iteraci, pokud bude nalezen rozdíl mezi cílovou a aktuální hodnotou regulované veličiny (vč. pásma necitlivosti). V dalších iteracích bude přepínáno po krocích, dokud

aktuální hodnota nedosáhne té cílové s respektováním pásma necitlivosti. Pokud nebude zaznamenán rozdíl v regulované veličině (vč. pásma necitlivosti), nebude se převod měnit.

Protože jsou zde použity některé stejné logiky jako v kontinuálních metodách, budu se na ně pouze odkazovat. Nejprve uvádím regulaci napětí. Cílovou hodnotu regulovaného napětí uvažuji opět jako v předchozích metodách dle vzorce 4.2-2. Zápis nové velikosti převodu  $t_{ik}$  se provede po ověření rozdílu v cílovém napětí  $U_{cíl_k}$  s uvažováním pásma necitlivosti  $d$  a aktuální hodnotě  $U_k$  a po kontrole regulačního rozsahu velikosti převodu  $t_{ik}$ :

$$\begin{aligned}
 & \text{if } U_k^{(p)} > (U_{cíl_k} + d) \ \& \ t_{ik}^{(p-1)} < t_{ik_{max}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} + \Delta t_{ik} \\
 & \text{elseif } U_k^{(p)} < (U_{cíl_k} - d) \ \& \ t_{ik}^{(p-1)} > t_{ik_{min}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} - \Delta t_{ik} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.2-18}$$

Pokud nebudou splněny tyto podmínky, nebude se velikost převodu měnit. Když bude aktuální vypočítané napětí  $U_k$  v řízeném uzlu nižší než  $U_{cíl}$ , sníží se převod  $t_{ik}$ . Toto tvrzení platí stejně jako v předchozích metodách pro danou konfiguraci transformátoru z Obr. 4.2-1. Dále je nutné ověřit, zda velikosti převodu  $t_{ik}$  nepřekračují meze přepínačů odboček, příp. nastavit maximální resp. minimální hodnotu (vzorec 4.2-4).

Pro regulaci jalového výkonu platí obdobná logika jako v případě regulace napětí. Cílová hodnota regulovaného jalového výkonu je vypočítána podle vzorce 4.2-6. Aktuální hodnota protékajícího jalového výkonu se zjistí obdobně jako v předchozích metodách dle vzorce 4.2-5. Pro novou hodnotu velikosti převodu  $t_{ik}$  s uvažováním rozdílu v řízené veličině  $-Q_{ki}$  a cílové veličině  $Q_{cíl_{ki}}$  s uvažováním pásma necitlivosti  $d$  a možnosti přepnout přepínač odboček:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } -Q_{ki}^{(p)} > (Q_{cíl_{ki}} + d) \ \& \ t_{ik}^{(p-1)} < t_{ik_{max}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} + \Delta t_{ik} \\
 & \text{elseif } -Q_{ki}^{(p)} < (Q_{cíl_{ki}} - d) \ \& \ t_{ik}^{(p-1)} > t_{ik_{min}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} - \Delta t_{ik} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.2-19}$$

Zde se opět ověřuje, zda velikost převodu nepřekračuje meze přepínačů. Provede se již známým způsobem, dle vzorce 4.2-4.

Obdobně jako na předchozí regulace je pohlíženo také na regulaci činného výkonu. Cílová hodnota protékajícího činného výkonu ve větvi s regulačním transformátorem je

vypočítána ze vzorce 4.2-11. Aktuální hodnota protékaného činného výkonu potom dle vzorce 4.2-10.

Zápis nového úhlu převodu  $\alpha_{ik}$  (následující vzorec 4.2-20) se provede po ověření rozdílu v aktuální hodnotě protékajícího činného výkonu  $-P_{ki}$  a cílovém činném výkonu  $P_{cíl_{ki}}$  s uvažováním pásma necitlivosti  $d$  a kontrole regulačního rozsahu úhlu převodu  $\alpha_{ik}$ .

$$\begin{aligned}
 & \text{if } -P_{ki}^{(p)} > (P_{cíl_{ki}} + d) \ \& \ \alpha_{ik}^{(p-1)} < \alpha_{ik_{max}} \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik}^{(p-1)} + \Delta\alpha_{ik} \\
 & \text{elseif } -P_{ki}^{(p)} < (P_{cíl_{ki}} - d) \ \& \ \alpha_{ik}^{(p-1)} > \alpha_{ik_{min}} \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik}^{(p-1)} - \Delta\alpha_{ik} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.2-20}$$

Následuje opět nutná kontrola mezí přepínače odboček, příp. korekce dle vzorce 4.2-15.

V každé iteraci je třeba aplikovat změny velikostí a úhlů převodů v admitanční matici  $A$  stejným způsobem jako u předchozích metod dle 4.2-16 a 4.2-17. Změna v admitanční matici vyvolá změny ve vypočítávané síti.

Podobně jako u metody OLTC 1 jsou do výpočtu zařazeny nejprve algoritmy regulačních transformátorů a poté logiky jalových mezí PU uzlů. Není mezi nimi použita žádná priorita. Pokud jsou v síti řešené tímto přístupem regulační transformátory pro regulaci činného nebo jalového výkonu, dochází k oscilaci mezi dvěma velikostmi převodu nebo úhlu převodu. Toto jsem při testech vyřešil přepnutím regulačních transformátorů na fixní po určitém počtu iterací. Počet iterací, při kterých se přepnou na fixní, je samozřejmě nutné upravovat pro každou síť zvlášť. Správného nastavení jsem dosáhl s pomocí grafických výstupů programu, ze kterých se dá vysledovat přibližný korektní počet iterací pro ukončení výpočtu. Pokud by měla tato metoda mít využití, bylo by nutné doplnit jí o hlídání přepínání mezi dvěma sousedními převody. Kdyby se měnil převod pouze mezi dvěma sousedními kroky např. 10x za sebou, ukončil by se výpočet přepnutím na fixní transformátory s posledním stavem. Nebo by bylo možné vyhodnotit oba stavy a rozhodnout, který je přesnější z hlediska dosažení cílové hodnoty. Toto je ovšem opět pro praktické využití zbytečná komplikace vzhledem k nepřesnosti samotných regulačních transformátorů v praxi.

### 4.3 Regulační transformátory v NR metodě

Metodu Newton-Raphson jsem pro začlenění algoritmů k hledání optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů upravoval pouze jedním přístupem dle [12], [15] a [16]. Jedná se o cestu úprav základního algoritmu NR metody. Není zde zaokrouhlování na celé

kroky převodů. Stejně jako u metody Gauss-Seidel jsou data potřebná pro modelování regulačních transformátorů součástí zadání.

Opět lze výpočet optimálních odboček regulačních transformátorů v ustáleném chodu soustavy rozdělit na regulaci napětí, toku jalového a činného výkonu. Takto odděleně budou problémy nadále popisovat. Začnu popisem úprav a logik k výpočtu optimálního nastavení odboček u regulace napětí. Před startem výpočtové smyčky „while“ programu je nutné nalézt všechny regulační transformátory pro řízení napětí, příp. vyhodnotit zda jsou v paralelním chodu a zapsat jejich pozice pro další použití ve výpočtu. Následně se těmto transformátorům, obecně zapojeným mezi uzly  $i$  a  $k$ , nastaví cílové napětí do regulovaných uzlů  $k$ :

$$U_k = U_{cíl_k} = \frac{U_{max_k} + U_{min_k}}{2} \quad (4.3-1)$$

V první iteraci výpočtu budou vždy aktivní všechny regulační transformátory (obecně mezi uzly  $i$  a  $k$ ), o jejich přepnutí na fixní se rozhoduje až po aktualizaci nových převodů v současné iteraci dle logiky 4.3-7. Zmíněnými parciálními derivacemi se nahradí prvky  $N_{ik}$ ,  $N_{kk}$ ,  $L_{ik}$  a  $L_{kk}$  Jacobiho matice dle následujících vztahů:

$$N_{ik} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = -2(G_{ik} + G_{ik0}) \frac{U_i^2}{t_{ik}^2} + \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-2)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_{ki}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-3)$$

$$L_{ik} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = 2(B_{ik} + B_{ik0}) \frac{U_i^2}{t_{ik}^2} - \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-4)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_{ki}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-5)$$

Ostatní prvky v příslušných sloupcích submatic  $N$  a  $L$  je nutno nahradit nulami.

Po změnách v Jacobiho matici se změní také přírůstkový vektor  $d$ . Na příslušných pozicích pro aktivní regulační transformátory se místo výpočtu přírůstků napětí  $\Delta U_k / U_k$  počítají přírůstky velikostí převodů  $\Delta t_{ik} / t_{ik}$ .

Nyní je nutné upravit původní aktualizaci velikosti napětí v PQ uzlech ze vzorce 3.2-25. V uzlech řízených přepínači odboček pro regulaci napětí je nastaveno cílové napětí  $U_k$ . Na těchto pozicích se tedy napětí nemění a není nutné jej aktualizovat. Pro ostatní napětí v PQ uzlech proběhne standardní aktualizace dle vzorce 3.2-25. V případě regulačních transformátorů se dopočítávají aktualizace velikostí převodů s využitím upraveného přírůstkového vektoru dle následující logiky 4.3-6.

$$\begin{aligned}
 & \text{if } |\Delta_i| < DXT_3 \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} + \frac{\Delta t_{ik}^{(p)}}{t_{ik}^{(p-1)}} t_{ik}^{(p-1)} \\
 & \text{elseif } |\Delta_i| \geq DXT_3 \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik}^{(p-1)} + \left( 2 \text{sign}(\Delta_i) \frac{DXT_3}{t_{ik}^{(p-1)}} - \frac{DXT_3^2}{\Delta_i (t_{ik}^{(p-1)})^2} \right) t_{ik}^{(p-1)} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.3-6}$$

Zde  $\Delta_i$  představuje hodnotu původního přírůstkového vektoru pouze pro regulační transformátory v podobě  $\Delta t_{ik}/t_{ik}$ . Vhodné nastavení hodnoty  $DXT_3$  bude zajištěno sérií testů dostupných sítí.

Po zjištění nových hodnot převodů regulačních transformátorů pro řízení napětí se kontroluje, zda jsou v příslušných mezích přepínačů. Pokud budou meze překročeny, zapíše se jako nový převod horní nebo dolní mez a transformátor se přepne na fixní:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } t_{ik}^{(p)} \leq t_{ik_{min}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik_{min}} ; \text{regulační} \rightarrow \text{fixní} \\
 & \text{elseif } t_{ik}^{(p)} \geq t_{ik_{max}} \\
 & \quad t_{ik}^{(p)} = t_{ik_{max}} ; \text{regulační} \rightarrow \text{fixní} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.3-7}$$

Při přepnutí na fixní transformátor dojde k uvolnění napětí v regulovaném uzlu  $k$  a jeho hodnota je dopočítávána původní Jacobiho maticí, původním vektorem  $d$  a aktualizací velikosti napětí v PQ uzlu.

Nové hodnoty velikostí převodů regulačních transformátorů vč. omezených jsou zapsány pro příští iteraci a promítnou se do admitanční matice obdobným způsobem jako v GS metodě dle vzorců 4.2-16 a 4.2-17. Pro správný průběh numerického výpočtu je po aktualizaci admitanční matice ještě nutné zjistit, které transformátory jsou stále regulační a které jsou fixní. Údaj o pozicích regulačních transformátorů se zapíše do příslušné proměnné. V další iteraci se podle tohoto údaje opět uvažují zmíněné změny nebo se počítá původním výpočtem chodu soustavy.

Zahrnutí algoritmů regulačních transformátorů pro výpočet optimálního nastavení odboček k regulaci jalového/činného výkonu je složitější než předchozí úpravy pro napětí. Nejprve je před startem výpočtu nutné nalézt pozice těchto transformátorů. Nyní se již nebude nastavovat cílová hodnota do kontrolovaného uzlu jako v případě regulace napětí, protože transformátory mění tok ve své vlastní větvi. Cílové hodnoty toků  $Q_{cílki}$ ,  $P_{cílki}$  jsou zjištěny dle známých vztahů z GS metody – viz vzorce 4.2-6 a 4.2-11. Po startu výpočetní „while“

smyčky je dle [15] nutné upravit původní rozdílový „mismatch“ vektor, Jacobiho matici a přírůstkový „correction“ vektor následovně:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ \partial y / \partial \theta_i & \partial y / \partial \theta_k & \partial y / \partial U_i & \partial y / \partial U_k & \partial y / \partial x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ik} / \partial x}{\Delta U^{(p)}} \\ \frac{\partial P_{ki} / \partial x}{U^{(p-1)}} \\ \frac{\partial Q_{ik} / \partial x}{\Delta x} \\ \frac{\partial Q_{ki} / \partial x}{} \end{bmatrix} \quad (4.3-8)$$

Tento obecný zápis úprav platí pro oba typy regulačních transformátorů. Prvky  $H$ ,  $N$ ,  $J$  a  $L$  představují původní Jacobiho matici, příp. Jacobiho matici s respektováním regulačních transformátorů pro regulaci napětí. Význam proměnných  $x$  a  $y$  bude vysvětlen níže.

V případě regulačního transformátoru pro řízení jalového výkonu, mezi uzly  $i$  a  $k$ , vyjadřuje proměnná  $\Delta y$  rozdíl aktuální  $-Q_{ki}$  a cílové  $Q_{cíl_{ki}}$  hodnoty:

$$\Delta y = Q_{cíl_{ki}} - \left( (B_{ik} + B_{ik0})U_k^2 - \frac{U_i U_k}{t_{ik}} (B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})) \right) \quad (4.3-9)$$

Výpočet dle vzorce 4.3-9 je již ve finální podobě a je nutné jej provést při výpočtu původního rozdílového „mismatch“ vektoru a do tohoto vektoru novou hodnotu zahrnout.

