ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu

Bc. Jiří Čeleda **2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jiří ČELEDA**
Osobní číslo:	**E11N0110P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektroenergetika**
Název tématu:	**Řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

V této práci komplexně obsáhněte problematiku modelování napěťové stability, zejména však:

1. zpracujte teoretický základ napěťové stability (prokažte schopnost práce s informacemi z dostupných českých i anglických informačních zdrojů).

2. proveďte úvahu nad analytickým řešením napěťové stability pro jednoduchou 2-uzlovou soustavu s pomocí klasických uzlových rovnic řešení chodu sítě.

3. objasněte rozsah použití klasického numerického postupu (chod sítě pomocí Gauss-Seidelovy a Newton-Raphsonovy metody) k řešení napěťové stability středně velkých soustav.

4. aplikujte metodiku tzv. Determination of Shortest Distance to Instability pro určení nejkratší vzdálenosti k dosažení nestability rozsáhlých elektrizačních soustav.

5. vytvořte výpočtový program v Matlabu, který bude schopen řešit napěťovou stabilitu libovolně rozsáhlé a komplexní soustavy pomocí metodik ad 3) a 4). S pomocí tohoto programu pak proveďte analýzu napěťové stability některých vybraných reálných sítí vč. návrhu zlepšení stability vhodnými nápravnými opatřeními (testové sítě budou k dispozici).

V závěru shrňte jednotlivé postupy z hlediska přesnosti výsledků, časové i výpočtové náročnosti a možnosti realizace/vhodnosti pro řešení reálných sítí v praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **J. Mertlová, P. Hejtmánková, T. Tajtl : Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, ZČU, Pilsen, 2004, ISBN 80-7043-307-8**
2. **Larsson, M.: Coordinated Voltage Control in Electric Power System, Doctoral dissertation, Lund University, 2000**
3. **Doležal, J., Pospíšil, V. : Hodnocení bezpečnosti chodu soustavy, Paper in ELEN poster conference, Prague, September, 2010**
4. **Crow, M. : Computational Methods for Electric Power Systems, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-1352-X**
5. **Kundur, P. : Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994, ISBN 0-07-035958-X**

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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

L.S.

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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá řešením napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu. V úvodní části práce je popsán chod soustavy. V této části je především podrobně řešen popis elektrizační soustavy, tvorba admitanční matice a popis dvou nejvíce používaných numerických postupů. V další části práce je řešena a popisována napěťová stabilita soustavy. Je zde popsán postup řešení napěťové stability jednoduché 2–uzlové sítě pomocí analytických vztahů, řešení napěťové stability "hrubou" silou v ustáleném stavu a výpočet nejkratší vzdálenosti do black-outu. Pro řešení této problematiky byl vytvořen program, který je schopen vyřešit napěťovou stabilitu elektrizačních soustav a určit nejkratší vzdálenosti do black-outu.

Klíčová slova

Elektrizační soustava, chod soustavy, admitanční matice, Gauss–Seidelova metoda, Newton–Raphsonova metoda, Jacobiho matice, jalové meze, napěťová stabilita, nosová křivka, maximální zatížení, zatížitelnost, analytické řešení, base-case, black-out, nejkratší vzdálenost do black-outu

Abstract

This diploma thesis focuses on steady–state voltage stability analysis of electric power systems. In the first part of the thesis, the load–flow analysis is described. In this section, description of electric power systems, bus admittance matrix and a description of two mostly used numerical algorithms is presented. In the next part, the voltage stability of the power system is described. Here is also described the procedure for solving voltage stability of simple 2-bus network using analytical formulas. Furthermore, voltage stability analysis using "brute" force and the concept of the shortest distance to the black-out are described. To solve this problem, specialized program was developed to solve the voltage stability of power systems and determine the shortest distance to black-out.

Keywords

Electric power system, load–flow analysis, admittance matrix, Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method, Jacobi matrix, reactive power limits, voltage stability, nose curve, maximum load, loadability, analytical solution, base-case, black-out, the shortest distance to the black-out

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 9.5.2013 Bc. Jiří Čeleda

…………………….

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Velebovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Velice si cením poskytnutí velkého množství odborné literatury a celé řady elektrizačních soustav pro realizaci analýz.

OBSAH:

Seznam symbolů a zkratek

θ_i ....fázový posun sdruženého napětí uzlu *i*

φ_i ....fázový posun mezi napětí a proudem v uzlu *i*

$\overline{U}_i, U_i$ ....fázor sdruženého napětí v uzlu *i,* velikost napětí v uzlu *i*

$\overline{U}_i^*$ ....fázor napětí v uzlu *i* komplexně sdružený

$\overline{I}_i, I_i$ ....fázor proudu v uzlu *i*, velikost proudu v uzlu *i*

$\overline{I}_i^*$ ....fázor proudu v uzlu *i* komplexně sdružený

P_i, Q_i, S_i ....činný výkon, jalový výkon a zdánlivý výkon injektovaný v uzlu *i*

$\overline{S}_i, \overline{S}_i^*$ ....komplexní výkon, komplexně sdružený výkon v uzlu *i*

R_{ik}, X_{ik} ....rezistence, reaktance podélné impedance mezi uzly *i, k*

G_{ik0}, B_{ik0} ....konduktance, susceptance příčné admitance mezi uzly *i, k* proti zemi

$\overline{Z}_{ik}, \overline{Y}_{ik}$ ....podélná impedance, admitance mezi uzly *i, k*

$\overline{Z}_{ik0}, \overline{Y}_{ik0}$ ....příčná impedance, admitance mezi uzly *i, k* proti zemi

$\overline{U}_{fi}$ ....hodnota fázového napětí v uzlu *i*

$\underline{\overline{I}}$ ....sloupcový vektor injektovaných proudů do sítě

$\underline{\overline{U}}_f$ ....sloupcový vektor fázových napětí v uzlech

$\underline{\overline{A}}$ ....čtvercová uzlová admitanční matice

$\overline{p}_{ik}$ ....komplexní převod transformátoru

$p, p_{\max}$ ....počet iterací, maximální počet iterací

n ....počet uzlů sítě

$\overline{A}_{ik}$ ....hodnota prvku v admitanční matici na pozici *i, k*

$\overline{U}_{REF}$ ....fázor napětí v referenčním uzlu

U_{i_set} ....velikost napětí v uzlu *i* na počátku iteračního procesu (pro PU uzly)

θ_{ik} ....fázový rozdíl mezi θ_i a θ_k

$\Delta P_i, \Delta Q_i$ ....výkonový rozdíl (mismatch) činného resp. jalového výkonu v uzlu *i*

$\underline{\Delta P}^{(p-1)}, \underline{\Delta Q}^{(p-1)}$ ......sloupcový vektor činného resp. jalového výkonu v (*p-1*) iteraci

$\underline{\Delta\theta}^{(p)}, \underline{\Delta U}^{(p)}$ ....sloupcový přírůstkový vektor úhlu napětí resp. velikosti napětí

$Q_{Gi\_\min}, Q_{Gi\_\max}$ ....minimální resp. maximální jalový výkon pro PU uzel

$\lambda, \lambda_{\max}$ ....zatížitelnost, maximální zatížitelnost

k_i, k^* ....vzdálenost do black-outu, nejkratší vzdálenost do black-outu

x, x^* ....stavový vektor, kritický stavový vektor

u_{i_krit} ....kritické napětí ve sledovaném uzlu *i*

ρ ....výkonový parametrický vektor,

ρ^* ....kritický výkonový parametrický vektor

S ....křivka (plocha, super-plocha) vzniklá z napěťově kritických bodů

w ....levý vlastní vektor matice J_X při x^*

η ....směrový vektor zatížení

δ ....rozdílový úhel

J_X, J_ρ ....Jacobiho matice derivovány dle vektoru x resp. ρ

---

pu ....poměrné jednotky

A – matice ....uzlová admitanční matice

G–S metoda.........................Gauss–Seidelova metoda

N–R metoda ....Newton–Raphsonova metoda

PU–uzel..............................elektrárenský uzel

PQ–uzel..............................odběrový uzel

ref.–uzel ....referenční uzel

ČR ....Česká Republika

ČSFR..................................Česká a Slovenská Federativní Republika

PS, DS................................přenosová resp. distribuční soustava

ČEPS..................................Česká Energetická Přenosová Společnost

UCTE ....Union for the Coordination of the Transmission of Electricity

UCPTE ....Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity

PES CDO – MIR................Propojené elektrizační soustavy evropských zemí RVHP, řízené Centrální dispečerskou organizací

CLF software ....Continuation load-flow software

Úvod

V současné době, kdy dochází k nárůstu spotřeby elektrické energie, se soustavy provozují stále blíže ke svým provozním mezím. Díky tomuto faktu je stále aktuálnější sledování bezpečnosti chodu soustavy, která je definována několika kritérii.

Bezpečnost chodu soustavy může být narušena výpadky napájení elektrickou energií, poruchami v soustavě nebo následným řetězením poruch. Tyto poruchy mohou mít za následek i úplnou ztrátu napájení neboli black-out. K zamezení rozsáhlých výpadků elektrické energie je možné se poučit z historických údajů, které popisují posloupnost událostí zapříčiňující tyto situace. Provoz elektrické soustavy je také ohrožen faktory, které jsou následkem neuvážené lidské činnosti. Při obchodování s elektrickou energií někteří obchodníci nedodržují technické limity a vlastnosti vedení. Následkem tohoto neuváženého jednání může být přenos výkonů mezi oblastmi, ve kterých mohou být přenosové linky provozovány na hranici zatížitelnosti. Zároveň stabilitu elektrizační soustavy ohrožují extrémní atmosférické podmínky (teplota, vítr, apod.) nebo zanedbání terénních úprav oblastí, ve kterých jsou elektrické linky postaveny.

Mezi sledovaná kritéria bezpečnosti provozu elektrizační soustavy patří i řešení napěťové stability. Analyzování napěťové stability se klasifikuje z hlediska poruchy do dvou různých scénářů. V případě velkých poruch, jako jsou výpadek zdroje nebo ztráta zatížení, se napěťová stabilita určuje pomocí nelineární dynamické analýzy. U malých poruch se používá postupná změna zatížení a soustavu je tak možno řešit v ustáleném stavu.

Za účelem sledování bezpečnosti provozu elektrizační soustavy v ustáleném stavu z hlediska napěťové stability byla vytvořena tato diplomová práce. V této práci je popsán postup k vytvoření uzlové admitanční matice. Dále jsou zde popsány dvě nejpoužívanější metody pro řešení chodu soustavy, a to Gauss-Seidelova a Newton-Raphsonova metoda. K reálnějšímu posouzení chodu soustavy jsou do obou metod zahrnuty jalové meze generátorů u PU uzlů. Další kapitola se zabývá napěťovou stabilitou. Zejména pak řešení napěťové stability v ustáleném stavu “hrubou“ silou, řešení napěťové stability pomocí základních analytických vztahů pro obecnou 2-uzlovou soustavu a pak aplikování metody pro určení nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě. Závěrečná kapitola se zabývá zhodnocením výsledků získaných ze softwarů vytvořených pro řešení výše zmíněné problematiky, které jsem vytvořil v rámci této diplomové práce.

1 Elektrizační soustava ČR

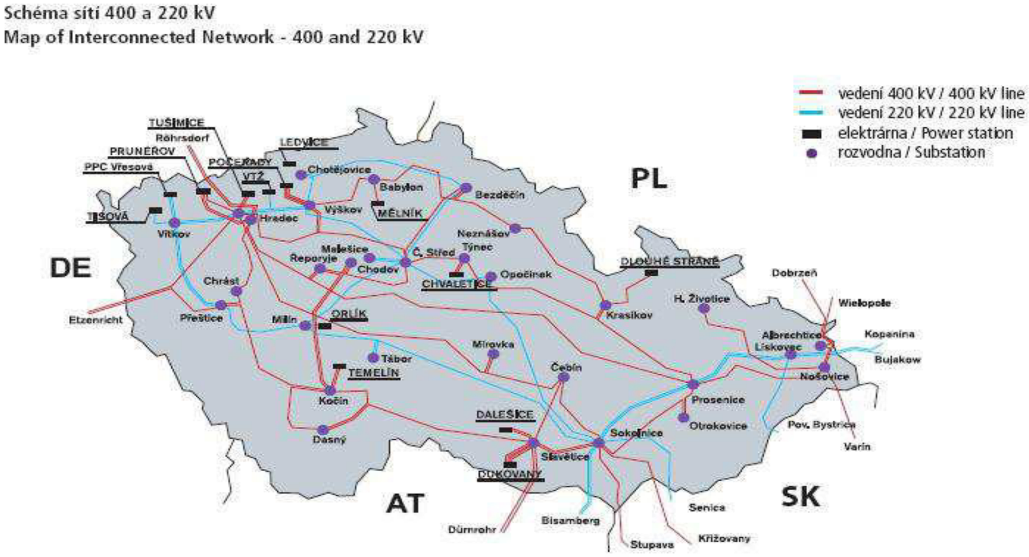
Elektrizační soustava je ucelený systém energetických zařízení pro výrobu, přenos, rozvod, akumulaci a spotřebu elektrické energie. Tento systém musí zajistit dodávku elektrické energie v požadovaném místě, čase a kvalitě. Skládá se z dalších soustav a to z elektrárenské, přenosové, distribuční a spotřebitelské soustavy. Každá soustava je tvořena elektrickými zařízeními či stanicemi (transformovny, rozvodny, měnírny, atd.), které jsou propojeny elektrickými sítěmi.

Následující kapitoly 1.1 a 1.2 byly zpracovány na základě materiálů v literatuře [1], které jsem prostudoval a zpracoval.

1.1 Konstrukce a způsob provozu

Rozdělení elektrizačních sítí na přenosovou a distribuční soustavu má svůj význam jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska jejich provozu a řízení.

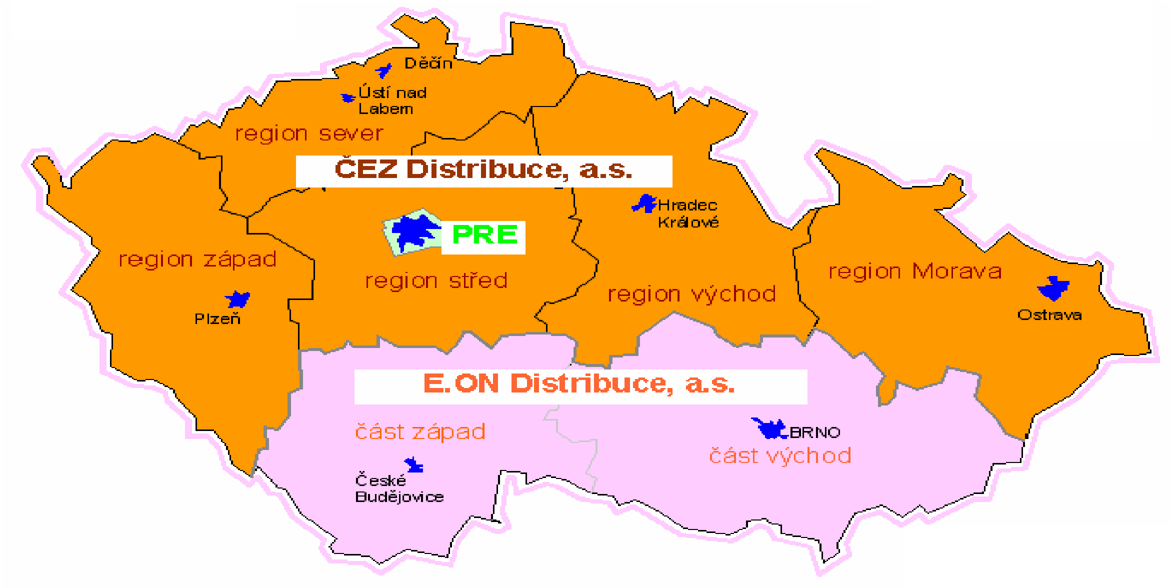
Hlavním úkolem přenosové soustavy je propojení uzlů tzv. pilotních uzlů, do kterých je přiváděna elektrická energie z hlavních výrobních jednotek (systémových zdrojů elektrické energie). Z těchto uzlů je přenášena elektrická energie do rozvodných soustav tak, aby bylo rozložení výkonu v celé oblasti optimální. Tato soustava je nazývána nadřazená soustava díky svému dominantnímu postavení. Nadřazená soustava je tvořena pomocí dvou napěťových úrovní 400 kV a 220 kV (110 kV na dvou místech ČR) a je řešena jako okružní síť. Nadřazená soustava je zároveň propojena s ostatními zahraničními soustavami. Provozovatelem přenosové soustavy v České Republice je společnost ČEPS.



Obr. 1.1-1: Schéma přenosové soustavy ČR [12]

Distribuční neboli rozvodná soustava je soustava umožňující přivedení elektrické energie ke spotřebitelům. Do distribuční soustavy je elektrická energie přivedena z přenosové soustavy. Dále však do této soustavy jsou připojovány elektrické zdroje o menších jmenovitých výkonech, jako jsou například malé vodní elektrárny a průmyslové elektrárny. V současnosti jsou do distribuční soustavy připojovány obnovitelné zdroje energie především fotovoltaické elektrárny nebo větrné elektrárny či větrné farmy. Distribuční soustava je provozována na hladině vysokého, nízkého napětí a na hladině 110 kV. Z hlediska rozvodu elektrické energie je provozována paprskovitě nebo formou průběžného rozvodu.

Distribuční soustava je rozdělena mezi tři provozovatel. Největší část distribuční soustavy vlastní společnost ČEZ, druhým největším provozovatelem je společnost E-ON a nejmenším provozovatelem je společnost PRE – Pražská energetika.



Obr. 1.1-2: Rozdělení působností distribučních společností [13]

Elektrické sítě jsou řešeny různými napěťovými úrovněmi. Volba přenosového a rozvodného zařízení je dána nejen technickou, ale i ekonomickou rozvahou, přičemž hlavním parametrem je velikost přenášeného výkonu a vzdálenost. Během elektrifikace vznikala řada různých jmenovitých napětí dle příslušného zařízení. Postupem času se zavedly normalizované řady napětí, ke kterým byly následně přiřazeny maximální provozovací hodnoty napětí.

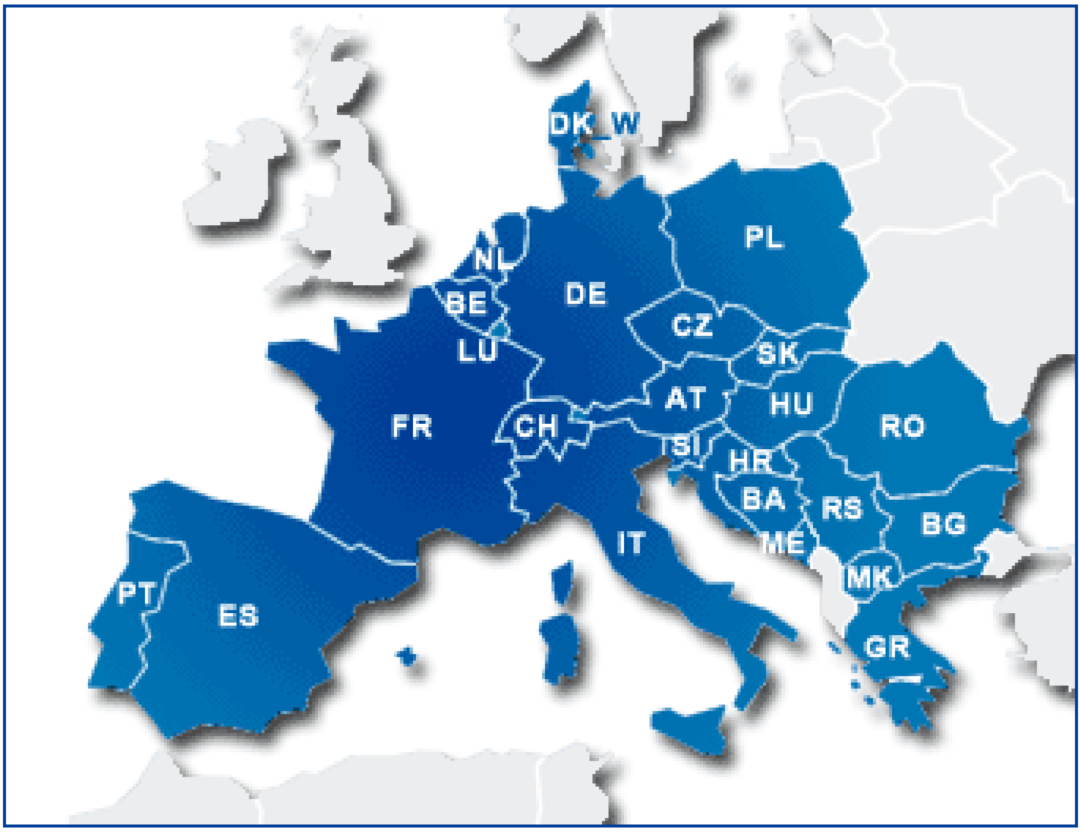
ČR [kV]	6	10	-	22	35	-	-	110	-	-	220	-	400
IEC [kV]	6,6	11	16	22	33	47	66	122	132	150	220	275	380

Tab. č. 1.1-1: Normalizovaná řada napětí [1]

1.2 Propojení zahraničních soustav

Historie propojení se zahraničními soustavami úzce souvisí s politickou situací. Do roku 1990 bylo propojení naší soustavy se západoevropskou soustavou realizováno jen místně pro přenos menších výkonů. Propojení se řešilo s Rakouskem a SRN pomocí stejnosměrných propojek, protože synchronní propojení nebylo technicky možné. Elektrizační soustava byla synchronně propojena se systémem PES CDO – MIR (Propojené elektrizační soustavy evropských zemí RVHP, řízené Centrální dispečerskou organizací).

Po roce 1990 se státy jako ČSFR, Maďarsko a Polsko rozhodly připojit se synchronně k západní části Evropy a zlepšit tak technickou úroveň svých elektrizačních soustav. Nejprve se ČSR zapojila do soustavy CENTREL, poté se v roce 1998 stala součástí UCPTE a po vstupu do Evropské Unie je Česká Republika připojena do soustavy UCTE.



Obr. 1.2-1: Synchronní soustava UCTE [14]

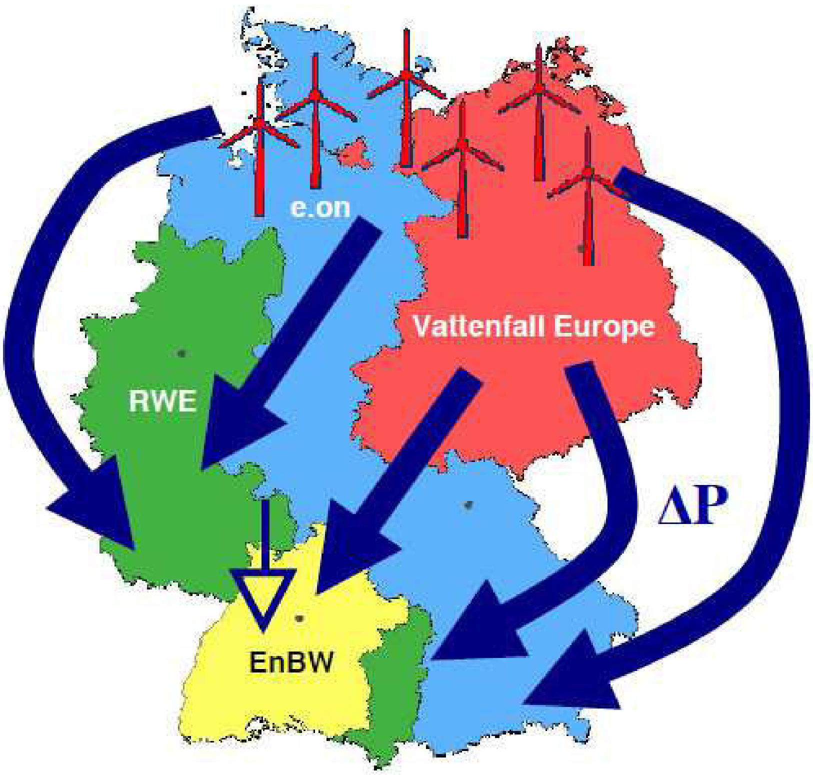
1.3 Provoz ES v současné době

V současnosti je provoz elektrizační soustavy závislý na mnoho faktorech ovlivňující bezpečný chod. Bezpečnost chodu soustavy může být narušena různými příčinami, jako jsou například velké poruchy v síti (výpadek velkého zdroje) nebo zřetězení několika poruch, které mohou mít za následek výpadek napájení nebo přechod do havarijních režimů (Ostrovní provoz). Mezi časté příčiny narušení bezpečného provozu se řadí například nepříznivé extrémní situace (extrémní počasí, plánované opravy), neuvážená lidská ekonomická činnost (liberalizace trhu) a také absence podpůrných programů řešící odhad bezpečnosti soustavy v reálném čase. Tato podkapitola je sepsána na základě textů v literaturách [10] a [17].

Při vyhodnocování bezpečnosti chodu soustavy je možno se poučit z historických událostí, které vinou mnoha faktorů dospěly až k úplné ztrátě napájení neboli black-outu. K nejznámějším výpadkům patří black-out ve státě New York v roce 2003. Tento black-out způsobilo zanedbání terénních úprav, extrémní letní počasí a výpadek velkého zdroje o výkonu 597 MW, které zapříčinilo prodloužení vodiče venkovního vedení 345 kV. V důsledku prodloužení došlo k jednofázovému zkratu při kontaktu vodiče se stromem. Přetížení vyvolalo kaskádovité šíření poruchy, postupné vypnutí přenosových vedení působením ochran, vznik ostrovního provozu a poté výpadek dodávky elektrické energie. Celkový výpadek představoval 61 800 MW. Událost zasáhla 265 elektráren s 508 bloky a bez elektřiny zůstalo 50 milionů obyvatel. Dalším známým black-outem je výpadek elektrické energie v Itálii, která je silně závislá na dovozu elektrické energie z okolních států. Tento výpadek byl rovněž způsoben kaskádovitým šířením poruch. Kde první příčinou byl jednofázový zkrat na hraničním vedení. Díky silné závislosti dovozu byly ostatní vedení přetěžovány a vlivem oteplení vodičů se zvětšil průhyb lan vedení. Zanedbáním terénních úprav došlo k další poruše, které mělo již katastrofální následky. Obnova soustavy trvala v průměru osm až šestnáct hodin, ale některé části jižní Itálie byly bez elektřiny až tři dny. V minulosti byly tyto výpadky způsobeny chybným vyhodnocením situace dispečerů, špatné funkce ochran nebo použitím softwarových nástrojů, které nebyly dostatečně vyvinuty.

