

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

POSOUZENÍ ROZVOJE SÍTĚ VVN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

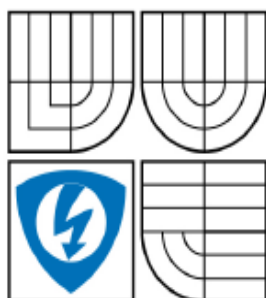
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIRÍ ČAJAN

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Čajan Jiří

ID: 77678

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Posouzení rozvoje sítě vn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. výpočet ustáleného chodu elektrické sítě,
2. kontrola zadané sítě pro stávající a budoucí zatížení,
3. návrh potřebného zesílení sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 4.6.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jiří Čajan
Bytem: Hluboš 167
Narozen/a (datum a místo): 20.06.1972 Příbram
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.,
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Posouzení rozvoje sítě vn
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.
Ústav:	Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP:	16.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů ... 1
- elektronické formě – počet exemplářů ... 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

ČAJAN, J. Posouzení rozvoje sítě vvn. Bakalářská práce. Brno:

Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 63 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci (bakalářskou práci)** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce >>. doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.<< za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Posouzení rozvoje sítí VVN

Jiří Čajan

vedoucí: doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Evaluation of development HV distribution system

by

Jiří Čajan

Supervisor: doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce bude řešit ustálený chod sítě VN a posouzení nutného posílení sítě při neustálém růstu zatížení této sítě

KLÍČOVÁ SLOVA:

Uzel sítě - je místo připojení zdrojů ,spotřebičů nebo spojení dvou popř více prvků

Referenční uzel pro uzlová napětí – je místo v síti ,ke kterému se měří napětí uzlů.Nejčastěji je jím „zem“ nebo uzemněný střední vodič trojfázové sítě

Referenční uzel pro fázory úbytků napětí – je místo v síti ,ke kterému se měří fázory úbytků napětí

Fázor úbytku napětí – je fázový rozdíl napětí v daném uzlu \bar{U}_i a napětí v referenčním uzlu pro fázory úbytků napětí \bar{U}_r : $\Delta\bar{U}_i = \bar{U}_i - \bar{U}_r$

Úbytek napětí - je rozdíl modulů fázorů napětí v daném uzlu a v referenčním uzlu pro fázory úbytků napětí $\Delta\bar{U}_i : |\bar{U}_i| - |\bar{U}_r|$

Větev – je vodivé spojení mezi uzly sítě

ABSTRACT

The Bachelor's Thesis thesis deals with steady power flow of electrical HV network and with appreciation of the system necessary development at continual load growth..

KEY WORDS:

Network node

Reference node for node voltage

Reference node for voltage drop vector

Voltage drop vector

Voltage drop

Branch

OBSAH



.....	6
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING	7
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	16
1 ÚVOD.....	17
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY-USTÁLENÉHO CHODU SÍTÍ ES.....	17
3 CÍLE PRÁCE	18
4 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ.....	18
4.1 LINEÁRNÍ METODY ŘEŠENÍ SÍTÍ.....	18
4.1.1 METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ (MUN).....	19
4.1.2 POPIS METODY UZLOVÝCH NAPĚTÍ.....	19
4.1.3 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	21
4.2 NELINEÁRNÍ METODY ŘEŠENÍ SÍTÍ – ŘEŠENÍ SÍTÍ VVN,ZVN.....	22
4.2.1 NÁHRADA PRVKŮ SÍTĚ II-ČLÁNKEM	23
4.2.2 ITERAČNÍ METODY PRO VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ.	24
4.2.3 GAUSS-SEIDLOVA METODA	24
4.2.4 NEWTONOVA METODA.....	26
5 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ZADANÉ SÍTĚ VVN	34
5.1 POPIS SOFTWARE POUŽITÉHO PRO VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ZADANÉ SÍTĚ.....	34
5.2 POUŽITÁ VÝPOČETNÍ METODA SE KTEROU PRACUJE SW BIZON	35
6 VÝPOČTOVÁ ČÁST	37
6.1 CHOD SÍTĚ S NAPÁJECÍM NAPĚTÍM $U_{NAP}=110KV$.....	37
6.1.1 STAV SÍTĚ V ROCE 0 $U_{NAP} = 110KV$	39
6.1.2 STAV SÍTĚ V ROCE 1 $U_{NAP} = 110KV$	40
6.1.3 STAV SÍTĚ V ROCE 2 $U_{NAP} = 110KV$	41

6.1.4 STAV SÍTĚ V ROCE 3 $U_{NAP} = 110KV$	42
6.1.5 STAV SÍTĚ V ROCE 4 $U_{NAP} = 110KV$	43
6.2 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ S NAPÁJECÍM NAPĚTÍM $U_{NAP}=121KV$	46
6.2.1 STAV SÍTĚ V ROCE 0 $U_{NAP} = 121KV$	46
6.2.2 STAV SÍTĚ V ROCE 1 $U_{NAP} = 121KV$	47
6.2.3 STAV SÍTĚ V ROCE 2 $U_{NAP} = 121KV$	48
6.2.4 STAV SÍTĚ V ROCE 3 $U_{NAP} = 121KV$	49
6.2.5 STAV SÍTĚ V ROCE 4 $U_{NAP} = 121KV$	50
6.2.6 STAV SÍTĚ V ROCE 5 $U_{NAP} = 121KV$	51
6.2.7 STAV SÍTĚ V ROCE 6 $U_{NAP} = 121KV$	52
6.2.8 STAV SÍTĚ V ROCE 7 $U_{NAP} = 121KV$	53
6.3 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ S NAPÁJECÍM NAPĚTÍM $U_{NAP}=99KV$	56
6.3.1 STAV SÍTĚ V ROCE 0 $U_{NAP} = 99KV$	56
6.4 PRVNÍ POSÍLENÍ SÍTĚ PŘI $U_{NAP}=121 KV$.....	58
6.5 DRUHÉ POSÍLENÍ SÍTĚ PŘI $U_{NAP}=121 KV$	59
6.6 PARAMETRY SÍTĚ PO 20 LETECH PROVOZU PŘI $U_{NAP}=121 KV$.....	61
7 ZÁVĚR.....	63
7.1 ZHODNOCENÍ VÝPOČTŮ.....	63
7.2 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	63
POUŽITÁ LITERATURA	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>obr.1. Odvození modifikované metody uzlových napětí</i>	19
<i>obr.2 Fázorový diagram proudu a napětí a napětí</i>	22
<i>obr.3 Náhrada vedení π-článkem vedení π-článkem</i>	23
<i>obr.4 Přenos s uvážením pouze podélné reaktance podélné reaktance</i>	31
<i>obr.5 Napěťové poměry při odběru výkonů v uzlu j o velikosti P, Q</i>	32
<i>obr.6 Poměry při odběru při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ a konstantním činném odběru P</i>	32
<i>obr.7 Schéma zapojení sítě</i>	37
<i>obr.8 Proudové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$</i>	43
<i>obr.9 Proudové poměry na vedení v roce 4 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$</i>	43
<i>obr.10 Napěťové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$</i>	44
<i>obr.11 Napěťové poměry na vedení v roce 4 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$</i>	44
<i>obr.12 Proudové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$</i>	53
<i>obr.13 Proudové poměry na vedení v roce 7 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$</i>	53
<i>obr.14 Napěťové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$</i>	54
<i>obr.15 Napěťové poměry na vedení v roce 7 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$</i>	54
<i>obr.16 Proudové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$</i>	56
<i>Obr.17 Schéma zapojení sítě po 20 letech a znázornění proudové zatížitelnosti</i>	62

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6 1 Zadané parametry sítě.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 6 2 Vzdálenosti vedení mezi jednotlivými uzly</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6 3 Jednotlivé odběry v uzlech</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6 4 Odběry v uzlech při 3% růstu zatížení</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6 5 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 110kV – rok 0.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6 6 Výsledné hodnoty vedení U nap = 110kV – rok 0.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6 7 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 110kV – rok 1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6 8 Výsledné hodnoty vedení U nap = 110kV – rok 1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6 9 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 110kV – rok 2.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 6 10 Výsledné hodnoty vedení U nap = 110kV – rok 2.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 6 11 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 110kV – rok 3.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6 12 Výsledné hodnoty vedení U nap = 110kV – rok 3.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6 13 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 110kV – rok 4.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6 14 Výsledné hodnoty vedení U nap = 110kV – rok 4.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6 15 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 0.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6 16 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121 kV– rok 0.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6 17 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121 kV– rok 1.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6 18 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121 kV– rok 1.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6.19 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121 kV– rok 2.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6.20 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121 kV– rok 2.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6.21 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 3.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6 22 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121kV – rok 3.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6 23 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 4.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6 24 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121kV – rok 4.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6 25 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 5.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6 26 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121kV – rok 5.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6 27 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 6.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 6 28 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121kV – rok 6.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 6 29 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 121kV – rok 7.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6 30 Výsledné hodnoty vedení U nap = 121kV – rok 7.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6 31 Výsledné hodnoty uzlu U nap = 99kV – rok 0.....</i>	<i>56</i>

<i>Tab. 6 32 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 99kV$ – rok 0.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6 33 Výsledné hodnoty v uzlech $U_{nap} = 121kV$ – po posílení sítě</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 6 34 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po posílení sítě.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6 35 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po prvním posílení sítě 14 rok</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6 36 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po druhém posílení sítě 14 rok</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 6 37 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po druhém posílení sítě 20 rok</i>	<i>62</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{I}	fázor proudu x-tého spotřebiče
$[\bar{I}]$	vektor uzlových proudů v matici
\bar{I}^*	je komplexně sdružený proud k proudu
$[J]$	matice parciálních derivací tzv. Jacobián
MSP	metoda smyčkových proudů
MUN	metoda uzlových napětí
P	činný výkon
Q	jalový výkon
\bar{S}^*	komplexní výkon
\bar{U}_i	napětí uzlů proti referenčnímu uzlu 0
$\Delta\bar{U}_i$	fázory úbytků napětí proti referenčnímu uzlu fázorů úbytků napětí
$[\bar{U}]$	vektor neznámých uzlových napětí v matici
U_{xn}	jmenovitá hodnota napětí x-tého spotřebiče
$[\bar{Y}]$	admitanční uzlová matice
$[\bar{Y}]$	příčná impedance
\bar{Z}	podélná impedance

1 ÚVOD

Správnému návrhu sítě předchází určení spotřeby elektrické energie nejen v současné době ale i výhledově. Je obecně obtížné stanovit vývoj zatížení a zpravidla se vychází ze známých statistických hodnot o spotřebě energie v dané oblasti kdy tyto hodnoty nahradíme vhodnou funkční závislostí a předpokládáme, že podle ní se bude vyvíjet zatížení v budoucnu. Nejčastěji se používá exponenciální funkce ve tvaru

$$y = a.b^x \quad [1.1]$$

jako přibližný odhad se v praxi osvědčil růst zatížení asi o 7% ročně, tedy zatížení se přibližně za 10 let zdvojnásobuje. Sítě je zapotřebí navrhovat tak dynamicky aby se v průběhu let skutečného vývoje zatížení daly dobře přizpůsobovat. V praxi se často průřezy vodičů navrhuji na zatížení očekávané přibližně v polovině života sítě

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY-USTÁLENÉHO CHODU SÍTÍ ES

Ustáleným chodem rozvodných sítí rozumíme takové provozní stavy, při kterých v zařízení neprobíhají krátkodobé přechodné děje související např.s poruchovými stavy, údery blesku do vedení nebo jeho blízkosti, připojování nebo odpojování odběrů, vedení , zdrojů opad. Ustálený stav sítě teoreticky nikdy nenastane, neboť se neustále mění počet odběrů a jejich zatížení a i se neustále mění i příkon zdrojů pracujících do soustavy. Tyto změny jsou ale relativně pomalé proto je nebudeme uvažovat. Obvykle nás zajímají rozdělení napětí a proudů v síti v mezních podmínkách ustáleného stavu tj. např. ve stavu ročního minima nebo maxima zatížení spotřebiče, spotřebitele, nebo celé sítě. Způsob výpočtu rozdělení napětí a proudů se liší podle jmenovitého napětí sítě. Při řešení vn sítí do 35 kV můžeme přistoupit k určitým zjednodušením v síti a tyto úlohy řešit jako lineární. Naopak u sítí vvn t.j.110kV, 220kV, 400kV tato zjednodušení nemůžeme použít a úlohy v těchto sítích řešíme jako nelineární některou z iteračních metod. Výpočet pomocí těchto metod bývá poměrně časově náročný a dosti často špatně konverguje nebo nekonverguje vůbec.

Znalost činných a jalových výkonů, ztrát a napěťových poměrů v jednotlivých větvích a uzlech ES je nutná nejen pro řízení provozu ale pro navrhování dalšího rozvoje ES. Hodnoty získané při výpočtu ustáleného chodu sítě se používají i při řešení přechodných jevů v ES (zkraty, statická stabilita, dynamická stabilita) a dále při optimalizaci hospodárného rozdělování výroby činných a jalových výkonů, optimalizaci regulace napětí atd. Výpočet ustáleného chodu sítě je nutno vždy doplnit kontrolním výpočtem zda nedochází v některém místě ES k přetěžování prvků ES. V praxi zadáváme odběry a dodávky pomocí činných a jalových výkonů což má za následek, že chod sítě nelze bez určitých zjednodušení popsat soustavou lineárních rovnic.

Matematický popis ustáleného chodu sítě vede k soustavě nelineárních rovnic, které se řeší některou z iteračních metod. Proto pro některé výpočty ustáleného chodu, kde není nutná velká přesnost úlohu linearizujeme. Jedná se např. o výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje ES nebo výpočet spolehlivosti ES

3 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je rozbor několika matematických metod, které se používají při řešení ustáleného chodu sítí jak vn tak i vvn a jejich využití. Dále je cílem této práce posoudit konkrétní typ sítě VVN a navrhnout v kterém roce bude nutné její posílení při 3% ročním růstu zatížení. Řešením sítí se rozumí stanovení určení proudů ve všech úsecích sítě, napětí v uzlech a ztrát výkonů v ustáleném provozním stavu.

4 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

4.1 Lineární metody řešení sítí

Za zjednodušujících předpokladů jsou k výpočtu použitelné všechny metody řešení lineárních obvodů jako je metoda smyčkových proudů, uzlových napětí, superpozice, Théveninova poučka, transfigurace. Vhodnost jakékoliv metody se posuzuje podle počtu neznámých, které se v daném obvodu - rovnici - vyskytují a podle toho jakým způsobem jsou zadány zdroje a spotřebiče obvodu.

Zjednodušující předpoklady:

- Trojfázovou síť uvažujeme souměrnou v parametrech, zdrojích i spotřebičích, což nám umožní řešit náhradní schéma pouze jedné fáze.
- Závislost proudu na napětí u všech prvků sítě máme za lineární a síť řešíme pouze pro kmitočet základní harmonické.
- Prvky sítě s homogenně rozloženými parametry nahrazujeme obvody se soustřednými parametry.
- Parametry vedení, popř. transformátorů a ostatních prvků jsou konstanty nezávislé na proudu nebo napětí.
- Odběry jsou zadány pomocí proudů nezávislých na napětí, které je na jejich svorkách. Pokud jsou zadány pomocí výkonů tak se přepočítají na nezávislé proudy pomocí jmenovitého napětí.

$$\bar{i} = \frac{\bar{S}^*}{\sqrt{3} \cdot U_{xn}} \quad (4.1)$$

\bar{i} fázor proudu x-tého spotřebiče

\bar{S}^* komplexní výkon x-tého spotřebiče

U_{xn} jmenovitá hodnota napětí x-tého spotřebiče

4.1.1 Metoda uzlových napětí (MUN)

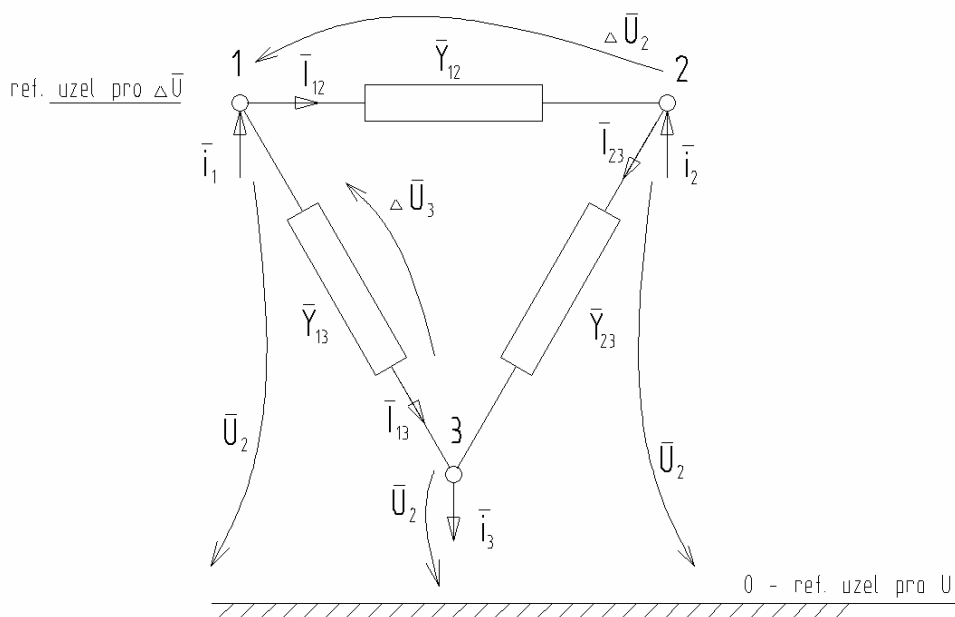
Podrobnou analýzou schémat rozvodné soustavy lze prokázat vhodnost použití této metody. Její výhodnost lze shrnout do těchto bodů.

- Schéma sítě má téměř vždy více paralelních větví takže úplný strom má menší počet větví než je počet nezávislých smyček. Uzlových napětí je proto méně než smyčkových proudů. Tato metoda má tedy méně neznámých.
- Zdroje jsou většinou zadávány jako ideální zdroje proudu a odběry pomocí proudů nebo výkonů nezávislých na napětí, což je v souladu se způsobem zadávání používaného u této metody.