Úprava Jacobiho matice je zřejmá ze 4.3-8. Zde je nutné k původní matici přidat řádek resp. sloupec, které budou v příslušných „regulačních“ pozicích  $i$  a  $k$  obsahovat parciální derivace rozdílu aktuální a cílové hodnoty  $\Delta y$  resp. parciální derivace toků činných nebo jalových výkonů:

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_i} = \frac{\partial(-Q_{ki})}{\partial \theta_i} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-10)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_k} = \frac{\partial(-Q_{ki})}{\partial \theta_k} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-11)$$

$$\frac{\partial y}{\partial U_i} = \frac{\partial(-Q_{ki})}{\partial U_i} U_i = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-12)$$

$$\frac{\partial y}{\partial U_k} = \frac{\partial(-Q_{ki})}{\partial U_k} U_k = 2(B_{ik} + B_{ik0})U_k^2 - \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-13)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial(-Q_{ki})}{\partial t_{ik}} t_{ik} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-14)$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial x} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = -2(G_{ik} + G_{ik0}) \frac{U_i^2}{t_{ik}^2} + \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-15)$$

$$\frac{\partial P_{ki}}{\partial x} = \frac{\partial P_{ki}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-16)$$

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial x} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = 2(B_{ik} + B_{ik0}) \frac{U_i^2}{t_{ik}^2} - \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-17)$$

$$\frac{\partial Q_{ki}}{\partial x} = \frac{\partial Q_{ki}}{\partial t_{ik}} t_{ik} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-18)$$

Tyto změny korespondují s původní topologií Jacobiho matice. Prvky  $\partial y/\partial x$  jsou obsazeny pouze na hlavní diagonále, ostatním je zapsána nula. U prvků v přidaném řádku a sloupci jsou obsazeny pouze příslušné pozice  $i$  a  $k$ , ve zbylých je nula.

Obecná proměnná  $\Delta x$  představuje přírůstek velikosti převodu:

$$\Delta x = \frac{\Delta t_{ik}}{t_{ik}} \quad (4.3-19)$$

Její hodnota je vypočítávána v přírůstkovém vektoru obdobně jako u regulace napětí (4.3-6) s využitím nových mezí  $DXT_4$ , jejichž hodnotu bude nutné zjistit.

Nyní uvedu obdobné úpravy v případě regulačního transformátoru pro řízení činného výkonu, zapojeného obecně mezi uzly  $i$  a  $k$ . Zde vyjadřuje obecná proměnná  $\Delta y$  rozdíl aktuální  $-P_{ki}$  a cílové  $P_{cíl_{ki}}$  hodnoty:

$$\Delta y = P_{cíl_{ki}} - \left( -(G_{ik} + G_{ik0})U_k^2 + \frac{U_i U_k}{t_{ik}} (G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})) \right) \quad (4.3-20)$$

Úprava Jacobiho matice dle 4.3-8:

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_i} = \frac{\partial(-P_{ki})}{\partial \theta_i} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-21)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_k} = \frac{\partial(-P_{ki})}{\partial \theta_k} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-22)$$

$$\frac{\partial y}{\partial U_i} = \frac{\partial(-P_{ki})}{\partial U_i} U_i = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-23)$$

$$\frac{\partial y}{\partial U_k} = \frac{\partial(-P_{ki})}{\partial U_k} U_k = -2(G_{ik} + G_{ik0})U_k^2 + \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-24)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial(-P_{ki})}{\partial \alpha_{ik}} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-25)$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial x} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial \alpha_{ik}} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-26)$$

$$\frac{\partial P_{ki}}{\partial x} = \frac{\partial P_{ki}}{\partial \alpha_{ik}} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [G_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-27)$$

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial x} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \alpha_{ik}} = \frac{U_i U_k}{t_{ik}} [-B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-28)$$

$$\frac{\partial Q_{ki}}{\partial x} = \frac{\partial Q_{ki}}{\partial \alpha_{ik}} = -\frac{U_i U_k}{t_{ik}} [B_{ik} \sin(\alpha_{ik} - \theta_{ik}) + G_{ik} \cos(\alpha_{ik} - \theta_{ik})] \quad (4.3-29)$$

Tyto změny opět korespondují s původní topologií Jacobiho matice. Prvky  $\partial y/\partial x$  jsou obsazeny pouze na hlavní diagonále, ostatním je zapsána nula. U prvků v přidaném řádku a sloupci jsou obsazeny pouze příslušné pozice  $i$  a  $k$ , ve zbylých je nula.

Obecná proměnná  $\Delta x$  představuje přírůstek úhlu převodu:

$$\Delta x = \Delta \alpha_{ik} \quad (4.3-30)$$

Její hodnota je dopočítávána v přírůstkovém vektoru obdobně jako úhly napětí v uzlech:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } |\Delta_i| < DXT_5 \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik}^{(p-1)} + \Delta\alpha_{ik}^{(p)} \\
 & \text{elseif } |\Delta_i| \geq DXT_5 \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik}^{(p-1)} + \left( 2\text{sign}(\Delta_i)DXT_5 - \frac{DXT_5^2}{\Delta_i} \right)^{(p)} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.3-31}$$

Zde  $\Delta_i$  představuje hodnotu původního přírůstkového vektoru pouze pro regulační transformátory v podobě  $\Delta\alpha_{ik}$ . Hodnota  $DXT_5$  bude řešena testy dostupných sítí.

I pro regulační transformátory k řízení jalového/činného výkonu je nutné hlídat překročení maximální resp. minimální meze převodu. V případě překročení mezí je nutné přepnout transformátor na fixní a nastavit příslušnou mez. U regulačních transformátorů k řízení jalového výkonu platí logika 4.3-7. U regulačních transformátorů k řízení činného výkonu je hlídáno překročení mezí následovně:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \alpha_{ik}^{(p)} \leq \alpha_{ik_{min}} \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik_{min}} ; \text{regulační} \rightarrow \text{fixní} \\
 & \text{elseif } \alpha_{ik}^{(p)} \geq \alpha_{ik_{max}} \\
 & \quad \alpha_{ik}^{(p)} = \alpha_{ik_{max}} ; \text{regulační} \rightarrow \text{fixní} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{4.2-32}$$

Opět je po zjištění nových převodů nutné aktualizovat admitanční matici o změny vlivem regulačních transformátorů (vč. aktuálně přepnutých na fixní) dle známých vztahů 4.2-16 a 4.2-17. Dále se aktualizuje, které transformátory jsou stále regulační a které jsou již přepnuty na fixní.

V původním výpočtu chodu soustavy byly zahrnuty jalové meze PU uzlů, které v kombinaci s logikami pro regulační transformátory destabilizují celý výpočet. Literatura zabývající se touto problematikou [15] doporučuje zavést rozhodovací proces mezi oběma logikami. Nejprve spínat klasický výpočet NR s jalovými mezemi a při přiblížení konvergence (cca  $1e-4$ ) sepnout logiky regulačních transformátorů. Toto nastavení se mi v mém programu nepodařilo zprovoznit i přes sérii testů s různým nastavením všech algoritmů. Zaměřil jsem se tedy více na nastavování mezí  $DXT$  „update“ procesů regulačních transformátorů. Při zmíněných testech vznikl problém s rychlým přepnutím regulačních transformátorů na fixní. Z tohoto důvodu jsem začlenil ještě možnost změny přepnutých fixních transformátorů zpět na regulační dle algoritmů podobných zpětné logice jalových mezí (viz vzorec 3.2-20). Výsledky z testů a shrnutí je v Kap. 5.4.2.



## 5 Programy výpočtu ustáleného chodu v MATLABu

Vytvořené PC programy pro numerický výpočet ustáleného chodu elektrizační soustavy s vyhledáním optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů (dále jen „programy“) mají funkční charakter. Nemají tedy vytvořeno žádné uživatelské prostředí a ovládají se přímo z „*Command Window*“ MATLABu pomocí známých příkazů. Pro získání výsledků a účely této diplomové práce postačují více než dobře. To platí i pro případného koncového uživatele. Úpravy programů (změna přesnosti výpočtu, změna max. počtu iterací atd.) je nutné provést v samotných „m-file“ skriptech. V těchto „m-file“ jsou proto vepsány komentáře u všech částí výpočtu, aby bylo vše přehledné.

Programy jsou rozděleny ve smyslu textu práce na čtyři nezávislé funkční celky. Tři programy obsahují stejný výpočet ustáleného chodu soustavy metodou GS a odlišné přístupy k výpočtu optimálního nastavení regulačních odboček. Zbylý program slouží pro výpočet ustáleného chodu soustavy metodou NR s výpočtem optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů. Adresář s programy na přiloženém CD k jednomu výtisku práce obsahuje ještě možnosti dodatkových výpočtů, které byly v průběhu programování testovány. Více o rozdělení programů a možnostech alternativních výpočtů bude uvedeno v Kap. 5.2.

V programech, které jsem kompletně vytvořil, je možné počítat ustálený chod soustavy bez regulačních transformátorů nebo s regulačními transformátory. Pro oba účely slouží vždy stejný program. Vzájemné potlačení logik, které nejsou potřeba pro daný výpočet, je již zakomponováno. Do výpočtů jsem zahrnul jalové meze elektrárenských PU uzlů. Lze počítat síť s nainstalovanými kompenzátory. Dále jsem programy doplnil širokou škálou možných výstupů z výpočtu.

Programy jsou poměrně rozsáhlé – u výpočtů GS metodou obsahují každý přes 300 řádků s příkazy, u výpočtů metodou NR program obsahuje přes 500 řádků s příkazy. Navzdory složitosti a rozsáhlosti jednotlivých programů jsou výstupy přehledné. Vypisují se do „*Command Window*“ MATLABu, příp. do souboru „*xls*“ a je dostupný také grafický výstup. Grafy obsahují průběh výpočtu velikostí a úhlů všech napětí v síti a průběh výpočtu nastavení velikostí převodů a úhlů převodů všech regulačních transformátorů.

### 5.1 Zadání

Pro správné fungování výpočetních programů je nutné mít vstupní data zpracována v určitém formátu. Toto zpracování je pro větší síť velmi časově náročné a tvorba vstupních dat je tak největší slabinou těchto programů. Na druhou stranu je možné do vstupních dat

namodelovat sítě různého rozsahu a s obsahem v praxi používaných zařízení. Data jsou ve formátu „m-file“ z MATLABu – „název\_soustavy.m“.

Zadaná data mají formát tří matic –  $M_0$ ,  $M_1$  a  $M_2$ . Matice  $M_0$  obsahuje základní informace o soustavě ve formě textu. Matice  $M_1$  obsahuje údaje o všech větvích soustavy včetně dat potřebných k programování regulačních transformátorů (označeny kurzívou). Počet jejích řádků je závislý na počtu větví soustavy, počet sloupců je 17. Každý sloupec má svůj daný účel, který je pro všechny řádky stejný. Pro matici  $M_1$  platí:

1. Sloupec – číslo větve
2. Sloupec – typ větve (0 – vedení, 1 – transformátor s pevným převodem, 2 - regulační transformátor pro U, 3 – regulační transformátor pro řízení Q, -1 - regulační transformátor pro řízení P)
3. Sloupec – vstupní uzel  $i$  (uzel s ideálním transformátorem)
4. Sloupec – výstupní uzel  $k$  (uzel s  $\pi$ -článkem transformátoru)
5. *Sloupec – kontrolovaný uzel (pouze pro regulační transformátory pro U)*
6. Sloupec – odpor vedení  $R$  (pu)
7. Sloupec – reaktance vedení  $X$  (pu)
8. Sloupec – konduktance vedení  $G$  (pu)
9. Sloupec – susceptance vedení  $B$  (pu)
10. Sloupec – převod transformátoru  $p$  (pu)
11. Sloupec – úhel převodu transformátoru  $\alpha$  ( $^\circ$ )
12. *Sloupec – dolní mez převodu transformátoru (pu,  $^\circ$ )*
13. *Sloupec – horní mez převodu transformátoru (pu,  $^\circ$ )*
14. *Sloupec – krok převodu regulačního transformátoru (pu,  $^\circ$ )*
15. *Sloupec – minimální hodnota U/P/Q (pu)*
16. *Sloupec – maximální hodnota U/P/Q (pu)*
17. Sloupec – maximální zatížení větve ((A) pro vedení, (VA) pro transformátory)

Pozn.: 5. Sloupec obsahuje kladné číslo kontrolovaného uzlu pro hlavní transformátory, záporné číslo pro další transformátory v paralelním chodu s hlavním transformátorem.

Matice  $M_2$  obsahuje data o jednotlivých uzlech soustavy. Počet jejích řádků je závislý na počtu uzlů soustavy, počet sloupců je 15. Každý sloupec má svůj daný účel, který je pro všechny řádky stejný. Pro matici  $M_2$  platí:

1. Sloupec – číslo uzlu
2. Sloupec – typ uzlu (1 – referenční uzel, 2 – PQ uzel, 3 – PU uzel)
3. Sloupec – jmenovité napětí uzlu (kV)

4. Sloupec – odebíraný činný výkon  $P_L$  v uzlu (pu)
5. Sloupec – odebíraný jalový výkon  $Q_L$  v uzlu (pu)
6. Sloupec – velikost napětí uzlu (pu)
7. Sloupec – úhel napětí uzlu ( $^\circ$ )
8. Sloupec – dolní jalová mez  $Q_{min}$  PU uzlu (pu)
9. Sloupec – horní jalová mez  $Q_{max}$  PU uzlu (pu)
10. Sloupec – vyráběný činný výkon  $P_G$  v uzlu (pu)
11. Sloupec – vyráběný jalový výkon  $Q_G$  v uzlu (pu)
12. Sloupec – konduktance kompenzačního prvku v uzlu (pu)
13. Sloupec – susceptance kompenzačního prvku v uzlu (pu)
14. Sloupec – minimální mez napětí v uzlu (pu)
15. Sloupec – maximální mez napětí v uzlu (pu)

Některé sloupce zadaných matic nejsou v různě definovaných sítích zapotřebí. Některé se upravují v průběhu výpočtu. Nikdy však není možné nedůležité sloupce vynechat při tvoření zadání nebo je smazat v průběhu výpočtu. Došlo by k chybám načítání vstupních dat, protože sloupce jsou již pevně definovány ve výpočtech.

