



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOORDINACE PROVOZU PST TRANSFORMÁTORŮ V PROPOJENÉM REGIONU
OPERATION COORDINATION OF PHASE-SHIFTING TRANSFORMERS IN AN
INTERCONNECTED REGION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Tesař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Branislav Bátora, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Tesař

ID: 164425

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Koordinace provozu PST transformátorů v propojeném regionu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Transformátory s příčnou regulací fáze
2. Používané způsoby koordinace PST
3. Návrh a odzkoušení algoritmu pro koordinaci nastavení odboček PST ve vysoce propojených oblastech, jako je přenosová soustava střední Evropy

Cílem algoritmu by mělo být nalezení optimální odbočky tak, aby bylo zajištěno dodržení bezpečnostního kritéria N-1 a zároveň aby nedocházelo k nadbytečné protiregulaci PST. V případě nedostatečnosti PST pro zajištění dodržení kritéria N-1 by měl algoritmus navrhnout další opatření (redispečink) za podmínky minimalizace nákladů nebo ztrát.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Branislav Bátora, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

TESAŘ, J. *Koordinace provozu PST transformátorů v propojeném regionu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Branislav Bátora, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma KOORDINACE PROVOZU PST TRANSFORMÁTORŮ V PROPOJENÉM REGIONU jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

Zároveň bych touto cestou rád poděkoval Ing. Branislavovi Bátorovi, Ph.D. za vedení, pomoc a rady při zpracování této diplomové práce, a Ing. Martinovi Pistorovi za konzultace a odborné připomínky k tématice práce.

V Brně dne: 21.5.2018

.....

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá transformátory s příčnou regulací fáze (PST) a jejich koordinací v elektricky blízkém propojeném regionu. V práci je provedena teoretická rešerše popisující způsoby řízení výkonu, popis funkce a konstrukce PST, dále popis stávajících metod pro koordinaci PST ve světě. Na základě této rešerše je vytvořen optimalizační algoritmus v prostředí MATLAB, který počítá doporučené nastavení odboček PST na základě vstupní konfigurace sítě.

V druhé části práce jsou popsány dílčí části tohoto algoritmu a prezentovány výsledky ze tří demonstračních scénářů. Algoritmus je schopen vyřešit malé problémy v síti, větší problémy jsou nad síly samotných PST. Pro kompletní funkčnost algoritmu je třeba rozšířit řešení o algoritmus redispečinku sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA: Algoritmus, phase-shifter, PST, koordinace, optimalizace

ABSTRACT

This master's thesis deals with phase-shifting transformers (PST) and coordination of electrically close devices in an interconnected region. Theoretical research is performed in the work, describing methods of power control, function and design of PST, as well as actual methods of PST coordination in the rest of the world. Based on the research there is an optimisation algorithm designed in MATLAB, which computes recommended tap setting of PST based on the network configuration.

In the second part of this thesis there are described components of this algorithm and also presented the results of three demonstrative scenarios. Algorithm is able to solve minor problems in the network; more complex problems are beyond its solving ability. For an improved functionality there is a necessity to further expand this algorithm by a network redispatch solving algorithm.

KEY WORDS: Algorithm, phase-Shifter, PST, coordination, optimisation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	11
2 TRANSFORMÁTORY S PŘÍČNOU REGULACÍ FÁZE.....	12
2.1 ŘÍZENÍ TOKU VÝKONU	12
2.1.1 UZLOVÁ NAPĚTÍ	14
2.1.2 REAKTANCE VEDENÍ	14
2.1.3 FÁZOVÝ POSUV	14
2.2 PRINCIP REGULACE FÁZE PST	15
2.2.1 PŘÍMÝ ASYMETRICKÝ TRANSFORMÁTOR.....	18
2.2.2 PŘÍMÝ SYMETRICKÝ TRANSFORMÁTOR	19
2.2.3 NEPŘÍMÝ ASYMETRICKÝ TRANSFORMÁTOR	20
2.2.4 NEPŘÍMÝ SYMETRICKÝ TRANSFORMÁTOR	20
2.2.5 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ŘEŠENÍ	21
2.3 INSTALOVANÉ JEDNOTKY V EVROPĚ	21
3 POUŽÍVANÉ ZPŮSOBY KOORDINACE PST.....	22
3.1 METODA MONTE CARLO.....	22
3.2 VÍCESTUPŇOVÁ METODA MONTE CARLO.....	23
3.3 PARTICLE SWARM – HEJNO ČÁSTIC	24
3.4 LINEARIZACE SOUSTAVY A ŘEŠENÍ POMOCÍ STEJNOSMĚRNÉ ANALÝZY.....	25
4 OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS.....	26
4.1 PŘÍPRAVA TESTOVACÍ OBLASTI.....	27
4.1.1 MODEL OBLASTI	27
4.1.2 MODEL PST	28
4.2 POPIS OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU	29
4.2.1 VSTUPNÍ DATA	29
4.2.2 ADMITANČNÍ MATICE	31
4.2.3 ZAŘAZENÍ PST DO ADMITANČNÍ MATICE	31
4.2.4 DC ANALÝZA – VÝPOČET TOKŮ ČINNÉHO VÝKONU	32
4.2.5 KRITÉRIUM N-1.....	33
4.2.6 STANOVENÍ CITLIVOSTI PST (VLIV NA SÍŤ)	34
4.2.7 VYHODNOCENÍ TOKŮ.....	34
4.3 ÚPRAVA ODBOČEK PST.....	36
4.3.1 ŘEŠENÍ ZÁKLADNÍHO STAVU	36
4.3.2 ŘEŠENÍ SÍŤE VČETNĚ KRITÉRIA N-1	37
5 VÝSLEDKY.....	39
5.1 SCÉNÁŘ 1 – PRVOTNÍ NÁVRH.....	39
5.2 SCÉNÁŘ 2 – SÍŤ PO REDISPEČINKU	44
5.3 SCÉNÁŘ 3 – ZVÝŠENÁ VÝROBA OZE V NĚMECKU.....	48
6 ZÁVĚR.....	51
POUŽITÁ LITERATURA	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1 - Jednoduchý model přenosového vedení</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2.2 - Fázorový diagram jednoduchého vedení.....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2.3 - Průběh činného a jalového výkonu na vedení bez uvažování ztrát a pro $U_1 = U_2$..</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2.4 - Schéma sériové kompenzace (TCSC)[2]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2.5 - Paralelní vedení s PST [10]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2.6 - Model vedení s PST bez uvažování ztrát a bez zatížení.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2.7 - Ukázka efektu PST na dvě nesouměrně zatížená paralelní vedení z obr. 4[7].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2.8 - Konstrukce dvoujádrového transformátoru s příčnou regulací</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2.9 - Přímý asymetrický transformátor s příčnou regulací fáze [10].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2.10 - Fázorový diagram přímého asymetrického PST [10]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2.11 - Přímý symetrický PST [10]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.12 - Fázorový diagram symetrického přímého transformátoru [10]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2.13 - Nepřímé asymetrické zapojení PST [10].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2.14 - Nepřímé symetrické zapojení PST [10].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2.15 - Instalované PST v Evropě (k roku 2017) [14].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3.1 - Příklad stanovení velikosti čísla π metodou Monte Carlo.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3.2 - Vícetupňová metoda Monte Carlo se čtyřmi úrovněmi přiblížení</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4.1 - Vývojový diagram algoritmu</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4.2 - Přibližná ukázka modelované oblasti [13].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 4.3 - Porovnání hodnot matematického popisu (červeně) a reálných měření (modře) změny reaktance v závislosti na úhlu α [15]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 4.4 - Kód - vstupní data</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4.5 - Kód - stanovení admitanční matice</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.6 - Kód - výpočet parametrů PST při nulté a při maximální odbočce.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.7 - Kód - zařazení PST do admitanční matice</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4.8 - Kód - stanovení napětově-úhlového profilu</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.9 - Kód - zápis napětí do výsledkové matice U_N a U_V.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.10 - Kód - kritérium N-1</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4.11 - Kód - stanovení citlivosti PST a vlivu na síť</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4.12 - Kód - výpočet zatížení vedení</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 4.13 - Kód - vyhodnocení citlivosti PST</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 4.14 - Kód - úprava odboček PST při základním stavu</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 4.15 - Kód - úprava odboček PST při kontrole kritéria N-1.....</i>	<i>37</i>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 4.16 – Kód – omezovací podmínky výsledků algoritmu.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 5.1 - Scénář 1 - rozložení proudu, 1. iterace</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 5.2 - Scénář 1 - rozložení proudu, 2. iterace</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5.3 - Scénář 1 - rozložení proudu, 3. iterace</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5.4 - Scénář 1 - rozložení proudu, 4. iterace</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 5.5 - Scénář 1 - rozložení proudu, 5. iterace</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 5.6 - Scénář 1 - rozložení proudu, 6. iterace</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 5.7 - Scénář 1 - rozložení proudu, 7. Iterace</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 5.8 - Scénář 1 – změna odboček PST v jednotlivých iteracích</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 5.9 - Scénář 2 - rozložení proudu, 1. Iterace</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 5.10 - Scénář 2 - rozložení proudu, 2. Iterace</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 5.11 - Scénář 2 - rozložení proudu, 3. Iterace</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 5.12 - Scénář 2 - rozložení proudu, 4. Iterace</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.13 - Scénář 2 – změna odboček PST v jednotlivých iteracích</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 5.14 – Scénář 3 – Výchozí stav bez kritéria N-1 (1.iterace).....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 5.15 – Scénář 3 – Finální stav včetně N-1 (7. Iterace).....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 5.16 – Scénář 3 – Změna odboček v jednotlivých iteracích.....</i>	<i>50</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.1 - Průměrné měrné hodnoty vedení v síti.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4.2 - Šítkové parametry PST 850 MVA provozované společností ČEPS [14]</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4.3 - ukázka zápisu hodnot v souboru uzly.xls</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4.4 - ukázka zápisu hodnot ze souboru vedeni.xls.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4.5 – Ukázka matice PSDF (distribuční faktor PST) – změna P při regulaci úhlu o 1°..</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 4.6 – Ukázka matice Iv – výpočet rozložení proudu.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 5.1 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 1. iteraci</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 5.2 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 2. iteraci</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 5.3 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 3. iteraci</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5.4 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 4. iteraci</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5.5 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 5. iteraci</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 5.6 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 6. iteraci</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 5.7 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 7. iteraci</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 5.8 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 2. iteraci</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 5.9 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 3. iteraci</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 5.10 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 4. iteraci</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 5.11 – Scénář 3 – Soupis výsledků</i>	<i>49</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity (Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny)
FACTS	Flexible AC Transmission Systems (Přizpůsobivé střídavé přenosové systémy)
PSE	Polskie Sieci Elektroenergetyczne (Operátor polské přenosové soustavy)
PST	Transformátor s příčnou regulací fáze (Phase-shifting transformer)
TCSC	Thyristor-controlled series capacitor (Tyristorově řízený sériový kondenzátor)
TSO	Transmission system operator (Operátor přenosové soustavy)
UPFC	Unified power flow controller (Jednotný ovladač toku výkonu)

Značka	Veličina	Jednotka
I	Proud	A
S_1	Výkon v uzlu 1	VA
P_1	Činný výkon v uzlu 1	W
Q_1	Jalový výkon v uzlu 1	VA _r
U_1	Napětí v uzlu 1	V
U_2	Napětí v uzlu 2	V
U_L	Napětí zátěže	V
U_S	Napětí zdroje	V
U'	Napětí za impedancí transformátoru	V
U	Napětí za ideálním transformátorem	V
δ	Zátěžný úhel	°
α	Regulační úhel PST	°
R_V	Odpor vedení	Ω
X_V	Reaktance vedení	Ω
B_V	Susceptance vedení	μS
X_{PST}	Reaktance PST	Ω

1 ÚVOD

Základním úkolem přenosové soustavy je doručovat vyrobenou elektřinu z generátorů ke spotřebičům. Elektřina je vyrobena a přenesena okamžitě tam, kde je potřeba. Výpadek elektřiny je nežádoucí, proto musí být soustava dostatečně robustní, aby odolala vysokým nárokům spotřeby, náhodným poruchám elektrických zařízení nebo náporům počasí. Zároveň musí být celý systém vybudován a provozován co nejekonomičtěji.

Ještě před několika lety se přenosové soustavy obešly bez aktivních prvků, neboť byly navrženy ve stabilní konfiguraci a dal se předvídat reálný vývoj. Meziúčetní výměny byly pouze v menším rozsahu a obvykle blízko plánovaným hodnotám. Nicméně s rozvojem obnovitelných zdrojů, otevřenému trhu vedoucímu ke vzniku oblastí s výrazným exportem či importem a velkými omezeními ve výstavbě nové infrastruktury dochází ke vznikům tzv. úzkých míst. Přes tyto místa dochází k přenosu obrovských výkonů, na které nejsou dimenzována.

Obvyklá řešení jako rekonfigurace a redispečink řeší tyto problémy jen velmi obtížně a ne vždy jsou schopné problém vyřešit úplně. V některých případech hrozí i nesplnění bezpečnostního kritéria N-1, které vyjadřuje požadavek na dimenzování sítí tak, aby při výpadku kteréhokoliv prvku v síti nedošlo k přetížení ostatních prvků. Pokud totiž ochrana odpojí přetížené vedení, celý tok tímto prvkem se přerozdělí do ostatních vedení, čímž může dojít k přetížení i dalších prvků. Lavinově by potom reagovaly i ostatní ochrany a postupně by došlo k odpojení všech přetížených prvků, což by způsobilo rozpad sítě a tzv. blackout, tedy úplný výpadek dodávky energie.

Z uvedených důvodů se hromadně začalo využívat aktivních prvků v síti, které dokážou tyto výkonové toky regulovat. Jedním z nich je právě transformátor s příčnou regulací fáze. S rostoucím počtem těchto prvků v síti ovšem vyvstává otázka, zda a jak se budou vzájemně ovlivňovat. Aby totiž tyto prvky pracovaly efektivně, je třeba určitým způsobem koordinovat jejich nastavení. Mohlo by totiž dojít ke stavu, kdy jeden prvek působí jako přesný opak jiného prvku a vlastně tak znehodnocuje žádaný výsledek.

2 TRANSFORMÁTORY S PŘÍČNOU REGULACÍ FÁZE

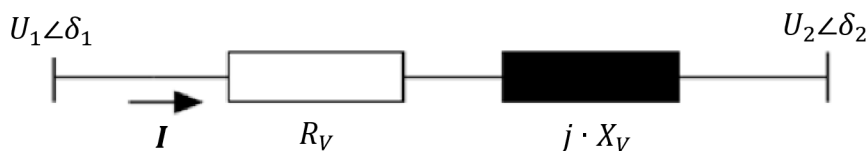
V minulosti se přenosové soustavy navrhovaly za účelem dodávky elektrické energie vyrobené generátory ve stejném regionu nebo zemi. Propojení se realizovalo hlavně z důvodu havarijní výpomoci, a tak nebylo nutné budovat velké přenosové kapacity na hraničních propojkách. Nicméně deregulace trhu s elektřinou vedla k podstatným změnám. Přenosová soustava stále slouží k dopravě energie od výrobce ke spotřebiteli, který ale nemusí být ze stejné země, dokonce ani ze sousedního státu. Smlouva potom stanovuje, že výrobce vyrobí určité množství energie a spotřebitel toto množství přímou cestou obdrží a zaplatí. Reálná cesta toku energie ovšem podléhá fyzikálním zákonům a dělí se do všech paralelních cest, a to i přes soustavy zemí, které vůbec nefigurují v obchodní transakci.

Kombinace odlehle výroby a mezinárodního obchodu způsobuje vznik tranzitních a kruhových toků, které mohou způsobit problémy s přetížením. Častým faktorem jsou nepředvídané změny toků při proměnlivé výrobě z obnovitelných zdrojů. Pro zajištění bezpečného provozu a stability sítě je tedy nutné tyto výkonové toky omezovat a řídit.

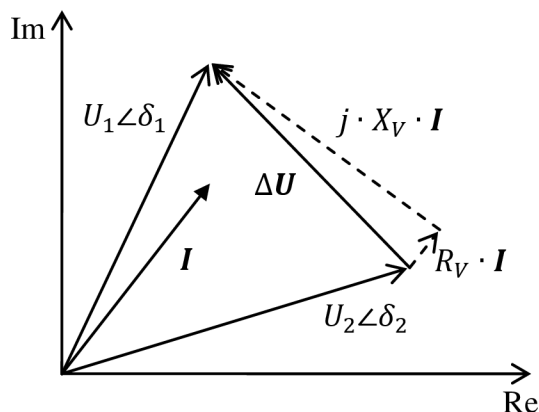
2.1 Řízení toku výkonu

Pro popis toku výkonu po vedení mezi dvěma uzly lze použít jednoduchý model složený z podélného odporu a induktivní reaktance. Komplexní proud tekoucí mezi těmito uzly potom závisí na rozdílu velikosti a úhlu napětí v uzlech a také na celkové impedanci vedení, kde U_1 a U_2 jsou sdružená napětí a Z_v je impedance vedení:

$$I = \frac{U_1 \angle \delta_1 - U_2 \angle \delta_2}{\sqrt{3} \cdot Z_v} = \frac{U_1 \angle \delta_1 - U_2 \angle \delta_2}{\sqrt{3} \cdot (R_v + j \cdot X_v)} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1 - Jednoduchý model přenosového vedení



Obrázek 2.2 - Fázorový diagram jednoduchého vedení

Komplexní výkon na začátku vedení (v uzlu 1) získáme pomocí sdruženého napětí U_1 v daném místě a komplexně sdruženého proudu z předchozí rovnice.

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I^* \quad (2.2)$$

Dosazením proudu z rovnice (2.1) získáme rovnici pro komplexní výkon ve tvaru:

$$S_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{\frac{R_V^2 + X_V^2}{X_V}} \cdot \sin \delta + \frac{U_1^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta}{\frac{R_V^2 + X_V^2}{R_V}} + j \cdot \left[\frac{U_1^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta}{\frac{R_V^2 + X_V^2}{X_V}} - \frac{U_1 \cdot U_2}{\frac{R_V^2 + X_V^2}{R_V}} \cdot \sin \delta \right] \quad (2.3)$$

Kde rozdíl fázových úhlů $\delta_1 - \delta_2$ je roven δ , tedy celkovému fázovému posuvu mezi uvažovanými napětími U_1 a U_2 . Pro názornost lze uvažovat v případě přenosové soustavy bezztrátové vedení s činným odporem R_V vedení rovným nule. V takovém případě se rovnice zjednoduší na tvar (2.4).

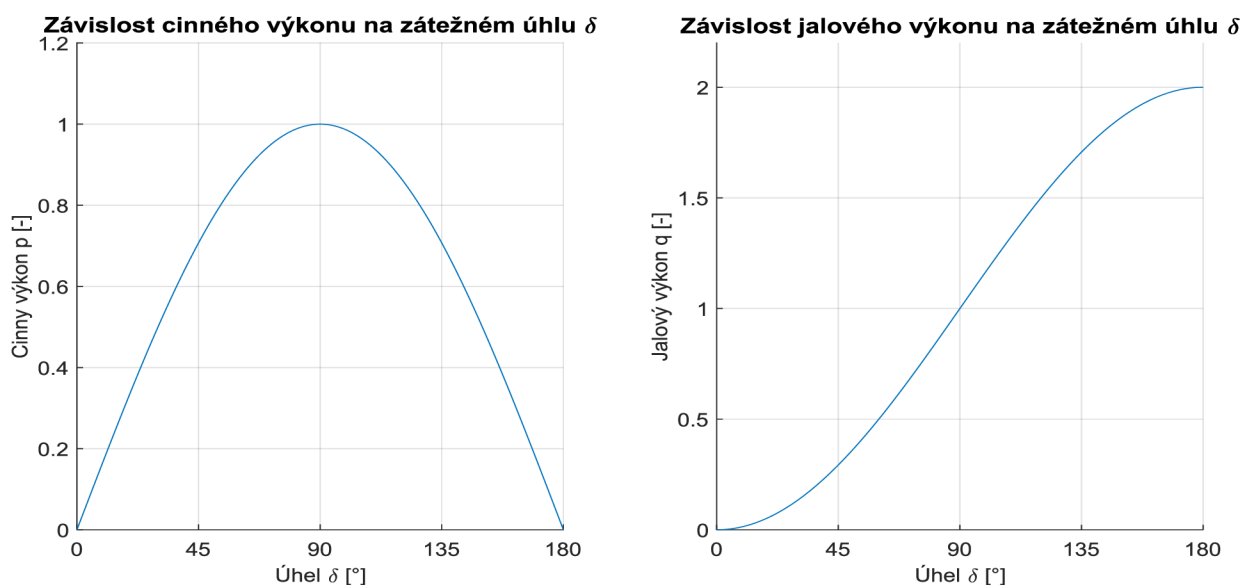
$$S_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_V} \cdot \sin \delta + j \cdot \frac{U_1^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta}{X_V} \quad (2.4)$$

Což představuje činný resp. jalový výkon dle rovnic (2.5) a (2.6):

$$P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_V} \cdot \sin \delta \quad (2.5)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 - U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta}{X_V} \quad (2.6)$$

Činný výkon dosahuje maxima při úhlu 90° , jalový výkon roste až do 180° .



Obrázek 2.3 - Průběh činného a jalového výkonu na vedení bez uvažování ztrát a pro $U_1 = U_2$

Na základě uvedených rovnic je patrné, že činný i jalový výkon závisí na čtyřech proměnných, tedy na uzlových napětích, reaktanci vedení mezi uzly a úhlovém posuvu. Změnou těchto parametrů lze přímo měnit tok výkonu, za předpokladu uzlové sítě.

2.1.1 Uzlová napětí

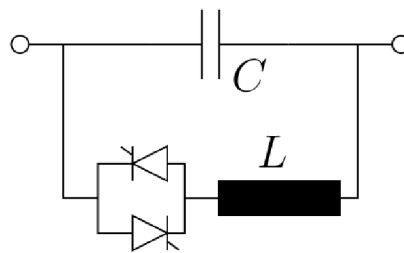
Vzhledem k požadavku udržovat napětí v celé síti co nejbližší jmenovité hodnotě nelze tok výkonu řídit změnou napětí v uzlu. Regulace napětí je velmi důležitá pro chod sítě, nepoužívá se však pro řízení činného výkonu.

