

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ELEKTRICKÉ SÍTĚ VYUŽÍVAJÍCÍ STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ DO 1000 V

ELECTRIC NETWORKS WITH DC VOLTAGE UP TO 1000 V

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Fiala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Martin Fiala

ID: 146816

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické sítě využívající stejnosměrné napětí do 1000 V

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedení rešerše dané problematiky, jakožto kvalitního podkladu umožňující postupné řešení následujících částí.
2. Výpočet ztrát elektrické energie ve vybrané lokalitě.
3. Návrh stejnosměrně sítě NN pro danou lokalitu.
4. Výpočet ztrát elektrické energie pro stejnosměrnou síť.
5. Analýza stejnosměrné a střídavé sítě z pohledu ekonomického a technického.
6. Výhody a nevýhody jednotlivých řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít technických norem, odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

FIALA, M. *Elektrické sítě využívající stejnosměrné napětí do 1000V*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

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

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Michal Ptáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a poskytnuté konzultace při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Martinu Jordovi ze společnosti E. ON Česká republika s.r.o. za odborné vedení a rady při vypracování mé diplomové práce. Zvláštní poděkování patří za čas, který mi věnoval při konzultacích.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat svým rodičům a přítelkyni za podporu během celé doby mého studia.

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem stejnosměrné sítě nízkého napětí na napěťové hladině 1000 V stejnosměrných v obci Praskolesy u Mrákotína. Stejnosměrný rozvod bude realizován pouze na daném vývodu, který bude napájet danou lokalitu. Další část práce se zabývá popisem distribučních soustav jak už střídavých, tak i stejnosměrných. Navržená stejnosměrná síť bude využívat stávající distribuční rozvody. Dále práce popisuje problematiku dlouhých vývodů v sítích nízkého napětí a elektrických rozvodů v budovách. Výsledkem práce je porovnání ztrát mezi střídavým a navrženým stejnosměrným systémem. Dále pak hodnotí ekonomické a technické řešení navržených variant včetně jejich výhod a nevýhod.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Návrh stejnosměrné sítě; stejnosměrná síť; stejnosměrné napětí; distribuční soustava; nízké napětí; dlouhý vývod; výpočet ztrát; činné ztráty; jalové ztráty; porovnání ztrát; úbytek napětí analýza; Praskolesy u Mrákotína

ABSTRACT

This master's thesis deals with the proposal of DC low voltage network at a voltage level of 1000 V DC in Praskolesy u Mrakotina village. Direct distribution will be realized only at the terminal, which will power the village. Next part of this thesis is theoretical and its main focus is description of both DC and AC distribution systems. The proposed DC grid will use existing distribution grid. The thesis further describes the problems of long terminals in low voltage distribution systems and electrical installation in buildings. The result of this work is a comparison of the losses between AC and the proposed DC system. The last part deals with economical evaluation and technical solution for the proposed network variant, including their advantages and disadvantages.

KEY WORDS:

Proposal of DC network; DC network; DC; distribution system; low voltage; long terminal; calculation of losses; active losses; reactive losses; compared to losses; voltage drop, analysis; Praskolesy u Mrákotína

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	15
2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY – STRÍDAVÉ NAPĚTÍ.....	17
2.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	18
2.1.1 STUPEŇ ZAJIŠTĚNÍ DODÁVKY ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	19
2.2 TYPY DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV NÍZKÉHO NAPĚTÍ	20
2.2.1 SÍŤE PAPERKOVÉ	20
2.2.2 SÍŤE OKRUŽNÍ	20
2.2.3 SÍŤE MŘÍŽOVÉ	21
2.3 DLOUHÉ VÝVODY V SÍŤÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	23
2.4 ZÁKLADNÍ PRVKY DISTRIBUČNÍCH SÍŤÍ.....	24
2.4.1 VENKOVNÍ A KABELOVÉ VEDENÍ NÍZKÉHO NAPĚTÍ	24
2.4.1.1 VENKOVNÍ VEDENÍ	24
2.4.1.2 KABELOVÁ VEDENÍ.....	25
2.5 ELEKTROINSTALACE V BUDOVÁCH	26
2.5.1 DRUHY SÍŤÍ POUŽÍVANÝCH V ELEKTROINSTALACÍCH	27
2.5.1.1 TN – S	28
2.5.1.2 TN – C	29
2.5.1.3 TN – C – S.....	30
2.6 METODY PRO VÝPOČET CHODU SÍŤE	31
2.6.1 NEWTONOVA ITERAČNÍ METODA.....	31
2.7 ZTRÁTY PŘI PŘENOSU ENERGIE	35
2.7.1 STRÍDAVÝ PŘENOS VÝKONU	35
3 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY - STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ.....	36
3.1 STEJNOSMĚRNÉ SOUSTAVY NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	37
3.1.1 TOPOLOGICKÁ STRUKTURA STEJNOSMĚRNÝCH SÍŤÍ.....	37
3.1.2 ELEKTROINSTALACE V BUDOVÁCH	39
3.1.2.1 TN – S	39
3.1.2.2 TN – C	40
3.1.2.3 TN – C – S.....	40
3.2 NAPĚŤOVÉ HLADINY A POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÝCH SÍŤÍ	41
3.2.1 NAPĚŤOVÉ HLADINY	41