## 5.2 Vlastní programy – ovládání

Pro správnou funkci všech programů doporučuji zkopírovat jejich „m-file“ a také „m-file“ testovaných sítí do adresáře „work“ v kořenovém adresáři programu MATLAB (standardní cesta C:\Program files\MATLAB71\work). Pokud jsou soubory umístěny v tomto adresáři, pak lze v „*Command Window*“ programu MATLAB 7.1 využít příkaz „run“ k jejich spuštění (příkaz „run *název\_programu*“ – bez přípony). Nebo je možné v MATLABu otevřít „m-file“ příslušného programu a spustit jej klávesou F5.

Jak již bylo uvedeno, programy jsou rozděleny na čtyři funkční celky. Jejich dělení je ve smyslu textu této práce následující:

- 1) Program „DiplGS\_OLTC\_1.m“ – slouží pro výpočet chodu soustavy metodou Gauss-Seidel s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů se zaokrouhlením kroku dle Kap. 4.2.1.
- 2) Program „DiplGS\_OLTC\_1\_bez\_round“ – slouží pro výpočet chodu soustavy metodou Gauss-Seidel s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů bez zaokrouhlení kroku dle Kap. 4.2.2.
- 3) Program „DiplGS\_OLTC\_2“ – slouží pro výpočet chodu soustavy metodou Gauss-Seidel s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů

po jednotlivých krocích dle Kap. 4.2.3.

- 4) Program „DiplNR\_OLTC“ – slouží pro výpočet chodu soustavy metodou Newton-Raphson s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů dle Kap. 4.3.

Pozn.: Všechny soubory lze samozřejmě využít také pro výpočet chodu soustavy bez regulačních transformátorů.

Další soubory, které jsou dostupné na CD v adresáři „*Dodatky*“ obsahují některé dodatkové výpočty. Tyto výpočty uložené v souborech typu „*m-file*“ nejsou zahrnuty do finálních skriptů programů, ale bylo s nimi v průběhu programování testováno. Mohou tak tvořit alternativu pro výpočty chodu soustavy. Jedná se o následující:

- 1) Soubor „DiplNR\_GS\_odhad.m“ – slouží jako alternativa pro počáteční odhad napětí v metodě Newton-Raphson. Odhad pomocí pěti iterací výpočtu GS.
- 2) Soubor „DiplNR\_SS\_odhad.m“ – slouží jako alternativa pro počáteční odhad napětí v metodě Newton-Raphson. Odhad pomocí zjednodušení ([6] na str. 91-93).

V „*m-filech*“ dodatkových výpočtů je uveden komentář, jakým způsobem je lze zahrnout do finálních programů. Je vždy nutné zcela nahradit část programu, jejíž alternativou celý dodatek je.

Po spuštění programů zmíněnými způsoby se otevře dialogové okno pro výběr sítě, která má být vyřešena. Zde je nutné zvolit vstupní „*m-file*“ síť ve formátu zadání dle Kap. 5.1. Následně proběhne výpočet a dojde k výpisu základních výstupních hodnot do „*Command Window*“ MATLABu. V „*Command Window*“ lze po zadání příslušných proměnných vypsát i další numerické výstupy. Dále je programem vykreslen grafický výstup a provede se přehledný výpis numerických dat sítě do souboru s příponou „*.xls*“ (viz Příloha C). Tento soubor s výstupy je otevřen po dokončení aktuálního výpočtu v okně programu Microsoft Excel. Pro tento účel musí být MS Excel nainstalován na PC. Jsou zde přehledně rozděleny všechny výstupy na základní údaje, větvové a uzlové hodnoty sítě. Aktuální soubor s výstupními daty lze uložit na libovolné místo na disku PC.

### 5.3 Aplikace programů - výpočet chodu soustavy

Vzhledem k širšímu využití mých programů jsem se rozhodl uvést příklady výpočtu chodu soustavy bez regulačních transformátorů a chodu soustavy s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů odděleně. V této kapitole se budu věnovat výpočtům chodu soustavy bez regulačních transformátorů u obou numerických metod (GS i NR) a jejich vzájemnému porovnání. Jako ukazatele správného výsledku jsou použity celkové činné  $\Delta P$

a jalové  $\Delta Q$  ztráty celé sítě. V následující tabulce je porovnání výpočtů sítí, které byly řešeny oběma metodami.

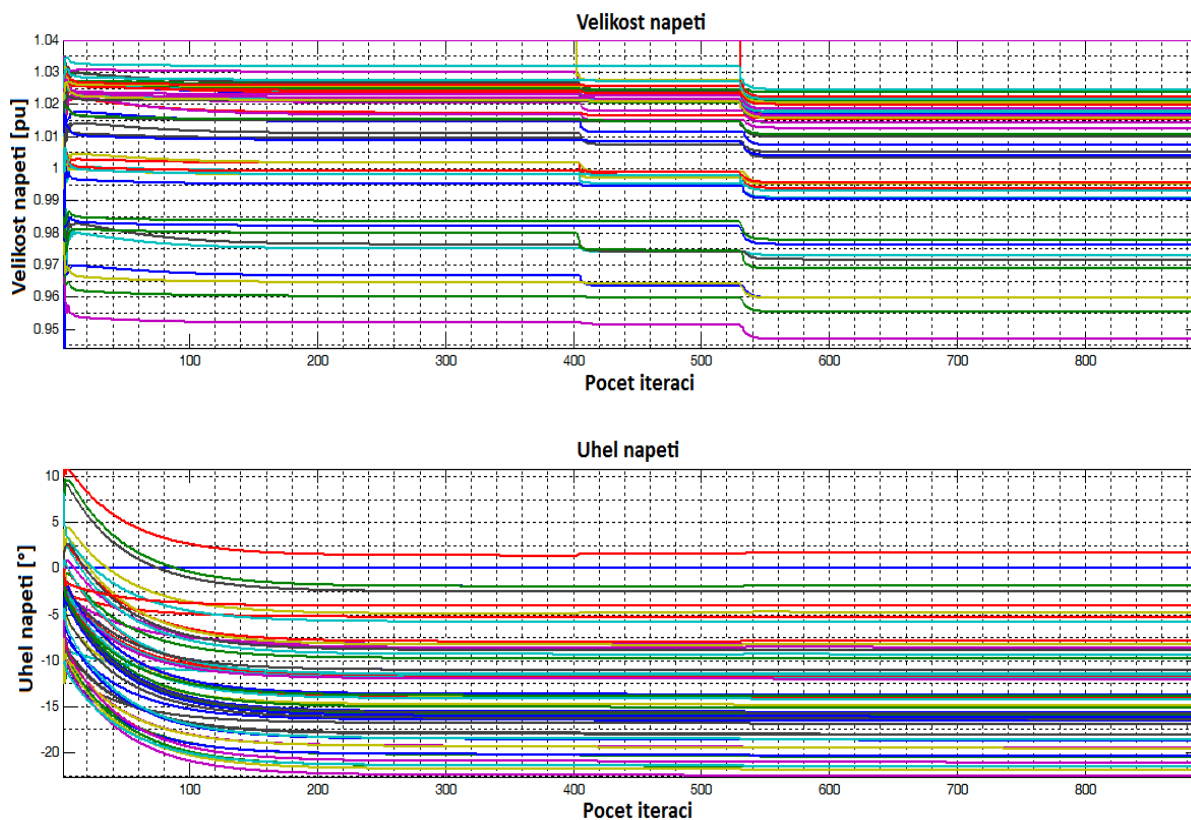
Tab. 5.3-1 Porovnání výpočtů chodu soustavy obou numerických metod – základní ukazatele

Řešená síť	Gauss-Seidel				Newton-Raphson				
	$\Delta P$ [pu]	$\Delta Q$ [pu]	iter [-]	čas [s]	$\Delta P$ [pu]	$\Delta Q$ [pu]	iter [-]	čas [s]	
EPS0009Ipu	0,0495	-0,8012	74	0,0178	0,0495	-0,8012	4	0,0156	
EPS0011IIpu	0,8398	9,0783	212	0,0624	0,8398	9,0783	7	0,0156	
EPS0011IIIpu	0,0864	-15,1490	51	0,0156	0,0864	-15,1490	3	0,0156	
EPS0014Ipu	0,1339	0,3012	90	0,0468	0,1339	0,3012	4	0,0156	
EPS0015Ipu	0,1298	-0,1768	128	0,0468	0,1298	-0,1768	4	0,0156	
EPS0016Ipu	0,1501	0,2748	172	0,078	0,1501	0,2748	4	0,0156	
EPS0017Ipu	0,9398	5,0526	402	0,1404	0,9398	5,0526	5	0,0156	
EPS0023Ipu	0,1830	-1,1928	166	0,078	0,1830	-1,1928	3	0,0156	
EPS0024Ipu	0,5125	-0,9513	181	0,0936	0,5125	-0,9513	4	0,0156	
EPS0026Ipu	0,1576	0,8476	99	0,078	0,1576	0,8476	4	0,0156	
EPS0030Ipu	0,1755	0,3304	278	0,2028	0,1755	0,3304	4	0,0156	
EPS0039Ipu	0,4159	-0,6444	757	0,6864	0,4159	-0,6444	5	0,0312	
EPS0057Ipu	0,2786	0,0633	275	0,3588	0,2786	0,0633	4	0,0312	
EPS0061Ipu	0,7469	4,2388	888	1,1856	0,7469	4,2388	5	0,0312	
EPS0118Ipu	1,3249	-5,1762	1065	2,7924	1,3249	-5,1762	4	0,0312	
EPS0145Ipu	-18,2990	167,97	5602	19,609	-18,2990	167,97	6	0,0469	
EPS0162Ipu	1,6296	-4,4081	2315	8,3461	1,6296	-4,4081	10	0,0936	
EPS0300Ipu	4,0899	-3,9367	7902	70,622	4,0899	-3,9367	6	0,0624	
Sumární počet iterací / čas			<b>20657</b>	<b>104,46</b>				<b>86</b>	<b>0,4993</b>

Pozn.: V Tab. 5.3-1 jsou uvedeny pouze sítě, které byly řešeny použitím obou metod. Zvolená odchylka (chyba) výpočtu je  $1e-8$ . Číslo v názvu řešených sítí udává počet uzlů soustavy. U metody Gauss-Seidel jsou údaje o výpočtové době pro výpočty bez grafického výstupu. Kompletní seznam všech sítí řešených jednotlivými metodami je uveden v Příloze A resp. v Příloze B i s porovnáním s výsledky ze softwaru vedoucího této diplomové práce.

Z Tab. 5.3-1 lze vysledovat, že pro konečnou konvergenci metody Gauss-Seidel je nutný větší počet iterací i u malých sítí. Pro velké sítě je nárůst počtu iterací a výpočtové doby značný. Počet iterací a výpočtová doba jsou závislé také na zatížení sítě, příp. počtu PU uzlů s jalovými mezemi (ojedinělá navýšení u některých sítí). U metody Newton-Raphson není patrný žádný výrazný nárůst počtu iterací s rostoucím počtem uzlů, k ojedinělému navýšení u některých sítí dochází opět vlivem jalových mezí PU uzlů nebo díky velkému zatížení. Výpočtová doba se zvyšuje s rostoucím počtem uzlů jen nepatrně. Výsledné porovnání obou metod je patrné ze sumárních počtů iterací a výpočtové doby všech 18 testovaných sítí. Zatímco metoda Gauss-Seidel pro jejich vyřešení potřebuje 20 657 iterací a 104,46 s, metoda Newton-Raphson vyřeší stejné sítě v 86 iteracích a 0,499 s.

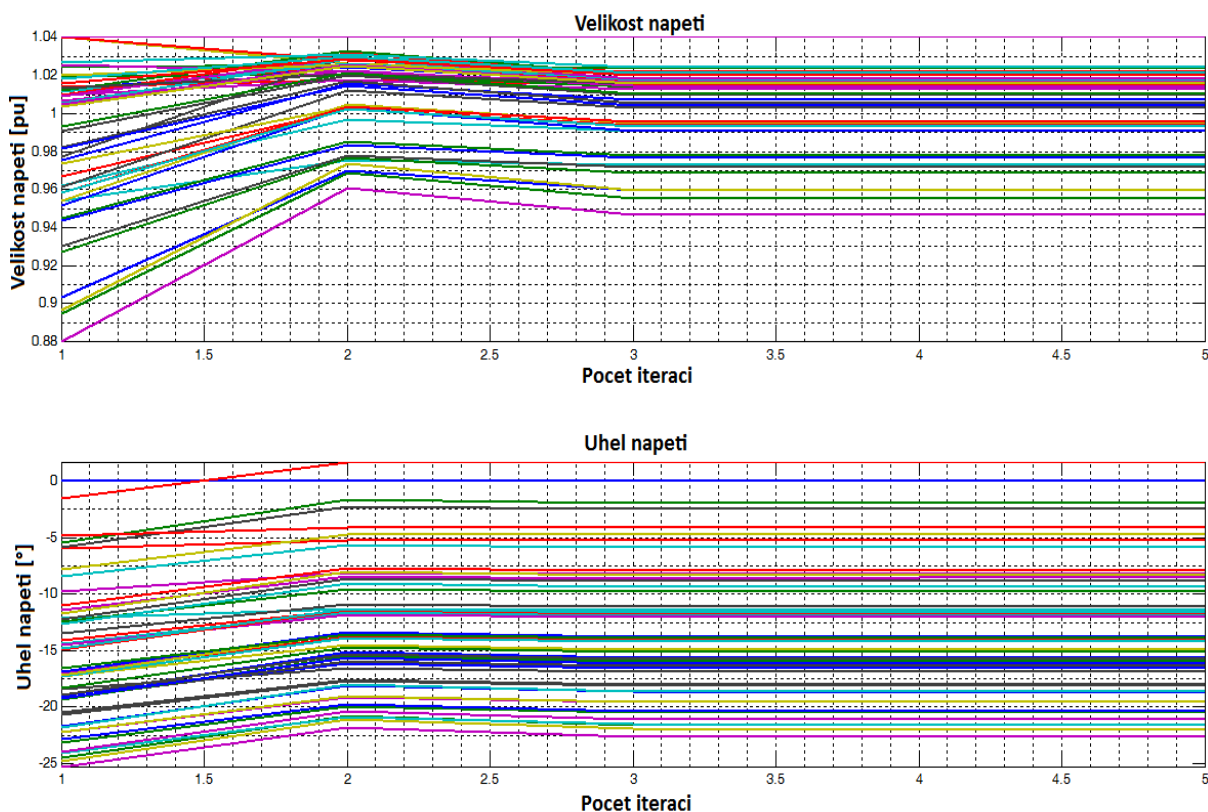
Pro lepší představu o rozdílech metod a průběhu výpočtu uvedu níže ještě grafické výstupy např. z řešení sítě EPS0061Ipu oběma metodami. Tato síť obsahuje 61 uzlů, z nichž je patnáct PU uzlů s jalovými mezemi. Uzly jsou propojeny 89 větvemi (vč. 40 fixních transformátorů). Nejprve řešení metodou Gauss-Seidel.