2.1.2 Reaktance vedení

Tok činného výkonu je nepřímo úměrný impedanci vedení. Reaktanci nelze přímo řídit, lze ji ale zvýšit vložením tlumivky v sérii nebo kompenzovat sériovým kondenzátorem. Výsledná reaktance je závislá na rozdílu indukce a kapacity dle vzorce (2.7):

$$X_L = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2.7)$$

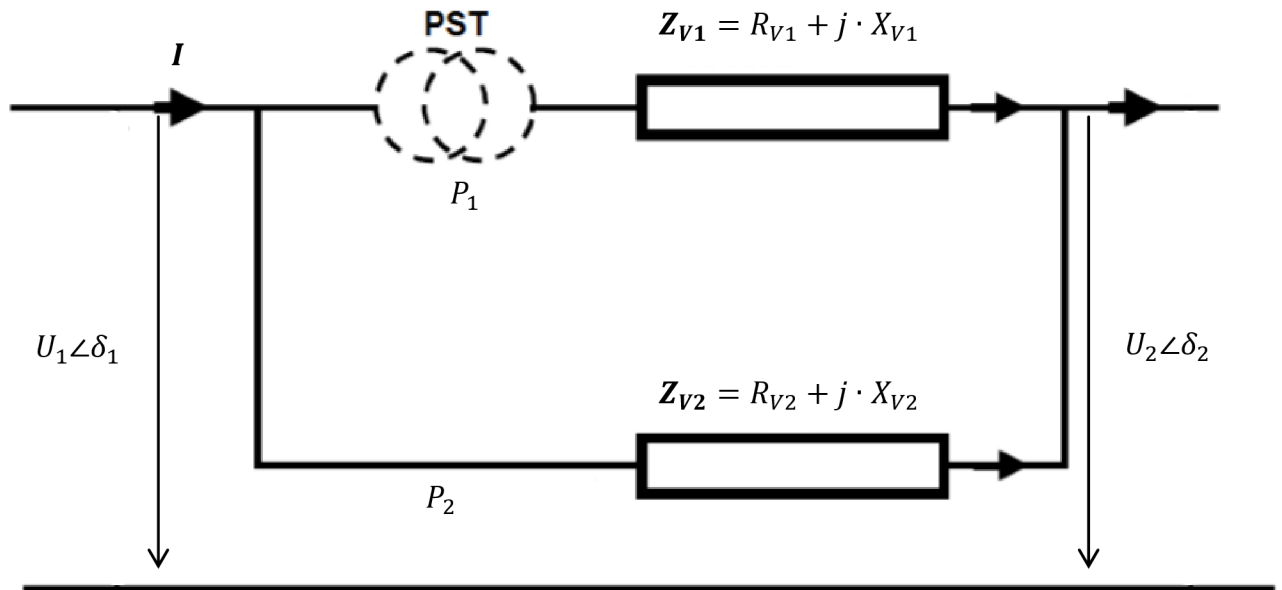
Změny reaktance tímto způsobem nejsou plynulé, lze je realizovat pouze jako skokové regulační stupně. Pro plynulejší řízení lze využít technologie tyristorového řízení TCSC (z ang. Thyristor-controlled series capacitor – Tyristorově řízený sériový kondenzátor), kde se zapojí paralelně ke kondenzátoru tyristorový spínač složený ze dvou antiparalelních tyristorů. Pro větší efekt lze připojit ke spínači navíc reaktor, čímž se zvýší napětí na kondenzátoru vedoucí k vyšší kapacitě [2].



Obrázek 2.4 - Schéma sériové kompenzace (TCSC)[2]

2.1.3 Fázový posuv

Třetím způsobem je přímá změna fázového posuvu napětí mezi danými uzly. Běžné transformátory používané v síti dovedou měnit pouze velikost napětí v závislosti na počtu závitů primárního a sekundárního vinutí, dle zapojení vinutí lze také vytvořit permanentní posuv mezi vinutími označovaný jako hodinový úhel. Zapojení hvězda-trojúhelník vytváří pevný posuv 30° , zapojení do polygonu umožňuje vytvořit posuv $\pm 15^\circ$. Nicméně plynulá regulace fázového posuvu není u běžných zařízení možná, je třeba využít specializovaných zařízení. Prvním z nich je transformátor s příčnou regulací fáze (dále PST, z ang. Phase shifting transformer). Toto zařízení je schopné vkládat do každé fáze regulační napětí získané ze zbylých dvou fází, velikost tohoto napětí závisí na nastaveném regulačním stupni, a tak lze efektivně měnit fázový úhel při zachování jmenovitého napětí na výstupu transformátoru. PST lze použít k propojení dvou jinak nezávislých systémů a s jeho pomocí řídit tok výkonu mezi těmito systémy, nebo s ním lze řídit tok mezi paralelními cestami například u nesouměrně zatížených paralelních vedení mezi dvěma uzly.



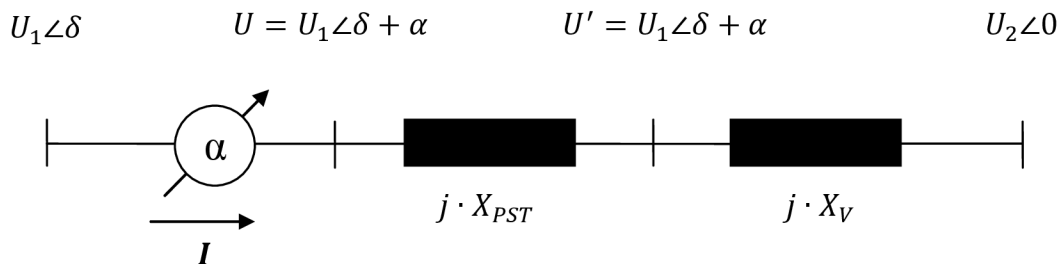
Obrázek 2.5 - Paralelní vedení s PST [10]

Rozdělení toku výkonu v tomto příkladu podléhá Kirchhoffovým zákonům a vedení s nižší impedancí bude zatíženo vyšším výkonem. Při použití PST v kterémkoliv z těchto dvou vedení lze omezit či navýšit tekoucí výkon daným vedením, a tak zvýšit přenášenou kapacitu a odlehčit přetížené vedení.

Transformátor s příčnou regulací fáze ovšem není jediný způsob jak řídit tok výkonu v síti. S rozvojem výkonových součástek vznikly i další alternativy, jako například UPFC (z ang. Unified power flow controller, v překladu Jednotný kontrolér toku výkonu), se kterými je možné daleko více, než jen řídit fázový posuv [2][10].

2.2 Princip regulace fáze PST

Zařazením PST do sítě přibude další prvek k modelu sítě z obrázku 2.1. Jako každý transformátor jej lze zjednodušeně reprezentovat podélnou reaktancí, navíc mění fázový posuv mezi uzly. Výsledný zjednodušený model je na obrázku 2.8.



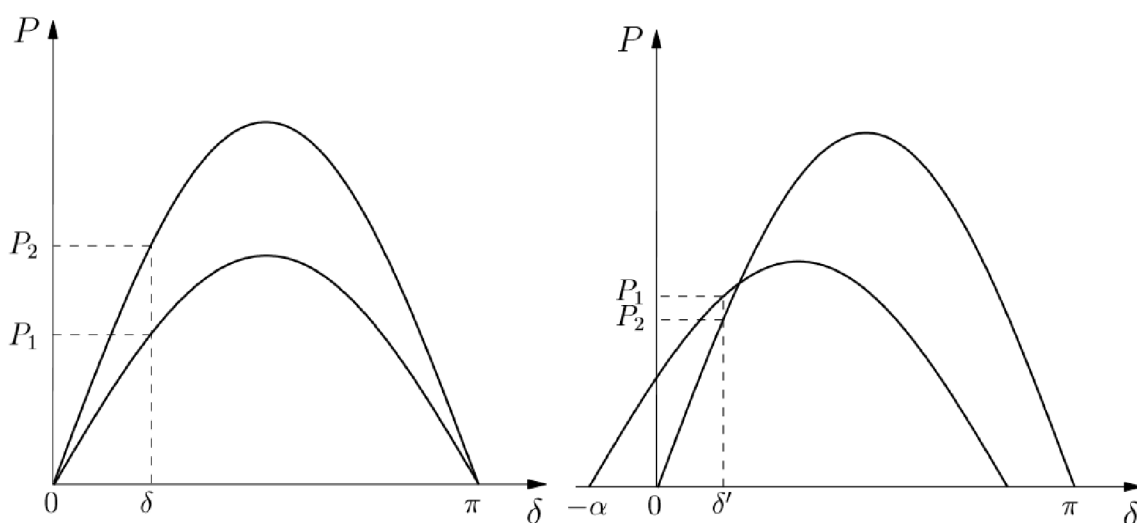
Obrázek 2.6 - Model vedení s PST bez uvažování ztrát a bez zatížení

Modelu odpovídající rovnice (2.8) toku výkonu ukazuje, že transformátor svojí reaktancí snižuje a tedy omezuje maximální tok daným vedením. Míra snížení je dána poměrem reaktancí bez a s PST, dle rovnice (2.9):

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_V + X_{PST}} \cdot \sin(\delta + \alpha) \quad (2.8)$$

$$K_S = \frac{X_V}{X_V + X_{PST}} \quad (2.9)$$

Fázový posuv transformátoru potom zajistí posuv výkonové křivky jedním či druhým směrem ideálně tak, aby se výkony tekoucí každým vedením vzájemně vyrovnaly. Navýšení zátěžného úhlu o úhel α u vedení s transformátorem vede k reakci na druhém vedení, kde dojde ke snížení úhlu δ na nový úhel δ' tak, aby byla suma přenášených výkonů konstantní [6][7].



Obrázek 2.7 - Ukázka efektu PST na dvě nesouměrně zatížená paralelní vedení z obr. 4[7]

Poměr toku výkonů na vedení před instalací PST se rozdělí pouze v závislosti poměru reaktancí jednotlivých vedení (dle rovnic 2.10 a 2.11), při daném úhlu δ , který dle výkonu odpovídá rovnici (2.5) [7].

$$\frac{P_1}{P_C} = \frac{X_2}{X_1 + X_2} \quad (2.10)$$

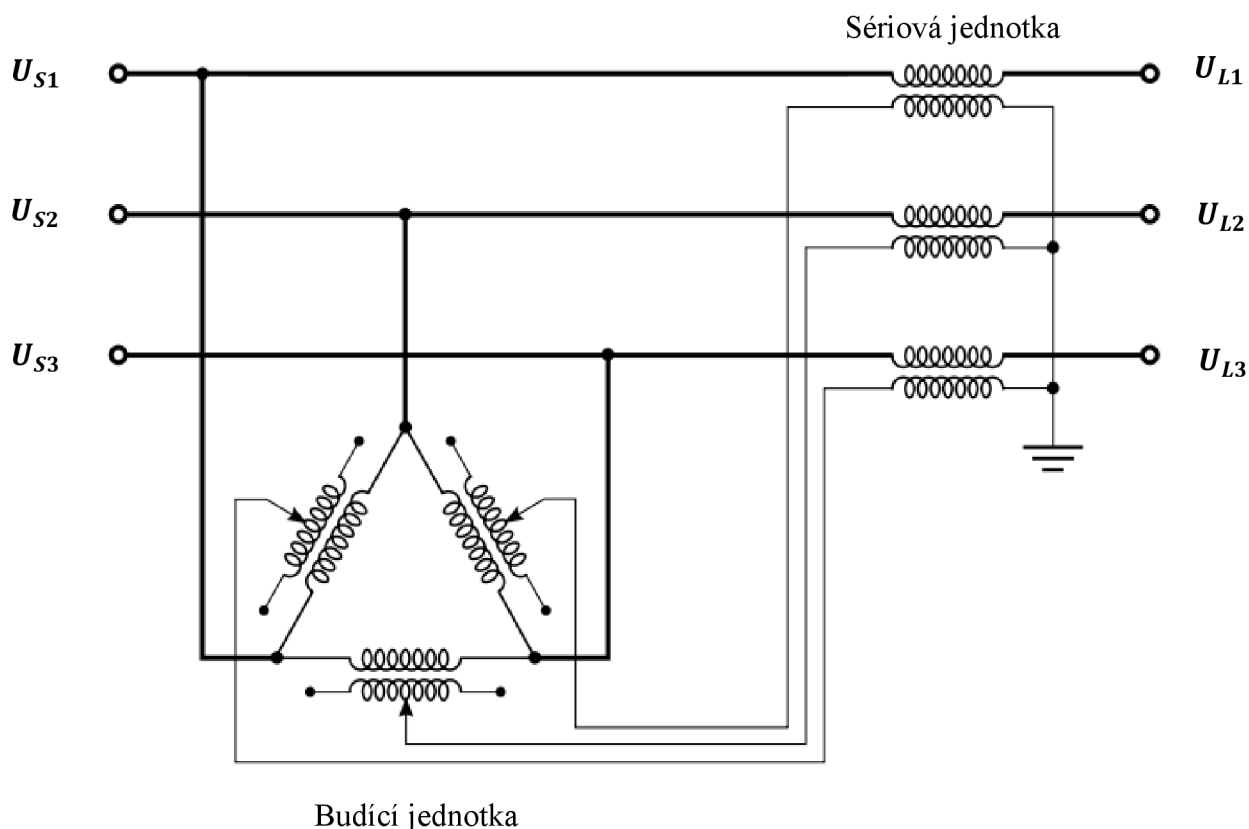
$$\frac{P_2}{P_C} = \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (2.11)$$

Po umístění PST na vedení 1 dojde jednak k navýšení reaktance vedení o reaktanci PST a zároveň ke změně zátěžného úhlu o úhel α , což povede dle rovnice (2.5) a (2.8) ke změně zátěžného úhlu na hodnotu δ' .

$$\frac{P_1}{P_C} = \frac{1}{1 + \frac{X_1 + X_{PST}}{X_2} \cdot \frac{\sin(\delta' + \alpha)}{\sin \delta'}} \quad (2.12)$$

$$\frac{P_2}{P_C} = \frac{1}{1 + \frac{X_2}{X_1 + X_{PST}} \cdot \frac{\sin(\delta' + \alpha)}{\sin \delta'}} \quad (2.13)$$

Princip funkce PST lze popsat na základě modelu se dvěma jádry (obr. 2.8). Na obrázku je zjednodušené schéma zapojení PST se dvěma transformátory, kde je paralelně připojeno vinutí zapojené do trojúhelníku, označované jako příčný, budící či derivační transformátor, a sériově připojeno vinutí zapojené do hvězdy. Příčná jednotka spojuje vinutím dvě vstupní fáze, čímž dochází na výstupu k posuvu napětí o 90° proti zdroji. Toto napětí je přivedeno k sériovému vinutí třetí fáze, které vektorově sčítá toto napětí s napětím zdroje. Výstupní napětí je potom proti zdroji posunuté o úhel α . Velikost příčného (posuvného) napětí lze měnit pomocí odboček na budícím transformátoru, a tím přímo měnit velikost fázového posuvu [5][8][10].



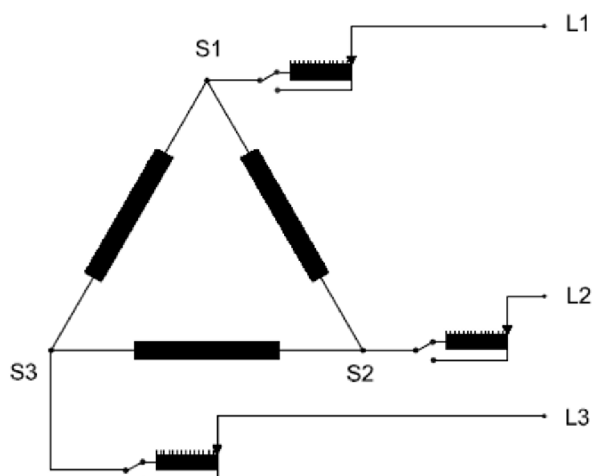
Obrázek 2.8 - Konstrukce dvoujádrového transformátoru s příčnou regulací

Na základě konstrukce a způsobu zapojení lze rozlišit PST do dvou skupin:

- Přímé (jednojádrové) transformátory, vinuté na společném jádru. K posuvu fáze dochází způsobem zapojení jednotlivých vinutí.
- Nepřímé (dvoujádrové) transformátory, využívající budící vinutí k regulaci injektovaného napětí a sériové vinutí k injekci tohoto napětí do správné fáze.
- Asymetrické transformátory, jejichž výstupem je napětí s rozdílným fázovým úhlem i amplitudou oproti vstupnímu napětí.
- Symetrické transformátory, které vytváří na výstupu napětí o stejné amplitudě jakou má vstupní napětí a přitom posunout fázový úhel.

Kombinací těchto kategorií získáme čtyři možné typy PST.

2.2.1 Přímý asymetrický transformátor



Obrázek 2.9 - Přímý asymetrický transformátor s příčnou regulací fáze [10]

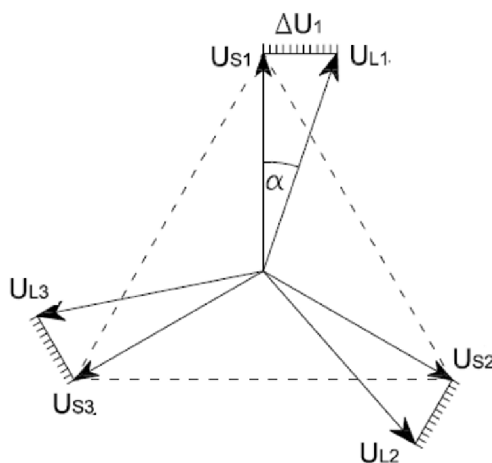
PST v přímém asymetrickém provedení je nejlevnějším typem. Konstrukce je založena na jediném společném jádru, vstupní napětí se přivádí na svorky S1-S3. Výstupní svorky jsou pomocí odbočkového vinutí připojeny ke vstupním svorkám a navzájem magneticky propojeny vinutím vstupních svorek. Tímto zapojením se ke zdrojovému napětí vektorově přičítá příčné napětí ΔU , jehož velikost lze měnit pomocí odbočkového vinutí a tak přímo měnit úhel α . Jeho velikost lze určit z fázorového diagramu a odpovídá rovnici (2.14):

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\Delta U_1}{U_{S1}} \quad (2.14)$$

Výsledný přenášený výkon při použití tohoto typu PST bude odpovídat rovnici (2.15).

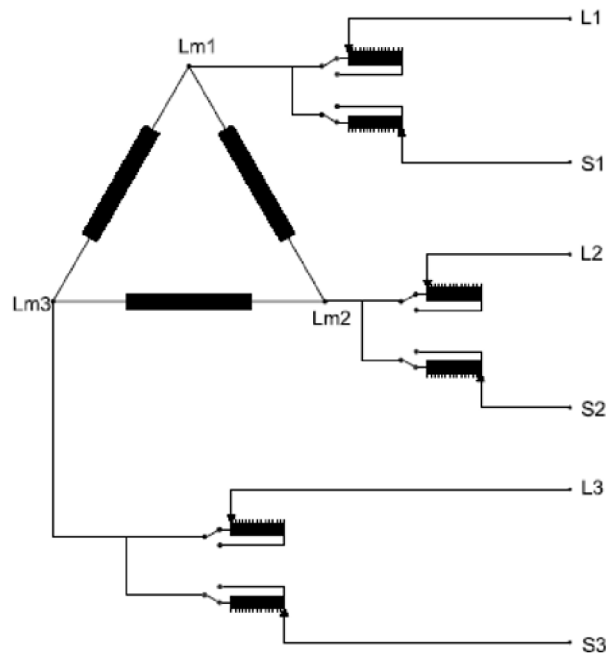
$$P = \frac{U_2}{X_V + X_{PST}} \cdot (U_{S1} \cdot \sin \delta + \Delta U_1 \cdot \cos \delta) \quad (2.15)$$

Směr fázového posuvu se určuje pomocí přepínače u odbočkového vinutí. Výstupní napětí je z principu pro $\alpha \neq 0$ vždy větší než zdrojové napětí, čímž se změní maximální přenášený výkon vedením [5][8][10][15].



Obrázek 2.10 - Fázorový diagram přímého asymetrického PST [10]

2.2.2 Přímý symetrický transformátor



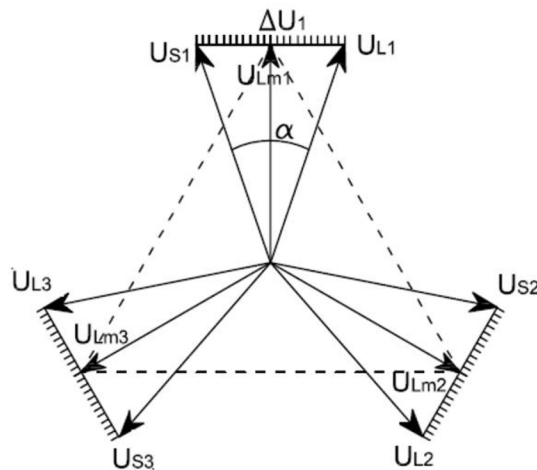
Obrázek 2.11 - Přímý symetrický PST [10]

Je-li třeba zachovat na výstupu stejnou amplitudu napětí jako na vstupu, lze použít symetrický transformátor. K symetrizaci dojde přidáním dalšího odbočkového vinutí ke vstupním svorkám transformátoru. Z fázorového diagramu lze odvodit závislost úhlu α na velikosti injektovaného napětí dle rovnice (2.16) a odpovídající přenášený výkon dle rovnice (2.17).

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{\Delta U_1}{2 \cdot U_{L1}} \quad (2.16)$$

$$P = \frac{U_{L1} \cdot U_2}{X_V + X_{PST}} \cdot \sin \left(\delta + 2 \cdot \sin^{-1} \frac{\Delta U_1}{2 \cdot U_{L1}} \right) \quad (2.17)$$

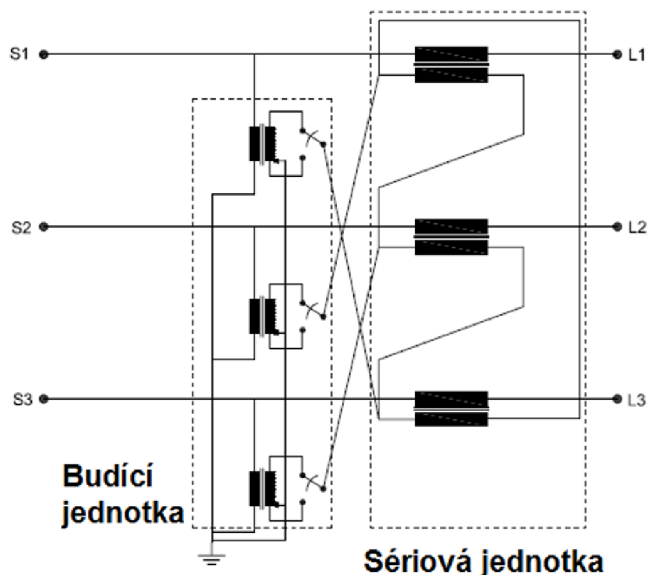
Konstrukce tohoto transformátoru umožňuje vyšší rozsah změny fázového úhlu, který může přesáhnout i 90° a teoreticky dosáhnout až 180° . Přenášený výkon v takovém případě narůstá se zvyšujícím se úhlem α do svého maxima a potom klesá k nule [5][8][10][15].