3.3 EXISTUJÍCÍ POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÝCH SÍTÍ	42
3.3.1 TELEKOMUNIKACE	42
3.3.2 STROJE A DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY	43
3.3.3 TRAKČNÍ SYSTÉMY	44
3.3.4 HVDC.....	44
3.3.5 STEJNOSMĚRNÝ PŘENOS VÝKONU	45
3.4 ZTRÁTY VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE	46
3.4.1 SPÍNACÍ ZTRÁTY	46
3.5 USMĚRŇOVAČE	47
3.5.1 POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE - UZLOVÉ.....	49
3.5.1.1 NEŘÍZENÉ POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE V JEDNOCESTNÉM ZAPOJENÍ	49
3.5.1.2 JEDNOFÁZOVÝ JEDNOPULZNÍ USMĚRŇOVAČ	50
3.5.1.3 JEDNOFÁZOVÝ DVOUPULZNÍ JEDNOCESTNÝ USMĚRŇOVAČ.....	51
3.5.1.4 TŘÍFÁZOVÝ TROJPULZNÍ JEDNOCESTNÝ USMĚRŇOVAČ	52
3.5.1.5 TŘÍFÁZOVÝ ŠESTIPULZNÍ UZLOVÝ USMĚRŇOVAČ	53
3.5.2 POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE - MŮSTKOVÉ.....	54
3.5.2.1 JEDNOFÁZOVÝ DVOUPULZNÍ DVOUCESTNÝ USMĚRŇOVAČ.....	54
3.5.2.2 TROJFÁZOVÝ ŠESTIPULZNÍ USMĚRŇOVAČ	54
3.5.3 POROVNÁNÍ MAXIMÁLNÍCH STŘEDNÝCH HODNOT VÝSTUPNÍCH NAPĚTÍ	55
3.5.4 KOMUTAČNÍ POKLESY	56
4 VÝPOČETNÍ PROGRAM BIZON.....	58
4.1 VÝPOČETNÍ METODY PROGRAMU BIZON	59
4.1.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ (LFOFF).....	59
4.1.2 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ SÍTĚ – ZKOFF	59
5 CHARAKTERISTIKA OBLASTI	60
5.1 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ OBLASTI OBCE PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA.....	60
6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY OBCE PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA	64
6.1 ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ	64
6.1.1 ODBĚRNÁ MÍSTA	64
6.1.2 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTOR	66
6.1.3 ÚSEKY VEDENÍ.....	67
6.1.3.1 VYPOČTENÉ ZTRÁTY	68
7 NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO ŘEŠENÍ V OBLASTI PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA	69
7.1 VARIANTY NÁVRHU STEJNOSMĚRNÉ SÍTĚ.....	69

7.1.1 VARIANTA 1	69
7.1.2 VARIANTA 2	70
7.2 MODEL SÍTĚ PRO VÝPOČET ZTRÁT A ÚBYTKU NAPĚTÍ	71
7.3 VÝSLEDKY STEJNOSMĚRNÉ ANALÝZY – VARIANTA 1	73
7.3.1 PAPERSEK ČÍSLO 1	73
7.3.2 PAPERSEK ČÍSLO 2	74
7.3.3 PAPERSEK ČÍSLO 3	74
7.3.4 VYHODNOCENÍ – VARIANTA 1	74
7.4 VÝSLEDKY STEJNOSMĚRNÉ ANALÝZY – VARIANTA 2	75
7.4.1 PAPERSEK ČÍSLO 1	75
7.4.2 PAPERSEK ČÍSLO 2	76
7.4.3 PAPERSEK ČÍSLO 3	77
7.4.4 VYHODNOCENÍ – VARIANTA 2	77
7.4.5 POROVNÁNÍ OBOU VARIANT	78
7.5 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	79
7.5.1 VARIANTA 1	79
7.5.2 VARIANTA 2	81
7.6 NÁKLADY PŘI POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÉ SÍTĚ S NAPĚTÍM 1000 V	84
7.6.1 JIŠTĚNÍ A CHRÁNĚNÍ	84
7.6.2 KABELOVÉ A VENKOVNÍ VEDENÍ	85
7.6.3 TRANSFORMÁTOR	86
7.6.4 USMĚRŇOVAČE	86
8 ZÁVĚR	87
9 POUŽITÁ LITERATURA	89
PŘÍLOHY	92
A: OBRÁZKY	92
B: VÝSLEDKY USTÁLENÉHO CHODU	93
C: STEJNOSMĚRNÁ ANALÝZA – DATA	93
D: JEDNOPÓLOVÉ SCHÉMA PRO VÝPOČET STEJNOSMĚRNÝCH POMĚRŮ V SÍTI	93
E: KARTOGRAFICKÉ MAPY OBLASTI	93

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1: Principiální schéma přenosové a distribuční soustavy [3].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-2: Topologické znázornění paprskové sítě nízkého napětí</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2-3: Topologické znázornění okružní sítě nízkého napětí [3].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-4: Znázornění zjednodušené mřížové sítě nízkého napětí [3]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-5: Topologické znázornění klasické mřížové sítě [3]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-6: Principiální řešení NN vývodu na napěťové hladině 1000 V.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2-7: Znázornění sítě TN - S [13].....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 2-8: Znázornění sítě TN - C [13]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 2-9: Znázornění sítě TN - C – S [13]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3-1: Řetězec dodávky elektřiny [16]</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3-2: Topologická struktura paprskového rozvodu u střídavých (vlevo) a stejnosměrných (vpravo) sítí [16]</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3-3: Koncept stejnosměrného napájení dlouhých vývodu NN [16].....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 3-4: Principiální řešení dvou systémů stejnosměrných sítí [16]</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 3-5: Stejnosměrná síť typu TN - S [13]</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 3-6 a) :Stejnosměrná síť typu TN – C [13]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 3-6 b) :Stejnosměrná síť typu TN – C - dva zdroje [13]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 3-7: Stejnosměrná síť typu TN - C - S [13].....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 3-8: Znázornění typického telekomunikačního rozvodu založeného na stejnosměrné síti [17].....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 3-9: Znázornění energetického systému HEV s použitím stejnosměrného rozvodu [17]</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 3-10: Liniové znázornění HVDC systému [17].....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 3-11: Spínací ztráty na tranzistorech [17]</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 3-12: Vypínací ztrátový výkon diody [17]</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 3-13: Využití usměrňovačů v technických oborech [16]</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 3-14: Blokovaná sestava polovodičového usměrňovače [20]</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 3-15: q-pulsní usměrňovač v jednosměrném uzlovém zapojení [20]</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 3-16: Jednopolzní usměrňovač s obecnou zátěží [19].....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 3-17: Průběh napětí a proudu jednopolzního usměrňovače s obecnou ohmickou zátěží [19].....</i>	<i>51</i>