**Obr. 5.3-1 Grafický průběh výpočtu velikostí a úhlů napětí 61-uzlové sítě metodou Gauss-Seidel**

Z průběhů na Obr. 5.3-1 jde vidět opatrnější, postupné přibližování k výsledku o dané přesnosti  $1e-8$ . Na druhou stranu je výpočet touto metodou spolehlivý a nebylo nutné ho nijak výrazně stabilizovat při programování. Pouze jsem jej zrychlil úpravou algoritmů a jednoduchou metodou akcelerace dle vzorce 3.1-8. Náhlé změny velikostí napětí jsou dány přepnutím dvou PU uzlů na PQ (překročení jalových mezí). Kvůli závislosti výpočtové doby na počtu uzlů sítě tuto metodu nedoporučuji k výpočtům sítí, které mají více než 1 000 uzlů. Z tohoto důvodu nebude zřejmě v praxi další využití této metody možné, ale pro potvrzení získaných výsledků je více než spolehlivým nástrojem.

Následuje řešení 61 uzlové sítě (EPS0061Ipu) metodou Newton-Raphson.



**Obr. 5.3-2** Grafický průběh výpočtu velikostí a úhlů napětí 61-uzlové sítě metodou Newton-Raphson

Z průběhů na Obr. 5.3-2 jde vidět rychlé (skokové) přiblížení k výsledku a následné dokonvergování k přesnosti  $1e-8$ . Tato metoda výpočtu je velmi rychlá – konverguje již při pěti iteracích. K získání výsledků u všech sítí jsem musel celý výpočet stabilizovat, dle vzorců 3.2-24 a 3.2-25. Po této stabilizaci je metoda Newton-Raphson velmi účinným nástrojem pro výpočet chodu soustavy jakéhokoliv rozsahu. Z porovnávaných dvou metod bych právě tuto doporučil pro použití v praxi (Pozn.: Pro praktické účely je metoda NR až příliš přesná, využití je dnes hlavně u metody Fast-Decoupled Newton-Raphson. Ta ovšem nebyla předmětem řešení v této diplomové práci. Navíc je implementace regulačních transformátorů do výpočtů velice obtížná).

Správnost výsledků všech sítí je dále ověřena s výstupy ze softwaru vedoucího této diplomové práce (viz Přílohy A a B). Při tomto porovnání se ukazatele  $\Delta P$  a  $\Delta Q$  neliší a lze je tedy po dvojnásobném ověření (dva vlastní programy a program vedoucího) považovat za správné. V Příloze C této práce je uveden výpis všech dostupných numerických výsledků, který se provádí do souboru. Lze z něho získat lepší přehled o vyřešené soustavě. Vypíše se vždy, tzn. pro chod soustavy bez i s regulačními transformátory. U sítí s obsahem regulačních transformátorů obsahuje ještě výpis jejich optimální nastavení odboček.

## 5.4 Aplikace programů – výpočet chodu soustavy s regulací U/P/Q

V této kapitole provedu rozbor přístupů k výpočtu chodu soustavy s optimálním nastavením odboček regulačních transformátorů použitými numerickými metodami (dle Kap. 4). Ukazateli pro jejich posouzení jsou počet iterací, výpočtová doba a sumární kvadratická odchylka. Výpočet této odchylky je následující:

$$\Delta UQP = \sum_a^n (U_{k_a} - U_{cl_a})^2 + \sum_b^n (-Q_{ki_b} - Q_{cl_b})^2 + \sum_c^n (-P_{ki_c} - P_{cl_c})^2 \quad (5.4-1)$$

Zde  $a$  označuje počet regulační transformátory pro řízení napětí,  $b$  označuje počet regulačních transformátorů pro řízení jalového výkonu,  $c$  označuje počet regulačních transformátorů pro řízení činného výkonu,  $n$  je počet regulačních transformátorů v síti. Tato sumární kvadratická odchylka vyjadřuje odchylku (chybu) výsledných hodnot monitorovaných veličin od jejich cílových přednastavených hodnot.

### 5.4.1 GS metoda

Nejprve je nutné vyhodnotit jednotlivé přístupy v metodě Gauss-Seidel, z nichž vyberu ten nejvhodnější. Pro přehled o jejich chování ve výpočtech testovaných sítí slouží Tab. 5.4-1 a 5.4-2 uvedené níže. Jelikož jsou přístupy OLTC 1 a OLTC 1 bez „round“ naprogramovány ze stejného základu, uvedu nejprve jejich porovnání.

**Tab. 5.4-1 Porovnání přístupů OLTC 1 a OLTC 1 bez zaokrouhlení - výpočet chodu soustavy s optimálním nastavením regulačních transformátorů v metodě Gauss-Seidel**

Řešená síť	Počet OLTC transformátorů			OLTC 1			OLTC 1 – bez „round“		
	U	Q	P	iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$	iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$
9LTC-1	1	2	0	500	0,14	9,06E-05	253	0,09	7,63E-19
9LTC-2	3	0	0	177	0,08	1,37E-06	903	0,30	9,44E-18
14LTC-1	2	1	1	504	0,19	2,83E-05	676	0,27	2,76E-18
24LTC-1	2	1	2	672	0,44	1,30E-04	791	0,55	3,08E-05
30LTC-1	1	1	2	795	0,48	1,65E-05	1045	0,80	2,54E-18
30LTC-2	4	0	0	913	0,56	1,19E-06	882	0,61	1,37E-17
39LTC-1	3	0	0	642	0,62	1,26E-06	1746	1,50	1,01E-06
57LTC-1	8	3	4	1863	2,26	1,28E-04	2128	2,61	2,28E-04
118LTC-1	1	3	5	16422	43,77	7,69E-03	21641	61,14	7,06E-04
118LTC-2	0	3	5	16383	45,35	7,35E-03	21529	59,90	1,61E-28
300LTC-1	49	1	1	17664	157,98	3,83E-02	22229	182,16	2,10E-02
300LTC-2	49	0	0	17443	156,41	2,13E-02	21281	174,71	1,95E-02
Sumární počet iterací/výpočtové doby				73978	408,28		95104	484,64	

Pozn.: V Tab. 5.4-1 jsou výsledky všech dostupných sítí. Jedná se o upravené sítě, které byly řešeny také v předchozí kapitole pouze s fixními transformátory. Zde jsou některé



transformátory v síti regulační (viz „Počet OLTC transformátorů“ v tabulce). Jejich optimální nastavení je dopočítáváno programem. Požadovaná přesnost výpočtu chodu soustavy je nastavena na  $1e-8$ . Číslo u názvu řešených sítí udává počet uzlů soustavy.

Uvedená Tab. 5.4-1 koresponduje s předběžným hodnocením jednotlivých přístupů v Kap. 4.2-1 a 4.2-2. Pro přístup OLTC 1 jsem nemusel upravovat vnitřní řazení algoritmů pro regulační transformátory a jalové meze PU uzlů. U přístupu OLTC 1 bez „round“, jenž je pouze úpravou přístupu OLTC 1 bylo překvapivě nutné toto rozhodování zařadit. Z hodnot v Tab. 5.4-1 je patrný nárůst počtu iterací i výpočtové doby s rostoucím počtem uzlů soustavy u obou přístupů. U přístupu OLTC 1 bez „round“ je přesnost nastavení regulačních odboček transformátorů vyšší než v OLTC 1. U některých sítí je tato přesnost značná (až  $1e-28$ ), ovšem za cenu vyššího počtu iterací a delší výpočtové doby.

V metodě Gauss-Seidel jsem testoval ještě jeden přístup OLTC 2 – přepínání odboček regulačního transformátoru po jednom kroku v jedné iteraci. Tento přístup se od předchozích dvou výrazněji liší.

**Tab. 5.4-2 Přístup OLTC 2 - výpočet chodu soustavy s optimálním nastavením regulačních transformátorů v metodě Gauss-Seidel**

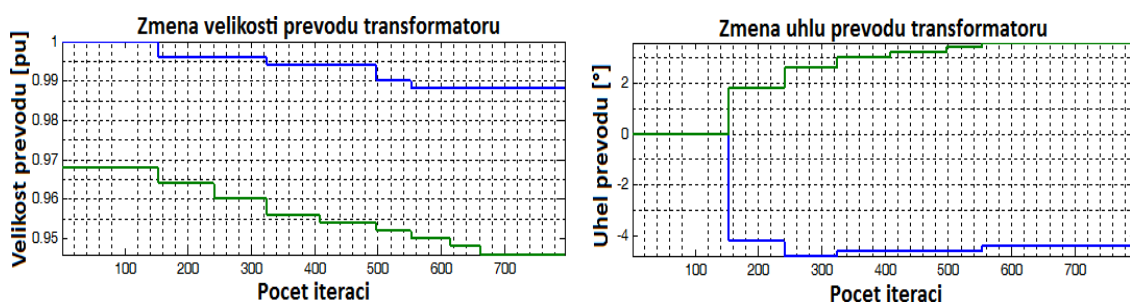
Řešená síť	Počet OLTC transformátorů			OLTC 2 - po krocích		
	U	Q	P	iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$
9LTC-1	1	2	0	1723	0,72	5,84E-05
9LTC-2	3	0	0	335	0,16	3,75E-05
14LTC-1	2	1	1	1400	1,32	3,79E-05
24LTC-1	2	1	2	2200	3,71	7,75E-05
30LTC-1	1	1	2	2000	3,42	2,02E-04
30LTC-2	4	0	0	1902	2,09	2,14E-05
39LTC-1	3	0	0	713	1,01	1,73E-05
57LTC-1	8	3	4	5000	4,85	2,55E-04
118LTC-1	1	3	5	60000	-	2,00E-02
118LTC-2	0	3	5	70000	-	6,70E-02
300LTC-1	49	1	1	100000	-	2,19E-02
300LTC-2	49	0	0	25320	411,76	2,17E-02

Pozn.: Pro tuto tabulku platí stejná nastavení jako u předchozí Tab. 5.4-1. Sumy počtu iterací a výpočtových časů by nebyly vzhledem k přibližným hodnotám vypovídající.

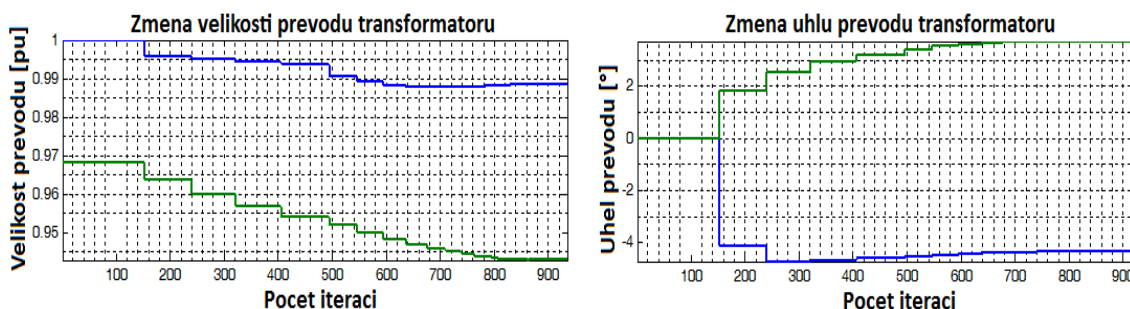
Z Tab. 5.4-2 je patrné, že oproti předchozím přístupům narostl počet iterací i výpočtová doba (až na výjimky). Toto je logické vzhledem k faktu, že dochází k přepínání pouze jednoho kroku v jedné iteraci. Zelenou barvou jsou označeny počty iterací a výpočtové doby u testů sítí, které bylo nutné zastavit ručně po několika přepnutích dvou stejných stavů regulačních transformátorů. Počet iterací a výpočtová doba jsou tedy v takovém případě

přibližné. U velkých sítí byla výpočtová doba velmi dlouhá (desítky minut), není proto uvedena. Přesnost výpočtu optimálního nastavení regulačních odboček transformátorů je porovnatelná s přístupem OLTC 1. U některých sítí je nastavení přesnější, u některých naopak méně přesné.

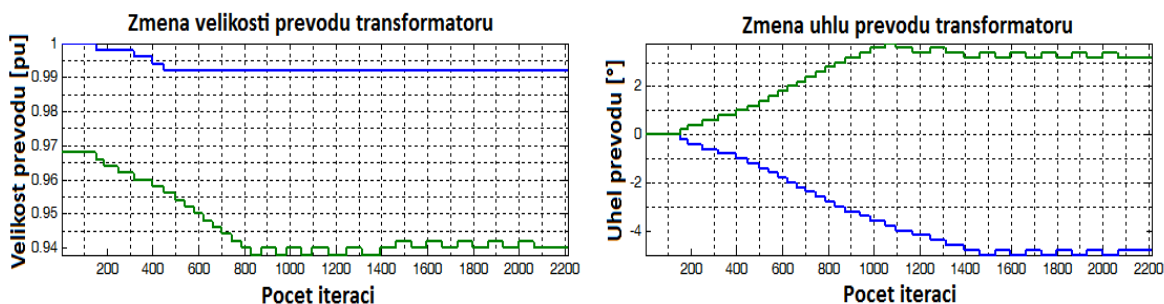
Pro větší přehlednost a konečné posouzení nejvhodnějšího přístupu k výpočtu optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů v metodě Gauss-Seidel uvádím grafické výstupy nastavení odboček 30 uzlové sítě (30LTC-1). Tato síť obsahuje jeden transformátor pro regulaci napětí, jeden transformátor pro regulaci jalového výkonu a dva transformátory pro regulaci činného výkonu.