V současné době bezporuchový chod soustavy UCTE nejvíce ohrožují nepravidelné dodávky výkonů z obnovitelných zdrojů (OZE). Především Německo, které je odstoupilo od koncepce jaderných zdrojů, představuje v Evropské unii velmoc ve větrné a solární energetice. Větrné farmy na německém pobřeží Severního moře mají v současné době výkon 27 GW. Výkon německých solárních elektráren činil koncem roku 2010 téměř 17GW.

Zároveň v Německu prosazují další výstavby OZE. Již v roce 2020 mají větrné elektrárny v severní oblasti dosáhnout výkonu až 47 GW a solární elektrárny až 50 GW. Německu však scházejí přenosová vedení, která by tyto velké výkony přenesly. V současné době existuje několik přenosových cest, z nichž dvě vedou přes Českou Republiku (viz Obr. 1.3-1). V době výroby elektrické energie větrné farmy v severní části Německa, kterou nelze pevně předpovědět, dochází k přenosům těchto obrovských výkonů přes naše území, což velice ohrožuje bezpečný chod přenosové soustavy ČR. Provozovatel přenosové soustavy ČEPS zvažuje výstavbu transformátorů s úhlovou regulací (Phase Shifting Transformers) v pohraničních oblastech, které by byly schopny tyto velké výkonové toky omezit.



Obr. 1.3-1: Znázornění toku výkonů z větrné farmy v severním Německu [18]

V České Republice je bezpečnost chodu soustavy založena na kritérii *N-1* (zajištění stálého provozu i při výpadku libovolné větve soustavy), kterou zajišťuje provozovatel přenosové soustavy ČEPS s použitím kontingenční analýzy. Zároveň se však snaží dodržovat kritérium *N-2*, které je nařízené pro provoz jaderných elektráren.

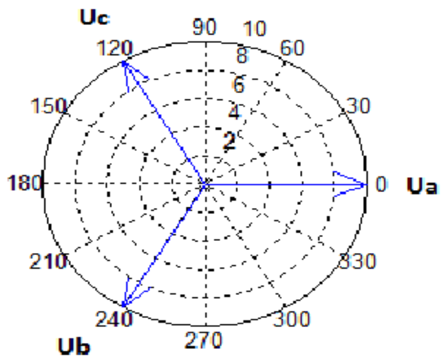
2 Chod soustavy

Elektrizační soustava je velice komplikovaný systém složený ze zdrojů elektrické energie (generátorů), vedení, transformátorů, spotřebičů a různých kompenzačních zařízení. Pod pojmem "chod soustavy" si lze představit úlohu pro určení vzájemných poměrů mezi uzlovými a větvovými aktivními veličinami. Tedy při řešení problematiky chodu soustavy zjišťujeme vzájemné napěťové a proudové veličiny v uzlech elektrizační soustavy a také větvové výkonové toky, ze kterých je možno dále dořešit činné a jalové ztráty v elektrizační soustavě či ztráty v jednotlivých větvích soustavy.

Informace zpracované v kapitole 2 jsem zpracoval na základě prostudování textů v literaturách [2], [3], [4], [6] a [7].

Pro řešení chodu soustavy platí následující předpoklady:

- analýza pouze ustálených stavů
- rovnice popisující obvod jsou lineární
- napětí a proud mají sinusový průběh → možnost použití SKM
- třífázové sítě jsou zadány souměrně → soustavu lze řešit jako jednofázově (zbylé dvě fáze dopočteme pootočením o ± ⅔π)



Obr. 2-1: Třífázové souměrné napětí [16]

Při analytickém řešení chodu soustavy vycházíme z platnosti Kirchhoffových zákonů (pro napětí i proud) a z Ohmova zákona. Z hlediska řešení pomocí výpočetní techniky je nejvýhodnější použití **metody uzlových napětí**.

Základní výhody pro použití této metody jsou zejména:

- jednoduché značení uzlů přímo v jednofázovém schématu
- jednoduchá příprava dat
- napětí v uzlech je přímo dáno řešením, proudy se snadno dopočtou
- příčné parametry soustavy neznamenají obtíže

Soustava se řeší pomocí poměrných jednotek, které jsou vztaženy na zvolené napětí (U_V) a výkon (S_V). Pro numerický výpočet je použití poměrných jednotek výhodnější z hlediska rychlejší konvergence.

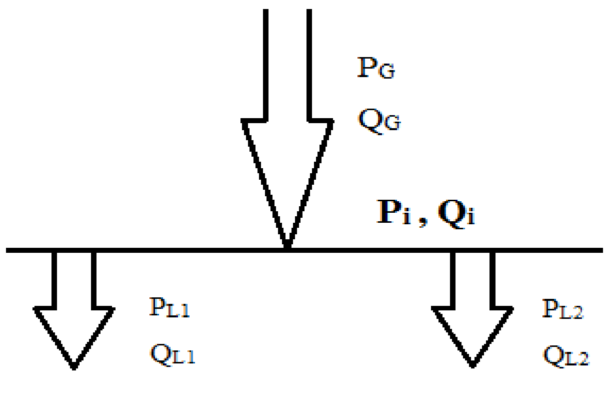
Řešení chodu soustavy je podmíněno minimem vstupních dat nutných pro řešení, mezi které zejména patří:

- impedance (admitance) všech větvových prvků soustavy
- velikost napětí a úhel napětí v referenčním uzlu
- velikost napětí v PU uzlech
- činný výkon v PU a PQ uzlech
- jalový výkon v PQ uzlech

Pro analyzování vlastností chodu soustavy je potřeba mít dostatečný počet výstupních proměnných, kterými jsou:

- velikost napětí (U_i) a úhel (θ_i) v každém uzlu
- dodávaný a odebíraný výkon v každém uzlu (P_G, Q_G, P_L, Q_L)
- výkonové toky na každé straně větve (P_{ik}, P_{ki}, Q_{ik}, Q_{ki})
- větvové ztráty (ΔP_{ik}, ΔQ_{ik})
- výroba a spotřeba výkonu v každém kompenzačním prostředku (P_{sh_i}, Q_{sh_i})
- celkové ztráty v systému (ΔP_C, ΔQ_C)

Ve všech uzlech elektrizační soustavy dochází k "přítokům" a "odtokům" výkonů, takže celkový výkon v jednotlivých uzlech je dán součtem injektovaného a odebíraného výkonu. Pro řešení chodu soustavy se uvažuje tzv. **znaménková dohoda výkonů**:



Obr. 2-2: Uzel *i* demonstrující znaménkovou dohodu

Na obrázku (Obr. 2-2) je patrné, že výkony přitékající do uzlu, tzv. injektované výkony, se uvádějí se znaménkem plus (+) a výkony odtékající se uvádějí se znaménkem mínus (-).

$$\begin{aligned} P_i &= P_G + P_{L1} + P_{L2} \\ Q_i &= Q_G + Q_{L1} + Q_{L2} \end{aligned} \qquad (2\text{-}1)$$

2.1 Definování elektrické sítě

Elektrizační soustava nebo elektrická síť je elektrický obvod, který je tvořen různými **větvemi** a jsou spojeny do **uzlů** soustavy.

2.1.1 Uzel

Uzel v soustavě je kontrolní místo, kde dochází k měření, diagnostikování nebo sledování aktivních uzlových veličin. Můžeme si ho představit jako rozvodnu, transformovnu, odběr či připojení nadřazené soustavy. Mezi aktivní uzlové veličiny patří napětí ($\bar{U}$) neboli velikosti napětí (U) a velikosti úhlu napětí (θ), proud ($\bar{I}$) a velikost činného výkonu a jalového výkonu (P a Q).

Mezi těmito veličinami platí tyto vztahy:

$$\begin{aligned} \overline{S}_i &= P_i + jQ_i = 3\overline{U}_{if} \cdot \overline{I}_i^* = \sqrt{3}\,\overline{U}_i \cdot \overline{I}_i^* \\ \overline{I}_i &= \frac{\overline{S}_i^*}{\sqrt{3}\,\overline{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3}\,\overline{U}_i^*} \\ \overline{U}_i &= U_i e^{j\theta_i} \qquad \overline{U}_i^* = U_i e^{-j\theta_i} \\ P_i &= \sqrt{3}U_i I_i \cos\varphi_i \qquad Q_i = \sqrt{3}U_i I_i \sin\varphi_i \end{aligned} \qquad (2.1.1\text{-}1)$$

Podle základních veličin charakterizujících uzel rozlišujeme tři typy uzlů:

- **Referenční uzel = Uzel soustavy**
  Jedná se o uzel s největším elektrárenským blokem v síti nebo se také může jednat o uzel propojující danou soustavu s nadřazenou soustavou nebo se zahraniční soustavou**.** Pro jednoznačné řešení chodu soustavy musíme určit vždy alespoň jeden uzel jako referenční. V referenčním uzlu jsou definovány jako vstupní data velikost napětí (U) a úhel napětí (θ). Velmi často se zadává nulová vstupní hodnota úhlu napětí. Výstupní data referenčního uzlu jsou výsledný činný a jalový výkon (P a Q).

- **Elektrárenský uzel = PU uzel**

  Reprezentuje uzel s přímo připojeným elektrárenským blokem či elektrárnou, kde je definován činný výkon (P) a nastavená velikost napětí (U). Výstupní data u elektrárenského uzlu jsou výsledný jalový výkon (Q) a velikost úhlu napětí (θ).

- **Odběrový uzel = PQ uzel**

  Charakteristickými veličinami pro tento uzel jsou činný výkon a jalový výkon (P, Q). Jsou dány rozdílem injektovaného výkonu do tohoto uzlu a výkonu odebíraného. Výstupními veličinami odběrových uzlů jsou velikost napětí (U) a velikost úhlu napětí (θ). Převážná většina uzlů v soustavě jsou právě PQ uzly.

2.1.2 Větve

Větve elektrické sítě neboli elektrického obvodu jsou tvořeny elektrickými vedeními, transformátory, kondenzátory a tlumivkami. Při znalosti větvových parametrů můžeme určit tzv. větvové toky, ze kterých lze vypočítat ztráty na vedení, transformátorech či ztráty celé řešené soustavy.

U větvových prvků v elektrické soustavě rozlišujeme parametry **aktivní** a **pasivní**. Mezi aktivní parametry větvových prvků patří:

- proud ve větvi mezi uzly *i, k* .... $\bar{I}_{ik}$ ($\bar{I}_{ki}$) na straně uzlu *i (k)*
- rozdíl napětí ve větvi mezi uzly *i, k* .... $\Delta\bar{U}_{ik} = \bar{U}_i - \bar{U}_k$
- úhel mezi napětími uzlů *i, k* .... $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$
- činný výkonový tok ve větvi mezi uzly *i, k* ..... P_{ik} (P_{ki}) na straně uzlu *i (k)*
- jalový výkonový tok ve větvi mezi uzly *i, k* .... Q_{ik} (Q_{ki}) na straně uzlu *i (k)*

Pasivní parametry větvových prvků se dále dělí na **podélné** a **příčné**. Jako podélné parametry jsou označovány prvky mezi uzly *i* a *k* a jako příčné parametry jsou označovány prvky, které jsou mezi větví a společným pólem (zemí).

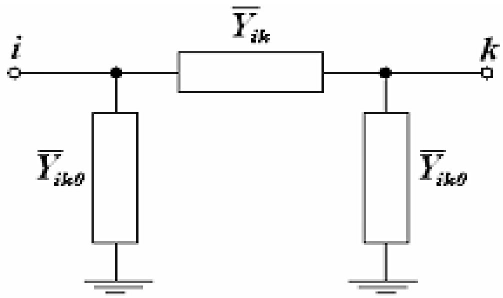
2.2 Modelování chodu soustavy

Při tvorbě náhradního schématu elektrizační soustavy vycházíme z výše uvedených předpokladů. Jednotlivé prvky soustavy se namodelují pomocí jejich náhradních schémat. V elektrizační soustavě se nejvíce vyskytují vedení a dvouvinuťové transformátory, proto se na odvození jejich parametrů zaměřím v následujících dvou podkapitolách.

2.2.1 Náhradní schéma vedení

Elektrické vedení je prvek v elektrizační soustavě, které má za úkol přenášet elektrickou energii na různé vzdálenosti na stejné napěťové hladině. Při řešení chodu soustavy se můžeme setkat s vedeními venkovními nebo kabelovými. Každý typ vedení je charakteristický svými pasivními parametry.

Vedení modelujeme ve tvaru symetrického Π – článku a to zejména z důvodu snadnější formulace rovnic a následné výpočty.



Obr. 2.2.1-1: Náhradní schéma elektrického vedení [2]

Podélná impedance resp. admitance je tvořena provozní rezistancí (R_P) a provozní indukčností (L_P). Příčná admitance resp. impedance je tvořena rovněž dvěma prvky a to vodivostí (G_{ik0}) a kapacitní susceptancí (B_{ik0}).

- **Pro podélné parametry platí:**

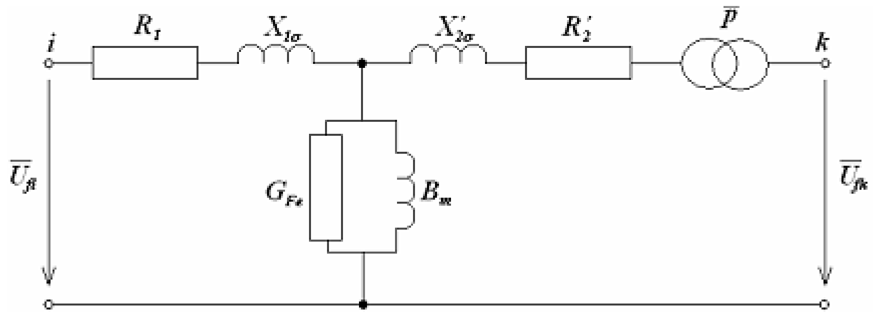
$$\overline{Y}_{ik} = \frac{1}{\overline{Z}_{ik}} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} - j\frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \qquad (2.2.1\text{-}1)$$

- **Pro příčné parametry platí:**

$$\overline{Y}_{ik0} = \frac{1}{2}(G_{ik0} + jB_{ik0}) \qquad (2.2.1\text{-}2)$$

2.2.2 Náhradní schéma transformátoru

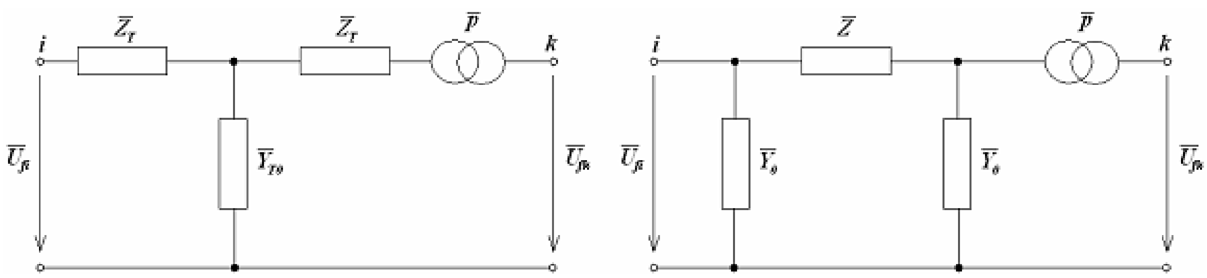
Dvouvinuťový transformátor je využíván v elektrizační soustavě pro transformaci elektrických veličin mezi různými napěťovými hladinami. Na rozdíl od vedení se dvouvinuťový transformátor převážně modeluje v náhradním schématu jako T – článek.



Obr. 2.2.2-1: Náhradní schéma dvouvinuťového transformátoru [2]

Na obrázku (Obr. 2.2.2-1) je náhradní schéma dvouvinuťového transformátoru ve tvaru symetrického T – článku, ke kterému je připojen sériově ideální transformátor s komplexním převodem ($\overline{p}$). Hodnoty v náhradním schématu jsou přepočteny na stranu primárního napětí čili na stranu uzlu *i*.

Pro výpočet všech pasivních parametrů je nutné znát štítkové hodnoty transformátoru. Z těchto hodnot, lze následně dopočítat všechny podélné i příčné parametry. Při znalosti všech parametrů náhradního schématu dvouvinuťového transformátoru ve tvaru symetrického T – článku lze toto schéma přetransfigurovat na více požadované náhradní schéma, které je ve tvaru symetrického Π – článku (viz Obr. 2.2.2-2). Pro transfiguraci se používají vztahy pro převod Y–D (hvězda – trojúhelník).



Obr. 2.2.2-2: Transformace z T - článku na Π – článek [2]

$$\begin{aligned}\overline{Z}_T &= R_1 + jX_{1\sigma} = R_2^{'} + jX_{2\sigma}^{'} \\ \overline{Y}_{T0} &= G_{FE} - jB_m\end{aligned} \quad \cong \quad \begin{aligned}\overline{Z} &= R_K + jX_K \cong 2\overline{Z}_T \\ \overline{Y}_0 &= \frac{1}{2}\left(G_{FE} - jB_m\right) \cong \frac{1}{2}\overline{Y}_{T0}\end{aligned} \qquad (2.2.2\text{-}1)$$

2.3 Odvození admitanční matice

Admitanční matice resp. uzlová admitanční matice je matice popisující elektrizační soustavu pomocí jejich admitancí vypočtených z pasivních parametrů všech prvků soustavy.

Pro vyjádření napěťových a proudových poměrů vycházíme z jedné z těchto rovnic:

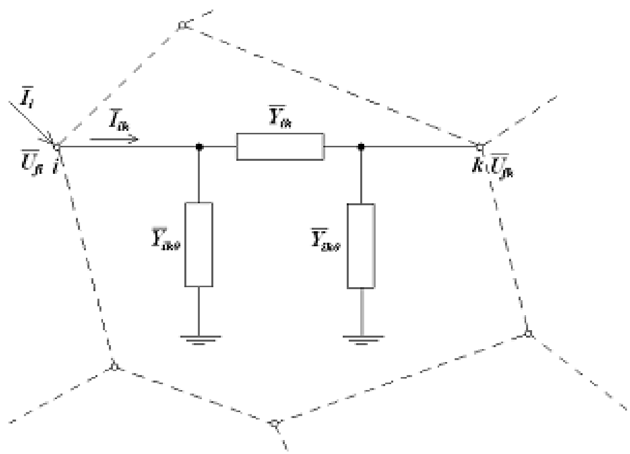
$$\overline{\underline{I}} = \overline{\underline{A}} \cdot \overline{\underline{U}}_f \tag{2.3-1}$$

$$\overline{\underline{U}}_f = \overline{\underline{Z}} \cdot \overline{\underline{I}} \tag{2.3-2}$$

kde: $\overline{\underline{I}}$ .... sloupcový vektor injektovaných proudů do sítě
$\overline{\underline{U}}_f$ .... sloupcový vektor fázových napětí v uzlech
$\overline{\underline{A}}$ .... čtvercová uzlová admitanční matice
$\overline{\underline{Z}}$ .... čtvercová impedanční matice

2.3.1 Začlenění vedení

Pro odvození uzlové admitanční matice využijeme části zjednodušeného schématu elektrizační soustavy (viz. Obr. 2.3.1-1) s použitím rovnice (2.3-1) pro proudové poměry:



Obr. 2.3.1-1: Schéma pro odvození admitanční matice [3]

Celkový injektovaný proud do uzlu *i* $\bar{I}_i$ je roven součtu všech proudů vytékajících z uzlu *i* $\bar{I}_{ik}$:

$$\overline{I}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} \overline{I}_{ik} \tag{2.3.1-1}$$

kde: n .... počet uzlů soustavy

Proud ($\bar{I}_{ik}$) tekoucí z uzlu *i* do uzlu *k* určíme jako:

$$\overline{I}_{ik} = \overline{U}_{fi}\overline{Y}_{ik0} + (\overline{U}_{fi} - \overline{U}_{fk})\overline{Y}_{ik} = \overline{U}_{fi}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) - \overline{U}_{fk}\overline{Y}_{ik} \qquad (2.3.1\text{-}2)$$

Při dosazení rovnice 2.3.1-1 do rovnice 2.3.1-2 dostaneme vzorec pro celkový proud:

$$\overline{I}_{ik} = \overline{U}_{fi}\sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) - \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}\overline{U}_{fk}\overline{Y}_{ik} \qquad (2.3.1\text{-}3)$$

Nyní při úpravě rovnice 2.3.1-3 do admitančního tvaru dostaneme prvky matice:

Pro prvky na **hlavní diagonále** admitanční matice platí:

$$\overline{A}_{ii} = \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) \qquad (2.3.1\text{-}4)$$

Pro **mimodiagonální** prvky admitanční matice platí:

$$\overline{A}_{ik} = -\overline{Y}_{ik} \qquad (2.3.1\text{-}5)$$

2.3.2 Změny konfigurace sítě

Prvky admitanční matice značí, zda jsou nebo nejsou uzly v soustavě propojené. Pokud hodnota mimodiagonálního prvku matice je nulová, znamená to, že uzly nejsou vzájemně propojené.

Při změnách topologie sítě lze snadno admitanční matici aktualizovat (např. v případech **zapnutí** nebo **vypnutí** linky).

Nejprve uvážíme možnost **zapnutí** linky mezi uzly *i, k:*

$$\overline{A}_{ik-nová} = \overline{A}_{ik-puvodni} - \overline{Y}_{ik}$$
$$\overline{A}_{ii-nová} = \overline{A}_{ii-puvodni} + \overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0} \qquad \overline{A}_{kk-nová} = \overline{A}_{kk-puvodni} + \overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0} \qquad (2.3.2\text{-}1)$$

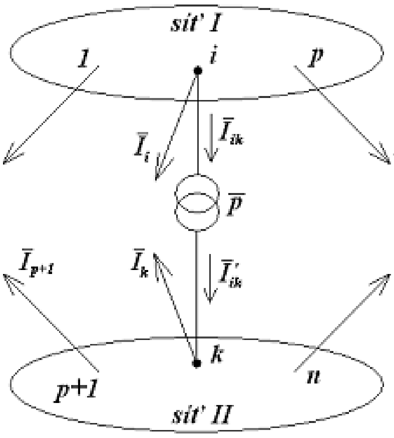
Nyní dojde k **vypnutí** linky mezi uzly *i, k*:

$$\overline{A}_{ik-nová} = \overline{A}_{ik-puvodni} + \overline{Y}_{ik}$$
$$\overline{A}_{ii-nová} = \overline{A}_{ii-puvodni} - \overline{Y}_{ik} - \overline{Y}_{ik0} \qquad \overline{A}_{kk-nová} = \overline{A}_{kk-puvodni} - \overline{Y}_{ik} - \overline{Y}_{ik0} \qquad (2.3.2\text{-}2)$$

2.3.3 Začlenění transformátorů

Elektrizační soustava obsahuje několik napěťových hladin, které jsou vzájemně propojeny. Pro propojení napěťových hladin užíváme transformátory, které musíme rovněž zahrnout do admitanční matice.

Pro odvození rovnic využijeme nejjednodušší možný případ a to propojení dvou napěťových hladin pomocí transformátoru (viz Obr. 2.3.3-1).



Obr. 2.3.3-1: Schéma propojení dvou sítí dvouvinuťovým transformátorem [3]

Na výše uvedeném obrázku předpokládáme dvě sítě (*I, II*) o různých napěťových hladinách, které jsou propojeny transformátorem s komplexním převodem ($\overline{p}$). Ze sítě *I* vytékají proudy ($\overline{I}_1,...,\overline{I}_i,....\overline{I}_p$) a u sítě *II* jsou vytékajícími proudy ($\overline{I}_{p+1},...,\overline{I}_k,....\overline{I}_n$).

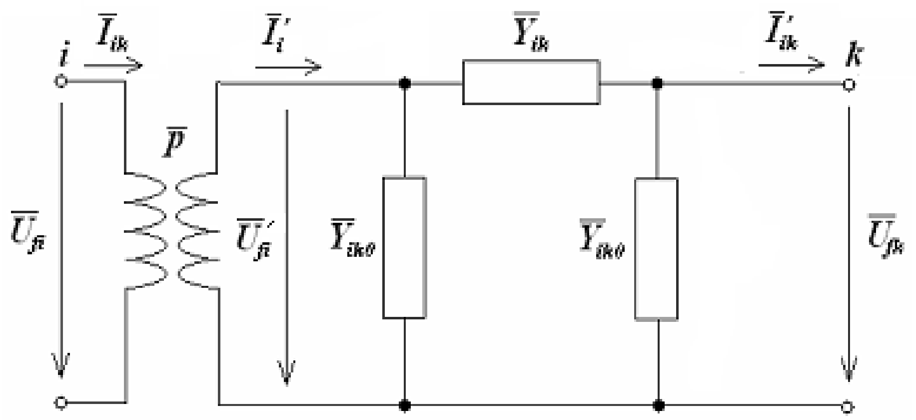
Pro úplnost je nutné dodefinovat proudy ($\overline{I}_{ik},\overline{I}'_{ik}$). Při aplikaci znaménkové dohody na řešené schéma (Obr. 2.3.3-1) je patrné, že proud ($\overline{I}_{ik}$) je proud vytékající z uzlu *i*, proto je označen zápornou hodnotou (se znaménkem “–”) a proud ($\overline{I}'_{ik}$) je proud vtékající do uzlu *k*, proto je označen kladnou hodnotou (se znaménkem “+”).