<i>Obrázek 3-18: Dvoupulzní usměrňovač s obecnou zátěží [19].....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 3-19: Trojpulzní usměrňovač s obecnou ohmickou zátěží [20].....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 3-20: Průběh napětí a proudu dvojpulzního usměrňovače s obecnou ohm. zátěží [19] .</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 3-21: Průběh napětí a proudu trojpulzního usměrňovače s obecnou ohmickou zátěží [19].</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 3-22: Dvoupulzní usměrňovač v můstkovém zapojení [21].....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 3-23: Trojfázový šestipulzní usměrňovač v můstkovém zapojení [20]</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 3-24: Komutační poklesy ve fázovém napětí [22]</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 5-1: Poloha obce Praskolesy u Mrákotína [27]</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 5-2: Kmenové vedení VN 86 - napájení obce Praskolesy u Mrákotína.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 7-1: Celkové náhradní jednopólové schéma oblasti Praskolesy u Mrákotína pro stejnosemernou analýzu</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 7-2: Vyvedení výkonu z DTS - Varianta 1.....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 7-3: Schéma zapojení dvou šestipulzních usměrňovačů v sérii [19]</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 7-4: Zjednodušené schéma zapojení s jedním trojvinuťovým transformátorem.....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 7-5: Zjednodušené schéma zapojení se dvěma transformátory.....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 7-6: Vyvedení výkonu z DTS - Varianta 2.....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 7-7: Provedení čtyřpólového jističe pro jistění v síti s napětím 1000 V stejnosmerných [31].....</i>	<i>85</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2-1: Porovnání vlastností nepoužívanějších typů NN sítí [3].</i>	22
<i>Tabulka 2-2: Používané průřezy venkovního vedení používané u společnosti E. ON</i>	25
<i>Tabulka 2-3: Nepoužívanější průřezy kabelového vedení u společnosti E. ON</i>	26
<i>Tabulka 2-4: Vysvětlivky ke schématům dle IEC 60617 - 11[13]</i>	27
<i>Tabulka 3-1: Shrnutí argumentů pro volbu stejnosměrné úrovně napětí [16]</i>	41
<i>Tabulka 3-2: Maximální střední hodnoty výstupního napětí $U_{d,max}$ různých usměrňovačů [21].</i>	55
<i>Tabulka 5-1: Parametry použitého distribučního transformátoru</i>	61
<i>Tabulka 5-2: Odběrná místa v obci Praskolesy u Mrákotína</i>	62
<i>Tabulka 5-3: Používané typy vedení v obci Praskolesy u Mrákotína - technické parametry</i>	62
<i>Tabulka 5-4: Rozdělní použitého typu vedení na jednotlivé úseky</i>	63
<i>Tabulka 6-1: Výchozí vypočtené hodnoty odběrů a proudů při ustáleném chodu</i>	65
<i>Tabulka 6-2: Vypočtené hodnoty při ustáleném chodu - distribuční transformátor</i>	66
<i>Tabulka 6-3: Vypočtené hodnoty při ustáleném chodu - úseky vedení</i>	67
<i>Tabulka 6-4: Celkové ztráty na vedení</i>	68
<i>Tabulka 7-1: Stejnosměrné výkony v odběrných místech</i>	70
<i>Tabulka 7-2: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 1</i>	73
<i>Tabulka 7-3: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 1</i>	74
<i>Tabulka 7-4: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 3 – Varianta 1</i>	74
<i>Tabulka 7-5: Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát: Praskolesy u Mrákotína - Varianta 1</i>	75
<i>Tabulka 7-6: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 2 – 500 V</i>	75
<i>Tabulka 7-7: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 2 – 1000 V</i>	76
<i>Tabulka 7-8: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 2 – 500 V</i>	76
<i>Tabulka 7-9: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 2 – 1000 V</i>	77
<i>Tabulka 7-10: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 3 – Varianta 2 – 1000 V</i>	77
<i>Tabulka 7-11: Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát: Praskolesy u Mrákotína - Varianta 2</i>	78
<i>Tabulka 7-12: Celkové ztráty v síti - Varianta 1 a 2</i>	78

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

SYMBOL	POPIS	JEDNOTKA
ΔP	Ohmické ztráty	W
$\Delta P_{\check{c}}$	Ztráty činného výkonu	W
ΔP_s	Spínací ztráty	W
ΔQ_j	Ztráty jalového výkonu	Var
ΔU	Úbytek napětí	V
Δx	Rozdíl odhadu kořenu od skutečné hodnoty	–
Δy	Rozdíl skutečné hodnoty a hodnoty vypočítané z iterace	–
B	Kapacitní susceptance	S
C	Kapacita	F
C_k	Měrná kapacita	F/km
d_{Kom}	Relativní hloubka komutačního poklesu	-
f	Funkce	–
f_s	Frekvence spínání	Hz
G	Konduktance	S
i	Index řádku matice	–
I	Proud	A
I_{AC}^*	Střídavý proud (komplexně sdružený)	A
$I_{\check{c}}$	Činná složka proudu	A
I_d	Proud diodou	A
I_{DC}	Stejnoseměrný proud	A
I_j	Jalová (imaginární) složka proudu	A
I_{max}	Maximální proud	A
I_n	Jmenovitý proud jisticího prvku	A
I_n	Jmenovitý proud	A
I_{RRM}	Maximum Reverse Recovery Current	A
j	Index sloupce matice	–
k	Pořadí iterace	–
l	Délka vedení	km
L	Indukčnost	H
L_k	Měrná indukčnost	H/km
m	Počet fází	–
n	Pořadí / počet	–
P_{AC}	Střídavý činný výkon	W
$P_{\check{c}}$	Činný výkon	W
P_{DC}	Stejnoseměrný výkon	W
q	Počet pulzů	–
Q_{AC}	Střídavý jalový výkon	Var
Q_i	Jalový výkon v i-tém řádku matice	Var
Q_{ij}	Jalový výkon v j-tém sloupci matice	Var
Q_j	Jalový výkon	VAR
R	Rezistence	Ω
R_k	Měrný odpor	Ω /km
S_{AC}	Střídavý zdánlivý výkon	VA
S_n	Nominální zdánlivý výkon	VA
t	Čas	s
$t_{c(off)}$	Čas vypnutí	s

