

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY
A EKOLOGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Optimalizace chodu konvenčních numerických metod
pro řešení chodu soustavy**

**autor: Bc. Marek Vyhnal
vedoucí práce: Ing. Jan Veleba
rok: 2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek VYHNAL**
Osobní číslo: **E10N0194P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Optimalizace chodu konvenčních numerických metod pro řešení chodu soustavy**
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 :

1. Matematicky popište řešení chodu soustavy (admitanční uzlová matice, typy uzlů, nelinearita uzlových rovnic, atd.).
2. Formulujte numerický postup Gauss-Seidelovy a Newton-Raphsonovy metody vč. mezi jalových výkonů v generátorech soustavy.
3. Diskutujte možnosti akcelerace chodu Gauss-Seidelovy metody (minimalizace počtu iterací, zrychlení výpočtu) zejména pro rozsáhlejší sítě a distribuční sítě.
4. Rovněž posuďte možnosti stabilizace chodu Newton-Raphsonovy metody (rozšíření její oblasti numerické stability) zvláště pro silně zatížené a slabě propojené soustavy.
5. Vytvořte výpočtový program v Matlabu pro testování jednotlivých akceleračních a stabilizačních technik G-S a N-R metody na širokém spektru elektrizačních soustav.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mertlová, J., Hejtmánková, P., Tajtl, T. : Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, ZČU in Pilsen, 2004
2. Glover, J.D., Sarma, M.S., Overbye, T.J. : Power System Analysis and Design, CENGAGE-Engineering, 2007
3. Canizares, C., Conejo, A.J., Exposito, A.G. : Electric Energy Systems, Analysis and Operation, CRC Press, 2008
4. Heckmann, W., Sorg, A., Weber, T., Wellssow, W.H. : Enhanced AC Power-Flow Solutions for Reliability Analyses, ETEP, Germany, European Transactions on Electrical Power, Vol. 11, No. 2, 2001, pp. 79-88
5. Koh, C.S., Ryu, J.S., Fujiwara, K. : Convergence Acceleration of the Newton-Raphson Method Using Successive Quadratic Function Approximation of Residual, 2005, IEEE Shenyang, China, IEEE, Transactions on magnetics, Vol. 42, No. 4, 2006, pp. 611-614

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Veleba

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry



V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Práce se zabývá řešením chodu elektrizační soustavy v ustáleném stavu. Popisuje a dále optimalizuje konvenční numerické metody pro řešení chodu soustavy, jako jsou Gauss-Seidelova a Newton-Raphsonova metoda. Optimalizace se týká upravení fundamentálního algoritmu G-S a N-R metody. U G-S metody toto upravení spočívá v použití akceleračního a retardačního koeficientu, který může být konstantní pro všechny uzly nebo může být pro každý uzel odlišný a proměnný v každé iteraci. U metody N-R se lze setkat se dvěma typy stabilizace – zpřesnění startovních hodnot fázorů napětí (pomocí metody G-S, Fast-Decoupled či DC Load Flow) nebo užití koeficientu při aktualizaci fázorů napětí na konci každé iterace. Cílem této práce je nalézt co nejlepší techniku pro akceleraci G-S metody a stabilizaci N-R metody. Testování jednotlivých akceleračních a stabilizačních technik (čerpaných z literatury nebo vytvořených autorem) probíhá na širokém spektru elektrizačních soustav.

Klíčová slova

Přenosová soustava, admitanční matice, typy uzlů, Gauss-Seidelova metoda, Newton-Raphsonova metoda, akcelerace G-S metody, stabilizace N-R metody, Over-Relaxation metoda (SOR), Fast-Decoupled metoda, DC Load Flow metoda, One-Shot G-S metoda, State Update Truncation metoda (SUT)

Abstract

The study deals with the steady-state solution of the electric power system. It describes and optimizes conventional load flow techniques such as Gauss-Seidel and Newton-Raphson method. The optimization is based on modifications of the fundamental algorithm of G-S and N-R method. The G-S is modified using acceleration and retardation coefficient which can be constant for all nodes or may be different for each node and iteration. Two main methods exist for stabilization of N-R process - more accurate starting values of complex voltage (using G-S, Fast-Decoupled or DC Load Flow) or using the coefficient in updating complex voltages at the end of current iteration. The aim of this master thesis is to find the best technique for the acceleration of G-S method and the stabilization of N-R method. Testing of individual acceleration and stabilization techniques (taken from the literature or created by the author) is performed on a broad range of electric power systems available.

Key words

Transmission system, admittance matrix, bus types, Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method, accelerations of Gauss-Seidel method, stabilization of Newton-Raphson method, Over-Relaxation method (SOR), Fast-Decoupled method, DC Load Flow method, One-Shot G-S method, State Update Truncation method (SUT)

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.

V Plzni dne 7. 5. 2012

Bc. Marek Vyhnal

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Velebovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Vážím si též toho, že mi poskytl velké množství rozličných elektrizačních sítí pro realizaci analýz chodu soustavy.

Také bych chtěl poděkovat mé rodině za významnou podporu při mém studiu.

Obsah

1	Úvod.....	- 13 -
2	Charakteristika současné elektrizační soustavy ČR	- 15 -
3	Modelování elektrizačních soustav.....	- 18 -
3.1	Tvorba náhradního schématu	- 18 -
4	Řešení chodu soustavy.....	- 20 -
4.1	Modelování uzlů soustavy s využitím metody uzlových napětí.....	- 20 -
4.2	Odvození admitanční matice	- 22 -
4.2.1	Změny matice při změně konfigurace	- 22 -
4.2.2	Začlenění transformátoru	- 23 -
4.2.3	Začlenění kompenzačních prvků	- 26 -
5	Numerické metody pro řešení chodu soustavy.....	- 27 -
5.1	Gauss-Seidelova metoda	- 27 -
5.2	Newton-Raphsonova metoda.....	- 30 -
5.3	Začlenění jalových mezí v PU uzlech do G-S a N-R metody	- 34 -
6	Optimalizace konvenčních numerických metod	- 37 -
6.1	Akcelerační techniky využívané u Gauss-Seidelovy metody	- 37 -
6.1.1	Použití akceleračního koeficientu α (acc1)	- 38 -
6.1.2	Použití akceleračního nebo zpomalovacího koeficientu m (acc2)	- 38 -
6.1.3	Použití proměnného akceleračního nebo zpomalovacího koeficientu (acc3)	- 40 -
6.2	Stabilizace Newton-Raphsonovy metody	- 43 -
6.2.1	Zpřesnění startovních hodnot pomocí G-S metody (stb1)	- 44 -
6.2.2	Zpřesnění startovních hodnot pomocí F-D metody (stb6)	- 45 -
6.2.3	Zpřesnění startovních hodnot pomocí metody DC Load Flow (stb5)	- 46 -
6.2.4	Použití fixních koeficientů pro částečnou aktualizaci (stb2)	- 47 -
6.2.5	Kombinace přístupu 6.2.1 a 6.2.4 (stb3)	- 48 -
6.2.6	Použití proměnného koeficientu (stb4)	- 48 -
7	Výpočtový software.....	- 52 -
7.1	Vstupní data a jejich formát	- 53 -
7.2	Ukázka řešení	- 54 -
8	Zhodnocení výsledků	- 59 -
8.1	Výsledky akceleračních technik G-S metody.....	- 59 -
8.2	Výsledky stabilizačních technik N-R metody	- 62 -
9	Závěr	- 64 -
10	Seznam použitých zdrojů	- 65 -
10.1	Seznam literatury	- 65 -
10.2	Seznam testovaných soustav u akcelerace G-S	- 66 -
10.3	Seznam testovaných sítí u stabilizace N-R	- 67 -

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky

CEE TSO	.....	sdružení osmi střeoevropských TSO
ČEPS	.....	Česká elektrizační přenosová soustava
DS	.....	distribuční soustava
ENTSO-E	.....	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ES	.....	elektrizační soustava
ETSO	.....	European Transmission System Operators
F-D	.....	Fast-Decoupled metoda
G-S	.....	Gauss-Seidelova metoda
NN	.....	nízké napětí
N-R	.....	Newton-Raphsonova metoda
OSGS	.....	One-Shot Gauss-Seidelova metoda
OSDC	.....	One-Shot DC Load Flow metoda
OSFD	.....	One-Shot Fast-Decoupled metoda
OZ	.....	opětovné zapnutí
PS	.....	přenosová soustava
SOR	.....	Successive Over-Relaxation metoda
SUT	.....	State Update Truncation metoda
TSO	.....	Transmission system operator
UCTE	.....	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
VN	.....	vysoké napětí
VVN	.....	velmi vysoké napětí
ZVN	.....	zvláště vysoké napětí

Symbols

Pokud není napsáno jinak, potom tyto symboly značí:

\bar{V}	.....	matice či vektor
\bar{V}	.....	fázor (komplexní hodnota)
V^*	.....	veličina komplexně sdružená
V'	.....	hodnota přepočtená na jinou napěťovou úroveň
$V^{(p)}$	.....	hodnota v p iteraci
V_v	.....	vztažná veličina
V_i	.....	veličina i prvku
v	.....	veličina v poměrných jednotkách ¹
$j(i)$	.....	komplexní jednotka
<hr/>		
f [Hz]	.....	frekvence
$U_{a,b,c}$ [V]	.....	napětí ve fázi a, b, c
U [V]	.....	sdružené napětí
U_f [V]	.....	fázové napětí
U_N [V]	.....	jmenovité napětí
p_{ik} [-]	.....	převod transformátoru zapojeného mezi uzly i a k
I_{ik} [A]	.....	elektrický proud tekoucí z uzlu i směrem k uzlu k pozn.: u I_{ki} je to naopak
I_i [A]	.....	elektrický proud vytékající (vtékající) z (do) uzlu i
$Z[\Omega]$	.....	impedance prvku
$R[\Omega]$	.....	rezistance prvku
$X[\Omega]$	.....	reaktance prvku
S [VA]	.....	zdánlivý výkon
P [W]	.....	činný výkon
Q [VAr]	.....	jalový výkon
ϑ [rad]	.....	fázový posun fázoru napětí
n [-]	.....	počet uzlů soustavy
\bar{Y}_{ik} [S]	.....	podélná komplexní admitance linky mezi uzlem i a k
\bar{Y}_{iko} [S]	.....	příčná komplexní admitance linky mezi uzly i, k a zemí
B_{sh} [S]	.....	susceptance kompenzačního prvku
Q_c [VAr]	.....	kapacitní jalový výkon kompenzačního prvku
\bar{A}	.....	admitanční matice
A_{ik}	.....	prvek admitanční matice v i řádku a k sloupci
G_{ik}	.....	reálná část prvku admitanční matice
B_{ik}	.....	imaginární část prvku admitanční matice
U_{set} [V]	.....	nastavená startovní hodnota napětí
ϑ_{set} [rad]	.....	nastavená startovní hodnota fázového posunu fázoru napětí

¹ Veličiny v poměrných jednotkách zabírají v této diplomové práci výhradní místo. Celý výpočtový software je koncipován na práci s veličinami v poměrných jednotkách, které jsou vztaženy (pokud není napsáno jinak) na hodnotu zdánlivého výkonu $S = 100$ MVA.

Q_L, Q_G [VAr]	.....	jalový odebíraný a generovaný výkon
P_L, P_G [W]	.....	činný odebíraný a generovaný výkon
$Q_{G,max}$ [VAr]	.....	horní mez jalového výkonu
$Q_{G,min}$ [VAr]	.....	dolní mez jalového výkonu
ε [-]	.....	zadaná odchylka v konvergenčním kritériu
$\Delta P, \Delta Q$	.....	prvky tvořící rozdílový vektor
$\overline{H}, \overline{N}, \overline{J}, \overline{L}$	.....	submatice jakobiánu s prvky $H_{ik}, N_{ik}, J_{ik}, L_{ik}$
$\Delta \vartheta, \Delta U/U$	.....	prvky tvořící přírůstkový vektor (přírůstky napětí a úhlu napětí)
\overline{M}	.....	pomocný vektor při začlenění jalových mezí
typ_1	.....	typ uzlu v aktuální iteraci při začlenění jalových mezí
typ_0	.....	typ uzlu na začátku simulace při začlenění jalových mezí
U_i^{sp}	.....	viz. U_{set} v uzlu i
U_{acc} [V]	.....	napětí spočtené akcelerační metodou
α, m	.....	akcelerační a akcelerační nebo retardační koeficient
$k, k_{1,2}$	.....	proměnné koeficienty použité v akceleračních technikách
$\overline{B}_{1,2}$	.....	matice ve F-D metodě s prvky B_{ik}
\overline{B}_x	.....	matice v metodě DC Load Flow s prvky $B_{x,ik}$
DXT	.....	dělicí mez korekčního vektoru
DXT_U	.....	dělicí mez korekčního vektoru pro velikost napětí
DXT_ϑ	.....	dělicí mez korekčního vektoru pro úhel napětí
$corrU$	.....	přírůstek napětí
$corr\vartheta$	.....	přírůstek fázového posunu fázorů napětí
$corrUpr$	.....	upravená hodnota přírůstku napětí nebo úhlu napětí
$corr$	.....	neupravená (vypočtená) hodnota přírůstku napětí a úhlu napětí
$odchU$	.....	viz. $corrU$
$odch\vartheta$	.....	viz. $corr\vartheta$
$odch$	.....	viz. $corr$
$\overline{M}_0, \overline{M}_1, \overline{M}_2$	.....	matice, v nichž jsou uloženy informace o soustavě

1 Úvod

Historie vývoje užití elektrické energie v českých zemích se začala psát roku 1878, kdy pro osvětlení tkalcovny lnu v Moravské Třebové bylo instalováno šest obloukových lamp. Výroba a zavádění elektřiny do pražské aglomerace jsou bezprostředně spjaty se jménem českého elektrotechnika a průmyslníka Františka Křižíka, jehož elektrické obloukové lampy v roce 1883 poprvé osvětlily Staroměstské náměstí. Zdrojem energie byla výhradně stejnosměrná dynamo. Elektrická energie byla tehdy využívána především pro veřejné osvětlení a jako zdroj energie pro výrobní podniky. Postupem času přestaly výrobní zdroje sloužit pouze jejich zřizovatelům, ale elektřina se postupně dostávala i k dalším odběratelům. Využívání střídavé elektrické energie začalo roku 1900, kdy byl zahájen provoz elektrárny v pražských Holešovicích s třífázovými generátory. V roce 1918 bylo ve vznikající Československé republice elektrifikováno již 11 procent měst s 34 procenty obyvatelstva. V roce 1955 bylo již elektrifikováno celé české území. [1]

Jak se pomalu začala rozvíjet energetika, stavěly se nové zdroje na výrobu elektřiny a byla čím dál větší potřeba vznikající elektrizační soustavy navrhovat, analyzovat jejich chod, provádět simulace budoucího stavu, plánovat rozvoj další výstavby či řešit provozní a poruchové stavy. S nástupem počítačů v 50. – 60. letech dvacátého století se hledal matematický nástroj pro modelování sítí v ustáleném stavu. Jako vhodné řešení se našla tzv. Gauss-Seidelova metoda nazvaná po německých matematicích Carlu Friedrichu Gaussovi a Philippu Ludwigovi von Seidel. Tato metoda měla výhody v tom, že byla velmi jednoduchá a numericky stabilní. Pro malé sítě, které byly v té době běžné, představovala vhodnou metodu pro jejich řešení. Nevýhoda této metody se projevovala až s příchodem větších sítí, kdy výpočet zabral příliš mnoho času kvůli velkému počtu iterací. Velké sítě měly v tehdejší době příliš velké nároky na paměť a rychlost počítačů.

V průběhu let, kdy se z malých lokálních elektrizačních soustav stávaly velké propojené celky, rostly požadavky na rychlost výpočtu a Gauss-Seidelova metoda přestala vyhovovat, bylo třeba najít ekvivalentní vyspělejší náhradu pro řešení chodu soustavy, čímž se stala Newton-Raphsonova metoda. Tato metoda je pojmenována po anglickém fyzikovi a matematikovi siru Isaacu Newtonovi a anglickém matematikovi Josephu Raphsonovi. N-R metoda vykompenzovala nevýhody G-S metody. Byla to velmi rychlá metoda, které stačil zanedbatelný počet iterací pro výpočet chodu soustavy oproti metodě G-S. Nevýhodou této metody byla paměťová náročnost, která se minimalizovala vhodným naprogramováním softwaru a částečným růstem výkonu počítačů v 70. letech. Zásadní nevýhodou, která přetrvává, je slabá numerická stabilita.

Pro požadavky síťových výpočtů v reálném čase byla téměř okamžitě po uvedení N-R metody zavedena metoda tzv. Fast-Decoupled, která zrychlovala výpočet jednotlivých iterací při relativně slušné přesnosti a stejně tak dobré stabilitě. Navýšení počtu iterací této metody bylo v porovnání s N-R metodou minimální, navíc metoda F-D měla kratší dobu výpočtu jedné iterace a menší požadavky na paměť. V dnešní době se výhradně používá pro řešení soustavy metoda Fast-Decoupled (pro svou rychlost a poměrně stabilní chování).

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi, jak vhodně minimalizovat nevýhody obou tradičních metod (G-S a N-R) tak, aby mohly být (obzvláště G-S metoda) i nadále používány při analýzách současných rozsáhlých a komplexních elektrizačních soustav. Z hlediska optimalizace numerických metod je u G-S snaha minimalizovat počet iterací a časové nároky na provedení jedné iterace. Akcelerace G-S metody se provádí zejména pro rozsáhlejší sítě a pro sítě distribuční. Využívá se různých akceleračních přístupů, z nichž je v této práci zpracováno použití akceleračního a retardačního koeficientu. U N-R je snaha stabilizovat jeho iterační výpočet, především pro silně zatížené a slabě propojené soustavy. Využívá se při tom zpřesnění startovních hodnot (pomocí výpočtu několika iterací G-S, F-D, DC Load Flow) nebo použití koeficientů pro částečnou aktualizaci komplexních hodnot napětí.

V práci je popsána problematika řešení chodu soustavy, včetně matematického modelu s využitím admitanční matice a uzlových napětí. Dále jsou zde rozebrány konvenční numerické metody (Gauss-Seidel a Newton-Raphson) analyzující chod soustavy, včetně začlenění mezi jalových výkonů v generátorech soustavy. Další kapitolou je optimalizace těchto konvenčních metod použitím vhodných akceleračních a stabilizačních technik, které jsou v této kapitole vysvětleny. Poslední kapitola se věnuje zhodnocení výsledků získaných ze simulačního výpočtového softwaru, který jsem v rámci diplomové práce vytvořil.

Tento výpočtový software nabízí širokou paletu optimalizačních přístupů ke zlepšení chování uvedených metod. Každá výpočetní metoda je samostatný celek a po jejím spuštění stačí zvolit soustavu pro vyřešení. Řešení programu se vypisuje na obrazovku nebo se zapisuje do souboru v tabulkovém formátu. V tomto souboru jsou uloženy údaje o počtu uzlů soustavy, konvergenci či divergenci řešení, celkových činných a jalových ztrátách, počtu iterací potřebných ke splnění konvergenčního kritéria, odchylce konvergenčního kritéria, celkové době řešení, době potřebné na výpočet jedné iterace a o výsledných hodnotách vypočteného komplexního napětí ve všech uzlech soustavy. Při řešení se zobrazí graf s vývojem hodnoty napětí v jednotlivých iteracích, který lze také uložit.