Obrázek 2.12 - Fázorový diagram symetrického přímého transformátoru [10]

2.2.3 Nepřímý asymetrický transformátor

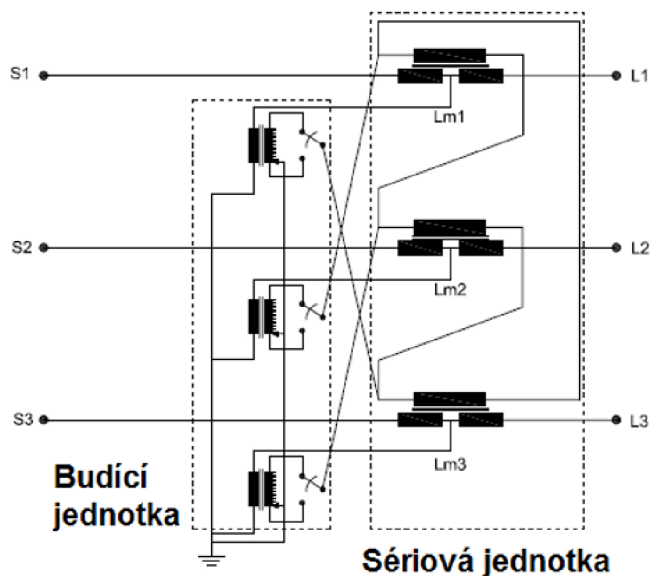
Nepřímé transformátory se skládají ze dvou oddělených jednotek – budícího a sériového vinutí. Tato vinutí mohou být umístěna zvlášť ve dvou nádržích nebo společně v jedné. Výhodou dvou nádrží je jednodušší přepravitelnost. Zapojení jednotek je vidět na následujícím obrázku. Fázorový diagram odpovídá přímému zapojení PST na obr. 2.10 [5][8][10][15].



Obrázek 2.13 - Nepřímé asymetrické zapojení PST [10]

2.2.4 Nepřímý symetrický transformátor

Konstrukční řešení symetrického nepřímého transformátoru sestává z rozdělení sériového vinutí na dvě poloviny a napájením budící jednotky z prostředku takto rozděleného vinutí. Zapojení je na obr. 2.14. Fázorový diagram opět odpovídá přímému zapojení na obr. 2.12 [5][8][10][15].



Obrázek 2.14 - Nepřímé symetrické zapojení PST [10]

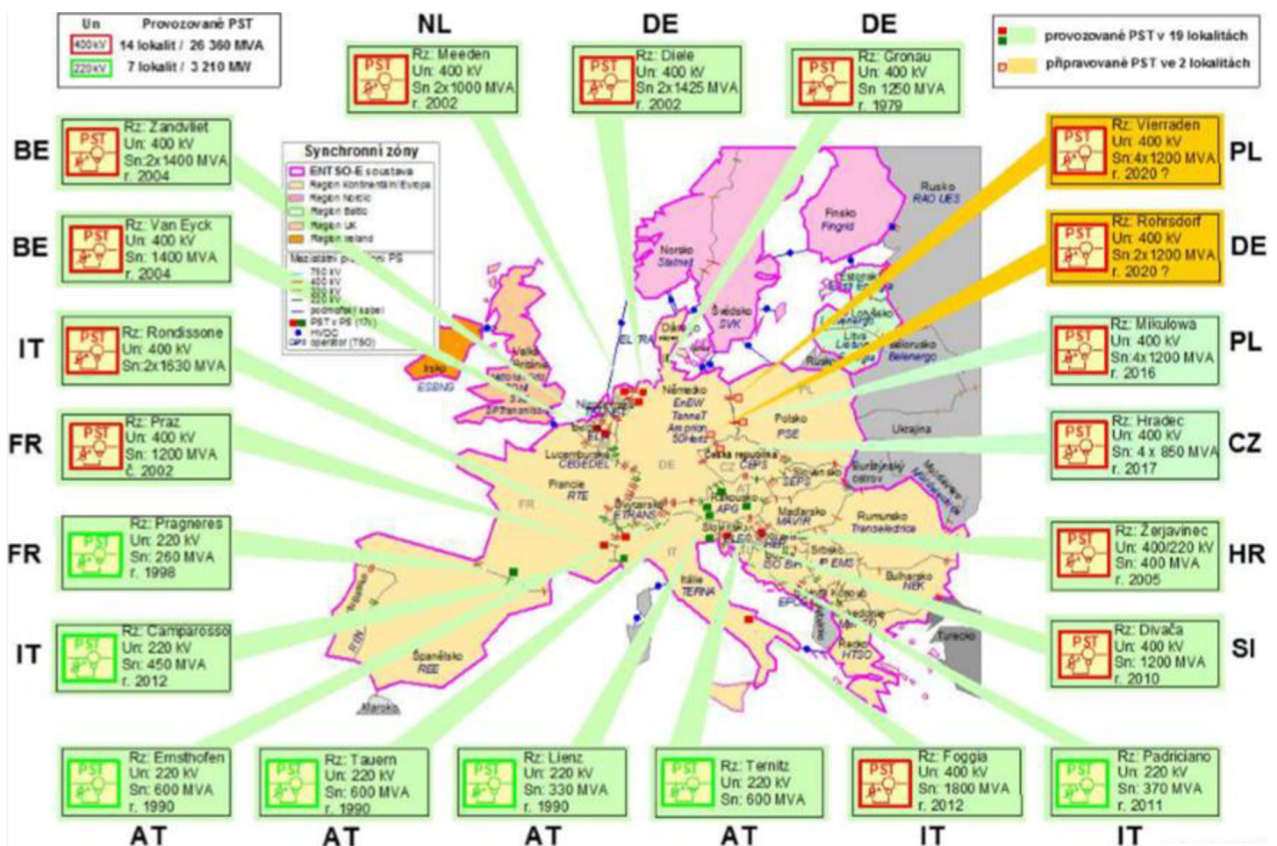
2.2.5 Porovnání jednotlivých řešení

Při návrhu PST je třeba počítat i s dalšími parametry jako rozměry, odolnost, cena a další. Jednojadrové řešení je jednodušší a tedy i levnější. Je však třeba počítat s tím, že odbočkové vinutí je přímo zapojeno do sítě a při nulovém regulačním úhlu nijak neomezuje zkratový proud. Musí tedy odolat všem negativním vlivům, které se mohou v síti objevit.

Stejně tak je nesymetrické provedení jednodušší a levnější, nicméně změna amplitudy výstupního napětí je obvykle nežádoucí, a tak je symetrické provedení i přes vyšší pořizovací náklady používanější variantou [5][8][10].

2.3 Instalované jednotky v Evropě

Transformátorů pro řízení fáze je ve světě instalováno velké množství. V Evropě jsou primárně využívány jako prostředek pro omezení či posílení příhraničních toků, ale často lze vidět využití uvnitř přenosové soustavy jednoho státu, který je využívá k lepší distribuci výkonů v rámci vlastní sítě. Příkladem je Velká Británie, která používá několik zařízení k odlehčení vlastní sítě, a to často přímo v distribučních soustavách na nižších napěťových hladinách. V Itálii je hlavním úkolem PST v rozvodně Foggia podpořit přenos výkonu ze severu na jih, kde je ho nedostatek [14].



Obrázek 2.15 - Instalované PST v Evropě (k roku 2017) [14]

3 POUŽÍVANÉ ZPŮSOBY KOORDINACE PST

S rostoucím počtem instalovaných regulačních jednotek bude potřeba najít způsob, jakým bude možné optimálně nastavit odbočky transformátorů. Přenosové soustavy v Evropě jsou propojené a elektricky blízké, velice se tedy navzájem ovlivňují. Pokud by například jeden transformátor byl nastaven pro navýšení toku a druhý transformátor v následujícím uzlu naopak „brzdil“, jejich efekt by se podstatně snižoval. Optimalizace není nutná v celé propojené síti, PST na španělsko-francouzské hranici bude jen málo ovlivněn transformátorem v Chorvatsku. V posledních letech nastal velký rozmach instalovaných jednotek na hraničních spojeních s Německem kvůli omezení velkých kolísavých toků a přetěžování linek ve směru „sever-jih“.

V současné době existuje několik studií o metodách koordinace, jako testovací oblast obvykle využívají síť Belgie a Nizozemska nebo jižní Británie. Přístupů k optimalizaci je také několik, mnoho z nich založeno na statistických metodách a algoritmech.

3.1 Metoda Monte Carlo

Metoda Monte Carlo je označení pro skupinu stochastických algoritmů. Zakladateli metody jsou Stanislaw Ulam a John von Neumann, kteří ve 40. letech 20. století zkoumali chování neutronů. K modelování života neutronu použili kolo rulety, odtud tedy plyne spojení s kasinem a název Monte Carlo.

Metoda je tedy založena na provádění experimentů s modelem systému, kde vstupní veličiny jsou generovány náhodně a výsledky statisticky vyhodnocovány. Typickým příkladem je stanovení čísla π . Použije se čtverec, do kterého se vepíše kruhová výseč a náhodný generátor čísel potom generuje body uvnitř tohoto čtverce. Číslo π se určí z poměru počtu bodů uvnitř kruhové výseče a celkového počtu bodů.

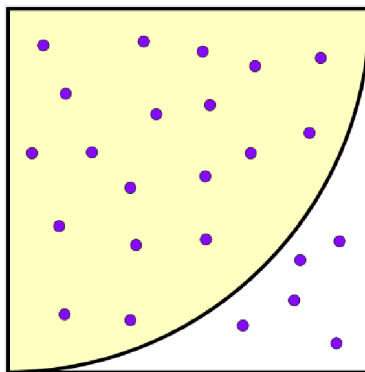
$$S_1 = \frac{\pi \cdot r^2}{4} \quad (3.1)$$

$$S_2 = r^2 \quad (3.2)$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\pi \cdot r^2}{4 \cdot r^2} = \frac{\pi}{4} \quad (3.3)$$

$$\pi = 4 \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (3.4)$$

kde S_1 je plocha kruhové výseče, resp. počet bodů uvnitř výseče a S_2 je plocha čtverce, resp. celkový počet všech bodů.



Obrázek 3.1 - Příklad stanovení velikosti čísla π metodou Monte Carlo

Řešení pomocí metody Monte Carlo sestává obecně ze tří kroků. Nejprve je nutné daný problém správně určit a zvolit vhodné řešení. Metoda je použitelná prakticky na jakoukoliv úlohu, vhodný postup však nemusí být vždy jasný. Dalším krokem je zvolení generátoru náhodných čísel. Podle typu problému se generované rovnoměrné rozložení transformuje na požadované pravděpodobnostní rozdělení, které lépe reprezentuje povahu řešeného úkolu. Posledním krokem řešení je statistické zpracování získaných výsledků. Nejčastěji se jedná o střední hodnotu nebo histogram.

Příklad optimalizace nastavení PST pomocí metody Monte Carlo byl proveden na testovací síti Nizozemska, Belgie a spojení s okolními státy. Ve studii je uvažováno se šesti transformátory a běžným zatížením sítě v dopoledních hodinách. Cílem metody je nastavení odboček tak, aby byla zajištěna maximální přenosová kapacita sítě s ohledem na tranzitní toky z Německa směrem do Francie, aniž by došlo k přetížení vedení. Generátor čísel vytváří vstupní hodnoty nastavení odboček všech transformátorů v maximálních mezích dle konstrukce PST. Tyto hodnoty jsou dále zpracovány programem na výpočet ustáleného chodu sítě. Následně je vypočtena celková přenosová kapacita a výsledky zaznamenány do histogramu. Z naměřených výsledků lze určit nastavení pro požadovanou přenosovou kapacitu, mimo jiné lze také určit nejhorší variantu.

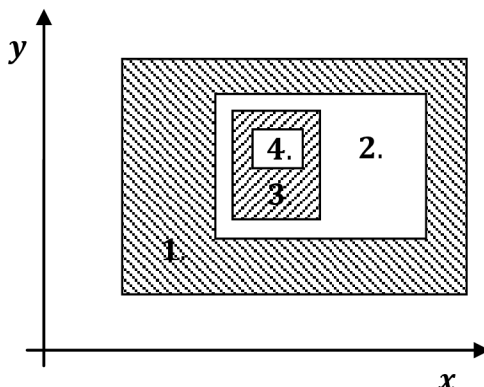
Výhodou metody Monte Carlo je jednoduchá implementace na daný problém, nevýhodou je ovšem nízká přesnost – pro zvýšení přesnosti o jeden řád je nutné navýšit počet vzorků o dva řády. Vyšší počet vzorků potom přináší delší výpočetní čas. V dané studii bylo uvažováno s 50 000 vzorky a výpočetní čas na běžném stolním počítači v tomto případě přesáhl 8 hodin. Metoda tedy není příliš vhodná pro řešení problémů v reálném čase [3][4].

3.2 Vícetupňová metoda Monte Carlo

Přesnost metody Monte Carlo úzce souvisí s počtem generovaných vzorků. Při uvažování výše uvedených 50 000 vzorků může například jen 100 z nich nabývat hodnot téměř stejných jako má ideální nastavení a přitom ani jeden vzorek nemusí být identický s hledanou hodnotou. Z povahy limitů generovaných vstupů jsou vzorky rozptýleny přes celou prohledávanou oblast. Proto je vhodné upravit v průběhu výpočtu hledanou oblast. K tomu lze použít vícetupňovou Monte Carlo metodu.

Principiálně se jedná o stejný postup jako u předchozí metody, je použita stejná testovací oblast, ale tato studie používá pouze 10 000 vzorků na jednu simulaci. Po dokončení simulace se výsledky seřadí od nejlepšího po nejhorší a vybere se určitý počet vzorků, například 20.

Na základě těchto vzorků se upraví limity generovaných vstupních hodnot a tím se zúží hledaná oblast blíže k optimální hodnotě.



Obrázek 3.2 - Vcestupňová metoda Monte Carlo se čtyřmi úrovněmi přiblížení

Tento postup se opakuje, dokud není dosaženo požadované přesnosti výsledků. V dané studii je simulace ukončena po pěti zúženích vyhledávací oblasti, tedy po 6 simulacích po 10 000 vzorcích. Jedna simulace tedy trvá podstatně kratší dobu, ale musí se několikrát opakovat. Tím opět dochází k významnému nárůstu výpočetního času, v tomto případě asi na 10 hodin. Metoda je tedy opět časově neefektivní, nicméně přináší přesnější výsledky a bližší pohled na chování PST v cílové oblasti [3][4].

3.3 Particle swarm – hejno částic

V další studii je k optimalizaci použita metoda hejna částic. Optimalizace hejnem částic (Particle swarm optimization – PSO) je poměrně nová meta-heuristická technika z oboru umělé inteligence. Je založena na studii chování hejna ptáků nebo ryb při hledání potravy, patří do skupiny evolučních algoritmů. Hejno dodržuje určitá jednoduchá pravidla, pomocí kterých dochází ke shodnému chování všech jedinců v hejnu. Každý jedinec komunikuje s dalšími jedinci kolem sebe, hejno není závislé na jednom či několika jedincích, kteří by řídili pohyb celého hejna. Tato inteligence hejna je schopna řešit rozsáhlé problémy, nicméně nemusí vždy dospět k optimálnímu výsledku.

V PSO se tedy jedinci (částice) pohybují ve vícerozměrném prostoru (dimenze d), který prohledávají. Každá částice může být popsána v čase svojí polohou a vektorem rychlosti, oboje o rozměru d . Rychlost částice v čase závisí na její předchozí rychlosti a faktoru inercie, který ovlivňuje změnu rychlosti. Pokud je velký, nová rychlost bude odpovídat hlavně předchozí rychlosti, což v důsledku umožňuje pouze malé změny rychlosti. Částice se tedy prostorem pohybuje rychleji oproti malé hodnotě inercie, kde se může rychlost drasticky měnit. To vede k nahodilejšímu chování částice, které je vhodnější v pozdější fázi algoritmu, kdy metoda již objevila přibližný prostor s optimem a nyní konverguje k výsledné hodnotě. Vhodným řešením by tedy pravděpodobně byla proměnná inercie v průběhu optimalizace tak, aby se v čase snižovala.

Každá částice má jednoduchou paměť – je schopna si pamatovat své osobní maximum a polohu, ve které k němu došlo. Chování částice je touto informací ovlivněno, neboť se snaží zůstat a prohledávat okolí tohoto bodu. Pokud nalezne bod, kde objeví nové maximum, tato oblast se posune a částice prohledává nové okolí. Důležitou vlastností je také určitá jednoduchá

komunikace mezi částicemi hejna. Částice ale nekomunikují s každou jinou částicí, pouze se svými sousedy. Tímto způsobem jsou schopny sdílet nalezené maximum optimalizované funkce pro celé hejno spolu s pozicí, ve které k němu došlo. Hejno se potom pohybuje ve směru nalezených maxim a prohledává pouze prostor, kde se může maximum potenciálně zvyšovat.

Pohyb hejna je přepočítáván iteračními kroky v diskrétních časových intervalech. Každá částice vždy nejprve vypočítá optimum ze svého okolí, následně jej porovná se svou dosavadní nejlepší hodnotou. Pokud je dosavadní maximum vyšší než nově vypočtené, částice zůstává v okolí dosavadního maxima a prohledává jinou část okolí. Je-li nové optimum vyšší než dosavadní maximum, rychlost částice se upraví ve směru nového maxima a částice začne prohledávat nové okolí. Rychlost je upravena pomocí kognitivního/konfidenčního faktoru, aby byla zajištěna určitá kontrola nad velikostí rychlosti a tím navýšena stabilita algoritmu. Po úpravě rychlosti dojde k určení nové polohy a k aktualizaci nových maxim v paměti částic [3][4].

3.4 Linearizace soustavy a řešení pomocí stejnosměrné analýzy

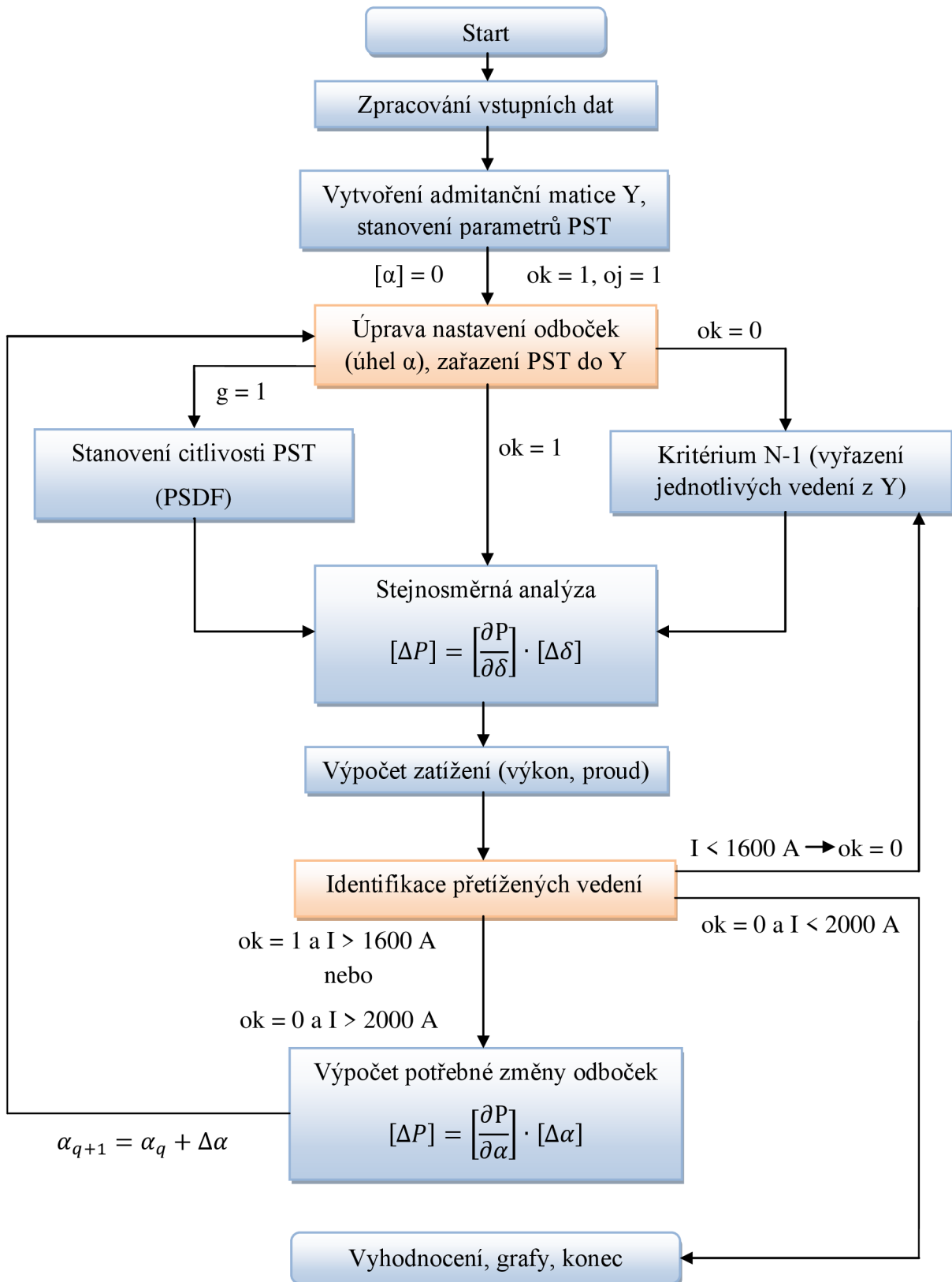
Metaheuristické metody jako Optimalizace hejnem částic poskytují poměrně přesně a rychle výsledky. Přístup k soustavě jako black box ale závisí pouze na simulacích a neposkytuje žádné analytické informace o chování sítě. Samozřejmě lze pro získané hodnoty nastavení vypočítat ustálený chod sítě, nelze tak ovšem získat hlubší pohled do problematiky.