$t_{c(on)}$	Čas zapnutí	s
t_{rr}	Doba zotavení	s
U	Napětí	V
U_{AC}	Střídavé napětí	V
U_d	Napětí na diodě	V
U_{DC}	Stejnsměrné napětí	V
U_i	Efektivní hodnoty napětí v i-tém řádku matice	V
U_z	Napětí na zátěži	V
x	Kořen rovnice	–
$x^{(0)}$	Odhad kořenu rovnice v nulté iteraci	–
$x^{(n)}$	Odhad kořenu rovnice v n-té iteraci	–
X	Induktivní reaktance	Ω
y	Hodnota funkce	–
Z	Impedance	Ω
α_{ii}	Úhel natočení fázoru uzlové admitance diagonálního prvku	$^\circ$
α_{ij}	Úhel natočení fázoru uzlové admitance mimodiagonálního prvku	$^\circ$
δ_i	Úhel natočení fázoru napětí v i-tém řádku matice	$^\circ$
δ_j	Úhel natočení fázoru napětí v j-tém sloupci matice	$^\circ$
ω	Úhlová frekvence	rad/s

ZKRATKA**VÝZNAM**

AC	Střídavý proud - Alternating current
NAYY	Instalační kabely s hliníkovým jádrem a PVC izolací
AYKY	Instalační kabely s hliníkovým jádrem a PVC izolací
CYKY	Instalační kabely s měděným jádrem a PVC izolací
AES	Závěsný kabel pro venkovní vedení.
C	Kombinovaný - Combiné (franc.)
CSC	Řiditelný zdroj proudu - Current source converter
DC	stejnsměrný proud - Direct current
DS	Distribuční soustava
DTS	Distribuční transformační stanice
HVDC	Vysoko napěťový stejnsměrný přenos - High voltage direct current
I	Izolovaný - Insulation (angl.)
IEC	Mezinárodní úřad pro elektrotechniku - International electrotechnical commision
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem - Insulated Gate Bipolar Transistor
N	Neutrální - Nutre (franc.)
NN	Nízké napětí
NT	Nízký tarif
NFA2X	Závěsný kabel pro venkovní vedení s XLPE izolací
PE	Polyetylen
PS	Přenosová soustava
PVC	Polyvinylchlorid

S	Oddělný - Separé (franc.)
T	Země - Terre (franc.)
T	Transformátor
VN	Vysoké napětí
VSC	Řiditelný zdroj napětí - Voltage-source converters
VT	Vysoký tarif
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí
XLPE	Zesítený polyetylén

1 ÚVOD

Cílem práce je návrh stejnosměrné sítě pro danou lokalitu, která je napájena střídavou sítí nízkého napětí a zhodnotit technickou realizaci navrženého řešení. Pro danou lokalitu bude provedena střídavá analýza chodu sítě s ohledem na ztráty v síti. Tato analýza bude sloužit, jako reference pro obdobnou stejnosměrnou analýzu chodu sítě pro navrženou stejnosměrnou síť. Stejnosemřnou analýzou sítě se určí ztráty v navržené stejnosměrné síti, které pak budou porovnány se ztrátami sítě střídavé. Porovnáním ztrát v síti, budeme moci určit, jak moc se vyplatí, respektive nevyplatí provozovat navrženou stejnosměrnou síť v dané lokalitě s ohledem na ztráty při přenosu eklektické energie.

Historie přenosu a distribuce elektrické energie započala koncem devatenáctého století. První distribuce elektrické energie se uskutečnila, dle návrhu francouzského fyzika Marcela Repreho, v Německu v roce 1882 mezi městy Miesbachem a Mnichovem. Přenos elektrické energie byl, prostřednictvím stejnosměrného proudu, uskutečněn na vzdálenost 57 km s účinností přenosu elektrické energie 22 % [2].

Počátek rozvoje eklektických sítí v českých zemích začal v roce 1882, kdy byla zavedena elektřina do Mahenova divadla v Brně a sloužila k jeho osvětlení. V tehdejší době bylo toto osvětlení realizováno s použitím stejnosměrného napětí. Používání stejnosměrného napětí, nejčastěji 120 V, mělo v začátcích elektrifikace několik nevýhod. Při přenosu na větší vzdálenosti zde byly velké ztráty, kde část elektrické energie byla zmařena Joulovými ztrátami ve vodičích v teplo. Tyto ztráty byly postupem času zmenšovány používáním vyššího napětí nebo použitím vodičů o menším měrném odporu, tj. s lepšími materiálovými vlastnostmi [2].