Případné křížení větví schématu nekomplikuje jeho popis

4.1.2 Popis metody uzlových napětí

Vzhledem k již zmíněnému zadání odběrů a zdrojů a k zanedbání příčných admitancí prvků sítě nelze použít metodu uzlových napětí bez úprav. Tyto úpravy spočívají v tom, že neznámá uzlová napětí nahradíme fázory úbytku napětí v uzlech. K výkladu MUN použijeme následující obrázek



Obr.1. Odvození modifikované metody uzlových napětí

kde

\bar{U}_i napětí uzlů proti referenčnímu uzlu 0

$i_{i,j}$ proudy odběrů a zdrojů

\bar{I}_{ij} proudy v podélných admitancích prvků sítě

\bar{y}_{ij} podélné admitance prvků sítě

$\Delta \bar{U}_i$ fázory úbytků napětí proti referenčnímu uzlu fázorů úbytků napětí 1

$\Delta \bar{U}_1 = 0$

Proudy v podélných admitancích pomocí uzlových napětí vyjádříme takto

$$\bar{I}_{ij} = (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \bar{y}_{ij} \quad (4.2)$$

Podle 1. Kirchhofova zákona platí pro proudy uzlu 1

$$\bar{i} = (\bar{U}_1 - \bar{U}_2) \bar{y}_{12} + (\bar{U}_1 - \bar{U}_3) \bar{y}_{13} = \bar{U}_1 (\bar{y}_{12} + \bar{y}_{13}) - \bar{U}_2 \bar{y}_{12} - \bar{U}_3 \bar{y}_{13} \quad (4.3)$$

Tímto způsobem vyjádříme i zbývající dva proudy a maticově zapíšeme

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13} & -\bar{y}_{12} & -\bar{y}_{13} \\ -\bar{y}_{12} & \bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} & -\bar{y}_{23} \\ -\bar{y}_{13} & -\bar{y}_{23} & \bar{y}_{13} + \bar{y}_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

V případě sítě s n -uzly dostaneme soustavu n lineárních komplexních rovnic ve kterých jsou neznámé veličiny uzlová napětí

$$[\bar{i}] = [\bar{Y}][\bar{U}] \quad (4.5)$$

$[\bar{i}]$ vektor uzlových proudů. Kladné označení je u proudů zdrojů, záporné u spotřebičů

$[\bar{Y}]$ admitanční uzlová matice

$[\bar{U}]$ vektor neznámých uzlových napětí

Vlastnosti admitanční matice soustavy

- souměrná podle hlavní diagonály. Pro její prvky platí

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ji} \quad \text{pro } i \neq j \quad (4.6)$$

- prvky hlavní diagonály \bar{Y}_{ii} jsou kladné a jsou to součty admitancí všech větví, které v náhradním schématu vycházejí z i -tého uzlu

$$\bar{Y}_{ii} = \sum_{k=1}^m \bar{Y}_{ik} \quad (4.7)$$

kde m je počet větví, které jsou spojeny v i -tém uzlu

- mimodiagonální prvky \bar{Y}_{ij} jsou záporně uvažované admitance větví spojujících v náhradním schématu uzly i a j

- Jelikož náhradní spojení neobsahuje ani jedno vodivé spojení – větev připojenou do referenčního uzlu pro \bar{U} (0-tého uzlu), platí pro každý řádek nebo sloupec matice

$$\bar{Y}_{ii} + \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} = 0 \quad (4.8)$$

tj. součet prvků v každém řádku nebo sloupci je nula. Matice je tedy singulární – její determinant je roven nule a soustava rovnic (4.5) nemá řešení pro neznámá uzlová napětí

4.1.3 Eliminace bilančního uzlu

Odstanění poslední vlastnosti soustavy rovnic (4.5), vyjádříme uzlová napětí pomocí fázorů úbytků napětí měřených k jednomu z uzlů sítě (např. 1) a napětí tohoto uzlu (referenční uzel úbytků fázorů napětí).

$$\bar{U}_i = \bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_i \quad (4.9)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Delta\bar{U}_1 = 0$$

Tento uzel nám hradí neznáme proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnává bilanci – bilanční uzel – mezi dodávkami a odběry. Vzhledem k tomu že máme v bilančním uzlu zadáno napětí dostaneme po dosazení (4.9) do (4.4) následující rovnici

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= (\bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_1)\bar{Y}_{11} - (\bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_2)\bar{Y}_{12} - (\bar{U}_1 + \Delta\bar{U}_3)\bar{Y}_{13} = \\ &= \bar{U}_1(\bar{Y}_{11} - \bar{Y}_{12} - \bar{Y}_{13}) + \Delta\bar{U}_1\bar{Y}_{11} - \Delta\bar{U}_2\bar{Y}_{12} - \Delta\bar{U}_3\bar{Y}_{13} \end{aligned} \quad (4.10)$$

po této substituci bude mít soustava rovnic (4.5) následující tvar

$$\begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y} \\ \bar{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{U} \\ \Delta\bar{U} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Protože úbytek napětí v referenčním uzlu pro fázory úbytku napětí je roven nule ($\Delta\bar{U}_1 = 0$)

Sníží se počet neznámých v soustavě rovnic (4.11) o jednu. První rovnici tedy nemusíme uvažovat. Vypuštění rovnice pro referenční – bilanční - uzel se nazývá eliminace bilančního uzlu. Vzhledem k tomu že první člen v každé rovnici je roven nule, lze soustavu přepsat na následující tvar

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_2 \\ -\bar{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} & -\bar{y}_{23} \\ -\bar{y}_{23} & \bar{y}_{13} + \bar{y}_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_2 \\ \Delta\bar{U}_3 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

V případě sítě s n -uzly, ve které byl uzel 1 zvolen za referenční-bilanční-uzel pro fázory úbytků napětí, řeší se neznámé fázory úbytků napětí ze soustavy $n-1$ rovnic

$$\begin{bmatrix} \bar{i} \\ \bar{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y} \\ \bar{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\bar{U} \\ \Delta\bar{U} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Matice admitancí $\begin{bmatrix} \bar{Y} \\ \bar{Y} \end{bmatrix}$ má nenulový determinant, protože uzel 1 je obsažen v náhradním schématu a součet prvků této matice alespoň v jednom řádku a sloupci není nulový. Ze soustavy (4.13) lze vypočítat i úbytky napětí.

$$[\Delta \bar{U}] = [\bar{Y}]^{-1} \cdot [\bar{i}] \quad (4.14)$$

a případně při známém napětí referenčního uzlu pro fázory úbytků napětí \bar{U}_1 i uzlová napětí pomocí (4.9) a proudové rozdělení podle (4.2).

4.2 Nelineární metody řešení sítí – řešení sítí vvn,zvn

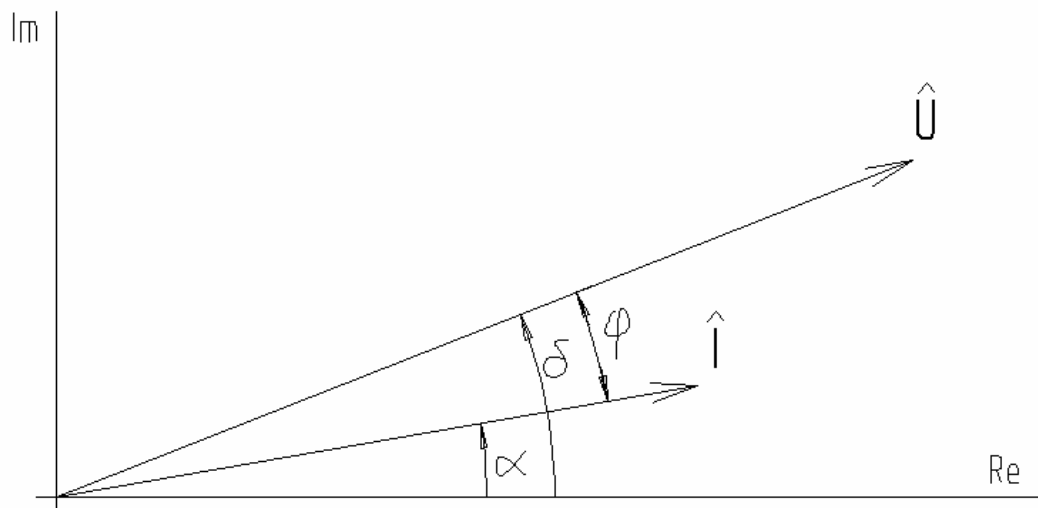
Předchozí metoda řešení sítí umožňovala řešení ustáleného stavu za zjednodušujících předpokladů postupně od uzlu k uzlu pouze u sítí ,které netvoří uzavřené smyčky. Připustíme-li náhradu každého vedení mezi uzly dvojbranem (π -článkem), pak lze řešit libovolně složité schéma pomocí soustavy výkonových rovnic. Při řešení těchto rovnic uvažujeme následující zjednodušení

- Prvky s homogenně rozloženými parametry jsou nahrazeny π -články.
- Trojfázová soustava je souměrná v parametrech prvků, ve zdrojích i spotřebičích. Řešíme proto pouze její jednofázový náhradní obvod.
- Parametry prvků sítě jsou konstanty nezávislé na napětí nebo proudu, mají lineární charakteristiku. V síti nejsou zdroje vyšších harmonických kmitočtů.
- Zdroje a odběry jsou zadány pomocí výkonů. Změna výkonu s napětím se neuvažuje.

V praxi bývají odběry a dodávky v uzlech zadávány pomocí činných a jalových výkonů takže pro i -tý uzel platí

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.15)$$

kde \bar{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \bar{I}_i . Znaménko u činného a jalového výkonu podle (4.15) vysvětluje následující obrázek



obr.2 – Fázorový diagram proudu a napětí

Fázorový diagram ukazuje výrobu činného a jalového výkonu s induktivním fázovým posunem. Z diagramu je patrné že při induktivním posunu proudu vůči napětí (proud je za napětím zpožděn) je $\varphi > 0$ a $P > 0$ a $Q > 0$.

Pro odběrový uzel uvažujeme proud záporně. To má za následek změnu znaménka u činného a jalového výkonu oproti uzlu s dodávkou. V případě, že do uzlu zdroj dodává induktivní jalový výkon nebo odběrový uzel odebírá kapacitní jalový výkon, pak znaménka jsou v obou případech stejná. Proto se v praxi často pro kompenzaci jalového induktivního výkonu používá termín „výroba jalového výkonu“ v místě spotřeby induktivního jalového výkonu.

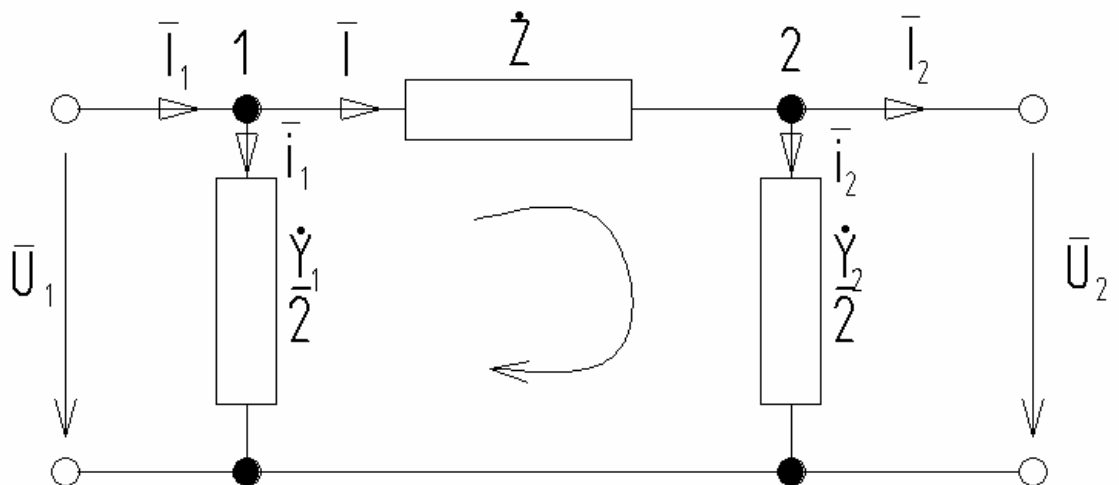
Vyjádříme-li z rovnice (4.15) proud

$$\bar{I}_i^* = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_{ij} \quad i=2,3,4,\dots,n \quad (4.16)$$

Z této rovnice vyplývá, že byla provedena eliminace bilančního uzlu a tudíž volba napětí \bar{U}_1 . Bilanční uzel v případě kdy jsou zadány uzlové výkony hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti.

4.2.1 Náhrada prvků sítě π -článkem

Π -článek je náhradní obvod který respektuje příčnou admitanci vedení v_{vn} a v_{zn} a rovnoměrné rozložení všech parametrů podél vedení. V π -článku je v podélném směru mezi vstupním a výstupní svorky připojena podélná impedance \bar{Z} a v příčném směru příčná impedance \bar{Y} (\bar{Y}_1, \bar{Y}_2). Dvojbran s takovou vnitřní strukturou spojení prvků nahrazuje vedení s homogenně rozloženými parametry v ustáleném stavu s dostatečnou přesností až do jeho celkové délky asi 400 km. Kratší vedení lze nahradit T-článkem.



Obr.3 náhrada vedení π -článkem

Při náhradě jednotlivých prvků sítě π -článkem podle obr.3, je proud tekoucí do uzlu 1 dán rovnicí

$$\bar{I}_1 = (\bar{U}_1 - \bar{U}_2)\bar{Z} + \bar{U}_1\bar{Y}_1 \quad (4.17)$$

a výkon

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \bar{U}_1\bar{I}_1^* \quad (4.18)$$

Je-li $P_1 > 0$ pak činný výkon vtéká do uzlu 1. Znaménko u jalového výkonu určuje, zda jde o výkon induktivní nebo kapacitní.

Proudy a výkony tekoucí do uzlu 2.

$$\bar{I}_2 = (\bar{U}_2 - \bar{U}_1)\bar{Z} + \bar{U}_2\bar{Y}_2 \quad (4.19)$$

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \bar{U}_2\bar{I}_2^* \quad (4.20)$$

Činné a jalové ztráty výkonu v tomto náhradním článku dostáváme algebraickým součtem výkonů tekoucích do uzlu 1, 2

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= P_1 + P_2 \\ \Delta Q_{12} &= Q_1 + Q_2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.2.2 Iterační metody pro výpočet ustáleného chodu sítě.

Iterační metody výpočtu soustavy nelineárních (lineárních) rovnic nevedou na rozdíl od přímých metod k přesnému řešení po konečném, předem daném počtu kroků. U iteračních metod volíme počáteční aproximaci řešení a určitým postupem ji v každém kroku zlepšujeme. K řešení se přibližujeme postupně a obecně ho dosáhneme až v limitě. Protože výpočet nelze provádět do nekonečna po jisté době ho ukončíme. S výpočtem skončíme obvykle tehdy, je-li norma rozdílu po sobe jdoucích aproximací dostatečně malá. Výsledkem bude přibližné řešení soustavy. Iterační metody mohou divergovat (řešení pomocí nich nemusíme najít). Zda bude metoda konvergovat, či nikoli, závisí na vlastnostech matice soustavy. Iterační metody jsou vhodné pro řešení velkých soustav s řídkou maticí koeficientu. Pro řešení malého počtu rovnic vhodné nejsou, tam lépe poslouží eliminace

4.2.3 Gauss-Seidlova metoda

Gauss-Seidelova metoda spočívá v tom, že při výpočtu další aproximace řešení použijeme vždy nejnovější přibližné hodnoty x_1, x_2, \dots, x_n , které máme k dispozici.

Řešme soustavu nelineárních (lineárních) rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ \cdot & \\ \cdot & \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned} \quad (4.23)$$

Z první rovnice vyjádříme x_1 z druhé x_2 atd. Dostaneme potom rovnice v následujícím tvaru

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3 - \dots - a_{1n}x_n) \\ x_2 &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3 - \dots - a_{2n}x_n) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x_n &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots - a_{nn-1}x_{n-1}) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Obecně iterační vztahy vypadají takto

$$\begin{aligned} x_1^{(r+1)} &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^{(r)} - a_{13}x_3^{(r)} - \dots - a_{1n}x_n^{(r)}) \\ x_2^{(r+1)} &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^{(r+1)} - a_{23}x_3^{(r)} - \dots - a_{2n}x_n^{(r)}) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x_n^{(r+1)} &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^{(r+1)} - a_{n2}x_2^{(r)} - \dots - a_{nn-1}x_{n-1}^{(r)}) \end{aligned} \quad (4.25)$$

kde horní index $(r+1)$ označuje 1, 2, ..., iteraci. Při výpočtu první iterace ($r=0$) vycházíme z nulové aproximace tj. odhadu kořenů $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Výpočet ukončíme v okamžiku kdy rozdíl

$$|x_i^{(r+1)} - x_i^{(r)}| \leq \varepsilon \quad \text{pro všechna } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.26)$$

kde ε je požadovaná přesnost výpočtu

4.2.3.1 Aplikace Gauss-Seidlovky metody při řešení ustáleného chodu sítě

Převědeme-li nyní tuto iterační metodu na řešení nelineárních rovnic (4.16), kterou upravíme do tvaru podle (4.24) takto. Výraz $\sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j$ na pravé straně rovnice (4.16) rozepíšeme na tři části čímž dostaneme

$$\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} = \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j + \bar{Y}_{ii} \bar{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j$$

odkud si vyjádříme napětí \bar{U}_i . Dostaneme tak tvar rovnic vhodný pro iterační výpočet

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \right) \quad (4.27)$$

pro $i = 1, 2, \dots, n$

Převedením (4.27) do iteračního tvaru podle (4.25) dostáváme

$$\bar{U}_i^{(r+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{(\bar{U}_i^{(r)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(r+1)} - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(r)} \right) \quad (4.28)$$

pro $i = 1, 2, \dots, n$

Výpočet ukončíme v okamžiku je-li pro všechna i splněna podmínka

$$\left| \bar{U}_i^{(r+1)} - \bar{U}_i^{(r)} \right| \leq \varepsilon \quad (4.29)$$

kde ε je požadovaná přesnost výpočtu.

Gauss-Seidlova metoda se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a potřebuje oproti jiným iteračním metodám poměrně krátkou dobu výpočtu na jeden iterační krok. Nevýhodou může být její relativně pomalá konvergence (zvláště u málo zauzlených sítí). Dále je nutno volit vysokou přesnost výpočtu (velmi malé ε), jinak se může stát, že nepřesně vypočítaná napětí způsobují značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. Tyto nevýhody do jisté míry odstraňuje Newtonova (někdy též Newton-Raphsonova) iterační metoda.

4.2.4 Newtonova metoda

Je to jedna z nejstarších metod. Newtonova metoda vyžaduje znalost první a druhé derivace zkoumané funkce. Použitím Newtonovy metody při řešení ustáleného chodu se úloha posouvá do více dimenzí. Dostáváme tak vektor nezávislých proměnných a vektor závislých proměnných, jejichž hodnota bude předem dána. Vztah mezi oběma vektory je dán pomocí výkonové bilance. Vztah mezi přírůstkem obou vektorů je pak dán Jakobihou maticí, která „linearizuje“ funkční vztahy na okolí daného bodu.

Řešme nelineární rovnice která je v následujícím tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (4.30)$$

Nejprve provedeme odhad kořenů v nulté iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhady kořenů se liší od jejich skutečných hodnot o $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$. Přesná hodnota kořenů je tedy $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}; x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}; \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}$. Původní soustavu rovnic (4.30) můžeme přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= y_2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) &= y_n \end{aligned} \quad (4.31)$$

Každou rovnici soustavy (4.31) můžeme rozepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Ukázka na první rovnici

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1 \quad (4.32)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd. a ϕ_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1^{(0)}; \Delta x_2^{(0)}; \dots; \Delta x_n^{(0)}$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 .