2 Charakteristika současné elektrizační soustavy ČR

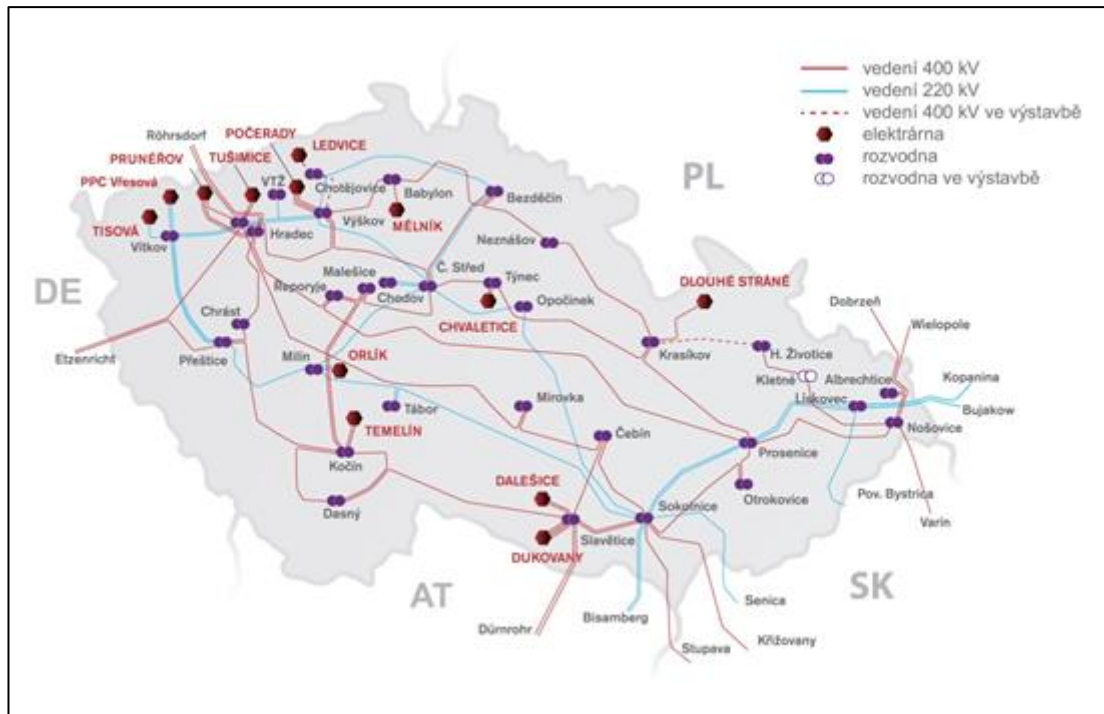
Elektrizační soustava (Obrázek 2.1) je ucelený soubor pro výrobu, přenos a distribuci (spotřebu) elektrické energie, včetně dalších prvků pro měření, kontrolu, ochranu, regulaci a řízení elektrizační soustavy. Funkcí ES je zajistit dodávku elektrické energie v požadovaném množství, místě a čase za odpovídající kvality, spolehlivosti a s maximální hospodárností. ES je provozována na normalizované řadě střídavých trojfázových napětí (podle normy ČSN IEC 38 33 01 20), jejichž sdružená hodnota je uvedena níže (Tabulka 2.1). Podle funkce se ES dělí na přenosovou a distribuční.

	Sdružené hodnoty napětí [kV]					
	Nízké napětí (NN)	Jmenovité	0,4		0,5	0,69
Max. provozní		0,42		---	0,73	
Vysoké napětí (VN)	Jmenovité	3	6	10	22	35
	Max. provozní	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí (VVN)	Jmenovité	110			220	
	Max. provozní	123			245	
Zvláště vysoké napětí (ZVN)	Jmenovité	400				
	Max. provozní	420				

Tabulka 2.1 - Normalizovaná řada napětí

V ČR je přenosová soustava provozována na napětí 400 a 220 kV a na vybraných napětí 110 kV. Napěťová soustava 400 kV je propojena se zahraničím. Provozovatel české přenosové soustavy ČEPS, a.s. bilaterálně spolupracuje především se sousedními zeměmi. U německých hranic existují dvě propojovací místa s ČR. První je v Bavorsku (E.ON Netz GmbH), druhé na východě Německa (Vattenfall Europe AG), dále pak jsou propojovací místa v Polsku (Polskie Sieci Elektroenergetyczne), na Slovensku (Slovenská elektrizačná přenosová sústava) a v Rakousku (Austrian Power Grid).

Od roku 2007 je ČEPS, a.s. členem uskupení CEE TSO, které sdružuje region střední a východní Evropy. Provozovatel české přenosové soustavy také působí v rámci asociace evropských provozovatelů přenosových soustav ENTSO-E, která integruje kontinentální Evropu od Portugalska po Polsko ve směru od západu na východ a od Dánska na severu až po Řecko v jihovýchodní oblasti. ENTSO-E jako nástupnická organizace 1. července 2009 plně převzala kompetence organizací UCTE a ETSO. [2]



Obrázek 2.1 - Schéma elektrizační soustavy ČR [3]

Základním úkolem přenosových sítí je propojení uzlů výroby (velkých elektráren) a uzlů rozvodu. ČEPS, a.s. jako provozovatel PS také zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektrické energie a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení ES. Pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky se využívají mimo jiné systémové služby, které jsou děleny do čtyř kategorií: [4]

- **udržování kvality elektřiny** (tato služba využívá následující technickoorganizační prostředky - udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence, sekundární regulaci f a P , sekundární regulaci napětí, terciární regulaci napětí, zajištění kvality napěťové sinusovky a zajištění stability přenosu),
- **udržování výkonové rovnováhy v reálném čase** (využívající sekundární regulaci f a P , terciární regulaci výkonu, využití dispečerské zálohy),
- **obnovení provozu** (využívající plán obnovy spolu s ostrovním provozem a startem ze tmy),
- **dispečerské řízení.**

Přenosová soustava je řešena konstrukčně i provozně jako okružní síť. Co se týče zapojení uzlu transformátoru, je přenosová soustava z hlediska bezpečnosti účinně uzemněná.

Distribuční nebo také rozvodná soustava umožňuje přivedení elektrické energie spotřebitelům. Ta se přivádí hlavně z nadřazené (přenosové) soustavy nebo ze zdrojů malých

výkonů místního charakteru, které se připojují na tuto soustavu. Těmito zdroji mohou být průmyslové elektrárny, kogenerační jednotky či obnovitelné zdroje využívající energii z vody, větru, biomasy, slunce. Distribuční soustava 110 kV a VN je provozována paprskově, případně formou průběžného rozvodu. Distribuční sítě nízkého napětí jsou řešeny převážně paprskovým nebo průběžným rozvodem, husté sítě jsou pak konstruovány jako mřížové. Z hlediska zapojení uzlu transformátoru je 110 kV soustava řešena jako účinně uzemněná, soustava VN je neúčinně uzemněna nebo uzly vinutí transformátoru jsou izolované. Na nízkém napětí 0,5 a 0,69 kV je taktéž soustava izolovaná a na hodnotě 0,4 kV je soustava účinně uzemněná, výjimečně izolovaná. Nízké napětí je převážně provozováno na 0,4 kV, ostatní napětí jsou z hlediska využívání zanedbatelná.

Požadavky kladené na DS:

- **kvalita elektrické energie** (stálé napětí udržované v povolených mezích),
- **spolehlivost dodávky elektrické energie** (omezení výpadků dodávky odběratelům na minimum; toho se docílí například zálohováním transformátorů a vedení, rozvodnami s více systémy přípojníc, kvalitnějšími a spolehlivějšími zařízeními, napájením z více uzlů přenosové soustavy VVN nebo automatikami pro zajištění mřížového obnovení napětí, např. automatika opětného zapnutí OZ),
- **možnost snadného rozšiřování a obnovování zařízení** (→ dostatečná rezerva při dimenzování transformátorů a průřezu vedení),
- **jednoduchost a přehlednost sítě** (jednoduchá obsluha a údržba (nedochází k chybám), nižší počet pracovníků, vyšší bezpečnost, jednodušší chránění při poruchách),
- **minimalizace zkratových poměrů** (žádný paralelní provoz nebo oboustranně napájená linka - zvyšování zkratového výkonu a složitá lokalizace poruchy),
- **ekonomický provoz sítě** (hospodárnost provozu při různých provozních stavech (různé zatížení) → minimalizace ztrát vhodnou konfigurací),
- **ekonomický návrh sítě** (kompromis mezi náklady, spolehlivostí a bezpečností).

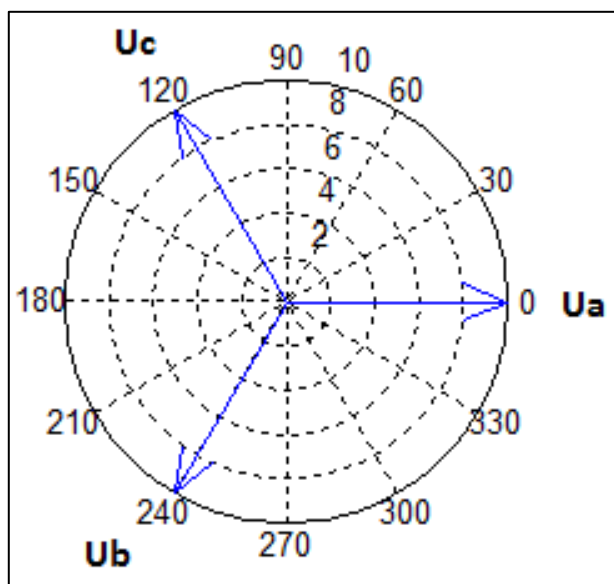
3 Modelování elektrizačních soustav

Úkoly při modelování ES jsou²: [5]

- výpočet napěťových a výkonových poměrů,
- výpočet celkových činných a jalových ztrát,
- vhodné nastavení převodů u transformátorů přepínačem odboček,
- vhodné nastavení generovaného činného výkonu elektrárenských bloků pro minimalizaci výrobních nákladů,
- plánování budoucího rozvoje ES,
- analýza poruchových stavů (výskyt jedno a více fázových zkratů v ES),
- kontingenční analýza (kritéria n-1, popřípadě n-2 u jaderných elektráren).

3.1 Tvorba náhradního schématu

Při tvorbě náhradního schématu lze použít některá zjednodušení. Uvažuje se, že všechny sítě jsou trojfázové a jejich pasivní parametry jsou stejné ve všech třech fázích. Dalším zjednodušením je uvažování sinusového průběhu napětí a proudu. Důsledkem toho je použití symbolicko-komplexní metody s možností počítat tak napětí a proudy ve formě fázorů daných velikostí a úhlem natočení. [6] Soustavu je pak možné řešit jen pro jednu fázi, která obsahuje uzly a větve, a zbylé dvě dopočítat pootočením o $\pm 120^\circ$ (Obrázek 3.1).



Obrázek 3.1- Fázorový diagram napětí

$$\begin{aligned} \bar{U}_b &= a^2 \bar{U}_a [V] \\ \bar{U}_c &= a \bar{U}_a [V] \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde operátor natočení

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

² Tato DP řeší pouze první dva zmíněné úkoly elektrizační soustavy (výpočet napěťových a výkonových poměrů a výpočet celkových činných a jalových ztrát)

Uzly reprezentují přípojnicové systémy, zdroje, spotřebiče. Pod pojmem uzel soustavy si lze představit například odběrné místo, rozvodnu, část nadřazené soustavy, elektrárnu. Větve symbolizují vedení, transformátory, případně kompenzační zařízení (tlumivky a kondenzátory).

Hodnoty veličin charakterizujících síť se udávají buď v poměrných jednotkách vztažených na vztažnou hodnotu V_v , nebo v jednotkách pojmenovaných (fyzických). Pro obecnou veličinu tedy platí

$$v = \frac{V}{V_v} [-] \quad (3.2)$$
$$\left(i = \frac{I}{I_v}; u = \frac{U}{U_v}; s = \frac{S}{S_v}; x = \frac{X}{X_v} \right)$$

$$\text{kde } I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3}U_v} [\text{A}],$$

$$X_v = \frac{U_v^2}{S_v} [\Omega].$$

Za vztažnou hodnotu napětí se dosazuje jmenovité sdružené napětí části soustavy, za vztažný výkon pak nejčastěji se vyskytující (běžná) hodnota výkonu v soustavě nebo hodnota, se kterou se dobře počítá, například 100 MVA (kVA).

Zatímco vztažných napětí může být v síti vícero (různé napěťové hladiny), vztažný výkon je volen jen jeden pro celou soustavu.

4 Řešení chodu soustavy

Základním řešením chodu soustavy lze získat napěťové poměry v uzlech sítě a větvové výkonové toky. Dále je možné dopočítat proudové poměry, ztráty a zatížení ve větvích či celkové činné a jalové ztráty v elektrizační soustavě, atd.

Pro složitější síť lze použít metodu smyčkových proudů nebo metodu uzlových napětí. V praxi se osvědčila metoda uzlových napětí, která má jednoduchou přípravu vstupních dat a uzlových rovnic (příčné prvky nezvyšují počet neznámých ani rovnic popisujících procházející větvové proudy). Důležitá je také vlastnost snadné změny sítě (vypínání, zapínání linek vedení) nebo snadné změny převodu u regulačních transformátorů. Pohodlné je také využití výpočetní techniky při řešení sítě. Nicméně všechny tyto způsoby řešení mají své kořeny v Kirchhoffových zákonech pro proud i napětí a v Ohmovu zákonu.

4.1 Modelování uzlů soustavy s využitím metody uzlových napětí

Neznámé v této metodě jsou komplexní uzlová napětí a proudy. Uzlové proudy jsou čistě vstupující (injektované) proudy do sítě v daných uzlech. Proud vstupující má kladnou hodnotu a proud vystupující zápornou. Výsledný injektovaný proud je dán součtem vstupujících a vystupujících proudů. Totéž platí pro uzlové injektované výkony dané vztahem

$$\bar{S} = \bar{P} + j\bar{Q} = \sqrt{3}\bar{U}\bar{I}^* \quad (4.1)$$

Zdánlivý injektovaný výkon je tedy přímo úměrný násobku hodnoty fázoru sdruženého napětí a komplexně sdružené hodnoty proudového fázoru.

Při řešení chodu soustavy se rozlišují tři základní typy uzlů: [5]

- **PQ uzel** (reprezentuje uzel se zátěží; je definován činným a jalovým výkonem P a Q ; dopočítává se napětí U a jeho fázový posun fázoru napětí ϑ),
- **PU (PV) uzel** (tzv. elektrárenský uzel – uzel s připojenou elektrárnou nebo se synchronním kompenzátorem; zadán činným výkonem P a velikostí napětí U ; dopočítává se jalový výkon Q a fázový posun fázoru napětí ϑ),
- **Referenční uzel** (je to „fiktivní“ uzel; jako referenční uzel se vybírá většinou uzel s největším elektrárenským blokem v síti nebo uzel propojující danou soustavu s nadřazenou či zahraniční sítí; je zde definováno U a ϑ (často nulové); pro výpočet je obvykle vybrán pouze jeden referenční uzel).

Z rozdělení uzlů je patrné, že pro řešení musí být uzel definován dvěma veličinami udávajícími typ uzlu a zbylé dvě se dopočítávají. Dále musí být jasná topologie sítě společně s impedancemi (admitancemi) všech jejích prvků (vedení, transformátory, kompenzační prvky) a dolní a horní meze jalových výkonů v generátorech soustavy.

Napěťové a proudové poměry jsou dány základní rovnicí vyplývající z Ohmova zákona:

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \bar{A} \cdot \bar{U}_f \\ \bar{U}_f &= \bar{Z} \cdot \bar{I}\end{aligned}\tag{4.2}$$

kde \bar{I} – sloupcová matice (vektor) injektovaných proudů v uzlech o rozměru $[n,1]$,

\bar{U}_f – sloupcová matice (vektor) fázových napětí v uzlech o rozměru $[n,1]$,

\bar{A} – uzlová admitanční matice o rozměrech $[n,n]$,

\bar{Z} – uzlová impedanční matice o rozměrech $[n,n]$,

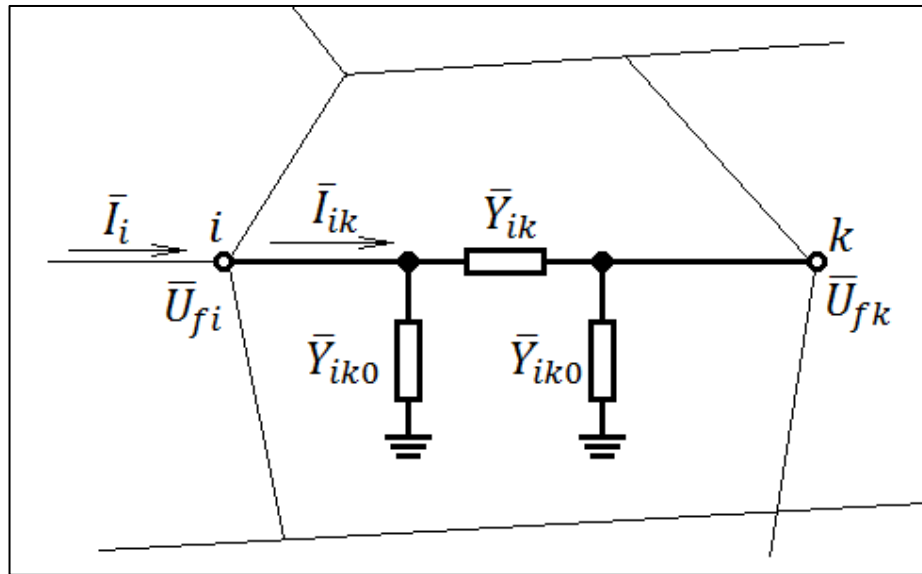
n – počet uzlů soustavy.

I když by se mohlo zdát, že mezi admitanční a impedanční maticí není při výpočtech veliký rozdíl, opak je pravdou.

„Prvky matice \bar{A} jsou obecně komplexní. Jedná-li se o síť, kde $R \ll X$ (VVN), lze reálné členy zanedbat. Potom po vytknutí imaginární jednotky j před maticí jsou diagonální členy reálná čísla záporná a mimodiagonální kladná.“ [6] Admitanční matice je také diagonálně dominantní, tedy že na diagonále jsou řádově vyšší hodnoty než mimo diagonálu. Pokud je provozovaná síť paprsková (mimodiagonální prvky matice pro nepropojené uzly sítě jsou nulové), výsledná matice je řídká a jedná-li se o síť obsahující pouze vedení, výsledná matice je i symetrická. Snadný je i přepočet při změnách konfigurace sítě (viz. kapitola 4.2.1).

Naproti tomu impedanční matice neobsahuje nulové prvky, není tedy diagonálně dominantní, a také není možné zabývat se pouze podmínkou jedné větve. Impedanční matice \bar{Z} je vlastně inverzní admitanční matice. Pokud se tedy změní konfigurace sítě, vždy se musí impedanční matice převést na admitanční, opravit konfiguraci a znovu převést na impedanční. Z tohoto pohledu jasně vyplývá, že admitanční matice je pro řešení chodu sítě vhodnější volbou.

4.2 Odvození admitanční matice



Obrázek 4.1 - Detail větve v ES pro odvození admitanční matice

$$\begin{aligned} \bar{I}_{ik} &= \bar{U}_{fi} \cdot \bar{Y}_{ik0} + (\bar{U}_{fi} - \bar{U}_{fk}) \bar{Y}_{ik} = \bar{U}_{fi} (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \bar{U}_{fk} \cdot \bar{Y}_{ik} \\ \bar{I}_i &= \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \bar{U}_{fk} \cdot \bar{Y}_{ik} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pokud se tyto rovnice srovnají s i řádkem maticového zápisu (4.2), který má následující podobu

$$\bar{I}_i = \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_{f1} + \bar{A}_{i2} \cdot \bar{U}_{f2} + \dots + \bar{A}_{ii} \cdot \bar{U}_{fi} + \dots + \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_{fk} + \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_{fn}, \quad (4.4)$$

lze zjistit, že:

$$\bar{A}_{ii} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) \quad (4.5)$$

$$\bar{A}_{ik} = -\bar{Y}_{ik}$$

4.2.1 Změny matice při změně konfigurace

Vypnutí linky ik :

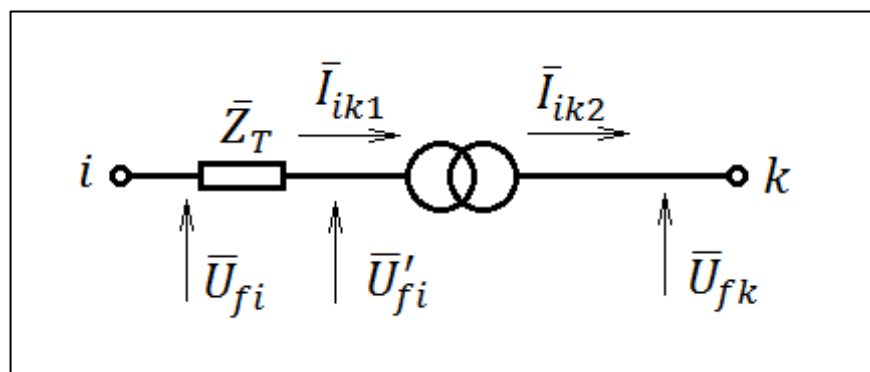
$$\begin{aligned} \bar{A}_{ik_nová} &= 0 \\ \bar{A}_{ii_nová} &= \bar{A}_{ii_původní} - \bar{Y}_{ik0} - \bar{Y}_{ik} \\ \bar{A}_{kk_nová} &= \bar{A}_{kk_původní} - \bar{Y}_{ik0} - \bar{Y}_{ik} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Zapnutí linky ik :

$$\begin{aligned}\bar{A}_{ik_nová} &= -\bar{Y}_{ik} \\ \bar{A}_{ii_nová} &= \bar{A}_{ii_původní} + \bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik} \\ \bar{A}_{kk_nová} &= \bar{A}_{kk_původní} + \bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}\end{aligned}\quad (4.7)$$

4.2.2 Začlenění transformátoru

Řešená soustava může obsahovat transformátory, tedy více napěťových úrovní, a proto pro zjednodušení výpočtu je výhodné přepočítat hodnoty na jednu napěťovou úroveň. Při přepočtech je nutné transformátor rozdělit na dvě části: impedanci (popřípadě admitanci) a ideální transformátor, u kterého je možné tvrdit, že vstupní výkon se rovná výstupnímu výkonu. Níže (Obrázek 4.2) je naznačen takto rozdělený transformátor při zanedbání příčné složky ve větvi mezi uzly i a k .