S uvažováním určitých zjednodušení lze soustavu popsat lineárními rovnicemi, a tak zjistit jednoduše přibližný dopad PST na chod sítě. Studie je založena na použití stejnosměrné analýzy, kde je možné vyhnout se iteračním výpočtům používaným v klasických výpočtech chodu sítě. Metoda uvažuje s tím, že napětí v uzlech jsou blízká jmenovitým hodnotám, v podstatě tedy všechna stejně velká. Dále se uvažuje bezztrátový přenos, zanedbává se činný odpor soustavy. Toto zjednodušení je v přenosové soustavě možné, neboť reaktance soustavy vysoce převyšuje odpor, a to v poměru obvykle asi 5-10:1. V distribučních soustavách je poměr obvykle vyrovnaný nebo odpor převyšuje reaktanci, tedy jej nelze zanedbat. Pro přesné výpočty ovšem nelze zanedbávat odpor ani v přenosových soustavách. V poslední řadě se uvažuje zjednodušení fázových posuvů napětí v uzlech, která jsou velmi malá, a proto lze psát, že $\sin \delta \approx \delta$, kde δ je vyčíslen v radiánech. Na toto zjednodušení musí být brán zřetel ve velmi zatížených soustavách, kde jsou úhly obvykle vyšší. Samotné PST také zvyšují nepřesnost výpočtu, neboť jejich fázový posuv není zanedbatelný.

Výkon S přenesený po vedení se odvíjí od rozdílu úhlů δ na začátku a na konci vedení. Transformátor je reprezentován regulovaným úhlem α a má lineární závislost na distribučním faktoru transformátorů, který vyjadřuje rozložení PST v síti a závisí pouze na konfiguraci a ne na zatížení sítě.

Ve studii je uvažována síť Belgie a Nizozemska, na které je proveden základní výpočet ustáleného chodu. Dle výsledků je rozdíl mezi stejnosměrným a střídavým ustáleným chodem pouze minimální. V další části studie je použita větší přenosová síť Nové Anglie se dvěma PST. Opět je řešena v ohledu na maximalizaci přenosové kapacity a zohledňuje optimalizaci bez a včetně zachování kritéria N-1. Metoda je rychlá, pro výpočet byl použit modul MOSEK pro MATLAB. Přesnost výsledků se odvíjí od zatížení sítě a rozdílů od zjednodušujících podmínek. Je vhodná hlavně při uvažování velkých sítí pro přibližný výpočet v omezeném čase [4][9].

4 OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS



Obrázek 4.1 - Vývojový diagram algoritmu

4.1 Příprava testovací oblasti

4.1.1 Model oblasti

Výchozími oblastmi jsou přenosové soustavy České republiky, Polska a části Německa, spravované operátory ČEPS, PSE a 50Hertz. Pro zjednodušení jsou všechna vedení v modelu považována za vedení na napěťové hladině 400 kV. Jejich délky jsou převzaty z open-source modelu SciGRID pro Evropu [11] a údajů dostupných na stránkách německého 50Hertz [12]. Měrné hodnoty odporu, reaktance a susceptance jsou uvažovány dle průměrných hodnot naměřených v síti dle tabulky 4.1.

Tabulka 4.1 - Průměrné měrné hodnoty vedení v síti

R_k [Ω/km]	X_k [Ω/km]	B_k [$\mu S/km$]
0,025648	0,287978	3,974451

Testovací oblast je složena ze 138 uzlů, z nichž 30 je v České republice, 45 v Německu a 63 v Polsku. Jako bilanční uzel je zvolena rozvodna Kočín, do které je vyveden výkon nedaleké jaderné elektrárny Temelín. Dále je soustava složena z 300 vedení v celkové délce 23 928 kilometrů. Označení uzlů a délky vedení viz příloha soubory uzly.xls a vedeni.xls. Pro potřeby modelu je uvažováno s PST umístěnými v rozvodnách Hradec v České republice, Röhrsdorf a Vierraden v Německu a Mikulowa v Polsku (zakroužkované rozvodny na obr. 4.2).



Obrázek 4.2 - Přibližná ukázka modelované oblasti [13]

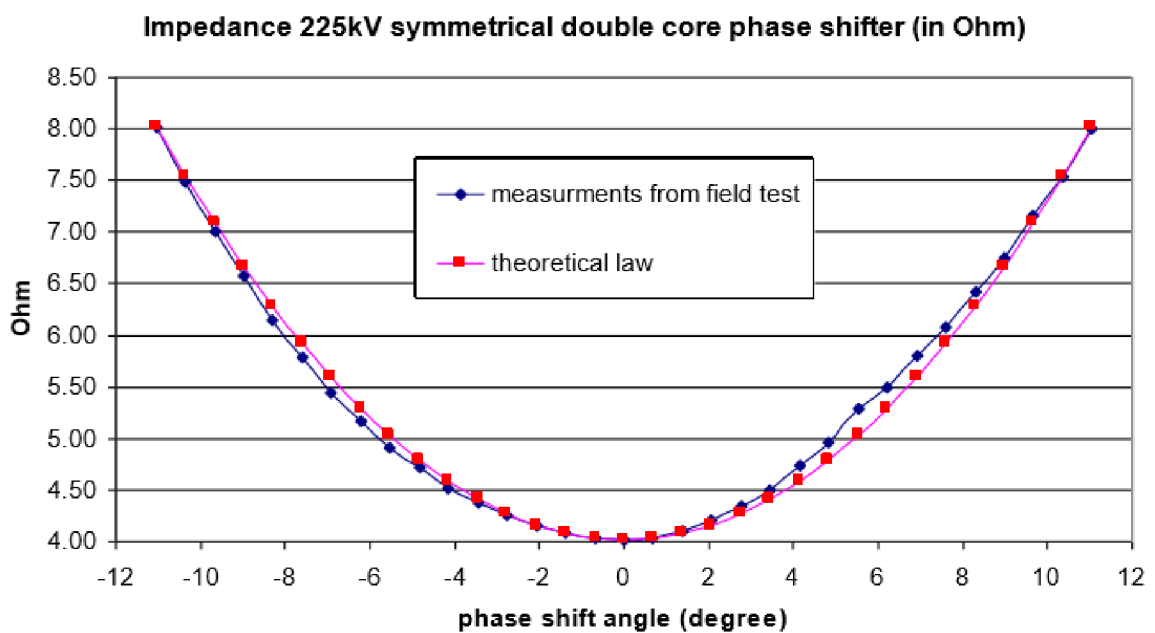
4.1.2 Model PST

Nezatížený transformátor je popsán v kapitole 2.2 a rovnici (2.8). Nicméně v reálném stavu je transformátor zatížen a nastaven do určité odbočky. Změnou odbočky regulačního vinutí se mění vnitřní reaktance stroje, není celou dobu konstantní. Z tohoto důvodu je třeba uvažovat přidanou reaktanci do systému jako proměnnou, která je závislá na nastavení regulovaného úhlu. Dle PST modelování od ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) odpovídá jednojádrové i dvoujádrové symetrické zapojení rovnici (4.1) a pro nesymetrické transformátory dle rovnice (4.2).

$$X_{(\alpha)} = X_{(0)} + (X_{(\alpha_{max})} - X_{(0)}) \cdot \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha_{max}}{2}} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$X_{(\alpha)} = X_{(0)} + (X_{(\alpha_{max})} - X_{(0)}) \cdot \left(\frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{\tan \frac{\alpha_{max}}{2}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Hodnoty vypočtené pomocí této rovnice byly porovnány s hodnotami naměřenými přímo u zařízení a vyneseny do grafu na následujícím obrázku. Je patrné, že matematické vyjádření není úplně přesné, ale poskytuje dostatečnou aproximaci průběhu reaktance [15].



Obrázek 4.3 - Porovnání hodnot matematického popisu (červeně) a reálných měření (modře) změny reaktance v závislosti na úhlu α [15]

Pro účely modelování bude využito šítkových parametrů transformátorů použitých v rozvodně Hradec, kde se nachází celkem čtyři transformátory s příčnou regulací fáze. PST jsou zapojeny vždy dva paralelně k sobě tak, aby byl navýšen jejich celkový maximální výkon. Tato varianta byla zvolena z důvodu neproveditelné přepravy většího zařízení. V Polském Mikulowa jsou umístěny taktéž dva transformátory na jedno vedení, ale jsou zapojeny v sérii. Takto sice nemají navýšeny maximální výkon, ale zato mají dvojnásobný regulační rozsah [14].

Tabulka 4.2 - Šítkové parametry PST 850 MVA provozované společností ČEPS [14]

S_N	850 MVA
U_N	400 kV
u_k	12,5-15,6 %
i_0	0,02 – 0,04 %
ΔP_0	200 – 350 kW
ΔP_k	940 – 1730 kW
α	$\pm 30^\circ$

4.2 Popis optimalizačního algoritmu

4.2.1 Vstupní data

```

4 %% zadane hodnoty
5 %parametry vedeni
6 - Ub = 400e3; %V
7 - zk = (0.025648+1i*0.287978)/1000; %ohm/m
8 - yk = (1i*3.974451e-6)/1000; %S/m
9 %parametry PST - 1-Hradec 2-Rohrsdorf 3-Vierraden 4-Mikulow
10 - St = [1700e6 1700e6 1200e6 1200e6 1700e6 1700e6]; %jm. vykon pst
11 - M = [1 1 1 1 2 2];
12 - uk = [0.125 0.156]; % min max
13 - i0 = [2e-4 4e-4]; % min max
14 - dPk = [2e5 3.5e5];
15 - dP0 = [9.4e5 1.73e6];
16 - amax = [30 30 20 20 40 40]; % rozsah regulace hradec rohrsrdorf zbytek
17 - ac = [0;0;0;0;0;0]; %nastaveni PST - v zakladu 0°
18 - pozPST = [29 33; 29 33; 33 35; 33 36; 77 74; 77 74;]; %uzly mezi kterymi je PST
19 - vedPST = [40; 41; 63; 65; 75; 76]; %cislo vedeni na kterych je PST
20 %nahrani souboru excelu
21 - [S,textu,uzly] = xlsread('uzly.xlsx'); %uzly-popis-kombo
22 - [l1,textv,vedeni] = xlsread('vedeni.xlsx'); %vedeni-popis-kombo
23 - PocetU = length(S); %pocet uzlu z uzly.xls
24 - PocetV = length(l1); %pocet vedeni
25 - PocetB = 1; %pocet bilancnich uzlu

```

Obrázek 4.4 - Kód - vstupní data

Pro potřeby algoritmu je nutné nejprve dodat vstupní data. Nejdůležitějším vstupem jsou dva tabulkové soubory, kde je nadefinována struktura testovací oblasti. První soubor obsahuje údaje o značení uzlů a o výrobě či spotřebě v těchto uzlech (uzly.xls), druhý soubor potom obsahuje výpis všech vedení, jejich délku a z kterého a do kterého uzlu vedou (vedeni.xls). Ostatní hodnoty jsou zadány přímo v těle algoritmu – výchozí napětí U_b , které je konstantní a odpovídá hodnotě 400 kV, dále měrný odpor, reaktance a susceptance vedení, štítkové parametry použitých zařízení, a další. Dále je nutné zadat hodnotu $PocetB$, což je počet bilančních uzlů v oblasti. Bilanční uzel nebo uzly musí být vždy na prvních místech v tabulce, v tomto případě tedy pozice 1 – Kočín. Výkon bilančního uzlu se nezadáva, neboť uzel hradí deficit výkonu včetně ztrát sítě.

Tabulka 4.3 - ukázka zápisu hodnot v souboru uzly.xls

Číslo uzlu	Výkon [MW] (výroba +, spotřeba -)	Název daného uzlu	Operátor přenosové soustavy
1	0	Kočín	ČEPS
2	1000	Lauchstädt	50Hertz
3	3200	Rogowiec	PSE
4	-290	Dasný	ČEPS
33	1109	Röhrsdorf	50Hertz
34	-903	Eula	50Hertz
77	-248	Mikułowa	PSE
78	-431	Polkowice	PSE

Tabulka 4.4 - ukázka zápisu hodnot ze souboru vedeni.xls

Délka vedení [m]	Číslo výstupního uzlu	Číslo vstupního uzlu	Číslo (název) vedení
36000	1	4	V1
43000	1	4	V2
143000	4	8	V3
56000	8	9	V4
56000	8	9	V5
74000	9	10	V6

4.2.2 Admitanční matice

```

34 - for i=1:PocetV
35     %podelne admitance
36     Ys(11(i,2),11(i,3)) = Ys(11(i,2),11(i,3)) + (11(i,1)*zk)^-1;
37     Ys(11(i,3),11(i,2)) = Ys(11(i,3),11(i,2)) + (11(i,1)*zk)^-1;
38     %pricne admitance
39     Yv(11(i,2),11(i,3)) = Yv(11(i,2),11(i,3)) + (11(i,1)*yk)/2;
40     Yv(11(i,3),11(i,2)) = Yv(11(i,3),11(i,2)) + (11(i,1)*yk)/2;
41 - end
42 %% vypocet vstupnich hodnot vedeni, admitancni matice
43 - for i=1:PocetU
44     for j=1:PocetU
45         if j == i
46             for k = 1:PocetU
47                 if k == i
48                     Yb(i,i) = Yb(i,i);
49                 else
50                     Yb(i,i) = Yb(i,i)+Ys(i,k)+Yv(i,k);
51                 end
52             end
53         else
54             Yb(i,j) = -Ys(i,j);
55         end
56     end
57 - end

```

Obrázek 4.5 - Kód - stanovení admitanční matice

První krok algoritmu stanovuje admitanční matici Y . Na základě délky vedení a měrných parametrů vypočte podélnou a příčnou admitanci, kterou dále uspořádá dle vstupních a výstupních uzlů do matice. Diagonální prvky jsou sumou všech admitancí vstupujících do daného uzlu, mimodiagonální prvky jsou záporné a odpovídají admitanci mezi dvěma uzly dle řádku a sloupce. Matice je vždy čtvercová o rozměrech *Počet uzlů* \times *Počet uzlů*. Dle rovnice (5.3) je vidět, že admitanční matice je velmi řídká, převažují v ní nulové prvky [18].

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \cdots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \cdots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} = \quad (4.3)$$

$$= \begin{bmatrix} 0,0229 - 0,2563i & 0 & 0 & -0,0157 + 0,1758i & 0 & \cdots \\ 0 & 0,0266 - 0,2973i & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0,0539 - 0,60036i & 0 & 0 & \cdots \\ -0,0157 + 0,1758i & 0 & 0 & 0,0175 - 0,1995i & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0070 - 0,0783i & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

4.2.3 Zařazení PST do admitanční matice

```

72 - for i=1:length(vedPST)
73     Zt(i,1)=(Ub^2/St(i))*(dPk(1)/St(i)+li*sqrt(uk(1)^2-(dPk(1)/St(i))^2)); %pod. impedance pri a=0
74     Zt(i,2)=(Ub^2/St(i))*(dPk(2)/St(i)+li*sqrt(uk(2)^2-(dPk(2)/St(i))^2)); %pod. impedance pri a=max
75     Yt(i,1)=(1/Ub^2)*(dP0(1)-li*sqrt((St(i)*i0(1))^2-dP0(1)^2)); %pric. admitance pri a=0
76     Yt(i,2)=(1/Ub^2)*(dP0(2)-li*sqrt((St(i)*i0(2))^2-dP0(2)^2)); %pric. admitance pri a=max
77 - end

```

Obrázek 4.6 - Kód - výpočet parametrů PST při multé a při maximální odbočce

```

86 -
87 - for i=1:length(vedPST) %cyklus na doplneni PST do admitance
88     Yts(i)=1/(Zt(i,1)+(Zt(i,2)-Zt(i,1))*((sin(deg2rad(ac(i)/2))/sin(deg2rad(amax(i)/2)))^2)); %prepocet pro uhel a
89     Ytp(i)=(Yt(i,1)+(Yt(i,2)-Yt(i,1))*((sin(deg2rad(ac(i)/2))/sin(deg2rad(amax(i)/2)))^2));
90     Ypst(pozPST(i,1),pozPST(i,2)) = Ypst(pozPST(i,1),pozPST(i,2)) - M(i)*Yts(i); %podelna admitance mezi dvema uzly
91     Ypst(pozPST(i,2),pozPST(i,1)) = Ypst(pozPST(i,2),pozPST(i,1)) - M(i)*Yts(i); %symetrizace
92     Ypst(pozPST(i,1),pozPST(i,1)) = Ypst(pozPST(i,1),pozPST(i,1)) + M(i)*(Ytp(i)+Yts(i)); % pricna admitance u uzlu s PST
93     Ypst(pozPST(i,2),pozPST(i,2)) = Ypst(pozPST(i,2),pozPST(i,2)) + M(i)*(Yts(i)); %pricna admitance u opacneho uzlu
94 - end

```

Obrázek 4.7 - Kód - zařazení PST do admitanční matice

Impedance, potažmo admittance phase-shifterů musí být taktéž zařazena do admittance matice. Algoritmus na začátku vypočítá velikost obou parametrů bez regulace a při maximální regulaci α_{\max} . Následně je vždy na začátku každé vnitřní iterace přepočítána aktuální admittance transformátorů při daném úhlu α . Tato hodnota je posléze zařazena do admittance matice označené Y_{PST} . Podélná admittance se odečítá od mimodiagonálních prvků, na hlavní diagonále se přičte. Příčná admittance se přičítá pouze k prvkům hlavní diagonály, a to jen k uzlům, u kterých je PST instalováno (vždy první sloupec matice *pozPST*). Ukázka výpočtu (dle tabulky 4.2) [19]:

$$Z_{t,1} = \frac{U_b^2}{S_t} \cdot \left(\frac{\Delta P_{k,1}}{S_t} + i \cdot \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{k,1}}{S_t} \right)^2} \right) = \frac{(4 \cdot 10^5)^2}{850 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^5}{850 \cdot 10^6} + i \cdot \sqrt{0,125^2 - \left(\frac{2 \cdot 10^5}{850 \cdot 10^6} \right)^2} \right) = (0,011 + i \cdot 11,765i) \Omega \quad (4.4)$$

$$Z_{t,2} = \frac{U_b^2}{S_t} \cdot \left(\frac{\Delta P_{k,1}}{S_t} + i \cdot \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_{k,1}}{S_t} \right)^2} \right) = \frac{(4 \cdot 10^5)^2}{850 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{3,5 \cdot 10^5}{850 \cdot 10^6} + i \cdot \sqrt{0,156^2 - \left(\frac{3,5 \cdot 10^5}{850 \cdot 10^6} \right)^2} \right) = (0,019 + i \cdot 14,682i) \Omega \quad (4.5)$$

$$Y_{ts(\alpha=10^\circ)} = \frac{1}{Z_{t,1} + (Z_{t,2} - Z_{t,1}) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha_{\max}}{2}\right)} \right)^2} = \frac{1}{0,011 + 11,765i + (0,019 + i \cdot 14,682i - 0,011 + i \cdot 11,765i) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{10}{2}\right)}{\sin\left(\frac{30}{2}\right)} \right)^2} = (0,001 - i \cdot 0,331) S \quad (4.6)$$

4.2.4 DC analýza – výpočet toků činného výkonu

```

160 - while (T>1e5 && f<6)
161 -     %pomocne promenne
162 -     dP = zeros(PocetU-PocetB,1);
163 -     P = zeros(PocetU-PocetB,1);
164 -     dPdd = zeros(PocetU-PocetB,PocetU-PocetB);
165 -     %%vypocet dP
166 -     for i=(PocetB+1):PocetU
167 -         for j=1:PocetU
168 -             P(i-PocetB) = P(i-PocetB) + (abs(U(i,f)) * abs(U(j,f)) * abs(Y(i,j)) * cos(angle(U(i,f)) - angle(U(j,f)) - angle(Y(i,j)) - degtorad(a(i,j)))));
169 -         end
170 -         dP(i-PocetB) = (real(S(i,2)) * 1e6) - P(i-PocetB);
171 -     end
172 -     %%vypocet jacobianu
173 -     for i=(PocetB+1):PocetU
174 -         for j=1:PocetU
175 -             if j ~= i
176 -                 dPdd(i-PocetB,i-PocetB) = dPdd(i-PocetB,i-PocetB) - abs(U(i,f)) * abs(U(j,f)) * abs(Y(i,j)) * sin(angle(U(i,f)) - angle(U(j,f)) - angle(Y(i,j)) - degtorad(a(i,j)))));
177 -             end
178 -         end
179 -         for n=PocetB+1:PocetU
180 -             if n~=i
181 -                 dPdd(i-PocetB,n-PocetB) = abs(U(i,f)) * abs(U(n,f)) * abs(Y(i,n)) * sin(angle(U(i,f)) - angle(U(n,f)) - angle(Y(i,n)) - degtorad(a(i,n)))));
182 -             end
183 -         end
184 -     end
185 -     dd = dPdd\dP;

```

Jádrem celého algoritmu je uzlová analýza. Obecně se jedná o uzlovou analýzu sítě využívající Newton-Raphsonovu metodu dle následujících rovnic [18].

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij} - \alpha_{ij}) \quad i = 2,3,4,5 \dots \quad (4.7)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij} - \alpha_{ij}) \quad i = 2,3,4,5 \dots \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Z důvodu nedostatečných informací z reálného provozu je zavedeno zjednodušení v síti. Všechna uzlová napětí jsou konstantní a nastavena na hodnotu 400 kV. Jelikož tok jalového výkonu podléhá převážně změnám ve velikostech napětí, lze jej v tomto případě zanedbat. Výpočet se tak výrazně zjednoduší, výsledek je však zatížen chybou, která je v reálném provozu nezanedbatelná. Pro návrh funkčního algoritmu však není důležitá absolutní přesnost, proto lze toto zjednodušení přijmout. V takovém případě lze rovnici upravit na tvar rovnice (4.10), který zanedbává jalový výkon v síti a také vliv změny velikosti napětí, který je vždy roven nule.

$$[\Delta P] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] \quad (4.10)$$

Následně stačí pouze stanovit derivace výkonové rovnice podle změny úhlu δ .