Jsou-li odhady kořenů blízké přesné hodnotě, jsou pak difference Δx_i malé a všechny členy s vyššími mocninami Δx_i můžeme zanedbat neboť $\phi_1 \rightarrow 0$

Označíme-li výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ pak rovnici (4.32) můžeme upravit na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (4.33)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany Δy_1 a hodnoty $\Delta y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice (4.32).

Analogicky můžeme takto upravit i zbývající rovnice soustavy (4.31) a obdržíme tak soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ a tuto soustavu můžeme zapsat maticově

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \cdot \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\text{nebo zkráceně } [J][\Delta x] = [\Delta y] \quad (4.35)$$

kde matice $[J]$ parciálních derivací je tzv. Jacobián. Ze soustavy rovnic (4.34) či (4.35) vypočítáme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme nové, opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (4.36)$$

kteří použijeme pro výpočet v další iteraci. Vzhledem k tomu, že v Taylorově rozvoji jsme uvažovali pouze první derivace nejsou hodnoty diferencí zcela přesné.

Iterační postup postupného zpřesňování kořenů soustavy rovnic (4.30) můžeme zapsat úpravou rovnic (4.35),(4.36) do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(r)}] = [J^{(r)}]^{-1} [\Delta y^{(r)}] \quad (4.37)$$

následně

$$x_i^{(r+1)} = x_i^{(r)} + \Delta x_i^r \quad (4.38)$$

kde horní index r určuje r -tou iteraci.

Předpokladem tohoto postupu je, že existují spojité derivace $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$, jednoznačnost řešení soustavy rovnic (4.34) a konvergence iteračního postupu, což v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí bývá obvykle splněno.

4.2.4.1 Aplikace Newtonovy metody při řešení ustáleného chodu sítě

Aplikujme nyní tuto iterační metodu na rovnici (4.16) popisující ustálený chod sítí. Rovnici přepíšeme do tvaru podle (4.30)

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad i=2, 3, \dots, n \quad (4.39)$$

Pravou stranu rovnice (4.39) rozepíšeme na reálnou a imaginární část. Toto můžeme provést buď zápisem fázorů napětí a komplexních admitancí ve složkovém či polárním tvaru. Zvolme polární tvar. Pak

$$\bar{U}_i = U_i \cdot \angle \delta_i; \quad \bar{U}_i^* = U_i \cdot \angle -\delta_i; \quad \bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \cdot \angle \alpha_{ij}.$$

Dosazením polárního tvaru napětí a admintace do (4.39) dostáváme po úpravě s uvážením, že $\cos(-x) = \cos x$ a $\sin(-x) = -\sin x$

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \right\} i = 2, 3, \dots, n \quad (4.40)$$

což je soustava $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Předpokládáme opět, že ve všech uzlech jsou předepsány dodávané či odebírané činné a jalové výkony kromě bilančního uzlu 1, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 (obvykle se volí $\delta_1=0$). Pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ podle schématu (4.34) a použitím rovnic (4.40) dostáváme soustavu (4.41). ΔU_i zde neznamená úbytek napětí, ale diferencii odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (4.40).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_2}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_2}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}, \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_3}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_3}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n}, \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2}, & \frac{\partial P_n}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial P_n}{\partial U_n}, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}, \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}, \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n}, \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2}, & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n}, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3}, & \dots, & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Soustavu rovnic (4.41) můžeme zkráceně zapsat pomocí matic rozdělením na pole ve tvaru

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Vypočítáme nyní prvky (parciální derivace) Jacobiánu derivováním rovnic (4.40) podle jednotlivých proměnných.

a) výpočet prvků matice $[\partial P / \partial U]$:

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.43)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.44)$$

b) výpočet prvků matice $[\partial P / \partial \delta]$:

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.45)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.46)$$

c) výpočet prvků matice $[\partial Q / \partial U]$:

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.47)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.48)$$

d) výpočet prvků matice $[\partial Q / \partial \delta]$:

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.49)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.50)$$

Algoritmus výpočtu:

- V nultém iteračním kroku $k=0$ odhadneme napětí v uzlech sítě a jejich úhly (obvykle $\bar{U}_i^{(0)} = \bar{U}_1; i = 2, 3, \dots, n$)

- Dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (4.40) vypočteme diferenci výkonů

$$\Delta P_i^{(0)} = P_{i(\text{zadané})} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})$$

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_{i(\text{zadané})} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})$$

- Dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (4.43) až (4.50) vypočítáme hodnoty Jacobiánu.

- Vyřešením soustavy lineárních rovnic (4.41) dostáváme difference $\Delta U_i^{(0)}$, $\Delta \delta_i^{(0)}$ v nulté iteraci.

- Vypočítáme opravené hodnoty napětí a jejich úhlů na konci prvního iteračního kroku

$$U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$$

$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)} \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n.$$

- Zpřesněnými napětími a jejich úhly nahradíme původními odhady jejich velikosti a opět v iteračním výpočtu postupujeme analogicky podle bodu add 2. až add 6.. Horní

index nabývá tedy postupně hodnot (0), (1), (2), podle jednotlivých iteračních kroků (k). Výpočet ukončíme až když jsou splněny nerovnice

$$\left. \begin{array}{l} |\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \\ |\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \end{array} \right\} \text{ pro všechna } i = 2, 3, \dots, n.$$

- kde ε je zvolená přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosažením vypočtených napětí a jejich úhlů do rovnic (4.40).

Newtonova metoda velmi rychle konverguje a obvykle potřebný počet iterací závisí při zadané přesnosti ε málo na velikosti řešené sítě. Nevýhodou je poměrně značný nárok na paměť počítače při výpočtu diferencí kořenů. Současně řešení soustavy rovnic (4.41) značně prodlužuje výpočtový čas potřebný na jednu iteraci.

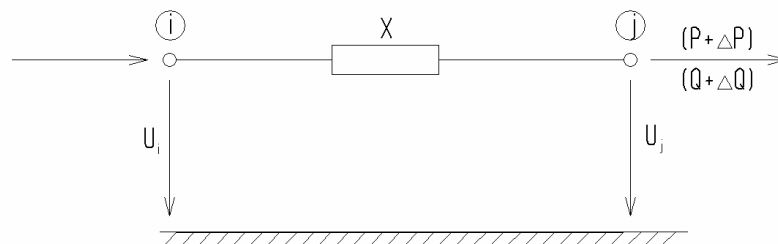
Pro méně přesné výpočty se používá následující zjednodušení. Vychází se z toho, že u sítí s převažující podélnou reaktancí vedení a transformátorů, při malých změnách absolutní velikosti napětí, se činné výkony v uzlech mění zanedbatelně jalové výkony. Pak za těchto předpokladů můžeme do rovnic (4.42) dosadit, že

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \doteq [0]; \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \doteq [0] \quad (4.51)$$

a ta přejde na zjednodušený tvar (4.52) vedoucí k urychlenému výpočtu.

$$[\Delta P] \doteq \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta]; [\Delta Q] \doteq \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot [\Delta U] \quad (4.52)$$

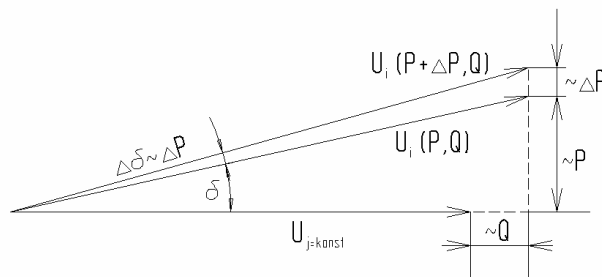
Pro názornost si ukážeme vliv změn odebíraného výkonu na změnu velikosti napětí a jeho úhlu na jednoduchém přenosu s uvážením pouze podélné reaktance podle obr.4.



obr.4 Přenos s uvážením pouze podélné reaktance

V obr.5 jsou nakresleny napěťové poměry při odběru výkonů v uzlu j o velikosti P, Q a dále při změně činného odběru v uzlu j o ΔP při stálém odebíraném výkonu Q . Vidíme, že je-li U_j udržováno na konstantní hodnotě, pak při změně činného uzlu na hodnotu $(P + \Delta P)$ se absolutní hodnota napětí v uzlu i prakticky nezmění, avšak změní se výrazně úhel mezi původním napětím o $\Delta \delta$, což je v souladu s první rovnicí (4.52) tj.

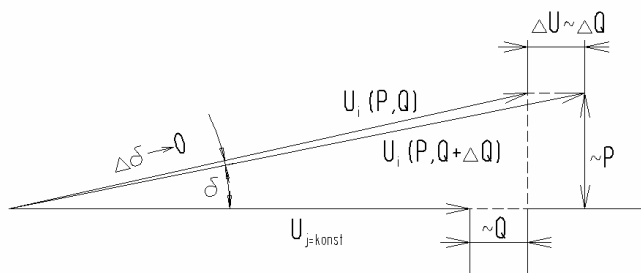
$$\Delta P \sim \Delta \delta.$$



obr.5. Napět'ové poměry při odběru výkonů v uzlu j o velikosti P, Q

V obr.6 jsou naznačeny napět'ové poměry při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ a konstantním činném odběru P . Vidíme, že změna jalového výkonu má podstatný vliv na změnu absolutní hodnoty napětí v uzlu i při $U_{j=konstantní}$ a zanedbatelný vliv na změnu úhlu, což je opět v souladu se druhou rovnicí (4.52) tj.

$$\Delta Q \sim \Delta U.$$



obr.6. Napět'ové poměry při odběru při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ a konstantním činném odběru P

4.2.4.2 Klasifikace uzlů a podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod je jednoznačně určen znalostí čtyř uzlových veličin:

- absolutní hodnoty napětí U
- úhlu napětí δ
- činným výkonem P
- jalovým výkonem Q

Z hlediska těchto čtyř veličin (U, δ, P, Q) se uzly rozlišují podle toho, které z nich jsou zadány a které jsou pomocí rovnic ustáleného chodu dopočítány. Zpravidla podle požadavků praxe dělíme uzly podle zadávaných uzlových veličin do tří tříd:

Třída (U, δ) – bilanční uzel: je to uzel ve kterém je zadáno napětí a jeho úhel. Jako neznámé jsou dopočítávány činný a jalový výkon. Tento uzel má za úkol hradit případnou nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů (součet dodávek = součet odběrů) a navíc musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti, které jsou známy až po dokončení výpočtu a určení výsledné výkonové bilance. V bilančním uzlu by měl být tudíž k dispozici zdroj výkonu.

Třída (P, Q) což jsou uzly se zadaným činným a jalovým výkonem buď dodávaným do uzlu (uzly se zdroji) nebo odebíraným v uzlu (odběrové uzly). Dodávky a odběry rozlišujeme znaménky \pm . Jako neznámé počítáme napětí a jeho úhel.

Třída (U,P) tzv. uzly regulační nebo kompenzační, což jsou uzly se zadaným činným výkonem a absolutní hodnotou napětí. Při výpočtu ustáleného chodu řešíme jaký jalový výkon musí být v tomto uzlu odebírán nebo dodáván, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí. Jako další neznámá je počítán úhel tohoto napětí.

Volby známých a neznámých veličin U , δ , P , Q , které charakterizují uzel nemůže být libovolné. Je nutné dodržet zásadu, že chod sítě nemůže být přeurčen ani neurčitý. Při praktických výpočtech vesměs vystačíme s volbou základních tří kombinací (tříd uzlů) jak bylo uvedeno výše tj.

- jeden bilanční uzel (U , δ)
- k uzlů (P , Q)
- $(n-k-1)$ uzlů (U , P)

neboť k řešení máme k dispozici $2(n-1)$ rovnic popisujících ustálený chod.

Rychlost konvergence zvolené iterační metody závisí na konfiguraci sítě a volbě bilančního uzlu, kde by měl být k dispozici zdroj, který nahradí výkonové ztráty v síti a případnou nerovnováhu v bilanci dodávek a odběrů. Dále též závisí na počtu a umístění uzlů třídy (P , Q) a (U , P). Výpočty ukazují, že bilanční uzel je vhodné volit v „elektrickém středu“ sítě. Tomu vyhovuje obvykle uzel mající největší vlastní admitanci – největší diagonální prvek v admitantní uzlové matici. Ne vždy je v tomto uzlu k dispozici „volný“ generátor. Je možné volit generátor na krytí ztrát i v jiném uzlu než ve kterém volíme pevné – zadané napětí a úhel. V tomto případě je nutno rozšířit uvedenou základní klasifikaci uzlů a blíže specifikovat podmínky určitosti chodu sítě. Dále můžeme krytí ztrát v síti rozdělit určitým dílem na všechny generátory pracující v soustavě. To však komplikuje matematické řešení úlohy a proto budeme uvažovat, že síť obsahuje pouze uzly základních tříd (U , δ), (P , Q) a (U , P).

5 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ZADANÉ SÍTĚ VVN

5.1 Popis softwaru použitého pro výpočet ustáleného chodu zadané sítě

K výpočtu ustáleného chodu sítě jsem použil software „Bizon V 4.3 od fi.Diasy. Je to programový systém pro výpočty režimů elektroenergetických sítí. Je určen především pro podporu projektování rozvodných sítí všech napěťových úrovní (nn, vn a vvn). Obsahuje podporu pro výpočty nastavení ochran a jištění pojistkami a jističi. Velkou výhodou produktu je schopnost spolupráce s GIS a CAD systémy. Produkt Bizon Projektant má, jako jednu z volitelných vlastností, možnost využívat obrazový materiál připravený v GIS nebo CAD. Předpokladem je existence grafického souboru ve formátech DGN, DXF, SHP, nebo CIT. Je rovněž možné použití souboru obrázku ve tvaru BMP jako podkladové vrstvy pro kreslení. Po definování měřítko lze i takto využívat schopnosti odečtu délek vedení a kabelů z obrázku

- snadné vytváření a modifikace schématu sítě přímo v obrázku v objektivě orientovaném grafickém prostředí s automatickou tvorbou i údržbou dat a obrázků (prostředky pro vytváření, údržbu či modifikaci provozních parametrů el. sítě a jejich mezí); databáze se vytváří současně s tvorbou obrázků; nakreslené schéma je okamžitě použitelné pro výpočty
- snadné napojení na reálná data ze systémů PAS DAISY Off-Line, PAS DAISY On-Line a systémy SCADA , případně z jiných zdrojů
- okamžité vyhodnocení a zobrazení topologie (probarvování komponent sítě podle příslušnosti ke zdroji)
- volitelný modul rozpočet odběrů po kmenových linkách a možnost přiřazovat uzlům odběrová místa (koncoví spotřebitelé, funkce pro vn a nn); v rozpočtech mohou být využity různé informace dostupné např. v rámci dat, předaných z rozvodných energetických podniků
- možnost definic vedení typu T a jejich využití při všech výpočtech
- plnohodnotné výpočetní modely trojvinutových transformátorů a souběžných vedení
- analýza ustáleného chodu elektrické sítě s využitím plného matematického modelu s kontrolou přetížení linek
- volitelná funkce výpočet symetrických, nesymetrických nebo vícenásobných poruch (zkratů, přerušení fází) včetně údajů pro nastavení ochran, možnost výpočtu při definici vícenásobných zkratů, průběhy zkratů na linkách
- ověření důsledků zamýšlených změn v síti (zatížení linek a transformátorů, úroveň ztrát...)
- trendování odběrů s možností kategorizace trendů po oblastech
- zobrazení výsledků ve schématech sítě a v tabulkových sestavách
- probarvování obrázků sítě podle topologie, zatížení vedení nebo kabelů (v absolutních i v procentních hodnotách), rozložení napětí v síti, typu vedení,

ztrát, zkratových poměrů, kvality hodnot, relativního proudu, zabezpečení; je možné doplnit další typy probarvování dle potřeb zákazníka

- tisk výsledků (přímo z obrázků) na laserových a barevných tryskových tiskárnách v tabulkovém i grafickém tvaru; při tisku jsou zachovány všechny možnosti probarvení sítě. Pro dokumentaci rozsáhlých schémat je možné s výhodou použít barevných inkoustových plotrů
- schopnost mít v jednom okamžiku rozpracovaných několik nezávislých sítí nebo jejich variant (tzv. studií), jednoduché přepínání mezi nimi
- možnost porovnání výsledků různých variant výpočtů se zvýrazněním odchylek a možností třídění podle absolutních i relativních rozdílů
- do systému mohou být doplněny další funkce podle potřeb konkrétního zákazníka, mohou být vyvinuty naší firmou na zakázku nebo lze integrovat funkce jiného dodavatele
- kontextový uživatelský pohled na data — pro každou napěťovou úroveň může být nastavena různá konfigurace uživatelského rozhraní: pohled na data (názvy datových objektů, množina viditelných a měnitelných dat,...)
- všechny obrazové informace jsou ukládány v reálných souřadnicích (milimetrech), což umožňuje mimo jiné zakreslování pomocí podkladových map, odečítání délek z obrázku, zobrazování a tisk ve zvoleném měřítku atd.
- produkt jako volitelnou vlastnost umožňuje práci s mapovým materiálem obdobným způsobem jako systémy GIS: spolupracuje s katalogem map a umí využít jak rastrové, tak vektorové formáty elektronických map
- volitelně může být součástí produktu i modul výpočtu ztrát pro vykazování podle vyhl. MPO 153/2001

5.2 Použitá výpočetní metoda se kterou pracuje SW Bizon

Výpočet v programu Bizon probíhá modifikovanou Newton-Raphson, čím je zaručena rychlá a spolehlivá konvergence výpočtu. Podrobný teoretický popis této metody byl proveden v kapitole 4 oddíl 4.2.4.

Základním pojmem pro výpočet je uzel. Za uzel je považován buď základní samostatně pracující úsek sběrnice, nebo několik takových úseků navzájem spojených spínači sběren. Uzly se dělí na dvě základní skupiny a to na uzly odběrové a napájecí. Odběrový uzel obsahuje vždy odběry činného a jalového výkonu, napětí v odběrovém uzlu (modul i fáze) je závislé na daném stavu sítě. Napájecí uzel může obsahovat kromě odběru i zdroj výkonu. Pokud v napájecím uzlu požadujeme regulaci na konstantní napětí a postačuje v něm možná dodávka jaloviny, je v něm udržován konstantní modul napětí, fáze napětí je opět závislá na stavu sítě a dodávka jaloviny je

proměnná. Pokud v napájecím uzlu není požadováno udržování zadaného napětí nebo v něm nepostačuje přípustná dodávka jaloviny, chová se jako uzel odběrový

Vztažný uzel je napájecí uzel, zvolený jako referenční pro celý výpočet. V každé řešené uzlové soustavě musí být zvolen jeden vztažný uzel. Pokud je v uzlové soustavě několik napájecích uzlů, program volí za vztažný uzel ten který má nejvyšší jmenovité napětí nebo největší možný rozsah regulace jalového výkonu. Ve vztažném uzlu je vždy udržováno konstantní napětí, jeho modul je zadán před začátkem výpočtu a jeho fáze se vždy dosadí nulová. Vzhledem k fyzikálnímu významu tohoto uzlu (vyrovnává činnou i jalovou bilanci uzlové soustavy včetně ztrát), je činná i jalová dodávka v tomto uzlu vždy dopočtena tak, aby obě bilance byly vyrovnány. Z toho vyplývá, že činná ani jalová dodávka ve vztažném uzlu nejsou pro výpočet vstupními konstantami a jejich hodnoty se výpočtem vždy změní. Pro výpočet sítě 22 kV je vztažným uzlem obvykle sekundární uzel napájecího transformátoru 110/22 kV.