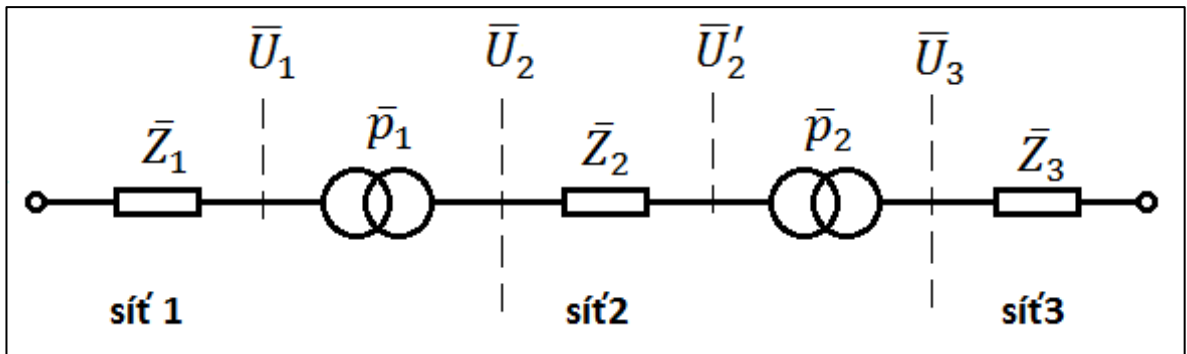


Obrázek 4.2 - Transformátor při zanedbání příčné složky

$$\bar{p} = \frac{\bar{U}'_{fi}}{\bar{U}_{fk}} = \frac{\bar{I}_{ik2}^*}{\bar{I}_{ik1}^*} [-] \quad (4.8)$$

Komplexní převod \bar{p} je označení převodu s hodinovým úhlem. Hodinový úhel je údaj o zapojení trojfázového transformátoru. Udává fázový posun mezi fázorem vstupního a výstupního napětí v hodinách, přičemž úhel 30° představuje jednu hodinu. Nejpoužívanější jsou hodinové úhly 0, 1 a 11, méně používané jsou 5, 6 a 7, nelze provést spojení 3 a 9.

Když do náhradního schématu transformátoru je zahrnuta také jeho impedance (admitance) a uvažuje se stále ideální transformátor (Obrázek 4.3), platí opět rovnost vstupních a výstupních výkonů. [6]



Obrázek 4.3 - Soustava s více napěťovými úrovněmi propojenými přes transformátory

Po přepočtení impedance sítě 2 na úroveň 1, musí platit:

$$\frac{\bar{U}_2^2}{\bar{Z}_2} = \frac{\bar{U}_1^2}{\bar{Z}'_2} \rightarrow \bar{Z}'_2 = \bar{Z}_2 \frac{\bar{U}_1^2}{\bar{U}_2^2} = \bar{Z}_2 \cdot \bar{p}_1^2 [\Omega] \quad (4.9)$$

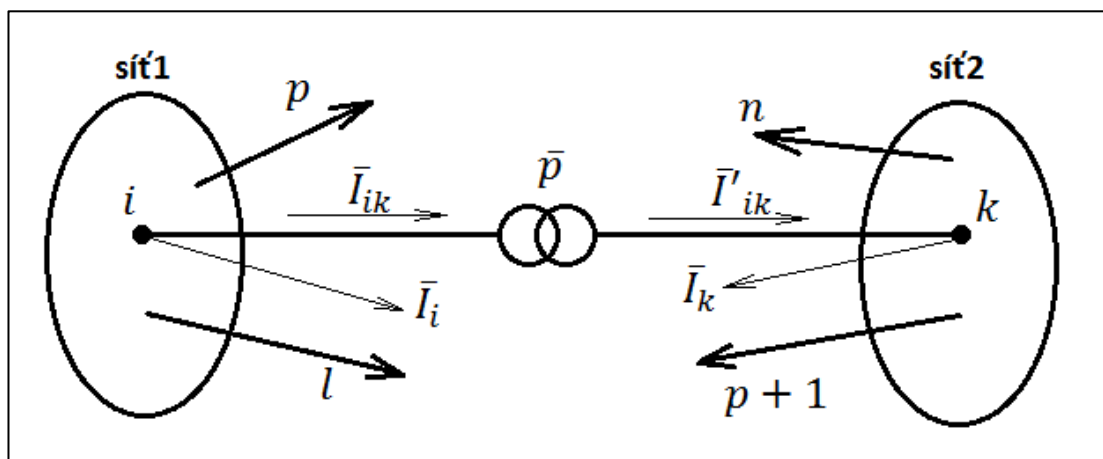
kde $\bar{Z}'_2 [\Omega]$ – impedance sítě 2 převedená na napěťovou úroveň 1,

$\bar{p}_1 [-]$ – převod transformátoru T_1 .

Při převádění impedance přes více transformátorů, převedená impedance se bude násobit příslušnými převody těchto transformátorů.

$$\bar{Z}'_3 = \bar{Z}_3 \cdot \bar{p}_1^2 \cdot \bar{p}_2^2 [\Omega] \quad (4.10)$$

Nutno podotknout, že se používají tři typy převodů: skutečný, jmenovitý a fiktivní. Použití jednotlivých typů závisí na tom, jak přesných výsledků se chce docílit, kdy nejpřesnější je skutečný a pro orientační výsledky je postačující fiktivní převod.

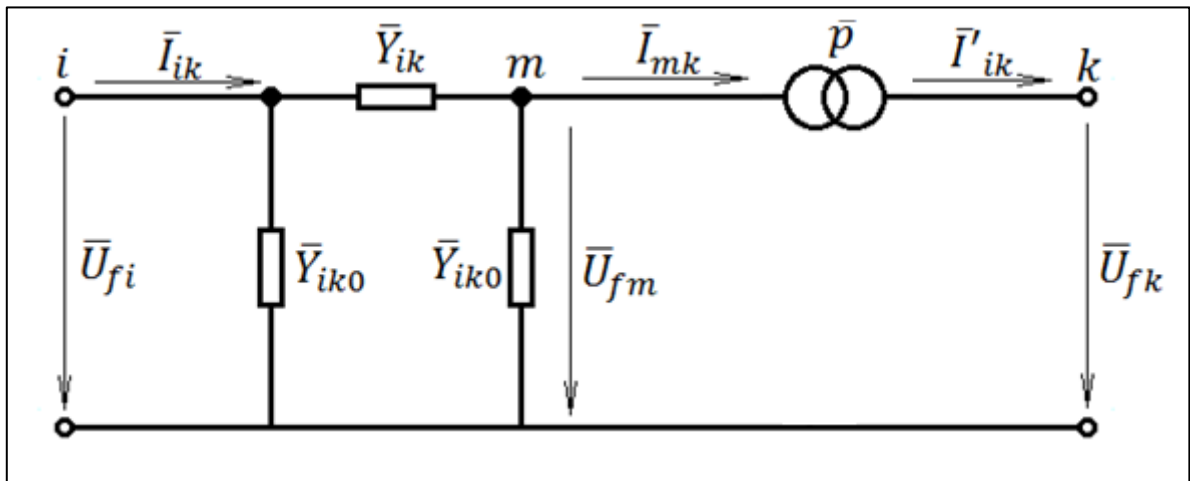


Obrázek 4.4 - Začlenění transformátoru do admitanční matice

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I}_i - \bar{I}_{ik} \\ \vdots \\ \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \cdots & \bar{A}_{1i} & \cdots & \bar{A}_{1p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{i1} & \cdots & \bar{A}_{ii} & \cdots & \bar{A}_{ip} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{p1} & \cdots & \bar{A}_{pi} & \cdots & \bar{A}_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fi} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fp} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{p+1} \\ \vdots \\ \bar{I}_k + \bar{I}'_{ik} \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{p+1,p+1} & \cdots & \bar{A}_{p+1,i} & \cdots & \bar{A}_{p+1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{k,p+1} & \cdots & \bar{A}_{kk} & \cdots & \bar{A}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{n,p+1} & \cdots & \bar{A}_{nk} & \cdots & \bar{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{fp+1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fk} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fn} \end{bmatrix}$$
(4.11)

Při dodržení znaménkové konvence je proud \bar{I}_{ik} , který vytéká z uzlu i , záporný a naopak hodnota proudu \bar{I}'_{ik} vstupujícího do uzlu k je kladná.



Obrázek 4.5 - Náhradní schéma dvouvinutového transformátoru

$$\bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \cdot \bar{Y}_{iko} + (\bar{U}_{fi} - \bar{U}_{fm}) \bar{Y}_{ik} \quad (4.12)$$

$$\bar{p} = \frac{\bar{U}_{fm}}{\bar{U}_{fk}} \rightarrow \bar{U}_{fm} = \bar{p} \cdot \bar{U}_{fk} \quad (4.13)$$

Z těchto rovnic (4.12), (4.13) vyjde, že komplexní hodnota proudu \bar{I}_{ik} tekoucího z uzlu i do uzlu k má následující tvar:

$$\bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \cdot (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{iko}) - \bar{p} \cdot \bar{U}_{fk} \bar{Y}_{ik} \quad (4.14)$$

Při porovnání výkonů na vstupní a výstupní straně ideálního transformátoru (Obrázek 4.5), lze získat komplexní hodnota proudu \bar{I}'_{ik} .

$$\begin{aligned} 3\bar{U}_{fm} \cdot \bar{I}'_{mk} &= 3\bar{U}_{fk} \cdot \bar{I}'_{ik} \\ \bar{p} \cdot \bar{U}_{fk} [(\bar{U}_{fi} - \bar{p}\bar{U}_{fk})\bar{Y}_{ik} - \bar{p}\bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik0}]^* &= \bar{U}_{fk} \cdot \bar{I}'_{ik} \\ \bar{I}'_{ik} &= \bar{p}^* [(\bar{U}_{fi} - \bar{p}\bar{U}_{fk})\bar{Y}_{ik} - \bar{p}\bar{U}_{fk}\bar{Y}_{ik0}] = \bar{p}^*\bar{Y}_{ik}\bar{U}_{fi} - |\bar{p}|^2(\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0})\bar{U}_{fk} \end{aligned} \quad (4.15)$$

V maticovém tvaru je zápis předchozích dvou proudů z rovnic (4.14), (4.15) následující:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}'_{ik} \\ \bar{I}'_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) & -\bar{p}\bar{Y}_{ik} \\ \bar{p}^*\bar{Y}_{ik} & -|\bar{p}|^2(\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_{fi} \\ \bar{U}_{fk} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Z výsledného maticového zápisu je patrné, že začleněním transformátoru do admitanční matice lze ovlivnit jen ty uzly, mezi kterými je transformátor umístěn. To znamená, že každým transformátorem jsou ovlivňovány pouze čtyři prvky v matici \bar{A} . Jestliže je v soustavě zapojen regulovatelný transformátor, je třeba změnit jen tři prvky v admitanční matici při případné změně převodu.

4.2.3 Začlenění kompenzačních prvků

Nejčastěji se do ES zapojují paralelní kondenzátory a induktory. Musí se ale dodržet znaménková konvence, že kondenzátor dodává jalový výkon do uzlu (susceptance je kladná) a induktor odebírá jalový výkon (susceptance je záporná). Kondenzátory se používají pro kompenzaci účinníku NN, VN. Induktory kompenzují kapacitní výkon v sítích VVN. [5]

$$B_{sh} = \frac{Q_c}{U_n^2} \quad (4.17)$$

Update admitanční matice se potom provádí následujícím způsobem:

$$\bar{A}_{ii_nová} = \bar{A}_{ii_původní} + jB_{sh_i} \quad (4.18)$$

5 Numerické metody pro řešení chodu soustavy

Pro řešení ES se používají dvě základní metody. První metoda je Gauss-Seidelova metoda (G-S). Tato metoda urychluje základní Gaussovu metodu, která pro výpočet stavových proměnných v dané iteraci nevyužívala již nově spočtené hodnoty ostatních proměnných. [5] Gaussova metoda tedy aktualizovala všechny neznámé na novou hodnotu až po ukončení celé iterace. Naproti tomu G-S metoda po vypočtení určité neznámé hodnoty, tuto hodnotu používá v té samé iteraci pro výpočet dalších neznámých hodnot, které jsou posléze znovu použity k výpočtu dalších neznámých. Tímto přístup G-S metody konverguje k řešení rychleji než samotný přístup Gaussovy metody.

Druhou metodou je Newton-Raphsonova metoda (N-R), jež používá sofistikovanějšího algoritmu pro snížení počtu iteračních kroků k získání výsledných hodnot komplexního napětí. Snížení počtu iterací je při porovnání těchto dvou metod patrné na první pohled. Zatímco u sítí, které při určité stanovené odchylce mezi dvěma sousedními iteracemi (konvergenční kritérium) mají při řešení G-S metodou tisíce iterací, u N-R metody lze výsledek získat do 20 iterací (většinou méně). Toto rapidní snížení iterací s sebou přináší ale též určitou nejistotu, kdy N-R metoda může v dané soustavě začít divergovat, tedy nebude splněno konvergenční kritérium.

5.1 Gauss-Seidelova metoda

G-S metoda byla aplikována pro řešení chodu soustavy jako první v padesátých letech dvacátého století. Je to výpočtově jednoduchá metoda vhodná pro využití prvních počítačů, ale pouze pro řešení malých soustav, jelikož pro modelování velkých sítí je velice časově náročná. I na dnešních stolních počítačích se nedají modelovat sítě větší než tisíc uzlů, proto se dnes používá především pro velmi vysokou spolehlivost výsledků danou stabilitou numerického výpočtu, kdy se postrádá požadavek na rychlost výpočtu. [5]

Při řešení soustavy se nejprve zvolí referenční uzel podle kritérií v kapitole 4.1. Pro tento uzel se následující základní iterační algoritmus pro výpočet komplexních napětí dané n-uzlové soustavy nevztahuje. Komplexní napětí neboli velikost napětí a fázový posun napětí v referenčním uzlu má stále stejnou hodnotu jako na začátku.

Iterační algoritmus má následující tvar (5.1). [5] Tohoto vztahu se využívá jen pro PQ uzly, kdy je znám jak činný výkon P , tak i výkon jalový Q .

$$\bar{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\bar{A}_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^{(p)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p+1)} - \sum_{k=i+1}^n \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p)} \right] \quad (5.1)$$

Pro „elektrárenské“ uzly je nutné v každé iteraci dopočítávat neznámou hodnotu jalového výkonu Q získanou z následující rovnice: [5]

$$Q_i^{(p)} = \operatorname{Im} \left\{ \bar{U}_i^{(p)*} \left[\sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p+1)} + \sum_{k=i}^n \bar{A}_{ik} \bar{U}_k^{(p)} \right] \right\} = Q_{Gi}^{(p)} + Q_{Li} \quad (5.2)$$

Neboli celkový jalový výkon v i uzlu je roven výsledné bilanci mezi generovaným jalovým výkonem Q_{Gi} a výkonem z tohoto uzlu odebíraným Q_{Li} .

V PU uzlech je důležité mít hodnotu napětí na stálé úrovni (U_{set}), ale během výpočtu se mění velikost jalového výkonu, který slouží k regulaci napětí (jalový výkon je silně závislý na napětí). Aby velikost napětí byla na stálé hodnotě, je nutné pro PU uzly aplikovat takzvaný „scaling process“, který zachovává standardní velikost napětí U a mění pouze úhel napětí ϑ v daném PU uzlu (5.3).

$$\bar{U}_i^{(p)} = \frac{\bar{U}_i^{(p)}}{|\bar{U}_i^{(p)}|} U_{i_set} \quad (5.3)$$

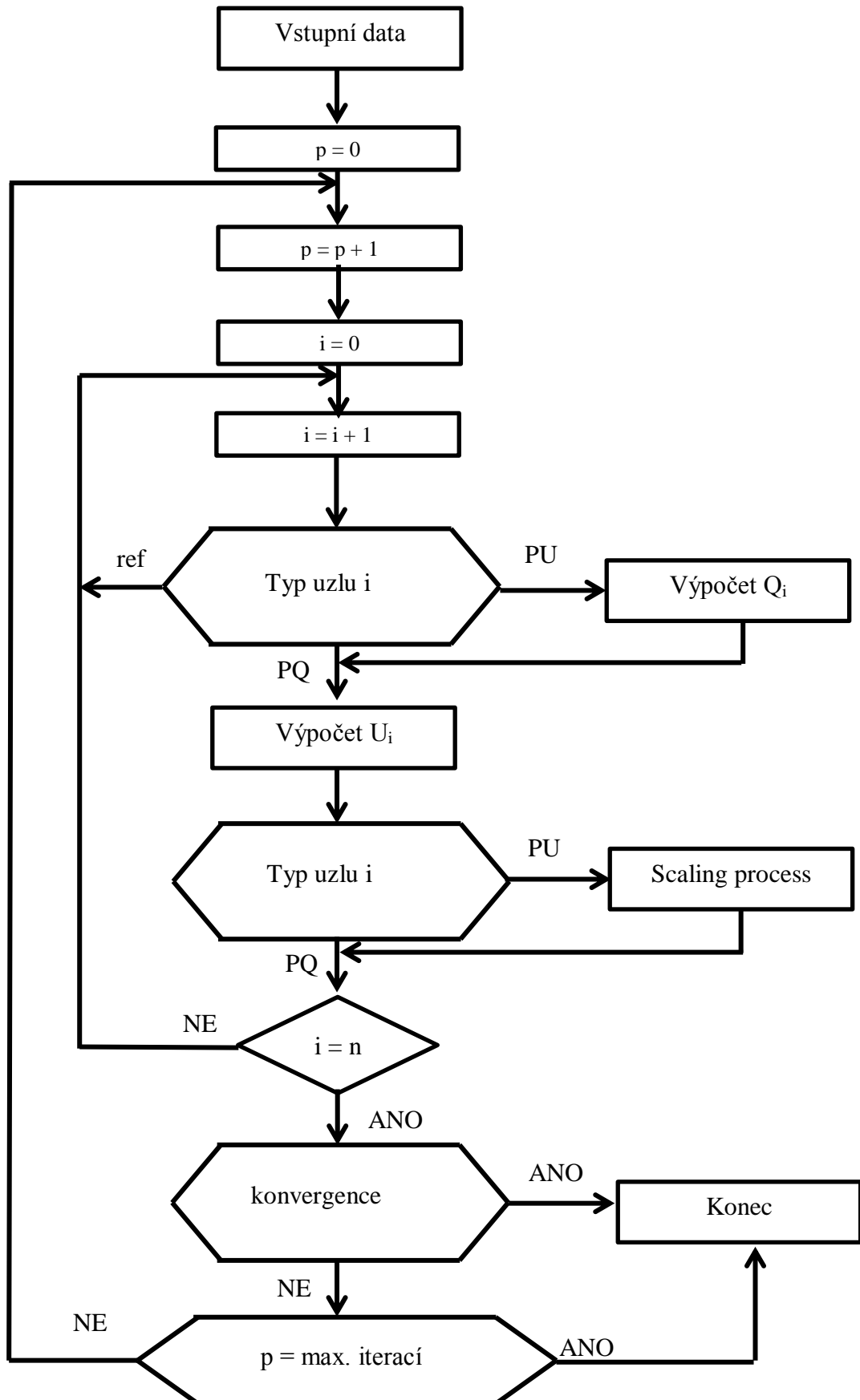
kde U_{i_set} – zvolená startovní hodnota napětí v uzlu i .

Pro samotný program počítající chod soustavy G-S metodou se musí nastavit podmínky, při kterých se dá říci, že daná soustava je vyřešena, nebo naopak se musí nastavit podmínky, které zabrání zacyklení programu v důsledku divergence řešení. Konvergenční kritéria pro napětí jsou tedy následující (5.4) a limitní hodnota odchylky je většinou $\varepsilon \in \langle 10^{-9}; 10^{-6} \rangle$.

$$\max_i \frac{|U_i^{(p+1)} - U_i^{(p)}|}{U_i^{(p)}} \leq \varepsilon \quad (5.4)$$

$$\max_i |\vartheta_i^{(p+1)} - \vartheta_i^{(p)}| \leq \varepsilon$$

V mé diplomové práci volím $\varepsilon = 10^{-8}$ pro G-S i N-R metodu. Proti zacyklení se volí maximální počet iterací, po kterém je výpočet zastaven a je hlášena divergence řešení. U malých sítí a přenosových soustav je počet iterací většinou menší než 15000. Při mém testování distribučních sítí jsem musel zvolit hodnotu maximálního počtu iterací daleko vyšší než 15000 (10^6 – konvenční G-S, 10^5 – akcelerační techniky) z důvodu dokončení konvergence všech sítí, abych mohl porovnávat akcelerační metody s konvenční metodou.