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij} - \alpha_{ij}) = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (4.12)$$

Daný výpočet se opakuje, dokud každý prvek vektoru ΔP není menší než nastavená tolerance, v tomto případě 0,1 MW. Metoda je velmi rychlá, konverguje obvykle nejpozději do tří iterací. Výsledkem je vektor $\Delta \delta$ (dd), který je následně přičten k napěťovým úhlům v jednotlivých uzlech [18].

```
187 - U(1:PocetB, f+1)=U(1:PocetB, f);
188 - for k=PocetB+1:PocetU
189 -     U(k, f+1)=abs(U(k, f)) * (cos(angle(U(k, f))+dd(k-PocetB))+li*sin(angle(U(k, f))+dd(k-PocetB)));
190 - end
```

Obrázek 4.8 - Kód - stanovení napěťově-úhlového profilu

```
194 - end % konec ustaleneho chodu
195 - UN(:, g) = U(:, f); %zapis vseh uzlovych napeti do jedne celkove matice o rozm. PocetU x PocetV+1
196 - Uv = [U(:, f), abs(U(:, f)), angle(U(:, f))]; %plovouci napeti pro vypocet zatizeni pri N-1
```

Obrázek 4.9 - Kód - zápis napětí do výsledkové matice U_N a U_v

Toto napětí je dále zpracováno v kapitole 4.2.7. Vyhodnocení toků.

4.2.5 Kritérium N-1

```
111 - for g= 1:g1 %vypocet N-1 s promennou g
112 -     if mod(g,10)==0
113 -         sprintf('N-1 hotovo z %0.2f %%', 100*g/(PocetV))
114 -     end
115 -     Y=Ypst; %vzdy zacinaam iteraci s puvodni PLNOU adm. matici voetne PST
116 -     if g~=1
117 -         %odecet admittance z matice kde pro vedeni G z i do j prictu podelnou Y(i,j) k
118 -         if (any(vedPST==g))
119 -             k=find(vedPST==g);
120 -             Y(l1(g-1,2), l1(g-1,3))=Y(l1(g-1,2), l1(g-1,3))+(l1(g-1,1)*zk)^-1 + M(k)*Yts(k);
121 -             Y(l1(g-1,3), l1(g-1,2))=Y(l1(g-1,3), l1(g-1,2))+(l1(g-1,1)*zk)^-1 + M(k)*Yts(k);
122 -             Y(l1(g-1,2), l1(g-1,2))=Y(l1(g-1,2), l1(g-1,2))-((l1(g-1,1)*zk)^-1)-((l1(g-1,1)*yk)/2)-M(k)*(Yts(k)-Ytp(k));
123 -             Y(l1(g-1,3), l1(g-1,3))=Y(l1(g-1,3), l1(g-1,3))-((l1(g-1,1)*zk)^-1)-((l1(g-1,1)*yk)/2)-M(k)*Yts(k);
124 -         else
125 -             Y(l1(g-1,2), l1(g-1,3))=Y(l1(g-1,2), l1(g-1,3))+(l1(g-1,1)*zk)^-1;
126 -             Y(l1(g-1,3), l1(g-1,2))=Y(l1(g-1,3), l1(g-1,2))+(l1(g-1,1)*zk)^-1;
127 -             Y(l1(g-1,2), l1(g-1,2))=Y(l1(g-1,2), l1(g-1,2))-((l1(g-1,1)*zk)^-1)-((l1(g-1,1)*yk)/2);
128 -             Y(l1(g-1,3), l1(g-1,3))=Y(l1(g-1,3), l1(g-1,3))-((l1(g-1,1)*zk)^-1)-((l1(g-1,1)*yk)/2);
129 -         end
130 -
131 -         c = 1;
132 -     else
133 -         c = length(vedPST)+1;
134 -     end
```

Obrázek 4.10 - Kód - kritérium N-1

Důležitou součástí algoritmu je ověření kritéria N-1. V zásadě se jedná o ověření zatížení sítě v případě výpadku jednoho jakéhokoliv prvku, přičemž nesmí dojít k přetížení ostatních prvků. Testovací oblast neobsahuje žádné jiné transformátory kromě phase-shifterů, algoritmus tedy kontroluje pouze výpadky jednotlivých vedení. První iterace je základní stav, každá další reprezentuje výpadek $i-1$ -tého vedení. Celkem proběhne *Počet vedení* + 1 iterací. Algoritmus vždy kontroluje, zda se jedná o vedení s PST či bez, aby byla správně odečtena admitance z admitanční matice.

První iterace algoritmu výpočet N-1 vynechává, vyřešení základního stavu prospěšně přispívá ke konvergenci. Zároveň se při ní stanovuje vliv PST na testovanou oblast (skrže proměnnou c). V každé iteraci následně proběhne stejnosměrná analýza, jejíž výsledek ve formě uzlových napětí se zapíše do výsledné matice U_N .

4.2.6 Stanovení citlivosti PST (vliv na síť)

```

136 - for r=1:c %stanovení citlivosti, když g=1 provede 9 iterací a zjistí PSDF, pro ostatní jen jedna iterace
137 -     if r~=1 %první iterace pro bezne zatizení
138 -         ax = ac;
139 -         ax(r-1) = ax(r-1)+1; %citlivost na zmenu o 1° v r-tem PST
140 -     else
141 -         ax = ac;
142 -     end
143 -
144 -     ps = [2;6];
145 -
146 -     for i=1:PočetU
147 -         U(1:i,1) = Ub; %vstupní napeti v uzlech
148 -         if i<length(vedPST)+1
149 -             if (mod(r,2)==1 || (mod(r,2) == 0 && not(any(ps == i))))
150 -                 a(pozPST(i,1),pozPST(i,2)) = ax(i); %matice uhlu alfa (pouze prvky mezi uzly s PST)
151 -                 a(pozPST(i,2),pozPST(i,1)) = -ax(i);
152 -             end
153 -         end
154 -     end

```

Obrázek 4.11 - Kód - stanovení citlivosti PST a vlivu na síť

Pro potřeby algoritmu je nutné stanovit vliv umístěných PST na ostatní prvky v síti. Algoritmus toto jednoduše řeší tak, že proběhne cyklus o *Počet PST* + 1 iteracích, kde jako první řeší běžný stav nebo N-1 při konstantním nastavení odboček PST vektorem ac . Tento vektor je na počátku nulový a mění se na konci každé iterace algoritmu. Při stanovování citlivosti jsou ovšem důležité zbylé iterace tohoto cyklu. Algoritmus vždy nastaví transformátor na pozici $r-1$ na hodnotu $\alpha + 1^\circ$, ostatní jsou nastaveny na výchozí hodnotu dle vektoru ac . Následně dojde k vytvoření matice a , která má rozměry *Počet uzlů* \times *Počet uzlů* a popisuje fázový posuv mezi danými uzly. Matice je velmi řídká, nenulové prvky jsou pouze mezi uzly s phase-shifterem (například uzly 29 a 33, Hradec – Röhrsdorf).

Tato nová matice a posléze vstupuje do stejnosměrné analýzy, kde dojde k jejímu vyhodnocení a uchování do další části algoritmu.

4.2.7 Vyhodnocení toků

Aby bylo možné jakkoliv vyhodnotit zatížení, nejprve musí být vyhodnocen napěťový profil sítě. Algoritmus počítá při každé iteraci výkon (proud) tekoucí každým vedením. Výpočet stanoví nejprve výkon vystupující z počátečního uzlu, vstupující do koncového uzlu, a také jejich součet, jehož výsledkem jsou ztráty daného vedení.

```

198 - for i=1:PocetV
199 -     if (g == 1 || i~= g-1)
200 -         if (any(vedPST == i)) %pokud je i cislo vedeni s PST
201 -             k = find(vedPST == i); %najde ktere PST na vedeni je
202 -             Y2 = M(k)*Ycs(k); %vypocte jeho admitanci
203 -             Y1 = ((11(i,1)*zk)^-1)*Y2)/((11(i,1)*zk)^-1)+Y2; %a spoji ji seriove s vedenim
204 -         else
205 -             Y1 = (11(i,1)*zk)^-1; %vypocita admitanci vyhodnocovaneho vedeni vedeni
206 -         end
207 -         Pv(i,1) = -imag(Y1)*Uv(11(i,2),2)*Uv(11(i,3),2)*sin(Uv(11(i,2),3)-Uv(11(i,3),3));
208 -         Pv(i,1) = Pv(i,1)+real(Y1)*(Uv(11(i,2),2)^2-Uv(11(i,2),2)*Uv(11(i,3),2)*cos(Uv(11(i,2),3)-Uv(11(i,3),3)));
209 -         Pv(i,2) = -imag(Y1)*Uv(11(i,2),2)*Uv(11(i,3),2)*sin(Uv(11(i,3),3)-Uv(11(i,2),3));
210 -         Pv(i,2) = Pv(i,2)+real(Y1)*(Uv(11(i,3),2)^2-Uv(11(i,2),2)*Uv(11(i,3),2)*cos(Uv(11(i,3),3)-Uv(11(i,2),3)));
211 -         Pv(i,3) = Pv(i,1)+Pv(i,2);
212 -         if Pv(i,1)>0 %proud z napajeciho uzlu (ve smeru toku)
213 -             Iv(i,g) = Pv(i,1)/sqrt(3)/abs(Uv(11(i,3),2));
214 -             PN(i,g) = Pv(i,1);
215 -         else
216 -             Iv(i,g) = Pv(i,2)/sqrt(3)/abs(Uv(11(i,2),2));
217 -             PN(i,g) = Pv(i,2);
218 -         end
219 -     end

```

Obrázek 4.12 - Kód - výpočet zatížení vedení

Nejprve je tedy třeba stanovit tok na vedení. Vyjdeme z rovnic (4.13) a (4.14). Dle směru toku bude výkon napájecího uzlu kladný a výkon příjemce záporný. Jejich součet potom označuje úbytek výkonu na vedení – ztráty [20][22].

$$P_{12} = G_{12} \cdot U_1^2 - G_{12} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) - B_{12} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.13)$$

$$P_{21} = G_{21} \cdot U_1^2 - G_{21} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - B_{21} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1) \quad (4.14)$$

Algoritmus opět v cyklu prochází všechna vedení a počítá jejich zatížení. Jelikož některá vedení jsou zdvojená nebo i ztrojená, nelze použít přímo admitanci z admitanční matice. Z tohoto důvodu je v každé iteraci počítána hodnota YI , což je admitance daného vedení. V případě, že se jedná o vedení včetně PST, algoritmus najde odpovídající transformátor a spočítá přímo sériovou kombinaci parametrů vedení a transformátoru. Dále ještě pro přehlednost vypočte odpovídající hodnotu proudu tekoucího vedením. Výpočet rozdělení výkonu probíhá po každém ukončeném výpočtu stejnosměrné analýzy, tedy při každé iteraci algoritmu.

```

220 -     IN(:,g) = Iv(:,1);
221 -     if g==1
222 -         if Pv(i,1)>0 %proud z napajeciho uzlu (ve smeru toku)
223 -             Pcit(i,r) = Pv(i,1);
224 -         else
225 -             Pcit(i,r) = Pv(i,2);
226 -         end
227 -     end
228 - end %konec smycky na stanoveni zatizeni
229
230 -     if (r ==1 && g == 1)
231 -         ztraty(g) = sum(Pv(:,3)); %celkove ztraty na vsehch vedenich kazdy radek odpovida jinemu prvku pri N-1
232 -     end
233 - end %konec stanovovani citlivosti
234 - end %KONEC N-1

```

Obrázek 4.13 - Kód - vyhodnocení citlivosti PST

Druhá část vyhodnocení toků řeší rozdělení toků při stanovování citlivosti PST. Tento výpočet probíhá vždy pouze v první iteraci kritéria N-1 (g je právě 1), která řeší běžný stav. Kladná hodnota výkonu (napájecí vedení) je zapsána do matice P_{cit} , ve které 1. sloupec obsahuje hodnoty výkonu na všech vedeních v základním stavu a každý další sloupec obsahuje hodnoty výkonu při změně úhlu daného phase-shifteru (tzn. 2. a 3. sloupec Hradec, 5. a 6. sloupec Mikulowa, atd.).

4.3 Úprava odboček PST

```

236   %% Oprava po N-1
237   %stanoveni PSDF
238   PSDF = zeros(PocetV,length(vedPST));
239   for j=1:length(vedPST)
240       PSDF(:,j) = Pcit(:,1)-Pcit(:,j+1);
241   end
242
243   if (ok ~= 0 && any(Iv(1:PocetV) >= 1600)) %hleda vedeni s proudem na 1600
244       max(max(Iv))
245       k = find(Iv(1:299) >= 1600); %identifikace pretizenyh vedeni
246       dPN = zeros(length(k),1);
247       dPdA = zeros(length(k),length(vedPST));
248
249       for i = 1:length(k)
250           dPN(i) = (-PN(k(i),1)+1100e6); %o kolik je pretizeno
251           dPdA(i,:) = PSDF(k(i),:); %redukcce citlivostni matice
252       end
253       dA = pinv(dPdA)*dPN; %zmena uhlu A podle citlivsoti a pretizeni
254       ac = ac-dA; %prenastaveni odbocek
255       alfa(:,q) = ac;
256       ok = 1

```

Obrázek 4.14 - Kód - úprava odboček PST při základním stavu

Nejdůležitější částí algoritmu je právě úprava odboček transformátorů. Kód v této části nejprve vytvoří matici $PSDF$ (z angl. Phase shift distribution factor – faktor rozložení fázového posuvu), která vychází z vektorů P_{cit} z předchozí části. Jedná se o rozdíl jednotlivých stavů oproti základnímu stavu. Tato matice slouží jako výchozí podklad pro úpravu odboček, neboť obsahuje údaje o tom, jak se změní tok na jednotlivých vedeních při změně regulačního úhlu daného PST o jeden stupeň.

Tabulka 4.5 – Ukázka matice $PSDF$ (distribuční faktor PST) – změna P při regulaci úhlu o 1°

PST \ Vedení	Hradec Röhrsdorf [MW/°]	Röhrsdorf Remptendorf [MW/°]	Röhrsdorf Weida [MW/°]	Mikulowa Hagenwerder [MW/°]	Vierraden Krajnik [MW/°]
V38	-3,46	0,24	0,96	2,35	-1,11
V39	-3,49	0,25	0,97	2,38	-1,12
V40 (Hradec 1)	-121	-0,01	-0,62	-3,41	1,60
V41 (Hradec 2)	-121	-0,01	-0,62	-3,41	1,60
V42	-5,75	-0,22	-0,32	3,92	-1,83

4.3.1 Řešení základního stavu

V této části probíhá identifikace přetížených vedení, nejprve pouze v základním stavu (bez kritéria N-1). Jedná se o první sloupec (prvních 300 prvků) z matice I_v , která obsahuje v jednotlivých sloupcích rozložení proudů při výpadku každého jednoho vedení. Pro zvýšení pravděpodobnosti konvergence algoritmus nejprve řeší základní stav, protože přetížení v tomto stavu se přenáší i do každé iterace kritéria N-1. Vzniká tak více než 300 přetížených prvků, což výrazně zvyšuje výpočetní nároky. Algoritmus tedy identifikuje všechna vedení s proudem více než 1600 A (80% limitní hodnoty), zapíše jejich čísla a vypočte, o jaký výkon je třeba jejich

zatížení snížit (vektor dP_N). Dále se do pomocné matice $dPdA$ zapíše všechny řádky z matice PSDF, které odpovídají přetíženým vedením. Tato matice zastupuje funkci jakobiánu v Newton-Raphsonově metodě. Následuje výpočet vektoru $d\alpha$ dle rovnice 4.15, který již přímo upravuje nastavení odboček PST.

$$[\Delta P_N] = \left[\frac{\partial P}{\partial \alpha} \right] \cdot [\Delta \alpha] \quad (4.15)$$

Jelikož má matice $dPdA$ vždy stejný počet sloupců dle počtu PST, není zaručeno, že bude mít i stejný počet řádků. Kvůli výpočtu je třeba vytvořit inverzní matici, což je u nečtvercových matic problém. Řešení nabízí MATLAB pomocí pseudoinverzní matice, která je použita i v tomto algoritmu. Jedná se o matici, která má společné vlastnosti s inverzní maticí, ale ne všechny. Pseudoinverzní matice umožňuje zjistit, zda má soustava rovnic nějaké řešení, a pokud ano, toto řešení také vypočítá.

Posledním krokem této části je, úprava vektoru s nastavením odboček ac , od kterého jednoduše odečte vypočtené hodnoty ve vektoru $d\alpha$. Nakonec nastaví identifikátor ok na hodnotu 1. V případě, že žádné vedení nepřekročilo hodnotu 1600 A, algoritmus přeskočí tyto kroky a přímo nastaví identifikátor ok na hodnotu 0, čímž se průběh přesune do druhé části, která řeší stav včetně kritéria N-1 [22][23][24].

4.3.2 Řešení sítě včetně kritéria N-1

```

261 - elseif (ok == 0 || any(Iv(:)>2000))
262 -     k = find(Iv(:) >= 2000);
263 -     dPN = zeros(length(k),1);
264 -     op = zeros(length(k),2);
265 -     for i = 1:length(k)
266 -         op(i,1) = floor(k(i)/PocetV);
267 -         op(i,2) = k(i)-op(i,1)*PocetV; %vraci cislo vypadeneho vedeni (1) a pretizeneho vedeni (2)
268 -         dPN(i) = (-PN(op(i,2),op(i,1)+1)+1350e6); %odpovida 2000 A
269 -     end
270 -     nl = 0;
271 -     for i = 1:size(op,1)
272 -         if any(nl(:,1) == op(i,2))
273 -             j = find(nl(:,1) == op(i,2));
274 -             if nl(j,2) < dPN(i)
275 -                 nl(j,2) = dPN(i);
276 -             end
277 -             elseif nl == 0
278 -                 nl = [op(i,2) dPN(i)];
279 -             else
280 -                 nl = [nl; op(i,2) dPN(i)];
281 -             end
282 -     end
283 -     dPdA = zeros(size(nl,1),length(vedPST));
284 -     if any(Iv(:)>2000)
285 -         for i = 1:size(nl,1)
286 -             dPdA(i,:) = PSDF(nl(i,1),:);
287 -         end
288 -         dA = pinv(dPdA)*nl(:,2); %zmena uhlu A podle jakobianu a citlivosti
289 -         ac = ac-dA;
290 -         alfa(:,q) = ac;
291 -         ok = 2
292 -     else
293 -         oj = 0
294 -         ok = 0
295 -         break
296 -     end
297 - end

```

Obrázek 4.15 - Kód - úprava odboček PST při kontrole kritéria N-1

Druhá část kódu se spouští po vyřešení první části, tedy v případě, že identifikátor *ok* je roven právě nule. Prerekvizitou této části je hotové řešení kritéria N-1, po které je známé rozložení proudu na jednotlivá vedení při výpadku jiného vedení. Ukázka této matice je v tabulce 4.5. První sloupec obsahuje rozložení proudů v základním stavu, každý další sloupec *n* ukazuje stav při výpadku *n-1* vedení (tzn. 2. sloupec platí pro výpadek vedení V1, 5. sloupec pro vedení V4 atd.).

Tabulka 4.6 – Ukázka matice *Iv* – výpočet rozložení proudu

Číslo vedení	Zákl. stav [A]	Výpadek V1 [A]	Výpadek V2 [A]	Výpadek V3 [A]	Výpadek V4 [A]	Výpadek V5 [A]
V1	819	0	1421	228	766	766
V2	686	1389	0	191	642	642
V3	1082	961	995	0	985	985
V4	865	823	834	485	0	1333
V5	865	823	834	485	1333	0

Řešení je opět založeno na identifikaci přetížených vedení, tentokrát je výpis v matici *op*, kde v prvním sloupci je číslo vypadlého vedení a ve druhém sloupci číslo přetíženého vedení. Vektor *dP_N* obsahuje velikost toku daným vedením přesahující limit. Tyto informace jsou nadále zpracovány do matice *nI*, která odstraní duplicitní přetížená vedení a uchová pouze jeden zápis od každého unikátního vedení včetně hodnoty jeho nejhoršího stavu. Teprve dle těchto údajů vytváří algoritmus pomocnou matici *dPdA* obsahující hodnoty z citlivostní matice *PSDF*. Následně řeší problém opět pomocí rovnice (4.15).

```

301 -   if (any(abs(ac) > 200) && (ok == 1 && uprava == 0))
302 -       sprintf('Základní stav nelze vyřešit optimálně')
303 -       limit1 = 2000;
304 -       ac = [0;0;0;0;0;0;0;0];
305 -       Iz = 0;
306 -       uprava = 1;
307 -       q = 1;
308 -   elseif ((any(abs(ac) > 200) && (ok == 0 || uprava == 1)) || not(any(abs(dA) > 1e-2)))
309 -       sprintf('Uhel příliš velký')
310 -       break
311 -   end
312 -

```

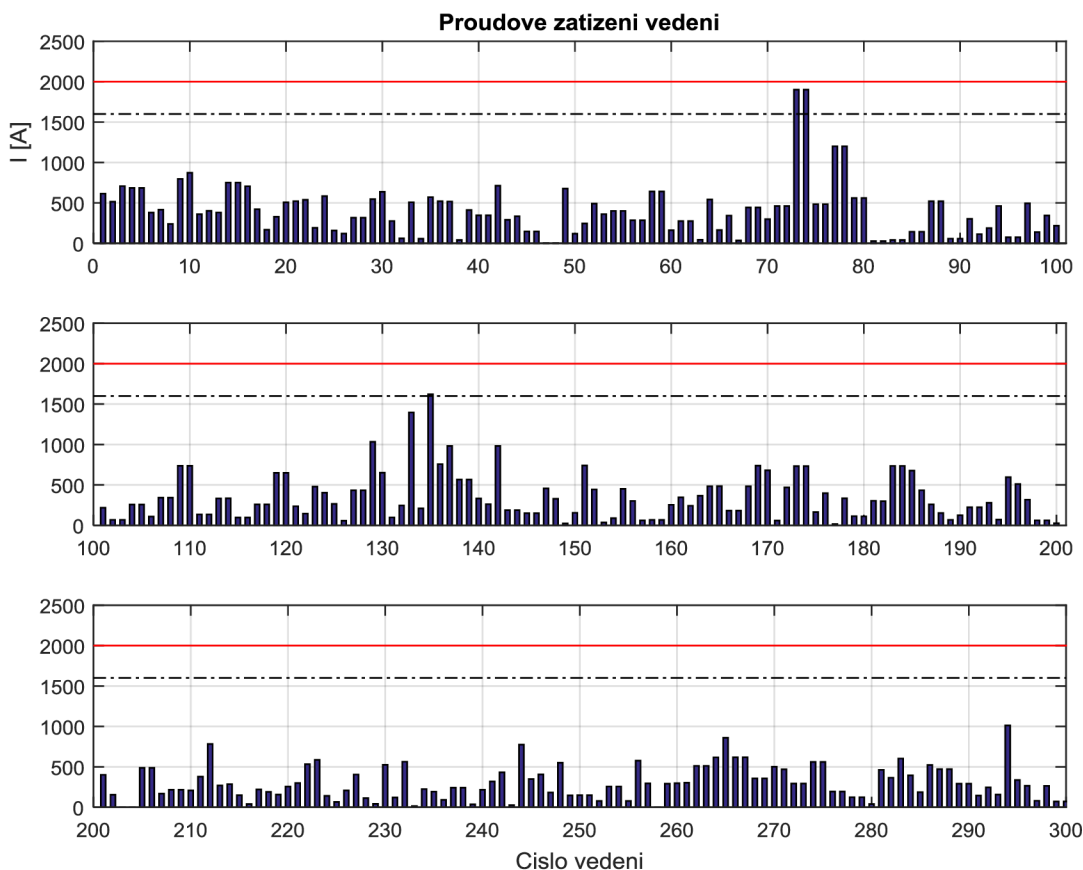
Obrázek 4.16 – Kód – omezovací podmínky výsledků algoritmu

V případě, že algoritmus není schopen vyřešit optimalizaci základního stavu, je třeba uvažovat také s variantou, kdy síť může být zatížena na hranici svých limitů, přesto splnit bezpečnostní kritéria. Proto pokud dojde v první části řešení k nárůstu úhlů PST nad hranici (v tomto případě 200°), výchozí hodnoty se obnoví a algoritmus zkouší řešit daný scénář s plným limitem proudu na vedení (2000 A). Pokud ani v tomto případě výsledky nekonvergují k přijatelným hodnotám, dojde k přerušení cyklu a ukončení algoritmu.