Až vynález transformátoru z roku 1876, objev točivého magnetického pole z roku 1886 a konstrukčně jednoduchého asynchronního motoru vytvořily předpoklady k hospodárnému přenosu elektrické energie. V roce 1891 byl uskutečněn první střídavý přenos o délce 175 km s napětím 15 kV a výkonem 250 kVA. Kolem roku 1918 byl již elektrický proud přístupný pro 34 % obyvatel tehdejší Československé republiky. Po druhé světové válce bylo elektrifikováno 70 % všech obcí. S postupem času docházelo ke zlepšování a zdokonalování přenosu elektrické energie. Po roce 1989 prodělala i česká elektroenergetika zásadní změny [2].

V současnosti se klade velký důraz na snížení spotřebované energie, respektive energetických ztrát. Společně s těmito úspornými požadavky se uvažuje o zpoplatnění činné a jalové složky odebíraného proudu, potažmo výkonu i u sítí nízkého napětí. Proto je vhodné uvažovat o vhodné alternativě, která dokáže zajistit snížení ztrát v síti a absenci kompenzačních prostředků. Touto alternativou, k dosavadnímu střídavému rozvodu v oblasti sítí NN, se jeví použití stejnosměrného napětí, potažmo nahrazení střídavé sítě sítí stejnosměrnou.

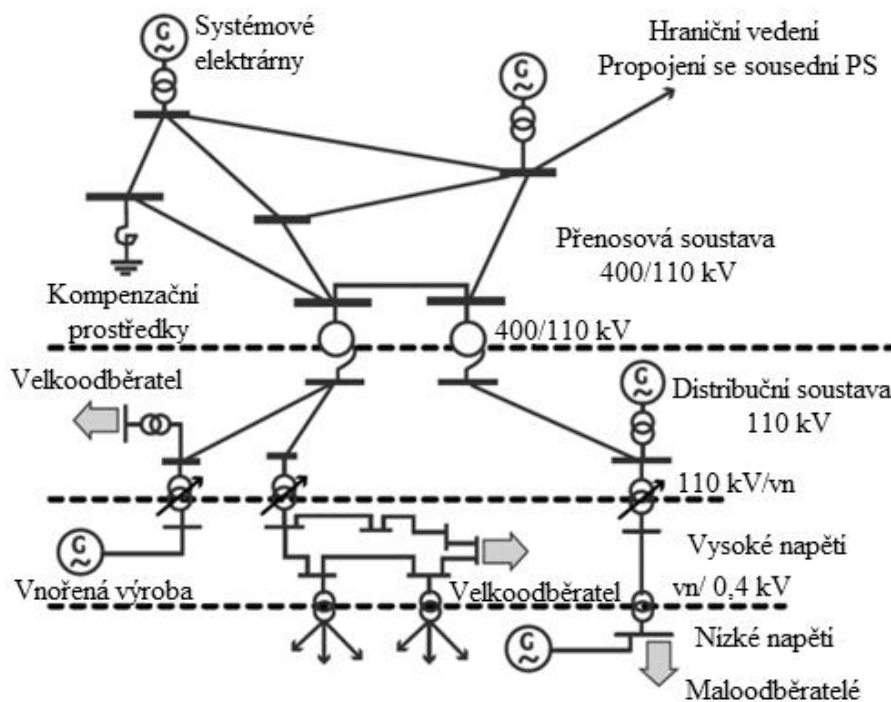
Proto jedním z cílů této diplomové práce je teoretická část popisující střídavé distribuční sítě, viz kapitola č. 2, tj. kladené požadavky distribuční sítě s popisem nejpoužívanějších typů provozního zapojení a použitých prvků sítě, popsáním problematiky dlouhých vývodů v sítích nízkého napětí, kde je popsáno několik technických řešení jak zabránit poklesu napětí na konci těchto vývodů, použité způsoby elektroinstalace v budovách, metody výpočtu chodů střídavé sítě a ztráty při přenosu elektrické energie. Obdobně popisuje kapitola č. 3 stejnosměrné sítě

Dále bude cílem práce analyzovat a porovnat použití stejnosměrné i střídavé sítě z pohledu ekonomického, technického a popsat výhody a nevýhody jednotlivých řešení

2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY – STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ

Cílem této práce je navrhnout stejnosměrnou síť pro danou oblast. Tento návrh se bude opírat o použití stávajících rozvodů elektrické energie v dané oblasti, ale může být aplikován i na jinou oblast s jiným uspořádáním sítě. Proto je vhodné zmínit a popsat distribuční sítě využívající střídavé napětí. Popsat požadavky jaké se kladou na tuto síť, jaké druhy či typy sítí se používají, co tvoří základ této sítě atd. Zpracování této kapitoly vyšlo z požadavků společnosti E. ON.

Elektrizační soustava slouží jako nástroj pro přenos a distribuci elektrické energie od výrobce až ke konečnému spotřebiteli. Zahrnuje v sobě proces výroby, přenosu a distribuce elektrické energie. Pro distribuci elektrické energie slouží distribuční soustava. Distribuce elektrické energie začíná v transformační stanici 400/110 kV a končí u spotřebitele na napěťové hladině 400/230 V. Mezi napěťovou hladinou 110 kV a 0,4 kV dochází ještě k jedné transformaci a to v transformační stanici 110/22(35) kV. Podle velikosti spotřeby elektrické energie a zároveň podle velikosti napětí dělíme spotřebitele na: velkoodběratele (napěťová hladina 110 kV), středoodběratele (napěťová hladina 22(35) kV) a maloodběratele (napěťová hladina 400/230 V) [3].