Obr. 5.4-1 Grafické výstupy nastavení odboček regulačních transformátorů – OLTC 1



Obr. 5.4-2 Grafické výstupy nastavení odboček regulačních transformátorů – OLTC 1 bez „round“



Obr. 5.4-3 Grafické výstupy nastavení odboček regulačních transformátorů – OLTC 2

Grafické výstupy jsem omezil na vykreslení pouze průběhů výpočtu nastavení velikostí resp. úhlů převodů regulačních transformátorů. Názorně ukazují rozdíly jednotlivých přístupů. OLTC 1 bez „round“ a OLTC 2 potřebují více přepnutí odboček a tedy i větší počet iterací k nastavení cílových hodnot než OLTC 1. Přístup OLTC 2 je pro velké sítě prakticky nepoužitelný, protože značně naroste počet iterací a výpočtová doba. Navíc dochází

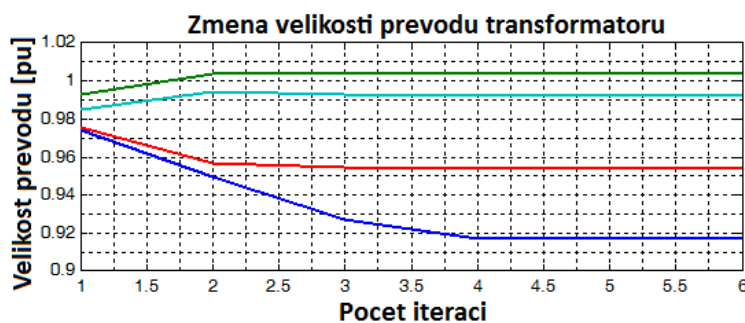
ke zmíněné oscilaci mezi dvěma sousedními kroky přepínačů odboček.

Z výše zmíněného a při porovnání grafických výstupů je zřejmé, že nejvhodnějším přístupem k výpočtu optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů v metodě Gauss-Seidel je přístup OLTC 1. Přesnost nastavení přepínačů odboček u tohoto přístupu pro praktické účely bohatě vyhovuje. Dochází k nejmenšímu počtu změn nastavení převodů, tudíž i k nejmenšímu počtu iterací a nižší výpočtové době v porovnání s ostatními přístupy u většiny sítí. Porovnání výsledků metody Gauss-Seidel s upřednostněným přístupem OLTC 1 pro optimální nastavení odboček regulačních transformátorů s výstupy vedoucího této diplomové práce obsahuje Příloha D.

#### 5.4.2 NR metoda

Začlenění přístupu z Kap. 4.3 bylo velmi časově náročné a na použité algoritmy a vztahy složité. Postup doporučený literaturou se spínáním jalových mezí vs. regulační transformátory se mi nepodařilo uvést do praxe. Dle mého názoru dochází k velmi rychlé konvergenci NR metody a začlenění transformátorů „nestihne“ ovlivnit výpočet. Testoval jsem celou řadu nastavení okamžiku sepnutí a různé skladby programu, ale žádný nebyl úspěšný. Zaměřil jsem se tedy na nastavování mezí *DXT* pro hledání přírůstků velikostí/úhlů převodů.

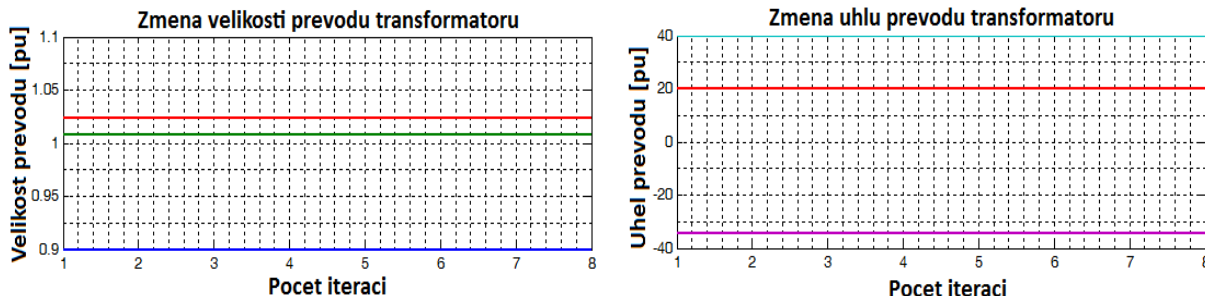
Úspěch jsem zaznamenal u regulačních transformátorů pro řízení napětí. Zůstává zde sice určité procento transformátorů, které se okamžitě po startu výpočtu přepnou na fixní. Ale jejich počet se vhodným nastavením *DXT* snížil. U testovaných sítí, které obsahují pouze transformátory pro řízení napětí jsou kvadratické regulační odchylky již porovnatelné s GS metodou (viz Příloha E). Rozdíly způsobuje právě přepínání na fixní transformátory a proto je rozdílné i finální nastavení jednotlivých přepínačů odboček. Přitom závěrem nelze říci, zda se nezbytně jedná o nesprávné výsledky. Řešení chodu soustavy může být více. Programem jsem vypočítával také vlastní distribuční soustavu (viz Kap. 6.1), která obsahuje pouze transformátory pro řízení napětí. Výsledky jednotlivých nastavení odboček byly s ohledem na konečné zaokrouhlování na celý krok převodu stejné jako při výpočtu GS metodou.



Obr. 5.4-4 Grafický průběh výpočtu nastavení odboček regulačních transformátorů – síť 30LTC-2

Na Obr. 5.4-4 je průběh výpočtu nastavení odboček čtyř regulačních transformátorů pro řízení napětí 30-uzlové sítě 30LTC-2. Lze říci, že je výpočet velmi rychlý a počet iterací nízký oproti GS metodě. Hodnota  $DXT_3$  byla pro tuto síť nastavena na  $0,1DXT_2$ . Žádný z regulačních transformátorů nebyl přepnut na fixní a výpočet proběhl s kvadratickou odchylkou regulace rovné nule (nedošlo k uvolnění napětí a to se stále rovná cílové hodnotě).

V případě regulačních transformátorů pro řízení činného/jalového výkonu dochází k prudké změně úhlu/velikosti převodu ihned po spuštění algoritmů a ve většině případů se transformátory přepnou po startu výpočtu na fixní. Průběh takového výpočtu naznačuje Obr. 5.4-5. Bohužel se mi nepodařilo dostatečně ovlivňovat úroveň nárůstu velikosti nebo úhlu převodů nastavením mezí  $DXT$  jako u regulace napětí. Z literatury doporučené řešení v podobě rozhodovací logiky mezi jalovými mezemi PU uzlů a regulačními transformátory jsem také nebyl schopen realizovat. Buď je chyba ve stavbě či složitých algoritmech mého programu (málo pravděpodobné – kontrola s vedoucím DP) nebo je zvolený přístup k řešení nastavení těchto regulačních transformátorů nevhodný. Dle [22] lze využít ještě tzv. „citlivostní“ přístup, který se používá u většiny komerčně využívaných programů. Takové řešení je naprosto odlišné a z časových důvodů jsem již nemohl provést jeho popis a modelaci. Rozsahem by odpovídal náplni hlavního úkolu jiné diplomové práce.



**Obr. 5.4-5 Grafický průběh výpočtu nastavení odboček regulačních transformátorů – síť 118LTC-2**

Z Obr. 5.4-5 lze pro výpočet 118-uzlové sítě 118LTC-2, která obsahuje tři regulační transformátory pro řízení  $Q$  a pět pro řízení  $P$ , vysledovat jejich okamžité přepnutí na fixní. Nastavení různých hodnot  $DXT$  neovlivnilo konečný výsledek. Takové výsledky jistě nejsou v pořádku a nelze je považovat za správné.

Implementaci algoritmů pro regulační transformátory k řízení napětí v NR metodě považuji i přes rozdíly nastavení jednotlivých přepínačů odboček oproti výsledkům v GS metodě za úspěšné. I když případnou chybu v řešení samozřejmě nelze vyloučit. Bohužel nebylo možné porovnat výsledky s nezávislým softwarem jako u GS metody, ale vzhledem k řešené distribuční síti a podobnosti kvadratických regulačních odchylek s GS metodou je považuji za správné (s určitou tolerancí). V Tab. 5.4-3 jsou tyto výsledky označeny zeleně.

Na druhou stranu začlenění regulačních transformátorů pro řízení jalového/činného výkonu nepovažuji v žádném případě za správné. Výsledky nejsou porovnatelné a některé sítě divergují nebo dosahují velké regulační odchylky. V Tab. 5.4-3 jsou tyto hodnoty označeny červeně a jsou uvedeny pouze pro informaci.

Tab. 5.4-3 Výpočet chodu soustavy s optimálním nastavením odboček NR metodou

Řešená síť	Počet OLTC transformátorů			Počet fixních	DXT <sub>3</sub>	NR OLTC		
	U	Q	P			iter [-]	CPU [s]	ΔUQP
9LTC-1	1	2	0	2	-	6	0,1092	1,38E-01
9LTC-2	3	0	0	1	0,2DXT <sub>2</sub>	8	0,0936	5,34E-04
14LTC-1	2	1	1	2	-	4	0,078	7,54E-02
24LTC-1	2	1	2	3	-	12	0,1092	2,58E+00
30LTC-1	1	1	2	3	-	5	0,1248	2,19E-01
30LTC-2	4	0	0	0	0,1 DXT <sub>2</sub>	6	0,078	0,00E+00
39LTC-1	3	0	0	2	0,1 DXT <sub>2</sub>	9	0,1092	1,01E-06
57LTC-1	8	3	4	3	-	5	0,0624	1,22E-02
118LTC-1	1	3	5	6	-	7	0,1404	2,35E+00
118LTC-2	0	3	5	5	-	8	0,1716	2,01E+00
300LTC-1	49	1	1	-	-	diverguje		
300LTC-2	49	0	0	28	0,3 DXT <sub>2</sub>	14	0,2028	5,31E-02

Pozn.: Pro každou řešenou síť s regulačními transformátory pro řízení napětí z Tab. 5.4-3 bylo nutné nastavit jinou hodnotu DXT<sub>3</sub> v závislosti na DXT<sub>2</sub>, aby došlo k co nejnižšímu počtu přepnutí regulačních transformátorů na fixní.

Dodatečné řešení v podobě logiky vracení přepnutých fixních regulačních transformátorů zpět na regulační se neosvědčilo. U většiny sítí docházelo k oscilacím mezi mezemi přepínačů nebo mezi dvěma hodnotami a výpočet divergoval.

## 6 Případová studie

K předvedení využitelnosti programů v aktuálních problémech elektrizačních soustav jsem se rozhodl provést analýzu a simulaci řízení napětí v distribuční soustavě. Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, jednou z pravděpodobných cest k udržení kvality napětí (ČSN EN 50160) v rozvodu elektrické energie bude výměna distribučních transformátorů s přepínači odboček bez zatížení za říditelné stroje s přepínačem odboček pod zatížením. Toto řešení bude jistě ekonomicky náročné, nicméně pro určité kritické lokality s mnoha zdroji OZE v distribuční síti pravděpodobně nevyhnutelné. Během modelace a testování zvolené distribuční sítě jsem narazil na některé typické problémy, které jsem se pokusil vyřešit.

Výhoda distribučních transformátorů s regulací pod zatížením v řešení mémi programy spočívá v možnosti reakce na změny napětí/výkonů v síti. Mnohdy mají také větší rozsah regulace napětí ( $\pm 4 \times 2,5 \%$ ). K přepnutí odboček není nutný výjezd montérů na místo provozu. Hlavní nevýhodou je cena, jsou několikrát dražší než standardní stroje. Jednotlivé principy regulace pod zatížením nabízené dnes na trhu jsou uvedeny v [17]. Pozn. autora: Stále oblíbenějším řešením jsou stroje s přepínačem na principu výkonové elektroniky nebo s tzv. hybridním řízením. Jejich hlavní výhodou je, že výrazně nenaroste hmotnost ani rozměry a mohou se tak umístit na původní stanoviště bez případných konstrukčních změn. Navíc není nutná tak častá údržba, protože spínání zajišťují polovodiče.

Česká republika patří k zemím v Evropské unii. Připojila se tedy ke snaze o dosažení klimaticko-energetického cíle. Jedná se o cíl snížit produkci skleníkových plynů o 20 %, zvýšit výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů o 20 % a zvýšit efektivitu využití elektrické energie o 20 %. Podpora obnovitelných zdrojů energie v takovém měřítku není v kontextu s bezpečností a spolehlivostí dodávky elektrické energie (viz Kodex DS [19]).

## 6.1 Simulace řízení napětí v distribuční soustavě

Jako základ testované distribuční soustavy jsem využil dostupnou IEEE 34 uzlovou síť [20], resp. 35 uzlovou síť DS035I (jedna ze sítí od vedoucího této diplomové práce). Síť DS035I se liší přidaným propojením na vyšší napěťovou hladinu. Originální hodnoty napětí a frekvence (69/24,9/4,16 kV, 60 Hz) jsem převedl pro náhradní modely jednotlivých vedení a zátěží na v České republice obvyklé hodnoty (110/22/0,4 kV, 50 Hz). Přepočít lze odvodit ze vzorců v Kap. 1. Přitom je nutné si uvědomit, že vstupní data programu jsou v poměrných jednotkách ( $S_v$  100 MVA). Další modifikací sítě, kterou jsem provedl je převedení veškerých odběrů na napěťovou hladinu 0,4 kV. Některé odběry jsou sloučeny do společného uzlu. Vzhledem k nízkému zatížení původní soustavy jsem přidal větší odběry do uzlů č. 6 a 14 (typické hodnoty např. malých obcí) a zvýšil hodnotu původních odběrů v ostatních uzlech o 30 %. Na hladině 0,4 kV je v praxi připojena drtivá část spotřeby elektrické energie. Všechny odběry v síti jsou tedy napájeny z distribučních transformátorů (dále DT) 22/0,4 kV - viz Tab. 6.1-1. Jejich náhradní modely jsem vypočítal ze vzorců v Kap. 1.2-1 a katalogu výrobce SGB - olejové distribuční transformátory (viz Příloha F).