S využitím metody uzlových napětí byly sestaveny admitanční matice pro sítě *I, II*:

$$\begin{bmatrix} \overline{I}_1 \\ \vdots \\ \overline{I}_i - \overline{I}_{ik} \\ \vdots \\ \overline{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_{11} & \cdots & \overline{A}_{1i} & \cdots & \overline{A}_{1p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{i1} & \cdots & \overline{A}_{ii} & \cdots & \overline{A}_{ip} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{p1} & \cdots & \overline{A}_{pi} & \cdots & \overline{A}_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U}_{f1} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fi} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fp} \end{bmatrix} \qquad (2.3.3\text{-}1)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{I}_{p+1} \\ \vdots \\ \overline{I}_k + \overline{I}'_{ik} \\ \vdots \\ \overline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_{p+1,p+1} & \cdots & \overline{A}_{p+1,k} & \cdots & \overline{A}_{p+1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{k,p+1} & \cdots & \overline{A}_{kk} & \cdots & \overline{A}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{n,p+1} & \cdots & \overline{A}_{nk} & \cdots & \overline{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U}_{fp+1} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fk} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fn} \end{bmatrix} \qquad (2.3.3\text{-}2)$$

V rovnicích (2.3.3-1 a 2.3.3-2) jsou jedinými neznámými proudy ($\overline{I}_{ik}, \overline{I}'_{ik}$), které je možné odvodit z náhradního schématu transformátoru (Obr. 2.3.3-2) ve tvaru symetrického Π–článku a uvážením ideálního bezeztrátového transformátoru s komplexním převodem ($\overline{p}$).



Obr. 2.3.3-2: Schéma dvouvinuťového transformátoru [2]

Nejprve zavedeme rovnici pro komplexní převod ($\overline{p}$):

$$\overline{p}_{ik} = \frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{U}'_{fi}} \Rightarrow \overline{U}'_{fi} = \frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{p}_{ik}} \qquad (2.3.3\text{-}3)$$

Nyní si spočteme hodnotu proudu ($\overline{I}'_{ik}$), který vytéká z transformátoru:

$$\overline{I}'_{ik} = \overline{Y}_{ik}(\overline{U}'_{fi} - \overline{U}_{fk}) - \overline{Y}_{ik0}\overline{U}_{fk} \qquad (2.3.3\text{-}4)$$

Při použití rovnic (2.2.3-3 a 2.2.3-4) a následné úpravě dostaneme:

$$\overline{I}'_{ik} = -\overline{U}_{fk}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) + \overline{Y}_{ik}\frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{\overline{p}}_{ik}} \qquad (2.3.3\text{-}5)$$

Dále stanovíme hodnotu proudu ($\overline{I}'_i$) těsně za převodem transformátoru:

$$\overline{I}'_i = \overline{Y}_{ik}(\overline{U}'_{fi} - \overline{U}_{fk}) + \overline{Y}_{ik0}\overline{U}'_{fi} \qquad (2.3.3\text{-}6)$$

′

Po dosazení z rovnice (2.3.3-3) dostáváme tvar:

$$\overline{I}'_i = \frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{\overline{p}}_{ik}}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) - \overline{Y}_{ik}\overline{U}_{fk} \qquad (2.3.3\text{-}7)$$

Pro bezeztrátový transformátor platí:

$$\begin{gathered}\overline{S}_i = \overline{S}'_i \\ 3\overline{U}_{fi}\overline{I}^*_{ik} = 3\overline{U}'_{fi}\overline{I}'^*_i\end{gathered} \qquad (2.3.3\text{-}8)$$

Při dosazení do výrazu (2.3.3-8) z rovnic (2.3.3-7 a 2.3.3-3) dostaneme rovnici:

$$\overline{U}_{fi}\overline{I}^*_{ik} = \frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{\overline{p}}_{ik}}\left(\frac{\overline{U}_{fi}}{\overline{\overline{p}}_{ik}}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) - \overline{Y}_{ik}\overline{U}_{fk}\right)^* \qquad (2.3.3\text{-}9)$$

Upravení výrazu dostaneme rovnici:

$$\overline{I}_{ik} = \left(\frac{\overline{U}_{fi}}{\left|\overline{p}_{ik}\right|^2}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) - \overline{Y}_{ik}\frac{\overline{U}_{fk}}{\overline{\overline{p}}^*_{ik}}\right) \qquad (2.3.3\text{-}10)$$

Finální maticový zápis pro transformátor vypadá takto:

$$\begin{bmatrix}\overline{I}_{ik} \\ \overline{I}'_{ik}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{1}{\left|\overline{p}_{ik}\right|^2}(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}) & -\frac{\overline{Y}_{ik}}{\overline{\overline{p}}^*_{ik}} \\ \frac{\overline{Y}_{ik}}{\overline{\overline{p}}_{ik}} & -(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0})\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\overline{U}_{fi} \\ \overline{U}_{fk}\end{bmatrix} \qquad (2.3.3\text{-}11)$$

Z rovnice (2.3.3-11) je vidět, že transformátor pozmění admitanční matici na čtyřech pozicích. Pokud je úhel převodu ($\overline{p}$) roven nule, poté admitanční matice zůstane symetrická. V opačném případě se admitanční matice stane nesymetrickou.

Transformátor, který propojuje dvě různé napěťové hladiny, tvořící větvový prvek mezi uzly *i* a *k*, změní strukturu admitanční matice na pozicích (*ii, ik, ki, kk*). Toto je výrazné zjednodušení pro tvorbu matice, protože stačí přepočítat pouze 4 prvky matice a nemusíme při změně konfigurace sítě přepočítávat celou síť nebo při změně převodu ($\overline{p}$) není třeba vytvářet celou admitanční matice znovu, tzn., stačí přepočítat jen prvky na třech pozicích s převodem.

V rovnici (2.3.3-12) je zahrnut transformátor do admitanční matice, kdy je nejprve uvažováno pouze vedení, a zbylé prvky jsou nulové. Poté jsme dosadili do admitanční matice rovnice pro každý transformátor.

$$\begin{bmatrix} \overline{I}_1 \\ \vdots \\ \overline{I}_i \\ \vdots \\ \overline{I}_p \\ \vdots \\ \overline{I}_k \\ \vdots \\ \overline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_{11} & \cdots & \overline{A}_{1i} & \cdots & \overline{A}_{1p} & \cdots & \overline{A}_{1k} & \cdots & \overline{A}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{i1} & \cdots & \overline{A}_{ii} + \dfrac{\left(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}\right)}{\left|\overline{p}_{ik}\right|^2} & \cdots & \overline{A}_{ip} & \cdots & \overline{A}_{ik} - \dfrac{\overline{Y}_{ik}}{\overline{p}_{ik}^{*}} & \cdots & \overline{A}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{p1} & \cdots & \overline{A}_{pi} & \cdots & \overline{A}_{pp} & \cdots & \overline{A}_{pk} & \cdots & \overline{A}_{pn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{k1} & \cdots & \overline{A}_{ki} - \dfrac{\overline{Y}_{ik}}{\overline{p}_{ik}} & \cdots & \overline{A}_{kp} & \cdots & \overline{A}_{kk} + \left(\overline{Y}_{ik} + \overline{Y}_{ik0}\right) & \cdots & \overline{A}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{A}_{n1} & \cdots & \overline{A}_{ni} & \cdots & \overline{A}_{np} & \cdots & \overline{A}_{nk} & \cdots & \overline{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U}_{f1} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fi} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fp} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fk} \\ \vdots \\ \overline{U}_{fn} \end{bmatrix} \quad (2.3.3\text{-}12)$$

2.3.4 Zahrnutí kompenzačních prvků

V elektrizační soustavě se vyskytují i kompenzační prostředky pro kompenzaci jalového výkonu v síti. Tyto prvky pak mají za úkol do sítě dodávat resp. ze sítě odebírat jalový výkon a tím odlehčovat síť a zvětšovat tak přenosovou kapacitu vedení.

Paralelní kapacitory se užívají pro kompenzaci jalového výkonů v uzlech elektrizační soustavy. Tyto prvky dodávají jalový výkon do sítě a usnadňují tak práci zdrojům elektrické energie. Dodávkami jalových výkonů se reguluje velikost napětí v uzlech soustavy.

Pro paralelní kapacitory jako kompenzátory platí:

$$B_{sh\_i} = \frac{Q_C}{U_n^2} > 0 \tag{2.3.4-1}$$

Paralelní induktory se nejvíce používají pro kompenzaci kapacitních (nabíjecích) proudů vedení při chodu naprázdno nebo při malých zatíženích. Tlumivka je zapojována dvojím způsobem. První způsob je přímé připojení do uzlu *i* proti zemi nebo je tlumivka připojena přes terciální vinutí transformátoru.

Pro paralelní induktory jako kompenzátory platí:

$$B_{sh\_i} = \frac{Q_C}{U_n^2} < 0 \tag{2.3.4-2}$$

Zahrnutí kompenzačních prvků do admitanční matice pak vypadá takto:

$$A_{ii\_nova} = A_{ii\_puvodni} + jB_{sh\_i} \tag{2.3.4-3}$$

Některé soustavy mají zapojeny paralelní kapacitory nebo induktory v referenčním uzlu soustavy. Takto zapojené kompenzační prvky u řešené soustavy reprezentují nadřazenou soustavu.

2.3.5 Tvorba admitanční matice – shrnutí

Admitanční matice nese vlastnosti a topologii elektrizační soustavy. Jednotlivé řádky a sloupce reprezentují čísla uzlů soustavy. V admitanční matici jsou zahrnuta vedení, transformátory a kompenzační prvky.

Základ matice je tvořen elektrickými vedeními, která tvoří propojení mezi jednotlivými uzly soustavy. V admitanční matici je každá linka reprezentována čtyřmi prvky. Při změně topologie sítě nemusíme přepočítat všechny prvky matice, ale stačí pouze přepočítat prvky, u kterých došlo ke změně.

Další prvky v admitanční matici jsou transformátory. Tyto prvky opět ovlivňují matici na čtyřech pozicích. Z těchto čtyř hodnot jsou tři ovlivněny komplexním převodem ($\overline{p}$), proto při přepínání odboček na transformátoru (v PS přepínání odboček pod zatížením) se změní pouze tři pozice v matici.

Zahrnutí kompenzačních prvků do admitanční matice je nejjednodušší. Tyto prvky ovlivňují pouze prvky na hlavní diagonále, protože tyto prvky nejsou nijak propojeny s jiným uzlem soustavy.

Ve většině případů dochází k tomu, že hodnota prvku v admitanční matici je rovna nule, tzn., že tento uzel není nijak vzájemně propojen s právě vyšetřovaným uzlem.

2.4 Numerické metody

Při řešení chodu soustavy se využívají matematické numerické metody, které pomocí iteračních cyklů naleznou řešení. Ve světě je mnoho numerických metod, mezi ty nejpoužívanější patří *Gauss–Seidelova* metoda a *Newton–Raphsonova* metoda. Každá z nich obsahuje své výhody i nevýhody použití.

2.4.1 Gauss–Seidelova numerická metoda

Gauss–Seidelova metoda je z hlediska matematického zápisu neboli jedna z nejjednodušších. Zároveň však tato jednoduchost zapříčiňuje vysoký počet iterací. Zejména u sítí s řádově stovkami až tisíci uzly se počet iterací pohybuje velmi vysoko. Hlavní pozorované parametry při řešení jsou velikost napětí U_i a úhel napětí θ_i.

Rovnice pro řešení Gauss – Seidelovy metody vychází ze závislosti fázorů sdružených napětí $\overline{U}_i$ na proudech $\overline{I}_i$:

$$\overline{U}_i^{(p)} = \frac{1}{\overline{A}_{ii}}\left[\sqrt{3}\overline{I}_i - \sum_{k=1}^{i-1}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p)} - \sum_{k=i+1}^{n}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p-1)}\right] \qquad (2.4.1\text{-}1)$$

Fázor proudu $\overline{I}_i$ se dá vyjádřit pomocí vztahu pro komplexní výkon $\overline{S}_i$:

$$\overline{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3}U_i^*} \qquad (2.4.1\text{-}2)$$

Po dosazení výrazu (2.4.1-2) do rovnice (2.4.1-1) dostáváme algoritmus pro řešení chodu soustavy pomocí Gauss–Seidelovy metody:

$$\overline{U}_i^{(p)} = \frac{1}{\overline{A}_{ii}}\left[\frac{P_i - jQ_i}{\overline{U}_i^{*(p-1)}} - \sum_{k=1}^{i-1}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p)} - \sum_{k=i+1}^{n}\overline{A}_{ik}\overline{U}_k^{(p-1)}\right] \qquad (2.4.1\text{-}3)$$

Pro uzly typu PU je hodnota Q_i neznámá, proto je potřeba před hlavním výpočetním algoritmem Gauss–Seidelovy metody její hodnotu určit:

$$Q_i^{(p)} = \mathrm{Im}\left\{\overline{U}_i^{(p)}\left[\sum_{k=1}^{i-1}\overline{A}_{ik}^{*}\overline{U}_k^{*(p)} + \sum_{k=i}^{n}\overline{A}_{ik}^{*}\overline{U}_k^{*(p-1)}\right]\right\} = Q_{Gi}^{(p-1)} + Q_{Li} \qquad (2.4.1\text{-}4)$$

Pro porovnání velikosti měřítka napětí $\overline{U}_i$ používáme scaling proces, který provádí korekci v PU – uzlech tak, aby velikost napětí byla rovna původní hodnotě U_{i_set}:

$$\overline{U}_i^{(p)} = \frac{\overline{U}_i^{(p)}}{\left|\overline{U}_i^{(p)}\right|} \cdot U_{i\_set} \tag{2.4.1-5}$$

Ukončení iteračního cyklu je opatřeno dvěma konvergenčními kritérii, která sledují maximální odchylky mezi velikostmi napětí a odchylky mezi úhly:

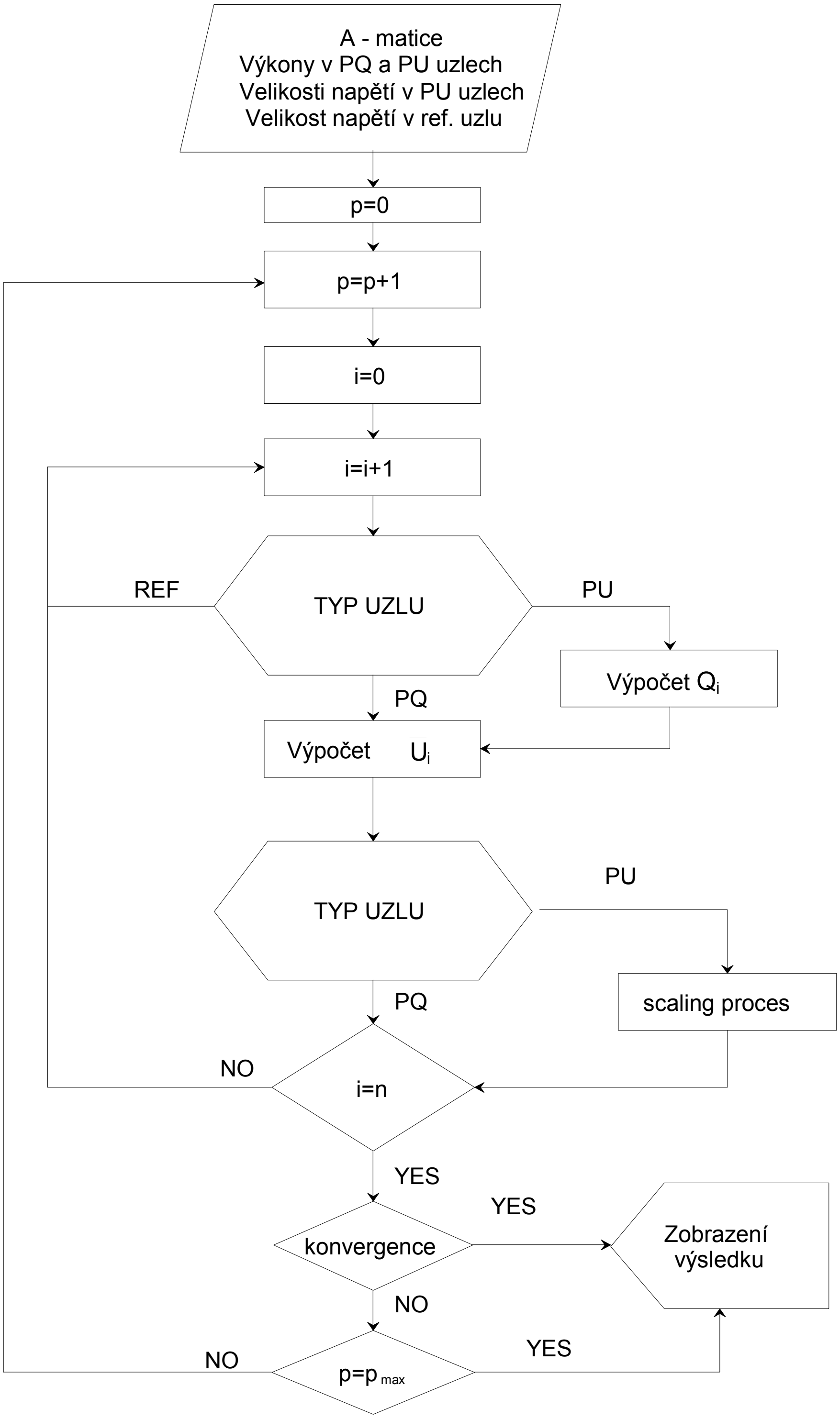
$$\max_i \frac{\left|U_i^{(p)} - U_i^{(p-1)}\right|}{U_i^{(p)}} \leq \varepsilon \qquad \max_i \left|\theta_i^{(p)} - \theta_i^{(p-1)}\right| \leq \varepsilon \tag{2.4.1-6}$$

Druhý způsob ukončení iteračního procesu je kritérium pro překročení maximální počtu iterací. Proto je-li hodnota počtu iterací p vyšší než maximální možná hodnota $p_{\max}$ (viz rovnice 2.4.1-7), cyklus je zastaven bez výsledného řešení:

$$p \leq p_{\max} \tag{2.4.1-7}$$

Gauss–Seidelova metoda vychází ze znalosti admitanční matice, výkonů v uzlech a znalosti velikostí napětí v uzlech včetně referenčního uzlu. Poté dochází k samotnému řešení, kdy na začátku dojde k lokalizaci referenčního uzlu. Tento uzel je pak u všech iterací neřešen, tzn. hodnoty velikosti napětí a fázového posunu jsou stejné na začátku i na konci iteračního procesu. Poté je spuštěn iterační cyklus, který dle výše zmíněných rovnic a vývojového diagramu řeší chod soustavy. Řešení chodu soustavy je zastaveno konvergenčními kritérii, která jsou popsány v rovnicích (2.4.1-6 a 2.4.1-7).

Celý iterační proces Gauss–Seidelovy metody je znázorněn pomocí vývojového diagramu na obrázku (Obr. 2.4.1-1):



Obr. 2.4.1-1: Vývojový diagram popisující Gauss-Seidelovu metodu

2.4.2 Newton – Raphsonova numerická metoda

Newton – Raphsonova metoda využívá metodu tečen, pomocí které se velice rychle blíží ke hledanému řešení. Tato metoda je aplikována na složitém matematickém algoritmu, který rapidně sníží počet iterací, a proto se tato metoda užívá u rozsáhlejších sítí pro jejich rychlé vyřešení.

Bohužel tato metoda není z hlediska matematické stability tak spolehlivá jako Gauss–Seidelova metoda. Při špatném zadání vstupních hodnot může metoda divergovat a nedosáhnout tak konečného řešení nebo konverguje k jinému (fyzikálně špatnému) řešení. Naopak výhodou této metody je, že v algoritmu se počítá pouze s reálnými čísly.

Při řešení chodu soustavy pomocí Newton–Raphsonovy metody vycházíme ze znalosti injektovaných činných a jalových výkonů do uzlu *i*:

$$\overline{S}_i = P_i + jQ_i \rightarrow \overline{S}_i^* = P_i - jQ_i = \sqrt{3} I_i U_i^* \qquad (2.4.2\text{-}1)$$

A ze znalosti proudů $\overline{I}_i$ závislých na sdružených napětí $\overline{U}_i$:

$$\sqrt{3}\overline{I}_i = \overline{U}_i \overline{A}_{ii} + \sum_{k=1}^{n} \overline{A}_{ik} \overline{U}_k \qquad (2.4.2\text{-}2)$$

V následujících rovnicích pro zjednodušení budeme používat vztah:

$$\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k \qquad (2.4.2\text{-}3)$$

Po dosazení rovnice (2.4.2-2 a 2.4.2-3) do výrazu (2.4.2-1) získáme následující vztah:

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= \left(\overline{U}_i \overline{A}_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} \overline{A}_{ik} \overline{U}_k \right) \overline{U}_i^* = \\ &= (G_{ii} + jB_{ii}) U_i^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} \left((G_{ik} + jB_{ik}) U_k (\cos\theta_k + j\sin\theta_k) U_i (\cos\theta_k - j\sin\theta_k) \right) \\ &= (G_{ii} + jB_{ii}) U_i^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} U_i U_k (\cos\theta_{ik} - j\sin\theta_{ik}) (G_{ik} + jB_{ik}) \end{aligned} \qquad (2.4.2\text{-}4)$$

Rovnici (2.4.2-4) rozdělíme na reálnou a imaginární část, ze kterých dostaneme vztahy pro injektované činné a jalové výkony do uzlu *i*:

$$P_i = G_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik})$$

$$Q_i = -B_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \qquad (2.4.2\text{-}5)$$

Výpočetní iterační algoritmus pro řešení chodu soustavy je zapsán následovně:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P}^{(p-1)} \\ \underline{\Delta Q}^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{H}^{(p-1)} & \underline{N}^{(p-1)} \\ \underline{J}^{(p-1)} & \underline{L}^{(p-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta^{(p)} \\ \dfrac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}} \end{bmatrix} \qquad (2.4.2\text{-}6)$$

Iterační algoritmus je složen z rozdílů činných a jalových výkonů, které tvoří tzv. mismatch vektor. Tyto rozdíly se dají vyjádřit z rovnice (2.4.2-5):

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

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{k=1}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \qquad (2.4.2\text{-}7)$$

Velikost sloupcového mismatch vektoru závisí na typu uzlů v soustavě:

PQ – uzel..................2 rovnice (ΔP_i a ΔQ_i)

PU – uzel..................1 rovnice (ΔP_i)

Referenční uzel..........0 rovnic

Základem algoritmu je Jacobiho matice, která je složena ze čtyř submatic:

$$\bar{\underline{J}} = \begin{bmatrix} \underline{H}^{(p-1)} & \underline{N}^{(p-1)} \\ \underline{J}^{(p-1)} & \underline{L}^{(p-1)} \end{bmatrix} \qquad (2.4.2\text{-}8)$$

Prvky na příslušných pozicích Jacobiho matice značí fyzické propojení uzlů a určují tak topologii soustavy. Každý z prvků jednotlivých submatic je vypočítán parciální derivací z rozdílů činného nebo jalového výkonu. Odvození těchto prvků je naznačeno v rovnicích (2.4.2-9 – 2.4.2.12) a v rovnicích (2.4.2-13 – 2.4.2.17).

Rovnice (2.4.2-9 – 2.4.2-12) popisují odvození prvků submatic $\underline{H}$, $\underline{N}$, $\underline{J}$ a $\underline{L}$ na hlavních diagonálách, kde $i = k$:

$$H_{ii} = -\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = = \frac{\partial}{\partial \theta_i}\left(G_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=i \\ k \neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = = \left(U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (-G_{ik} \sin\theta_{ik} + B_{ik} \cos\theta_{ik}) \right) = -(Q_i + B_{ii} U_i^2) \quad (2.4.2\text{-}9)$$

$$N_{ii} = -U_i \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} = U_i \frac{\partial P_i}{\partial U_i} = = U_i \frac{\partial}{\partial U_i}\left(G_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=i \\ k \neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = = \left(G_{ii} U_i^2 + G_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = P_i + G_{ii} U_i^2 \quad (2.4.2\text{-}10)$$

$$J_{ii} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = = \frac{\partial}{\partial \theta_i}\left(-B_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \right) = = \left(U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = P_i - G_{ii} U_i^2 \quad (2.4.2\text{-}11)$$

$$L_{ii} = -U_i \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} = U_i \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = = U_i \frac{\partial}{\partial U_i}\left(-B_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} + B_{ik} \cos\theta_{ik}) \right) = = \left(-2B_{ii} U_i^2 + U_i \sum_{k=i}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} + B_{ik} \cos\theta_{ik}) \right) = Q_i - B_{ii} U_i^2 \quad (2.4.2\text{-}12)$$

Výsledné rovnice pro prvky na hlavní diagonále jsou shrnuty v rovnici (2.4.2-13):

$$\begin{array}{ll} H_{ii} = -(Q_i + B_{ii} U_i^2) & N_{ii} = P_i + G_{ii} U_i^2 \\ J_{ii} = P_i - G_{ii} U_i^2 & L_{ii} = Q_i - B_{ii} U_i^2 \end{array} \quad (2.4.2\text{-}13)$$

Rovnice (2.4.2-14 – 2.4.2-17) popisují odvození prvků submatic $\underline{H}$, $\underline{N}$, $\underline{J}$ a $\underline{L}$ ležící mimo hlavní diagonálu, kde $i \neq k$:

$$H_{ik} = -\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial \theta_k}\left(G_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = \qquad (2.4.2\text{-}14)$$
$$= \frac{\partial}{\partial \theta_k}\left(G_{ii}U_i^2 + U_i U_k (G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k))... \right) =$$
$$= U_i U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik})$$

$$N_{ik} = -U_k \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_k} = U_k \frac{\partial P_i}{\partial U_k} =$$
$$= U_k \frac{\partial}{\partial U_k}\left(G_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=i \\ k\neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) \right) = \qquad (2.4.2\text{-}15)$$
$$= U_i U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik})$$

$$J_{ik} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial \theta_k}\left(-B_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=i \\ k\neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k))... \right) = \qquad (2.4.2\text{-}16)$$
$$= U_i U_k (-G_{ik} \cos\theta_{ik} - B_{ik} \sin\theta_{ik}) =$$
$$= -U_i U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik}) = -N_{ik}$$

$$L_{ik} = -U_k \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_k} = U_k \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} =$$
$$= U_k \frac{\partial}{\partial U_k}\left(-B_{ii}U_i^2 + U_i \sum_{\substack{k=i \\ k\neq i}}^{n} U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} + B_{ik} \cos\theta_{ik}) \right) = \qquad (2.4.2\text{-}17)$$
$$= U_i U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} + B_{ik} \cos\theta_{ik}) = H_{ik}$$

Prvky submatic ležících mimo hlavní diagonálu jsou shrnuty v rovnici (2.4.2-18):

$$H_{ik} = U_i U_k (G_{ik} \sin\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \qquad N_{ik} = U_i U_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \sin\theta_{ik})$$
$$J_{ik} = -N_{ik} \qquad L_{ik} = H_{ik} \qquad (2.4.2\text{-}18)$$

V případě PU uzlu neznáme hodnotu injektovaného jalového výkonu Q_i, kterou je nutné dopočítat:

$$Q_i^{(p-1)} = U_i^{(p-1)} \sum_{i=1}^{n} U_k^{(p-1)} (G_{ik} \sin \theta_{ik}^{(p-1)} - B_{ik} \cos \theta_{ik}^{(p-1)}) = Q_{Gi}^{(p-1)} + Q_{Li} \qquad (2.4.2\text{-}19)$$

Nyní jedinými neznámými v rovnici (2.4.2-6) jsou hodnoty přírůstkového vektoru, který je složen z hodnot přírůstků úhlu napětí $\Delta\theta$ a přírůstků velikosti napětí $\frac{\Delta U}{U}$. Tyto hodnoty jsou přičítány v update procesu v každé iteraci k předchozím hodnotám a získáváme tak nové hodnoty pro další iteraci.