Výpočetní metoda nemá žádné další aproximace, požadovaná přesnost výpočtu je zadatelná. Výpočet používá pro výpočty dvojitou přesnost, takže lze běžně dosáhnout přesnost 0,01 kW. Pro jalový výkon je vhodné volit zhruba třikrát větší než pro činný

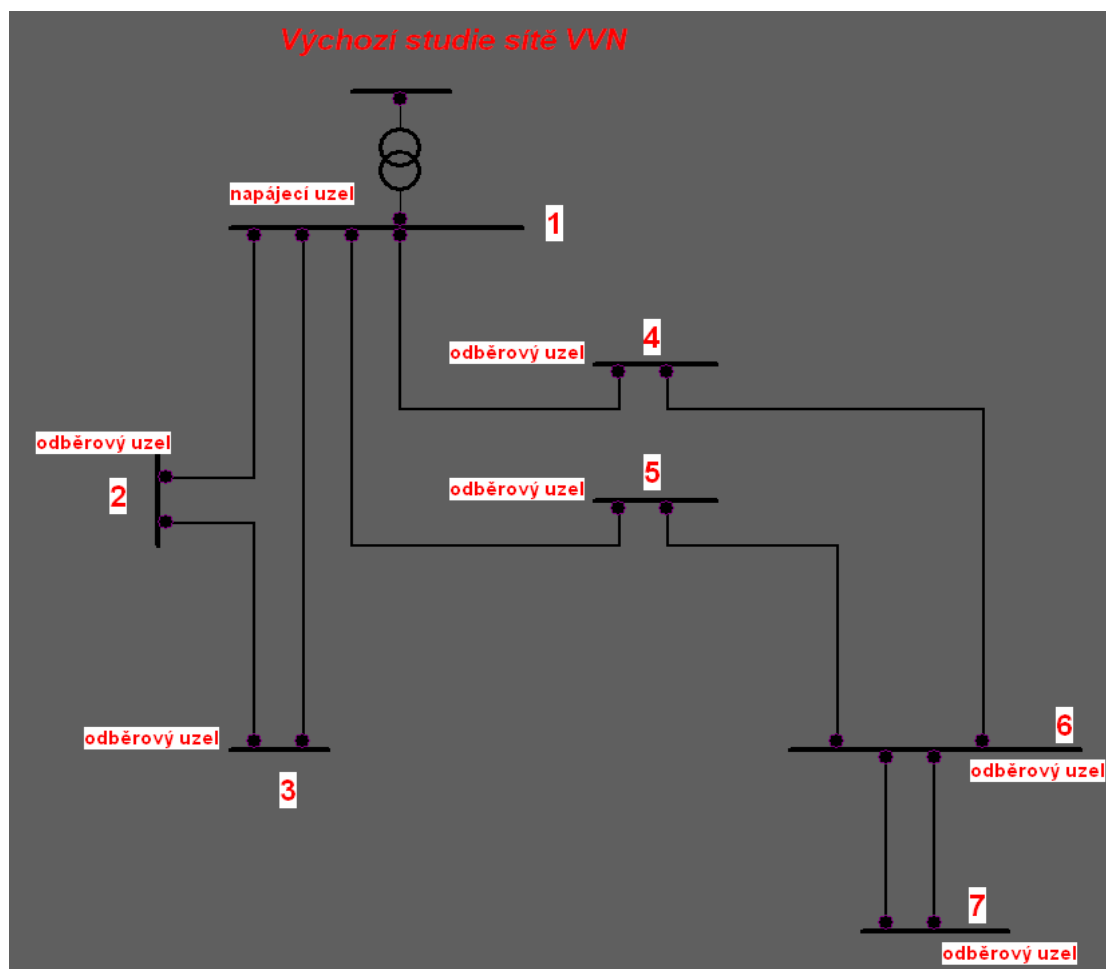
6 VÝPOČTOVÁ ČÁST

6.1 Chod sítě s napájecím napětím $U_{\text{nap}}=110\text{kV}$

Jedná se o síť s jmenovitým napětím $U_n=110\text{kV}$ (dovolená tolerance $90\div 110\%$ U_n). Maximální proudové zatížení sítě je $I_{\text{max}}=486\text{A}$ a dovolené proudové zatížení je $I_{\text{dov}}=80\%I_{\text{max}}=389\text{A}$. Tato síť má jeden napájecí uzel a 6 odběrových uzlů s různým zatížením činného i jalového výkonu. Vedení má mezi jednotlivými uzly různou délku ale vedení je jednotného průřezu $s=185\text{ mm}^2$. U této sítě dochází k ročnímu růstu zatížení ve výši 3%.

Tab. 6-1 Zadané parametry sítě

U_n [kV]	I_{max} [A]	I_{dov} [A]	S [mm^2]	R_k [Ω/km]	X_k [Ω/km]	B_k [$\mu\text{S}/\text{km}$]	G_k
110kV	486A	389A	185 mm^2	0,156	0,4 Ω/km	$2,5\mu\text{S}/\text{km}$	0



Obr.7 Schéma zapojení sítě

Tab. 6-2 Vzdálenosti vedení mezi jednotlivými uzly

Vedení	1-2	2-3	1-3	1-4	1-5	4-6	5-6	6-7	6-7
l [km]	26	20	50	26	6	2	27	7	7

Tab. 6-3 Jednotlivé odběry v uzlech

Číslo uzlu	2	3	4	5	6	7
P [MW]	38,00	30,30	20,60	25,50	25,50	45,30
Q [MVar]	3,00	5,20	5,10	6,00	8,00	10,10

Tab. 6-4 Jednotlivé odběry v uzlech období 10 let při 3% růstu zatížení

	číslo uzlu	2	3	4	5	6	7
rok	odběr						
1	P [MW]	38,00	30,30	20,60	25,50	25,50	45,30
	Q [MVar]	3,00	5,20	5,10	6,00	8,00	10,10
2	P [MW]	39,14	31,21	21,22	26,27	26,27	46,66
	Q [MVar]	3,09	5,36	5,25	6,18	8,24	10,40
3	P [MW]	40,31	32,15	21,85	27,05	27,05	48,06
	Q [MVar]	3,18	5,52	5,41	6,37	8,49	10,72
4	P [MW]	41,52	33,11	22,51	27,86	27,86	49,50
	Q [MVar]	3,28	5,68	5,57	6,56	8,74	11,04
5	P [MW]	42,77	34,10	23,19	28,70	28,70	50,99
	Q [MVar]	3,38	5,85	5,74	6,75	9,00	11,37
6	P [MW]	44,05	35,13	23,88	29,56	29,56	52,52
	Q [MVar]	3,48	6,03	5,91	6,96	9,27	11,71
7	P [MW]	45,37	36,18	24,60	30,45	30,45	54,09
	Q [MVar]	3,58	6,21	6,09	7,16	9,55	12,06
8	P [MW]	46,74	37,27	25,34	31,36	31,36	55,71
	Q [MVar]	3,69	6,40	6,27	7,38	9,84	12,42
9	P [MW]	48,14	38,38	26,10	32,30	32,30	57,38
	Q [MVar]	3,80	6,59	6,46	7,60	10,13	12,79
10	P [MW]	49,58	39,53	26,88	33,27	33,27	59,11
	Q [MVar]	3,91	6,78	6,65	7,83	10,44	13,18

V následujících výpočtech jsem vycházel z napětí napájecího uzlu o jmenovité hodnotě tj.

$$U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$$

6.1.1 Stav sítě v roce 0 $U_{\text{nap}} = 110\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v roce 0

Tab. 6-5 Výsledné hodnoty uzlu – rok 0

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	108.314	-5.935	0.0	38.0
		0.985		0.0	3.0
odběrový uzel č.3	110.0	108.035	-6.124	0.0	30.3
		0.982		0.0	5.2
odběrový uzel č.4	110.0	107.057	-6.234	0.0	20.6
		0.973		0.0	5.1
odběrový uzel č.5	110.0	109.503	-4.525	0.0	25.5
		0.995		0.0	6.0
odběrový uzel č.6	110.0	106.900	-6.347	0.0	25.5
		0.972		0.0	8.0
odběrový uzel č.7	110.0	106.528	-6.634	0.0	45.3
		0.968		0.0	10.1
napajecí uzel 110kV	110.0	110.446	-3.871	0.0	0.0
		1.004		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	189.0	0.0
		1.025	1.025	66.7	0.0

Tab. 6-6 Výsledné hodnoty vedení – rok 0

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	108.314	-6	-5.5	-1.2	30	0.01	6
	odběrový uzel č.3	108.035	-6	5.5	1.9	31	0.67	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	110.446	-4	-65.3	-17.2	353	0.37	73
	odběrový uzel č.5	109.503	-5	64.9	16.5	353	0.21	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	110.446	-4	-53.7	-14.8	291	1.08	61
	odběrový uzel č.4	107.057	-6	52.6	13.0	292	0.88	
5 - 6	odběrový uzel č.5	109.503	-5	-39.4	-10.5	215	0.62	45
	odběrový uzel č.6	106.900	-6	38.8	10.0	216	0.91	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.900	-6	-22.7	-5.0	125	0.05	26
	odběrový uzel č.7	106.528	-7	22.6	5.1	126	0.23	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.900	-6	-22.7	-5.0	125	0.05	26
	odběrový uzel č.7	106.528	-7	22.6	5.1	126	0.23	
4 - 6	odběrový uzel č.4	107.057	-6	-32.0	-8.0	178	0.03	37
	odběrový uzel č.6	106.900	-6	32.0	8.0	178	0.07	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	110.446	-4	-25.2	-2.7	132	0.43	28
	odběrový uzel č.3	108.035	-6	24.8	3.3	134	1.71	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	110.446	-4	-44.2	-5.0	232	0.69	48
	odběrový uzel č.2	108.314	-6	43.5	4.2	233	0.89	

6.1.2 Stav sítě v roce 1 $U_{\text{nap}} = 110\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v roce 1

Tab. 6-7 Výsledné hodnoty uzlu – rok 1

. uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	108.150	-6.123	0.0	39.1
		0.983		0.0	3.1
odběrový uzel č.3	110.0	107.861	-6.318	0.0	31.2
		0.981		0.0	5.4
odběrový uzel č.4	110.0	106.853	-6.433	0.0	21.2
		0.971		0.0	5.3
odběrový uzel č.5	110.0	109.381	-4.667	0.0	26.3
		0.994		0.0	6.2
odběrový uzel č.6	110.0	106.691	-6.550	0.0	26.3
		0.970		0.0	8.2
odběrový uzel č.7	110.0	106.307	-6.846	0.0	46.7
		0.966		0.0	10.4
napajecí uzel 110kV	110.0	110.356	-3.993	0.0	0.0
		1.003		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	194.8	0.0
		1.025		69.2	0.0

Tab. 6-8 Výsledné hodnoty vedení – rok 1

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	108.150	-6	-5.7	-1.3	31	0.01	7
	odběrový uzel č.3	107.861	-6	5.7	1.9	32	0.67	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	110.356	-4	-67.3	-17.8	364	0.39	75
	odběrový uzel č.5	109.381	-5	66.9	17.1	365	0.21	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	110.356	-4	-55.4	-15.4	301	1.15	62
	odběrový uzel č.4	106.853	-6	54.2	13.5	302	0.88	
5 - 6	odběrový uzel č.5	109.381	-5	-40.6	-10.9	222	0.66	46
	odběrový uzel č.6	106.691	-7	40.0	10.3	223	0.90	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.691	-7	-23.4	-5.1	129	0.06	27
	odběrový uzel č.7	106.307	-7	23.3	5.2	130	0.23	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.691	-7	-23.4	-5.1	129	0.06	27
	odběrový uzel č.7	106.307	-7	23.3	5.2	130	0.23	
4 - 6	odběrový uzel č.4	106.853	-6	-33.0	-8.2	184	0.03	38
	odběrový uzel č.6	106.691	-7	33.0	8.2	184	0.07	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	110.356	-4	-26.0	-2.8	137	0.46	29
	odběrový uzel č.3	107.861	-6	25.5	3.4	138	1.71	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	110.356	-4	-45.5	-5.3	240	0.73	50
	odběrový uzel č.2	108.150	-6	44.8	4.4	240	0.89	

6.1.3 Stav sítě v roce 2 $U_{\text{nap}} = 110\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve druhém roce

Tab. 6-9 Výsledné hodnoty uzlu – rok 2

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	107.980	-6.317	0.0	40.3
		0.982		0.0	3.2
odběrový uzel č.3	110.0	107.681	-6.518	0.0	32.2
		0.979		0.0	5.5
odběrový uzel č.4	110.0	106.639	-6.637	0.0	21.9
		0.969		0.0	5.4
odběrový uzel č.5	110.0	109.254	-4.814	0.0	27.0
		0.993		0.0	6.4
odběrový uzel č.6	110.0	106.472	-6.758	0.0	27.0
		0.968		0.0	8.5
odběrový uzel č.7	110.0	106.076	-7.064	0.0	48.1
		0.964		0.0	10.7
napajecí uzel 110kV	110.0	110.261	-4.119	0.0	0.0
		1.002		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	200.7	0.0
	1.025	1.025		71.9	0.0

Tab. 6-10 Výsledné hodnoty vedení – rok 2

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	107.980	-6	-5.9	-1.3	32	0.01	7
	odběrový uzel č.3	107.681	-7	5.8	2.0	33	0.67	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	110.261	-4	-69.3	-18.5	376	0.41	78
	odběrový uzel č.5	109.254	-5	68.9	17.7	376	0.21	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	110.261	-4	-57.1	-16.0	310	1.23	64
	odběrový uzel č.4	106.639	-7	55.8	13.9	311	0.88	
5 - 6	odběrový uzel č.5	109.254	-5	-41.9	-11.4	229	0.70	48
	odběrový uzel č.6	106.472	-7	41.2	10.6	231	0.90	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.472	-7	-24.0	-5.3	134	0.06	28
	odběrový uzel č.7	106.076	-7	24.0	5.4	134	0.23	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.472	-7	-24.0	-5.3	134	0.06	28
	odběrový uzel č.7	106.076	-7	24.0	5.4	134	0.23	
4 - 6	odběrový uzel č.4	106.639	-7	-34.0	-8.5	190	0.04	39
	odběrový uzel č.6	106.472	-7	34.0	8.5	190	0.07	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	110.261	-4	-26.8	-3.0	141	0.49	29
	odběrový uzel č.3	107.681	-7	26.3	3.5	142	1.70	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	110.261	-4	-46.9	-5.5	247	0.78	51
	odběrový uzel č.2	107.980	-6	46.1	4.5	248	0.89	

6.1.4 Stav sítě v roce 3 $U_{\text{nap}} = 110\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve třetím roce

Tab. 6-11 Výsledné hodnoty uzlu – rok 3

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	107.803	-6.518	0.0	41.5
		0.980		0.0	3.3
odběrový uzel č.3	110.0	107.494	-6.725	0.0	33.1
		0.977		0.0	5.7
odběrový uzel č.4	110.0	106.418	-6.849	0.0	22.5
		0.967		0.0	5.6
odběrový uzel č.5	110.0	109.122	-4.966	0.0	27.9
		0.992		0.0	6.6
odběrový uzel č.6	110.0	106.246	-6.975	0.0	27.9
		0.966		0.0	8.7
odběrový uzel č.7	110.0	105.837	-7.291	0.0	49.5
		0.962		0.0	11.0
napajecí uzel 110kV	110.0	110.163	-4.248	0.0	0.0
		1.001		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	206.9	0.0
		1.025	1.025	74.7	0.0

Tab. 6-12 Výsledné hodnoty vedení – rok 3

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	107.803	-7	-6.0	-1.4	33	0.01	7
	odběrový uzel č.3	107.494	-7	6.0	2.0	34	0.66	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	110.163	-4	-71.5	-19.2	388	0.44	80
	odběrový uzel č.5	109.122	-5	71.0	18.4	388	0.21	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	110.163	-4	-58.8	-16.6	320	1.31	67
	odběrový uzel č.4	106.418	-7	57.5	14.3	321	0.87	
5 - 6	odběrový uzel č.5	109.122	-5	-43.2	-11.8	237	0.74	49
	odběrový uzel č.6	106.246	-7	42.4	10.9	238	0.90	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.246	-7	-24.8	-5.5	138	0.07	29
	odběrový uzel č.7	105.837	-7	24.7	5.5	138	0.23	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.246	-7	-24.8	-5.5	138	0.07	29
	odběrový uzel č.7	105.837	-7	24.7	5.5	138	0.23	
4 - 6	odběrový uzel č.4	106.418	-7	-35.0	-8.8	196	0.04	41
	odběrový uzel č.6	106.246	-7	35.0	8.7	196	0.06	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	110.163	-4	-27.6	-3.2	145	0.52	30
	odběrový uzel č.3	107.494	-7	27.1	3.6	147	1.70	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	110.163	-4	-48.3	-5.8	255	0.83	53
	odběrový uzel č.2	107.803	-7	47.5	4.7	256	0.88	