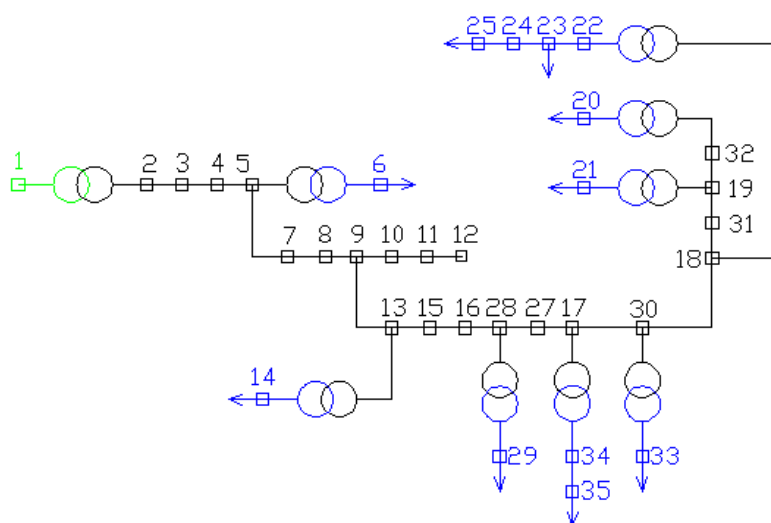
Řešení této soustavy jsem rozdělil na dva scénáře. Nejprve jsem provedl studii připojitelnosti do sítě s ohledem na napětí. V tomto testu jsem postupně zvyšoval (o 2,5 % v každém kroku) odběry v uzlech 6, 14, 20, 21, 23, 25, 29, 33 a 35. Takto upravená síť je vykreslena ve schématu na Obr. 6.1-1. Zvyšování zatížení o 2,5 % je v souvislosti

s dokumentem ČEPS [21] předpokládaný meziroční nárůst spotřeby elektrické energie v České republice. Roční spotřeba činí cca 70 TWh/rok (8 GW) a předpokládaný nárůst meziroční spotřeby je cca 200 MW.

**Tab. 6.1-1 Změny v testované síti – distribuční transformátory, odběry a maximální odběry**

Uzel č.	Jmenovitý výkon transformátoru [kVA]	PL [kW]	QL [kVAr]	PL MAX [kW]	QL MAX [kVAr]
6	2000	900	370	1125	462,5
14	2000	825	355	1031,25	443,75
20	250	102	72	127,5	90
21	160	67,5	52,5	84,375	65,625
23 (22)	250	60	45	75	56,25
25 (22)		30	12	37,5	15
29	100	38	16	47,5	20
33	160	83	42	103,75	52,5
35 (34)	250	113	0	141,25	462,5

Pozn.: V Tab. 6.1-1 čísla uzlů v závorce značí, ze kterého výstupního uzlu transformátoru je daný odběr napájen. P<sub>L</sub>, Q<sub>L</sub> označují základní odběry, ze kterých bylo zvyšováno a P<sub>L MAX</sub>, Q<sub>L MAX</sub> označují maximální odběry.

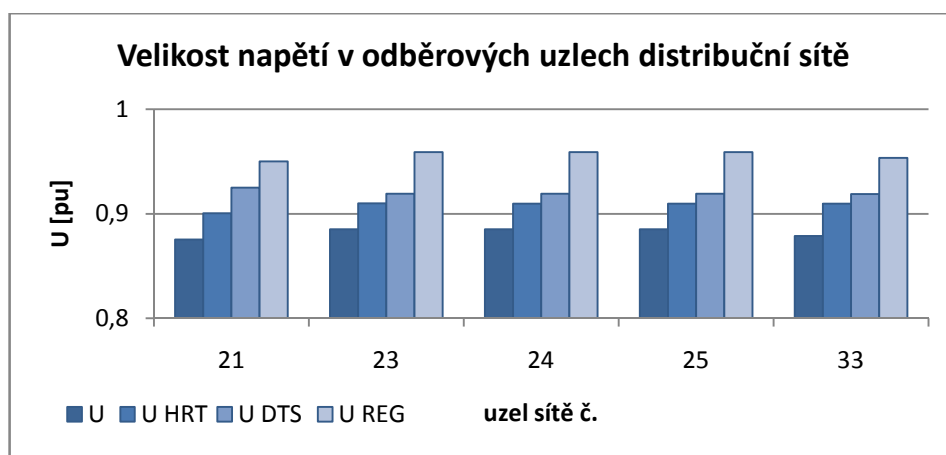


**Obr. 6.1-1 Základní schéma upravené distribuční sítě s uvažováním všech odběrů, OZE a distribučních transformátorů, zelená - 110 kV, černá - 22 kV, modrá - 0,4 kV**

Během testování jsem kontroloval napěťové poměry v síti, napětí v žádném z uzlů nesmělo klesnout pod 90 % U<sub>n</sub>. Všechny DT i transformátor 110/22 kV s hladinovým regulátorem (dále HRT) měli nastavenou střední odbočku. Konečné maximální zatížení sítě je o 25 % vyšší než původní hodnoty. To odpovídá předpokládanému nárůstu zatížení v období deseti let. V odběrových uzlech 0,4 kV (č. 21, 23, 24, 25 a 33) se po plošném překročení odběrů o dalších 2,5 % maximálních hodnot z Tab. 6.1-1 objevilo podpětí – dle normy ČSN

EN 50 160 hodnoty nižší než 90 %  $U_n$ . Rozhodl jsem se tedy využít tohoto stavu distribuční sítě k následujícímu rozboru možností k ovlivnění napětí v síti.

Pokud vezmu v úvahu všechny možnosti pro zjednání nápravy dle [17], pak v síti není možnost regulovat jalový výkon z vn výroben. Nastavením úrovně hladinového regulátoru na hodnotu napětí o 2 % vyšší (jedna odbočka) jsem dosáhl eliminace podpětí. Také řešení v podobě vhodného nastavení odboček DT  $22 \pm 2 \times 2,5 \% / 0,4 \text{ kV}$ , které se v beznapěťovém stavu změní, bylo z hlediska napěťových poměrů úspěšné. Odbočky všech inkriminovaných DT jsem nastavil o jednu ke zvýšení napětí (-2,5%). V programu práce je uvažováno s náhradním modelem transformátorů dle Obr. 2.3-2, proto snížení odboček zvýší napětí. Poslední zkoumanou možností bylo nasazení regulačních distribučních transformátorů 22/0,4 kV s regulací pod zatížením. Použil jsem transformátory s regulačním rozsahem  $\pm 4 \times 2,5 \%$  - viz [17] (resp. regulační pásmo v rozsahu  $\pm 10 \%$ ) a nastavil jim cílovou hodnotu napětí v příslušných výstupních 0,4 kV uzlech na 0,95 pu. Chtěl jsem dosáhnout bezpečného zvýšení napětí. Všechny zmíněné postupy zvýšení napětí popisuje graf na Obr. 6.1-2.



**Obr. 6.1-2 Vyhodnocení změn napětí v odběrových uzlech sítě s eliminací podpětí,  $U$  – původní velikost napětí,  $U_{HRT}$  – vyšší hladina HRT,  $U_{DT}$  – změna odboček distribučních transformátorů,  $U_{REG}$  - nasazení DT s přepínači odboček pod zatížením**

Vyzkoušel jsem ještě více zatížit síť s nastavenými klasickými DT na -5 % k jejich maximálnímu možnému zvýšení napětí (průměrně 0,928 pu). V porovnání s DT s přepínači odboček pod zatížením nastavenými na napětí 0,95 pu. Projevilo se větší regulační pásmo DT s přepínači odboček pod zatížením a síť bylo možné zatížit o 10 % více oproti klasickým strojům. Opět během testů nesměla klesnout hodnota žádného napětí v síti pod 90 %  $U_n$ .

Ze zmíněných metod k řešení napěťových poměrů by bylo zřejmě zvoleno vhodné nastavení odboček DT a přenastavení HRT na vyšší úroveň k příznivému ovlivnění napětí dle provozních zkušeností. Samozřejmě se jedná pouze o modelový případ, kdy transformátory neměli nastavenou žádnou z typických provozních hodnot. Standardně se totiž nastavuje

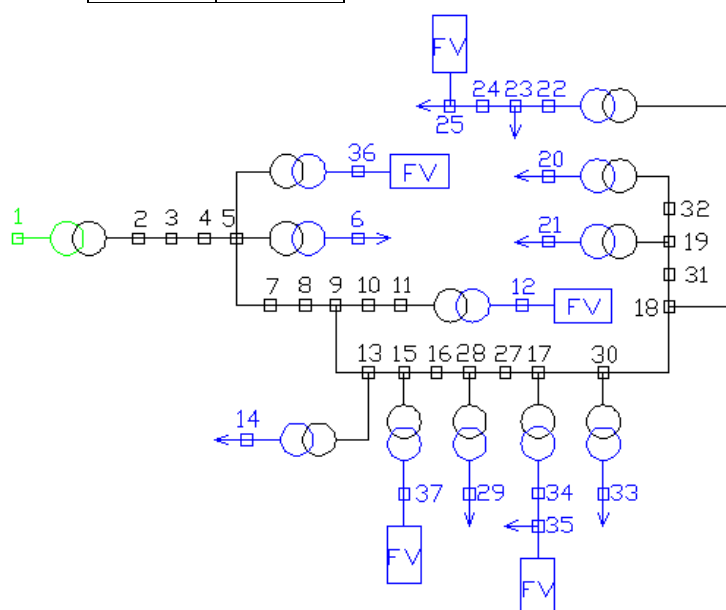


hodnota HRT na 23,1 kV a napětí na hladině 0,4 kV se při maximálním zatížení pohybuje kolem 106 %  $U_n$  (4 % pro krytí necitlivosti HRT). HRT má také určitou necitlivost – 0,3 kV, se kterou nebylo počítáno. K případnému podpětí v praxi docházelo až na koncích vývodů nn. Nicméně jsem si na tomto příkladu ověřil chování sítě i vlastních programů v různých nastaveních a uvedl zde možnosti regulace napětí.

Následuje další scénář provozu této distribuční sítě. Odběry jsem vrátil na původní hodnoty  $P_L$  a  $Q_L$  a tyto беру jako maximální. Do sítě jsem v uzlech č. 12, 36 a 37 připojil malé fotovoltaické elektrárny (dle [18] – uvažování jalových výkonů) s příslušnými 160 kVA transformátory s přepínačem odboček bez zatížení (viz Tab. 6.1-2). Dále jsou v nn uzlech se stávající vazbou na vyšší napěťovou hladinu č. 25 a 35 také připojeny fotovoltaické elektrárny. Všechny splňují podmínky pro připojení do distribuční soustavy dle PPDS (Pravidel Provozování Distribuční Soustavy) [19] a neovlivňují svým provozem napětí o více než 3 % v síti nn, resp. 2 % v síti vn. Uzly č. 36 a 37 rozšiřují původní distribuční soustavu. V síti nn mezi uzly 24 a 25 jsem prodloužil vedení tak, aby celková délka vývodu nn byla cca 550 m. Jedná se o obvyklou délku vedení nn, které se běžně provozují. Schéma této sítě je na Obr. 6.1-3.

Tab. 6.1-2 Fotovoltaické elektrárny - přehled

Uzel č.	$P_n$ [kWp]	Uzel č.	$P_n$ [kWp]
12	120	36	100
25	100	37	80
35	90		



Obr. 6.1-3 Schéma upravené distribuční sítě s uvažováním všech odběrů, OZE a distribučních transformátorů, zelená - 110 kV, černá - 22 kV, modrá - 0,4 kV

Po zmíněných úpravách jsem se zaměřil na záměrně prodlouženou síť nn, konkrétně uzly č. 22, 23, 24 a 25. Zde je připojena fotovoltaická výrobná a odběry. HRT napájecího transformátoru 110/22 kV je nastaven na 23,1 kV. DT 22/0,4 kV má nastavenou střední odbočku. Jako první případ jsem uvažoval provoz bez výroby z OZE (např. v noci) a s nulovou zátěží v celé síti. Napětí na vstupním uzlu DT bylo 1,027 pu. Na konci vedení nn (uzel č. 25) s nulovým zatížením 1,01175 pu. Dále беру v úvahu provoz v 7:00 hod ráno. Výroba z OZE je minimální (nastavena na 5 %) a spotřeba je ve své „ranní špičce“. Napětí na vstupním vinutí DT bylo 0,9909 pu (vliv odběrů v celé síti). Zvýšená spotřeba (75 %) v síti nn způsobila úbytek napětí (spolu s úbytkem napětí na DT) a na konci vedení nn v uzlu č. 25 bylo 0,8976 pu. Došlo zde tedy k podpětí. Situaci jsem vyřešil přenastavením odbočky DT ke zvýšení napětí (-2,5 %). Posledním testovaným stavem již se změněnou odbočkou DT je provoz v 12:00 hod slunný den. Výroba z OZE je uvažována téměř maximální (90 %), spotřeba minimální (25 %). Zvýšená výroba a nižší spotřeba způsobují nárůst napětí ve vn síti ve vstupním uzlu DT na 1,044 pu. Na konci vedení nn je vlivem zvýšení napětí odbočkou a připojenou výrobnou OZE napětí 1,091 pu. Hrozí zde přepětí, pokud by se zvýšila výroba nebo se ještě snížil odběr v síti.