Obrázek 5.1 – Vývojový diagram pro Gauss-Seidelovu metodu

Výhodami G-S metody jsou především stabilita výpočtu daná pomalým (lineárním) přibližováním se k hledanému řešení v jednotlivých iteracích, snadný matematický model neobsahující žádné derivace nebo matice a také nízká doba vztažená pro výpočet jedné iterace, bohužel G-S metoda má silnou závislost počtu iterací na velikosti soustavy a výpočet tak trvá dlouho pro obsáhlé elektrizační soustavy. Jako nedostatek se může jevit i práce s komplexními čísly.

5.2 Newton-Raphsonova metoda

N-R metoda je druhou a složitější metodou pro řešení chodu soustavy. Tato metoda se využívá častěji díky rychlosti výpočtu, avšak z hlediska stability není tak spolehlivá jako G-S metoda. Před samotným výpočtem se stejně jako u G-S metody zvolí referenční uzel, který se při řešení dané soustavy nemění.

Základní iterační algoritmus má potom následující tvar: [7]

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & N^{(p-1)} \\ J^{(p-1)} & L^{(p-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vartheta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ \frac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

kde $\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix}$ - rozdílový vektor (anglicky „mismatch vector“),

$\begin{bmatrix} H^{(p-1)} & N^{(p-1)} \\ J^{(p-1)} & L^{(p-1)} \end{bmatrix}$ - Jacobiho matice neboli jakobián,

$\begin{bmatrix} \Delta \vartheta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ \frac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}} \end{bmatrix}$ - přírůstkový vektor (anglicky „correction vector“).

Počet prvků ΔP v rozdílovém vektoru je dán počtem PU a PQ uzlů a počet prvků v ΔQ je roven počtu PQ uzlů. Jestliže síť má n uzlů, rozdílový vektor má tedy rozměr $[n - \text{ref} + \text{PQ}]$ neboli $[\text{PU} + 2\text{PQ}]$ a prvky tohoto vektoru jsou definovány následujícími vztahy (5.6). [7] Kvůli začlenění jalových mezí v PU uzlech (kapitola 5.3) jsou v programu pro ΔQ začleněny i PU uzly (jejich velikost je rovna nule), a rozměr rozdílového vektoru je $[2n - \text{ref}]$. Tímto zahrnutím PU uzlů do ΔQ se lze vyvarovat případné změně rozměru rozdílového vektoru způsobeného přepnutím PU uzlu na PQ. Mezi prvky ΔQ jsem zahrnul i referenční uzel, protože je potom jednodušší algoritmus pro naplnění Jacobiho matice, kdy uzly, které nejsou typu PQ, se prostě přeskakují (absence jedné proměnné, která by měnila pozici v ΔQ).

$$\begin{aligned}\Delta P_i &= P_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \vartheta_{ik} + B_{ik} \sin \vartheta_{ik}) \\ \Delta Q_i &= Q_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \vartheta_{ik} - B_{ik} \cos \vartheta_{ik})\end{aligned}\tag{5.6}$$

G_{ik} je reálná část prvku na pozici ik v admitanční matici \bar{A} a B_{ik} je naopak imaginární část tohoto prvku. Úhel napětí ϑ_{ik} je roven rozdílu ϑ_i a ϑ_k ($\vartheta_{ik} = \vartheta_i - \vartheta_k$).

Jacobiho matice se skládá ze čtyř submatic \bar{H} , \bar{N} , \bar{J} a \bar{L} , jejichž rozměry mají tyto hodnoty \bar{H} [n-1;n-1], \bar{N} [n-1;PQ], \bar{J} [PQ;n-1] a \bar{L} [PQ;PQ]. Podobný efekt jako u rozdílového vektoru (vzhledem k možnému přepnutí PU uzlu na PQ při začlenění jalových mezí) způsobí změnu rozměrů submatic \bar{N} [n-1;n], \bar{J} [n;n-1] a \bar{L} [n;n]. Submatice \bar{H} zůstane nezměněna a prvek v submatici \bar{L} , kde se kříží řádek referenčního uzlu se sloupcem referenčního uzlu, bude roven jedné kvůli zabezpečení regularity jakobiánu. Prvky submatice \bar{L} budou rovny jedné i u křížení řádků a sloupců v PU uzlech (vždy jen při křížení řádku a sloupce totožného PU uzlu). Jacobiho matice je velmi řídká a silně diagonálně dominantní, což vede k rychlé konvergenci. Prvky jednotlivých submatic se spočtou takto: [7]

$$\begin{aligned}H_{ii} &= -Q_i - B_{ii}U_i^2 \\ H_{ik} &= U_iU_k(G_{ik}\sin\vartheta_{ik} - B_{ik}\cos\vartheta_{ik}) \\ J_{ii} &= P_i - G_{ii}U_i^2 \\ J_{ik} &= -U_iU_k(G_{ik}\cos\vartheta_{ik} + B_{ik}\sin\vartheta_{ik}) \\ N_{ii} &= P_i + G_{ii}U_i^2 \\ N_{ik} &= U_iU_k(G_{ik}\cos\vartheta_{ik} + B_{ik}\sin\vartheta_{ik}) \\ L_{ii} &= Q_i - B_{ii}U_i^2 \\ L_{ik} &= U_iU_k(G_{ik}\sin\vartheta_{ik} - B_{ik}\cos\vartheta_{ik})\end{aligned}\tag{5.7}$$

Podobně jako se v G-S metodě dopočítával jalový výkon Q u PU uzlů, objeví se takováto korekce i zde (5.8). [7]

$$Q_i^{(p-1)} = U_i^{(p-1)} \sum_{k=1}^n U_k^{(p-1)} (G_{ik} \sin \vartheta_{ik}^{(p-1)} - B_{ik} \cos \vartheta_{ik}^{(p-1)}) = Q_{Gi}^{(p-1)} + Q_{Li}\tag{5.8}$$

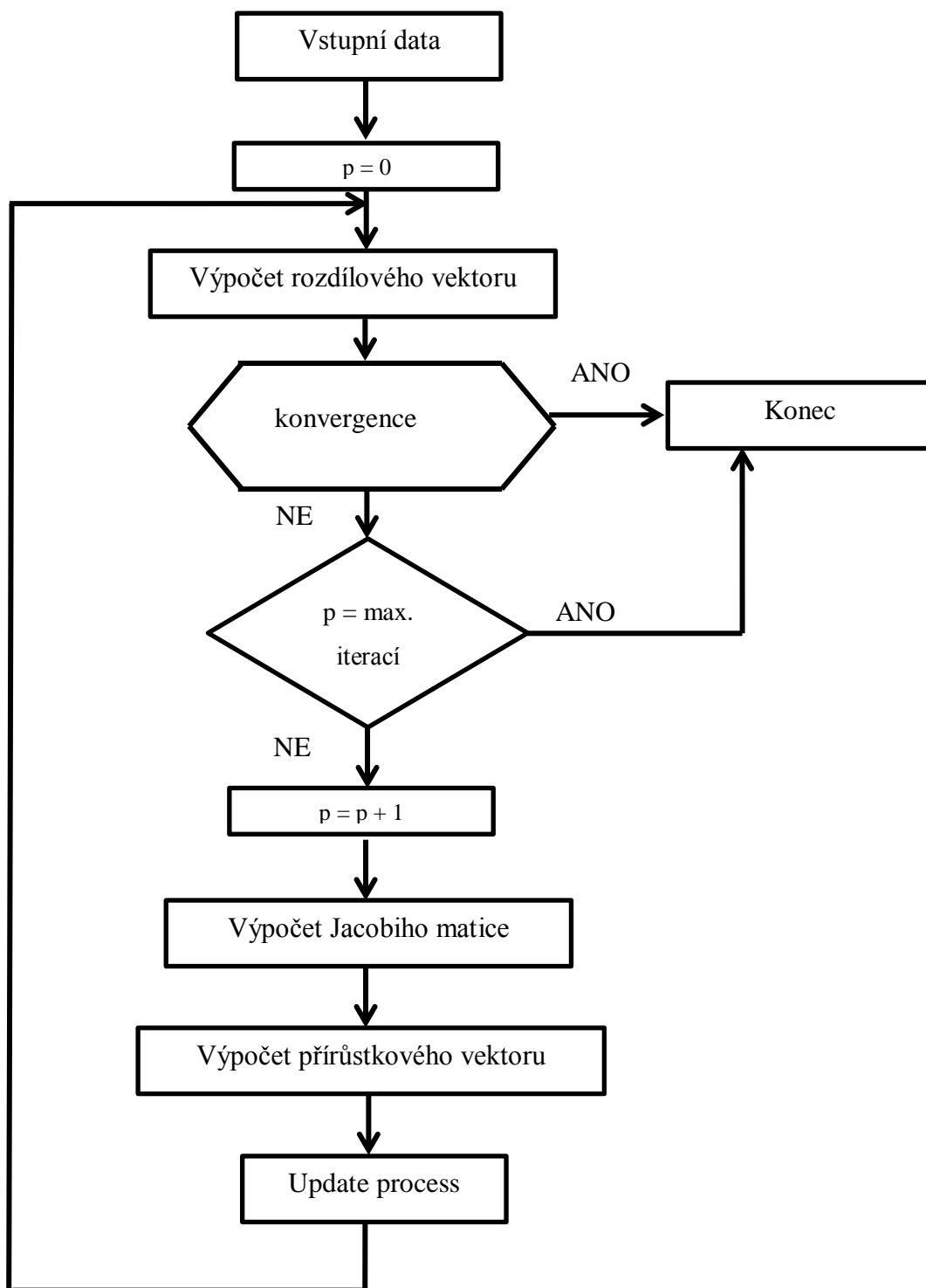
Nyní, jestliže je definován rozdílový vektor a Jacobiho matice, se dopočte přírůstkový vektor, jehož prvky se využijí v aktualizaci velikosti a úhlu počítaných napětí v jednotlivých uzlech („update proces“) (5.9). [7]

$$\begin{aligned}\vartheta_i^{(p)} &= \vartheta_i^{(p-1)} + \Delta\vartheta_i^{(p)} \\ U_i^{(p)} &= U_i^{(p-1)} + \frac{\Delta U_i^{(p)}}{U_i^{(p-1)}} U_i^{(p-1)}\end{aligned}\tag{5.9}$$

Konvergenční kritérium pro vyskočení z nekonečné smyčky programu pro řešení chodu soustavy:

$$\max_i \left| \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \right| \leq \varepsilon\tag{5.10}$$

Odchylka, kterou jsem zvolil, je stejně jako u G-S metody rovna $\varepsilon = 10^{-8}$, ale maximální počet iterací pro N-R je nastaven na 25 iterací, což je hodnota vcelku naddimenzovaná, jelikož nejčastěji se počet iterací pohybuje pod hodnotou 10 iterací. Při testování silně zatížených sítí je třeba pro jistotu hodnotu iterací zvýšit na 35.



Obrázek 5.2 – Vývojový diagram Newton-Raphsonovy metody

Výhodou N-R metody je jednoznačně nízký počet iterací i pro velké sítě (počet iterací se zvyšuje jen lineárně). S tím souvisí také časové nároky, které na výpočet jedné iterace jsou sice vyšší než u G-S metody, ale celkový čas řešení je díky nízkému počtu iterací rozhodně nižší. Delší čas výpočtu jedné iterace je způsoben komplikovanějším matematickým modelem. Časově i výpočtově nejnáročnější část výpočtu Newton-Raphsonovy metody je výpočet inverze Jacobiho matice. Jak je psáno již výše, tato metoda má vysokou nejistotu konvergence, zvláště pak u řídicí propojených sítí, silně zatížených sítí a při špatném odhadu počátečních hodnot napětí. Tato problematika bude rozebrána v kapitole 6.2.

5.3 Začlenění jalových mezí v PU uzlech do G-S a N-R metody

Jak už je z názvu PU uzlů patrné, tak je PU uzel definován činným výkonem a velikostí napětí. K tomu, aby elektrárna udržovala konstantní napětí, se používá primární regulace napětí, která reguluje jalový výkon, jenž je na napětí závislý. Samozřejmě napětí se nedá udržovat nekonečnou regulací jalového výkonu, ale jako každé fyzikální zařízení, je jeho řízení definováno určitými mezemi.

$$Q_{G_min} \leq Q_G \leq Q_{G_max} \quad (5.11)$$

Q_{G_min} a Q_{G_max} jsou příslušné jalové meze (kladné – dodávka, záporné - spotřeba). Jestliže už zařízení není schopno držet jalový výkon v intervalu těchto mezí, je daný PU uzel přepnut na uzel PQ a hodnota jalového výkonu Q se nastaví na hodnotu porušené meze (5.12).

Takto pracuje daná logika v praxi, k tomu, aby se dosáhlo výsledného efektu i v numerickém řešení pomocí G-S a N-R metody, je zapotřebí upravit daný program následujícími logikami. Pro G-S a pro N-R metodu se používá vždy trochu odlišný typ logiky.

Základní logiku lze tedy zapsat následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} & \text{if } Q_{Gi} > Q_{Gi_max} \\ & \quad Q_{Gi} = Q_{Gi_max}; PU \rightarrow PQ; \\ & \text{elseif } Q_{Gi} < Q_{Gi_min} \\ & \quad Q_{Gi} = Q_{Gi_min}; PU \rightarrow PQ; \\ & \text{end} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Tato základní logika je bohužel z hlediska spolehlivosti, že skutečně dojde k přepnutí nejmenšího možného počtu PU uzlů na PQ, nedostatečná, nicméně je možné se s ní setkat hned v řadě publikací ([8], [9], [10], [11]).

V Gauss-Seidelově metodě se používá upravená logika, respektive dvě logiky, které nepřepínají všechny uzly, u kterých byla překročena daná mez, ale jen ten uzel, jenž překročil danou mez nejvíce. Tedy v první logice (5.13) se do proměnné M_i ukládá rozdíl mezi danou jalovou mezí a aktuální hodnotou jalového výkonu v daném uzlu i . Druhá logika (5.14) potom z vektoru \overline{M} vybere maximální překročení dané meze a tento uzel se poté nastalo přepne na PQ. Toto přepnutí vyvolá v další iteraci výraznější změnu napětí a z toho plynoucí zvětšení konvergenční odchylky ε . Aby se dosáhlo pravdivých výsledků a snížil se rostoucí počet iterací začleněním jalových mezí u PU uzlů, není tato logika spouštěna pro každou iteraci výpočtu (jako je zamýšleno v [8]), ale pouze když se konvergence blíží ke své konvergenční odchylce. Tato odchylka musí být citlivě zvolena vzhledem k tomu, že při malé odchylce nemusí program při začlenění jalových mezí vypisovat správné výsledky a naopak příliš konzervativní hodnota odchylky zbytečně zvyšuje počet iterací. Jako správné nastavení se doporučuje zvolit hodnotu odchylky pro začlenění jalových mezí o dva řády vyšší než je konvergenční odchylka ε .

```

if  $Q_{Gi} > Q_{Gi\_max}$ 
     $M_i = Q_{Gi} - Q_{Gi\_max}$ ;
elseif  $Q_{Gi} < Q_{Gi\_min}$ 
     $M_i = Q_{Gi\_min} - Q_{Gi}$ ;

```

(5.13)

```

end
if  $M_i == \max(M) \ \&\& \ Q_{Gi} > Q_{Gi\_max}$ 
     $Q_{Gi} = Q_{Gi\_max}; \ PU \rightarrow PQ$ ;
elseif  $M_i == \max(M) \ \&\& \ Q_{Gi} < Q_{Gi\_min}$ 
     $Q_{Gi} = Q_{Gi\_min}; \ PU \rightarrow PQ$ ;
end

```

(5.14)

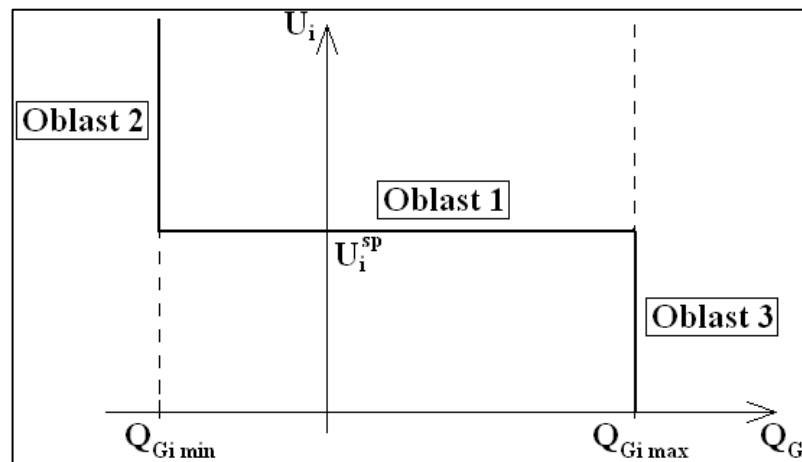
V N-R metodě se používá kombinace užívající základní logiku (5.12) pro začlenění jalových mezí spolupracující s další tzv. zpětnou logikou (5.15), a je tak mnohem pružnější (např. publikace [12], [13]). Program pak funguje tak, že v každé iteraci se aktivuje logika (5.12), která změní všechny uzly překračující danou mez z typu PU na typ PQ. Zpětná logika následně navrací některé přepnuté uzly zpět na typ PU.

```

if  $typ_{i1} == PQ \ \&\& \ typ_{i0} == PU$ 
    if  $(Q_{Gi} = Q_{Gi\_max} \ \&\& \ U_i > U_i^{sp}) \ || \ (Q_{Gi} = Q_{Gi\_min} \ \&\& \ U_i < U_i^{sp})$ 
         $U_i = U_i^{sp}; PQ \rightarrow PU;$ 
    end
end

```

kde typ_{i1} - typ uzlu i v aktuální iteraci,
 typ_{i0} - typ uzlu i na začátku simulace,
 U_i^{sp} - hodnota napětí na začátku simulace pro i uzel.



Obrázek 5.3 - Provozní oblasti pro PU uzly s jalovými mezemi

Podle obrázku tedy může nastat pro daný uzel i pět možností. Jestliže je jalový výkon uvnitř svých jalových mezí, je hodnota napětí rovna U_i^{sp} a jedná se o uzel PU (Oblast 1). Pokud by jalový výkon překročil svou horní mez Q_{Gi_max} , ale napětí by mělo hodnotu vyšší než U_i^{sp} , tak při přepnutí PU uzlu na PQ se se snížením hodnoty napětí U_i na hodnotu U_i^{sp} sníží i velikost jalového výkonu. Proto zde bude použito zpětné logiky k navrácení na typ PU. Obdobně je tomu tak při překročení dolní meze. Pro oblast 3 (respektive oblast 2) se neuplatní zpětná logika, protože při překročení horní meze a následnému zvýšení napětí na hodnotu U_i^{sp} se zvýší i hodnota jalového výkonu (hodnota jaloviny je i před tím vyšší než Q_{Gi_max}), a uzel zůstane přepnut na typ PQ.

6 Optimalizace konvenčních numerických metod

Tato kapitola se bude zabývat optimalizačními technikami pro řešení chodu soustavy pomocí numerických metod. Následující optimalizační techniky, které budou zakomponované do dvou základních metod pro řešení chodu soustavy (Gauss-Seidelova a Newton-Raphsonova metoda), vylepšují samotný průběh těchto metod a napravují tak alespoň z části jejich negativa, která vyplývají ze způsobu, jakým jsou konstruovány.

V případě G-S metody se jedná o příliš velký počet iterací. S tímto problémem se potýká G-S metoda hlavně při řešení soustav o velkém počtu uzlů nebo distribučních sítí, pro které je tato metoda prakticky nepoužitelná. Vzhledem k účelu těchto technik se nazývají technikami akceleračními. V této kapitole zmíním některé možnosti, jakými lze snadno a bez zbytečně složitých úprav výpočetního programu dosáhnout snížení velkého počtu iterací. V některých případech akceleračních technik se jedná i o snížení více jak 80 procentní a urychlení konvergence je vzhledem k vysokému počtu iterací při řešení takovéto soustavy skutečně znát. Bohužel zde ve všech případech neplatí přímá úměra mezi snižováním počtu iterací a celkovou dobou výpočtu, popřípadě průměrnou dobou pro výpočet jedné iterace.