Update proces pro úhel napětí a velikost napětí vypadají následovně:

$$\theta_i^{(p)} = \theta_i^{(p-1)} + \Delta\theta_i^{(p)} \qquad U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + \left(\frac{\Delta U_i^{(p)}}{U_i^{(p-1)}} \right) U_i^{(p-1)} \qquad (2.4.2\text{-}20)$$

Pro zastavení iteračního algoritmu je zavedeno konvergenční kritérium:

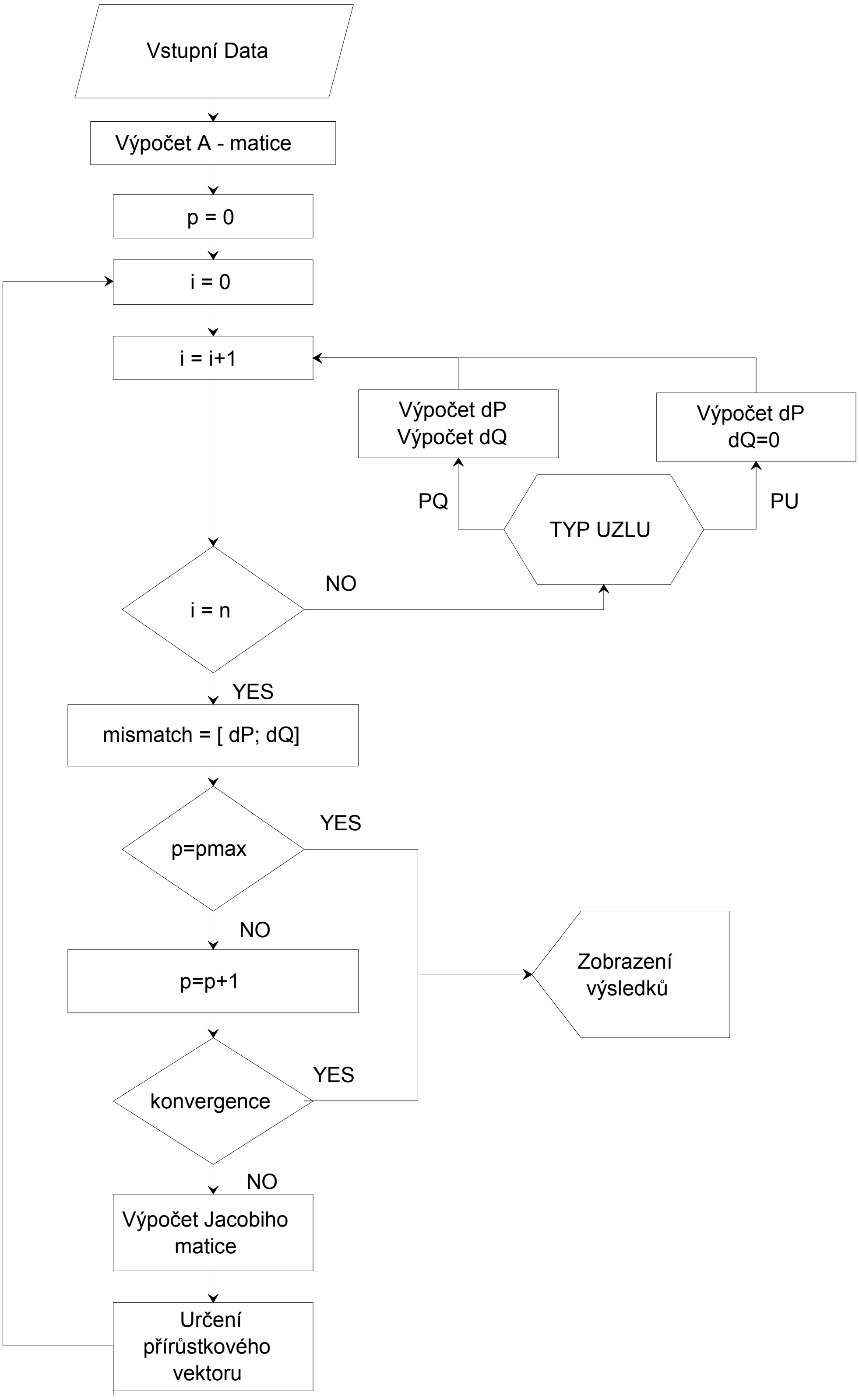
$$\max_i = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix} \leq \varepsilon \qquad (2.4.2\text{-}21)$$

Druhý způsob ukončení iteračního procesu je kritérium pro překročení maximálního počtu iterací. Proto je-li hodnota počtu iterací p vyšší než maximální možná hodnota $p_{\max}$ (viz rovnice 2.4.2-22), cyklus je zastaven bez výsledného řešení:

$$p \leq p_{\max} \qquad (2.4.2\text{-}22)$$

Po načtení vstupních dat se spustí výpočtový algoritmus, který začíná výpočtem mismatch vektoru a následným zkontrolování konvergenčního kritéria. Při nepřekročení této hranice se algoritmus zaměří na výpočet Jacobiho matice a následného spočtení přírůstkového vektoru, který je v dalším kroku aplikován do update procesu. Po updatování hodnot se opět spočte mismatch vektor a opět se kontroluje konvergenční kritérium. Teprve v tomto místě je ukončena první iterace.

Na následujícím obrázku (Obr. 2.4.2-1) je vývojový diagram popisující iterační algoritmus Newton–Raphsonovy metody:



Obr. 2.4.2-1: Vývojový diagram popisující Newton–Raphsonovu metodu

2.4.3 Zahrnutí jalových mezí v numerickém postupu

Při řešení chodu soustavy se u elektrárenských (PU) uzlů, sledují tzv. jalové meze elektrárenského zdroje, kde každý zdroj je schopen dodávat do sítě resp. odebírat ze sítě jen určité množství jalového výkonu a to v intervalu:

$$Q_{Gi} = \left\langle Q_{Gi\_\min}; Q_{Gi\_\max} \right\rangle \tag{2.4.3-1}$$

Při překročení těchto mezí se z PU uzlu stává PQ uzel. Základní logika pro řešení jalových mezí a změny charakteru konkrétních uzlů je tato:

$$Q_{Gi} = \begin{cases} Q_{Gi\_\max} & if \quad Q_{Gi} > Q_{Gi\_\max} \quad PU \rightarrow PQ \\ \\ Q_{Gi\_\min} & if \quad Q_{Gi} < Q_{Gi\_\min} \quad PU \rightarrow PQ \end{cases} \tag{2.4.3-2}$$

Touto základní logikou bohužel nedosáhneme minimálního počtu přepnutých (z PU na PQ) uzlů a tak Gauss–Seidelova i Newton–Raphsonova metoda řeší tuto problematiku odlišně.

Gauss – Seidelova metoda nevyužívá logiky pro jalové meze v každé iteraci, ale až v oblasti blízké konvergence. Základem algoritmu je rovnice (2.4.3-2). Nejprve se určuje kladná odchylka Q_i od nejbližší meze:

$$Q_i = \begin{cases} Q_{Gi} - Q_{Gi\_\max} & if \quad Q_{Gi} > Q_{Gi\_\max} \\ \\ Q_{Gi\_\min} - Q_{Gi} & if \quad Q_{Gi} < Q_{Gi\_\min} \end{cases} \tag{2.4.3-3}$$

Odchylka Q_i je pak ukládána do vektoru, ze kterého se následně zjišťuje maximální hodnota. Uzel s maximální odchylkou, který nejvíce překračuje své jalové meze je pak trvale přepnut z PU na PQ uzel a jako nejvíce rušivý člen soustavy je tak eliminován.

Tato logika je popsána v následující rovnici, která je aktivována pouze ve stavu blízké konvergence:

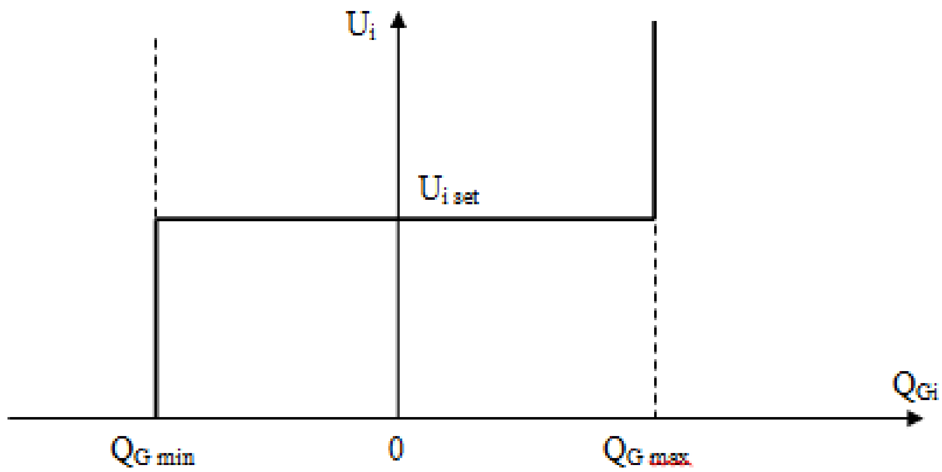
$$Q_i = \begin{cases} Q_{Gi\_\max} & if \quad Q_i = \max(Q_i) \quad \& \quad Q_{Gi} > Q_{Gi\_\max} \quad PU \rightarrow PQ \\ \\ Q_{Gi\_\min} & if \quad Q_i = \max(Q_i) \quad \& \quad Q_{Gi} < Q_{Gi\_\min} \quad PU \rightarrow PQ \end{cases} \tag{2.4.3-4}$$

Newton–Raphsonova metoda využívá algoritmu pro jalové meze v každé iteraci. Proto je algoritmus rozdělen na dvě části, a to na přímou a zpětnou logiku. Přímá logika je již popsána v rovnicích (2.4.3-2). Je sledována aktuální hodnota jalového výkonu Q_{Gi} v i – tém uzlu. Pomocí zpětné logiky je možné některé PQ uzly přepnout zpět na PU uzly. Využívá se vzájemného vztahu mezi velikostí napětí U_i a jalovým výkonem Q_{Gi}. Při překročení jalových mezí je hodnota Q_{Gi} nastavena na dolní jalovou mez $Q_{Gi\_\min}$ resp. horní jalovou mez $Q_{Gi\_\max}$ a sleduje se velikost napětí U_i. Velikost napětí U_i v i – tém uzlu je rozhodující parametr, a je možné použít zpětnou logiku pro daný uzel.

Pro použití zpětné logiky platí následující zápis:

$$U_i = U_{i\_set} \quad \begin{cases} if \quad Q_{Gi} = Q_{Gi\_\max} \quad \& \quad U_i \geq U_{i\_set} \quad PQ \rightarrow PU \\ if \quad Q_{Gi} = Q_{Gi\_\min} \quad \& \quad U_i \leq U_{i\_set} \quad PQ \rightarrow PU \end{cases} \tag{2.4.3-5}$$

Pro lepší představu je podmínka, zapsána v rovnici (2.4.3-5), ilustrována na obrázku (Obr. 2.4.3-1).



Obr. 2.4.3-1: Pracovní oblast zpětné logiky

3 Napěťová stabilita elektrizačních soustav

Problémy související s napěťovou stabilitou se zejména týkají soustav, které jsou velmi zatěžovány, obsahují závažnou poruchu nebo mají nedostatek generovaného jalového výkonu. Charakter napěťové stability může být analyzován zkoumáním výroby, přenosem nebo spotřebou jalového výkonu. Napěťová stabilita se týká celých elektrizační soustavy, spíše však jen některé její konkrétní "kritické" oblasti.

Napěťová stabilita je schopnost elektrizační soustavy udržet si stabilní pracovní bod ve všech uzlech soustavy za normálních provozních podmínek, při malé změně zatížení nebo při vzniku poruchy. Hlavním faktorem způsobujícím napěťovou nestabilitu je neschopnost uspokojit poptávku po jalovém výkonu. K zamezení napěťové nestability se používají zařízení, které jsou schopny udržet velikost napětí v přijatelných mezích. Druhým způsobem vedoucím k zamezení napěťové nestability je dodávka jalového výkonu v místech soustavy, kde je napěťová stabilita ohrožena. Mezi tyto zařízení patří zejména automatické regulátory napětí, synchronní kompenzátory, kondenzátorové baterie nebo instalace nového generátoru.

Kritériem napěťové stability je vztah mezi velikostí napětí U_i a velikostí jalového výkonu Q_i, tzn. soustava je napěťově stabilní, pokud se ve všech uzlech velikost napětí U_i zvyšuje se zvětšováním jalového výkonu Q_i. Pokud je mezi vztah U_i a Q_i alespoň v jednom uzlu záporný, soustava je napěťově nestabilní.

Napěťová stabilita se klasifikuje z hlediska poruchy do dvou kategorií - stabilita při malých poruchách a velkých poruchách v soustavě. Toto členění se provádí z hlediska analyzování nebo zkoumání vlastností soustavy. V případě velkých poruch, jako jsou výpadek zdroje nebo ztráta zatížení, se napěťová stabilita určuje pomocí nelineární dynamické analýzy. U malých poruch se používá postupná změna zatížení a soustavu je možno řešit v ustáleném stavu.

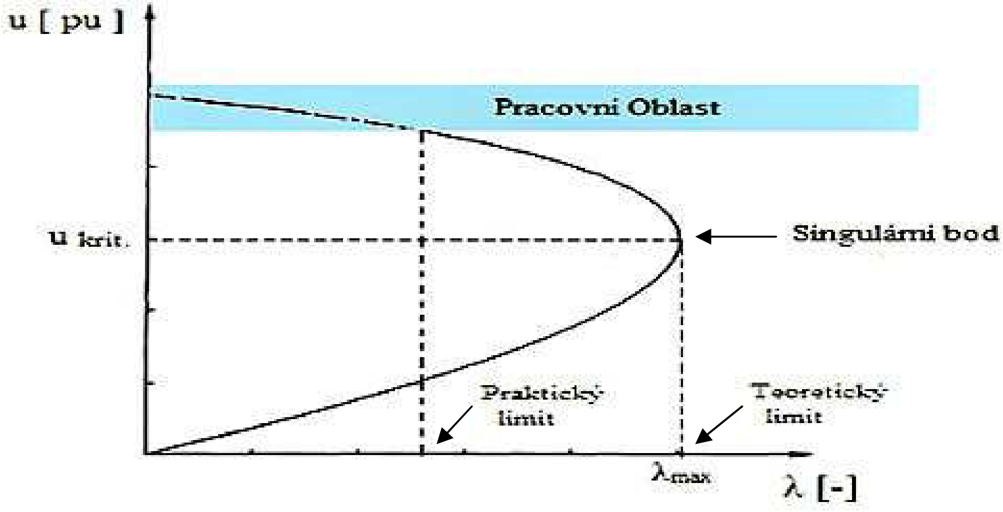
Zabývání se řešením napěťové stability je důležité pro zjištění aktuálního pracovního bodu, ve kterém soustava pracuje. Následným zvyšováním zatížení u odběrových uzlů lze dosáhnout teoretických a reálných hodnot maximální zatížitelnosti a kritického napětí v napěťově nejslabším uzlu soustavy. Výsledkem této analýzy je také zjištění napěťových a výkonových marginů, tzn. zjištění výkonové a napěťové rezervy. Tyto hodnoty určují vzdálenost do black-outu neboli do napěťového kolapsu.

3.1 Základní pojmy týkající se napěťové stability

Při řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu je nutné znát základní pojmy, vzorce a definice. V následující kapitole jsou stručně popsány základy týkající se napěťové stability. Kapitoly 3.1 a 3.2 jsou zpracovány z literatur [5], [9] a [12].

- **Nosová křivka**

Graf zobrazující závislost velikosti napětí v libovolném uzlu U_i na velikosti zatížitelnosti soustavy λ. Křivka je tvořena jednotlivými body, které jsou spočteny chodem soustavy.



Obr. 3.1-1: Nosová křivka

- **Zatížitelnost - λ**

Podíl aktuálního zatížení vůči původnímu zatížení soustavy. Pro počáteční pracovní bod je zatížitelnost soustavy $\lambda = 1$. Maximální zatížitelnost $\lambda_{\max}$ odpovídá napěťovému kolapsu (Jacobiho matice je singulární).

- **Kritické napětí - u_{krit}**

Hodnota velikosti napětí při maximálním zatížení soustavy. Reálné kritické napětí je určeno pracovní oblastí soustavy. Teoretické kritické napětí odpovídá napěťovému kolapsu neboli v blízkosti black-outu.

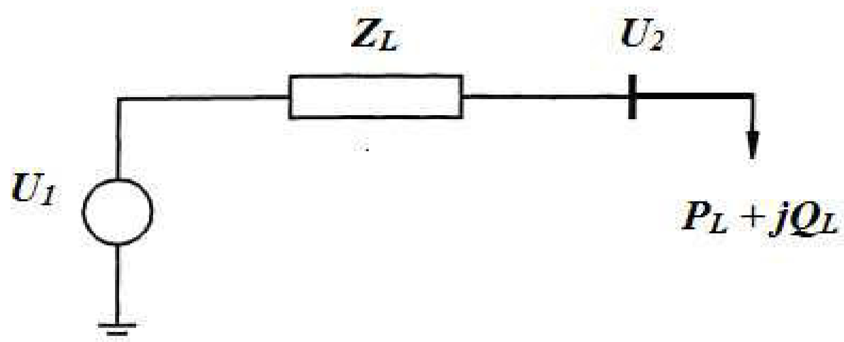
- **Singulární bod**

Bod kritického zatížení, ve kterém nastává napěťový kolaps soustavy neboli black-out. V tomto bodě je Jacobiho matice singulární.

3.2 Řešení napěťové stability ES “hrubou“ silou

Řešení napěťové stability “hrubou” silou je založeno na řešení chodu soustavy, při postupném navyšování výkonového zatížení u vybraných uzlů soustavy. Napěťovou stabilitu je možno řešit ve dvou scénářích. První scénář je založen na zvyšování odběrů výkonů v PQ a PU uzlech, tzv. L – scénář. Druhý scénář je založen na podobném principu navyšování zatížení, zároveň však dochází i k navyšování generovaného činného výkonu v PU uzlech – L+G – scénář.

Výsledkem řešení je teoretická hodnota maximální zatížitelnosti $\lambda_{\max}$ a velikost kritického napětí u_{krit}. Princip řešení napěťové stability je vysvětlen na následující 2-uzlové soustavě.



Obr. 3.2-1: Obecná 2-uzlová síť

Analýza napěťové stability je odvozena od původního provozního stavu soustavy (P_{L0}, Q_{L0}), resp. (P_{L0}, Q_{L0}, P_{G0}), které je násobeno zatížitelností λ.

Následující rovnice popisuje nárůst výkonového zatížení.

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{L0} \\ Q_{L0} \end{bmatrix} \cdot \lambda_{NEW} \qquad \begin{bmatrix} P_G \\ P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G0} \\ P_{L0} \\ Q_{L0} \end{bmatrix} \cdot \lambda_{NEW} \tag{3.2-1}$$

Navyšování výkonového zatížení, je realizováno se stejným (konstantním) účiníkem. Pro update zatížitelnosti platí následující vztah:

$$\lambda_{NEW} = \lambda_{OLD} + \Delta\lambda \tag{3.2-2}$$

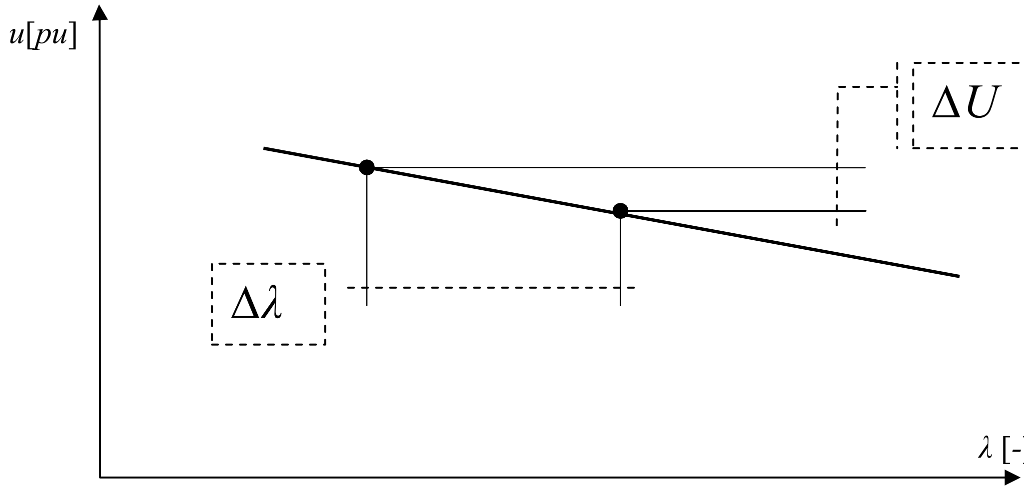
$\Delta\lambda$ ....velikost přírůstku zatížitelnosti

Velikost přírůstku zatížitelnosti $\Delta\lambda$ je definována velikostí rozdílového úhlu δ, který je dán sklonem nosové křivky. Před dalším navýšením výkonového zatížení (rovnice 3.2-1) je spočtena odchylka velikosti napětí a odchylka zatížitelnosti mezi dvěma po sobě jdoucími body, pomocí kterých je určen rozdílový úhel. Rozdílový úhel se spočítá dle následujícího výrazu:

$$\delta = arctg \frac{\Delta U}{\Delta \lambda} \tag{3.2-3}$$

Dle velikosti rozdílového úhlu je zatížitelnost navyšována "velkým" nebo "malým" navyšovacím krokem (*VK* nebo *MK*).

Pro lepší představu je situace ohledně výpočtu velikosti rozdílového úhlu δ zobrazena na obrázku (Obr. 3.2-2):

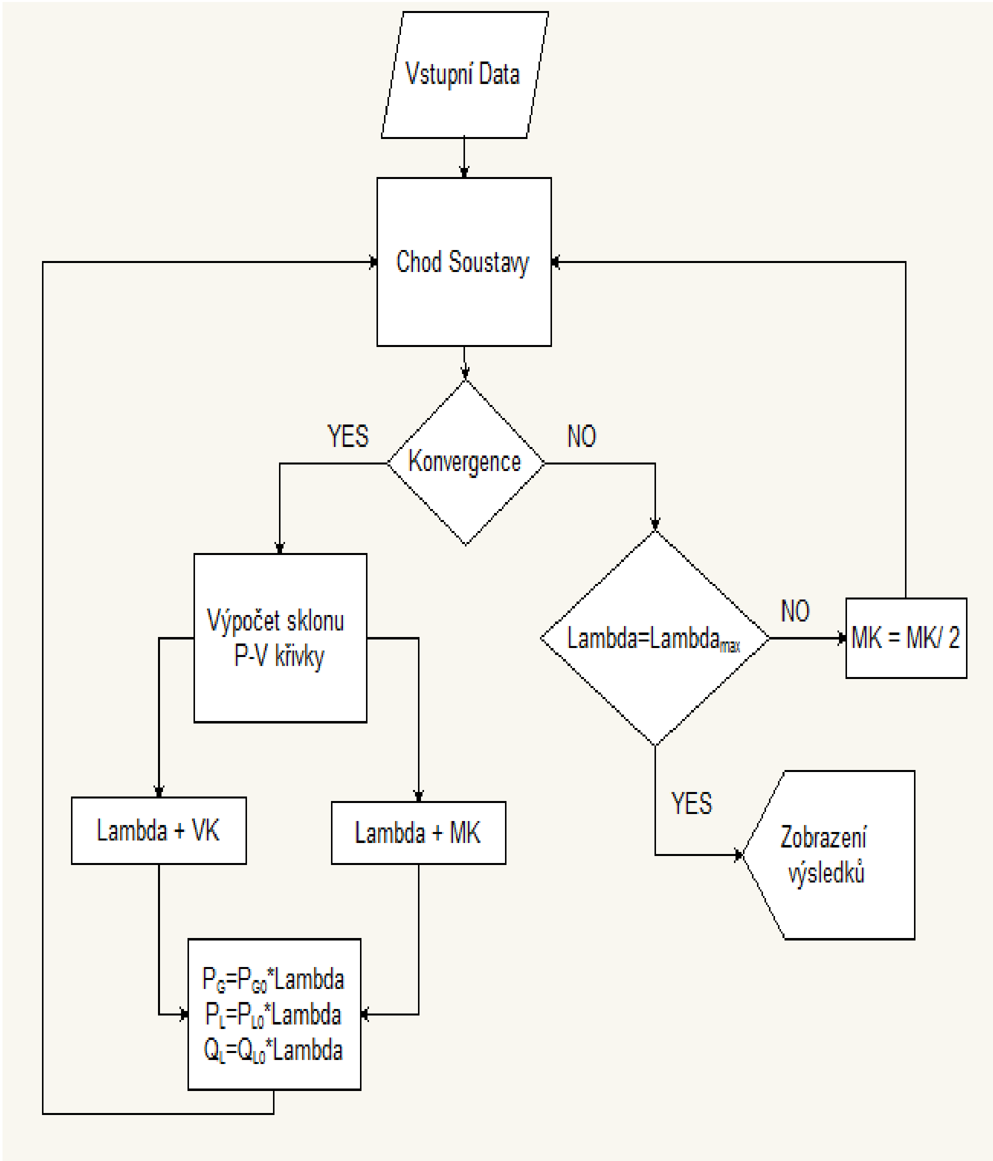


Obr. 3.2-2: Znázornění výpočtu rozdílového úhlu δ

V oblasti blízké napěťovému kolapsu (black-outu) je hodnota velikosti přírůstku zatížitelnosti $\Delta\lambda$ půlena. Pokud tato hodnota klesne pod minimální nastavenou hodnotu přírůstku zatížitelnosti $\Delta\lambda_{\min}$ je výpočet ukončen. Toto kritérium popisuje rovnice (3.2-4):

$$\Delta\lambda \leq \Delta\lambda_{\min} \tag{3.2-4}$$

Řešení napěťové stability "hrubou" silou je naznačeno pomocí vývojového diagramu na následujícím obrázku (Obr. 3.2-3):



Obr. 3.2-3: Vývojový diagram popisující řešení napěťové stability

3.3 Určení nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě

Vzdálenost k napěťové nestabilitě je určena zvyšujícím se zatížením v soustavě předem učeným způsobem, který představuje nejpravděpodobnější stresový scénář založený na historických a předpovězených údajích. Analýza určí nejkratší vzdálenost k singulárnímu bodu. Následující kapitola je zpracována z textů, které jsem nastudoval v literatuře [8].