Obrázek 2-1: Principiální schéma přenosové a distribuční soustavy [3]

Distribuční soustava je soubor vzájemně propojených vedení a zařízení od napěťové hladiny 110 kV a níže, výjimku tvoří vybraná vedení a zařízení na napěťové hladině 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy. Dále řadíme do distribuční soustavy vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV. Tato vedení

slouží k zajištění distribuce elektrické energie na vymezeném území České republiky (viz Obrázek P-1). Distribuční soustava dále slouží ke správné funkci a napájení většiny systémů a to: měřicích, ochranných, řídicích, zabezpečovacích, informačních a telekomunikačních aj. Distribuční soustavy jsou zřizovány a provozovány ve veřejném zájmu. Hlavním úkolem distribuční soustavy je bezpečné a hospodárné zásobování odběratelů elektrinou v požadovaném množství a kvalitě v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele distribuční soustavy. Kromě toho zajišťuje systémové a podpůrné služby na úrovni distribuční soustavy [3].

Provozovatel distribučních soustav je právnická či fyzická osoba, která je držitelem licence na distribuci elektřiny a to na částech vyjmutých z území provozovatele regionální distribuční soustavy. Provozovatel distribuční soustavy odpovídá za její bezpečný a spolehlivý provoz s ohledem přiměřeným k ochraně životního prostředí a za její rozvoj. Tyto činnosti řídí prostřednictvím svého technického dispečinku provozovatele distribučních soustav a svých provozních a rozvojových útvarů. Provozovatel distribuční soustavy je povinen na vymezeném území, na základě uzavřených smluvních dohod umožnit distribuci elektřiny, a připojit k distribuční soustavě každého, kdo o to požádá a splňuje podmínky dané energetickým zákonem (předpis č. 458/2000 Sb.), jeho prováděcími vyhláškami a Pravidly provozování distribučních soustav. Místo a způsob připojení k distribuční soustavě se určí tak, aby nedošlo k přetížení nebo překročení parametrů žádného prvku soustavy [3].

2.1 POŽADAVKY KLADENÉ NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY

Jak už je zmíněno, distribuční sítě zajišťují rozvod elektrické energie z elektrických uzlových stanic přenosové soustavy, až ke koncovým spotřebitelům viz Obrázek 2–1 [3]. Účel městských a průmyslových sítí, které jsou součástí distribuční soustavy, je zajistit zásobování spotřebitelů elektrickou energií v potřebném množství a místě, v požadované kvalitě a v požadovaném čase při zachování spolehlivosti dodávky a při respektování hospodárnosti. Jednotlivé požadavky kladené na distribuční sítě jsou:

Kvalita elektrické energie – zde se především jedná o stálou velikost napětí a frekvenci 50 Hz, které mají být v povolených mezích. U napětí je dovolená odchylka od jmenovité hodnoty $\pm 10\%$ a u frekvence $\pm 1\%$. Frekvenci nelze z hlediska distribuční sítě ovlivnit, je dána především primárními zdroji elektrické energie pracujícími do přenosové soustavy. Odchylny napětí od jmenovité hodnoty v distribučních sítích vznikají zejména úbytkem napětí na vedeních a transformátorech. Tento úbytek závisí na rozsahu sítě, typu a způsobu provozu, průřezu elektrického vedení, na charakteru spotřebičů a umístění napájecích bodů. Nepříznivým vlivem, který omezuje přenosovou schopnost sítě, je nesymetrie napájecího napětí, vyvolaná například nesouměrně rozloženými jednofázovými odběry. Při nesymetrii napájecího napětí není možné transformátory ani vedení provozovat při jmenovitém výkonu.

Spolehlivost dodávky elektrické energie – zde se jedná o výpadky dodávek elektrické energie, tyto výpadky je potřeba snižovat na minimum. U spotřebičů zařazených v 1. stupni zabezpečení dodávky elektrické energie nesmí dojít k výpadku. Došlo by k přímému ohrožení životů nebo by mohly nastat velké materiální škody. Spolehlivost dodávky elektrické energie lze ovlivnit výběrem použitých zařízení, u kterých je minimální pravděpodobnost výskytu poruchy. Dále lze spolehlivost ovlivnit zálohováním elektrického vedení, transformátorů nebo dimenzací transformátorů.

Jednoduchost a přehlednost sítě – toto kritérium zaručuje snadnou údržbu zařízení. Dále zvyšuje bezpečnost pracovníků obsluhy i údržby, omezuje chyby při obsluze zařízení. Jednoduchost a přehlednost se vyznačuje používáním menšího počtu typů zařízení v oblasti vysokého a nízkého napětí s použitím vybraných průřezů kabelů a vodičů, velikostí transformátorů aj.

Ekonomický provoz sítě – zde se jedná o hospodárny provoz sítě při různých provozních stavech a při odběrech s různou účinností. Jedná se tedy o minimalizaci činných a jalových ztrát v síti, které lze ovlivnit změnou konfigurace distribuční sítě a optimálním dělením, počtem transformátorů v provozu či kompenzací spotřebičů.

Ekonomický návrh distribuční sítě – zde se jedná o minimální vynaložení investic na výstavbu a provoz distribuční sítě. Hledá se kompromis mezi náklady na investice a provozními náklady, mezi zajištěním spolehlivé dodávky elektrické energie a bezpečnosti osob atd. [6].