6.1.5 Stav sítě v roce 4 $U_{\text{nap}} = 110\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve čtvrtém roce

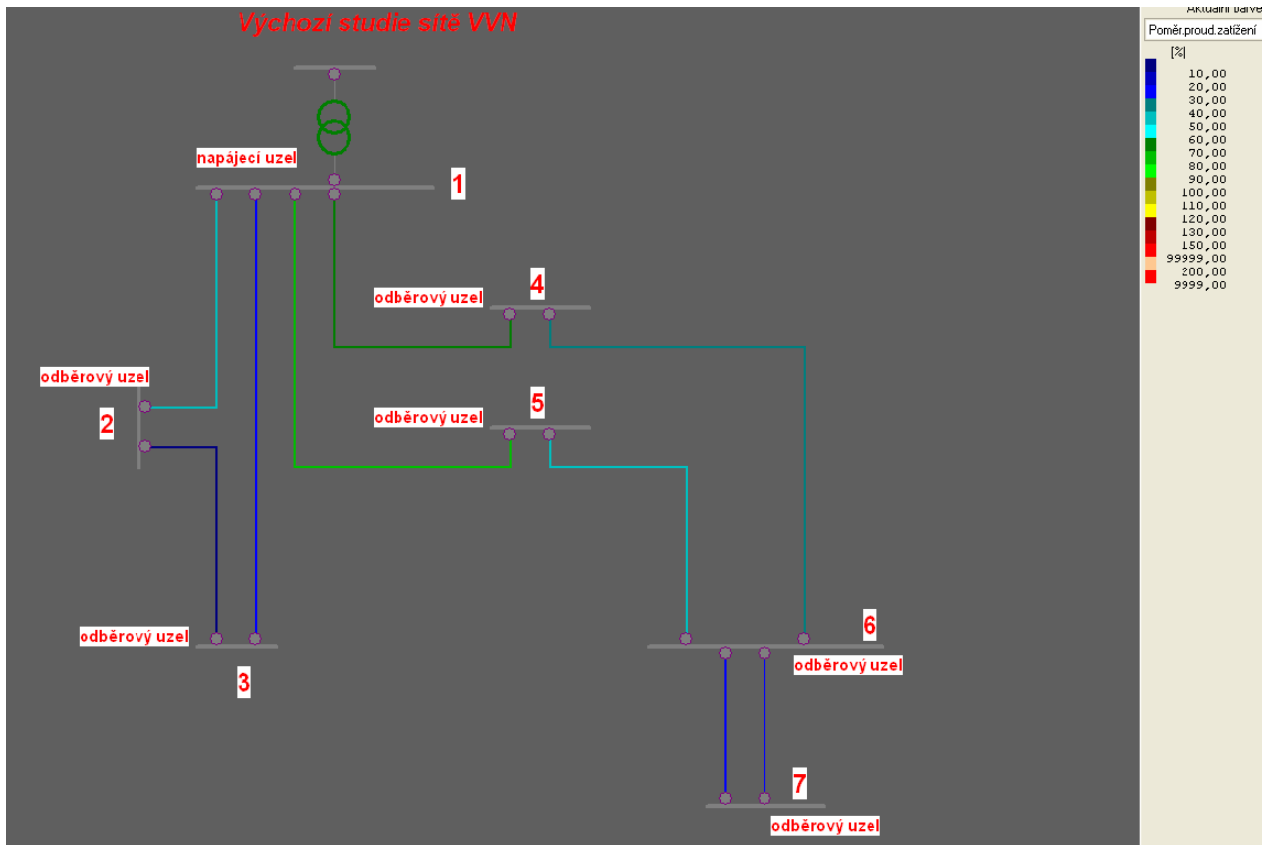
Tab. 6-13 Výsledné hodnoty uzlu – rok 4

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	107.618	-6.726	0.0	42.8
		0.978		0.0	3.4
odběrový uzel č.3	110.0	107.298	-6.940	0.0	34.1
		0.975		0.0	5.8
odběrový uzel č.4	110.0	106.188	-7.070	0.0	23.2
		0.965		0.0	5.7
odběrový uzel č.5	110.0	108.983	-5.124	0.0	28.7
		0.991		0.0	6.8
odběrový uzel č.6	110.0	106.010	-7.200	0.0	28.7
		0.964		0.0	9.0
odběrový uzel č.7	110.0	105.587	-7.527	0.0	51.0
		0.960		0.0	11.4
napajecí uzel 110kV	110.0	110.060	-4.383	0.0	0.0
		1.001		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	213.3	0.0
	1.025	1.025		77.6	0.0

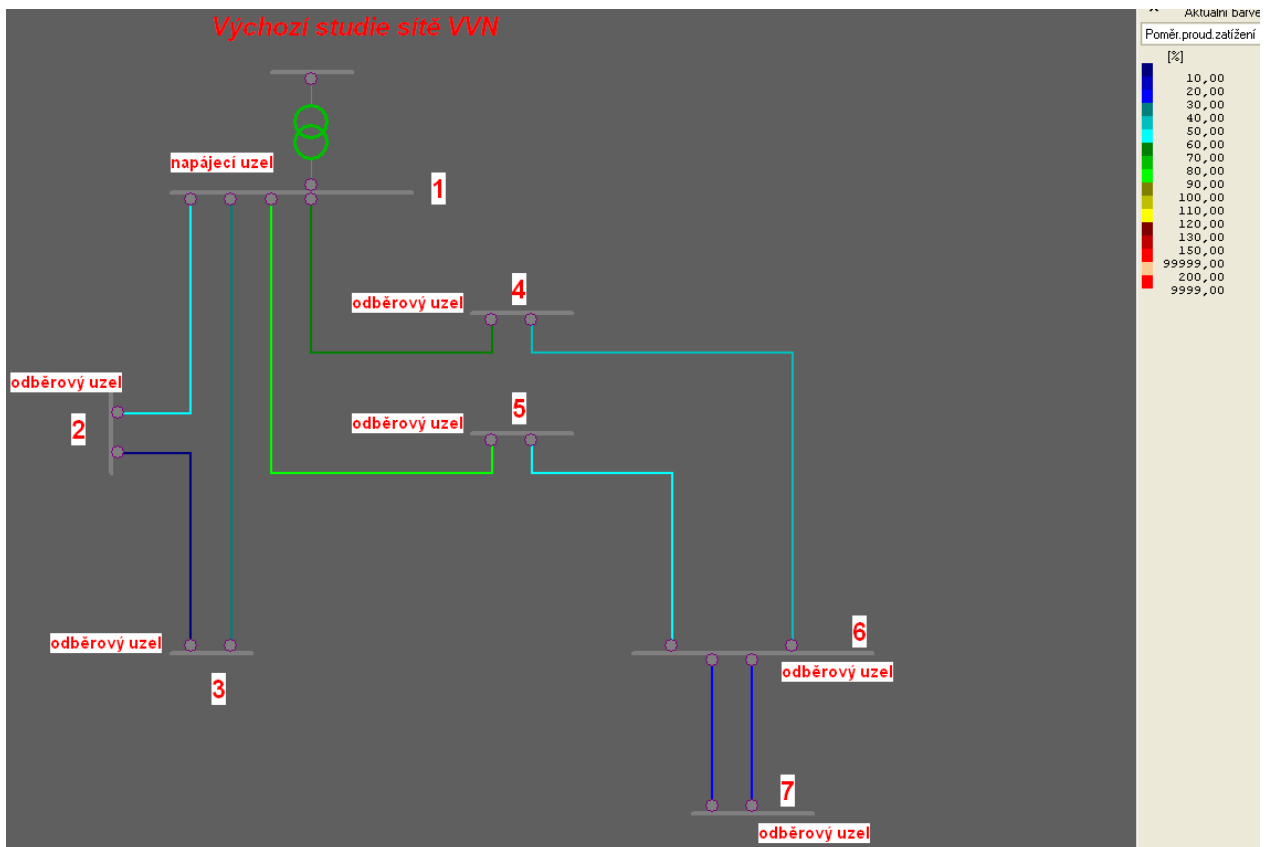
Tab. 6-14 Výsledné hodnoty vedení – rok 4

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	107.618	-7	-6.2	-1.5	34	0.01	7
	odběrový uzel č.3	107.298	-7	6.2	2.1	35	0.66	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	110.060	-4	-73.7	-19.9	400	0.47	83
	odběrový uzel č.5	108.983	-5	73.2	19.0	401	0.21	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	110.060	-4	-60.6	-17.3	331	1.40	69
	odběrový uzel č.4	106.188	-7	59.2	14.8	332	0.87	
5 - 6	odběrový uzel č.5	108.983	-5	-44.5	-12.3	244	0.79	51
	odběrový uzel č.6	106.010	-7	43.7	11.2	246	0.89	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.010	-7	-25.5	-5.6	142	0.07	30
	odběrový uzel č.7	105.587	-8	25.4	5.7	143	0.22	
6 - 7	odběrový uzel č.6	106.010	-7	-25.5	-5.6	142	0.07	30
	odběrový uzel č.7	105.587	-8	25.4	5.7	143	0.22	
4 - 6	odběrový uzel č.4	106.188	-7	-36.0	-9.0	202	0.04	42
	odběrový uzel č.6	106.010	-7	36.0	9.0	202	0.06	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	110.060	-4	-28.4	-3.4	150	0.56	31
	odběrový uzel č.3	107.298	-7	27.9	3.7	151	1.69	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	110.060	-4	-49.8	-6.1	263	0.88	55
	odběrový uzel č.2	107.618	-7	48.9	4.9	264	0.88	

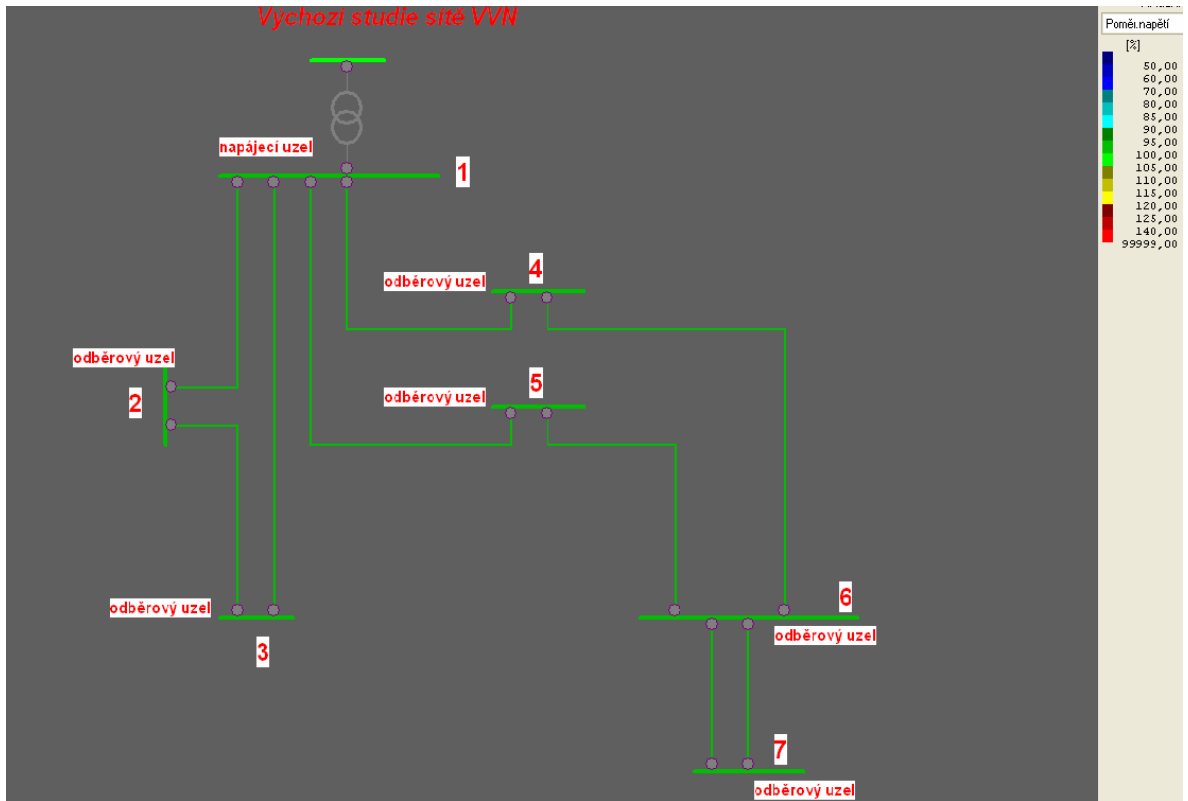
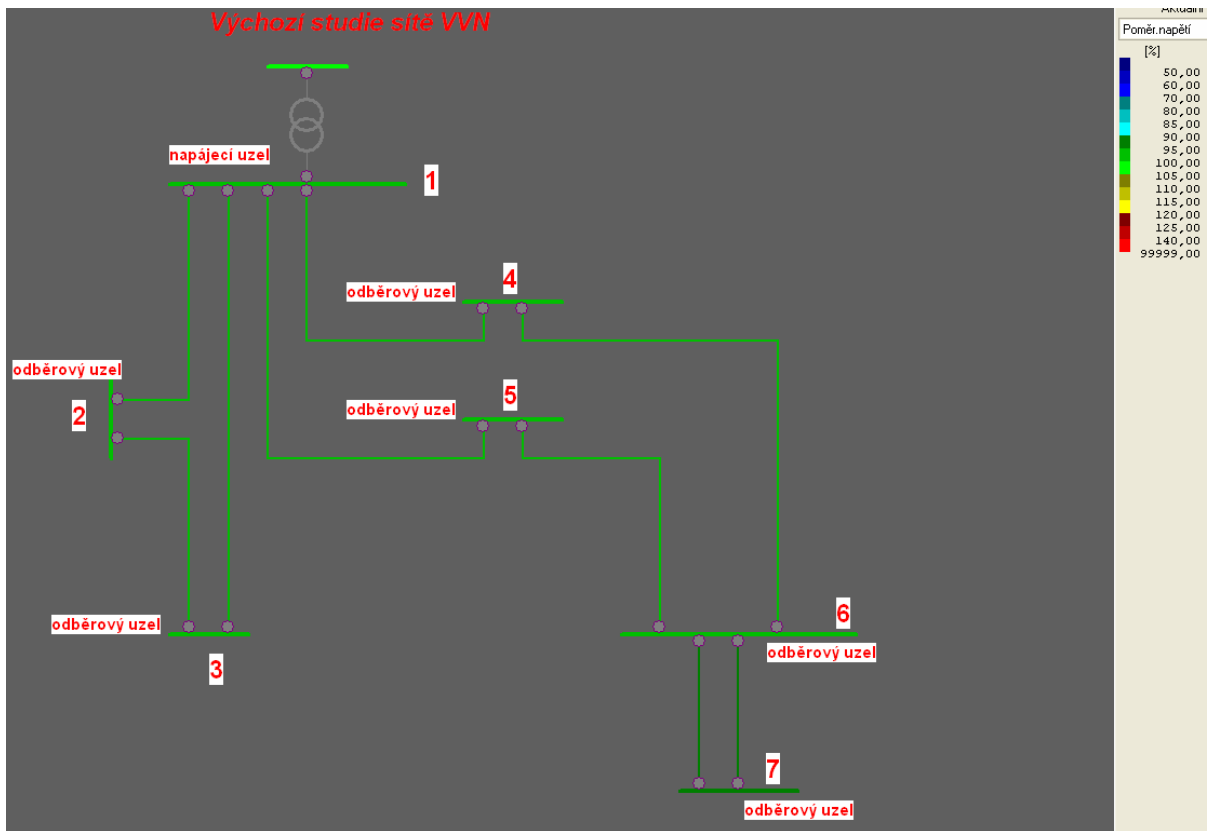
Grafické znázornění proudových a napěťových poměrů v síti



Obr.8 Proudové poměry na vedení v roce 0 $U_{nap} = 110kV$



Obr.9 Proudové poměry na vedení v roce 4 $U_{nap} = 110kV$

Obr.10 Napěťové poměry v uzlech v roce 0 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$ Obr.11 Napěťové poměry v uzlech v roce 4 $U_{\text{nap}} = 110\text{kV}$

6.2 Ustálený chod sítě s napájecím napětím $U_{\text{nap}}=121\text{kV}$

6.2.1 Stav sítě v roce 0 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Tab. 6-15 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 0

Ustálený chod sítě při daném zatížení v roce 0 uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	119.706	-5.574	0.0	38.3
		1.088		0.0	3.0
odběrový uzel č.3	110.0	119.463	-5.727	0.0	30.3
		1.086		0.0	5.2
odběrový uzel č.4	110.0	118.582	-5.805	0.0	20.6
		1.078		0.0	5.1
odběrový uzel č.5	110.0	120.768	-4.403	0.0	25.5
		1.098		0.0	6.0
odběrový uzel č.6	110.0	118.441	-5.898	0.0	25.5
		1.077		0.0	8.0
odběrový uzel č.7	110.0	118.107	-6.132	0.0	45.3
		1.074		0.0	10.1
napajecí uzel 110kV	110.0	121.610	-3.864	0.0	0.0
		1.106		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	188.8	0.0
	1.025	1.025		64.0	0.0

Tab. 6-16 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 0

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	119.706	-6	-5.4	-1.0	27	0.01	6
	odběrový uzel č.3	119.463	-6	5.4	1.8	28	0.82	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.610	-4	-65.1	-16.5	319	0.30	66
	odběrový uzel č.5	120.768	-4	64.8	16.0	319	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.610	-4	-53.6	-14.0	263	0.88	55
	odběrový uzel č.4	118.582	-6	52.7	12.9	264	1.07	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.768	-4	-39.3	-10.0	194	0.50	40
	odběrový uzel č.6	118.441	-6	38.8	9.9	195	1.11	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.441	-6	-22.7	-4.9	113	0.04	23
	odběrový uzel č.7	118.107	-6	22.7	5.0	113	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.441	-6	-22.7	-4.9	113	0.04	23
	odběrový uzel č.7	118.107	-6	22.7	5.0	113	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	118.582	-6	-32.1	-7.8	161	0.03	33
	odběrový uzel č.6	118.441	-6	32.0	7.9	161	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.610	-4	-25.2	-2.1	120	0.36	25
	odběrový uzel č.3	119.463	-6	24.9	3.4	121	2.08	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.610	-4	-44.3	-4.3	211	0.57	44
	odběrový uzel č.2	119.706	-6	43.7	4.0	212	1.08	

6.2.2 Stav sítě v roce 1 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v prvním roce

Tab. 6-17 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 1

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	119.557	-5.734	0.0	39.1
		1.087		0.0	3.1
odběrový uzel č.3	110.0	119.302	-5.894	0.0	31.2
		1.085		0.0	5.4
odběrový uzel č.4	110.0	118.388	-5.983	0.0	21.2
		1.076		0.0	5.3
odběrový uzel č.5	110.0	120.647	-4.535	0.0	26.3
		1.097		0.0	6.2
odběrový uzel č.6	110.0	118.243	-6.079	0.0	26.3
		1.075		0.0	8.2
odběrový uzel č.7	110.0	117.897	-6.320	0.0	46.7
		1.072		0.0	10.4
napajecí uzel 110kV	110.0	121.517	-3.978	0.0	0.0
		1.105		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	194.2	0.0
		1.025		66.3	0.0

Tab. 6-18 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 1

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	119.557	-6	-5.7	-1.1	28	0.01	6
	odběrový uzel č.3	119.302	-6	5.7	1.9	29	0.82	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.517	-4	-67.1	-17.1	329	0.32	68
	odběrový uzel č.5	120.647	-5	66.8	16.6	329	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.517	-4	-55.2	-14.6	271	0.94	56
	odběrový uzel č.4	118.388	-6	54.3	13.3	273	1.07	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.647	-5	-40.5	-10.4	200	0.53	42
	odběrový uzel č.6	118.243	-6	40.0	10.2	202	1.10	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.243	-6	-23.4	-5.0	117	0.05	24
	odběrový uzel č.7	117.897	-6	23.3	5.2	117	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.243	-6	-23.4	-5.0	117	0.05	24
	odběrový uzel č.7	117.897	-6	23.3	5.2	117	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	118.388	-6	-33.0	-8.1	166	0.03	34
	odběrový uzel č.6	118.243	-6	33.0	8.1	166	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.517	-4	-25.9	-2.3	124	0.38	26
	odběrový uzel č.3	119.302	-6	25.5	3.5	125	2.08	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.517	-4	-45.4	-4.6	217	0.60	45
	odběrový uzel č.2	119.557	-6	44.8	4.2	217	1.08	