Základním úkolem je stanovení směrového vektoru zatížení tak, aby vzdálenost mezi počátečním provozním bodem (base-case) a bodem kritického zatížení (black-out) byla minimální. Tohoto kritéria dosáhneme modifikací chodu soustavy, která je popsána v následující rovnici.

$$f(x,p) = g\begin{bmatrix} U \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = 0 \qquad (3.3\text{-}1)$$

kde: $x = \begin{bmatrix} U \\ \theta \end{bmatrix}$ ....stavový vektor

$\rho = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$ ....výkonový parametrický vektor

Oba vektory x i ρ mají rozměr N, kde $N = 2N_{PQ} + N_{PU}$.

N_{PQ} ....počet PQ uzlů v soustavě

N_{PU} ....počet PU uzlů v soustavě

Nechť matice $\overline{\underline{J}}_x$ a $\overline{\underline{J}}_\rho$ jsou Jacobiho matice, jejichž prvky jsou derivovány podle stavového vektoru x, respektive podle výkonového parametrického vektoru ρ. Z toho vyplývá, že matice $\overline{\underline{J}}_x$ je klasická Jacobiho matice a matice $\overline{\underline{J}}_\rho$ je jednotková matice.

$$\overline{\underline{J}}_x = \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & -\dfrac{\partial \Delta P}{\partial U} \\ -\dfrac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & -\dfrac{\partial \Delta Q}{\partial U} \end{bmatrix} \qquad \overline{\underline{J}}_\rho = \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial \Delta P}{\partial P} & -\dfrac{\partial \Delta P}{\partial Q} \\ -\dfrac{\partial \Delta Q}{\partial P} & -\dfrac{\partial \Delta Q}{\partial Q} \end{bmatrix} \qquad (3.3\text{-}2)$$

Analyzování nejkratší vzdálenosti k nestabilitě probíhá od počátečního pracovního bodu soustavy (x_0, ρ_0), kde vektor x_0 je výsledkem řešení chodu soustavy při výkonovém zatížení ρ_0. Od počátečního pracovního bodu soustavy (x_0, ρ_0) je soustava zatěžována postupným zvyšováním výkonového parametrického vektoru ρ_i. Stanovení nové hodnoty výkonového parametrického vektoru ρ_i je dáno následující rovnicí:

$$\rho_i = \rho_0 + k_i \eta_i \qquad (3.3\text{-}3)$$

V rovnici (3.3-3) je η_i směrový vektor zatížení a k_i je vzdálenost mezi počátečním pracovním bodem a novým pracovním bodem soustavy.

Soustava dosahuje kritického bodu napěťové stability při odpovídajícím stavovém vektoru x^*. Pak výkonový parametrický vektor odpovídá hodnotě ρ^* a Jacobiho matice J_X je singulární. Nová hodnota směrového vektoru zatížení η_{i+1} se vypočte jako:

$$\eta_{i+1} = w_i J_\rho \qquad (\ 3.3.4\ )$$

Vektor w je levý vlastní vektor matice J_X při kritickém zatížení, který odpovídá nulovému vlastnímu číslu matice. Vektor η_{i+1} normujeme a tím zpřesňujeme pro každý uzel soustavy. Výpočet opakujeme opět od počátečního pracovního bodu s novou zpřesněnou hodnotou směrového vektoru η_{i+1} až k dosažení black-outu.

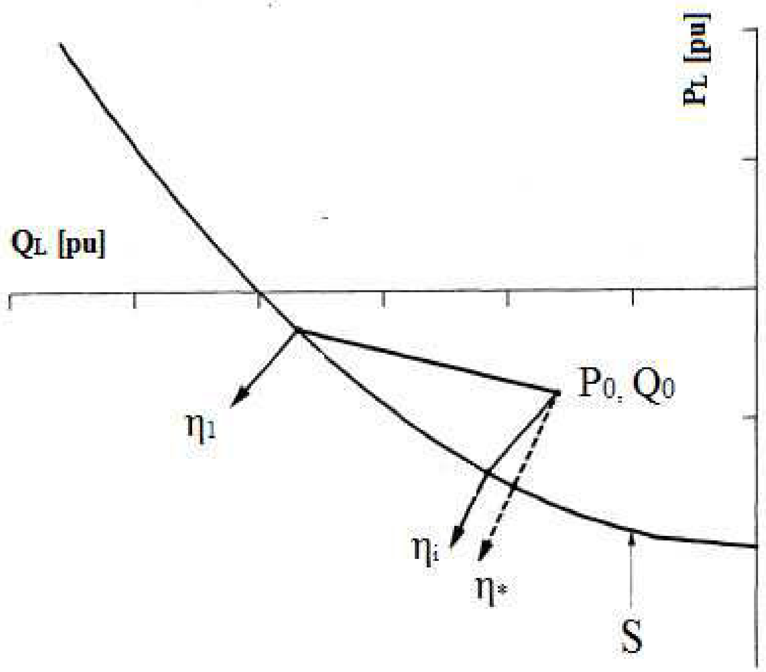
Vzdálenost k mezi počátečním pracovním bodem ρ_0 a kritickým bodem a black-outem se určí jako:

$$k = \left|\rho^* - \rho_0\right| \qquad (\ 3.3\text{-}5\ )$$

Hodnota k iteračními kroky konverguje k nejkratší vzdálenosti do black-outu. Potom výkonový parametrický vektor se spočte jako:

$$\rho^* = \rho_0 + k^* \eta^* \qquad (\ 3.3.6\ )$$

Jednotlivé hodnoty kritického parametrického vektoru ρ^*, znázorňují v P – Q rovině křivku kritického zatížení – *S*. V případě *N* – rozměrného prostoru se uvažuje hladká plocha (super-plocha = hypersurface), která znázorňuje obalovou křivku kritických hodnot. Hodnota lokálního minima k pak znázorňuje nejkratší vzdálenost mezi počátečním pracovním bodem ρ_0 a křivkou *S*. Pro lepší představu je určení nejkratší vzdálenosti naznačeno na obrázku (Obr. 3.3-1), který platí pro obecnou 2-uzlovou soustavu.



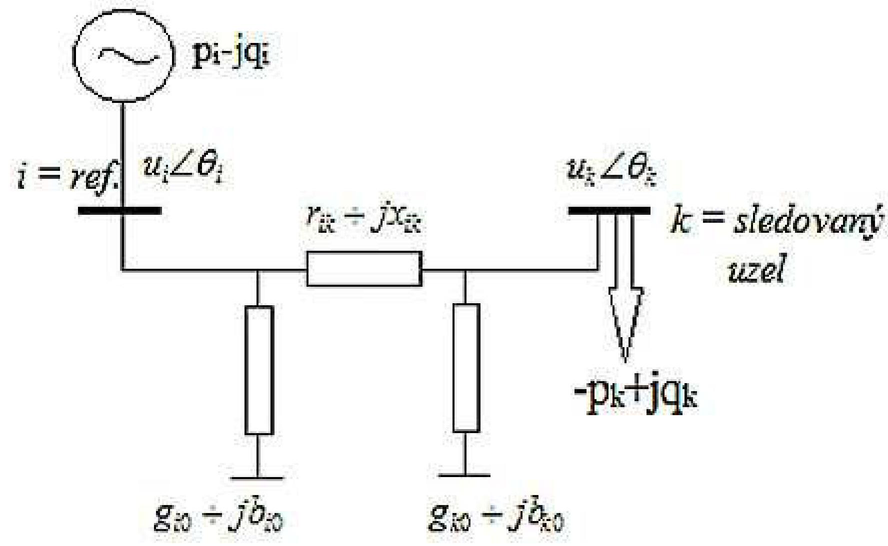
Obr. 3.3-1: Zobrazení P-Q roviny [8]

Analyzování pomocí této metody začíná postupným navyšováním z počátečního pracovního bodu v libovolně zvoleném směru η_0. Při dosažení kritického bodu soustavy neboli black-outu je spočtena vzdálenost kritického bodu od počátečního pracovního bodu k_i a nový směrový vektor zatížení. Pomocí tohoto nového zpřesněného směrového vektoru η_{i+1} je soustava znovu zatěžována od počátečního pracovního bodu. Tento postup se stále opakuje, dokud hodnota k_i nedokonverguje ke hledanému řešení, tj. určení nejkratší vzdálenosti do black-outu k^*.

3.4 Analytické řešení napěťové stability

Řešení napěťové stability pomocí analytických vztahů je založeno na řešení chodu soustavy. Analytické vztahy řešící chod soustavy je možno aplikovat pouze na obecnou 2-uzlovou soustavu.

Výsledkem analýzy jsou vztahy závislosti $u_k = f(\theta_{ik}), p_k = f(\theta_{ik})$ a $p_k = f(u_k)$. Analytické vztahy jsou odvozeny pro následující 2-uzlovou soustavu.



Obr. 3.4-1: Obecná 2-uzlová síť pro analytické řešení

Řešení napěťové stability pomocí analytických vztahů je založeno na rovnici (2.1.1-1), po aplikování této rovnice na danou soustavu dostáváme následující rovnice:

$$\frac{P_i - jQ_i}{\overline{U}_i^*} = \overline{A}_{ii}\overline{U}_i + \overline{A}_{ik}\overline{U}_k \qquad (3.4\text{-}1)$$

$$\frac{-P_k + jQ_k}{\overline{U}_k^*} = \overline{A}_{ik}\overline{U}_i + \overline{A}_{kk}\overline{U}_k \qquad (3.4\text{-}2)$$

Pro zjištění uvedených závislostí je prioritní rovnice (3.4-2). V této rovnici dosadíme za hodnoty admitancí, upravíme a převedeme do poměrných jednotek:

$$-p_k + jq_k = ((g_{ik} + g_{k0}) + j(b_{ik} + b_{k0}))u_k^{\,2} - u_i u_k(\cos\theta_{ik} - j\sin\theta_{ik})(g_{ik} + jb_{ik}) \qquad (3.4\text{-}3)$$

Vyseparováním reálných a imaginárních částí z rovnice (3.4-3) dostáváme následující rovnice:

$$p_k = -(g_{ik} + g_{k0})u_k^{\,2} - u_i u_k (g_{ik} \cos\theta_{ik} + b_{ik} \sin\theta_{ik}) \tag{3.4-4}$$

$$q_k = (b_{ik} + b_{k0})u_k^{\,2} + u_i u_k (g_{ik} \sin\theta_{ik} - b_{ik} \cos\theta_{ik}) = e \cdot p_k \tag{3.4-5}$$

V rovnici (3.4-5) je zaveden koeficient e, který se určí jako:

$$e = \tan(\arccos(\varphi)) \tag{3.4-6}$$

Při dosazení rovnice (3.4-4) do rovnice (3.4-5) dostáváme následnými úpravami závislost $u_k = f(\theta_{ik})$:

$$u_k = \frac{u_i((g_{ik}e + b_{ik})\cos\theta_{ik} + (-g_{ik} + b_{ik}e)\sin\theta_{ik})}{e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})} \tag{3.4-7}$$

Při dosazení rovnice (3.4-7) do rovnice (3.4-4) je finální závislost $p_k = f(\theta_{ik})$ rovna:

$$\begin{aligned} p_k &= \frac{u_i^{\,2}(g_{ik}e + b_{ik})(g_{ik}b_{k0} - g_{k0}b_{ik})}{\left(e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right)^2}\cos^2\theta_{ik} + \\ &+ \frac{u_i^{\,2}(-g_{ik} + b_{ik}e)(g_{ik}^{\,2} + g_{ik}g_{k0} + b_{ik}b_{k0} + b_{ik}^{\,2})}{\left(e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right)^2}\sin^2\theta_{ik} - \\ &- \left(\frac{\begin{array}{l} 2(g_{ik} + g_{k0})(g_{ik}e + b_{ik})(g_{ik} + b_{ik}e) - \\ -(-g_{ik}^2 + 2g_{ik}b_{ik}e + b_{ik}^2)\left(e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right) \end{array}}{\left(e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right)^2} \right)\sin\theta_{ik}\cos\theta_{ik} \end{aligned} \tag{3.4-8}$$

Poslední závislost získáme vyjádřením goniometrických funkcí z rovnice (3.4-7) a dosazením do počáteční rovnice (3.4-4):

$$\begin{aligned} p_k &= \left(\frac{\begin{array}{l} u_k^2 e^2\left[(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right](g_{ik}^2 + b_{ik}^2) + \\ + (g_{ik}^2 + b_{ik}^2)u_k\sqrt{u_i^2\left[(g_{ik} + b_{ik}e)^2 - (-g_{ik} + b_{ik}e)^2\right] - u_k^2\left[e(g_{ik} + g_{k0}) + (b_{ik} + b_{k0})\right]^2} \end{array}}{(g_{ik}e + b_{ik})^2 + (g_{ik} - b_{ik}e)^2} \right) - \\ &- u_k^2(g_{ik} + g_{k0}) \end{aligned} \tag{3.4-9}$$

Rovnice (3.4-9) je předpis pro P-V křivku, tzv. nosovou křivku pro danou 2-uzlovou soustavu.

Pokud rovnici (3.4-8) parciálně derivujeme podle úhlu θ_{ik} a položíme rovno 0, následným vyjádřením dostaneme kritickou hodnotu úhlu θ_{krit} :

$$\frac{\partial p_k(\theta_{ik})}{\partial \theta_{ik}} = 0 \rightarrow \theta_{ik\_krit} \qquad (3.4\text{-}10)$$

Stejně tak pokud rovnici (3.4-9) parciálně derivujeme podle velikosti napětí u_k a položíme rovno 0. Úpravou dostaneme kritickou hodnotu velikosti napětí u_{krit} :

$$\frac{\partial p_k(u_k)}{\partial u_k} = 0 \rightarrow u_{k\_krit} \qquad (3.4\text{-}11)$$

4 Vytvořený software

Součástí této diplomové práce je "balíček" výpočtových programů zabývající se řešením problematiky spojené s napěťovou stabilitou. V balíčku jsou programy řešící napěťovou stabilitu elektrizačních soustav v ustáleném stavu tzv. "hrubou" silou. Jednotlivé programy se od sebe liší použitou numerickou metodou řešení chodu soustavy (N-R, G-S). Poté je v balíčku připojen menší program řešící napěťovou stabilitu pomocí analytických vztahů. Poslední software v balíčku je schopen určit nejkratší vzdálenost k napěťové nestabilitě soustav. Tento balíček je přiložen k diplomové práci na kompaktním disku.

Jednotlivé programy jsou závislé na specifickém formátu vstupních dat, ze kterých programy načítají veškeré data o soustavě.

4.1 Vstupní data

Každá soustava je zapsána do matic M_0, M_1 a M_2 jejichž obsah je dále vysvětlen.

➢ Matice M_0

Matice M_0 obsahuje název soustavy (3012 Bus TEST CASE) a doplňkové informace o soustavě. Například z jakého ročního období jsou data poskytnuta či provozní režim soustavy. Může zde být také uveden zdroj, odkud byla data čerpána.

➢ Matice M_1

V matice M_1 jsou, zaznamená veškerá data týkající se větví mezi uzly soustavy (vedení a dvouvinuťové transformátory). Matice M_1 má následující tvar vstupních dat:

Číslo sloupce	Popis dat ve sloupci
1	**Číslo větve**
2	**Typ větve** (0 – vedení, 1 – Transformátor)
3	**Větev vede z uzlu** (číslo uzlu)
4	**Větev vede do uzlu** (číslo uzlu)
5	**Kontrolní uzel**
6	**Odpor větve [pu]**
7	**Reaktance větve [pu]**
8	**Konduktance větve [pu]**
9	**Susceptance [pu]**
10	**Převod transformátoru[pu]** (1 – jmenovitý převod, 0 – vedení)
11	**Úhel transformátoru [°]** (obvykle nula)
12 – 16	**Prázdné sloupce**
17	**Limitní proudové / výkonové zatížení pro větev soustavy** (A – vedení, VA – transformátory)

Tab. č. 4.1-1: Tabulka znázorňující vstupní data matice M_1

➢ Matice M_2

V této matici nalezneme vstupní data popisující veškeré informace týkající se jednotlivých uzlů soustavy. Vstupní data jsou podobně zpracovány jako v matice M_1.

Číslo sloupce	Popis dat ve sloupci
1	**Číslo uzlu**
2	**Typ uzlu** (1 – referenční uzel, 2 – PQ uzel, 3 – PU uzel)
3	**Jmenovitá hodnota velikosti napětí [kV]**
4	**Činný odebíraný výkon v uzlu [pu]**
5	**Jalový odebíraný výkon v uzlu [pu]**
6	**Velikost napětí [pu]**
7	**Úhel napětí [°]**
8	**Limitní minimální jalový výkon [pu]** (pouze pro PU uzly)
9	**Limitní maximální jalový výkon [pu]** (pouze pro PU uzly)
10	**Činný dodávaný výkon do uzlu [pu]**
11	**Jalový dodávaný výkon do uzlu [pu]**
12	**Kompenzační zařízení - konduktance**
13	**Kompenzační zařízení - susceptance**
14	**Limitní minimální velikost napětí [pu]**
15	**Limitní maximální velikost napětí [pu]**

Tab. č. 4.1-2: Tabulka zobrazující vstupní data matice M_2

4.2 Řešení napěťové stability ES "hrubou" silou

Pro tuto analýzu byly vytvořeny dva výpočtové programy. V prvním je chod soustavy řešen pomocí numerické iterační metody Gauss-Seidel, v druhé je základ softwaru metoda Newton-Raphson. Dále jsou již oba softwary podobné, proto budu popisovat pouze jednu metodu. Bohužel tyto programy neobsahují uživatelské prostředí, které by umožňovalo snadné použití softwaru. Proto bylo vytvořeno ovládání přímo v příkazovém okně softwaru MATLAB.

Po spuštění programu je uživateli nabídnuta varianta výpočtu automatickým nebo manuálním režimem.

Automatický režim je uzpůsoben k řešení většího počtu soustav nebo k analyzování jedné sítě, kterou můžeme různě modifikovat (rekonfigurovat). Před započetím řešení automatického chodu je nutné si vytvořit soubor v Excelu, kde budou data připravena. Z tohoto souboru si software načítá data na začátku. Po načtení těchto dat je spuštěn zacyklený běh řešení napěťové stability, který automaticky přepíná mezi scénáři L a L+G (viz. Kapitola 3.2). Napěťová stabilita je vyřešena pro oba scénáře. Výstupy analýzy jsou hodnoty maximální zatížitelnosti – λ_{max} pro jednotlivé řešené soustavy, kritického napětí v libovolném sledovaném uzlu – u_{i_krit} , počet opakování zacykleného řešení chodu soustavy a výpočtová doba. Výsledky jsou zapisovány do stejného souboru, ze kterého byla načítána vstupní data.

Manuální chod je uzpůsoben pro řešení jedné konkrétní sítě, kterou chceme analyzovat. Síť (soustava) je načítána ze stejné složky, ve které je samotný program umístěn. V této modifikaci programu si uživatel vybere pouze jeden scénář řešení (L nebo L+G). Po výběru scénáře je uživateli nabídnut výběr množiny uzlů, ve kterých si přeje, aby docházelo k navyšování. Toto je zásadní rozdíl oproti Automatickému chodu, kde je navyšování nastaveno u všech uzlů soustavy.

Po výběru variant řešení programu je spuštěn samotný výpočet. Nejprve jsou načteny všechny data o soustavě a poté je spočtena admitanční matice. Následně je spuštěn numerický výpočet chodu soustavy, kdy je uvažováno základní zatížení – base-case. Po úspěšném vyřešení chodu soustavy je navýšeno zatížení u uzlů, kde je definován odběr. Tento postup je zacyklen. V případě nevyřešení chodu soustavy je navýšení zatížení zjemněno. Pokud není řešení opakovaně nalezeno a navýšení zatížení je již minimální. Výpočet je ukončen. Z tohoto je patrné, že software řeší pouze stabilní část nosové křivky.

Výsledkem manuálního chodu řešení napěťové stability jsou hodnoty maximální zatížitelnosti – λ_{max}, hodnota velikosti kritického napětí - u_{i_krit} a výpočtová doba. Zároveň je uživateli poskytnuto grafické okno, kde jsou vykresleny napěťové profily všech uzlů soustavy v závislosti na zatížitelnosti – λ.

4.3 Řešení napěťové stability pomocí analytických vztahů

Tento program dokáže vyřešit napěťovou stability s pomocí analytických vztahů, které jsem odvodil v kapitole 3.4. Zejména pak využívá rovnici (3.4-9), což je předpis P-V křivky pro obecnou 2-uzlovou soustavu.

Síť se načte do programu pomocí funkce *uigetfile*. Poté se spočtou hodnoty větve, která je definovaná v soustavě. Následuje spočtení hodnot činného odběru pro celou nosovou křivku a pro stabilní část nosové křivky zvlášť.

Výstupem jsou hodnoty kritické činného zatížení a hodnota kritické velikosti napětí. Zároveň je výstupem i grafické okno, ve kterém je znázorněna nosová křivka a vyznačen kritický bod neboli black-out. Tento program je určen pro ověření výsledků numerických programů řešící napěťovou stabilitu na jednoduché 2- soustavě.

4.4 Určení nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě

Vytvořený software pro řešení nejkratší vzdálenosti do black-outu je schopen řešit více soustav najednou, tak i pouze jednu konkrétní soustavu. Tento software dokáže vyřešit pouze distribuční soustavy nebo soustavy, které obsahují pouze PQ uzly. Z této množiny program vyseparuje pouze uzly, u kterých je definován nenulový činný odběr.

Tuto problematika je možné aplikovat pouze k řešení napěťové stability pomocí modifikace Newton-Raphsonovy metody. Ani zde není vytvořené žádné uživatelské prostředí pro snazší ovládání.

Po spuštění programu je uživateli nabídnut výběr mezi automatickým a manuálním režimem výpočtu. Automatický režim pracuje na stejném principu jako u řešení napěťové stability ES "hrubou" silou. V tomto režimu jsou zároveň vyřešeny dva scénáře původního navyšování.

Po zvolení manuálního režimu je otevřeno okno, ve kterém je seznam soustav k řešení, kterou chce uživatel řešit Po vybrání soustavy je spuštěn samotný výpočet. Na počátku řešení jsou načtena veškerá data týkající se soustavy a následně spočtena admitanční matice. Poté se aktivuje výpočet chodu soustavy s následným navyšováním zatížení. Výsledkem je určení kritického zatížení a zjištění vzdálenosti mezi počátečním pracovním bodem a black-outem. S použitím výsledků kritického zatížení je spočten nový směrový vektor zatížení. S pomocí zpřesněného směrového vektoru zatížení je opět řešena napěťová stabilita. Tento postup je opakován, až do doby kdy vzdálenosti mezi počátečním bodem a black-outem konverguje ke hledanému řešení.

Výstupními hodnotami analýzy je nejkratší možná vzdálenost do black-outu, počet bodu řešení a výpočtová doba. Součástí výstupu jsou i matice *Výstup1* a *Výstup2*, ve kterých jsou hodnoty nejkratší vzdálenosti, nejmenší vlastní čísla a směrové vektory zatížení pro činné a jalové odběry.

5 Případové studie

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit programy řešící napěťovou stabilitu elektrizačních soustav a určení nejkratší vzdálenosti do black-outu pro široké spektrum soustav. Samotná tvorba probíhala od počátečního naprogramování numerických metod řešící chod soustavy až po sestavení programové částí týkající se nejkratší vzdálenosti do black-outu. V následující kapitole jsou popsány výsledky jednotlivých částí programů od prvopočátku psaní kódu dle vzorových vzorců až po optimální vyladění do stavu, ve kterém je software schopen řešit vybranou problematiku v přijatelném čase a s dostatečně přísnou přesností výpočtu.

K testování jednotlivých částí programu byl k dispozici dostatečný počet soustav. K dispozici byly i soustavy, které nesou značení IEEE. Výsledné hodnoty těchto soustav byly ověřovány profesionálními softwary, a to i včetně softwaru Ing. Jana Veleby. Všechny tyto výsledky byly shodné. Proto jsou tyto soustavy vhodné pro názornou ukázku a porovnání výsledků z mnou vytvořeného softwaru.