5 VÝSLEDKY

5.1 Scénář 1 – prvotní návrh

Výchozí scénář odpovídá modelu BIALEK z roku 2009 [17]. V první iteraci algoritmus začíná s odbočkami v neutrálních polohách (0°). Vypočtený maximální proud v základním stavu je 1901 A. Algoritmus pro lepší konvergenci nejprve řeší pouze základní stav bez kritéria N-1.



Obrázek 5.1 - Scénář 1 - rozložení proudu, 1. iterace

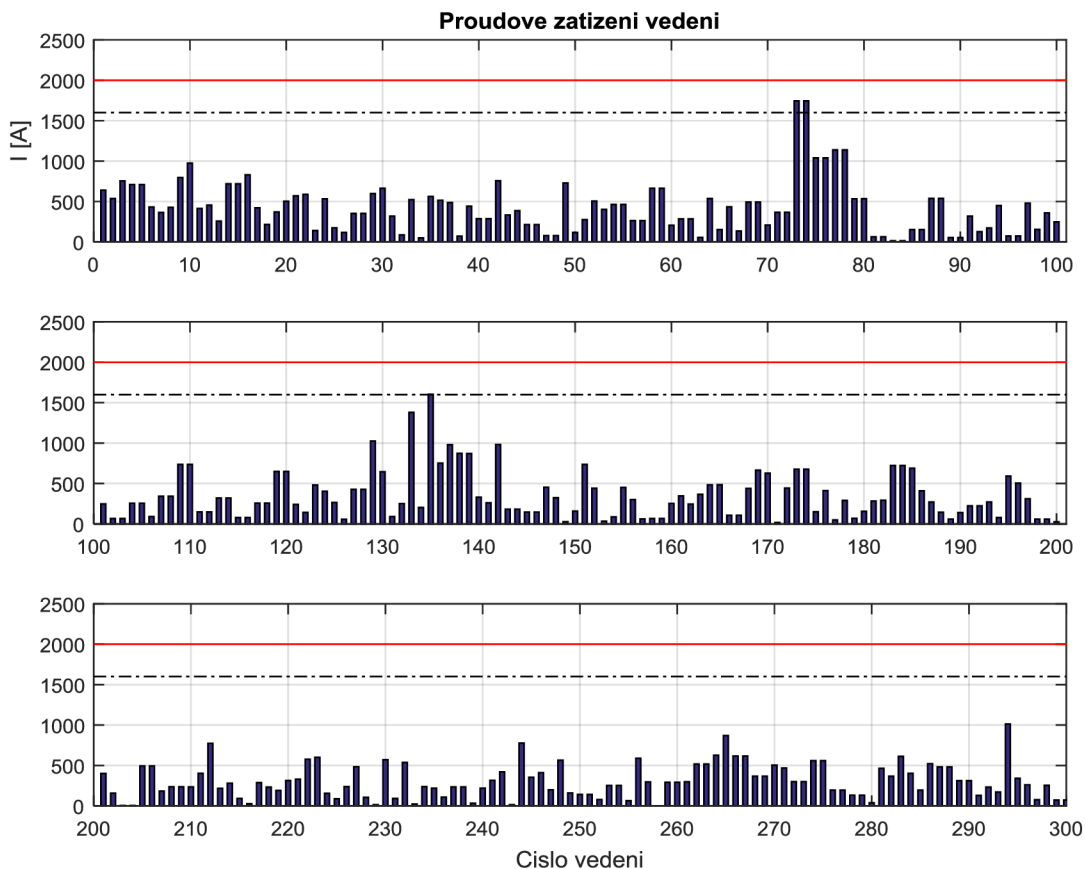
Tabulka 5.1 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 1. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
3.43°	3.43°	0.15°	0.32°	-2.40°	-2.40°	1.03°	1.03°

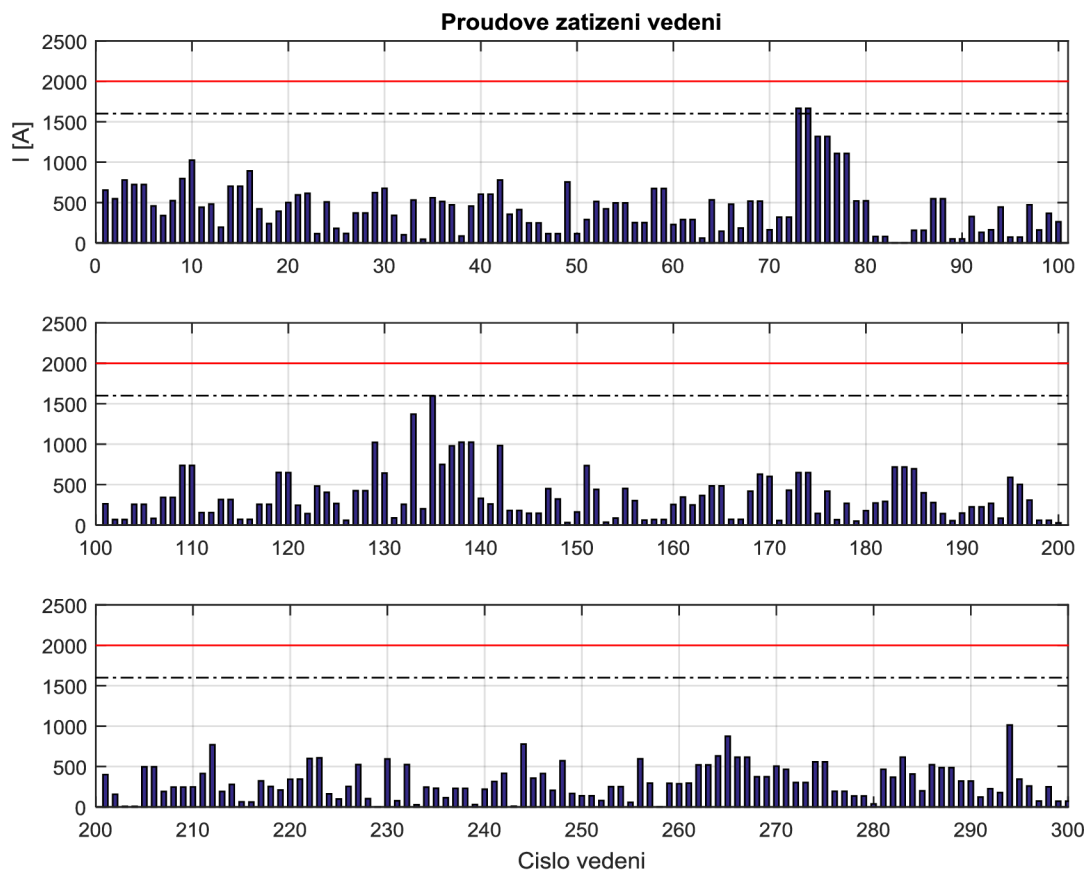
Iterace č. 2 – maximální proud v základním stavu je 1745 A. Nové nastavení odboček:

Tabulka 5.2 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 2. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
5.1581°	5.1581°	0.2284°	0.4827°	-3.6126°	-3.6126°	1.5482°	1.5482°



Obrázek 5.2 - Scénář 1 - rozložení proudu, 2. iterace

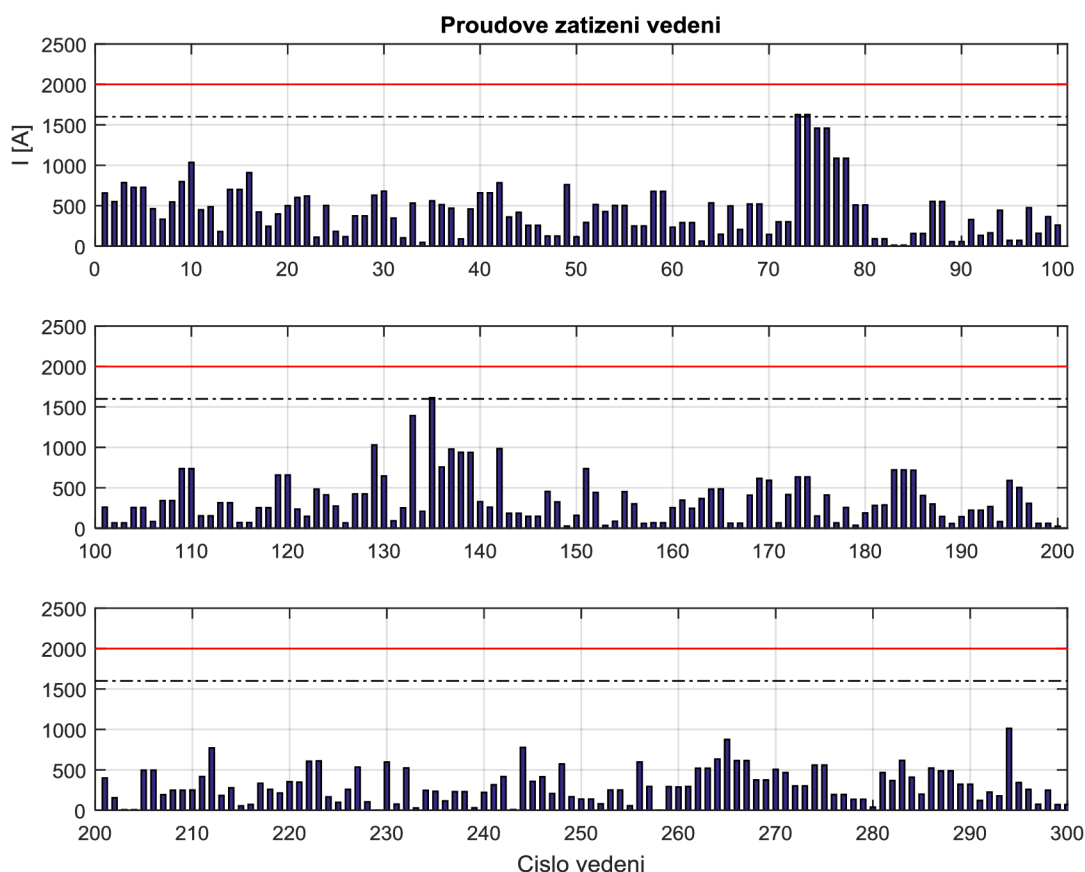


Obrázek 5.3 - Scénář 1 - rozložení proudu, 3. iterace

Iterace č. 3 – maximální proud základního stavu je 1666 A. Nové nastavení odboček:

Tabulka 5.3 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 3. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
5.46°	5.46°	0.22°	0.47°	-4.22°	-4.22°	1.24°	1.24°



Obrázek 5.4 - Scénář 1 - rozložení proudu, 4. iterace

Iterace č. 4 – maximální proud základního stavu je 1627 A. Nové nastavení odboček:

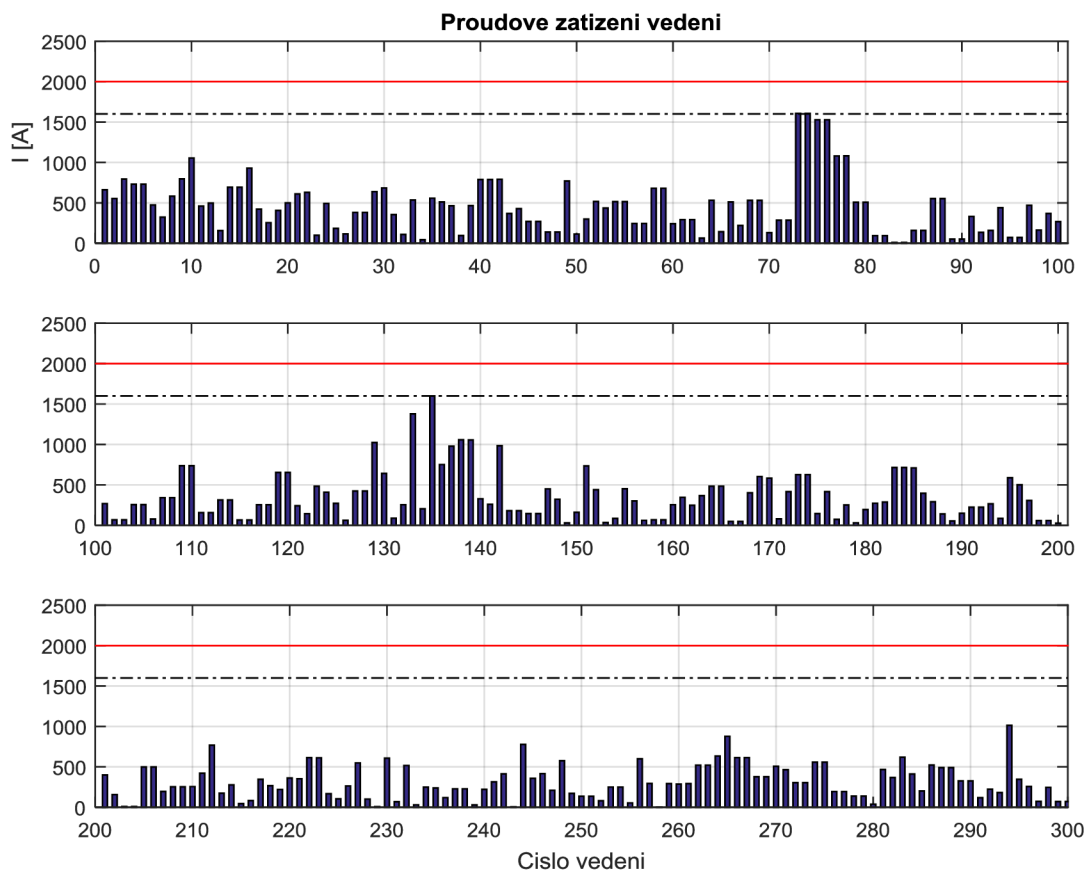
Tabulka 5.4 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 4. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
6.17°	6.17°	0.26°	0.56°	-4.52°	-4.52°	1.65°	1.65°

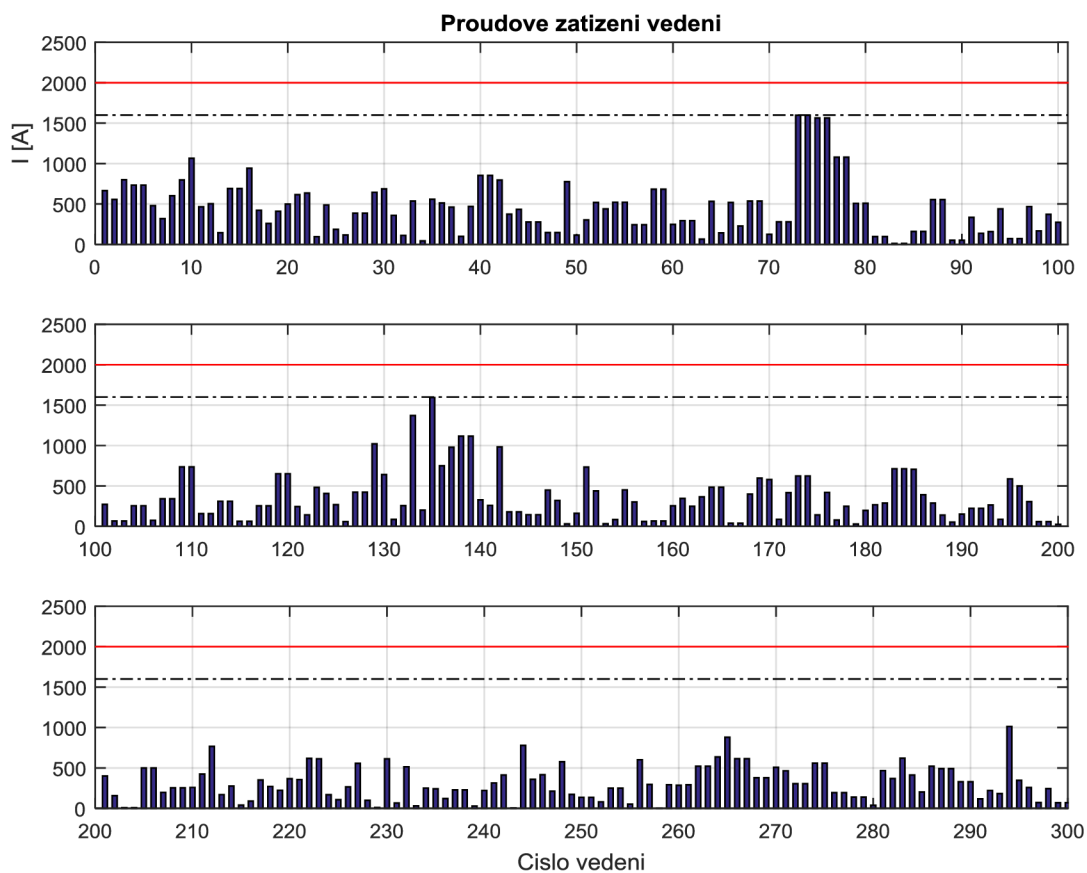
Iterace č. 5 – maximální proud v základním stavu je 1608 A. Nové nastavení odboček:

Tabulka 5.5 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 5. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
6.53°	6.53°	0.28°	0.60°	-4.68°	-4.68°	1.85°	1.85°



Obrázek 5.5 - Scénář 1 - rozložení proudu, 5. iterace



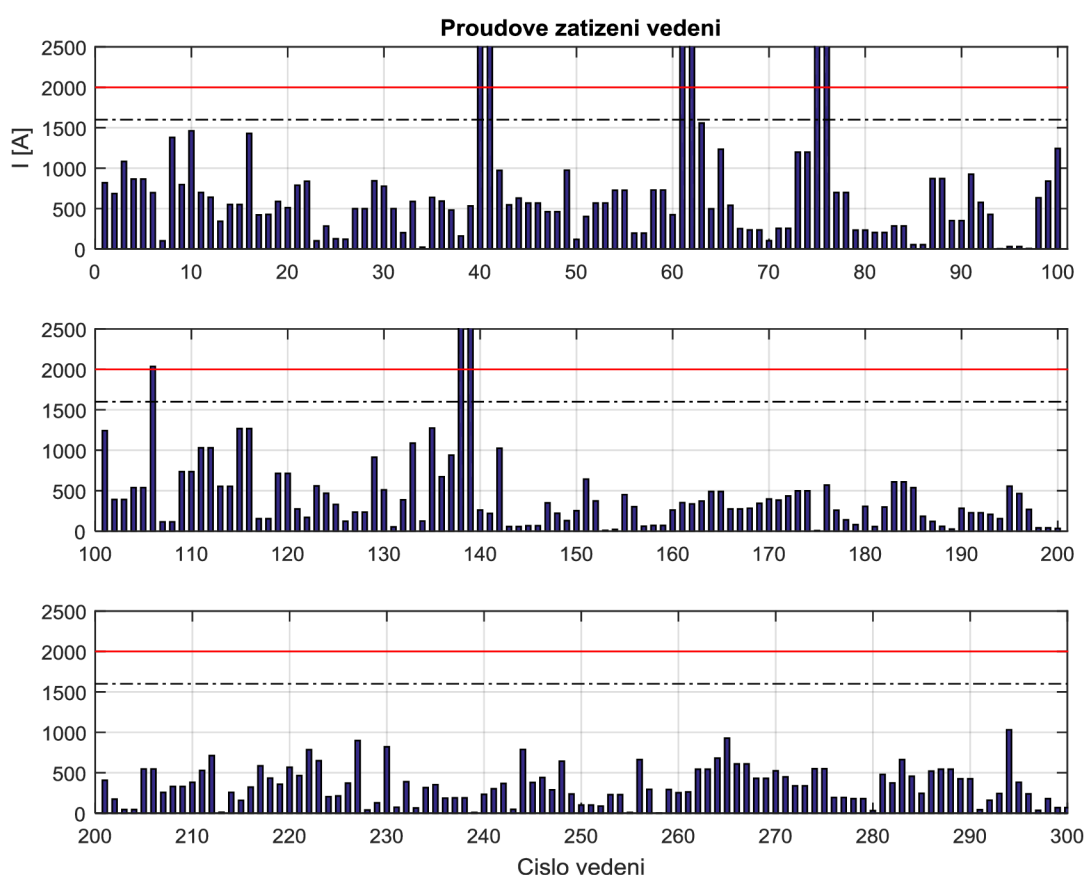
Obrázek 5.6 - Scénář 1 - rozložení proudu, 6. iterace

Iterace č. 6 – maximální proud v základním stavu je 1598 A. Zatížení je tedy pod žádanou velikostí 1600 A. Nyní algoritmus začíná kontrolovat kritérium N-1. Vypočtený maximální proud je 2690 A, a to na vedení 138. Nově vypočtené nastavení odboček:

Tabulka 5.6 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 6. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
17.66°	17.66°	22.58°	49.63°	-10.81°	-10.81°	6.81°	6.81°

Úhel transformátorů v rozvodně Röhrsdorf sice momentálně přesahuje nastavenou horní mez, nicméně v průběhu výpočtu lze tento drobný přesah prozatím zanedbat, neboť může dojít ke konvergenci k nižší hodnotě.