6.2.3 Stav sítě v roce 2 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve druhém roce

Tab. 6-19 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 2

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	119.389	-5.914	0.0	40.3
		1.085		0.0	3.2
odběrový uzel č.3	110.0	119.125	-6.080	0.0	32.2
		1.083		0.0	5.5
odběrový uzel č.4	110.0	118.182	-6.171	0.0	21.9
		1.074		0.0	5.4
odběrový uzel č.5	110.0	120.518	-4.676	0.0	27.0
		1.096		0.0	6.4
odběrový uzel č.6	110.0	118.032	-6.271	0.0	27.0
		1.073		0.0	8.5
odběrový uzel č.7	110.0	117.676	-6.520	0.0	48.1
		1.070		0.0	10.7
napajecí uzel 110kV	110.0	121.418	-4.103	0.0	0.0
		1.104		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	200.1	0.0
		1.025	1.025	68.9	0.0

Tab. 6-20 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 2

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	119.389	-6	-5.9	-1.2	29	0.01	6
	odběrový uzel č.3	119.125	-6	5.9	2.0	30	0.81	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.418	-4	-69.2	-17.7	340	0.34	70
	odběrový uzel č.5	120.518	-5	68.8	17.2	340	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.418	-4	-56.9	-15.1	280	1.00	58
	odběrový uzel č.4	118.182	-6	55.9	13.8	281	1.07	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.518	-5	-41.8	-10.8	207	0.57	43
	odběrový uzel č.6	118.032	-6	41.2	10.5	208	1.10	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.032	-6	-24.1	-5.2	121	0.05	25
	odběrový uzel č.7	117.676	-7	24.0	5.4	121	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	118.032	-6	-24.1	-5.2	121	0.05	25
	odběrový uzel č.7	117.676	-7	24.0	5.4	121	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	118.182	-6	-34.0	-8.4	171	0.03	35
	odběrový uzel č.6	118.032	-6	34.0	8.4	171	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.418	-4	-26.7	-2.5	127	0.40	27
	odběrový uzel č.3	119.125	-6	26.3	3.6	129	2.07	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.418	-4	-46.8	-4.8	224	0.64	46
	odběrový uzel č.2	119.389	-6	46.2	4.4	224	1.08	

6.2.4 Stav sítě v roce 3 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve třetím roce

Tab. 6-21 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 3

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	119.216	-6.101	0.0	41.5
		1.084		0.0	3.3
odběrový uzel č.3	110.0	118.943	-6.272	0.0	33.1
		1.081		0.0	5.7
odběrový uzel č.4	110.0	117.970	-6.367	0.0	22.5
		1.072		0.0	5.6
odběrový uzel č.5	110.0	120.384	-4.823	0.0	27.9
		1.094		0.0	6.6
odběrový uzel č.6	110.0	117.816	-6.470	0.0	27.9
		1.071		0.0	8.7
odběrový uzel č.7	110.0	117.447	-6.728	0.0	49.5
		1.068		0.0	11.0
napajecí uzel 110kV	110.0	121.314	-4.231	0.0	0.0
		1.103		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	206.2	0.0
		1.025	1.025	71.5	0.0

Tab. 6-22 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 3

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	119.216	-6	-6.0	-1.2	30	0.01	6
	odběrový uzel č.3	118.943	-6	6.0	2.0	31	0.81	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.314	-4	-71.3	-18.4	350	0.36	73
	odběrový uzel č.5	120.384	-5	70.9	17.8	351	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.314	-4	-58.6	-15.7	289	1.07	60
	odběrový uzel č.4	117.970	-6	57.6	14.2	290	1.07	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.384	-5	-43.1	-11.2	213	0.60	44
	odběrový uzel č.6	117.816	-6	42.4	10.8	215	1.10	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.816	-6	-24.8	-5.4	124	0.05	26
	odběrový uzel č.7	117.447	-7	24.8	5.5	125	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.816	-6	-24.8	-5.4	124	0.05	26
	odběrový uzel č.7	117.447	-7	24.8	5.5	125	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.970	-6	-35.0	-8.6	177	0.03	37
	odběrový uzel č.6	117.816	-6	35.0	8.6	177	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.314	-4	-27.5	-2.6	132	0.43	27
	odběrový uzel č.3	118.943	-6	27.1	3.7	133	2.07	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.314	-4	-48.2	-5.1	231	0.68	48
	odběrový uzel č.2	119.216	-6	47.6	4.5	231	1.08	

6.2.5 Stav sítě v roce 4 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení ve čtvrtém roce

Tab. 6-23 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 4

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	119.035	-6.294	0.0	42.8
		1.082		0.0	3.4
odběrový uzel č.3	110.0	118.752	-6.471	0.0	34.1
		1.080		0.0	5.8
odběrový uzel č.4	110.0	117.749	-6.571	0.0	23.2
		1.070		0.0	5.7
odběrový uzel č.5	110.0	120.244	-4.976	0.0	28.7
		1.093		0.0	6.8
odběrový uzel č.6	110.0	117.589	-6.677	0.0	28.7
		1.069		0.0	9.0
odběrový uzel č.7	110.0	117.208	-6.944	0.0	51.0
		1.066		0.0	11.4
napajecí uzel 110kV	110.0	121.206	-4.365	0.0	0.0
		1.102		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	212.6	0.0
		1.025		74.4	0.0

Tab. 6-24 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 4

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	119.035	-6	-6.2	-1.3	31	0.01	7
	odběrový uzel č.3	118.752	-6	6.2	2.1	32	0.81	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.206	-4	-73.5	-19.1	362	0.38	75
	odběrový uzel č.5	120.244	-5	73.1	18.4	362	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.206	-4	-60.4	-16.3	298	1.14	62
	odběrový uzel č.4	117.749	-7	59.3	14.7	299	1.06	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.244	-5	-44.4	-11.6	220	0.64	46
	odběrový uzel č.6	117.589	-7	43.7	11.2	222	1.09	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.589	-7	-25.6	-5.5	128	0.06	27
	odběrový uzel č.7	117.208	-7	25.5	5.7	129	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.589	-7	-25.6	-5.5	128	0.06	27
	odběrový uzel č.7	117.208	-7	25.5	5.7	129	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.749	-7	-36.1	-8.9	182	0.03	38
	odběrový uzel č.6	117.589	-7	36.1	8.9	182	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.206	-4	-28.4	-2.8	136	0.45	28
	odběrový uzel č.3	118.752	-6	27.9	3.8	137	2.06	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.206	-4	-49.7	-5.4	238	0.72	49
	odběrový uzel č.2	119.035	-6	49.0	4.7	239	1.07	

6.2.6 Stav sítě v roce 5 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v pátém roce

Tab. 6-25 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 5

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	118.845	-6.494	0.0	44.0
		1.080		0.0	3.5
odběrový uzel č.3	110.0	118.552	-6.676	0.0	35.1
		1.078		0.0	6.0
odběrový uzel č.4	110.0	117.518	-6.781	0.0	23.9
		1.068		0.0	5.9
odběrový uzel č.5	110.0	120.098	-5.133	0.0	29.6
		1.092		0.0	7.0
odběrový uzel č.6	110.0	117.352	-6.891	0.0	29.6
		1.067		0.0	9.3
odběrový uzel č.7	110.0	116.960	-7.166	0.0	52.5
		1.063		0.0	11.7
napajecí uzel 110kV	110.0	121.092	-4.503	0.0	0.0
		1.101		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	219.1	0.0
	1.025	1.025		77.3	0.0

Tab. 6-26 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 5

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	118.845	-6	-6.4	-1.4	32	0.01	7
	odběrový uzel č.3	118.552	-7	6.4	2.2	33	0.81	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	121.092	-5	-75.7	-19.8	373	0.41	77
	odběrový uzel č.5	120.098	-5	75.3	19.1	373	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	121.092	-5	-62.3	-17.0	308	1.21	64
	odběrový uzel č.4	117.518	-7	61.1	15.1	309	1.06	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.098	-5	-45.7	-12.1	227	0.69	47
	odběrový uzel č.6	117.352	-7	45.0	11.5	229	1.09	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.352	-7	-26.3	-5.7	133	0.06	27
	odběrový uzel č.7	116.960	-7	26.3	5.9	133	0.28	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.352	-7	-26.3	-5.7	133	0.06	27
	odběrový uzel č.7	116.960	-7	26.3	5.9	133	0.28	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.518	-7	-37.2	-9.2	188	0.03	39
	odběrový uzel č.6	117.352	-7	37.2	9.2	188	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	121.092	-5	-29.2	-3.0	140	0.48	29
	odběrový uzel č.3	118.552	-7	28.7	3.9	141	2.06	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	121.092	-5	-51.2	-5.6	246	0.77	51
	odběrový uzel č.2	118.845	-6	50.5	4.9	246	1.07	

6.2.7 Stav sítě v roce 6 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v šestém roce

Tab. 6-27 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 6

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	118.649	-6.701	0.0	45.4
		1.079		0.0	3.6
odběrový uzel č.3	110.0	118.345	-6.889	0.0	36.2
		1.076		0.0	6.2
odběrový uzel č.4	110.0	117.277	-6.998	0.0	24.6
		1.066		0.0	6.1
odběrový uzel č.5	110.0	119.945	-5.296	0.0	30.5
		1.090		0.0	7.2
odběrový uzel č.6	110.0	117.107	-7.112	0.0	30.5
		1.065		0.0	9.6
odběrový uzel č.7	110.0	116.701	-7.397	0.0	54.1
		1.061		0.0	12.1
napajecí uzel 110kV	110.0	120.973	-4.645	0.0	0.0
		1.100		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	225.8	0.0
		1.025	1.025	80.4	0.0

Tab. 6-28 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 6

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	118.649	-7	-6.6	-1.4	33	0.01	7
	odběrový uzel č.3	118.345	-7	6.6	2.2	34	0.80	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	120.973	-5	-78.0	-20.5	385	0.44	80
	odběrový uzel č.5	119.945	-5	77.6	19.7	385	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	120.973	-5	-64.2	-17.7	318	1.29	66
	odběrový uzel č.4	117.277	-7	62.9	15.6	319	1.06	
5 - 6	odběrový uzel č.5	119.945	-5	-47.1	-12.6	235	0.73	49
	odběrový uzel č.6	117.107	-7	46.4	11.9	236	1.09	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.107	-7	-27.1	-5.9	137	0.06	28
	odběrový uzel č.7	116.701	-7	27.0	6.0	137	0.27	
6 - 7	odběrový uzel č.6	117.107	-7	-27.1	-5.9	137	0.06	28
	odběrový uzel č.7	116.701	-7	27.0	6.0	137	0.27	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.277	-7	-38.3	-9.5	194	0.04	40
	odběrový uzel č.6	117.107	-7	38.3	9.5	194	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	120.973	-5	-30.1	-3.2	144	0.51	30
	odběrový uzel č.3	118.345	-7	29.6	4.0	146	2.05	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	120.973	-5	-52.8	-5.9	254	0.82	53
	odběrový uzel č.2	118.649	-7	52.0	5.0	254	1.07	

6.2.8 Stav sítě v roce 7 $U_{\text{nap}} = 121\text{KV}$

Ustálený chod sítě při daném zatížení v sedmém roce

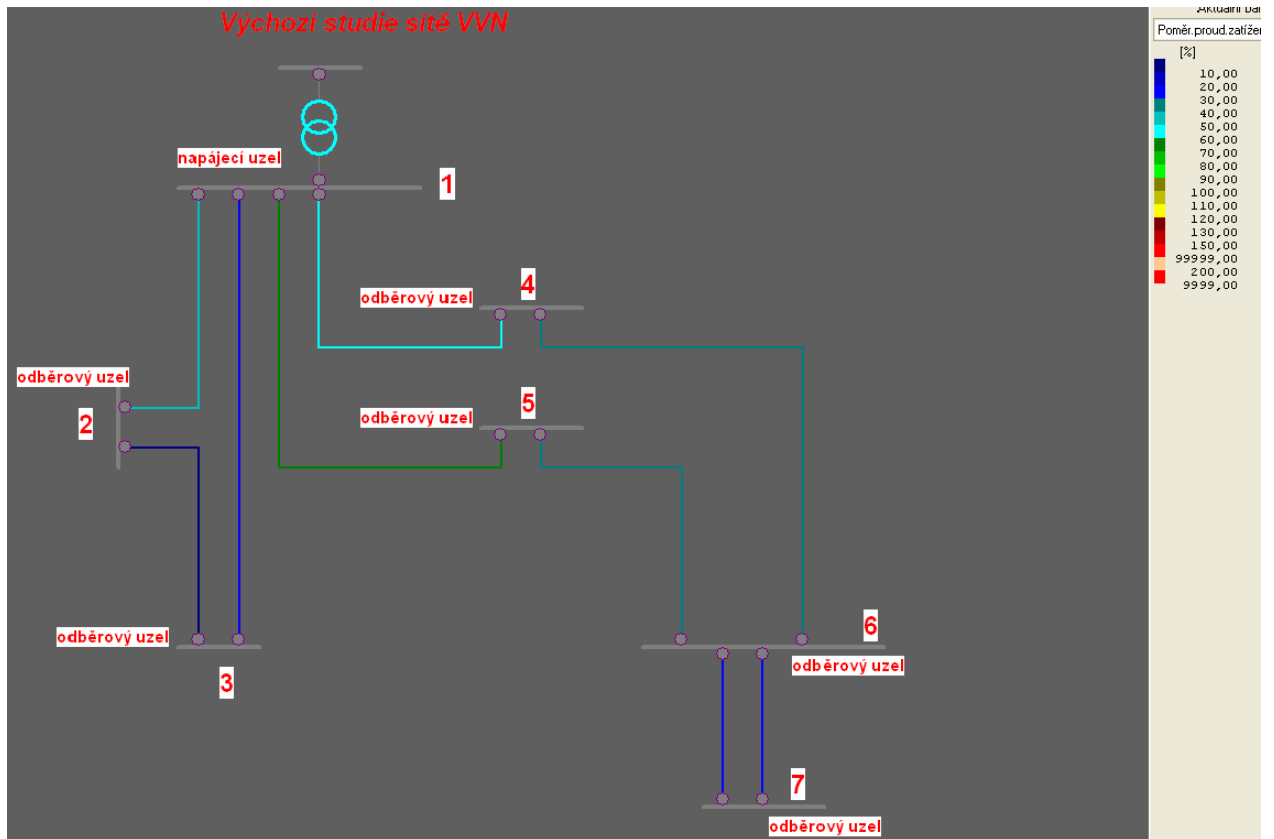
Tab. 6-29 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ – rok 7

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	118.442	-6.915	0.0	46.7
		1.077		0.0	3.7
odběrový uzel č.3	110.0	118.127	-7.110	0.0	37.3
		1.074		0.0	6.4
odběrový uzel č.4	110.0	117.026	-7.223	0.0	25.3
		1.064		0.0	6.3
odběrový uzel č.5	110.0	119.785	-5.464	0.0	31.4
		1.089		0.0	7.4
odběrový uzel č.6	110.0	116.850	-7.341	0.0	31.4
		1.062		0.0	9.8
odběrový uzel č.7	110.0	116.431	-7.636	0.0	55.7
		1.058		0.0	12.4
napajecí uzel 110kV	110.0	120.848	-4.793	0.0	0.0
		1.099		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	232.7	0.0
	1.025	1.025		83.7	0.0

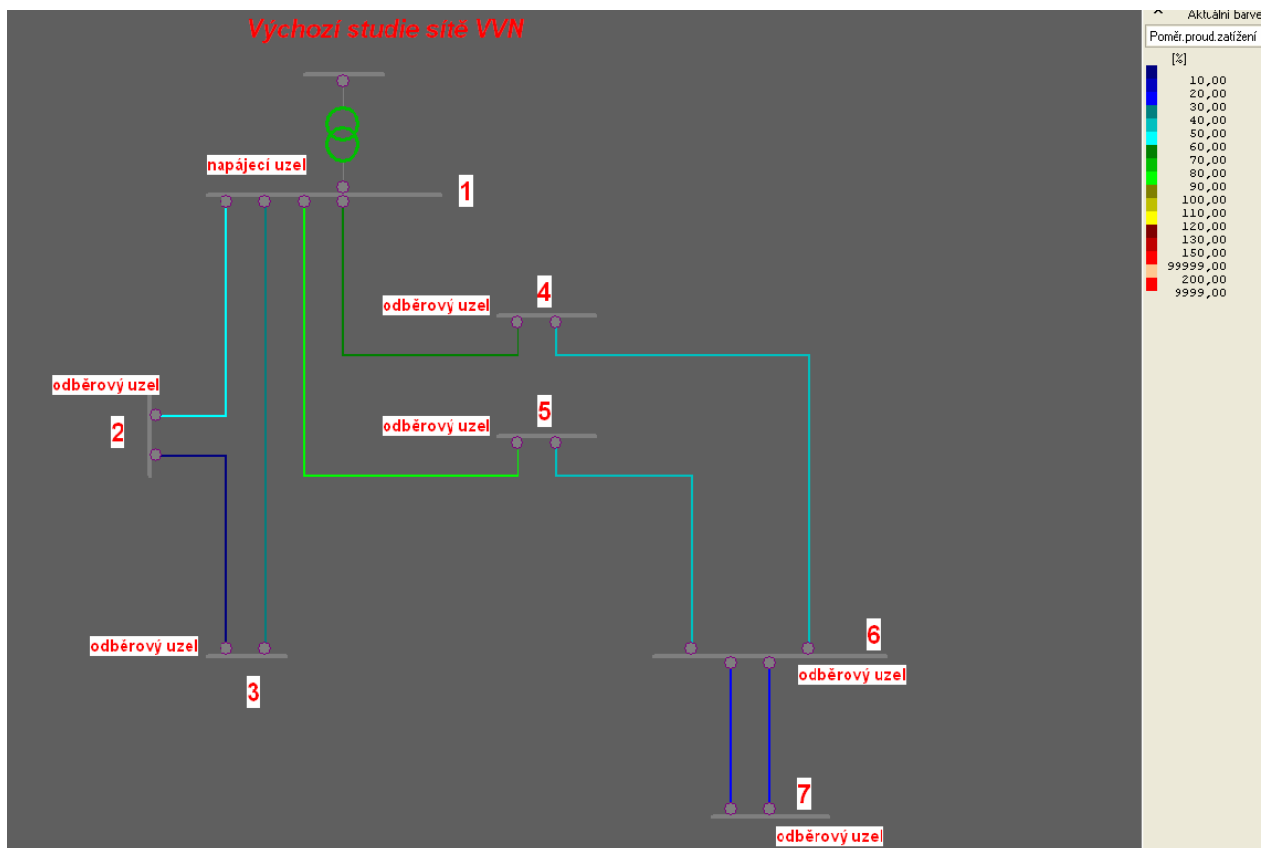
Tab. 6-30 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 121\text{ kV}$ – rok 7