Na rozdíl od počtu iterací u G-S metody, má N-R metoda už ve své základní podobě velice nízký počet iterací, který je ovšem vykoupen možnými problémy při řešení chodu soustavy. Tyto metody mají tedy za úkol rozšířit oblast numerické stability Newton-Raphsonovy metody, proto se nazývají stabilizačními metodami. Použití těchto stabilizačních technik se projeví především u soustav silně zatížených či slabě propojených.

Výsledky, kterých při optimalizaci docílím, budou podrobně popsány v kapitole 8.

6.1 Akcelerační techniky využívané u Gauss-Seidelovy metody

V tomto odstavci bude vypsáno několik akceleračních metod (Tabulka 6.1) pro optimalizaci Gauss-Seidelovy iterační metody. Budou zde popsány metody, které se už v praxi osvědčily, i metody, které určitým způsobem z těchto metod vyplývají a které jsou tak mým přínosem v problematice řešení chodu soustavy numerickými metodami.

Metoda	Popis
acc1	Využití akceleračního koeficientu
acc2	Využití akceleračního nebo retardačního koeficientu
acc3_0	Obdoba acc2, zvolení typu koeficientu na základě velikosti odchylky
acc3_1	Spočtení proměnného koeficientu s využitím 2 mocninných funkcí
acc3_2	Spočtení prom. koeficientu pro U a ϑ s využitím jedné mocninné funkce
acc3_3	Spočtení společného prom. koeficientu s využitím 1 mocninné funkce

Tabulka 6.1 – Seznam testovaných akceleračních metod

6.1.1 Použití akceleračního koeficientu α (acc1)

První nejjednodušší optimalizační technika v sobě zahrnuje akcelerační koeficient α , který násobí rozdíl komplexních napětí v po sobě jdoucích iteracích (6.1). Tato metoda se v zahraniční literatuře nazývá SOR (Successive Over-Relaxation method) a je používána pro PU a PQ uzly.

$$\bar{U}_{i_acc}^{(p)} = \bar{U}_i^{(p-1)} + \alpha(\bar{U}_i^{(p)} - \bar{U}_i^{(p-1)}) \quad (6.1)$$

Jediným problémem této metody je zvolení vhodného koeficientu. Akcelerační koeficient α se volí mezi hraničními body 1 a 2, $\alpha \in \langle 1; 2 \rangle$. Při zvolení $\alpha = 1$, lze z výše uvedené rovnice (6.1) usoudit, že se jedná o klasickou Gauss-Seidelovu metodu bez žádného akceleračního koeficientu. Jestliže naopak koeficient $\alpha = 2$, G-S iterační algoritmus bude vždy divergovat. Z tohoto lze vyvozovat, že čím větší koeficient α se používá, tím více se výpočet může chovat divergentně. Tato fakta lze aplikovat obecně na každou n-uzlovou soustavu, ale pro konkrétní soustavu platí jiný optimální akcelerační koeficient a tento koeficient už nelze nijak lépe specifikovat (například neexistuje žádná vazba mezi optimálním koeficientem α a počtem uzlů v soustavě). V literaturách [11], [12] se obvykle akcelerační koeficient volí mezi hodnotami 1,3 a 1,7. Lze tedy prosazovat konzervativní přístup k řešení dané obecné soustavy a volit tak menší akcelerační koeficient nebo při řešení známých soustav volit pro každou soustavu jejich optimální akcelerační koeficient a využít tak potenciálu této metody naplno. Při simulaci v mé diplomové práci jsem zvolil akcelerační koeficient $\alpha = 1,71$.

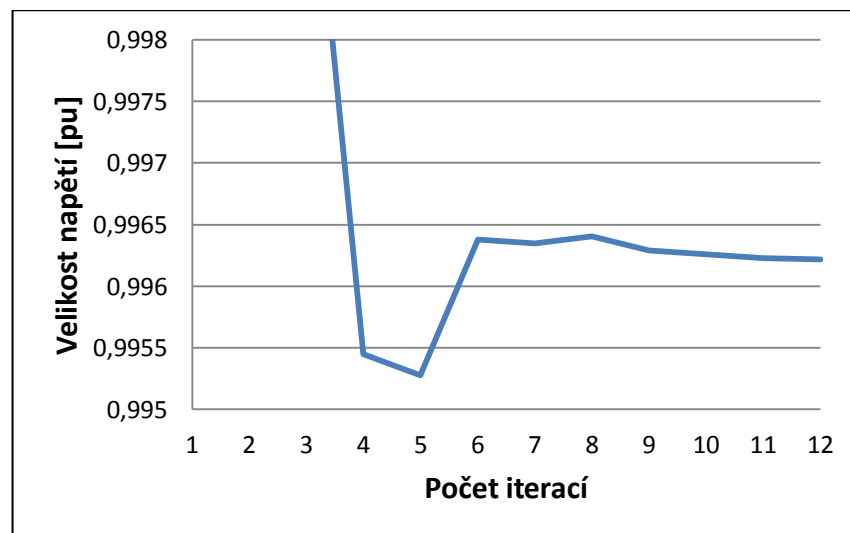
6.1.2 Použití akceleračního nebo zpomalovacího koeficientu m (acc2)

Tato logika navazuje na předešlou metodu, ale je sofistikovanější v tom, že ne vždy je dobré využívat jen akcelerační koeficient; pokud hodnoty počítaného napětí oscilují kolem nějaké hodnoty (většinou výsledné) a nemají tak klesající nebo rostoucí charakter, je místo akceleračního koeficientu použit koeficient zpomalovací ke změlnění skoků napětí mezi iteracemi. Zpomalovací nebo také retardační koeficient má velikost nižší než jedna a použití akceleračního nebo zpomalovacího koeficientu se týká PU i PQ uzlů.

Algoritmus pro zavedení této metody a logika pro výběr typu koeficientu je následující: [14]

$$\begin{aligned}
 & \text{if } (U_i^{(p+1)} - U_i^{(p)}) \cdot (U_i^{(p)} - U_i^{(p-1)}) \geq 0 \\
 & \quad m_{i1} > 1,00 \text{ (akcelpace);} \\
 & \text{else} \\
 & \quad m_{i1} < 1,00 \text{ (retardace);} \\
 & \text{end} \\
 & \text{if } (g_i^{(p+1)} - g_i^{(p)}) (g_i^{(p)} - g_i^{(p-1)}) \geq 0 \\
 & \quad m_{i2} > 1,00 \text{ (akcelpace);} \\
 & \text{else} \\
 & \quad m_{i2} < 1,00 \text{ (retardace);} \\
 & \text{end}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Zde je ještě tato logika rozdělena na dvě části, kde první porovnává hodnoty velikosti napětí a druhá porovnává úhel napětí. Výsledné koeficienty m_1 a m_2 pak mohou v rámci jednoho uzlu ve stejné iteraci mít rozdílnou velikost. Koeficient m je také odlišný pro každý uzel soustavy. Tento koeficient se tedy mění nejen každou iteraci, ale v rámci jedné iterace může mít v každém uzlu rozdílnou hodnotu a navíc v rámci uzlu se dělí na koeficient m_1 , který mění velikost napětí, a koeficient m_2 pro změnu úhlu napětí.



Graf 6.1 - Hodnoty napětí v jednotlivých iteracích

Jestliže je například průběh velikosti napětí takovýto (Graf 6.1), bude koeficient v páté ($p+1=5$) iteraci větší než jedna (akcelerační koeficient), protože v předchozích dvou iteracích jsou hodnoty vždy větší než hodnota následná. Zato v šesté iteraci bude použit zpomalovací koeficient, jelikož pátá iterace je menší než iterace čtvrtá a také menší než šestá (nemá klesající ani rostoucí charakter). Obdobně by tomu bylo i u závislosti úhlu napětí

v jednotlivých iteracích. Nutno podotknout, že spuštění této logiky se provádí až ve třetí iteraci, kdy už jsou spočtené předchozí dvě hodnoty a lze tak porovnávat tyto tři hodnoty mezi sebou. Nevýhoda je, že ukládání dvou předešlých hodnot zvyšuje nároky na využívanou paměť počítače.

6.1.3 Použití proměnného akceleračního nebo zpomalovacího koeficientu (acc3)

Cílem této metody bylo vytvořit takový algoritmus, který by byl závislý na tom, jak se vyvíjí odchylka konvergenčního kritéria. To znamená, že čím větší odchylka by byla, tím menším koeficientem by se násobilo. V praxi to tedy funguje tak, že když jsou dvě hodnoty jednoho napětí v po sobě jdoucích iteracích značně odlišné a mají tedy velký rozdíl, využije se koeficientu zpomalovacího charakteru (menší než jedna), jestliže ale tento rozdíl bude nepatrný, je možné výpočet urychlit koeficientem akceleračního charakteru.

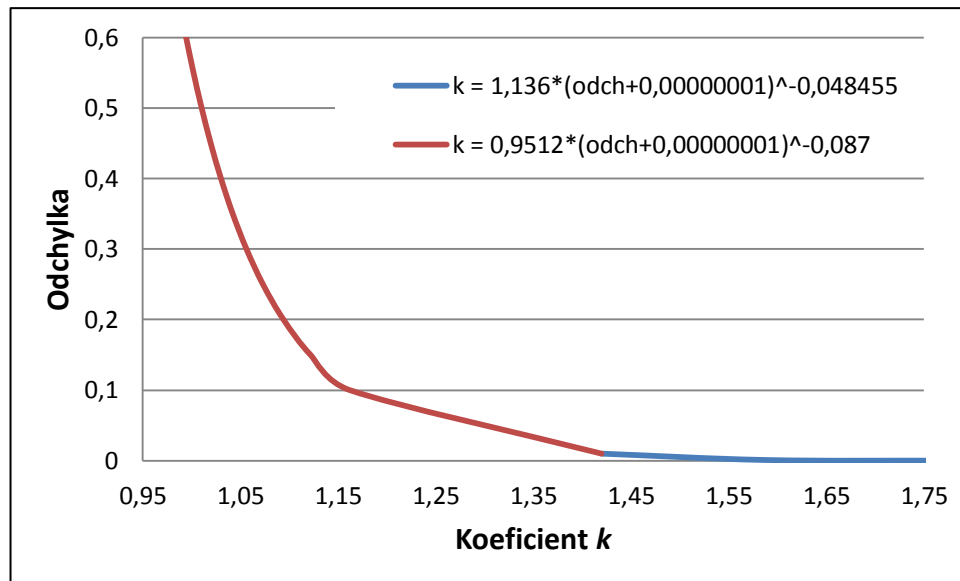
Řešení této metody jsem si rozdělil do několika submetod. První typ (6.3) je podobný metodě s akceleračním a zpomalovacím koeficientem (acc2). Jedná se o akcelerační techniku pod zkratkou acc3_0. Zde jsem si zvolil jednu mez, která rozděluje velikost odchylky na dva intervaly. První interval od nuly do 0,05, kde koeficient $k = 1,75$. Druhý interval je větší než 0,05 a koeficient je zde $k = 0,98$. Tato metoda se používá pro PQ i PU uzly a koeficient není rozdělen pro úhel napětí a velikost napětí.

```
if odch $U_i > 0,05$  // odch $\vartheta_i > 0,05$ 
     $k_i = 0,98;$ 
else
     $k_i = 1,75;$ 
end
```

(6.3)

Druhým typem je proložení závislosti velikosti odchylky na dané funkci (v tomto případě mocninné), která bude vypočítávat koeficient k přímo z velikosti příslušné odchylky. Jako první jsem vytvořil funkci složenou ze dvou mocninných funkcí (první kopíruje hodnoty odchylky nad 0,01 a druhá pod 0,01), viz rovnice (6.4). Označení této metody je acc3_1. Složená mocninná funkce má následující tvar zápisu:

$$k = \begin{cases} 1,136 \cdot (\text{odch} + 10^{-8})^{-0,048455}; & \text{if } \text{odch} \leq 0,01 \\ 0,9512 \cdot (\text{odch} + 10^{-8})^{-0,087}; & \text{if } \text{odch} > 0,01 \end{cases} \quad (6.4)$$



Graf 6.2 – Závislost koeficientu k na odchylce (acc3_1)

if $odchU_i \leq 0,01 \parallel odch\vartheta_i \leq 0,01$

$$k_i = 1,136 \cdot (odch_i + 0,00000001)^{-0,048455};$$

if $k_i > k_{max}$

$$k_i = k_{max};$$

elseif $k_i < k_{min}$

$$k_i = k_{min};$$

end

else

$$k_i = 0,9512 \cdot (odch_i + 0,00000001)^{-0,087};$$

if $k_i > k_{max}$

$$k_i = k_{max};$$

elseif $k_i < k_{min}$

$$k_i = k_{min};$$

end

end

kde $k_{min} = 0,98$ a $k_{max} = 1,75$,

odch – vyšší hodnota z *odchU* a *odch ϑ* .

(6.5)

Použití těchto hraničních bodů k_{min} a k_{max} je z důvodu zvýšení pravděpodobnosti konvergence této metody.

Další možností je použití pouze samostatné mocninné funkce (pod názvem acc3_3):

$$k = 0,95 \cdot odch^{-0,045} \quad (6.6)$$

if $odchU_i = 0 \parallel odch\vartheta_i = 0$

$$k_i = k_{max};$$

else

$$k_i = 0,95 \cdot odch_i^{-0,045};$$

if $k_i > k_{max}$

$$k_i = k_{max};$$

elseif $k_i < k_{min}$

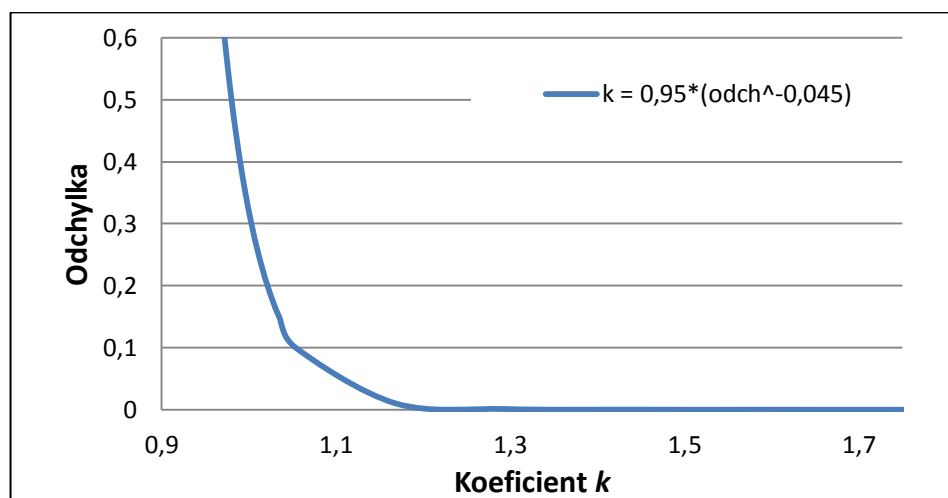
$$k_i = k_{min};$$

end

end

(6.7)

Pozn.: příkaz *if* $odchU = 0 \parallel odch\vartheta = 0$ je použit z důvodu vyvarování se matematické chybě při umocňování nulového základu záporným mocnitelem.



Graf 6.3 – Závislost koeficientu k (acc3_2, acc3_3)

Třetím typem je použití funkce (6.6) odděleně pro odchylku velikosti napětí a úhlu napětí (s názvem `acc3_2`).

```
if odchUi == 0
    ki1 = kmax;
else
    ki1 = 0,95·odchUi-0,045;
    if ki1 > kmax
        ki1 = kmax;
    elseif ki1 < kmin
        ki1 = kmin;
    end
end
if odchθi == 0
    ki2 = kmax;
else
    ki2 = 0,95·odchθi-0,045;
    if ki2 > kmax
        ki2 = kmax;
    elseif ki2 < kmin
        ki2 = kmin;
    end
end
```

(6.8)

6.2 Stabilizace Newton-Raphsonovy metody

Newton-Raphsonovu metodu, jakožto novější a důmyslnější, nemá smysl již dále akcelarovat, jelikož počet iterací k získání výsledných komplexních hodnot napětí většinou nepřesahuje hodnotu 25 iterací. Problémem této metody je vlastně její „rychlost“ konvergence. Zatímco G-S metoda se k výsledku blížila lineárně, N-R metoda využívá k výpočtu kvadratický přístup, který při určitých podmínkách může dokonvergovat buď k nesprávným kořenům soustavy nelineárních rovnic, nebo dokonce začne divergovat. Toto se většinou stává u silně zatížených a slabě propojených soustav nebo při špatně zvolených startovních hodnotách napětí.

Opatření, která by měla zabránit divergenci, se tedy mohou rozdělit na dva typy:

- získání vhodně zvolených startovních komplexních hodnot napětí,
- při update procesu použít jen částečnou aktualizaci přírůstkového vektoru.

Existují také ale další metody stabilizace N-R. Například Fast-Decoupled metoda, která zjednodušuje výpočet výsledných hodnot napětí tím, že záměrně zanedbává závislost mezi činným výkonem a napětím či závislost mezi jalovým výkonem a úhlem napětí (6.9).

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & 0 \\ 0 & L^{(p-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ U^{(p-1)} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Metoda	Popis
stb1	Zpřesnění startovních hodnot napětí užitím G-S (OSGS)
stb2	Použití konstantních koeficientů pro částečný update
stb3	Kombinace stb1 a stb2
stb4_0	Použití proměnného koeficientu vypočteného pomocí lineární funkce
stb4_1	Použití proměnného koeficientu vypočteného z funkce signum
stb5	Zpřesnění startovních hodnot napětí užitím metody DC Load Flow (OSDC)
stb5_0	Kombinace stb4_0 a stb5
stb5_1	Kombinace stb4_1 a stb5
stb6	Zpřesnění start. hodnot napětí vypočtením 1 iterace Fast-Decoupled m. (OSFD)
stb6_0	Kombinace stb4_0 a stb6
stb6_1	Kombinace stb4_1 a stb6

Tabulka 6.2 – Seznam testovaných stabilizačních metod

6.2.1 Zpřesnění startovních hodnot pomocí G-S metody (stb1)

Při řešení chodu soustavy se obvykle jako startovní hodnota napětí v každém uzlu soustavy zadává $U_{set} = 1,00$ [pu] a úhel napětí je nulový, $\vartheta_{set} = 0$ [rad]. Ve většině případů takovéto startovní podmínky nebrání ke konvergenci řešení. Nicméně pro určité typy sítí (slabě propojené a silně zatížené) mohou vést tyto hodnoty k nespolehlivému výpočtu. Proto se využívá G-S metody pro zpřesnění těchto startovních hodnot. Tato technika je v angličtině nazývána jako One-Shot Gauss-Seidel (OSGS).

Celý program tedy funguje tak, že před samotným N-R algoritmem se použije výpočet několika iterací pomocí G-S metody, která nastaví startovní hodnoty mnohem blíže fyzickému řešení a tyto hodnoty jsou posléze načítány samotným N-R algoritmem. Záleží jen na tom, jak přesné hodnoty se chce dosáhnout. Pro rychlejší průběh výpočtu G-S lze zvolit menší počet iterací, které ovšem nemusí ve všech případech stačit pro dostatečné zpřesnění

startovních hodnot a celé řešení může nakonec opět divergovat.

V mém algoritmu jsem zvolil 40 iterací pro výpočet startovních hodnot metodou One-Shot Gauss-Seidel.

6.2.2 Zpřesnění startovních hodnot pomocí F-D metody (stb6)

F-D metoda využívá silné závislosti mezi činným výkonem a úhlem napětí a mezi jalovým výkonem a velikostí napětí. Závislosti mezi činným výkonem a velikostí napětí a mezi jalovým výkonem a úhlem napětí již nejsou tak významné. Ostatně tyto závislosti jsou patrné už i v Newton-Raphsonově metodě, kdy kolem diagonály jsou řádově vyšší čísla. Fast-Decoupled metoda využívá tedy toho, že nevýznamné závislosti (P na U , Q na ϑ) lze úplně zanedbat. Proto tedy submatice \bar{N} a \bar{J} v Jacobiho matici lze nahradit nulou (6.9) a celou tuto soustavu rovnic lze rozdělit na dvě části (z anglického decoupled = oddělit). To, že submatice \bar{N} a \bar{J} mají malé hodnoty prvků, je dáno malým úhlovým posunutím ϑ_{ij} ($\vartheta_i - \vartheta_j$) a malým poměrem R/X (primárně u přenosových soustav). Už samotné rozdělení má za následek rychlejší výpočet (hlavně u velmi rozsáhlých soustav), jelikož jsou řešeny dvě menší (poloviční) soustavy rovnic. [15]

Pro další zrychlení numerického procesu lze použít ještě dalších zjednodušení vyplývajících z porovnávání pasivních prvků soustavy. Jak bylo napsáno výše, velikost úhlového posunutí ϑ_{ij} je většinou blízko nuly a tak lze goniometrickou funkci $\sin\vartheta_{ij}$ nahradit nulou a funkci $\cos\vartheta_{ij}$ lze nahradit jedničkou. U přenosových elektrizačních sítí lze také zanedbat hodnoty G_{ik} oproti B_{ik} a také při porovnání B_{ii} je hodnota Q_i zanedbatelná. Tato zanedbání samozřejmě platí jen v poměrných jednotkách. Proto lze prvky submatice \bar{H} a \bar{L} vypočítat podle následujících vztahů:

$$\begin{aligned} H_{ii} &= L_{ii} = -B_{ii}U_{ii}^2 \\ H_{ik} &= L_{ik} = -B_{ik}U_iU_k \end{aligned} \tag{6.10}$$

Fundamentální zápis pro Fast-Decoupled algoritmus je tedy následující:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\Delta P^{(p-1)}}{U^{(p-1)}} \right] &= \left[B_1^{(p-1)} \right] [\Delta \vartheta^{(p)}] \\ \left[\frac{\Delta Q^{(p-1)}}{U^{(p-1)}} \right] &= \left[B_2^{(p-1)} \right] [\Delta U^{(p)}] \end{aligned} \tag{6.11}$$

Matice $\overline{B_{1,2}}$ vznikly zjednodušením (6.10) submatic \overline{H} a \overline{L} Jacobiho matice. Rozdílové vektory ΔP a ΔQ se počítají stejným způsobem jako v případě N-R, tedy bez žádného zjednodušení a zanedbávání (5.6).