Ke zmíněným stavům u dlouhých vývodů nn s výrobou z OZE skutečně dochází [17]. Bral jsem v úvahu reálné hodnoty zatížení a výroby, kdy výroba z OZE nebude asi nikdy rovna instalovanému výkonu a spotřeba nevzroste také na své maximum. Při výpočtech jsem uvažoval s necitlivostí HRT 0,3 kV (1,36 %), kterou jsem vždy připočetl do výsledků tak, aby byl uvažován nejnepříznivější stav. Pro úplnost jsem doplnil ještě dva teoretické stavy - maximální spotřebu resp. maximální výrobu (viz Tab. 6.1-2). Opět dle scénáře s řešením podpětí přenastavením odbočky DT, což vyvolá při druhém provozním stavu přepětí.

**Tab. 6.1-2 Vliv změn výroby a spotřeby na velikosti napětí - rekapitulace**

Výroba z OZE [%]	Spotřeba [%]	$U_{DT}$ [pu]	$U_{NN}$ [pu]
0	0	1,027	1,012
5	70	0,99	0,898
90	25	1,044	1,091
0	100	0,972	0,881
100	0	1,065	1,116

Pozn.: V Tab. 6.1-2  $U_{DT}$  označuje napětí na vstupní straně distribučního transformátoru 22/0,4 kV,  $U_{NN}$  označuje napětí na konci vývodu nn.

Pro uvažovaný vývod nn v distribuční síti doporučuji nasadit DT s regulací napětí pod zatížením. Lze logicky očekávat jeho příznivý vliv na napěťové poměry a četnost spínání několikrát za den podle změn zatížení/výroby.

## Závěr

Gauss-Seidel metodu jsem rozšířil o výpočet optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů pro řízení  $U/Q/P$  třemi metodami. Testování jednotlivých přístupů potvrdilo metodu OLTC 1 jako nejvhodnější. Tato metoda nejméně navýšila počet iterací a výpočtovou dobu klasické GS metody a je dostatečně přesná. Metodu OLTC 1 bez „round“ jsem použil ke zpřesnění výsledků řízených veličin vzhledem k cílovým hodnotám. V reálných aplikacích je využití této vyšší přesnosti snad jen u distribučních transformátorů řízených pomocí výkonové elektroniky, kde se nenastavují plně odbočky. Nicméně dle mého názoru je vysoká přesnost nastavení odboček u regulačních transformátorů zbytečná. V síti dochází k rychlým změnám a zřejmě vždy bude nutné zahrnovat určitou necitlivost. Navíc se právě kvůli přesnějšímu nastavování odboček celý výpočet prodlužuje. Metoda OLTC 2 ukázala odlišný přístup k řešení. Respektuje sice pásmo necitlivosti, ale její spínání jedné odbočky v jedné iteraci je z hlediska výpočtu časově náročné a počet iterací značně roste. Tuto metodu bych pro reálné použití nedoporučil.

Začlenění regulačních transformátorů do NR metody je vzhledem k náročnosti algoritmů a možných cest vedoucích k řešení velmi časově náročné. Tato náročnost se mi potvrdila při jednotlivých pokusech o modelaci přístupu, který upravuje základní úlohu NR metody. Výsledky sítí v porovnání s výpočtem GS metodou mohou potvrdit pouze u zahrnutí regulačních transformátorů pro řízení napětí, kde jsem dosáhl podobných hodnot. Výpočet v této metodě je oproti výpočtům v GS metodě velmi rychlý. Vyřešení ustáleného chodu libovolně velké soustavy se zahrnutím regulačních transformátorů pro řízení napětí netrvá déle než 1 s. Pro regulační transformátory k řízení jalového/činného výkonu jsem nenašel vhodné nastavení algoritmů tak, aby byly výsledky jejich nastavení reálné. Zvolená metoda zřejmě nebyla příliš vhodná, i když literatura [15] uváděla tuto metodu jako funkční. Doporučil bych tedy při programování NR metody zvolit přístup přes citlivosti, dle [23]. Ta je využívána u většiny komerčních programů a bude zřejmě spolehlivější k získání správných výsledků.

Praktické využití vlastních programů jsem uvedl na příkladu analýzy distribuční soustavy se simulací řízení napětí. Lze vyšetřovat skutečné provozní stavy a získat výstupy ustáleného chodu vč. optimálního nastavení odboček regulačních transformátorů. Tento přístup k výpočtu bude možná již brzy vyžadován jako jedna z možností k eliminaci rizik způsobených nestabilní výrobou z OZE. Myslím, že nejenom v distribučních soustavách by takové centrální řízení transformátorů přispělo ke stabilizaci a větší bezpečnosti provozu.

## Použitá literatura

- [1] J. J. GRAINGER, W. D. STEVENSON, Jr., *Power system analysis* - International editions, McGraw-Hill, Inc., 1994, ISBN 0-07-113338-0.
- [2] P. KUNDUR, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, Inc.
- [3] C. A. GROSS, *Power system analysis*, John Wiley & Sons, 1986, ISBN 0471862061.
- [4] J.D. GLOWER, M.S. SARMA and T.J. OVERBYE, *Power Systems Analysis and Design* - 4<sup>th</sup> edition, CENGAGE-Engineering, 2007, ISBN 0-5345-4884-9.
- [5] H. SAADAT, *Power System Analysis* - 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, Inc., 2002, ISBN-0728-4869-3.
- [6] J. MERTLOVÁ, M. KOCMICH, P. HEJTMÁNKOVÁ, *Přenos a rozvod elektrické energie*, ZČU Plzeň 1995.
- [7] J. VELEBA, *Řešení chodu soustavy I, II*. Přednášky k předmětu Teorie přenosu a rozvodu. ZČU Plzeň. 2011. ISBN 80-7082-222-8
- [8] J. SLIVONĚ, *Výkonové transformátory na hladinách vn a vvn*, Bakalářská práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2011.
- [9] M. VYHNAL, *Optimalizace chodu konvenčních numerických metod pro řešení chodu soustavy*, Diplomová práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2012.
- [10] A. J. CONEJO, *Load flow*, Presentace, Univ. Castilla – La Mancha, 2011.
- [11] ENTSO-E, *Ten year network development plan 2010-2020*, 2010.
- [12] T.V. CUTSEM and C. VOURNAS, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Springer, 2008, ISBN 978-0-387-75535-9.
- [13] M. CROW, *Computational Methods for Electric Power Systems*, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-1352-X.
- [14] K. MÁŠLO and A. KASEMBE, "PTDF Calculation in Network with Phase Shifting Transformers", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific Conference Electric Power Engineering EPE*, Brno, Czech Republic, 2010, pp. 1-3.
- [15] A. J. EXPOSITO, A. J. CONEJO and C. CANIARES, *Electric Energy Systems, Analysis and Operation*, CRC Press, 2008, ISBN 0849373654.
- [16] J. VELEBA and V. SÍŤAŘ *Possibilities of Voltage Control in Islanded Distribution Systems with Photovoltaic Power Sources*, EPE Conference, Brno, 2012.
- [17] M. KAŠPÍREK, *Distribuční transformátory s regulací pod zatížením jako prvky pro stabilizaci napětí nn*, Konference ČK CIRED 2012, 2012.
- [18] L. PROKOP, S. MISAK: *Hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny*, EPE konference, VŠB - TU Ostrava, Dlouhé Stráně, 2011.
- [19] [www.cez.cz](http://www.cez.cz) – *Pravidla provozování distribuční soustavy*, dostupné dne 23.4.2013
- [20] <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/> - *IEEE34*, dostupné dne 22.4.2013
- [21] [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz) – *10 letý rozvojový plán ČEPS*, dostupné dne 1.5.2013
- [22] <http://www.ee.washington.edu/research/real/Library/Reports/> - *Tap adjustments in AC Load flow.pdf*, dostupné dne 5.5.2013

## Seznam příloh

<b>Příloha A – Řešené sítě metodou Gauss-Seidel .....</b>	<b>1</b>
<b>Příloha B – Řešené sítě metodou Newton-Raphson.....</b>	<b>2,3</b>
<b>Příloha C – Numerické výstupy programu .....</b>	<b>4,5</b>
<b>Příloha D – Řešené sítě s OLTC metodou Gauss-Seidel .....</b>	<b>6</b>
<b>Příloha E – Řešené sítě s OLTC metodou Newton-Raphson.....</b>	<b>7</b>
<b>Příloha F – Katalog distribučních transformátorů .....</b>	<b>8</b>

## Příloha A

Seznam a výsledky řešených sítí metodou Gauss-Seidel s porovnáním s výsledky ze softwaru vedoucího této diplomové práce – Ing. Jan Veleba. Zvolená přesnost výpočtu  $1e-8$ . Porovnávané ukazatele správných výsledků – činné  $\Delta P$  a jalové  $\Delta Q$  ztráty celé sítě se neliší.

Řešená síť	Počet uzlů	$\Delta P$	$\Delta Q$	Ing. Jan Veleba		J. Slivoně	
				iterace	cpu [s]	iterace	cpu [s]
EPS0009Ipu	9	0,050633	-0,771009	68	0,0624	110	0,0468
EPS0011Ipu	11	0,839750	9,078300	143	0,0468	212	0,0624
EPS0011IIIpu	11	0,086393	-15,149000	31	0,0156	51	0,0156
EPS0014Ipu	14	0,133930	0,301220	57	0,0312	90	0,0468
EPS0015Ipu	15	0,129830	-0,176810	80	0,0312	128	0,0468
EPS0016Ipu	16	0,150120	0,274840	166	0,078	172	0,078
EPS0017Ipu	17	0,939790	5,052600	276	0,1248	402	0,1404
EPS0023Ipu	23	0,182970	-1,192800	113	0,078	166	0,078
EPS0024Ipu	24	0,512470	-0,951320	123	0,078001	181	0,0936
EPS0026Ipu	26	0,157640	0,847570	64	0,0468	99	0,078
EPS0030Ipu	30	0,175520	0,330390	191	0,156	278	0,2028
EPS0039Ipu	39	0,415910	-0,644420	522	0,5304	757	0,6864
EPS0057Ipu	57	0,278640	0,063280	189	0,2808	275	0,3588
EPS0061Ipu	61	0,746880	4,238800	633	0,99841	888	1,1856
EPS0118Ipu	118	1,324900	-5,176200	805	2,5272	1065	2,7924
EPS0145Ipu	145	-18,299000	167,970000	4117	15,975	5602	19,609
EPS0162Ipu	162	1,629600	-4,408100	1061	4,4928	2315	8,3461
EPS0300Ipu	300	4,089900	-3,936700	5610	45,895	7902	70,622
				<b>14249</b>	<b>71,44</b>	<b>20693</b>	<b>104,48</b>

## Příloha B

Seznam a výsledky řešených sítí metodou Newton-Raphson s porovnáním s výsledky ze softwaru vedoucího této diplomové práce – Ing. Jan Veleba. Zvolená přesnost výpočtu  $1e-8$ . Porovnávané ukazatele správných výsledků – činné  $\Delta P$  a jalové  $\Delta Q$  ztráty celé sítě se neliší.

Řešená síť	Počet uzlů	$\Delta P$	$\Delta Q$	Ing. Jan Veleba		J. Slivoně	
				iterace	cpu [s]	iterace	cpu [s]
IEEE009I	9	0,049547	-0,8012	4	0,0156	4	0,0156
EPS0010I	10	0,04078	0,34497	4	0,0156	4	0,0156
EPS0011I	11	0,548902	-0,13804	6	0,0156	6	0,0156
EPS0011II	11	0,839751	9,078277	8	0,0156	8	0,0156
EPS0011III	11	0,086392	-15,1486	3	0,0156	3	0,0156
EPS0013I	13	0,301608	-27,2063	4	0,0156	4	0,0156
DS013II	13	0,000195	0,000708	3	0,0156	3	0,0156
IEEE014I	14	0,133933	0,301224	4	0,0156	4	0,0156
EPS0015I	15	0,129832	-0,17681	4	0,0156	4	0,0156
EPS0016I	16	0,150124	0,274843	4	0,0156	5	0,0156
EPS0017I	17	0,939792	5,052564	5	0,0156	5	0,0156
DS019I	19	0,015617	0,12432	3	0,0156	3	0,0156
EPS0023I	23	0,182971	-1,19279	3	0,0156	3	0,0156
IEEE024I	24	0,512464	-0,95132	4	0,0156	4	0,0156
IEEE026I	26	0,157641	0,847571	4	0,0156	4	0,0156
IEEE030I	30	0,175519	0,330387	4	0,0156	4	0,0156
DS035I	35	0,000188	-0,0014	3	0,0156	3	0,0156
DS037I	37	0,329234	0,223252	3	0,0156	3	0,0156
IEEE039I	39	0,415922	-0,64442	5	0,0156	5	0,0312
EPS0043I	43	0,028018	-14,0757	5	0,0156	5	0,0312
IEEE057I	57	0,278638	0,06328	4	0,0156	4	0,0312
EPS0059I	59	7,300444	32,07748	16	0,0312	12	0,0624
EPS0059II	59	5,891022	16,26387	14	0,0312	20	0,0624
EPS0059III	59	6,322038	27,44794	7	0,0156	7	0,0312
EPS0059IV	59	2,395374	-16,0574	10	0,0156	5	0,0156
EPS0059V	59	4,627153	6,54049	14	0,0312	7	0,0156
EPS0059VI	59	2,056899	-17,9339	10	0,0156	9	0,0156
EPS0061I	61	0,746899	4,238759	5	0,0156	5	0,0312
IEEE118I	118	1,324914	-5,17617	4	0,0156	4	0,0312
DS125I	125	0,00207	0,006673	3	0,0156	3	0,0312
IEEE145I	145	-18,2989	167,9679	8	0,0312	6	0,0469

Řízení napětí a činného/jalového výkonu v elektrizačních soustavách  
s použitím transformátorů s přepínačem odboček

Bc. Jakub Slivoně 2013

IEEE162I	162	1,629586	-4,40806	6	0,0312	11	0,0936
IEEE300I	300	4,089965	-3,93666	7	0,0468	6	0,0624
EPS0629I	629	1,601398	-70,2899	4	0,0468	5	0,078
EPS0629II	629	1,592025	-71,4818	5	0,0468	6	0,0936
EPS0734I	734	1,969746	-74,1343	4	0,0468	6	0,0936
EPS0734II	734	2,117157	-75,7346	5	0,0624	5	0,312
EPS2383I	2383	7,360204	8,226186	7	0,2808	7	0,4212
EPS2736I	2736	3,259748	-30,7171	8	0,4056	8	0,6552
EPS2737I	2737	1,562046	-40,1795	5	0,234	5	0,3432
EPS2746I	2746	3,331831	-29,3912	10	0,4524	10	0,6708
EPS2746II	2746	5,135388	-17,6419	7	0,312	7	0,4836
EPS3012I	3012	6,186859	-13,3213	6	0,2964	6	0,3432
EPS3120I	3120	5,357315	-15,6325	6	0,312	6	0,4368
				<b>258</b>	<b>3,12</b>	<b>254</b>	<b>4,8049</b>



## Příloha C

Výpis všech dostupných výsledků dané soustavy. Pro přehlednost je uveden pouze výpis vyřešené malé 14 uzlové soustavy (14LTC-1) s regulačními transformátory. Lze z něho získat lepší přehled o vyřešené soustavě. Pro ostatní sítě se liší pouze rozměry větvových a uzlových výstupů. Případně není vypsáno nastavení převodů regulačních transformátorů, pokud je síť neobsahuje.