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	118.442	-7	-6.8	-1.5	34	0.01	7
	odběrový uzel č.3	118.127	-7	6.8	2.3	35	0.80	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	120.848	-5	-80.4	-21.3	397	0.46	82
	odběrový uzel č.5	119.785	-5	79.9	20.4	398	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	120.848	-5	-66.2	-18.4	328	1.37	68
	odběrový uzel č.4	117.026	-7	64.8	16.1	329	1.05	
5 - 6	odběrový uzel č.5	119.785	-5	-48.6	-13.1	242	0.78	50
	odběrový uzel č.6	116.850	-7	47.8	12.3	244	1.08	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.850	-7	-27.9	-6.1	141	0.07	29
	odběrový uzel č.7	116.431	-8	27.9	6.2	142	0.27	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.850	-7	-27.9	-6.1	141	0.07	29
	odběrový uzel č.7	116.431	-8	27.9	6.2	142	0.27	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.026	-7	-39.5	-9.8	201	0.04	42
	odběrový uzel č.6	116.850	-7	39.4	9.8	201	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	120.848	-5	-31.0	-3.4	149	0.55	31
	odběrový uzel č.3	118.127	-7	30.5	4.1	150	2.05	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	120.848	-5	-54.4	-6.3	262	0.87	54
	odběrový uzel č.2	118.442	-7	53.5	5.2	262	1.07	

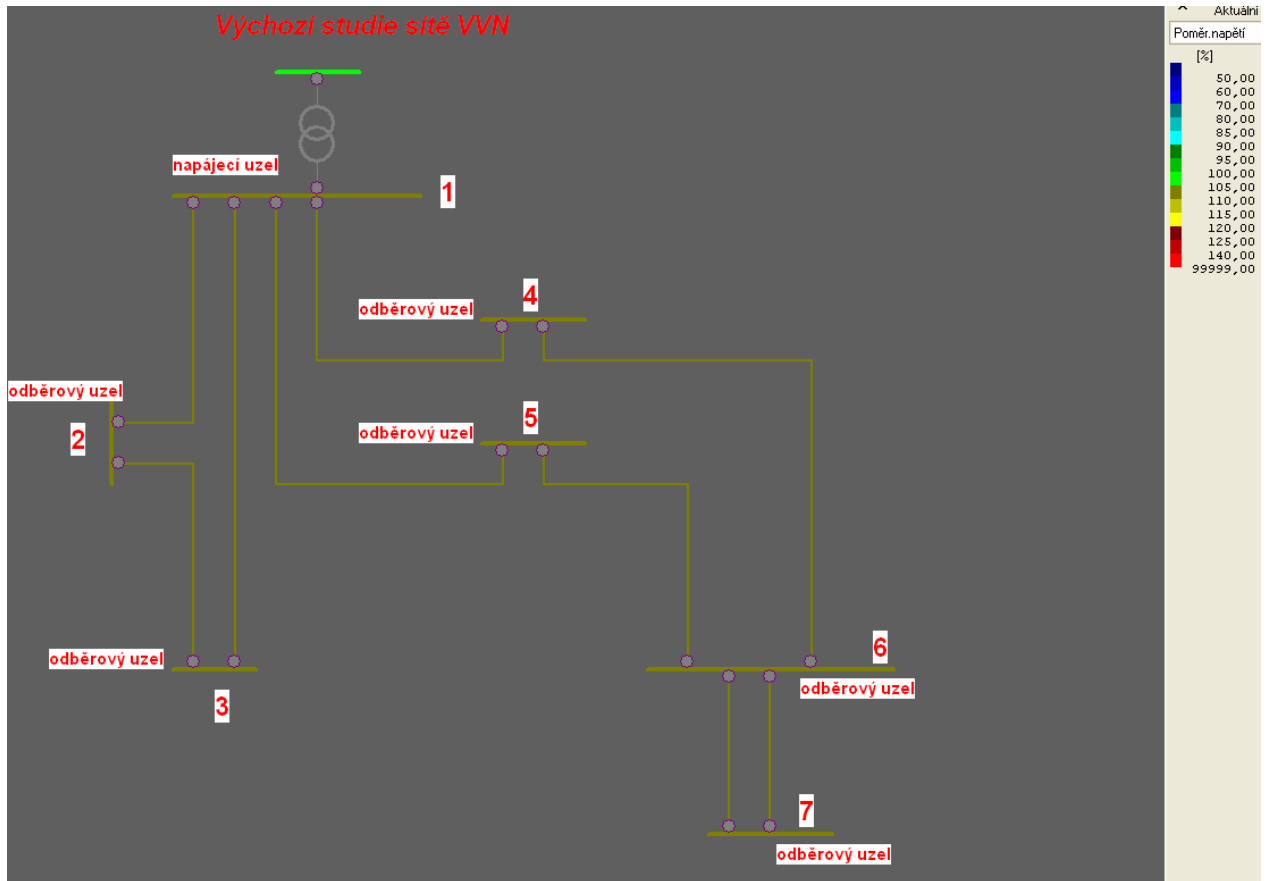
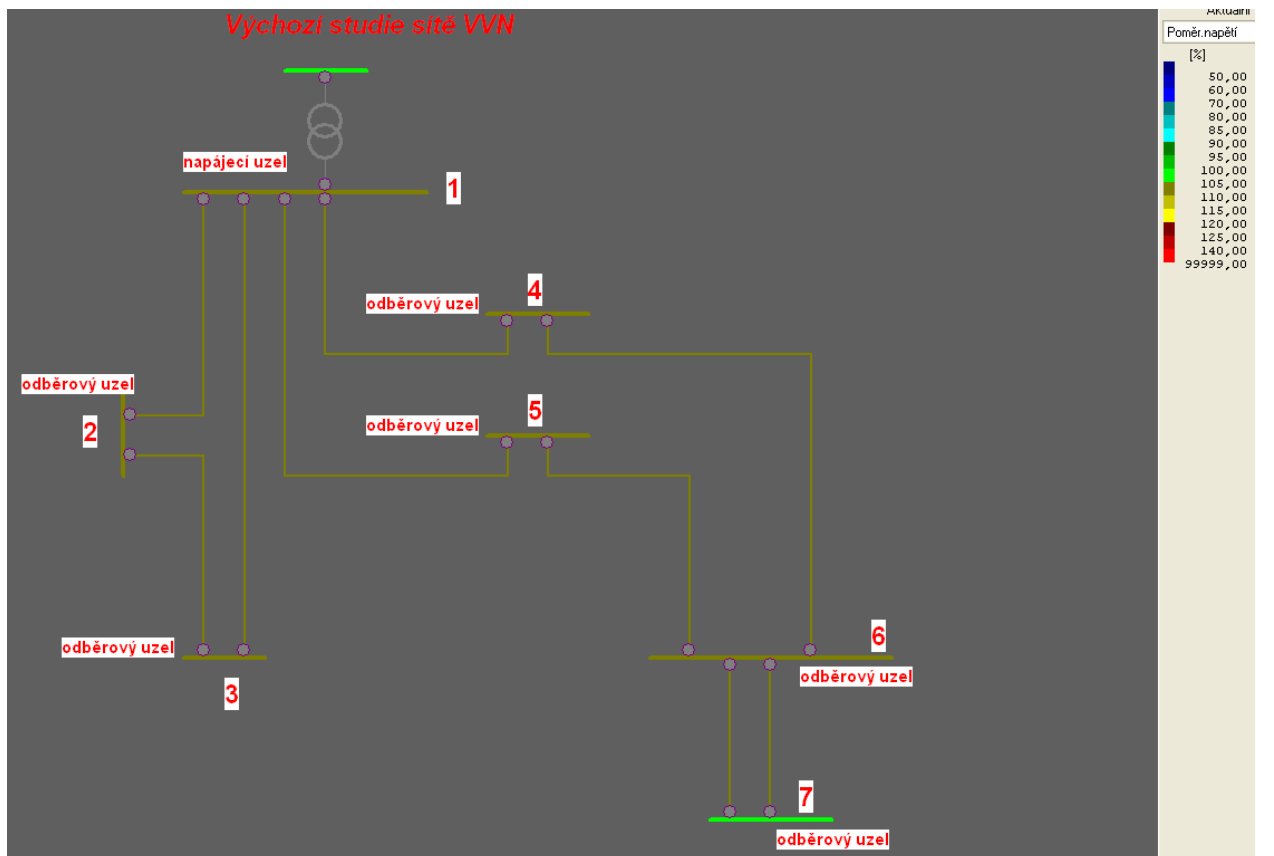
Grafické znázornění proudových a napěťových poměrů v síti



Obr.12 Proudové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$



Obr.13 Proudové poměry na vedení v roce 7 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$

Obr.14 Napěťové poměry na vedení v roce 0 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ Obr.14 Napěťové poměry na vedení v roce 7 $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$

6.3 Ustálený chod sítě s napájecím napětím $U_{\text{nap}}=99\text{kV}$

6.3.1 Stav sítě v roce 0 $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$

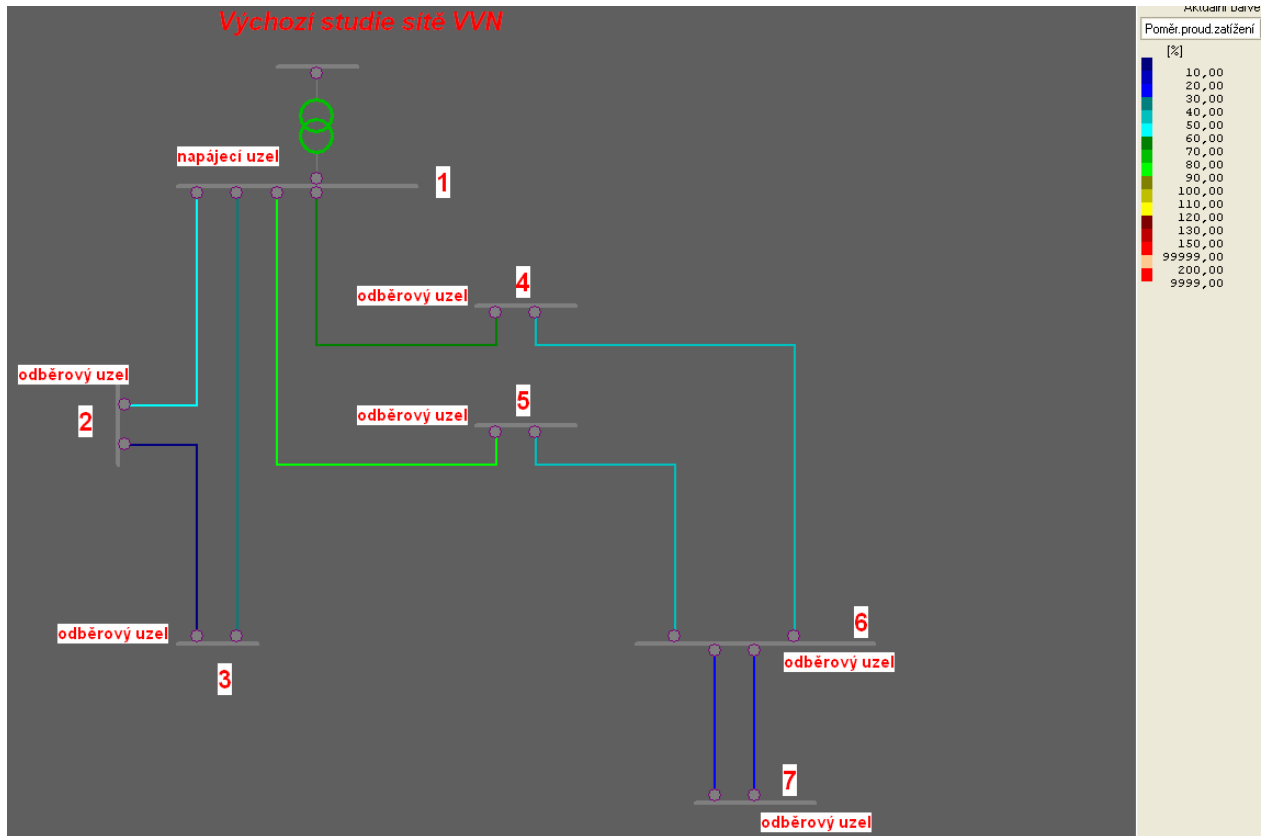
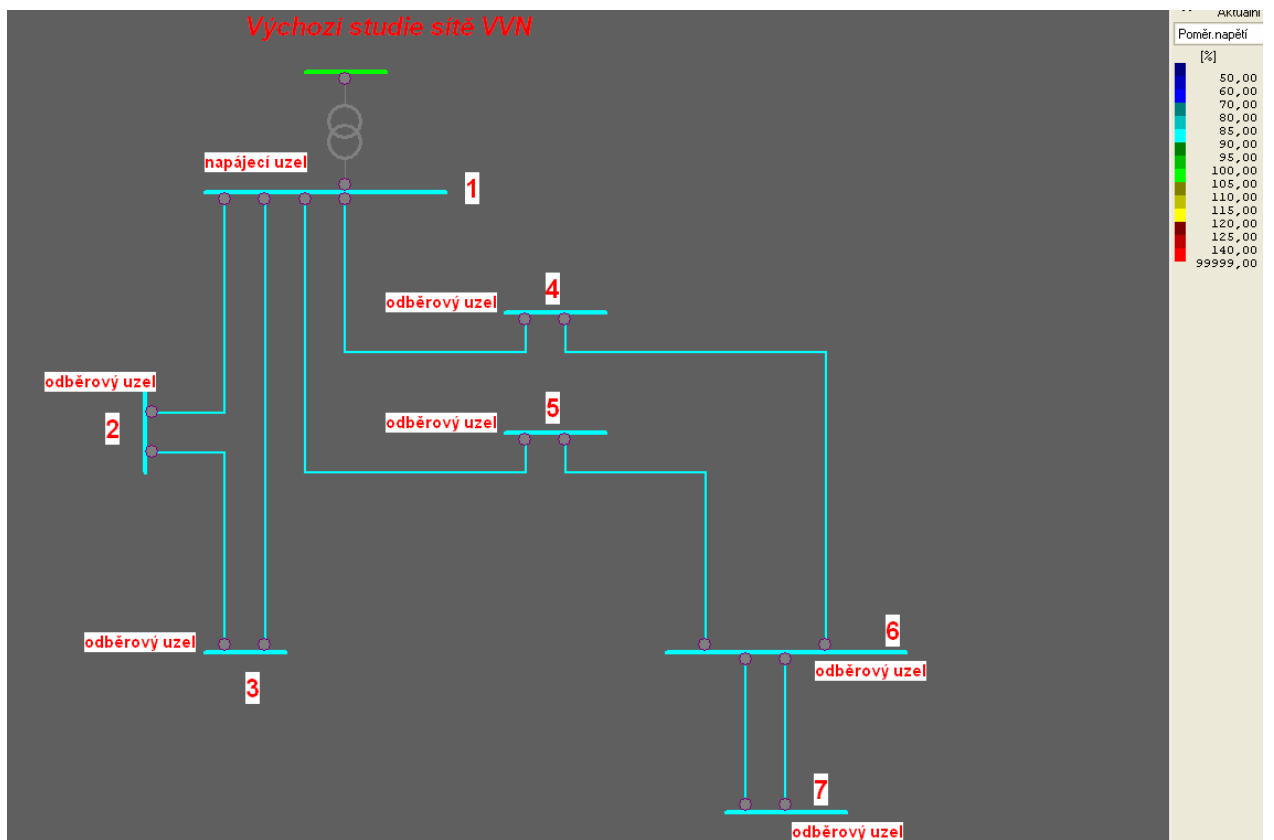
V následujících výpočtech jsem vycházel z napětí napájecího uzlu o které má hodnotu 90% jmenovitého napětí tj. $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$

Tab. 6-31 Výsledné hodnoty uzlu $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$ – rok 0

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	96.840	-6.459	0.0	38.0
		0.880		0.0	3.0
odběrový uzel č.3	110.0	96.520	-6.694	0.0	30.3
		0.877		0.0	5.2
odběrový uzel č.4	110.0	95.418	-6.841	0.0	20.6
		0.867		0.0	5.1
odběrový uzel č.5	110.0	98.200	-4.704	0.0	25.5
		0.893		0.0	6.0
odběrový uzel č.6	110.0	95.241	-6.984	0.0	25.5
		0.866		0.0	8.0
odběrový uzel č.7	110.0	94.822	-7.346	0.0	45.3
		0.862		0.0	10.1
napájecí uzel 110kV	110.0	99.272	-3.894	0.0	0.0
		0.902		0.0	0.0
napájecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	189.9	0.0
	1.025	1.025		70.3	0.0

Tab. 6-32 Výsledné hodnoty vedení $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$ – rok

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	96.840	-6	-5.5	-1.4	34	0.01	7
	odběrový uzel č.3	96.520	-7	5.5	1.9	35	0.54	
9 - 5	napájecí uzel 110kV	99.272	-4	-65.6	-18.1	396	0.46	82
	odběrový uzel č.5	98.200	-5	65.2	17.2	396	0.17	
9 - 4	napájecí uzel 110kV	99.272	-4	-54.1	-15.8	328	1.37	68
	odběrový uzel č.4	95.418	-7	52.7	13.2	329	0.71	
5 - 6	odběrový uzel č.5	98.200	-5	-39.7	-11.2	242	0.78	50
	odběrový uzel č.6	95.241	-7	38.9	10.0	243	0.72	
6 - 7	odběrový uzel č.6	95.241	-7	-22.7	-5.0	141	0.07	29
	odběrový uzel č.7	94.822	-7	22.6	5.1	141	0.18	
6 - 7	odběrový uzel č.6	95.241	-7	-22.7	-5.0	141	0.07	29
	odběrový uzel č.7	94.822	-7	22.6	5.1	141	0.18	
4 - 6	odběrový uzel č.4	95.418	-7	-32.1	-8.1	200	0.04	41
	odběrový uzel č.6	95.241	-7	32.1	8.0	200	0.05	
9 - 3	napájecí uzel 110kV	99.272	-4	-25.3	-3.3	148	0.54	31
	odběrový uzel č.3	96.520	-7	24.8	3.3	150	1.37	
9 - 2	napájecí uzel 110kV	99.272	-4	-44.4	-5.8	260	0.86	54
	odběrový uzel č.2	96.840	-6	43.5	4.4	261	0.72	

Obr.15 Proudové poměry na vedení v roce0 $U_{nap} = 99kV$ Obr.16 Napěťové poměry na vedení v roce0 $U_{nap} = 99kV$

6.4 První posílení sítě při $U_{\text{nap}}=121 \text{ kV}$

Při navrhování posílení sítě vycházím z napájecího napětí uzlu $U_{\text{nap}}=121 \text{ kV}$ neboť při napájecím napětí nižším by bylo ekonomicky nevýhodné. K posílení sítě by muselo dojít již v ve 3 roce provozu při napájecím napětí $U_{\text{nap}}=110 \text{ kV}$. Při napájecím napětí $U_{\text{nap}}=99 \text{ kV}$ je již síť z hlediska zadaných parametrů mimo napěťové i proudové meze a tudíž ji v tomto stavu nelze provozovat

Dojde –li tedy nejpозději do 7 roku provozu k vybudování nového vedení 110 kV mezi napájecím uzlem č.1 a odběrovým uzlem č.5 se stejnými parametry jako má základní vedení mezi těmito uzly t.j průřez vedení roven $S=185 \text{ mm}^2$ změní se napěťové a proudové parametry následujícím způsobem.