Výsledné zpřesněné startovní hodnoty jsou získány vyřešením rovnic F-D algoritmu (6.11). Jelikož v této metodě používám metodu F-D jen pro zpřesnění startovních hodnot komplexního napětí, je použita jen jedna iterace této metody.

6.2.3 Zpřesnění startovních hodnot pomocí metody DC Load Flow (stb5)

Poslední metodou zaměřenou čistě na zlepšení odhadu startovních hodnot napětí je metoda DC Load Flow. Ve skutečnosti tato metoda nemá nic společného se stejnosměrnými (DC) soustavami. Název této metody je pravděpodobně odvozen od podobnosti mezi touto metodou řešení a metodami používanými k řešení stejnosměrných obvodů, které jsou také lineární, neiterační a absolutně konvergentní. DC Load Flow je metoda, která odhaduje tok výkonů ve větvích střídavých elektrizačních soustav. Přesné řešení výkonových toků ve střídavých elektrizačních soustavách je nelineární problém, který vyžaduje iterační přístup a u kterého není žádná záruka dosažení konvergentnosti řešení.

DC Load Flow používá zjednodušenou, lineární formu modelování střídavé ES. Následně jeho řešení je neiterační (má pouze 1 iteraci), a proto je vždy konvergentní. Stává se tak rutinním algebraickým problémem řešícím soustavu n rovnic o n neznámých. Výsledek této metody je již ze své podstaty méně přesný než iterační algoritmy, ale je užitečný všude tam, kde je zapotřebí rychlé a spolehlivé řešení, u kterého je přijatelné přibližné řešení, což se hodí pro lepší odhad startovních hodnot pro N-R metodu.

Tato metoda obsahuje podobná zjednodušení, jaká jsou brána v úvahu u Fast-Decoupled metody. [15]

$$x_{ik} \gg r_{ik} \rightarrow g_{ik} = \frac{r_{ik}}{r_{ik}^2 + x_{ik}^2} \approx 0 \wedge b_{ik} = -\frac{x_{ik}}{r_{ik}^2 + x_{ik}^2} = \frac{-1}{x_{ik}} \quad (6.12)$$

$$\vartheta_{ik} \approx 0 \rightarrow \cos\vartheta_{ik} \approx 1 \wedge \sin\vartheta_{ik} \approx \vartheta_i - \vartheta_k \quad (6.13)$$

Navíc jsou všechna napětí brána jako jednotková.

$$u_i = u_k = 1,00 \text{ [pu]} \quad (6.14)$$

Při zahrnutí těchto zjednodušení, potom pro činný tok ve vedení a pro výsledný činný výkon v uzlu platí následující vztahy (6.15).

$$p_{ik} \approx \frac{1}{x_{ik}} (\vartheta_i - \vartheta_k)$$

$$p_i \approx \sum_k \frac{1}{x_{ik}} (\vartheta_i - \vartheta_k)$$
(6.15)

Indexem k se nahrazují všechny uzly, které jsou přímo spojeny s uzlem i .

Algoritmus pro výpočet DC Load Flow v maticové formě má následující zápis:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = [B_x] \begin{bmatrix} \vartheta_2 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{bmatrix}$$
(6.16)

kde $B_{x,ii} = \sum_j \frac{1}{x_{ij}}$ - prvek matice $\overline{B_x}$ na diagonále,

$B_{x,ij} = \sum_j -\frac{1}{x_{ij}}$ - prvek matice $\overline{B_x}$ mimo diagonálu.

Ze soustavy rovnic se musí vyjmout referenční uzel, aby byla matice $\overline{B_x}$ regulární a mohla se tak invertovat; jestliže se v rovnici (6.16) začíná až indexem 2, znamená to, že referenční uzel má index 1. Také pro všechny prvky matice $\overline{B_x}$ platí, že každý prvek, u kterého index i nebo j značí referenční uzel, má automaticky nulovou hodnotu.

Z výchozího algoritmu je patrné, že tato metoda zpřesňuje jen úhly napětí startovních hodnot, kdežto velikosti napětí jsou nezměněny.

6.2.4 Použití fixních koeficientů pro částečnou aktualizaci (stb2)

Druhým typem stabilizace N-R metody je použití koeficientů, které v update procesu při aktualizaci velikostí napětí a jejich úhlových hodnot „zmírní“ plnou aktualizaci na částečnou a tak zpomalí kvadratickou rychlost přibližování se k výsledku (6.17). Tato metoda se v anglické literatuře nazývá State Update Truncation (SUT).

$$\vartheta_i^{(p)} = \vartheta_i^{(p-1)} + k_1 \cdot \Delta\vartheta_i^{(p)}$$

$$U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + k_2 \cdot \frac{\Delta U_i^{(p)}}{U_i^{(p-1)}} U_i^{(p-1)}$$
(6.17)

Jestliže koeficienty $k_{1,2}$ mají hodnotu rovnou 1, je patrné, že se jedná o klasický update proces s plnou aktualizací komplexních hodnot napětí. Naopak při zvolení nulové hodnoty těchto koeficientů se hodnoty napětí nebudou měnit. Proto množina koeficientů pro částečnou aktualizaci je tvořena těmito hraničními body, $k_{1,2} \in (0; 1)$.

V metodě stb2 jsem zvolil fixní hodnotu těchto dvou koeficientů. Koeficient upravující aktualizaci úhlu napětí $k_1 = 0,7$ a koeficient pro velikost napětí $k_2 = 0,65$. Užitím této metody se sice lze vyvarovat divergentnosti některých sítí, zato u soustav, které bez problému konvergovali bez tohoto zásahu, se bude zvyšovat počet iterací, protože aktualizací proces nebude dosahovat svého maximálního navýšení hodnot velikosti napětí a úhlu napětí o plný přírůstek korekčního vektoru. Proto se musí obezřetně rozhodovat o výběru velikostí fixních koeficientů.

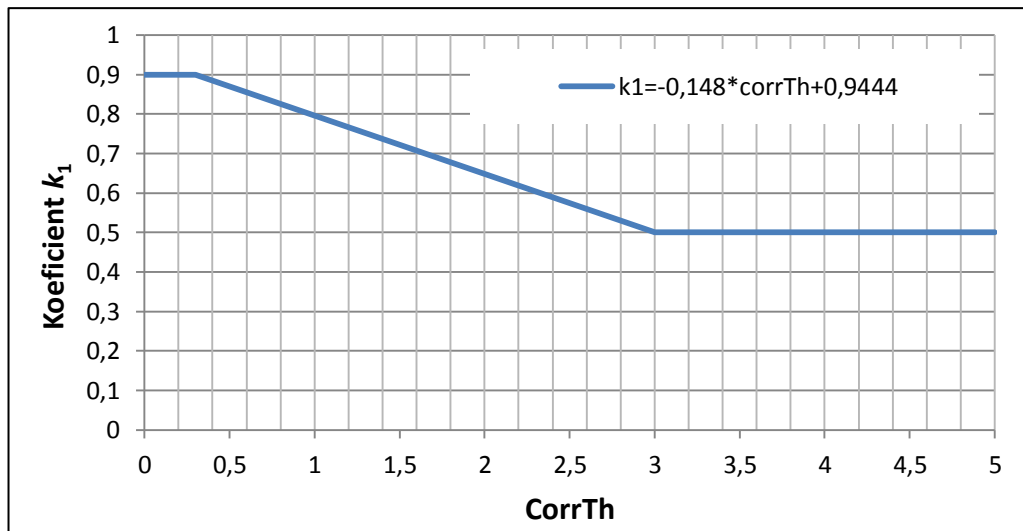
6.2.5 Kombinace přístupu 6.2.1 a 6.2.4 (stb3)

U této metody využívám kombinace metody zpřesnění startovních hodnot pomocí One-Shot Gauss-Seidel metody (stb1) a metody s koeficienty pro neúplnou aktualizaci (stb2). Jestliže jsem tedy pro samotnou metodu stb1 zvolil počet iterací roven 40, v této metodě tento počet snížím na 5, abych dosáhl snížení časové a výpočetní náročnosti. Naopak u ořezávacích koeficientů zvolím hodnotu vyšší než v případě metody stb2 kvůli zmenšení počtu iterací, a to na hodnotu $k_1 = 0,8$ a $k_2 = 0,75$.

6.2.6 Použití proměnného koeficientu (stb4)

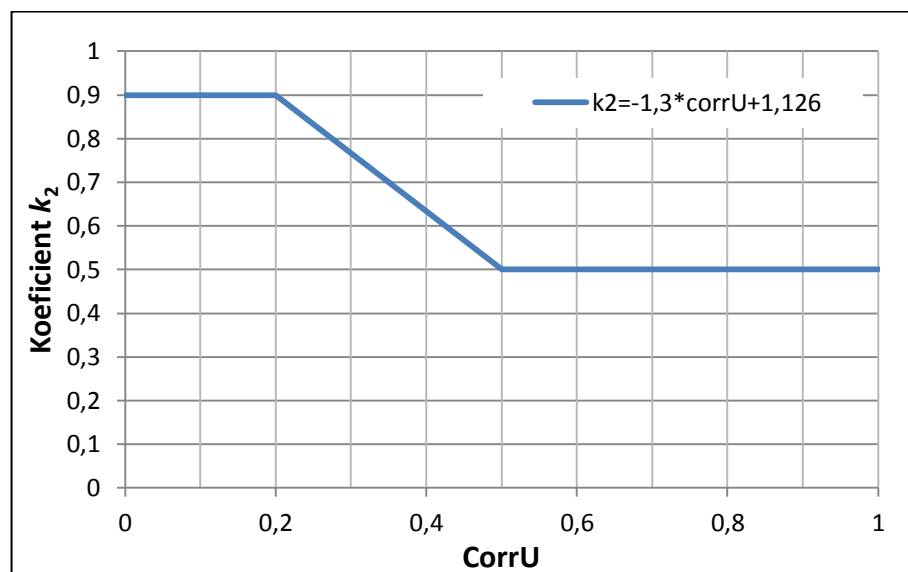
Místo používání konstantních koeficientů lze použít koeficientů, které se budou v závislosti na určitém parametru měnit. Při řešení tohoto problému se jeví jako dobrý funkční parametr použít hodnotu korekčního vektoru, která bude určovat velikost ořezávacího koeficientu pomocí funkční závislosti.

První variantou je tedy lineární závislost koeficientu na korekčním vektoru (stb4_0). U této metody se musí zahrnout ovšem určité meze, které budou tuto přímku ořezávat kvůli udržení proměnného koeficientu v mezích od 0 do 1 (v mém případě od 0,5 do 0,9 kvůli vyšší stabilitě a menším skokům hodnot koeficientů). Také jsou zde použity dva koeficienty – první pro úhly napětí, druhý pro velikosti napětí. Výsledná závislost hodnoty korekčního vektoru na koeficientu je zobrazena v grafech (Graf 6.4, Graf 6.5).



Graf 6.4 – Závislost ořezávacího koeficientu k_1 na velikosti korekčního vektoru úhlu napětí $\Delta\theta$

Lineární funkce (Graf 6.4) udávající hodnotu koeficientu k_1 mezi hodnotami úhlu napětí korekčního vektoru 0,3 a 3 má tvar $k_1 = -0,148 \cdot corr\vartheta + 0,9444$.



Graf 6.5 – Závislost ořezávacího koeficientu k_2 na velikosti korekčního vektoru velikosti napětí $\Delta U/U$

Lineární funkce (Graf 6.5) v tomto případě je mezi hodnotami 0,2 a 0,5 korekčního vektoru velikosti napětí a má tvar $k_2 = -1,3 \cdot corrU \cdot U + 1,126$.

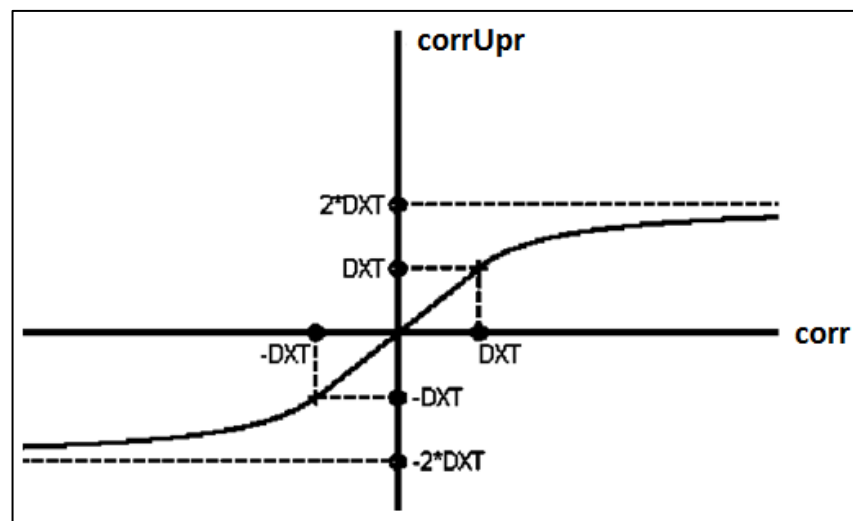
Výsledný zápis výpočtu koeficientů $k_{1,2}$ ve výpočetním programu má následující podobu (6.18):

$$\begin{aligned}
 k_{i1} &= -0,148 \cdot \text{abs}(\text{corr}g_i) + 0,9444; \\
 \text{if } k_{i1} &> 0,9 \\
 &\quad k_{i1} = 0,9; \\
 \text{elseif } k_{i1} &< 0,5 \\
 &\quad k_{i1} = 0,5; \\
 \text{end} \\
 k_{i2} &= -1,3 \cdot \text{abs}(\text{corr}U_i) \cdot U_i + 1,126; \\
 \text{if } k_{i2} &> 0,9 \\
 &\quad k_{i2} = 0,9; \\
 \text{elseif } k_{i2} &< 0,5 \\
 &\quad k_{i2} = 0,5; \\
 \text{end}
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

Druhou variantou je použití funkce `signum` (`stb4_1`). [14] Tato varianta zápisu nepoužívá explicitně žádný koeficient, ale upravený korekční vektor se také mění podle závislosti na korekčním vektoru jako v předchozím případě.

$$\text{corrUpr} = \begin{cases} \text{corr}; & \text{if } |\text{corr}| < DXT \\ 2 \cdot \text{signum}(\text{corr}) \cdot DXT - \frac{DXT^2}{\text{corr}}; & \text{if } |\text{corr}| \geq DXT \end{cases} \tag{6.19}$$

kde DXT - dělicí hodnota korekčního vektoru,
 corrUpr - upravená (oříznutá) hodnota korekčního vektoru,
 corr - vypočtená hodnota korekčního vektoru.



Graf 6.6 – Závislost korekčního vektoru na jeho oříznuté verzi [14]

Jestliže je absolutní hodnota korekčního vektoru menší než zvolená mez DXT , nebude se tato hodnota ořezávat, ale bude mít stejnou velikost $corrUpr = corr$. Ovšem při překročení této zvolené hodnoty DXT se potom velikost korekčního vektoru změní podle následující funkce $corrUpr = 2 \cdot \text{signum}(corr) \cdot DXT - \frac{DXT^2}{corr}$. Podle [14] se hodnota DXT rovná 0,2 pro ΔU a 1,5 pro $\Delta \vartheta$. V mém případě je $DXT_U = 0,2$ a hodnota $DXT_\vartheta = 0,3$.

7 Výpočtový software

Výpočtový software je prakticky „balík“ samostatně spustitelných souborů. Každý soubor (program) je reprezentován jednou z výše popsaných metod řešení, ať už se jedná o akcelerační metody pro G-S, stabilizační techniky N-R nebo konvenční G-S a N-R metodu. Tento software je přiložen k DP na kompaktním disku.

Program se ovládá pomocí příkazové řádky v prostředí simulačního programu Matlab. Při spuštění každé metody se zobrazí okno výběru pro zvolení elektrizační soustavy, kterou jsme se rozhodli vyřešit.³ Takto načtená soustava musí splňovat požadavky kladené na vstupní formát (kapitola 7.1), ve kterém je uložena, kvůli správnému načtení dat o soustavě (například charakteristické pasivní prvky soustavy, startovní hodnoty komplexních uzlových napětí, topologie soustavy).

Po načtení soustavy je spočtena admitanční matice, která se během výpočtu nemění, a následně je spuštěn iterační cyklus zvolené metody řešení. Postup řešení konvenčních metod je zobrazen na algoritmech v kapitole 5 (Obrázek 5.1 a Obrázek 5.2). Algoritmus optimalizačních metod je odvozen z těchto základních postupů. Při řešení mohou nastat dvě možnosti ukončení cyklu. První možnost je dokonvergování k výsledku a druhá je přerušování iteračního cyklu, protože byl překročen maximální počet iterací. Překročení maximálního počtu iterací nemusí jednoznačně znamenat divergenci výsledku, ale k výslednému řešení může program konvergovat příliš pomalu a pak maximální počet iterací nestačí ke splnění konvergenčního kritéria, které ukončuje nekonečný iterační cyklus. Toto je většinou případ, který se stává u metody G-S (a metod z něj odvozených), která má lineární přibližování k výsledku. U metody N-R se naopak ve většině případů jedná o divergenci.

Při konvergenci a korektním ukončení iteračního cyklu jsou výsledky vypsány na obrazovku, dále se zde objeví možnost uložení výsledných dat na pevný disk v tabulkovém formátu *data_metoda_soustava.xlsx* (do adresáře se spuštěným programem). Pro názornější zobrazení průběhu řešících metod je na obrazovce zobrazen graf závislosti průběhu napětí v jednotlivých iteračních krocích. K tomuto grafu napětí jsou zobrazeny grafy odchylek velikosti napětí a příslušného úhlu, popřípadě (podle závislosti na metodě) ještě závislost měnících se koeficientů (u G-S akcelerační nebo retardační, u N-R koeficient částečné aktualizace) v průběhu řešení. Tento výsledný graf lze uložit z kontextové nabídky při zobrazení na obrazovce nebo automaticky při potvrzení možnosti uložení dat na pevný disk. Při automatickém uložení je graf uložen v grafickém formátu *graf_metoda_soustava.png*.

³ Nevýhodou příkazu, který volá vyskakovací okno výběru, je fakt, že lze vybrat pouze soustavu, která je ve stejném adresáři jako spuštěný program (zvolená metoda).

Pro simulaci výpočtů na větším množství elektrizačních soustav jsem z důvodu automatizace a nezávislosti na lidském faktoru vytvořil nadstavbu programu, která si volá soubory s elektrizačními soustavami bez nutnosti jejich vybírání přes vyskakující okno výběru. V této nástavbě stačí zvolit počet řešených sítí, přejmenovat je podle vzoru *ES (číslo_soustavy).m* a program pak následně všechny soustavy načítá sám a jejich výsledky zapisuje do tabulky a ukládá na pevný disk. Tato nástavba se hodí v případě velkého množství soustav, u kterých je čas řešení v řádu hodin a odpadá tak neustálá kontrola nad tím, jestli je daná síť vyřešena (kvůli následnému zvolení další sítě).

7.1 Vstupní data a jejich formát

Pro správné načtení elektrizační soustavy musí být data o této soustavě uložena ve formátu *soustava.m*, který dokáže simulační nástroj Matlab přečíst. Tento „matlabovský“ formát nemá data uložena v binární soustavě, a proto lze otevřít a následně upravit v textovém editoru.