2.1.1 STUPEŇ ZAJIŠTĚNÍ DODÁVKY ELEKTRICKÉ ENERGIE

Podle § 16112 normy ČSN 34 1610 jsou dány tři stupně zajištění dodávky elektrické energie a to [4]:

- a) *„Dodávky 1. stupně jsou dodávky, které musí být zajištěny za každých okolností, jelikož jejich přerušení může způsobit buď ohrožení lidských životů (např. čerpadla požární vody a výtahy určené k evakuaci osob a materiálu) nebo velké národohospodářské ztráty znehodnocením výroby, zničením zařízení, zastavením důležitých strojů sloužících k udržování technologického procesu, které značně převyšují náklady na zajištění 1. stupně; rozhodnutí, že jde o dodávku 1. stupně, je třeba podložit náležitým technickoekonomickým zdůvodněním“*
- b) *„Dodávky 2. stupně jsou dodávky, které mají být pokud možno zajištěny, jelikož jejich přerušení a zastavení důležitých strojů může způsobit jen podstatné zmenšení, nebo zastavení výroby (aniž při tom nastane ohrožení osob).“*
- c) *„Dodávky 3. stupně jsou dodávky, které nemusí být zajišťovány zvláštními opatřeními.“*

U 1. stupně dodávky elektrické energie je potřeba, dle § 16112 normy ČSN 34 1610, zajistit napájení ze dvou na sobě nezávislých zdrojů, kde každý z nich musí mít dostatečný výkon, aby

při vypadnutí jednoho zdroje byla zajištěna dodávka elektrické energie v 1. stupni. Porucha na kterémkoli napájecím vývodu musí být signalizována. U zajištění dodávek menších výkonů a tam, kde to jde, může být jako druhý napájecí zdroj použito záložní soustrojí se spalovacím motorem, akumulátory aj.

U 2. stupně zajištění dodávky elektrické energie, na rozdíl od 1., má dle ČSN 34 1610, být zajištěna vzájemná záloha napáječů a transformátorů bez dalších investic. Za dostatečné jištění se považuje připojení napájení alespoň na dva transformátory nebo na dvě skupiny transformátorů.

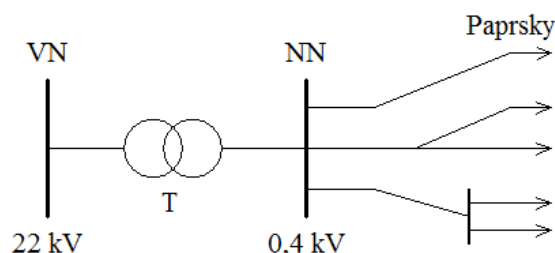
Pro 3. stupeň zajištění dodávky stačí pouze na jeden zdroj bez dalšího zajištění [5].

2.2 TYPY DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Distribuční soustavy nízkého napětí se navrhují s ohledem na charakter napájeného objektu nebo oblasti, které mají většinou odlišnou velikost požadovaných výkonů a stupně zajištění dodávky elektrické energie. Uvedená kritéria pak rozhodují nejen o dimenzování jednotlivých částí sítě, ale také o jejich konfiguraci a způsobu připojení odběrů.

2.2.1 SÍŤE PAPERKOVÉ

U paprskových sítí, viz Obrázek 2–2, vycházejí jedno vedení z napájecího místa například z transformační stanice, spínací stanice nebo rozvodné stanice a zásobují jednotlivé odběry. Každý vývod, respektive paprsek, vede samostatně bez možnosti vzájemného pospojování. Tento způsob rozvodu je obvykle nejlevnější. Tento způsob vykazuje nejmenší jistotu zásobování odběru elektrickou energií. Paprsková síť se obvykle používá v obcích, v malých městech i v menších průmyslových objektech [3].

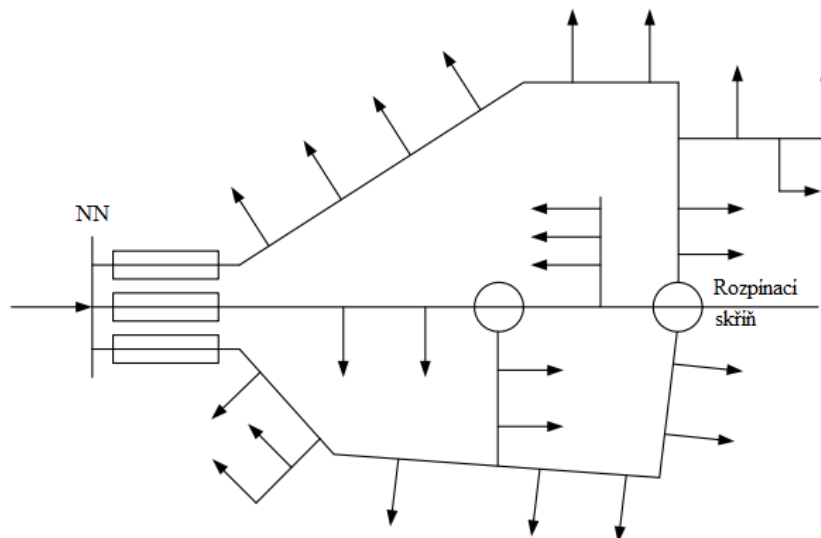


Obrázek 2-2: Topologické znázornění paprskové sítě nízkého napětí

2.2.2 SÍŤE OKRUŽNÍ

Okružní síť, viz Obrázek 2–3 [3], se skládá z okružních vedení, kde konce těchto vedení, například dvou, jsou připojeny do stejného napájecího místa a každý odběr je možné napájet ze dvou stran. To má za následek zlepšení zajištění dodávky elektrické energie při poruše. Okružní síť se vyznačuje menším kolísáním napětí v odběrových místech a použitím menších průřezů vedení. U těchto druhů sítí jsou zapotřebí složitější ochrany v porovnání se sítěmi paprskovými.