TESTOVANA SOUSTAVA:  
IEEE 14 Bus Test Case

Pocet uzlu soustavy	14
Pocet PU uzlu	4
Pocet prepnutych PU na PQ	2

Pocet vetvi soustavy	20
Pocet regulacnich transformatoru	4
Pocet fixnich transformatoru	1

Konecna odchylka vypoctu	9,65E-09
Sumarni kvadraticka odchylka OLTC	2,83E-05

VETVOVE VYSTUPY SOUSTAVY:											
Vetev	z uzlu	do uzlu	Pik [pu]	Qik [pu]	Iik [A]	Pki [pu]	Qki [pu]	Iki [A]	$\Delta P$ [pu]	$\Delta Q$ [pu]	zatizeni [%]
1	1	2	1,57	-0,20	653,90	-1,53	0,28	650,16	0,04	0,07	99,68
2	1	5	0,76	0,02	312,23	-0,73	0,04	311,97	0,03	0,06	71,29
3	2	3	0,73	0,04	306,69	-0,71	0,02	306,97	0,02	0,05	70,09
4	2	5	0,41	-0,01	172,63	-0,40	0,00	172,47	0,01	-0,01	62,55
5	2	4	0,57	-0,05	238,30	-0,55	0,07	236,70	0,02	0,02	86,34
6	3	4	-0,23	0,01	101,13	0,24	-0,01	101,41	0,00	0,00	36,74
7	4	5	-0,65	0,22	291,53	0,65	-0,20	291,53	0,01	0,02	105,63
8	4	7	0,30	-0,36	199,16	-0,30	0,41	27708,06	0,00	0,05	73,98
9	4	9	0,18	0,12	94,57	-0,18	-0,10	358,63	0,00	0,02	35,13
10	5	6	0,41	0,15	184,49	-0,41	-0,11	687,79	0,00	0,04	68,51
11	6	11	0,05	0,12	215,03	-0,05	-0,12	215,03	0,00	0,00	30,72
12	6	12	0,08	0,04	140,02	-0,08	-0,03	140,02	0,00	0,00	20,00
13	6	13	0,17	0,12	332,94	-0,16	-0,11	332,94	0,00	0,00	47,56
14	7	8	0,00	-0,23	12720,70	0,00	0,24	1156,43	0,00	0,01	115,72
15	7	9	0,30	-0,18	18959,15	-0,30	0,19	603,25	0,00	0,01	86,24
16	9	10	0,08	-0,04	150,55	-0,08	0,04	150,55	0,00	0,00	21,51
17	9	14	0,11	-0,02	185,71	-0,11	0,02	185,71	0,00	0,00	26,53
18	10	11	-0,01	-0,10	170,50	0,01	0,10	170,50	0,00	0,00	24,36
19	12	13	0,02	0,02	40,76	-0,02	-0,02	40,76	0,00	0,00	5,82
20	13	14	0,04	0,07	142,60	-0,04	-0,07	142,60	0,00	0,00	20,37

UZLOVE VYSTUPY SOUSTAVY:							
Uzel	Typ uzlu	Un [kV]	U_abs [pu]	U_ang [°]	Pg [pu]	Qg [pu]	Qsh [pu]
1	1	132	1,060	0,000	2,328	-0,183	0
2	3	132	1,045	-4,991	0,4	0,380	0
3	3	132	1,010	-12,728	0	0,216	0
4	2	132	1,024	-10,456	0	0	0
5	2	132	1,023	-8,807	0	0	0
6	2	33	1,068	-16,605	0	0,24	0
7	2	1	1,050	-13,941	0	0	0
8	2	11	1,089	-13,941	0	0,24	0
9	2	33	1,020	-15,772	0	0	0,19
10	2	33	1,021	-16,205	0	0	0
11	2	33	1,041	-16,516	0	0	0
12	2	33	1,050	-17,384	0	0	0
13	2	33	1,043	-17,326	0	0	0
14	2	33	1,012	-17,497	0	0	0

REGULACNI TRANSFORMATORY:					
Vetev	z uzlu	do uzlu	typ OLTC	tik [pu]	$\alpha_{ik}$ [°]
8	4	7	2	1,054	0
15	7	9	2	1,05	0
9	4	9	3	0,948	0
10	5	6	-1	0,932	2,8

Pozn.: Typ uzlu: 1 - referenční uzel, 2 - PQ uzel, 3 - PU uzel. Typ OLTC: 2 – řízení napětí, 3 – řízení jalového výkonu, -1 – řízení činného výkonu.

## Příloha D

Seznam a výsledky řešených sítí metodou Gauss-Seidel s optimálním nastavením regulačních transformátorů OLTC 1 s porovnáním s výsledky vedoucího této diplomové práce - Ing. Jan Veleba. Zvolená přesnost výpočtu  $1e-8$ . Sumární kvadratická odchylka regulace  $\Delta UQP$  – porovnatelné výsledky.

Řešená síť	Počet OLTC	Ing. Jan Veleba			J.Slivoně		
		iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$	iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$
9LTC-1	3	526	0,2028	9,06E-05	500	0,1404	9,06E-05
9LTC-2	3	193	0,0624	1,37E-06	177	0,0780	1,37E-06
14LTC-1	4	557	0,2184	2,83E-05	504	0,1872	2,83E-05
24LTC-1	5	548	0,3432	1,49E-04	672	0,4368	1,30E-04
30LTC-1	4	438	0,3588	1,65E-05	795	0,4836	1,65E-05
30LTC-2	4	535	0,4368	1,19E-06	913	0,5616	1,19E-06
39LTC-1	3	262	0,2808	1,26E-06	642	0,6240	1,26E-06
57LTC-1	15	2227	3,3384	2,22E-04	1863	2,2620	1,28E-04
118LTC-1	9	5560	17,4720	7,68E-03	16422	43,7740	7,69E-03
300LTC-1	49	8548	71,4170	3,86E-02	17664	157,9800	3,83E-02
300LTC-2	51	8476	70,9180	2,16E-02	17443	156,4100	2,13E-02

## Příloha E

Seznam a výsledky řešených sítí metodou Newton-Raphson s optimálním nastavením regulačních transformátorů s porovnáním s výsledky GS metodou. Zvolená přesnost výpočtu  $1e-8$ . Sumární kvadratická odchylka regulace  $\Delta UQP$  – porovnatelné výsledky u sítí s regulačními transformátory pro řízení napětí (označeny zeleně). Pro ostatní sítě výsledky pouze pro informaci.

Řešená síť	Počet OLTC	GS OLTC 1			NR OLTC		
		iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$	iter [-]	CPU [s]	$\Delta UQP$
9LTC-1	3	500	0,1404	9,06E-05	6	0,1092	1,38E-01
9LTC-2	3	177	0,078	1,37E-06	8	0,0936	5,34E-04
14LTC-1	4	504	0,1872	2,83E-05	4	0,078	7,54E-02
24LTC-1	5	672	0,4368	1,30E-04	12	0,1092	2,58E+00
30LTC-1	4	795	0,4836	1,65E-05	5	0,1248	2,19E-01
30LTC-2	4	913	0,5616	1,19E-06	6	0,078	0,00E+00
39LTC-1	3	642	0,624	1,26E-06	9	0,1092	1,01E-06
57LTC-1	15	1863	2,262	1,28E-04	5	0,0624	1,22E-02
118LTC-1	9	16422	43,774	7,69E-03	7	0,1404	2,35E+00
300LTC-1	49	17664	157,98	3,83E-02	diverguje		
300LTC-2	51	17443	156,41	2,13E-02	14	0,2028	5,31E-02

## Příloha F

Katalog olejových transformátorů SGB použitý pro výpočet náhradních modelů v testované distribuční síti. Zdroj: <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/technicka-data/katalogy-a-navody/> - Olejové transformátory SGB. (dostupné dne 25.4.2013)

Typové označení	Jm. výkon [kVA]	P <sub>0</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	u <sub>k</sub> [%]	L <sub>pA</sub> [dB]	a1 [mm]	b [mm]	h1 [mm]	d [mm]	e [mm]	f1 [mm]	f2 [mm]	hmotnost [kg]	z toho olej [kg]
DOTN 50H/20(10)	50	175	1250	4	41	870	670	1210	125	520	265	150	460	140
DOTEL 50H/20(10)	50	125	1100	4	37	850	670	1350	125	520	265	150	510	130
DOTN 100H/20(10)	100	290	2150	4	43	950	720	1250	125	520	265	150	610	160
DOTEL 100H/20(10)	100	210	1750	4	37	920	700	1290	125	520	265	150	790	180
DOTUL 100H/20(10)	100	210	1475	4	34	990	740	1350	125	520	265	150	630	180
DOTN 160H/20(10)	160	300	3100	4	44	1050	730	1310	125	520	265	150	840	190
DOTEL 160H/20(10)	160	300	2350	4	38	1010	720	1390	125	520	265	150	910	230
DOTUL 160H/20(10)	160	300	2000	4	35	1140	780	1430	125	520	265	150	1040	270
DOTN 250H/20(10)	250	570	4100	4	46	1200	780	1410	125	520	265	150	1060	260
DOTEL 250H/20(10)	250	425	3250	4	39	1050	730	1470	125	520	265	150	1250	260
DOTUL 250H/20(10)	250	425	2750	4	37	1200	800	1480	125	520	265	150	1260	310
DOTN 400H/20(10)	400	750	6000	4	47	1230	890	1470	125	670	265	150	1240	290
DOTZ 400H/20(10)	400	730	6250	6	49	1230	890	1510	125	670	265	150	1280	300
DOTEL 400H/20(10)	400	600	4600	4	40	1200	800	1520	125	670	265	150	1510	330
DOTUL 400H/20(10)	400	610	3850	4	39	1260	850	1560	125	670	265	150	1580	340
DOTZ 500H/20(10)	500	850	7800	6	49	1610	930	1520	125	670	265	150	1580	350
DOTEL 500H/20(10)	500	720	5500	4	41	1245	820	1580	125	670	265	150	1750	430
DOTN 630H/20(10)	630	1030	8400	4	49	1550	970	1590	125	670	265	150	1760	410
DOTZ 630H/20(10)	630	1100	8700	6	51	1550	950	1520	125	670	265	150	1880	430
DOTEL 630H/20(10)	630	860	6500	4	41	1290	880	1640	125	670	265	150	1940	390
DOTUL 630H/20(10)	630	860	5400	4	40	1420	900	1660	125	670	265	150	2290	540
DOTZ 800H/20(10)	800	1150	11000	6	52	1650	930	1800	125	670	265	150	2270	530
DOTEL 800H/20(10)	800	980	8500	6	42	1520	955	1710	125	670	265	150	2620	670
DOTUL 800H/20(10)	800	980	7450	6	41	1545	940	1740	125	670	265	150	2605	610
DOTE 1000H/20(10)	1000	1700	10500	6	53	1750	1030	1790	160	820	265	150	2820	720
DOTEL 1000H/20(10)	1000	1100	10500	6	43	1750	1030	1780	160	820	265	150	2830	680
DOTUL 1000H/20(10)	1000	1100	9500	6	42	1670	980	1820	160	820	265	150	2920	680
DOTZ 1000H/20(10)	1000	1500	12500	6	53	1820	1090	1750	160	820	265	150	2720	700
DOTE 1250H/20(10)	1250	2000	13500	6	54	1940	1150	1870	160	820	265	150	3210	780
DOTEL 1250H/20(10)	1250	1350	13500	6	46	1990	1100	2050	160	820	265	150	3160	790
DOTUL 1250H/20(10)	1250	1400	11750	6	44	1905	1120	1885	160	820	265	150	3475	825
DOTZ 1600H/20(10)	1600	2200	20000	6	53	2070	1840	1990	160	820	165	365	3840	850
DOTE 1600H/20(10)	1600	2200	17000	6	55	1970	1180	1970	160	820	265	165	3910	1010
DOTEL 1600H/20(10)	1600	1700	17000	6	46	2200	1240	2130	160	820	265	165	4010	1040
DOTUL 1600H/20(10)	1600	1700	14000	6	46	2140	1260	1950	160	820	265	165	4030	970
DOTE 2000H/20(10)	2000	2900	22000	6	56	2200	1320	2030	200	1070	265	165	5040	1170
DOTEL 2000H/20(10)	2000	2100	22000	6	47	2270	1360	2420	200	1070	265	165	4950	1330
DOTUL 2000H/20(10)	2000	2100	18000	6	46	2255	1335	2040	200	1070	265	165	4885	1135
DOTE 2500H/20(10)	2500	3200	26500	6	58	2330	1430	2290	200	1070	265	265	6130	1400
DOTEL 2500H/20(10)	2500	2500	26500	6	48	2420	1480	2550	200	1070	265	165	5980	1620
DOTUL 2500H/20(10)	2500	2500	22000	6	47	2370	1410	2130	200	1070	265	165	5740	1300