5.1 Optimalizování numerických metod

Na začátku tvorby softwarů bylo hlavním úkolem naprogramovat a optimalizovat výpočetní metody řešící chod soustavy, které jsou základy všech vytvořených softwarů. Cílem optimalizace bylo minimalizovat délku výpočtu u obou použitých metod (Gauss-Seidel a Newton-Raphson) s ohledem na přesnost výpočtu.

5.1.1 Metoda Gauss–Seidel

Gauss–Seidelova metoda je určena pro řešení soustav s maximálním počtem stovek uzlů. Pokud je soustava větší nebo obsahuje velké množství propojujících vedení, pohybuje se délka výpočtu v řádu jednotek minut. Pro zrychlení numerického výpočtu jsem se nejprve zaměřil na odstranění nulových hodnot v admitanční matice. Tohoto faktu jsem docílil funkcí *sparse*, která tyto prvky eliminuje. Poté jsem rozdělil výpočetní cyklus pro PU a PQ uzly. Závěrem jsem využil akcelerační metody, která upravuje velikost přírůstků stavových veličin. Všechny tyto úpravy jsem zanesl do programu a porovnával výsledné hodnoty délek výpočtů pro jednotlivé soustavy. V následující tabulce jsou výsledky testovaných soustav.

	Kontrolní výsledky [1]		G-S bez optimalizace		G-S optimalizováno	
Case	**∑ P** $_{ztráty}$	**CPU [s]**	**∑ P** $_{ztráty}$	**CPU [s]**	**∑ P** $_{ztráty}$	**CPU [s]**
EPS0009IIpu	0.0506	0.063	0.0506	0.062	0.0506	0.046
EPS0014Ipu	0.1339	0.061	0.1339	0.109	0.1339	0.016
EPS0024Ipu	0.5125	0.099	0.5125	0.202	0.5125	0.062
EPS0026Ipu	0.1576	0.133	0.1576	0.094	0.1576	0.031
EPS0030Ipu	0.1755	0.156	0.1755	0.234	0.1755	0.093
EPS0039Ipu	0.4159	0.426	0.4159	1.263	0.4159	0.374
EPS0057Ipu	0.2786	0.258	0.2786	0.811	0.2786	0.171
EPS0118Ipu	1.3249	1.932	1.3249	3.619	1.3249	2.184
EPS0145Ipu	-18.2990	10.293	-18.2990	22.121	-18.2990	13.127
EPS0162Ipu	1.6296	2.864	1.6296	6.271	1.6296	3.547
EPS0300Ipu	4.0899	42.842	4.0899	62.401	4.0899	46.951
Celkem		**59.130**		**97.188**		**66.607**

Tab. č. 5.1.1-1: Výpočtové doby testovaných soustav metodou G-S

V tabulce (Tab. č. 5.1.1-1) jsou v prvním sloupci názvy jednotlivých soustav. V dalších sloupcích jsou uvedené hodnoty rychlosti výpočtu. Ve druhém a třetím sloupci jsou kontrolní výsledky podle, kterých jsem kontroloval správnou činnost softwaru. Ve čtvrtém a pátém sloupci jsou hodnoty neoptimalizované metody a v posledních dvou sloupcích jsou hodnoty výpočtu po optimalizaci kódu.

Ve sloupcích (2, 5 a 7) jsou celkové činné ztráty vybraných testovaných soustav, podle kterých jsem ověřoval správnou činnost softwaru.

Jak je vidět z hodnot rychlostí výpočtu po optimalizaci (sloupec č. 7), délka výpočtů se zkrátila téměř o polovinu. I přes optimalizování metody jsou délky výpočtů pro soustavy s počtem přesahující 100 uzlů stále příliš velké. Proto je tato metoda, dle mého názoru, vhodná pro ověřování správnosti výsledků při tvorbě nového výpočetního softwaru nebo lze tuto metodu použít k řešení soustav s počtem desítek uzlů.

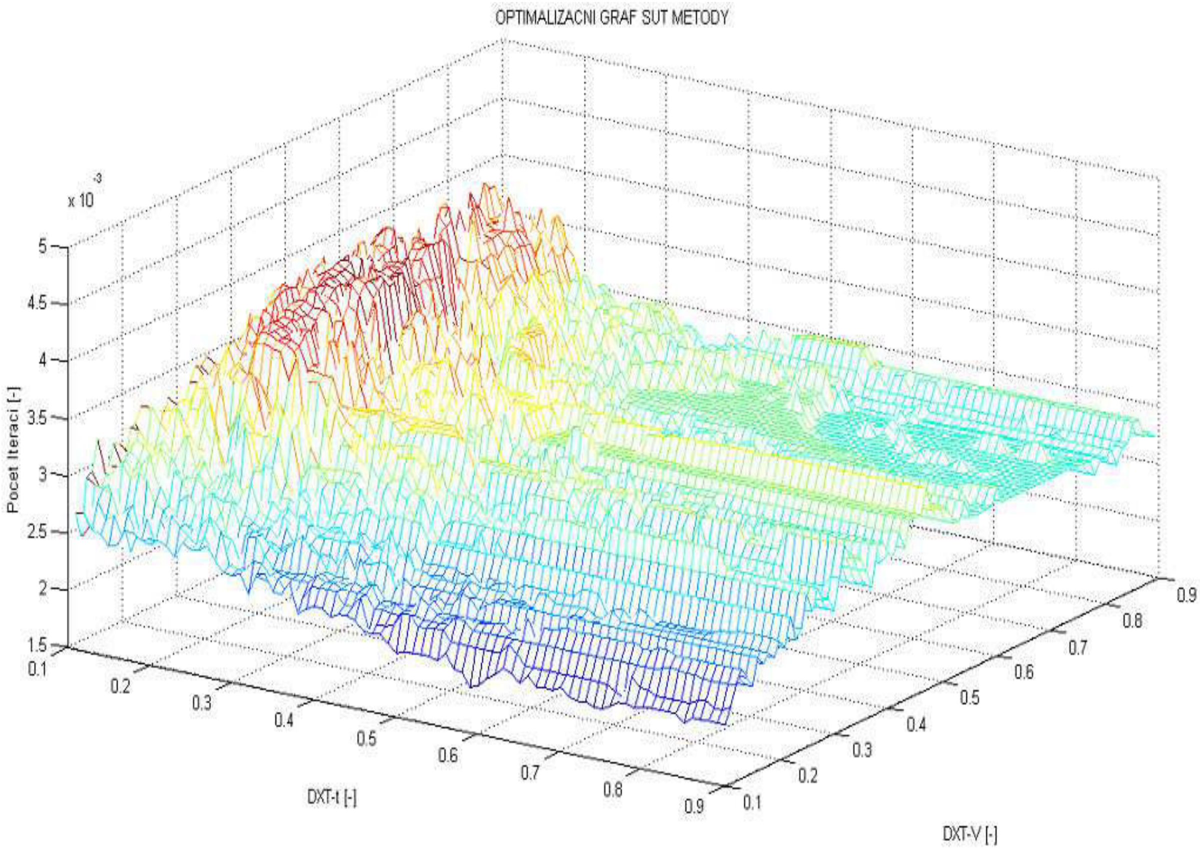
[1] Kontrolní výsledky byly poskytnuty od vedoucího práce Ing. Jana Veleby.

5.1.2 Metoda Newton–Raphson

Tato metoda je určena pro řešení rozsáhlejších soustav. Díky rychlé konvergenci k výsledku je tato metoda používána jako základ pro další metody řešící různá kritéria spjata s elektrizační soustavou. Vzhledem k složitosti algoritmu byla optimalizace daleko rozsáhlejší než u G-S metody. Cílem optimalizace u této metody bylo opět dosáhnout univerzálnosti použití, kde byla výpočtová doba velice ostře sledována.

U výpočtu admitanční matice jsem rovněž použil funkci *sparse*, kterou jsem následně použil i při tvorbě Jacobiho matice. Jacobiho matice rovněž reprezentuje fyzické propojení jednotlivých uzlů soustavy. Další zrychlení programu se dosáhlo použitím preprocesoru, který využívá Fast-Decoupled metody pro zpřesnění startovních hodnot pro řešení chodu soustavy.

Ke stabilizaci numerického výpočtu jsem použil metodu SUT. Tato metoda upravuje velikosti přírůstků a je charakteristická svými parametry *DXT_theta* a *DXT_Voltage*. Tyto dva parametry jsou závislé na struktuře programu. Pro svůj program jsem hledal optimální nastavení těchto parametrů. Na následujícím trojrozměrném grafu je zobrazeno nejoptimálnější nastavení těchto parametrů.



Obr. 5.1.2-1 Optimalizační graf SUT metody

Na obrázku (Obr. 5.1.2-1) je 3D graf, kde na *x* a *y* ose jsou parametry DXT. Osa *z* je převrácená hodnota počtu iterací. Z grafu je patrné že v červené oblasti hodnot se nachází optimální hodnota nastavení obou parametrů. Osobně jsem zvolil hodnoty *DXT_theta=0.4* a *DXT_voltage=0.2*. na základě testování těchto parametrů na dostupných soustavách.

Po aplikování všech optimalizačních a stabilizačních metod jsem testoval algoritmus na širokém spektru soustav. V následující tabulce jsou výsledky testovaných soustav.

	Kontrolní výsledky [2]		N – R bez optimalizace		N – R optimalizován	
Case	**∑ $P_{ztráty}$**	**CPU [s]**	**∑ $P_{ztráty}$**	**CPU [s]**	**∑ $P_{ztráty}$**	**CPU [s]**
EPS0009IIpu	0.0506	0.031	0.0506	0.109	0.0506	0.047
EPS0014Ipu	0.1339	0.036	0.1339	0.092	0.1339	0.001
EPS0024Ipu	0.5125	0.031	0.5125	0.105	0.5125	0.001
EPS0026Ipu	0.1576	0.046	0.1576	0.114	0.1576	0.015
EPS0030Ipu	0.1755	0.041	0.1755	0.124	0.1755	0.001
EPS0039Ipu	0.4159	0.036	0.4159	0.147	0.4159	0.015
EPS0057Ipu	0.2786	0.041	0.2786	0.184	0.2786	0.015
EPS0118Ipu	1.3249	0.031	1.3249	0.584	1.3249	0.015
EPS0145Ipu	-18.2989	0.062	-18.2989	0.966	-18.2989	0.071
EPS0162Ipu	1.6296	0.052	1.6296	0.995	1.6296	0.109
EPS0300Ipu	4.0899	0.068	4.0899	5.191	4.0899	0.062
Celkem		**0.479**		**8.611**		**0.489**

Tab. č. 5.1.2-1: Výpočtové doby testovaných soustav metodou N-R

V tabulce (Tab. č. 5.1.2-1) jsou v prvním sloupci názvy jednotlivých soustav. V dalších sloupcích jsou uvedené hodnoty rychlosti výpočtu. Ve druhém a třetím sloupci jsou kontrolní výsledky podle, kterých jsem kontroloval správnou činnost softwaru. Ve čtvrtém a pátém sloupci jsou hodnoty neoptimalizované metody a v posledních dvou sloupcích jsou hodnoty výpočtu po optimalizaci kódu.

Ve sloupcích (2, 5 a 7) jsou celkové činné ztráty vybraných testovaných soustav, podle kterých jsem ověřoval správnou činnost softwaru. Je patrné, že výpočetní doba se razantně zkrátila a to především u rozsáhlejších soustav. Díky dosažení výpočtových časů v hodnotách stovek milisekund je možné použít tuto metody pro další aplikace.

[2] Kontrolní výsledky byly poskytnuty od vedoucího práce Ing. Jana Veleby.

5.2 Řešení napěťové stability elektrizačních soustav

V předchozí kapitole byla řešena optimalizace chodu soustavy, která byla především zaměřena na minimalizaci délky výpočtové doby. V této kapitole bude prokázáno, proč byly nároky tak vysoké. Jak bylo zmíněno v kapitole 3, základem analyzování napěťové stability je řešení chodu soustavy. Chod soustavy vyřeší jednotlivé body nosové křivky od počátečního pracovního bodu (base-casu) až po singulární bod (black-out). Z toho vyplývá, že doba analyzování napěťové stability je závislá na jednotlivých časech řešení chodu soustavy. Délka doby výpočtu řešení chodu soustavy se prodlužuje s přibližováním se k singulárnímu bodu.

Při řešení této problematiky byly kladeny nároky na přesnost výpočtu, tzn. na určení maximální zatížitelnosti – λ_{max} a s tím související i kritické napětí – u_{i_krit}. Pro dosažení těchto hodnot bylo prioritní určit počet a velikosti jednotlivých kritérií navyšování zatížení.

5.2.1 Řešení napěťové stability s použitím G-S metody

Při použití Gauss-Seidelovy metody pro řešení napěťové stability elektrizačních soustav, jsem vycházel z údajů a hodnot získaných optimalizací metody v kapitole 5.1.1. Vzhledem k časové náročnosti této metody jsem použil tři kritéria navyšování zatížitelnosti (*VK, SK* a *MK*). Z nichž hodnoty *VK* a *SK* jsem zvolil vysoké, abych dosáhl rychleji oblasti blízké napěťového kolapsu. Hodnotu *MK* jsem zvolil menší pro dosažení singulárního bodu.

Napěťovou stabilitu jsem zároveň řešil pro scénáře L i L+G se stejnými kritérii navyšování. Hodnoty pro navyšování jsem zvolil takto: *VK=0.1; SK=0.07; MK=0.01*

	CLF Software			Výstupní hodnoty			
Case	**λ_{max} [-]**	**u_{i_krit} [pu]**	**CPU [s]**	**λ_{max} [-]**	**u_{i_krit} [pu]**	**CPU [s]**	**Sledovaný uzel**
EPS0009IIpu	1.3026	0.7658	0.562	1.3026	0.7660	27.207	2
EPS0014Ipu	1.7603	0.7406	1.201	1.7603	0.7408	42.744	3
EPS0024Ipu	1.5109	0.8493	1.264	1.5109	0.8497	68.032	1
EPS0026Ipu	2.4486	0.7936	0.515	2.3997	0.7931	77.454	5
EPS0030Ipu	1.5369	0.8328	1.950	1.5369	0.8331	100.246	3
EPS0039Ipu	1.2186	0.8996	0.296	1.2186	0.9004	242.067	3
EPS0057Ipu	1.4068	0.8445	2.902	1.4068	0.8449	202.552	5
EPS0118Ipu	1.6135	0.9354	16.677	1.6072	0.9336	1320.252	2
EPS0145Ipu	1.0000	1.1387	0.125	1.0100	1.1387	484.914	34
EPS0162Ipu	1.0800	0.9847	12.917	1.0800	0.9848	733.501	8
EPS0300Ipu	1.0246	1.0234	103.865	1.0233	1.0243	2271.375	1

Tab. č. 5.2.1-1: Výsledky řešení s použitím G-S metody pro L-Scénář

	CLF software			Výstupní hodnoty			
Case	λ_{max} [-]	u_{i_krit} *[pu]*	CPU [s]	λ_{max} [-]	u_{i_krit}*[pu]*	CPU [s]	Sledovaný uzel
EPS0009IIpu	1.1621	0.8026	0.3900	1.1600	0.8278	19.999	2
EPS0014Ipu	1.7780	0.7445	0.9360	1.7782	0.7448	40.451	3
EPS0024Ipu	1.6629	0.9150	0.4524	1.6750	1.0047	55.100	1
EPS0026Ipu	2.4820	0.7975	0.4368	2.4333	0.7971	75.489	5
EPS0030Ipu	1.5468	0.8349	1.6536	1.5469	0.8353	109.513	3
EPS0039Ipu	1.5395	0.8931	0.6396	1.5550	0.9691	96.611	3
EPS0057Ipu	1.6168	0.9026	1.3884	1.6199	0.9037	207.825	5
EPS0118Ipu	2.0809	0.8864	1.7472	2.1117	1.0197	463.978	2
EPS0145Ipu	1.1374	1.1186	1.6692	1.0000	1.1387	414.042	34
EPS0162Ipu	1.1390	0.9716	9.3913	1.1366	0.9713	601.025	8
EPS0300Ipu	1.0588	1.0221	4.0092	1.0000	1.0284	1087.561	1

Tab. č. 5.2.1-2: Výsledky řešení s použitím G-S metody pro L+G scénář

V tabulkách (Tab. č. 5.2.1-1 a 5.2.1-2) jsou zobrazeny výsledky řešení napěťové stability s použitím G-S metody. V prvním sloupci jsou názvy řešených soustav. Další sloupce jsou hodnoty z CLF softwaru, které jsou definovány jako referenční a jsou určeny pro ověření správnosti řešení algoritmu. Výstupní hodnoty z mnou vytvořeného softwaru jsou s těmito hodnotami ověřovány. Prioritními hodnotami jsou hodnoty maximální zatížitelnosti - λ_{max} a velikosti kritických napětí - u_{i_krit} v libovolném sledovaném uzlu.

ODCHYLKY				
	L - scénář		L + G - scénář	
EPS0009IIpu	0.00000	0.00023	0.00205	0.02525
EPS0014Ipu	0.00000	0.00023	-0.00023	0.00035
EPS0024Ipu	0.00000	0.00037	-0.01207	0.08962
EPS0026Ipu	0.04886	-0.00049	0.04870	-0.00043
EPS0030Ipu	0.00000	0.00035	-0.00018	0.00040
EPS0039Ipu	0.00000	0.00083	-0.01550	0.07599
EPS0057Ipu	0.00000	0.00039	-0.00307	0.00107
EPS0118Ipu	0.00638	-0.00183	-0.03087	0.13328
EPS0145Ipu	-0.01000	-0.00003	0.13743	0.02009
EPS0162Ipu	0.00000	0.00002	0.00238	-0.00028
EPS0300Ipu	0.00125	0.00089	0.05882	0.00630

Tab. č. 5.2.1-3: Tabulka odchylek řešení

V tabulce (Tab. č. 5.2.1-3) jsou určeny odchylky řešení mezi výsledky vypočtenými z mého softwaru a referenčními výsledky z CLF Softwaru. Při kontrolování těchto dat nalezneme i hodnoty odchylek se zápornou hodnotou. To by znamenalo, že metoda nalezla řešení, které není možné. Bohužel tento fakt je dán použitou metodou.

Hodnoty odchylek, zejména pro L+G scénář, jsou hodně odlišné od referenčních. Tyto odchylky jsou dány vysokými hodnotami přírůstků zatížitelnosti, které byly zvoleny záměrně pro rychlejší vyřešení.

5.2.2 Řešení napěťové stability s použitím N-R metody

Na rozdíl od použití Gauss-Seidelovy metody, metoda Newton-Raphson po optimalizačních a stabilizačních metodách dosahovala maximální délky výpočtu v řadech stovek milisekund. Tento fakt je základním předpokladem pro řešení napěťové stability u rozsáhlejších soustav. Vzhledem ke krátké výpočetní době jsem hodnoty navyšování zatížitelnosti (*VK, SK* a *MK*) volil menší než pro případ použití G-S metody. Prodlužuje se tím sice délka výpočtu, ale dosahuji tím přesnějších výsledků.

V následujících tabulkách jsou výsledné hodnoty vybraných testovaných soustav, které jsem opět řešil zároveň pro scénář L i L+G. Kritéria navyšování zatížitelnosti jsem zvolil takto: *VK=0.012; SK=0.006; MK=0.003*

	CLF software			Výstupní hodnoty			
Case	λ_{max} [-]	u_{i_krit} [pu]	CPU [s]	λ_{max} [-]	u_{i_krit} [pu]	CPU [s]	Sledovaný uzel
EPS0009IIpu	1.3026	0.7658	0.562	1.3015	0.7807	0.312	2
EPS0014Ipu	1.7603	0.7406	1.201	1.7590	0.7524	0.702	3
EPS0024Ipu	1.5109	0.8493	1.264	1.5055	0.8937	0.312	1
EPS0026Ipu	2.4486	0.7936	0.515	2.3995	0.7960	0.796	5
EPS0030Ipu	1.5369	0.8328	1.950	1.5355	0.8428	0.593	3
EPS0039Ipu	1.2186	0.8996	0.296	1.2175	0.9122	0.250	3
EPS0057Ipu	1.4068	0.8445	2.902	1.4065	0.8492	0.468	5
EPS0118Ipu	1.6135	0.9354	16.677	1.6015	0.9356	0.920	2
EPS0145Ipu	1.0000	1.1387	0.125	1.0135	1.1387	0.390	34
EPS0162Ipu	1.0800	0.9847	12.917	1.0735	1.0028	1.076	8
EPS0300Ipu	1.0246	1.0234	103.865	1.0240	1.0239	0.577	1

Tab. č. 5.2.2-1: Výsledky řešení s použitím N-R metody pro L scénář

	CLF software			Výstupní hodnoty			
Case	λ_{max} [-]	u_{i_krit} [pu]	CPU [s]	λ_{max} [-]	u_{i_krit} [pu]	CPU [s]	Sledovaný uzel
EPS0009IIpu	1.1621	0.8026	0.390	1.1620	0.8066	0.359	2
EPS0014Ipu	1.7780	0.7445	0.936	1.7770	0.7545	0.733	3
EPS0024Ipu	1.6629	0.9150	0.452	1.6615	0.9197	0.437	1
EPS0026Ipu	2.4820	0.7975	0.437	2.4295	0.8124	0.858	5
EPS0030Ipu	1.5468	0.8349	1.654	1.5460	0.8421	0.655	3
EPS0039Ipu	1.5395	0.8931	0.640	1.5295	0.9059	0.359	3
EPS0057Ipu	1.6168	0.9026	1.388	1.6135	0.9129	0.484	5
EPS0118Ipu	2.0809	0.8864	1.747	2.0455	0.8906	1.310	2
EPS0145Ipu	1.1374	1.1186	1.669	1.1335	1.1225	0.562	34
EPS0162Ipu	1.1390	0.9716	9.391	1.1335	0.9858	1.357	8
EPS0300Ipu	1.0588	1.0221	4.009	1.0495	1.0235	0.624	1

Tab. č. 5.2.2-2: Výsledky řešení s použitím N-R metody pro L+G scénář

V tabulkách (Tab. č. 5.2.2-1 a 5.2.2-2) jsou zobrazeny výsledky řešení napěťové stability s použitím N–R metody. V prvním sloupci jsou názvy řešených soustav. Další sloupce jsou hodnoty z CLF softwaru, které jsou definovány jako referenční. Výstupní hodnoty z mnou vytvořeného softwaru jsou s těmito hodnotami ověřovány. Prioritními hodnotami jsou výsledky maximální zatížitelnosti - λ_{max} a velikosti kritických napětí - u_{i_krit} v libovolném sledovaném uzlu. Další zajímavou hodnotou je délka výpočtu, která je úměrná velikosti maximální zatížitelnosti.

ODCHYLKY ŘEŠENÍ				
	L - Scénář		L + G - Scénář	
EPS0009IIpu	0,0000	-0,0001	0,0000	0,0000
EPS0014Ipu	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
EPS0024Ipu	0,0039	0,0396	0,0000	0,0000
EPS0026Ipu	0,0489	-0,0006	0,0482	-0,0004
EPS0030Ipu	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
EPS0039Ipu	0,0000	0,0001	0,0085	0,0116
EPS0057Ipu	0,0000	0,0001	0,0018	0,0074
EPS0118Ipu	0,0105	-0,0001	0,0339	0,0028
EPS0145Ipu	0,0000	0,0007	0,0000	0,0007
EPS0162Ipu	-0,0150	0,0000	0,0024	0,0028
EPS0300Ipu	0,0050	0,0159	0,0040	0,0126

Tab. č. 5.2.2-3: Tabulka odchylek řešení

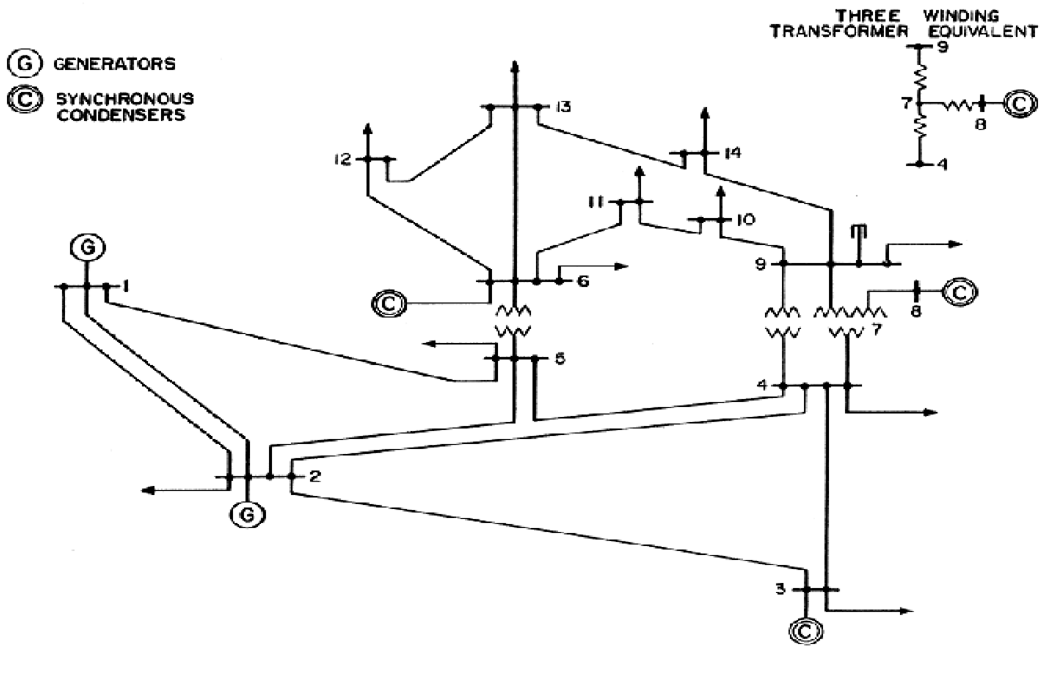
V tabulce (Tab. č. 5.2.2-3) jsou určeny odchylky řešení mezi výsledky vypočtenými z mého softwaru a referenčními výsledky z CLF Softwaru. Při kontrolování těchto dat nalezneme i hodnoty odchylek se zápornou hodnotou. To by znamenalo, že metoda nalezla řešení, které není možné. Bohužel i zde je tento fakt dán použitou metodou.
Z hodnot je patrné, že záporných hodnot podstatně ubylo. A zmenšili se i velikosti odchylek. Tyto fakt nasvědčují tomu, že při použití této metody jsem zvolil hodnoty přírůstků zatížitelnosti menší. Tím jsem dosáhl požadovaného přesnějšího kroku v blízkosti napěťového nestability.