Data o elektrizační soustavě jsou uložena v několika maticích. V matici $\overline{M_0}$, která pro samostatný výpočet není důležitá, jsou uloženy informace o soustavě (např. počet uzlů, lokalita, zdroj informací o této soustavě). Matice $\overline{M_1}$ obsahuje větve soustavy (linky), které tvoří topologii sítě. Počet řádků je dán počtem větví v soustavě a v jednotlivých sloupcích jsou uloženy následující informace:

- 1. sloupec (číslo větve = linky),
- 2. sloupec (typ větve: 0 = propojení mezi uzly představuje vedení, 1 = linka mezi uzly představuje transformátor, jeho převod i s úhlem je zadán v 10. a 11. sloupci matice $\overline{M_1}$),
- 3. sloupec (uzel, ze kterého je linka vedena),
- 4. sloupec (uzel, do kterého linka vede),
- 5. sloupec (kontrolní uzel – pro řešení tímto programem není důležitý),
- 6. sloupec (R – rezistance vedení v poměrných jednotkách),
- 7. sloupec (X – reaktance vedení v poměrných jednotkách),
- 8. sloupec (G – svod vedení v poměrných jednotkách),
- 9. sloupec (B – susceptance vedení v poměrných jednotkách),
- 10. sloupec (převod transformátoru),
- 11. sloupec (úhel transformátoru).

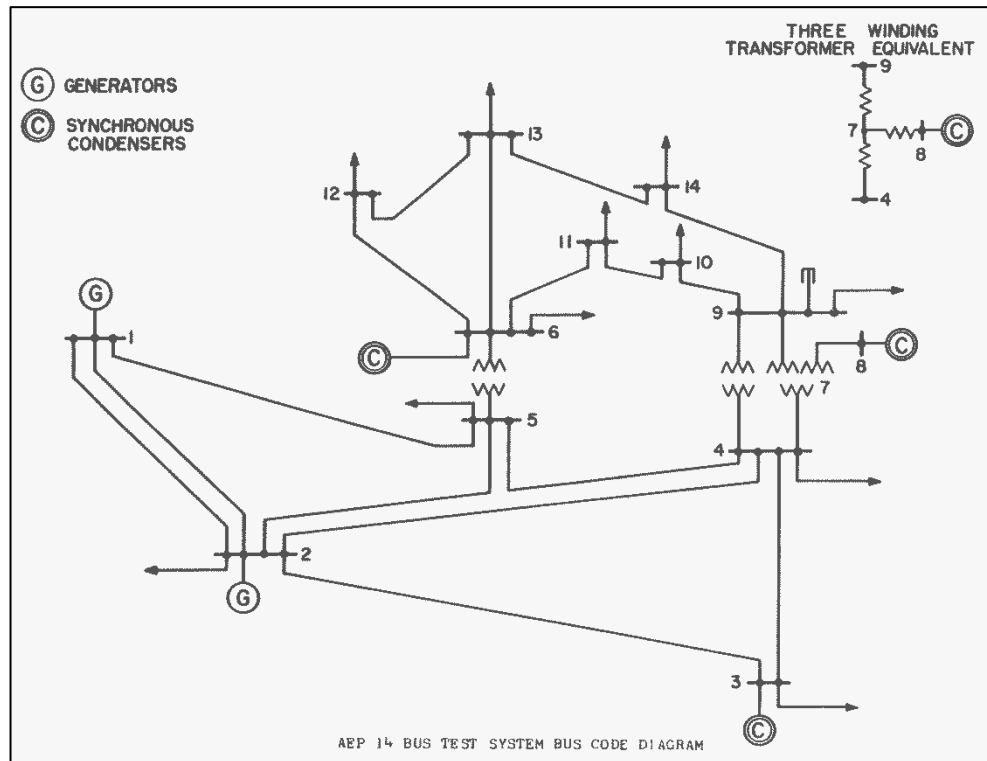
Poslední maticí je matice \overline{M}_2 , která obsahuje informace o uzlech soustavy. Řádky matice \overline{M}_2 znázorňují počet uzlů a ve sloupcích jsou uloženy následující data:

- 1. sloupec (číslo uzlu),
- 2. sloupec (typ uzlu: 1 = referenční, 2 = PQ, 3 = PU),
- 3. sloupec (provozní napětí uzlu ve fyzických jednotkách, není důležité),
- 4. sloupec (odebíraný činný výkon P_{load} v poměrných jednotkách),
- 5. sloupec (odebíraný jalový výkon Q_{load} v poměrných jednotkách),
- 6. sloupec (startovní velikost napětí),
- 7. sloupec (startovní velikost úhlu napětí),
- 8. sloupec (dolní velikost jalové meze $Q_{G_{min}}$ v poměrných jednotkách),
- 9. sloupec (horní velikost jalové meze $Q_{G_{max}}$ v poměrných jednotkách),
- 10. sloupec (generovaný činný výkon P_{gen} v poměrných jednotkách),
- 11. sloupec (generovaný jalový výkon Q_{gen} v poměrných jednotkách),
- 12. sloupec (konduktance kompenzačních prvků v poměrných jednotkách),
- 13. sloupec (susceptance kompenzačních prvků v poměrných jednotkách).

Sloupce, které jsou označeny jako nedůležité, jsou z pohledu řešení v mém simulačním programu nepotřebné a lze je tak nahradit nulovou hodnotou. V žádném případě se tyto sloupce však nesmí vynechat, protože musí být zachován rozměr těchto matic kvůli načítání hodnot ze správného sloupce.

7.2 Ukázka řešení

Pro ukázkou mého programu použiji 14 uzlovou elektrizační soustavu. [16] Tato síť je vhodná, protože je vcelku jednoduchá a řešení se lze dobrat jak pomocí Gauss-Seidelovy metody, tak i pomocí Newton-Raphsonovy metody, a lze tak ukázat rozdíl v řešení těchto dvou metod (Obrázek 7.1).



Obrázek 7.1 - IEEE 14 Bus Power Flow Test Case

Před řešením soustavy je nutné si uložit data do správného formátu (matice \overline{M}_1 , \overline{M}_2).

číslo větve	typ linky	uzel out	uzel in	kontrolní uzel	R [pu]	X [pu]	G [pu]	B [pu]	p [-]	úhel převodu [°]
1	0	1	2	0	0,01938	0,05917	0	0,0528	0,0000	0,0
2	0	1	5	0	0,05403	0,22304	0	0,0492	0,0000	0,0
3	0	2	3	0	0,04699	0,19797	0	0,0438	0,0000	0,0
4	0	2	5	0	0,05695	0,17388	0	0,0346	0,0000	0,0
5	0	2	4	0	0,05811	0,17632	0	0,034	0,0000	0,0
6	0	3	4	0	0,06701	0,17103	0	0,0128	0,0000	0,0
7	0	4	5	0	0,01335	0,04211	0	0	0,0000	0,0
8	1	4	7	0	0	0,20912	0	0	0,9780	0,0
9	1	4	9	0	0	0,55618	0	0	0,9690	0,0
10	1	5	6	0	0	0,25202	0	0	0,9320	0,0
11	0	6	11	0	0,09498	0,1989	0	0	0,0000	0,0
12	0	6	12	0	0,12291	0,25581	0	0	0,0000	0,0
13	0	6	13	0	0,06615	0,13027	0	0	0,0000	0,0
14	1	7	8	0	0	0,17615	0	0	1,0000	0,0
15	1	7	9	0	0	0,11001	0	0	1,0000	0,0
16	0	9	10	0	0,03181	0,0845	0	0	0,0000	0,0
17	0	9	14	0	0,12711	0,27038	0	0	0,0000	0,0
18	0	10	11	0	0,08205	0,19207	0	0	0,0000	0,0
19	0	12	13	0	0,22092	0,19988	0	0	0,0000	0,0
20	0	13	14	0	0,17093	0,34802	0	0	0,0000	0,0

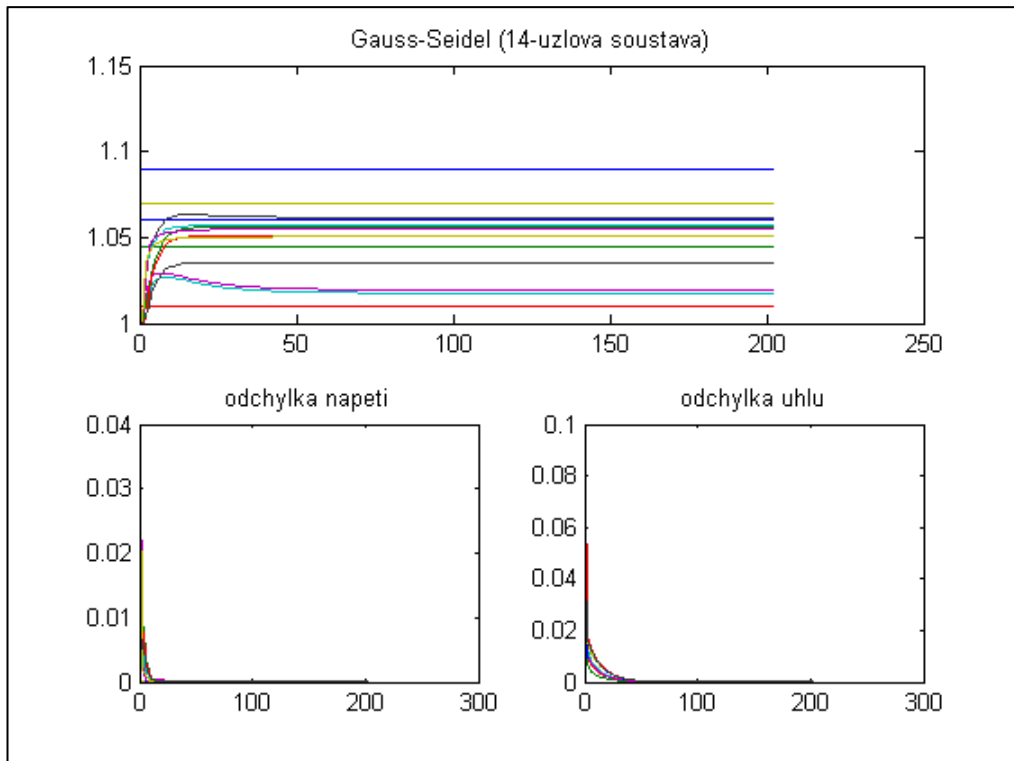
	číslo uzlu	typ uzlu	napětí [kV]	Pload [pu]	Qload [pu]	Uset [pu]	θ_{set} [°]	Og_min [pu]	Og_max [pu]	Pgen [pu]	Qgen [pu]	Gsh [pu]	Bsh [pu]
$M_2 =$	1	1	132	0.000	0.000	1.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	3	132	-0.217	-0.127	1.045	0.000	-0.400	0.500	0.400	0.000	0.000	0.000
	3	3	132	-0.942	-0.190	1.010	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	2	132	-0.478	0.039	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	2	132	-0.076	-0.016	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	3	33	-0.112	-0.075	1.070	0.000	-0.060	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
	7	2	1	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	8	3	11	0.000	0.000	1.090	0.000	-0.060	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
	9	2	33	-0.295	-0.166	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190
	10	2	33	-0.090	-0.058	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	11	2	33	-0.035	-0.018	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	12	2	33	-0.061	-0.016	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	13	2	33	-0.135	-0.058	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	14	2	33	-0.149	-0.050	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Pozn.: v souboru pro načtení vstupních dat (*soustava.m*) jsou jednotlivé matice odděleny středníkem. V matici \overline{M}_1 jsou jednotlivá data (sloupce) oddělena mezerníkem a každá větev začíná na začátku řádku (7.1). Obdobně je tvořena i matice \overline{M}_2 .

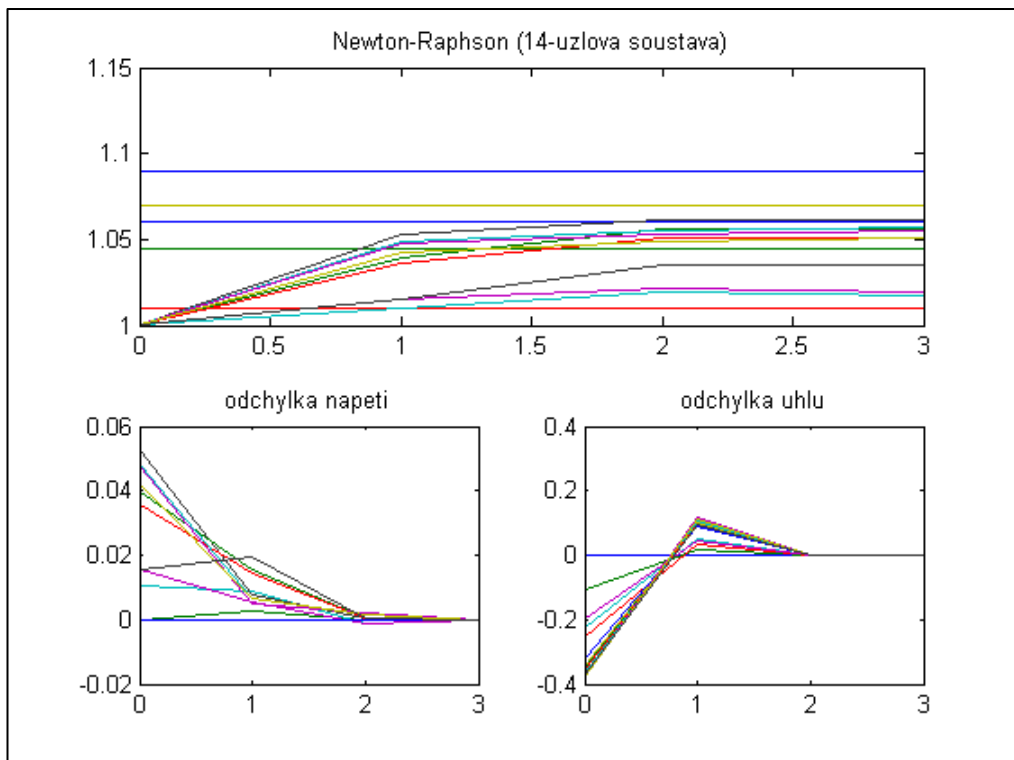
```
M1=[
1 0 1 2 0 0.01938 0.05917 0.0000 0.0528 0.0000 0.0
2 0 1 5 0 0.05403 0.22304 0.0000 0.0492 0.0000 0.0
...
];
```

(7.1)

Nyní lze již spustit kteroukoliv metodu pro řešení chodu soustavy. Pro ukázkou vyberu konvenční metody G-S a N-R.



Graf 7.1 – Průběh velikosti napětí v jednotlivých iteracích (G-S)



Graf 7.2 – Průběh velikosti napětí v jednotlivých iteracích (N-R)

Výsledné hodnoty napětí byly pro obě metody stejné, a to následující:

Uzel	Velikost napětí U [pu]	Úhel napětí [rad]
1	1.0600	0.0000
2	1.0450	-0.0870
3	1.0100	-0.2221
4	1.0177	-0.1800
5	1.0195	-0.1531
6	1.0700	-0.2482
7	1.0615	-0.2332
8	1.0900	-0.2332
9	1.0559	-0.2607
10	1.0510	-0.2635
11	1.0569	-0.2581
12	1.0552	-0.2631
13	1.0504	-0.2645
14	1.0355	-0.2798

Tabulka 7.1 – Konečné výsledky spočtených hodnot komplexních napětí

Každá metoda dospěla k těmto hodnotám jiným způsobem, který je zobrazen v průběhu řešení. Zatímco Gauss-Seidelova metoda tuto 14 uzlovou soustavu vyřešila po 202 iteracích, Newton-Raphsonova metoda získala stejné hodnoty řešení za 3 iterace (Tabulka 7.2).

Gauss-Seidelova metoda	Newton-Raphsonova metoda
Odchylka pro G-S: 9.9442e-009	Odchylka pro N-R: 1.1445e-010
Počet iterací pro G-S: 202	Počet iterací pro N-R: 3
dPloss = 0.13393, dQloss = 0.30122	dPloss = 0.13393, dQloss = 0.30122
Celkový čas je 0.21135 sec.	Celkový čas je 0.140111 sec.

Tabulka 7.2 – Výpis o vyřešení chodu soustavy

8 Zhodnocení výsledků

Simulace akceleračních a stabilizačních metod probíhala na souboru elektrizačních soustav, které byly v rámci G-S konvenční metody špatně řešitelné, u N-R metody buď zcela neřešitelné, nebo se jednalo o nefyzikální řešení (například obrovské přepětí nebo podpětí).

V případě Gauss-Seidelovy metody se jednalo o 25 distribučních soustav, u nichž řešení pomocí klasické neakcelerované metody zabíralo příliš mnoho času a konvergenční kritérium bylo splněno v mnohých případech po stech tisících iterací. Seznam těchto 25 soustav je uveden v podkapitole použitých zdrojů (10.2). Velikost těchto distribučních sítí je od lokální 13 uzlové sítě až po velkou 794 uzlovou distribuční soustavu.

Simulace Newton-Raphsonovy metody probíhala na souboru 8 elektrizačních soustav, z nichž některé jsou v testování stabilizačních metod zastoupeny v různých konfiguracích, v závislosti na jejich vytížení (nízký, střední, velký, špičkový odběr, odběr v zimních měsících). Stabilizační techniky N-R metody tak byly testovány na 14 případech. Jednalo se o sítě velikosti od 11 do 2746 uzlů. Seznam je uveden v podkapitole použitých zdrojů (10.3).

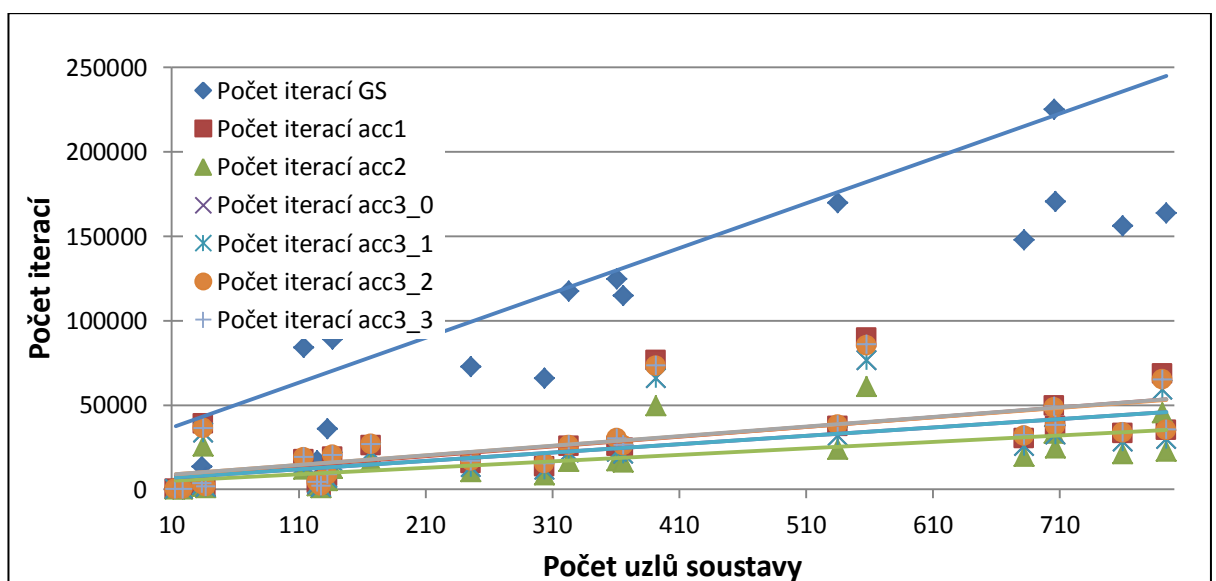
8.1 Výsledky akceleračních technik G-S metody

Porovnávání jednotlivých akceleračních metod lze rozdělit na dvě části. V první části lze porovnávat samotný počet iterací, kterých bylo potřeba ke splnění konvergenčního kritéria. Druhou část lze vyhodnocovat z pohledu časové náročnosti na jednu iteraci. Porovnávat celkovou dobu na vyřešení testované soustavy není zcela korektní, protože se zde projeví počet iterací potřebný ke konvergenci dané techniky (lze tedy usuzovat, že v celkové době na vyřešení dané elektrizační soustavy bude vnesena určitá chyba vzniklá různým počtem iterací u každé metody).