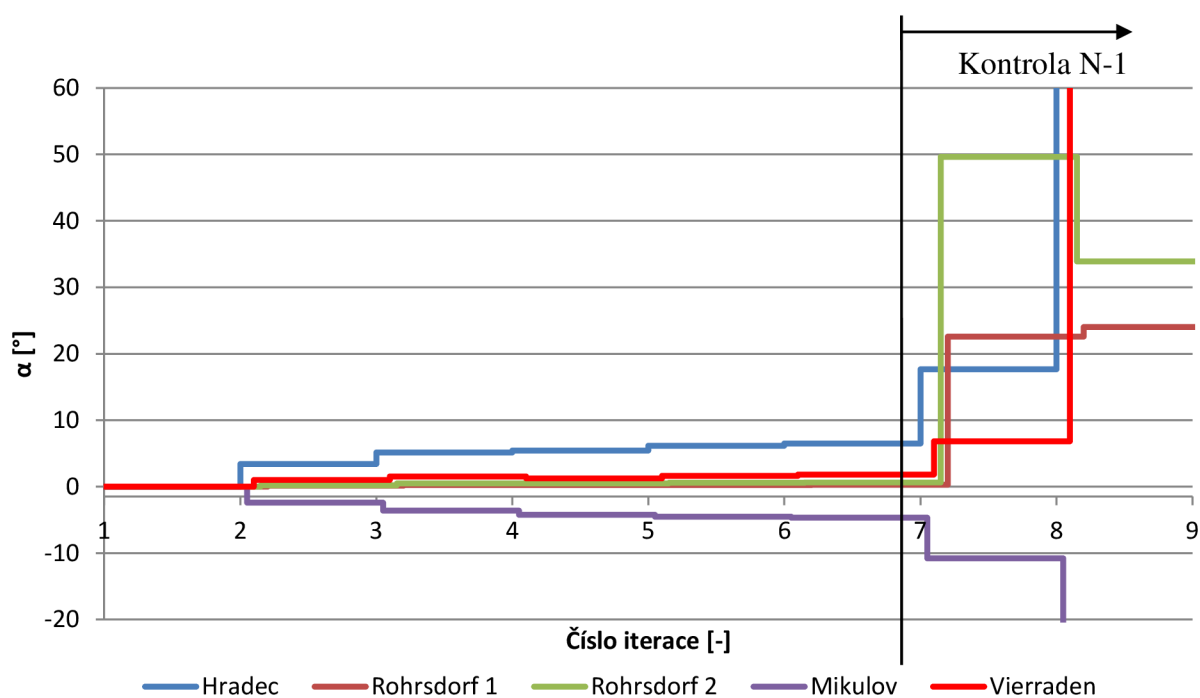
Obrázek 5.7 - Scénář 1 - rozložení proudu, 7. Iterace

Iterace č. 7 – maximální proud je 5966 A. Stav sítě se velmi zhoršuje, nové nastavení odboček:

Tabulka 5.7 - Scénář 1 - Nastavení odboček po 7. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
$9 \cdot 10^{13} \circ$	$-9 \cdot 10^{13} \circ$	24.0259°	33.9042°	$-5 \cdot 10^{13} \circ$	$5 \cdot 10^{13} \circ$	$4 \cdot 10^{13} \circ$	$-4 \cdot 10^{13} \circ$

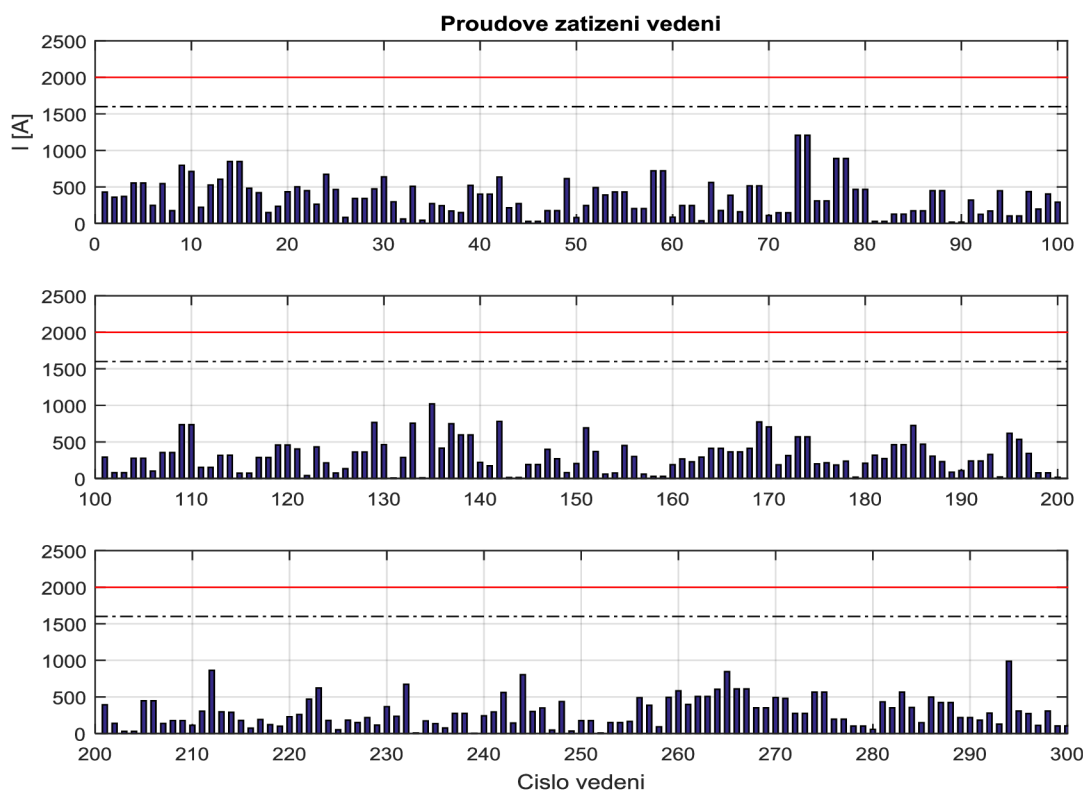
Vypočtený úhel v posledních dvou iteracích přesáhl maximální regulační rozsah použitých zařízení, což implikuje nemožnost vyřešení stavu pouze pomocí PST, je tedy třeba redispečink.



Obrázek 5.8 - Scénář 1 – změna odboček PST v jednotlivých iteracích

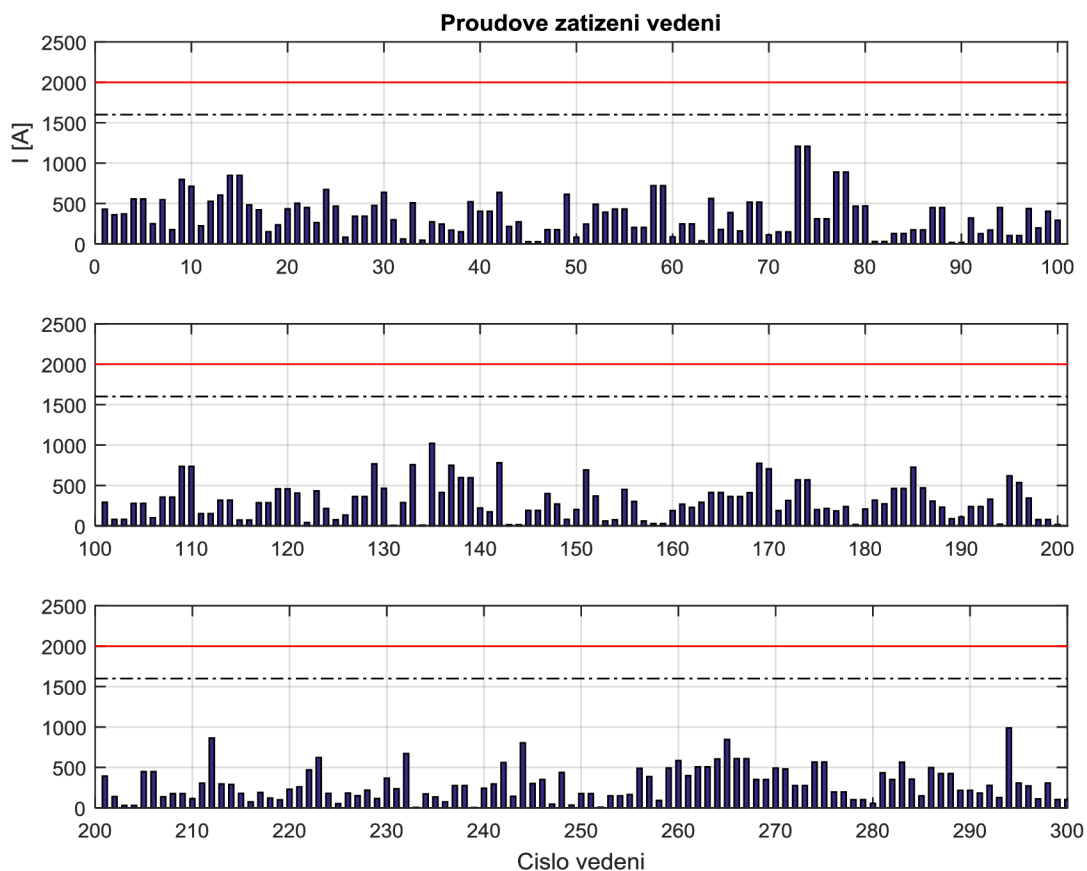
5.2 Scénář 2 – síť po redispečinku

Výchozí konfigurace scénáře 2 je založena na scénáři 1, nicméně došlo k redispečinku zejména v oblasti kolem rozvodny Vierraden a Krajník, kde byla síť zatěžována na hranici nebo i za hranici svých možností. Redispečink ulevil základnímu stavu a umožnil korigovat zatížení pomocí PST v případě kontroly kritéria N-1.



Obrázek 5.9 - Scénář 2 - rozložení proudu, 1. Iterace

1. iterace (bez N-1), maximální proud je 1208 A, není třeba úprava (odbočky zůstávají v základní poloze).

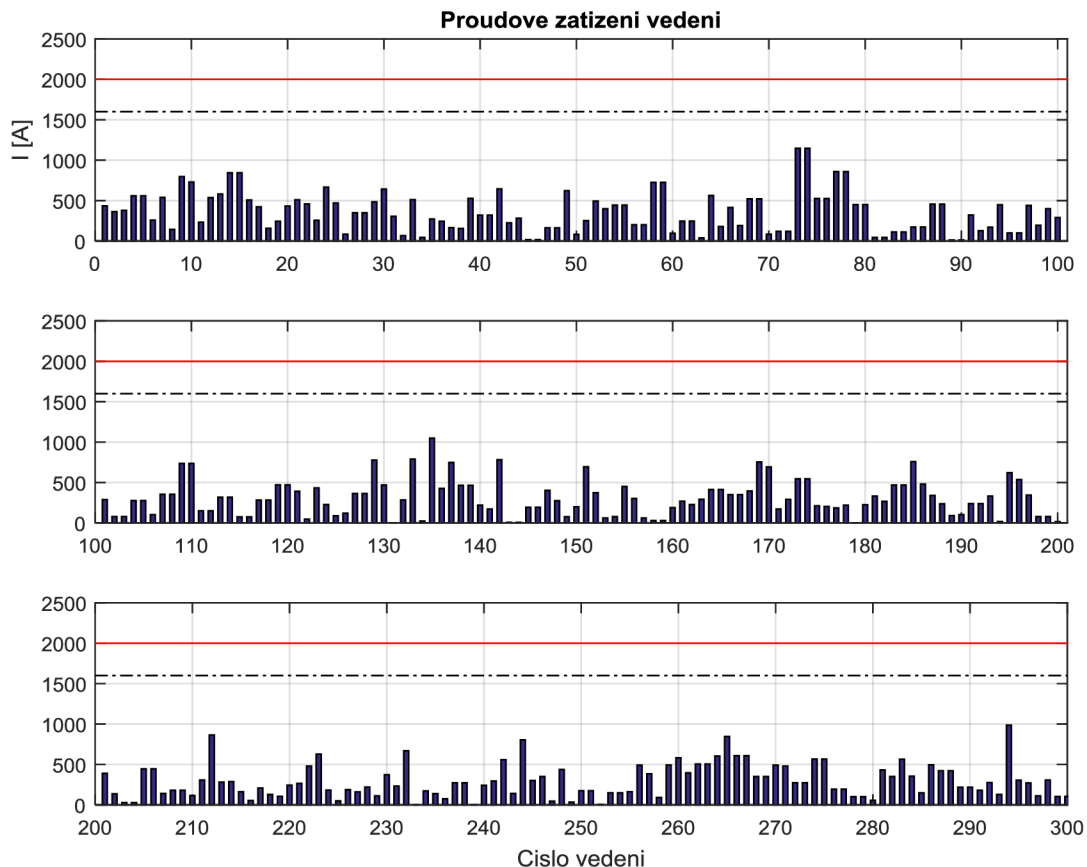


Obrázek 5.10 - Scénář 2 - rozložení proudu, 2. Iterace

2. iterace (včetně N-1), maximální proud 2145 A, úprava odboček na hodnoty:

Tabulka 5.8 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 2. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
0.47°	0.47°	-0.01°	-0.02°	-0.93°	-0.93°	-0.46°	-0.46°



Obrázek 5.11 - Scénář 2 - rozložení proudu, 3. Iterace

3. iterace (včetně N-1), maximální proud je 2006 A. úprava odboček na hodnoty:

Tabulka 5.9 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 3. iteraci

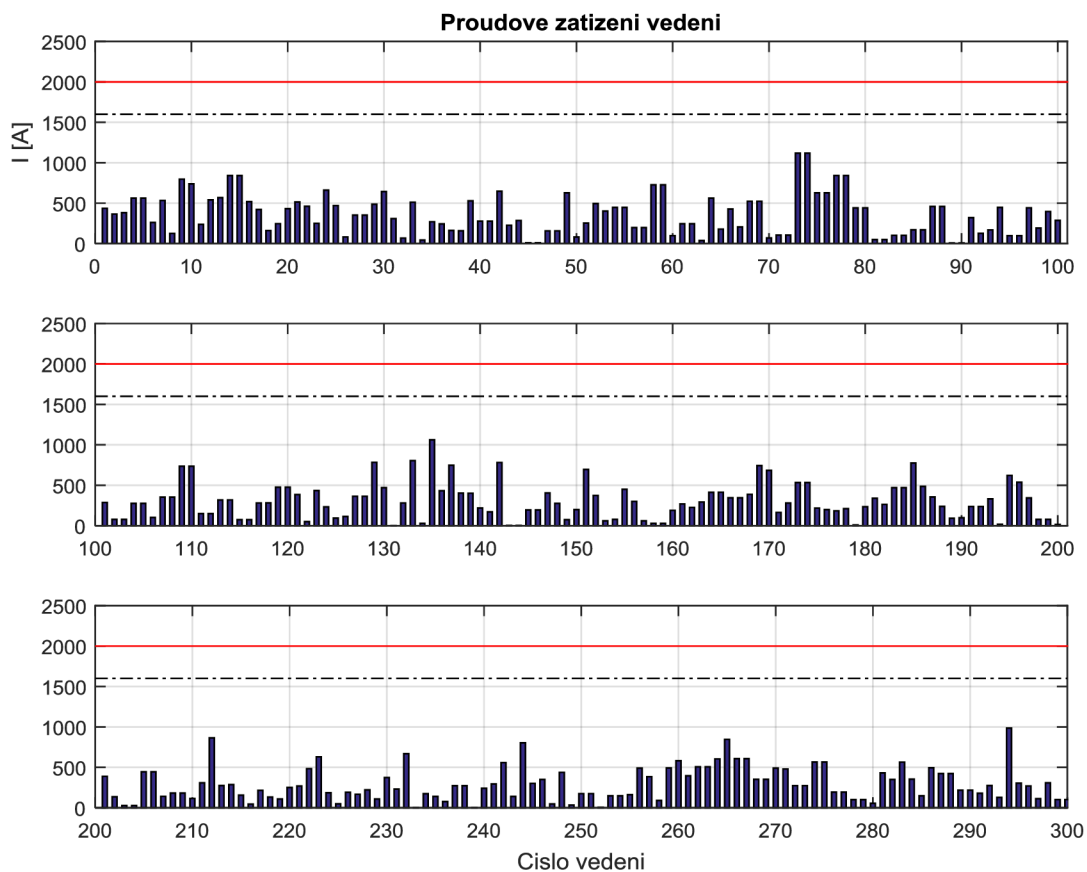
Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
0.69°	0.69°	-0.01°	-0.03°	-1.37°	-1.37°	-0.68°	-0.68°

4. iterace (včetně N-1), maximální proud je 1955 A, tedy pod požadovanou hranicí. Finální nastavení odboček tedy je dle tabulky 13:

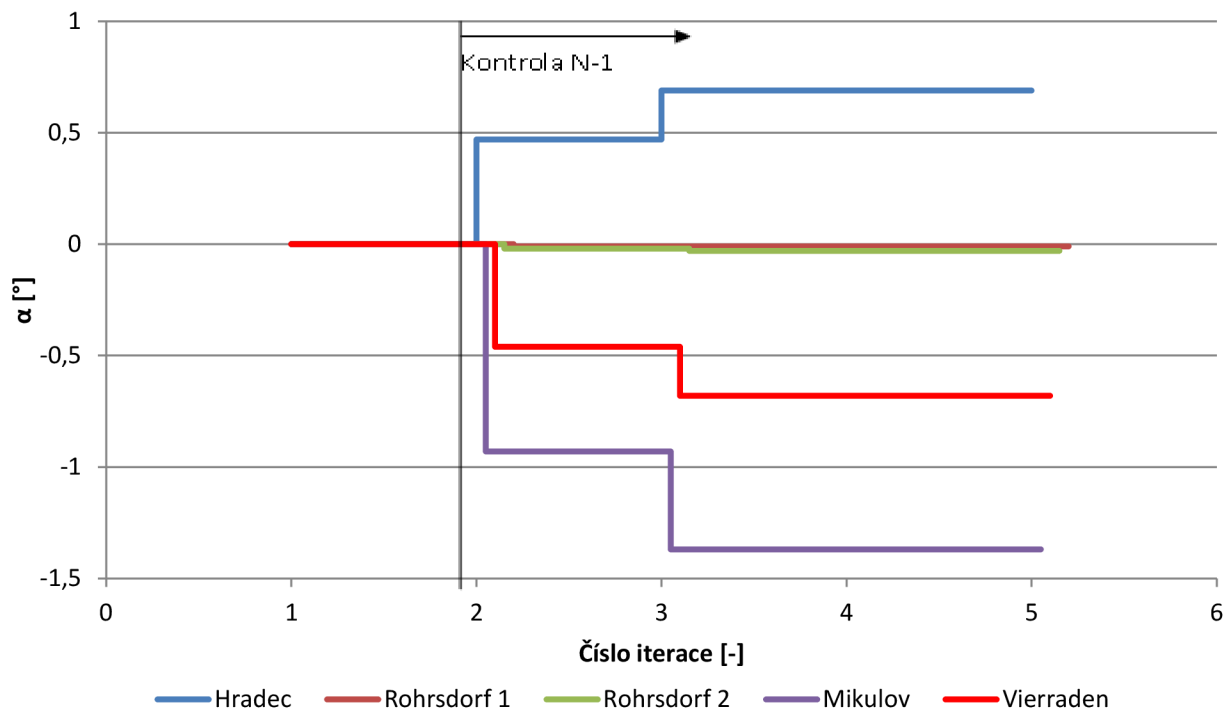
Tabulka 5.10 - Scénář 2 - Nastavení odboček po 4. iteraci

Hradec 1	Hradec 2	Röhrsdorf 1	Röhrsdorf 2	Mikulowa 1	Mikulowa 2	Vierraden 1	Vierraden 2
0.69°	0.69°	-0.01°	-0.03°	-1.37°	-1.37°	-0.68°	-0.68°

Z hodnot je patrné, že s drobnou odchylkou v dobře nakonfigurované síti si algoritmus rychle poradí a v několika iteracích je schopen navrhnout funkční řešení.



Obrázek 5.12 - Scénář 2 - rozložení proudu, 4. Iterace

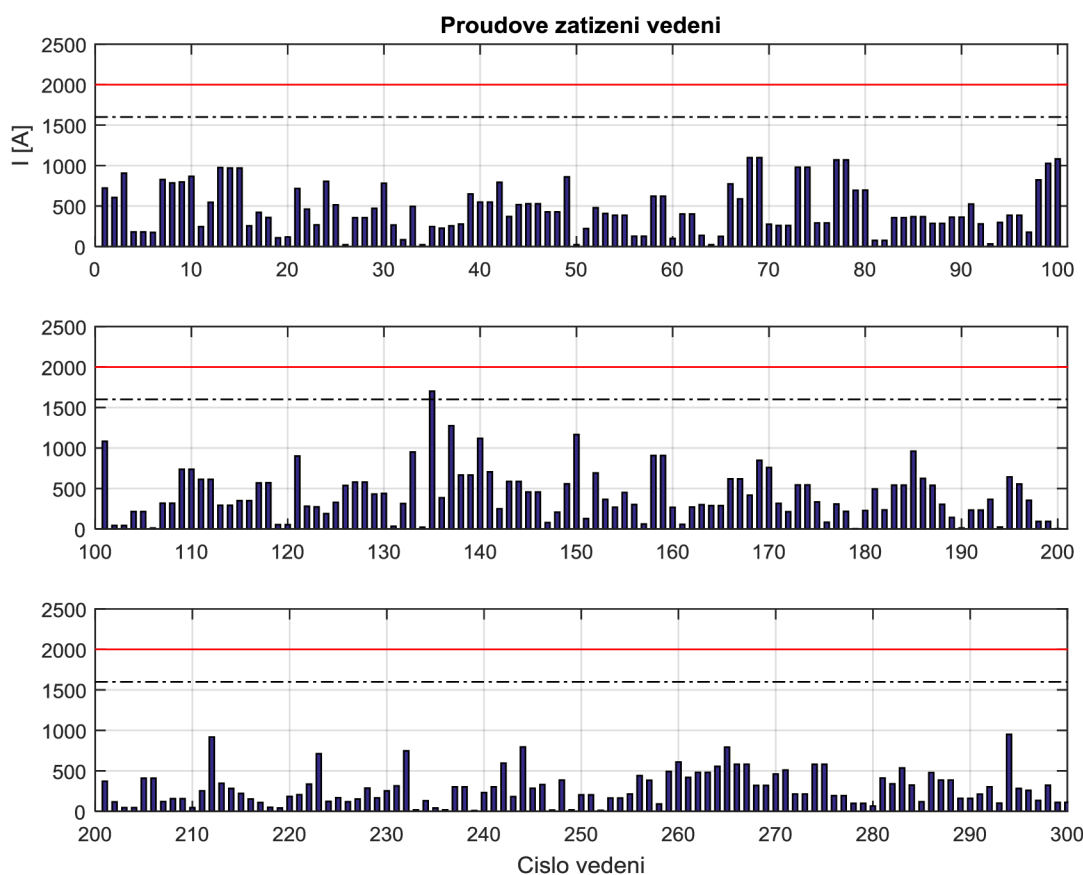


Obrázek 5.13 - Scénář 2 – změna odboček PST v jednotlivých iteracích

5.3 Scénář 3 – Zvýšená výroba OZE v Německu

Posledním scénářem je simulace výpadku velkého zdroje v České republice a nahrazením chybějícího výkonu zvýšenou výrobou v Německu. Výpadek zdroje je realizován v uzlu Slavětice (jaderná elektrárna Dukovany) a zvýšení výroby v oblasti severního Německa (rozvodny Lubmin, Bentwisch a částečně Röhrsdorf). Tento stav způsobí rozdíl sumy výkonu v soustavě asi 3,5 GW.