Výsledky dosažené touto metodou snesou přísnější kritéria hodnocení z hlediska přesnosti a z hlediska rychlosti výpočtu. Tyto vlastnosti předurčují další možné použití.

5.2.3 Ukázka řešení programu

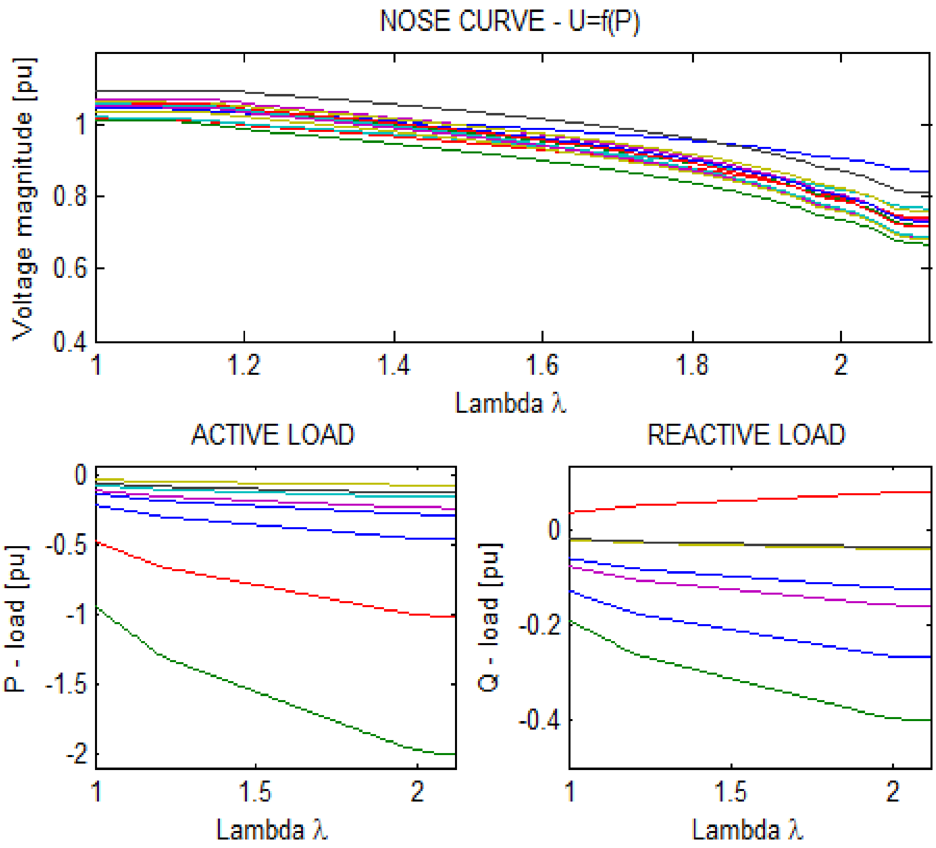
Jako vzorový příklad řešení mého programu jsem vybral 14 uzlovou soustavu IEEE 14. Vybranou soustavu jsem řešil pomocí L scénáře. Navyšování zatížení jsem náhodně definoval pouze pro uzly č. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12 a 13. Napěťovou stabilitu hrubou silou jsem řešil pomocí Gauss-Seidelovy i Newton-Raphsonovy metody. Následně jsem porovnal výsledky řešení obou metod na konkrétní případové studii.

Na následujícím obrázku je schéma vybrané soustavy IEEE 14.



Obr. 5.2.3-1: Schéma testované soustavy IEEE 14 [15]

- **Výstupní hodnoty ukázkové případové studie IEEE 14:**



Obr. 5.2.3-2: Grafické výsledky

	G-S metoda	N-R metoda
λ_{max} [-]	2.119	2.119
u_{3_krit} [pu]	0.7406	0.7406
CPU [s]	55.93	1.22
Počet bodů	116	151

Tab. č. 5.2.3-1: Tabulka výstupních hodnot

V tabulce (Tab. č. 5.2.3-1) jsou základní výstupní hodnoty, které software automaticky vygeneruje. Jak je vidět v tabulce, obě dvě metody určí maximální zatížitelnost – λ_{max} i kritické napětí v uzlu č. 3 - u_{3_krit} totožné. Vzhledem k odlišným vlastnostem softwarů, výpočtová doba se od sebe razantně liší a tím i počet opakování nutných k vyřešení. Toto je dáno velikostmi přírůstku zatížitelnosti, jak již bylo zmíněno.

Uzel č.	G-S metoda Velikost napětí [*pu*]	G-S metoda Úhel napětí [*pu*]	N-R metoda Velikost napětí [*pu*]	N-R metoda Úhel napětí [*pu*]
1	1.0600	0.0000	1.0600	0.0000
2	0.8715	-0.2002	0.8715	-0.2002
3	0.6681	-0.6874	0.6681	-0.6874
4	0.7405	-0.4692	0.7405	-0.4692
5	0.7676	-0.3772	0.7676	-0.3772
6	0.7327	-0.6839	0.7327	-0.6839
7	0.7577	-0.6013	0.7577	-0.6013
8	0.8099	-0.6013	0.8099	-0.6013
9	0.7308	-0.6731	0.7308	-0.6731
10	0.7187	-0.6878	0.7187	-0.6878
11	0.7156	-0.6964	0.7156	-0.6964
12	0.6897	-0.7430	0.6897	-0.7430
13	0.6832	-0.7413	0.6832	-0.7413
14	0.6822	-0.7413	0.6822	-0.7413

Tab. č. 5.2.3-2: Tabulka výstupních hodnot

V tabulce (Tab. č. 5.2.3-2) jsou výstupní hodnoty, které program je schopen vyřešit. Je patrné, že výstupní hodnoty Obě použité metody dospěly k naprosto stejným výsledků i přes různé použité hodnoty kritérií navyšovaní zatížitelnosti (*VK, SK* a *MK*). Rozdílové hodnoty v řešení jsou délka výpočtu a počet bodů nosové křivky.

5.2.4 Řešení napěťové stability s použitím analytických vztahů

V této kapitole jsem využil vztahy, které jsem odvodil pro řešení napěťové stability obecné 2-uzlové soustavy. Jejich odvození je naznačeno v kapitole 3.4 – Analytické řešení napěťové stability. Řešení s použitím analytických vztahů jsem využil pro ověření správnosti výsledků z programů, kterými jsem řešil napěťovou stabilitu numerickým výpočtem.

K analytickému řešení jsem vytvořil několik 2-uzlových soustav, na kterých bude demonstrováno použití analytických vztahů pro řešení napěťové stability s porovnáním použití numerických výpočtů. V následující tabulce jsou popsány vybrané soustavy:

Case	Typ větve	Prvky
EPS0002Ipu	Vedení	R, X, G, B
EPS000XIpu	Vedení	X
EPS000XIIpu	Transformátor	R, X

Tab. č. 5.2.4-1: Tabulka soustav a jejich charakteristika

S použitím výpočetních softwarů jsem dosáhl těchto výsledků:

Case	Analytika		Numerika G-S		Numerika N-R	
	p_{krit} [pu]	u_{i_krit} [pu]	p_{krit} [pu]	u_{i_krit} [pu]	p_{krit} [pu]	u_{i_krit} [pu]
EPS0002Ipu	-5.3832	0.5693	-5.3832	0.5693	-5.3832	0.5693
EPS000XIpu	-1.2361	0.5878	-1.2361	0.5878	-1.2361	0.5878
EPS000XIIpu	-37.0651	0.5875	-37.0651	0.5875	-37.0651	0.5875

Tab. č. 5.2.4-2: Výsledné hodnoty

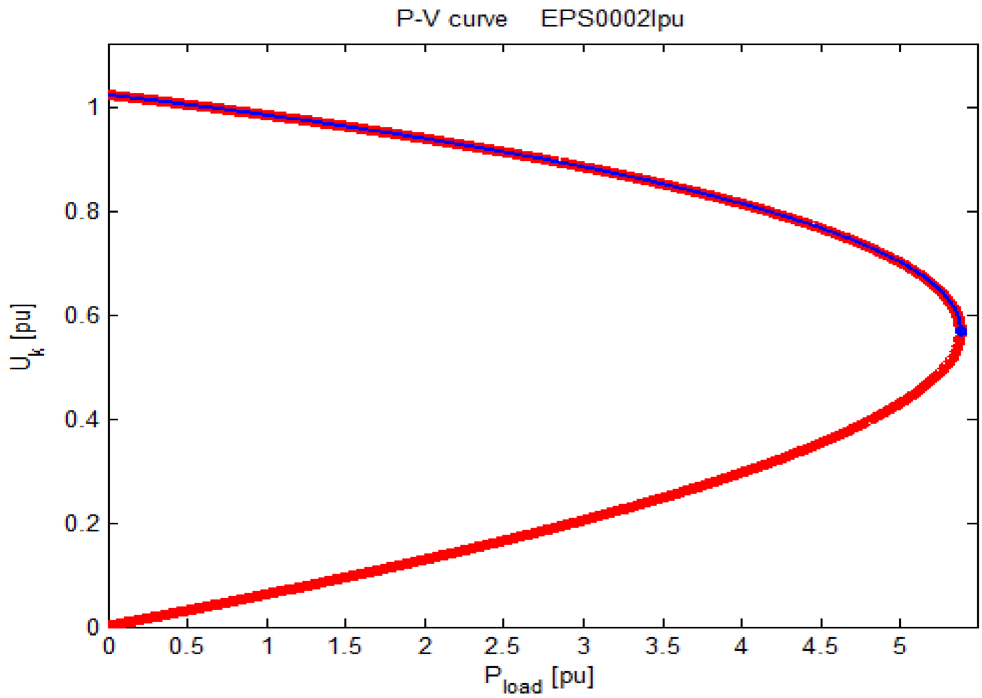
V tabulce (Tab. č. 5.2.4-2) jsou výsledné hodnoty z použitých výpočetních metod. První sloupec definuje název soustavy. Ve druhém a třetím sloupci jsou hodnoty získané řešením napěťové stability s použitím analytických vztahů. Ve čtvrtém a pátém resp. v šestém a sedmém sloupci jsou výsledné hodnoty řešení napěťové stability s použitím Gauss-Seidelovy resp. Newton-Raphsonovy iterační metody.

Z výsledných hodnot je patrné, že jednotlivé odchylky v řešení jsou nepatrné ne-li zanedbatelné. Hodnoty odchylek v procentech jsou uvedeny v tabulce (Tab. č. 5.2.4-3.).

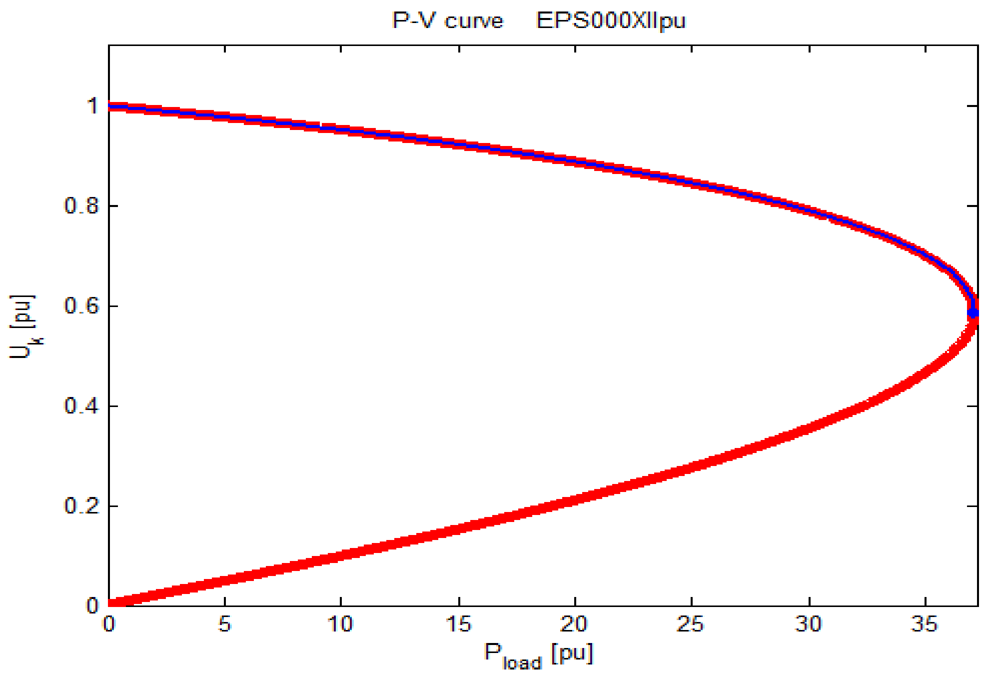
	Hodnoty odchylek [%]					
	Analytika - G-S		Analytika - N-R		N-R - G-S	
EPS0002Ipu	0.0013	0.0020	0.0013	0.0010	0.0000	0.0010
EPS000XIpu	0.0030	0.0010	0.0030	0.00300	0.0000	0.0020
EPS000XIIpu	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tab. č. 5.2.4-3: Hodnoty odchylek řešení

Nosové křivky pro soustavy EPS0002Ipu a EPS000XIIpu jsou představu na následujících obrazcích (Obr. 5.2.4-1 a 5.2.4-2), kde křivka červené barvy znázorňuje průběh celé nosové křivky, zatímco modrá křivka znázorňuje pouze stabilní část nosové křivky. Singulární bod je označen modrou tečkou.



Obr. 5.2.4-1: P-V křivka soustavy EPS0002Ipu



Obr. 5.2.4-2: P-V křivka soustavy EPS000XIIpu

5.2.5 Zhodnocení výsledků

Analyzováním napěťové stability elektrizačních soustav jsem získal hodnoty kritických napětí a maximální zatížitelnosti. Tyto hodnoty jsou pouze teoretické. Zařazením dalších limitních kritérií (přenosových linek, napěťových mezí) lze dosáhnout reálných hodnot. Výsledné hodnoty jsem vždy porovnával s výsledky CLF softwaru, a tím si ověřoval správnost výsledků. Zároveň jsem tuto metodu aplikoval na široké spektrum testových soustav, pomocí kterých jsem určil optimální nastavení navyšovacích kritérií zatížitelnosti pro obě použité metody *(VK, SK, MK).*

Při porovnání použitých metod řešící napěťovou stabilitu elektrizačních soustav je patrné, že řešení Gauss–Seidelovou metodou je vzhledem k časové náročnosti zcela nepřijatelné. Zároveň je důležité rozhodnout před započetím řešení, zda požadujeme přesné výsledky na úkor delší doby výpočtu nebo získáme hodnoty přibližné v kratším časovém intervalu. V mém případě jsem řešil soustavy se stovkami uzlů. Ze znalostí dob výpočtu (viz Kapitola 5.1.1) jsem zvolil vyšší hodnoty *(VK, SK, MK)*. I přesto byla výpočtová doba v jednotkách minut a výsledné hodnoty se shodovaly u většiny soustav (převážně L scénář).

Naopak analyzováním napěťové stability s využitím Newton-Raphsonovy metody jsem docílil velice přesných výsledků v krátkém časovém intervalu. A to i pro soustavy obsahující stovky uzlů. U této varianty řešení jsem zvolil nízké hodnoty navyšovacích kritérií a dosáhl tak výsledků s minimální odchylkou (vůči výsledkům poskytnuty CLF softwarem).

Bohužel obě metody obsahovaly skrytou chybu, kterou jsem analyzováním objevil. U některých soustav jsem se dostal až za možné teoretické meze soustavy, tzn. hodnoty maximální zatížitelnosti – λ_{max} byly vyšší než hodnoty poskytnuty CLF softwarem.

V závěru této kapitoly jsem řešil napěťovou stabilitu pomocí analytických vztahů. Tato metoda lze aplikovat pouze pro 2-uzlové soustavy, kde jsem určil hodnotu kritického napětí u_{i_krit} ve sledovaném uzlu a hodnotu maximálního možného činného zatížení p_{krit}. Výsledky jsem porovnával s hodnotami dosaženými z obou numerických metod pro řešení napěťové stability. Tento postup jsem testoval pro tři různé 2-uzlové soustavy za pomocí vytvořených programů. Hodnoty, kterých jsem dosáhl, byly přesné se zanedbatelnou odchylkou. Největší rozdíl výsledků byl 0,0030 %. Na závěr jsem vykreslil P-V křivky (nosové křivky), ze kterých lze odečíst kritické (teoretické i reálné) hodnoty pro danou 2-uzlovou soustavu.

5.3 Určení nejkratší vzdálenost k napěťové nestabilitě

Analyzování nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě jsem prováděl pouze u distribučních sítí nebo u soustav, které obsahovaly pouze PQ uzly. K testování jsem měl k dispozici dostatek soustav, na kterých jsem si mohl ověřit, zda software správně pracuje.

Modifikací softwaru řešení napěťové stability s použitím Newton-Raphsonovy metody jsem řešil tuto problematiku. Modifikace programu spočívá v řešení přírůstků zatížitelnosti (viz kapitola 3.3).

Pro testování jsem si zvolil dva odlišné scénáře řešení (*scénář 1 a scénář 2*), které se od sebe lišily počátečním směrovým vektorem zatížení. Tyto dva scénáře jsou zvoleny pro ověření výsledků, zda se výsledky nebudou od sebe navzájem lišit při různém počátečním zatěžování. Zároveň jsem část výsledků ověřil s výsledky, které mi poskytl Ing. Jan Veleba.

V následujících tabulkách jsou výsledné hodnoty pro testované soustavy, které byly k dispozici. Některé 2-uzlové soustavy jsem sám vytvořil.

CASE	Iterace	k_i (1)	k_i^*	P_0 [pu]	Q_0 [pu]	P_k [pu]	Q_k [pu]	CPU [s]	Δ k_i [%]
EPS000XIpu	7	1.8788	0.4024	-0.8000	-0.4000	-0.9766	-0.7616	5.8500	78.5824
EPS000XIIpu	18	102.5351	28.9244	-0.9000	-0.4000	-3.1111	-29.2398	145.7361	71.7907
EPS0002Ipu	13	13.8631	4.2959	-1.0000	-0.6000	-2.1893	-4.7217	24.0086	69.0122
EPS0007IIpu	8	0.1024	0.0160	-0.0480	-0.0228	-0.0656	-0.0548	3.8844	84.3670
EPS0013IIpu	11	0.0746	0.0142	-0.0109	-0.0066	-0.0256	-0.0401	6.6144	81.0079
EPS0019Ipu	7	6.3131	0.7230	-1.3410	-0.3990	-1.5234	-1.0862	8.2057	88.5475
EPS0035Ipu	8	0.0125	0.0037	-0.0035	-0.0023	-0.0082	-0.0071	6.8952	70.5349
EPS0043Ipu	6	4.1808	0.0186	-6.9700	-4.5800	-6.9849	-4.6440	7.8625	99.5545
EPS0125Ipu	8	0.0220	0.0034	-0.0349	-0.0192	-0.0499	-0.0433	16.5049	84.6785

Tab. č. 5.3-1: Tabulka výsledných hodnot pro *scénář 1*

CASE	Iterace	k_i (1)	k_i^*	P_0 [pu]	Q_0 [pu]	P_k [pu]	Q_k [pu]	CPU [s]	Δ k_i [%]
EPS000XIpu	7	0,7492	0,4024	-0,8000	-0,4000	-0,9766	-0,7616	5,3508	46,2906
EPS000XIIpu	18	54,8375	28,9244	-0,9000	-0,4000	-3,1111	-29,2398	132,2576	47,2543
EPS0002Ipu	14	7,4721	4,2899	-1,0000	-0,6000	-2,1892	-4,7218	25,3502	42,5882
EPS0007IIpu	8	0,0287	0,0160	-0,0480	-0,0228	-0,0656	-0,0548	4,0248	44,1657
EPS0013IIpu	10	0,0246	0,0142	-0,0109	-0,0066	-0,0256	-0,0401	6,0840	42,3928
EPS0019Ipu	11	2,0668	0,3963	-1,3410	-0,3990	-1,4197	-0,7751	9,7657	80,8274
EPS0035Ipu	10	0,0060	0,0037	-0,0035	-0,0023	-0,0082	-0,0071	8,5177	39,0123
EPS0043Ipu	6	0,1147	0,0186	-6,9700	-4,5800	-6,9849	-4,6440	6,2868	83,7673
EPS0125Ipu	7	0,0057	0,0034	-0,0349	-0,0192	-0,0499	-0,0433	14,1805	41,1191

Tab. č. 5.3-2: Tabulka výsledných hodnot pro *scénář 2*

V tabulkách (Tab. č. 5.3-1 a 5.3-2) jsou výsledné hodnoty pro *scénář 1*, kde počáteční směrový vektor zatížení je *etaP = -1 ; etaQ = 0.5* a *scénář 2*, kde počáteční směrový vektor zatížení jsem zvolil následně *etaP = -1 ; etaQ = 0*. Obě tabulky jsou totožné, proto budu popisovat pouze jednu. V prvním sloupci je název řešené soustavy. Ve druhém sloupci počet směrů zatěžování. Třetí a čtvrtý sloupec popisuje hodnoty vzdáleností od počátečního pracovního bodu do black-outu, kde třetí sloupec charakterizuje hodnotu vzdálenosti po prvním navyšování výkonového zatížení a čtvrtý sloupec je hledaná nejkratší vzdálenost mezi počátečním pracovním bodem a black-outem. Suma činných a jalových odběrových výkonů v počátečním pracovním bodu resp. v singulárním bodu jsou uvedeny ve sloupci č. 5 a č. 6 resp. ve sloupci č. 7 a č. 8. Hodnoty ve sloupci č. 9 reprezentují délku výpočtu. Poslední sloupec znázorňuje, o kolik procent klesla vzdálenost, mezi black-outem a počátečním pracovním bodem, při prvním a posledním navyšováním výkonového zatížení.

Dosažené hodnoty demonstrují rozdílné řešení po prvním navyšování v libovolném směrovém vektoru zatížení. Kritické hodnoty jsou však pro oba zvolené scénáře totožné, což je naznačeno v tabulce (Tab. č. 5.3-3), kde jsou spočteny jednotlivé odchylky hledaných řešení. V následující tabulce jsou uvedeny odchylky výsledků mezi *scénáři 1 a 2*.

CASE	$\Delta\, k_i^*$	$\Delta\, P_k$	$\Delta\, Q_k$
EPS000XIpu	0.0000	0.0000	0.0000
EPS000XIIpu	0.0000	0.0002	0.0000
EPS0002Ipu	0.0000	0.0005	0.0002
EPS0007IIpu	0.0000	0.0000	0.0000
EPS0013IIpu	0.0000	0.0000	0.0000
EPS0019Ipu	0.0000	0.0001	0.0000
EPS0035Ipu	0.0000	0.0000	0.0000
EPS0043Ipu	0.0000	0.0000	0.0000
EPS0125Ipu	0.0000	0.0000	0.0000

Tab. č. 5.3-3: Tabulka odchylek řešení

V tabulce (Tab. č. 5.3-3) jsou uvedeny odchylky pro dva různé scénáře počátečního zatěžování. Z výsledků je patrné, že u všech soustav software vyřešil stejnou nejkratší vzdálenost k nestabilitě, a to i pro různé počáteční směry výkonového zatěžování.

S těmito hodnotami se shodují i hodnoty činných a jalových výkonových odběrů, které se maximálně liší v setinách procent. Přesto jsem dosažené hodnoty kontroloval s výsledky uvedenými v tabulce (Tab. č. 5.3-4) poskytnuty vedoucím práce.

Case	Iterace	P_0	Q_0	k_i	P_{krit}	Q_{krit}	Nejmenší vl. číslo	CPU [s]
EPS0007II	6	-0,0480	-0,022800	0,0177	-0,0787	-0,0535	-2,13E-05	1,78
				0,0160	-0,0656	-0,0548	-3,64E-05	
EPS0013II	8	-0,0109	-0,006620	0,0161	-0,0431	-0,0389	7,15E-06	2,97
				0,0141	-0,0256	-0,0401	5,92E-06	
EPS0019I	12	-1,3410	-0,399000	1,2666	-4,0278	-3,0859	1,57E-04	5,05
				0,3843	-1,4197	-0,7751	9,51E-05	
EPS0035I	6	-0,0035	-0,0023	0,0048	-0,0117	-0,0105	-6,79E-06	3,00
				0,0037	-0,0082	-0,0072	1,07E-05	
EPS0043I	5	-6,9700	-4,5800	0,0276	-7,0552	-4,6652	2,95E-05	2,95
				0,0186	-6,9849	-4,6441	2,10E-05	
EPS0125I	6	-0,0349	-0,0192	0,0038	-0,0593	-0,0437	1,28E-06	6,69
				0,0034	-0,0499	-0,0433	-8,29E-07	

Tab. č. 5.3-4: Tabulka kontrolních výsledků

5.3.1 Ukázka řešení programu

V tomto případě jsem vybral tři vzorové případové studie. První studie se zabývala řešením nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě na obecné 2-uzlové síti. Tuto variantu jsem vybral, protože lze v P-Q rovině graficky znázornit jak se vzdálenost, od počátečního pracovního bodu do black-outu, zkracovala. Druhá studie se zabývala řešením libovolné soustavy, v mém případě soustavy EPS 13, ve kterém jsou i PQ uzly s definovaným nulovým činným odběrem a poslední studie analyzuje reálnou soustavu DS 19.