Z výsledků simulace akceleračních technik na zadaném souboru 25 elektrizačních soustav (Tabulka 8.3) je patrné, že počet iterací potřebných k vyřešení souboru soustav klesl nejméně o 78 % (jako základ jsem zvolil konvenční Gauss-Seidelovu metodu) a nejlepší metoda acc2, tedy použití akceleračního nebo retardačního koeficientu, potřebovala jen 14 % iterací oproti G-S metodě. Místo celkového součtu 3098264 iterací ve všech soustavách u konvenční G-S metody vyřešila tento soubor soustav při počtu 446130 iterací. Ostatní metody byly vůči sobě již celkem vyrovnané a nárůst počtu iterací oproti metodě acc2 se pohyboval od pěti do osmi procent, což není vzhledem k nízkému počtu iterací oproti G-S metodě markantní rozdíl. Z grafu (Graf 8.1) je jasně vidět, že při aproximaci počtu iterací lineární závislostí je největší snížení patrné u akcelerační metody acc2 (zelená přímka), ostatní metody jsou vyrovnané a nejhůře je na tom konvenční řešení pomocí G-S metody.

Počet uzlů	Počet iterací						
	GS	acc1	acc2	acc3_0	acc3_1	acc3_2	acc3_3
13	764	145	149	128	151	239	242
19	101	79	60	97	77	49	50
34	13391	2670	1738	2296	2355	3391	3427
35	156567	38773	25744	33524	33524	36196	36069
37	6941	1443	932	1236	1236	1688	1688
114	84072	17425	11788	14815	14815	18788	18957
125	16844	3468	2238	2968	3027	4334	4367
128	8356	1633	1039	1387	1422	2101	2116
133	35866	7878	5056	6737	6738	8628	8734
137	89085	19109	12325	16359	16367	20094	20243
167	119962	25821	16786	22183	22195	26562	26764
246	72577	15435	10332	13142	13154	16737	16898
304	65892	13371	8571	11391	11395	15310	15513
323	117471	25551	16566	21910	21914	26133	26343
361	124679	25731	16671	22028	22047	30159	30136
366	114615	24616	15955	20977	20981	26060	26322
392	335895	76448	49480	65646	65646	72973	73471
535	169763	37276	23812	31813	31815	37914	38267
558	401597	89780	60771	76384	76384	85025	85787
682	147816	30066	19383	25709	25710	31504	32056
706	224890	49523	33184	42709	42711	48516	48942
707	170514	37493	24535	32237	32240	37739	38020
760	156169	33181	21200	28306	28308	33422	33759
791	300835	68305	45129	58929	58932	64913	65018
794	163602	34913	22686	29858	29866	34866	35306
Celkově	3098264	680133	446130	582769	583010	683341	688495
v [%]	100	22	14	19	19	22	22

Tabulka 8.1 – Počet iterací jednotlivých metod



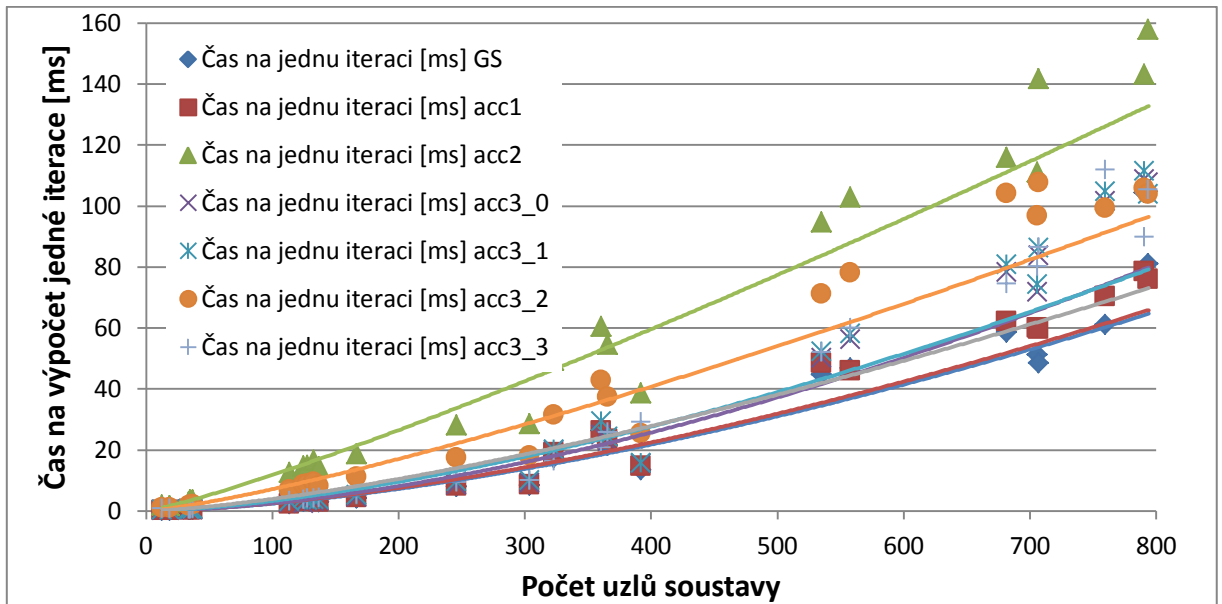
Graf 8.1 – Závislost počtu iterací na velikosti ES

Při vyhodnocování úspěšnosti akceleračních metod z hlediska doby potřebné na výpočet jedné iterace je znát náročnost akceleračního algoritmu. Proto také konvenční Gauss-Seidelova metoda, která nemá žádný akcelerační algoritmus, je z hlediska časové náročnosti na prvním místě. Také lze tvrdit, že doba řešení jedné iterace je závislá na velikosti ES. Neboli doba řešení jedné iterace se se složitostí soustavy a počtem uzlů v soustavě zvětšuje (Tabulka 8.2). Nejrychlejší akcelerační metodou z hlediska výpočtu jedné iterace je metoda acc1, tedy použití konstantního akceleračního koeficientu. V této akcelerační metodě se vlastně v akceleračním algoritmu nic nepočítá a jen se násobí tímto konstantním akceleračním koeficientem. Dalšími rychlými metodami jsou acc3_0 a acc3_3, které mají z hlediska metod s proměnnými koeficienty (acc3) nejjednodušší algoritmus pro výpočet akceleračního koeficientu.

Počet uzlů	Čas na jednu iteraci [ms]						
	GS	acc1	acc2	acc3_0	acc3_1	acc3_2	acc3_3
13	0,1681	0,2417	1,7722	0,2156	0,3554	0,9266	0,8100
19	0,2113	0,2150	1,7050	0,2225	0,3530	1,0742	0,7137
34	0,3847	0,3970	2,9650	0,5021	0,6087	1,6340	0,5998
35	0,4433	0,4505	3,4594	0,3990	0,5717	1,8369	0,7033
37	0,4835	0,4768	3,4408	0,3836	0,6378	2,0025	0,7511
114	2,3411	2,3260	12,6086	2,7375	3,0644	6,9454	3,2532
125	3,0615	3,0949	14,6659	2,5105	4,2043	8,6449	3,7995
128	3,2495	3,3304	14,9210	3,0807	3,5183	8,8623	4,2552
133	3,4435	3,4572	16,5045	3,0534	3,8411	9,5096	4,2499
137	2,8745	2,8431	14,5085	3,2570	3,6514	8,2561	4,4674
167	4,1437	4,3898	18,7456	4,6644	5,1588	11,1290	5,3708
246	7,9275	8,1066	28,1618	8,6268	9,5378	17,3281	9,4267
304	8,4622	8,5884	28,5843	9,2240	10,1169	18,1126	10,0497
323	17,3295	19,0129	49,3517	19,9820	20,0913	31,3995	16,4232
361	26,3169	26,1760	60,4922	24,8592	29,2938	42,8394	20,8512
366	21,4964	23,4722	54,4927	22,9470	24,3447	37,3930	25,7787
392	13,4118	14,6056	38,6587	15,4648	15,7185	25,4762	29,0875
535	44,6086	48,4154	94,7140	50,1943	52,3568	71,0942	52,0373
558	46,7456	45,9812	102,8784	56,1600	58,2397	78,0325	59,9683
682	58,6303	62,2095	115,8188	78,3545	80,8866	104,0493	74,5850
706	51,1633	60,0167	111,0307	71,8139	74,2571	96,6826	80,2379
707	48,4498	59,6318	141,7519	83,6885	86,3472	107,6156	86,4209
760	61,1587	70,2160	161,4064	101,6393	104,6674	99,3284	111,9845
791	104,3090	78,4672	143,2672	108,6498	111,4547	105,7745	89,7995
794	80,9601	75,9867	157,9647	107,6794	103,8448	103,8743	105,3038
Celkově	611,77	622,11	1393,87	780,31	807,12	999,82	800,93
v [%]	100	102	228	128	132	163	131

Tabulka 8.2 – Časová náročnost jednotlivých metod

Při proložení těchto časových náročností jednotlivých akceleračních technik je potvrzeno, že nejméně časově náročná je klasická konvenční G-S metoda a metoda acc1 s konstantním akceleračním koeficientem, poté jsou již zmíněné dvě metody (acc3_0 a acc3_3) a nejméně časově náročná se jeví metoda s nejmenším počtem iterací acc2.



Graf 8.2 – Závislost doby výpočtu jedné iterace na velikosti ES

8.2 Výsledky stabilizačních technik N-R metody

Jak bylo psáno již výše, snahou stabilizačních technik je optimalizovat průběh numerického výpočtu tak, aby byl v co nejvíce případech stabilní a dosahoval tak správného řešení při dosažení minimálního nárůstu iterací oproti konvenční N-R metodě.

Výsledky, které byly dosaženy simulací na 14 případech vybraných soustav, rozdělím do několika okruhů. V prvním okruhu budu porovnávat účinnost řešení mezi metodami upřesňujícími startovní hodnoty napětí (úhlu napětí) a metodami upravujícími velikost přírůstkového vektoru, který je součástí aktualizací na konci každé iterace. Poté budu porovnávat vhodnost užití všech metod z hlediska velikosti elektrizační soustavy.

Při vybírání vhodné stabilizační techniky z hlediska použití metod na úpravu startovních hodnot nebo metod, které upravují velikost přírůstkového vektoru, testy jasně ukázaly, že jako vhodnější volba je alternativa upravující startovní hodnoty komplexního napětí (Tabulka 8.3). Nejlepší z těchto metod byla při testování daného souboru elektrizačních soustav metoda stb5 - One-Shot DC Load Flow (OSDC), která byla při řešení úspěšná ve dvanácti případech z čtrnácti, tedy z 86 procent. Při použití kombinace metody upravující startovní hodnoty s metodou upravující přírůstkový vektor (částečná aktualizace) je znatelný nárůst úspěšnosti řešení pro metody upravující přírůstkový vektor v průměru o 21,6 %. Při

porovnávání kombinovaných metod s technikami zpřesňující startovní hodnoty jde o snížení úspěšnosti. Kombinované metody mají v průměru o 15,8 % menší úspěšnost.

Metody	Upravující přírůstkový vektor			Zpřesňující startovní hodnoty			Kombinované				
	stb2	stb4_0	stb4_1	stb1	stb5	stb6	stb3	stb5_0	stb5_1	stb6_0	stb6_1
11	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	1	-1	1	1	0	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
43	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
59	-1	-1	1	0	1	-1	1	0	1	-1	-1
59	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
59	-1	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	0
59	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
61	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
145	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1
629	-1	0	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
2736	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2746	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2746	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
Celkem úspěšných	3	3	6	9	12	7	7	8	10	6	5
v [%]	21	21	43	64	86	50	50	57	71	43	36
Pozn.:	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: #90EE90; margin-right: 5px;"></div> metoda, která úspěšně konvergovala k výsledku </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: #FFD700; margin-right: 5px;"></div> metoda, která konvergovala ke špatnému výsledku </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: #F08080; margin-right: 5px;"></div> metoda, která divergovala </div>										

Tabulka 8.3 – Úspěšnost řešení jednotlivých metod

Z hlediska vhodnosti metody podle velikosti elektrizační soustavy je pro malé a střední ES jako nejlepší volba použít metody stb5 (OSDC) nebo stb5_1 (kombinace DC Load Flow a funkce signum při aktualizaci). Pro rozsáhlé soustavy je nejlepší metoda stb1 (OSGS), popřípadě stb5 (OSDC).

9 Závěr

V této diplomové práci byl zpracován postup, kterým lze dosáhnout řešení chodu soustavy v ustáleném stavu. Je zde odvozena tvorba admitanční matice spolu s případnými úpravami při změně konfigurace elektrizační soustavy. Jsou zde podrobně rozepsány dvě základní metody řešení chodu soustavy – Gauss-Seidelova a Newton-Raphsonova iterační metoda. Pro realističtější průběh řešení těchto dvou iteračních metod byly do obou metod začleněny jalové meze u PU uzlů.

Stěžejním bodem v diplomové práci byla optimalizace G-S a N-R konvenční metody. Z důvodu pomalého lineárního průběhu řešení lze u G-S metody mluvit o akceleračních technikách, jejichž úkoly jsou snížit počet iteračních kroků a zkrátit dobu potřebnou na výpočet jedné iterace, zejména u distribučních a rozsáhlejších sítí. Jak ukázaly výsledky simulací, tyto dva úkoly si oponují. Jestliže je důležité snížit co nejvíce počet iterací, musí k tomu být sofistikovaný algoritmus, který zabírá více času na řešení a prodlužuje tak dobu výpočtu jedné iterace. Z pohledu snížení počtu iterací byla nejlepší metoda acc2, která volí mezi akceleračním nebo retardačním koeficientem. Počet iterací se oproti konvenční G-S metodě snížil o 86 %. Naopak nejrychlejší metoda na výpočet jedné iterace byla metoda acc1, jež používá jen konstantní akcelerační koeficient. U této metody byl nárůst doby výpočtu jedné iterace navýšen pouze o 2 % při snížení počtu iterací o 78 %. Výsledky byly získány ze simulace 25 distribučních soustav pomocí mnou vytvořeného výpočtového softwaru.

U N-R metody se jedná o stabilizaci, protože konvenční metoda je při řešení příliš numericky nestabilní. Úkolem stabilizačních technik je tedy rozšířit oblast numerické stability zvláště pro silně zatížené a slabě propojené soustavy. Z výsledků získaných na simulaci 8 soustav (dohromady 14 různých konfigurací) se projevila jako nejstabilnější metoda stb5 (One-Shot DC Load Flow), která upravuje startovní hodnoty fázového posunu fázoru napětí metodou DC Load Flow. Tato metoda byla úspěšná v 12 případech (hlavně u malých soustav), tedy z 86 %. Pro střední a velké sítě se tato metoda může obměnit metodou stb1 (One-Shot Gauss-Seidel), která u větších sítí byla 100 % úspěšná.

Výpočtový software, na kterém byly optimalizační metody testovány, byl naprogramován v prostředí programu Matlab. Jeho ovládání je skrze příkazovou řádku. Tento software se může používat jak při testování jednotlivých elektrizačních soustav, tak i pro soubor sítí, kdy není nutná přítomnost lidského faktoru a usnadňuje tak práci a šetří čas. Tento software má i své záporné stránky (například chybějící uživatelské prostředí), které ovšem při tomto testování nevadily a které lze v budoucnu odstranit dalším rozšířením programu.

10 Seznam použitých zdrojů

10.1 Seznam literatury

- [1] E. DVORSKÝ. ES soustava. Podklad k přednášce předmětu Management a marketing v EE [2012-02-15].
- [2] ČEPS, a.s.: O nás [online]. 2009 [cit. 2011-11-17]. Dostupné z WWW: <http://ceps.cz/detail.asp?cepsmenu=1&IDP=26&PDM2=0&PDM3=0&PDM4=0>
- [3] ČEPS, a.s.: Činnosti [online]. 2011 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z WWW: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>
- [4] ČEPS, a.s.: Systémové služby [online]. 2012 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z WWW: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Systemove-sluzby/Stranky/default.aspx>
- [5] J. VELEBA. Řešení chodu soustavy I. Přednáška k předmětu Teorie přenosu a rozvodu [2011-11-15]. ZČU Plzeň.
- [6] J. MERTLOVÁ, P. HEJTMÁNKOVÁ, T. TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 189 s. ISBN 80-7043-307-8.
- [7] J. VELEBA. Řešení chodu soustavy II. Přednáška k předmětu Teorie přenosu a rozvodu [2011-11-18]. ZČU Plzeň.
- [8] J. D. GLOVER, M. S. SARMA, T. J. OVERBYE. Power Systems Analysis and Design. CENGAGE-Engineering, 2007. ISBN 0-5345-4884-9.
- [9] P. KUNDUR. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
- [10] N. MOHAN. First Course on Power Systems. Year 2006 Edition, MNPERE, 2006. ISBN 0-9715292-7-2.
- [11] M. KOLCUN, J. MÜHLBACHER, R. HALLER. Mathematical Analysis of Electrical Networks. BEN, Prague, 2004. ISBN 80-7300-098-9.
- [12] C. CANIZARES, A. J. CONEJO, A. G. EXPOSITO. Electric Energy Systems: Analysis and Operation. CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-7365-7.
- [13] C. A. GROSS. Power System Analysis. John Wiley & Sons, 1986. ISBN 0471862061.
- [14] J. VELEBA. Acceleration and stability techniques for conventional numerical methods in load flow analysis. Článek na konferenci ELEN 2010 [2010-09-20].
- [15] J. VELEBA. Approximate methods – theory.
- [16] University of Washington Electrical Engineering: Research [online]. 2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z WWW: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

10.2 Seznam testovaných soustav u akcelerace G-S

Název	Popis
EPS0013Ipu.m	IEEE 13 Node Test Feeder, Zdroj: http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/
EPS0019Ipu.m	Dis. System 19 Bus Case (CZ), Distribuce Plzeň – Jih, Zdroj: Ing. Šilhán, 2008
EPS0035Ipu.m	IEEE 34 Node Test Feeder, Zdroj: http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/
EPS0037Ipu.m	IEEE 37 Bus Distribution Test Case with distributed generation, Sbase = 100kVA, Zdroj: Shahidehpour, Wang: Communication and Control in Electric Power Systems, Applications of Parallel and Distributed Processing
EPS0125Ipu.m	IEEE 123 Node Test Feeder, Zdroj: http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/
EPS0128Ipu.m	U těchto DS nebyly zveřejněny žádné bližší informace o původu
EPS0133Ipu.m	
EPS0361Ipu.m	
EPS0034Iphu.m	
EPS0114Iphu.m	
EPS0137Iphu.m	
EPS0167Iphu.m	
EPS0246Iphu.m	
EPS0304Iphu.m	
EPS0323Iphu.m	
EPS0366Iphu.m	
EPS0392Iphu.m	
EPS0535Iphu.m	
EPS0558Iphu.m	
EPS0682Iphu.m	
EPS0706Iphu.m	
EPS0707Iphu.m	
EPS0760Iphu.m	
EPS0791Iphu.m	
EPS0794Iphu.m	

10.3 Seznam testovaných sítí u stabilizace N-R

Název	Popis
EPS0011Ipu.m	11 Bus Test Case, Zdroj: Kundur: Power System Stability and Control, 1994
EPS0011Ipu.m	Reduced Mato Grosso System, 11 Bus Test Case, Brazil Zdroj: Granville, J. C. O. Mello, A. C. G. Mello: Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability (IEEE Transactions of Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996)
EPS0017Ipu.m	Reduced primary AC System for the South Island of New Zealand, 17 Bus Test Case Zdroj: Arrilaga, Watson: Computer Modelling of Electrical Power Systems, 2001
EPS0043Ipu.m	43 Bus Test System (Ill-Conditioned Case) Zdroj: S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, G. S. Hope: Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method (IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982)
EPS0059IIIpu.m	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia), Case III - peak load conditions (G 25430 MW, L 24800 MW), SVCs modelled as PV buses
EPS0059Ipu.m	Case I - heavy load conditions (G 23030 MW, L 22300 MW), SVCs modelled as PV buses
EPS0059IVpu.m	Case IV - light load conditions (G 15050 MW, L 14810 MW), SVCs modelled as PV buses
EPS0059Vpu.m	Case V - medium load conditions (G 19060 MW, L 18600 MW), SVCs modelled as PV buses Zdroj: M. Gibbard and D. Vowles: Simplified 14-Generator Model of the SE Australian Power System, 2008
EPS0061Ipu.m	61 Bus Test Case (UK) Zdroj: Taylor 2009
EPS0145Ipu.m	IEEE 145 Bus Test Case, Summer Season: 50-Gen Case Zdroj: IEEE Working Group, 01/02/90
EPS0629Ipu.m	629 Bus Test Case (UK), Scotland Area Zdroj: Prof. Malcolm Irving, BIPS (Brunel University, UK), 2009
EPS2736Ipu.m	2736 Bus Test Case (Polish), Year 2004, Summer Season Peak, Multiple generators have not been aggregated Zdroj: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl
EPS2746IIpu.m	2746 Bus Test Case (Polish), Case II - Year 2003-04, Winter Season evening peak, Case I - Year 2003-04, Winter Season Off-Peak, Multiple generators have not been aggregated
EPS2746Ipu.m	Zdroj: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl