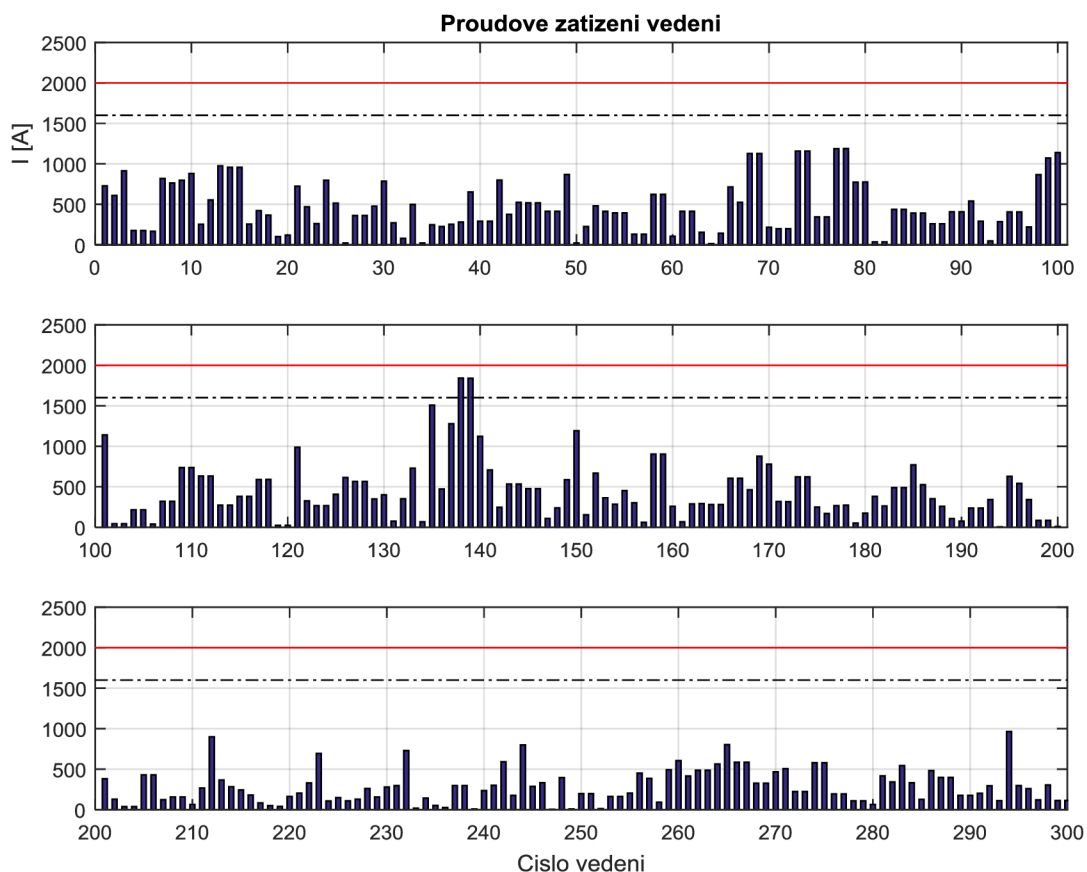
Výchozí stav sítě je na obrázku 5.14. Algoritmus stanovil maximální proud po první iteraci 1701 A. Nejprve tedy upraví odbočky tak, aby maximální proud v základním stavu nepřesáhl limit 1600 A. K tomu dojde po 5. iteraci, kdy proud klesne na hodnotu 1595 A a algoritmus tedy může začít řešit kritérium N-1. Celkem proběhne sedm iterací, po kterých již algoritmus našel vhodné řešení s maximálním proudem 1977 A, který je na vedení V135 při výpadku vedení V134 (mezi uzly Pasewalk a Vierraden). Výpis kompletního řešení je v tabulce 5.11.



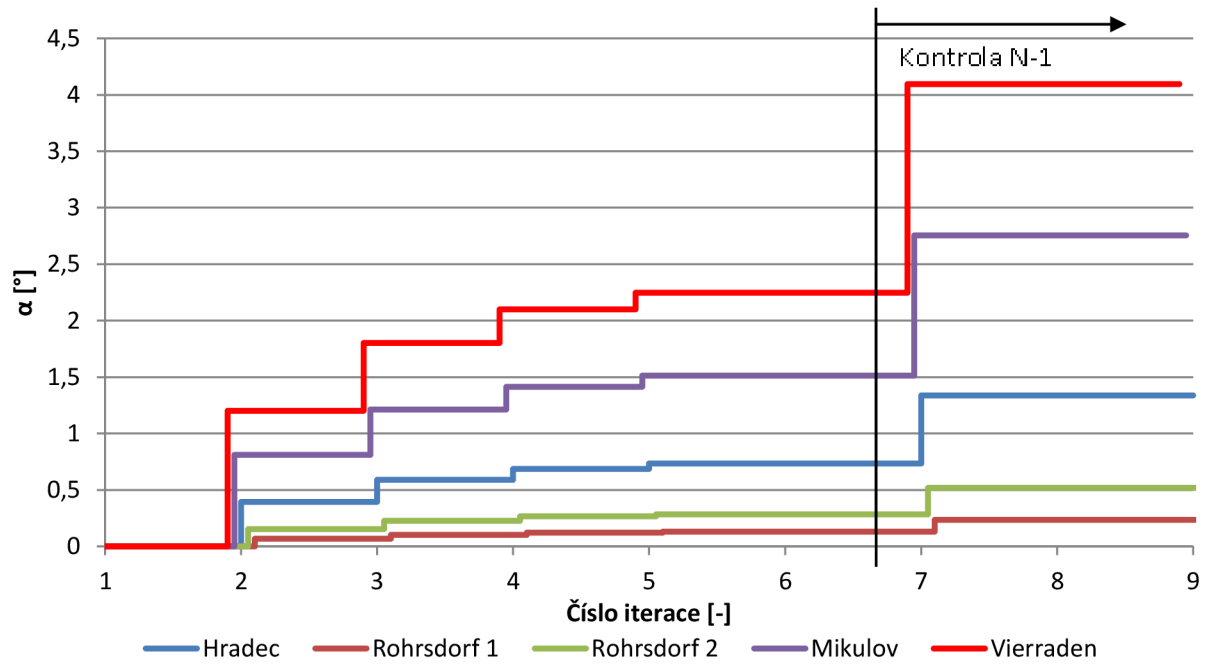
Obrázek 5.14 – Scénář 3 – Výchozí stav bez kritéria N-1 (1.iterace)

Tabulka 5.11 – Scénář 3 – Soupis výsledků

Číslo iterace	1	2	3	4	5	6	7
Max. proud [A]	1702	1644	1616	1602	1595	2123	1977
Hradec 1 [°]	0,39	0,59	0,69	0,73	0,73	1,34	1,34
Hradec 2 [°]	0,39	0,59	0,69	0,73	0,73	1,34	1,34
Rohrsdorf 1 [°]	0,07	0,10	0,12	0,13	0,13	0,24	0,24
Rohrsdorf 2 [°]	0,15	0,23	0,27	0,29	0,29	0,52	0,52
Mikulowa 1 [°]	0,81	1,21	1,41	1,51	1,51	1,51	1,51
Mikulowa 2 [°]	0,81	1,21	1,41	1,51	1,51	1,51	1,51
Vierraden 1 [°]	1,20	1,80	2,10	2,25	2,25	4,10	4,10
Vierraden 2 [°]	1,20	1,80	2,10	2,25	2,25	4,10	4,10



Obrázek 5.15 – Scénář 3 – Finální stav včetně N-1 (7. Iterace)



Obrázek 5.16 – Scénář 3 – Změna odboček v jednotlivých iteracích

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se věnuje problematice koordinace prostředků pro řízení výkonových toků v propojených soustavách. V první části práce jsou popsány důvody k využívání aktivních prvků v síti, kterými jsou kruhové toky a neplánované výměny ohromných množství výkonu na hraničních spojeních. Dále je popsána teorie k přenosu výkonu po vedeních a způsoby řízení, které využívají změnu impedance nebo změnu fázového posuvu mezi uzly. Kapitola dále pokračuje popisem principu funkce PST, který je vysvětlen na příkladu dvoujádrového symetrického transformátoru použitého v České republice. Použití PST je ilustrováno na dvou paralelních vedeních, kde dochází k přerozdělení výkonových toků. Dalším použitím je regulace toku mezi dvěma systémy, obvykle na příhraničním vedení. Důležitou částí této kapitoly je také popis jednotlivých konstrukcí PST, které se dělí na jednojádrové a dvoujádrové, a na symetrické a nesymetrické. U každého typu je schéma zapojení a fázorový diagram jako ukázka funkce daného zařízení. Na závěr kapitoly je mapa Evropy s vyznačenými PST v provozu i v přípravě.

V další kapitole je naznačeny způsoby koordinace již zpracované v jiných studiích. Jsou rozděleny do 4 podkapitol. V první a druhé části je popsána stochastická simulační metoda Monte Carlo, založená na statistickém vyhodnocení opakovaných výpočtů s náhodnými vstupními údaji a také vylepšená verze nazvaná jako Vícestupňová metoda Monte Carlo, která zvyšuje přesnost získaných výsledků. Obě metody jsou pro daný problém jen těžko použitelné z důvodu příliš dlouhého výpočetního času, který se dále prodlužuje se zvyšující se přesností simulace. Další popsanou metodou je Optimalizace hejnem částic. Metoda je inspirována chováním hejna ptáků a pomocí jednoduchého algoritmu je schopna dostatečně rychle nalézt dostatečně přesné řešení. Nicméně její nevýhodou je, že neudává žádné další informace ohledně zkoumaného systému, kromě již nalezeného řešení. Toto řešení nemusí být dokonce ani hledané optimum, neboť metoda může předčasně konvergovat v lokálním maximu prohledávané oblasti. Posledním typem je linearizace prvků v síti a následná stejnosměrná analýza. Tímto způsobem lze určit soustavu rovnic a matematickými metodami stanovit optimální výsledek bez použití iteračních metod. Metoda je ovšem založena na několika zjednodušeních a v případě velmi zatížené soustavy vzniká velká nepřesnost.

Ve čtvrté kapitole je popsána výchozí testovací soustava a jednotlivé části algoritmus. Testovací oblastí je soustava tří přenosových operátorů, těmi jsou český ČEPS, polský PSE a německý 50Hertz. Síť se skládá ze 138 uzlů a 300 vedení. Výchozí hodnoty zatížení v jednotlivých uzlech vychází z modelu kontinentální Evropy BIALEK. Průměrné měrné parametry vedení vychází z měření reálné sítě. Štítkové parametry v tabulce 4.1 jsou platné pro PST v Hradci, z důvodu neznalosti parametrů dalších transformátorů jsou použity také pro všechny ostatní uvažované PST.

Součástí čtvrté kapitoly je vývojový diagram zobrazující jednotlivé části algoritmu, tyto části jsou následně podrobněji popsány. Algoritmus vychází zejména z Newtonovy iterační metody pro řešení uzlových sítí, která je dále modifikována pro řešení rozložení činných výkonů bez uvažování změn velikosti napětí nebo jalového výkonu. Toto zjednodušení zanášá do výpočtu značnou chybu, ale z důvodu neznalosti jalových toků v řešené soustavě se jí nedá vyhnout. Výpočet tedy uvažuje ve všech uzlech konstantní napětí 400 kV a řeší pouze změny úhlu δ , jež jsou dominantní při řízení činných toků výkonu. Stejná iterační metoda je použita i pro výpočet nastavení odboček PST, kde algoritmus vychází z faktoru distribuce fázové posuvu v síti (PSDF), který vyjadřuje změnu toku vedením při změně úhlu jednoho PST. Následně je řešena soustava rovnic, která hledá vektor řešení změny úhlů tak, aby došlo k dostatečnému snížení toku výkonu

na všech přetížených vedeních. Algoritmus vždy nejprve řeší základní stav sítě (bez uvažování kritéria N-1), neboť je tak zajištěna vyšší pravděpodobnost konvergence výsledků. Hledá tedy takové hodnoty α , při kterých jsou proudy na všech vedeních menší než 1600 A. Pokud toto lze vyřešit, algoritmus pokračuje výpočtem rozložení proudu při řešení kritéria N-1, kde hledá takové nastavení, při kterém jsou všechny proudy pod limitem 2000 A. V případě, že není schopen vyřešit základní stav, dojde k úpravě limitu na maximum a znovu k přepočítávání výsledků. V případě, že nelze nalézt vyhovující řešení ani pro vyšší limit, algoritmus ukončí výpočet a vypíše přetížená vedení, kde je nutný redispečink.

V poslední kapitole jsou prezentovány výsledky výpočtů z algoritmu. Pro demonstraci jsou k dispozici tři scénáře, kde první z nich vychází beze změn z modelu BIALEK. Algoritmus je v tomto případě schopen vyřešit základní stav tak, aby zatížení bylo pod zadanou hodnotou, nicméně při řešení kritéria N-1 dojde k nárůstu úhlů nad omezující podmínku 200° , čímž dojde k přerušení algoritmu. S takovýmto stavem si samotné PST nedokáže poradit a je nutný redispečink v přetížené oblasti. Na obrázku 5.8 je graficky znázorněn vývoj nastavení odboček po jednotlivých iteracích, kde je vidět konvergence výsledků pro základní stav a následná divergence při řešení kritéria N-1.

Ve scénáři 2 byly provedeny potřebné úpravy jako redispečink scénáře 1. V této soustavě došlo k odlehčení v oblasti kolem PST Mikulowa a Vierraden, což vedlo ke zvýšení regulačního rozsahu algoritmu. Síť byla potom v základním stavu zatížena maximálně proudem 1208 A, nebylo tedy třeba měnit nastavení. Při řešení kritéria N-1 došlo k nárůstu proudu na maximum 2145 A na vedení 135(Pasewalk-Vierraden) při výpadku vedení 134(Bertikow-Vierraden). Právě toto vedení je úzkým místem v síti, což se projeví v každém scénáři. Algoritmus si s tímto drobným problémem dokázal poradit a během tří iterací vypočetl vhodné nastavení odboček (tabulka 5.10).

Scénář č. 3 simuluje poruchu v síti, kterou je v tomto případě výpadek velkého zdroje v České republice (jaderná elektrárna Dukovany). Chybějící výkon je dodáván z Německa, kde došlo k navýšení výroby na severu (rozvodny Lubmin, Bentwisch), což odpovídá přibližně lokaci větrných elektráren. Celkem došlo k nárůstu asi o 3 GW. Průběžné výsledky nastavení odboček jsou v tabulce 5.11, včetně maximálního proudu každé iterace, na obrázku 5.16 je zobrazen grafický průběh úprav algoritmem. K finálnímu výsledku došlo v 8. iteraci, kde došlo k nastavení odboček PST v rozmezí $0-5^\circ$.

Algoritmus funguje pro stavy sítě, které potřebují jemné ladění. Větší problémy je třeba řešit většinou pomocí jiných nástrojů (redispečinku). Velkým omezením této práce je rozsah testovací oblasti, neboť pro reálnou funkci by bylo třeba ji rozšířit o další oblasti (zejména zbytek Německa, Rakousko a Slovensko). V současné podobě jsou všechny hraniční profily mezi jednotlivými oblastmi obsazeny PST, a tak není žádná volná cesta, kudy by se mohly samy uzavírat kruhové toky způsobené právě těmito transformátory. Výsledkem je možnost řídit, jak se rozdělí toky výkonu mezi oblastmi, ale nelze změnit výsledný objem tohoto toku. Pro lepší funkčnost tohoto algoritmu by bylo třeba jej doplnit o algoritmus redispečinku a nejspíš by bylo vhodné zahrnout i ekonomickou stránku řízení (pro oceňování ztrát a podpůrných služeb), kde by do budoucna mohl algoritmus sloužit jako kontrolní nástroj dispečerům pro řízení soustavy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SONG, Yong-Hua. a Allan JOHNS. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. London: Institution of Electrical Engineers, 2008. IEE power and energy series, v. 30. ISBN 978-0-85296-771-3.
- [2] *Optimisation of transmission systems by use of phase shifting transformers*. S.l.: [s.n.], 2008. ISBN 9789085703068.
- [3] J. VERBOOMEN, D. VAN HERTEM, P. H. SCHAVEMAKER, W. L. KLING, AND R. BELMANS, "OPTIMAL PHASE SHIFTER COORDINATION: A MULTIDIMENSIONAL PROBLEM," IN IASTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SOFT COMPUTING (ASC) 2006, PALMA DE MALLORCA, SPAIN, AUGUST 2006, 6 PAGES
- [4] J. VERBOOMEN, D. VAN HERTEM, P. H. SCHAVEMAKER, W. L. KLING, AND R. BELMANS, "PHASE SHIFTING TRANSFORMERS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS," IN FUTURE POWER SYSTEMS (FPS) 2005, AMSTERDAM, THE NETHERLANDS, NOVEMBER 2005, 6 PAGES
- [5] J. VERBOOMEN, D. VAN HERTEM, P. H. SCHAVEMAKER, W. L. KLING, AND R. BELMANS, "THE INFLUENCE OF PHASE SHIFTING TRANSFORMERS ON TRANSIENT STABILITY," IN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC) 2005, CORK, IRELAND, SEPTEMBER 2005, 5 PAGES.
- [6] KUNDUR, P., Neal J. BALU a Mark G. LAUBY. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, c1994. ISBN 007035958X.
- [7] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, c2004. ISBN 0-8493-1704-5.
- [8] A. MARINAKIS, M. GLAVIC AND T. VAN CUTSEM, "CONTROL OF PHASE SHIFTING TRANSFORMERS BY MULTIPLE TRANSMISSION SYSTEM OPERATORS," IN 2007 IEEE LAUSANNE POWER TECH, 2007, PP. 119-124.
- [9] HELBICH, J. Využití phase-shift transformátorů v přenosových soustavách, Diplomová práce, Praha 2015, 77 stran.
- [10] C. Matke, W. Medjroubi, and D. Kleinans, SciGRID - An Open Source Reference Model for the European Transmission Network (v0.2), www.scigrid.de, 2015
- [11] 50Hertz, Static grid model – Data table, <http://www.50hertz.com/en/Grid-Access/Power-trading-and-Congestion-Management-in-Europe/Static-grid-model>, 2017
- [12] ENTSO-E, Transmission System Map, <https://www.entsoe.eu/map/Pages/no-webgl.html>
- [13] Ptáček, J. *Přednáška na téma Aktuální problémy a rozvoj elektrizačních soustav*. Brno, 2017
- [14] ENTSO-E, *PST modelling*, 2014. Dostupné z: https://www.entsoe.eu/Documents/CIM_documents/Grid_Model_CIM/ENTSOE_CGMES_v2.4.14_28May2014_PSTmodelling.pdf
- [15] ČEPS. *PST transformátory*, 2017. Dostupné z: <http://ceps.cz/cs/ke-stazeni>
- [16] Pokluda, M., ČEPS. *Phase Shifting Transformers*, Harrachov, 2013, Dostupné z: www.montazecakovice.cz/files/harrachov_2013/pst.pdf

- [17] HUTCHEON, Neil a Janusz W. BIALEK. Updated and validated power flow model of the main continental European transmission network. In: 2013 IEEE Grenoble Conference [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 1-5 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1109/PTC.2013.6652178. ISBN 978-1-4673-5669-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6652178/>
- [18] HALUZÍK, Evžen. Řízení provozu elektrizačních soustav. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987.
- [19] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. Distribuce elektrické energie [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2017 [cit. 2018-05-16].
- [20] SIMPSON-PORCO, John W. Lossy DC Power Flow. IEEE Transactions on Power Systems [online]. 2018, 33(3), 2477-2485 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2749042. ISSN 0885-8950. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8025613/>
- [21] F. M. Echavarren, E. Lobato, L. Rouco and T Flow Model with Loss Compensation [online]. Dostupné z: . Gómez, Full Active-Reactive DC Power <https://www.iit.comillas.edu/docs/IIT-16-119A.pdf> [cit. 2018-05-16].
B.Eldridge, R. P. O'Neill, A. Castillo, Marginal Loss Calculations for the DCOPF. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2017/170563r.pdf>
- [22] GLAVIC, Mevludin a Fernando L. ALVARADO. An extension of Newton–Raphson power flow problem. Applied Mathematics and Computation [online]. 2007, 186(2), 1192-1204 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1016/j.amc.2006.07.131. ISSN 00963003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0096300306010459>
- [23] YOUSSEF, R.D. Phase-shifting transformers in load flow and short-circuit analysis: modelling and control. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution [online]. 1993, 140(4), 331- [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1049/ip-c.1993.0049. ISSN 01437046. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-c.1993.0049>
- [24] K. Van den Bergh, E. Delarue, and W. D'haeseleer, DC Power Flow in Unit Commitment Models, TME Working Paper-Energy and Environment, Tech. Rep., 2014 [Online]. Dostupné z: http://www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/wpen2014-12.pdf