- **Případová studie EPS0002Ipu**

Tato 2-uzlová soustava je tvořena vedením 400 kV a sledovaný uzel je typu PQ. V následujících tabulkách jsou výsledné hodnoty řešení pro vzorovou 2-uzlovou soustavu EPS0002Ipu:

Iterace	k_i (1)	k_i^*	P_0 [pu]	Q_0 [pu]	P_k [pu]	Q_k [pu]	CPU [s]	Δ k_i [%]
11	13,86313	4,28988	-1,00000	-0,60000	-2,19019	-4,72147	21,23174	69,055

Tab. č. 5.3.1-1: Tabulka výstupních hodnot softwaru

V tabulce (Tab. č. 5.3.1-1) jsou hodnoty, které blíže popisují jednotlivé hodnoty. V prvním a druhém sloupci jsou hodnoty vzdálenosti od počátečního pracovního bodu do black-outu, kde první sloupec charakterizuje hodnotu vzdálenosti po prvním navyšování výkonového zatížení a druhý sloupec je hledaná nejkratší vzdálenost mezi počátečním pracovním bodem a black-outem. Suma činných a jalových odběrových výkonů v počátečním pracovním bodu jsou uvedeny ve sloupci č. 3 a č. 4. Hodnoty ve sloupci č. 5 – 8 reprezentují činné resp. jalové výkony při dosažení kritického bodu napěťové stability po prvním resp. posledním navyšování výkonového zatížení. Poslední sloupec znázorňuje, o kolik procent klesla vzdálenost, mezi black-outem a počátečním pracovním bodem, při prvním a posledním navyšováním výkonového zatížení.

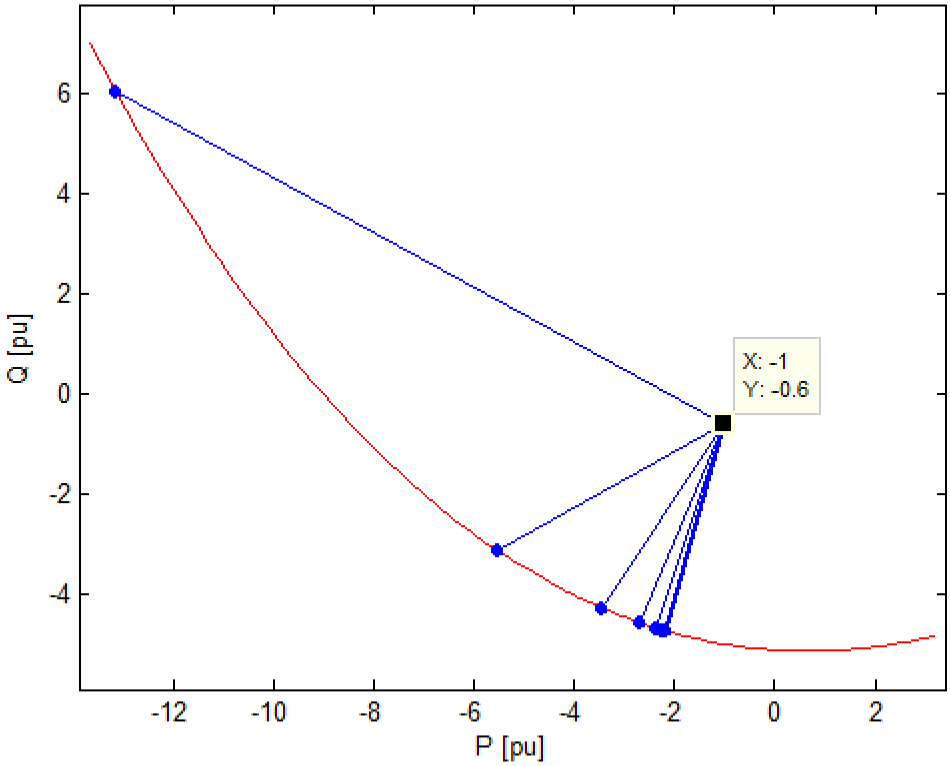
Iterace	k_i [-]	$\sum P_L$ [*pu*]	$\sum Q_L$ [*pu*]	Nejmenší vl. číslo
1	13.8631	-13.1592	6.0334	-0.0002
2	5.1982	-5.5452	-3.1225	-0.0004
3	4.4175	-3.4679	-4.2639	0.0011
4	4.3097	-2.6990	-4.5607	0.0013
5	4.2931	-2.3952	-4.6600	0.0014
6	4.2904	-2.2729	-4.6972	0.0014
7	4.2900	-2.2233	-4.7119	0.0014
8	4.2899	-2.2031	-4.7177	0.0013
9	4.2899	-2.1949	-4.7201	0.0020
10	4.2899	-2.1916	-4.7211	0.0015
11	4.2899	-2.1902	-4.7215	0.0013

Tab. č. 5.3.1-2: Tabulka výsledných hodnot

V tabulce (Tab. č. 5.3.1-1) v prvním sloupci je počet opakování, tzn., kolikrát bylo opakováno zatěžování od počátečního pracovního bodu. Druhý sloupce obsahuje hodnoty vzdáleností, od počátečního pracovního bodu – base casu do black-outu, zobrazující zkracování vzdálenosti k nestabilitě – k_i. Ve třetím resp. čtvrtém sloupci jsou hodnoty, které reprezentují celkový činný odběr výkonu – $\sum P_L$ resp. celkový jalový odběr výkonu $\sum Q_L$ soustavy (záporná hodnota = odběr viz znaménková dohoda rovnice (2-1)). V posledním sloupci jsou hodnoty nejmenších vlastních reálných čísel v jednotlivé iteraci.

Hodnoty vzdáleností k nestabilitě (sloupec č. 2 - k_i) se od původního zvoleného směru zatěžování se podstatně zkrátili a tím se změnily i hodnoty celkového činného a jalového odběru výkonu ze soustavy. Hodnoty uvedené v poslední řádce jsou výsledným řešením analýzy. Kde hodnota $k_i=4,2889$ je hodnota nejkratší vzdálenosti mezi počátečním pracovním bodem a black-outem. Této hodnotě přísluší i hodnoty celkových odběrů výkonů $\sum P_L = -2.1902$ *resp.* $\sum Q_L = -4.7215$.

Na obrázku (Obr. č. 5.3.1-1) je vykreslen graf znázorňující určení nejkratší vzdálenosti k napěťové nestabilitě. Křivka kritických zatížení – *S,* je v grafu vykreslena červeně. Body kritických zatížení jsou na křivce označeny modrým bodem. Jednotlivé vzdálenosti mezi kritickými body a počátečním bodem jsou vykresleny modře. Nejkratší vzdálenost do black-outu je vykreslena v grafu modrou tučnou čarou, což je hledané řešení této analýzy.



Obr. 5.3.1-1: Grafické znázornění konvergence k_i

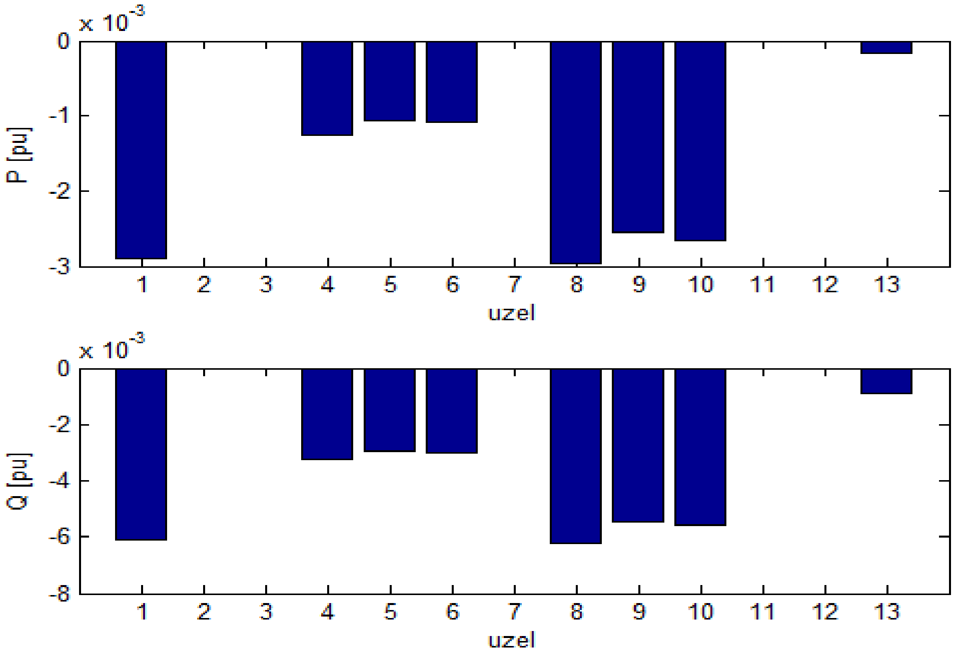
- **Případová studie EPS0013IIpu**

Tato soustava obsahuje pouze PQ uzly a zároveň v některých z uzlů soustavy je definovaný nulový činný výkonový odběr. V následující tabulce (Tab. č. 5.3.1-3) jsou výsledné hodnoty, které byly určeny pro *scénář2*: *etaP= -1, etaQ= 0.*

Iterace	k_i (1)	k_i^*	P_0 [pu]	Q_0 [pu]	P_k [pu]	Q_k [pu]	CPU [s]	Δ k_i [%]
13	2,0548	0,3843	-1,3410	-0,3990	-1,4197	-0,7751	12,9169	81,2994

Tab. č. 5.3.1-3: Tabulka výstupních hodnot softwaru

Na následujícím obrázku (Obr. 5.3.1-4) je znázorněno, o kolik se zvýší činný resp. jalový odběrový výkon v jednotlivých uzlech soustavy. Při této konfiguraci odběrů výkonu soustava dosáhne kritického bodu nejrychleji.



Obr. 5.3.1-2: Grafické znázornění výkonových odběrů v soustavě

Obrázek (Obr. 5.3.1-2) zobrazuje navýšení odběrového výkonu pouze v PQ uzlech, ve kterých je definován nenulový činný odběr výkonu. Je patrné, že nejvyšší navýšení činného i jalového výkonu je v uzlu č. 8. V tomto uzlu byl odběr navýšen o 0,3 MW a 0,6 MVAr.

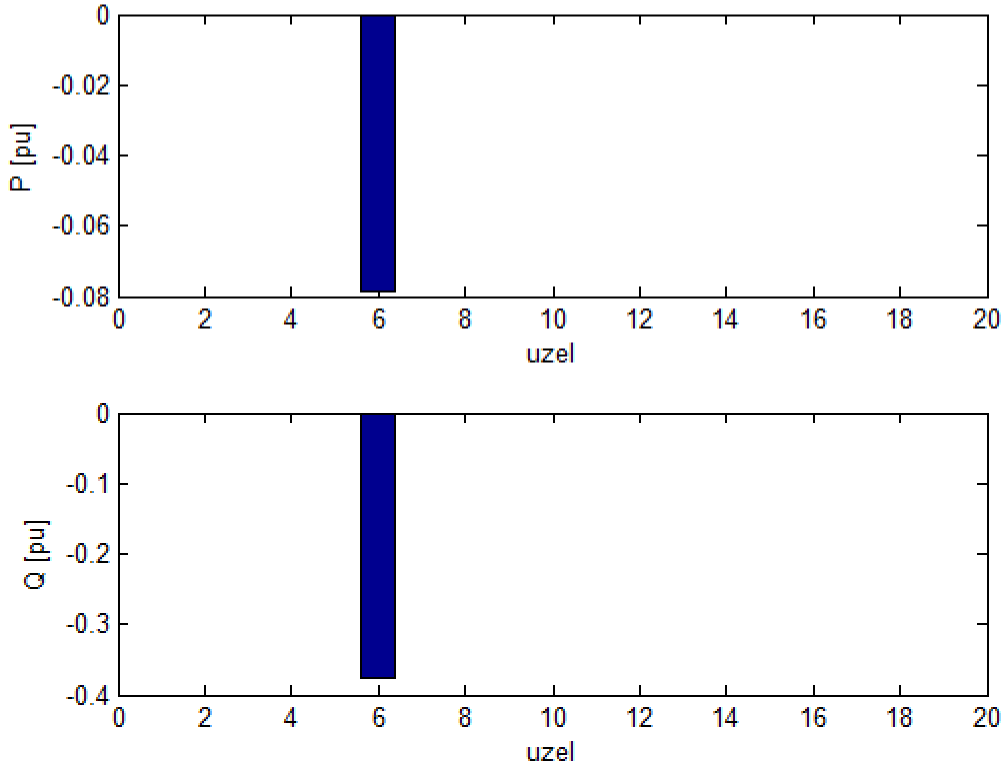
- **Případová studie EPS0019Ipu**

Toto je příklad reálné soustavy, konkrétně oblast Plzeň – jih. V následující tabulce jsou výsledné hodnot analýzy.

Iterace	k_i (1)	k_i^*	P_0 [pu]	Q_0 [pu]	P_k [pu]	Q_k [pu]	CPU [s]	Δ k_i [%]
13	2,0548	0,3843	-1,3410	-0,3990	-1,4197	-0,7751	12,9169	81,2994

Tab. č. 5.3.1-4: Tabulka výstupních hodnot softwaru

Při vyhodnocování výsledků této soustavy jsem zjistil změnu odběru výkonového zatížení pouze v jednom z uzlů soustavy. Z toho vyplývá, že nejkratší vzdálenosti k nestabilitě dosáhneme zvýšením činného resp. jalového odběrového výkonu jen v uzlu č. 6 o 7,87 MW resp. 37,61 MVAr. Toto navýšení je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 5.3.1-3).



Obr. 5.3.1-3: Navýšení odběrového výkonu pouze v uzlu č. 6

5.3.2 Zhodnocení výsledků

Analyzováním soustav distribučních soustav nebo soustav obsahující pouze PQ uzly jsem získal hodnoty nejkratších vzdáleností do black-outu a sumy činných a jalových výkonů všech uzlů soustavy při dosažení singulárního bodu. Tyto hodnoty jsem získal s použitím dvou mnou navržených scénářů, které se lišily v počátečním směrovém vektoru zatěžování. Tímto jsem ověřoval, zda program dospěje ke stejnému řešení. Výsledné hodnoty byly shodné pro všechny testované soustavy. Zároveň jsem ověřil správnou funkci softwaru pomocí grafického zobrazení v P-Q rovině u 2-uzlové soustavy, kde je naznačeno, jak se vzdálenost k napěťové nestabilitě zmenšovala až ke hledanému řešení.

Část výsledků jsem rovněž kontroloval s hodnotami poskytnutými vedoucím práce, který zvolil odlišný scénář počátečního směrového vektoru (*etaP* = *-1*, *etaQ* = *-1*). Hodnoty jednotlivých vzdáleností se shodovali pro všechny tři případy zvoleného počátečního směrového vektoru zatěžování. Tyto výsledky dokazují správnou funkci vytvořeného softwaru.

6 Závěr a shrnutí

Hlavním cílem této diplomové práce je představit napěťovou stabilitu elektrizačních soustav a s tím spojené i následné analyzování napěťové stability v ustáleném stavu. V této práci je podrobně popsána tvorba admitanční matice i případné změny v matici vlivem rekonfigurace soustavy. Dále jsou zde popsány dvě nejpoužívanější numerické metody (Gauss-Seidelova a Newton-Raphsonova), které jsou určeny pro řešení chodu soustavy. Součástí těchto numerických postupů je i popis a aplikace jalových mezí u elektrárenských uzlů (PU uzlů) v těchto metodách, které dodávají reálnější průběh řešení. Hlavní část práce je zaměřena na popis napěťové stability v soustavách, analytické odvození vztahů napěťové stability pro obecnou 2-uzlovou soustavu, řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu "hrubou" silou a představení analýzy k určení nejkratší vzdálenosti do black-outu.

Stěžejní částí této práce bylo vytvořit výpočtové softwary v programu MATLAB (7.1) řešící napěťovou stabilitu elektrizačních soustav v ustáleném stavu a program, který určí nejkratší vzdálenost do black-outu. Napěťovou stabilitu jsem řešil pomocí dvou vytvořených softwarů, jejichž základ se lišil v použité numerické metodě řešící chod soustavy. Tyto programy určí teoretické hodnoty maximální zatížitelnosti a velikosti kritických napětí v libovolných uzlech soustavy. Zároveň oba softwary vytvoří grafické okno vykreslující nosovou křivku. Tyto softwary vyřeší pouze stabilní část nosové křivky. Dále jsem napěťovou stabilitu řešil u 2-uzlových soustav s použitím analytických vztahů, které jsem sám odvodil. Software řešící nejkratší vzdálenost do black-out je unikátní. Tento druh výpočtu se v žádném dostupném programu nevyskytuje a jeho teoretický základ je popsán pouze v jedné odborné anglické literatuře. Výstupem tohoto programu je hodnota minimální vzdálenosti do black-outu. Rovněž software určí potřebnou změnu odběrových výkonů ze všech uzlů soustavy, tak aby vzdálenost od počátečního bodu soustavy do black-outu byla minimální.

Všechny vytvořené programy lze samozřejmě dále zdokonalit. Především postrádají uživatelské prostředí, které by umožňovalo snazší ovládání. Upgradováním softwarů řešící napěťovou stabilitu lze získat mnoho zajímavých výstupních hodnot (např. napěťových a výkonových marginů). Začleněním provozních limitů (vedení, transformátorů) a napěťových mezí lze dosáhnout reálných mezí soustav. Software řešící vzdálenost do black-out lze rozšířit i pro řešení soustav obsahující PU uzly s jalovými mezemi. Vytvořené softwary jsou určeny zatím pro výukové účely.

Seznam použité literatury

[1] J. Mertlová. P. Hejtmánková a T. Tajtl: *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. ZČU. Plzeň. 2004.

[2] J. Veleba: *Výpočet provozních a poruchových stavů v ES pomocí PC - ustálené stavy*. Diplomová práce. ZČU Plzeň. 2008.

[3] J. Veleba: *Řešení chodu soustavy I. Přednáška k předmětu Teorie přenosu a rozvodu*. ZČU Plzeň. 2011.

[4] J. Veleba: *Řešení chodu soustavy II. Přednáška k předmětu Teorie přenosu a rozvodu*. ZČU Plzeň. 2011.

[5] J. Veleba: *Application of continuation load flow analysis for voltage collapse prevention*. ActaTechnica 57. 2012. pp. 143-163.

[6] J.J. Grainger and W.D. Stevenson: *Power System Analysis*. McGraw-Hill. 1994.

[7] H. Saadat: *Power System Analysis - 2nd edition*. McGraw-Hill. 2002.

[8] P. Kundur: *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill. 1994.

[9] M. Larsson: *Coordinated Voltage Control in Electric Power Systém*. Doctoral dissertation. Lund University. 2000.

[10] J. Doležal. V. Pospíšil: *Hodnocení bezpečnosti chodu soustavy.* Praha. 2010.

[11] S. Chakrabarti: *Notes on Power System Voltage Stability.* Kanpur. 2010.

[12] ČEPS – technická infrastruktura [online], 2013 [cit. 30. 4. 2013] – http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/default.aspx

[13] Trust energy – trust consulting [online], 2013 [cit. 30. 4. 2013] – http://www.trustenergy.cz/elektrina/

[14] Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity [online], 2013 [cit. 30. 4. 2013] – http://alpestat.com/lexique/html/_ucte.html

[15] University of Washington Electrical Engineering : Power Systems Test Case Archive [online], 2013 [cit. 30. 4. 2013] – http://www.ee.washington.edu/research/pstca

[16] M. Vyhnal: *Optimalizace chodu konvenčních numerických metod pro řešení chodu soustavy*. Diplomová práce. ZČU Plzeň. 2012.

[17] ELEKTRO - odborný časopis: Příčiny a následky velkých výpadků v dodávkách elektřiny [online], 2013 [cit. 5. 5. 2013] – http://www.odbornecasopisy.cz/

[18] E. Dvorský: *Řízení činných toků v ES - Přednáška k předmětu Měření, řízení a regulace v ES,* ZČU Plzeň, 2011.

Přílohy

Seznam testových soustav	
Case	**Informace / zdroj**
EPS000XIpu	002 Bus Test Case, Power System – Analytic Case, Source: Jiri CELEDA / FEL ZCU V PLZNI, 2013
EPS000XIIpu	002 Bus Test Case – Power line, Power System – Shortest distance Case, Source: Jiri CELEDA / FEL ZCU V PLZNI, 2013
EPS0002Ipu	002 Bus Test Case – Transformer, Power System – Shortest distance Case, Source: Jiri CELEDA / FEL ZCU V PLZNI, 2013
EPS0007IIpu	7 Bus Test Power System (Case Study II.) Source: Glover, Sarma & Overbye 2008
EPS0009IIpu	IEEE 9 Bus Test Case (US), modified VAR limits in PVs Source: Lin/Zhan/Huang 2006
EPS0010Ipu	10 Bus Test Case Source: Bakirtzis/Kim/Meliopoulos 2002
EPS0011Ipu	Reduced Mato Grosso Systém, 11 Bus Test Case, Brazil Source: Granville/Mello 1996
EPS0011IIpu	11 Bus Test Case, Source: Kundur, 1994
EPS0011IIIpu	Klos-Kerner power systém, 11 Bus Test Case - light Source: Klos/Kerner 1975
EPS0013Ipu	13 Bus Test System (Ill-Conditioned Case) Source: Tripathy/Prasad/Malik/Hope 1982
EPS0013IIpu	26 Bus Test Case with constant shunt generation' Source: Saadat 2002
EPS0014Ipu	IEEE 14 Bus Test Case (US), Year 1962, Winter Season Source: UW ARCHIVE, 08/19/93
EPS0015Ipu	15 Bus Test Case Source: Yamayee/Bala 1994
EPS0016Ipu	16 Bus Test Case Source: Gross 1986
EPS0017Ipu	17 Bus Test Case, Reduced primary AC System for the South Island of New Zealand, Source: Arrilaga/Watson 2001
EPS0019Ipu	Dis. System 19 Bus Case (CZ),Distribuce Plzen - Jih Source: Ing. Silhan, 2008
EPS0023Ipu	23 Bus Test System Source: El-Ela 1992
EPS0024Ipu	IEEE 24 Bus RTS Case, IEEE Reliability Test Power System Source: MatPower v.4.0b1
EPS0026Ipu	26 Bus Test Case with constant shunt generation Source: Saadat 2002
EPS0030Ipu	IEEE 30 Bus Test Case (US), Year 1961, Winter Season Source: UW ARCHIVE, 08/20/93
EPS0035Ipu	IEEE 34 Node Test Feeder Source: Internet
EPS0037Ipu	IEEE 37 Bus Distribution Test Case with distributed generation, Sbase = 100kVA, Source: Shahidehpour/Wang, 2003
EPS0039Ipu	IEEE 39 Bus Test Case - New England systém base case power flow data, Source: Ajjarapu, 2006
EPS0043Ipu	43 Bus Test System (Ill-Conditioned Case) Source: Tripathy/Prasad/Malik/Hope 1982
EPS0057Ipu	IEEE 57 Bus Test Case (US), Year 1961, Winter Season Source: UW ARCHIVE, 08/25/93
EPS0059Ipu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case A - heavy load conditions (G 23030 MW, L 22300 MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008

EPS0059IIpu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case B - med-heavy load conditions (G 21590 MW, L 21000MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008
EPS0059IIIpu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia Case C - peak load conditions (G 25430 MW, L 24800 MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008
EPS0059IVpu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case D - light load conditions (G 15050 MW, L 14810 MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008
EPS0059Vpu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case E - medium load conditions (G 19060 MW, L 18600 MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008
EPS0059VIpu	Simplified 59-Bus 14-Generator Test Case (SE Australia) Case F - light load conditions (G 14840 MW, L 14630 MW) SVCs modelled as PV buses, Source: Gibbard/Vowles 2008
EPS0061Ipu	61 Bus Test Case (UK) Source: Taylor 2009
EPS0118Ipu	IEEE 118 Bus Test Case (US),Year 1961, Winter Season Source: UW ARCHIVE, 08/25/93
EPS0125Ipu	IEEE 123 Node Test Feeder Source: Internet
EPS0145Ipu	IEEE 145 Bus Test Case Year 1990, Summer Season: 50-Gen Case Source: IEEE Working Group, 01/02/90
EPS0162Ipu	IEEE 162 Bus Test Case Year 1990, Summer Season: 17-Gen Case Source: IEEE Working Group, 01/02/90
EPS0300Ipu	IEEE 300 Bus Test Case (US) Year 1991, Summer Season Source: CYME INTERNATIONAL, 13/05/91
EPS0629Ipu	629 Bus Test Case (UK), Scotland Area Source: Prof. Malcolm Irving, BIPS, Brunel University 2009
EPS0629IIpu	629 Bus Test Case (UK),Scotland Area - modified var limits Source: Jan Veleba, ZCU Pilsen 2009
EPS0734Ipu	734 Bus Test Case (UK), Scotland + Wales Area Source: Prof. Malcolm Irving, BIPS,'Brunel University 2009
EPS0734IIpu	734 Bus Test Case (UK), Scotland + Wales Area - modified var limits, Source: Jan Veleba, ZCU Pilsen 2009
EPS2383Ipu	2383 Bus Test Case (Polish),Year 1999-00, Winter Season Peak Lines to foreign networks are replaced by artificial load or generator buses (buses 180-186), Multiple generators have been aggregated, Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl
EPS2736Ipu	2736 Bus Test Case (Polish), Year 2004, Summer Season Peak Multiple generators have not been aggregated' Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl
EPS2737Ipu	2737 Bus Test Case (Polish),Year 2004, Summer Season Off-Peak, Multiple generators have not been aggregated Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.p
EPS2746Ipu	2746 Bus Test Case (Polish),Year 2003-04, Winter Season Off-Peak, Multiple generators have not been aggregated Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.p
EPS2746IIpu	2746 Bus Test Case (Polish), Year 2003-04, Winter Season evening peak, Multiple generators have not been aggregated Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl
EPS3012Ipu	3012 Bus Test Case (Polish), Year 2007-08, Winter Evening Peak, Multiple generators have been aggregated Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl
EPS3120Ipu	3120 Bus Test Case (Polish), Year 2008, Summer Morning Peak Multiple generators have been aggregated Source: Roman Korab, roman.korab@polsl.pl