Napěťové poměry

uzel	Un[kV]	U[kV]		Pdo [MW]	Pod [MW]
	Ez[-]	U[-]	Faz[st]	Qdo[MVAr]	Qod[MVAr]
odběrový uzel č.2	110.0	118.274	-7.128	0.0	48.1
		1.075		0.0	3.8
odběrový uzel č.3	110.0	117.948	-7.328	0.0	38.4
		1.072		0.0	6.6
odběrový uzel č.4	110.0	117.071	-7.283	0.0	26.1
		1.064		0.0	6.5
odběrový uzel č.5	110.0	120.188	-5.300	0.0	32.3
		1.093		0.0	7.6
odběrový uzel č.6	110.0	116.907	-7.391	0.0	32.3
		1.063		0.0	10.1
odběrový uzel č.7	110.0	116.476	-7.695	0.0	57.4
		1.059		0.0	12.8
napajecí uzel 110kV	110.0	120.762	-4.938	0.0	0.0
		1.098		0.0	0.0
napajecí uzel 440kV	400.0	410.000	0.000	239.6	0.0
		1.025		86.1	0.0

Tab. 6-33 Výsledné hodnoty v uzlech $U_{\text{nap}} = 121 \text{ kV}$ – po posílení sítě

Proudové a výkonové poměry v síti v7 roce provozu po prvním posílení sítě

Tab. 6-34 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po posílení sítě

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	118.274	-7	-7.0	-1.6	35	0.01	7
	odběrový uzel č.3	117.948	-7	7.0	2.4	36	0.80	
9 - 5	napájecí uzel 110kV	120.762	-5	-43.5	-11.3	215	0.14	45
	odběrový uzel č.5	120.188	-5	43.3	11.2	215	0.25	
9 - 5 posílení	napájecí uzel 110kV	120.762	-5	-43.5	-11.3	215	0.14	45
	odběrový uzel č.5	120.188	-5	43.3	11.2	215	0.25	
9 - 4	napájecí uzel 110kV	120.762	-5	-63.8	-17.7	317	1.28	66
	odběrový uzel č.4	117.071	-7	62.5	15.6	318	1.05	
5 - 6	odběrový uzel č.5	120.188	-5	-54.4	-14.8	271	0.97	56
	odběrový uzel č.6	116.907	-7	53.4	13.6	272	1.09	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.907	-7	-28.8	-6.3	145	0.07	30
	odběrový uzel č.7	116.476	-8	28.7	6.4	146	0.27	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.907	-7	-28.8	-6.3	145	0.07	30
	odběrový uzel č.7	116.476	-8	28.7	6.4	146	0.27	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.071	-7	-36.4	-9.2	185	0.03	38
	odběrový uzel č.6	116.907	-7	36.4	9.2	185	0.08	
9 - 3	napájecí uzel 110kV	120.762	-5	-32.0	-3.6	154	0.58	32
	odběrový uzel č.3	117.948	-7	31.4	4.2	155	2.04	
9 - 2	napájecí uzel 110kV	120.762	-5	-56.1	-6.6	270	0.93	56
	odběrový uzel č.2	118.274	-7	55.1	5.4	270	1.06	

6.5 Druhé posílení sítě při $U_{nap}=121$ kV

Síť v této konfiguraci je možné provozovat dalších 7 let. Ve čtrnáctém roce provozu sítě dojde k překročení limitních hodnot proudového zatížení mezi napájecím uzlem č.1 a odběrovým uzlem č.4. Proudové zatížení v této době dosáhne 80% jmenovité hodnoty, což je hodnota limitní a pro další provoz sítě je třeba vybudovat nové vedení.

Dojde-li tedy nejdříve do 7 roku provozu k vybudování nového vedení 110 kV mezi napájecím uzlem č.1 a odběrovým uzlem č.4 se stejnými parametry jako má základní vedení mezi těmito uzly t.j průřez vedení roven $S=185$ mm² změní se napěťové a proudové parametry následujícím způsobem.

Proudové a výkonové poměry v síti ve 14 roce provozu

Tab. 6-35 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po prvním posílení sítě 14 rok

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	116.779	-9	-8.4	-2.1	43	0.02	9
	odběrový uzel č.3	116.376	-9	8.4	2.9	44	0.78	
9 - 5	napajecí uzel 110kV	119.841	-6	-51.4	-14.7	257	0.19	47
	odběrový uzel č.5	119.141	-6	51.2	14.4	258	0.24	
9 - 5 posílení	napajecí uzel 110kV	119.841	-6	-52.7	-13.7	263	0.20	54
	odběrový uzel č.5	119.141	-6	52.5	13.4	263	0.25	
9 - 4	napajecí uzel 110kV	119.841	-6	-76.7	-22.3	385	1.89	80
	odběrový uzel č.4	115.315	-9	74.8	18.8	386	1.03	
5 - 6	odběrový uzel č.5	119.141	-6	-65.2	-18.8	329	1.43	68
	odběrový uzel č.6	115.117	-9	63.7	16.4	330	1.06	
6 - 7	odběrový uzel č.6	115.117	-9	-34.4	-7.6	177	0.11	37
	odběrový uzel č.7	114.592	-9	34.3	7.6	177	0.26	
6 - 7	odběrový uzel č.6	115.117	-9	-34.4	-7.6	177	0.11	37
	odběrový uzel č.7	114.592	-9	34.3	7.6	177	0.26	
4 - 6	odběrový uzel č.4	115.315	-9	-43.6	-11.0	225	0.05	47
	odběrový uzel č.6	115.117	-9	43.6	11.0	225	0.08	
9 - 3	napajecí uzel 110kV	119.841	-6	-38.3	-5.1	186	0.86	39
	odběrový uzel č.3	116.376	-9	37.5	5.0	188	2.00	
9 - 2	napajecí uzel 110kV	119.841	-6	-67.2	-8.9	327	1.36	68
	odběrový uzel č.2	116.779	-9	65.9	6.7	327	1.04	

Proudové poměry v síti ve 14 roce provozu po posílení sítě mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.4

Tab. 6-36 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po druhém posílení sítě 14 rok

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	116.995	-9	-8.4	-2.1	43	0.02	9
	odběrový uzel č.3	116.593	-9	8.4	2.9	44	0.78	
9 - 5	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-40.3	-10.7	200	0.11	36
	odběrový uzel č.5	119.519	-6	40.1	10.6	201	0.24	
9 - 5 posílení	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-41.3	-9.8	204	0.12	42
	odběrový uzel č.5	119.519	-6	41.2	9.8	204	0.25	
9 - 4 posílení	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-49.0	-12.9	244	0.76	51
	odběrový uzel č.4	117.226	-8	48.2	12.2	245	1.05	
9 - 4	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-49.0	-12.9	244	0.76	51
	odběrový uzel č.4	117.226	-8	48.2	12.2	245	1.05	
5 - 6	odběrový uzel č.5	119.519	-6	-42.8	-11.3	214	0.61	45
	odběrový uzel č.6	116.933	-8	42.2	10.9	215	1.08	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.933	-8	-34.4	-7.6	174	0.10	36
	odběrový uzel č.7	116.417	-8	34.3	7.6	174	0.27	
6 - 7	odběrový uzel č.6	116.933	-8	-34.4	-7.6	174	0.10	36
	odběrový uzel č.7	116.417	-8	34.3	7.6	174	0.27	
4 - 6	odběrový uzel č.4	117.226	-8	-65.3	-16.6	332	0.11	69
	odběrový uzel č.6	116.933	-8	65.1	16.4	332	0.08	
9 - 3	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-38.3	-5.1	186	0.85	39
	odběrový uzel č.3	116.593	-9	37.5	5.0	187	2.01	
9 - 2	napájecí uzel 110kV	120.050	-6	-67.2	-8.9	326	1.35	68
	odběrový uzel č.2	116.995	-9	65.9	6.7	327	1.05	

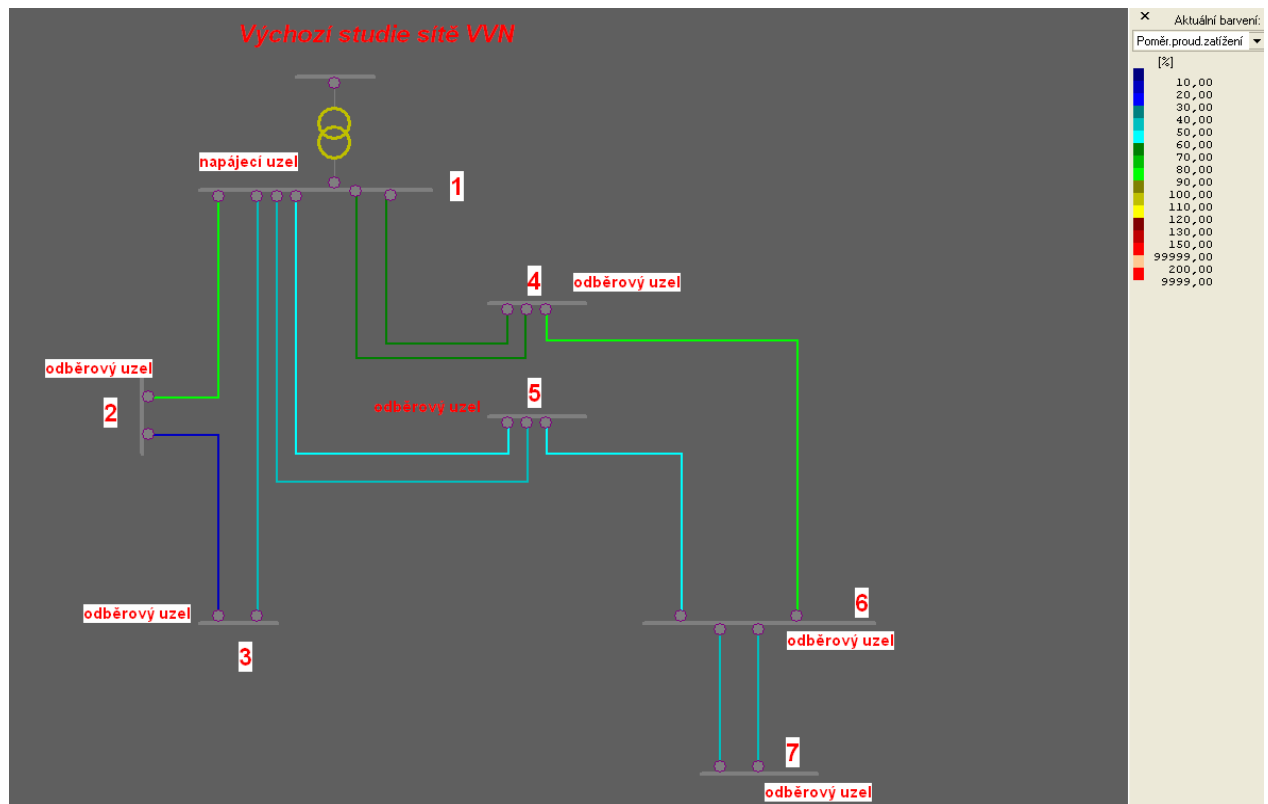
6.6 Parametry sítě po 20 letech provozu při $U_{nap}=121$ kV

Po druhém posílení sítě je možno tuto síť provozovat dalších 6 let.než opět dojde dojde k překročení povolené proudové zatížitelnosti vedení vedení.Ve 20 roce provozu bude vedení mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.2 zatíženo na 80% a vedení mezi odběrovým uzlem č.4 a odběrovým uzlem č.6 na 81% maximální proudové zatížitelnosti.

Tab. 6-37 Výsledné hodnoty vedení $U_{nap} = 121kV$ – po druhém posílení sítě 20 rok

vedení mezi uzly	uzel	U[kV]	Faz[st]	P[MW]	Q[MVAr]	I[A]	Pz/Qk	In[%]
2 - 3	odběrový uzel č.2	118.885	-7	-48.2	-13.2	243	0.17	44
	odběrový uzel č.3	118.234	-8	48.0	13.0	243	0.24	
9 - 5	napájecí uzel 110kV	118.885	-7	-58.7	-16.3	296	1.12	62
	odběrový uzel č.5	115.421	-9	57.6	14.6	297	1.02	
9 - 5 posílení	napájecí uzel 110kV	115.112	-10	-10.0	-2.8	52	0.03	11
	odběrový uzel č.5	114.614	-11	10.0	3.5	53	0.76	
9 - 4 posílení	napájecí uzel 110kV	118.885	-7	-49.5	-12.3	247	0.18	51
	odběrový uzel č.4	118.234	-8	49.3	12.1	248	0.24	
9 - 4	napájecí uzel 110kV	118.885	-7	-58.7	-16.3	296	1.12	62
	odběrový uzel č.4	115.421	-9	57.6	14.6	297	1.02	
5 - 6	odběrový uzel č.5	118.234	-8	-51.3	-14.2	260	0.90	54
	odběrový uzel č.6	115.064	-10	50.4	13.1	261	1.05	
6 - 7	odběrový uzel č.6	115.064	-10	-41.1	-9.2	211	0.15	44
	odběrový uzel č.7	114.435	-10	40.9	9.1	211	0.26	
6 - 7	odběrový uzel č.6	115.064	-10	-41.1	-9.2	211	0.15	44
	odběrový uzel č.7	114.435	-10	40.9	9.1	211	0.26	
4 - 6	odběrový uzel č.4	115.421	-9	-78.0	-20.1	403	0.16	81
	odběrový uzel č.6	115.064	-10	77.8	19.8	403	0.08	
9 - 3	napájecí uzel 110kV	118.885	-7	-46.0	-7.0	226	1.26	47
	odběrový uzel č.3	114.614	-11	44.7	5.9	227	1.95	
9 - 2	napájecí uzel 110kV	118.885	-7	-80.6	-12.0	396	2.00	80
	odběrový uzel č.2	115.112	-10	78.6	8.2	397	1.02	

Obr.17 Schéma zapojení sítě po 20 letech a znázornění proudové zatížitelnosti



7 ZÁVĚR

V mé práci jsem měl za úkol vypočítat ustálený chod sítě VVN a sledovat kdy dojde k překročení limitních hodnot proudů ve vedení popř. napětí v uzlech při známém růstu zatížení. Limitní hodnoty byly stanoveny takto. Proudové zatížení nesmělo překročit 80% I_{\max} (486A) tedy hodnota proudu dovoleného I_{dov} byla 389A. Zadaná síť byla s jedním napájecím uzlem o jmenovitém napětí $U_n = 110\text{kV}$ a s tolerancí $U_{\text{dov}} = 90\text{-}110\% U_n$. Hodnota dovoleného napětí se tedy mohla pohybovat v rozmezí $U_{\text{dov}} = 99\text{-}121\text{kV}$. Při výpočtech jsem sledoval jakým způsobem se mění uzlová napětí a jak se zvyšuje proudové zatížení vedení při 3% růstu zatížení. po dobu 20 let a v případě překročení dovolené limitní hranice navrhnout posílení vedení. Dále jsem sledoval jakým způsobem se výše uvedené hodnoty mění při různém napětí v napájecím uzlu které jsme něnil od 99 kV do 121kV

7.1 Zhodnocení výpočtů

Při napájecím napětí $U_{\text{nap}} = 99\text{kV}$ došlo k tomu že vedení mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.5 bylo zatíženo na 82% a všechna napětí v odběrových uzlech byla pod dovolenou hranicí 90% U_n

Při napájecím napětí $U_{\text{nap}} = U_n$ t.j 110kV došlo k překročení stanovení meze proudového zatížení mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.5 ve čtvrtém roce provozu. Při tomto stavu sítě by tedy nejpozději do 4 let muselo dojít k posílení sítě.

Při napájecím napětí $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ došlo k překročení stanovení meze proudového zatížení mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.5 v sedmém roce provozu. Při tomto stavu sítě by tedy nejpozději do 6 let muselo dojít k posílení sítě.

7.2 Návrh dalšího postupu

Pro další bezpečný provoz zadané soustavy navrhuji provozovat tuto soustavu s napětím v napájecím uzlu $U_{\text{nap}} = 121\text{kV}$ a nejpozději do 6 let posílit vedení mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem vybudováním nového vedení 110kV o průřezu $S = 185\text{ mm}^2$. V tomto stavu je možno provozovat síť další 7 let než dojde k překročení dovolené proudové tolerance mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.4. Po 14 letech provozu od výchozího stavu je tedy nutno vybudovat další posilovací vedení tentokrát mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.4, abychom tedy mohli síť provozovat po dobu 20 let jak bylo v zadání a účelem bakalářské práce.

Po 20 letech provozu se u zadané sítě dostáváme do stavu kdy je dosažena povolena proudová zatížitelnost mezi napájecím uzlem a odběrovým uzlem č.2 a dále i u vedení mezi odběrovým uzlem č.4 a odběrovým uzlem č.6

V praxi se tyto výpočty na ustálený chod vedení provádějí na základě výsledků měření zimních a v posledních letech i letním maxim. To znamená že v určitý den se dvakrát do roka provede měření odběrů se stejnou konfigurací sítě a na základě těchto výsledků, které se potom přenesou do výpočetního SW se sleduje možný další provoz soustavy popř. se navrhuje posílení nebo výstavba dalších vedení. Dalším kritériem které se pro určení nutnosti posílení nebo postavení nového vedení je zkoumání soustavy při poruchových stavech. Vychází se principu n-1 to znamená, že se nasimuluje porucha nejvíce zatíženého vedení v soustavě a poté se sleduje jaký vliv má tato porucha na zatížení ostatních vedení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HODINKA M., HALUZÍK E., KUČERA D., BLAŽEK V. - Přenos a rozvod elektrické energie, Ediční středisko VUT Brno, Brno 1975
- [2] BLAŽEK V., SKALA P. - Distribuce elektrické energie sítí, VUT Brno. Brno
- [3] VLADAŘ J., ZELENKA J., - Elektrotechnika a silnoproudá elektronika, SNTL /ALFA 1986
- [4] BLAŽEK V., PAAR M. - Přenosové sítě, VUT Brno, Brno 2007
- [5] HRADÍLEK Z. - Elektroenergetika- skripta VŠB, Ostrava 1982
- [6] FAJMON B., RŮŽIČKOVÁ I. - Matematika 3 Skriptum FEL, VUT Brno
- [7] FRANC L., ONDŘÍČEK M. - Výroba a rozvod elektrické energie, SPN Praha 1959