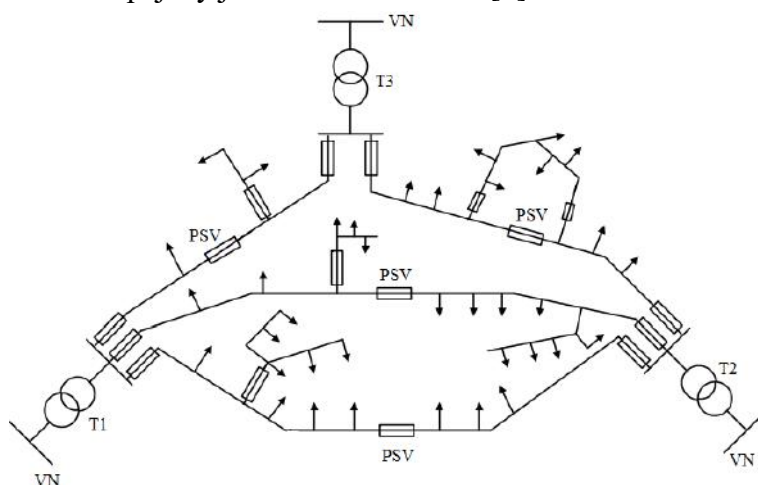
Tato síť se používá pro paralelní spolupráci několika elektráren, které jsou v jejím okruhu. Zabezpečuje lépe dodávku elektrické energie jak mezi elektrárnami, tak i do společné odběrové oblasti elektráren. Tento způsob provozování sítě se používá především k napájení větších měst a větších obcí pro nízké, ale i vysoké napětí [2].



Obrázek 2-3: Topologické znázornění okružní sítě nízkého napětí [3]

2.2.3 SÍŤE MŘÍŽOVÉ

Zjednodušená mřížová síť – Mřížovou zjednodušenou síť NN (Obrázek 2-5 [3]) lze vytvořit tehdy, když do společné sítě pracují alespoň dva transformátory VN/NN. Mezi těmito transformátory je hlavní vedení obvykle většího průřezu, které je jistěno výkonovými (hlavními) pojistkami na vývodech z DTS. Ve vhodných místech těchto hlavních vedení jsou slabší pojistky zvané pojistky slabé vazby (PSV). Podle zkušeností z provozu by měl být poměr jmenovitých proudů pojistek hlavních ku PSV 2 : 1. Zjednodušená mřížová síť tedy reaguje na poruchy na straně NN, nikoliv na straně VN. Distribuční transformovny s transformátory T 1, T 2 a T 3 jsou většinou napájeny jedním vedením VN [3].

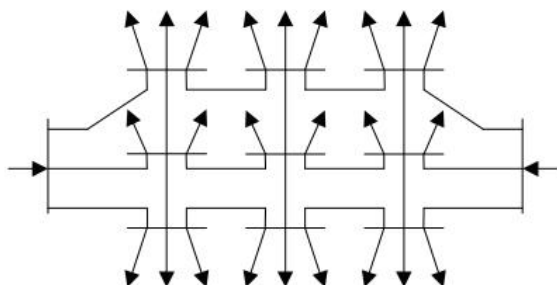


Obrázek 2-4: Znázornění zjednodušené mřížové sítě nízkého napětí [3]

Klasická mřížová síť - Klasické mřížové sítě jsou používány ve větších městech s měrnou hustotou 1000 kW/km^2 a více, kde je několik transformačních stanic napájených nejméně dvěma nebo více napáječi (3 – 5) VN. Klasická mřížová síť se projevuje lepší bezpečností, při poruše některého napájecího vývodu VN.

Výhody mřížových sítí: - Lépe využité transformátory i vedení. Rovnoměrnější rozložení zatížení mezi transformátory, tj. při stejném zatížení je menší počet transformačních stanic v porovnání s paprskovou nebo okružní sítí. Zmenší se úbytek napětí i kolísání napětí. Zmenší se ztráty v síti. Velká výhoda mřížových sítí je, že při větší poptávce, tj. při zvětšení spotřeby elektrické energie není potřeba rekonstrukce sítě, stačí do vhodných míst sítě umístit další transformovny. Nevýhoda mřížových sítí je větší zkratový proud v síti NN [2].

Na Obrázku 2-6 [3] je znázorněné topologické schéma klasické mřížové sítě.



Obrázek 2-5: Topologické znázornění klasické mřížové sítě [3]

Porovnání některých vlastností a specifikací tří typů sítí NN je uvedeno v Tabulce 2-1 [3].

Tabulka 2-1: Porovnání vlastností nejpoužívanějších typů NN sítí [3].

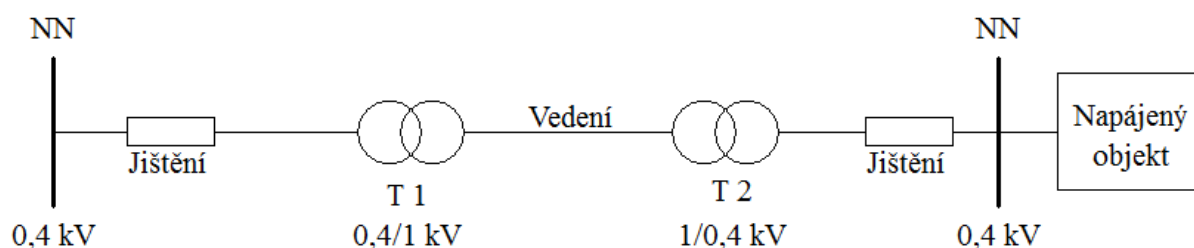
Vlastnosti	Mřížová síť - klasická	Mřížová síť - zjednodušená	Paprsková síť
Pravděpodobnost výpadku	Malá	Větší	Největší
Jistota zásobování	Největší	Větší	Malá
Kvalita napětí - U Úbytek napětí - ΔU	Stabilní napětí Nejmenší úbytek napětí	Menší kolísání napětí Poloviční úbytek oproti síti paprskové	Nestabilní napětí Velký úbytek
Připojování koncentrovaných odběrů	Odběry až do poloviny výkonu transformátoru	Odběry až do čtvrtiny výkonu transformátoru	Nelze
Využití transformátoru a vedení	Ušetří se 30 % výkonu transformátoru nejlepší využití	Střední	Malé využití, nestejně zatěžování
Ztráty elektrické energie	Až o 30 % menší než u paprskové sítě	Střední	Velké
Zkratové proudy	Největší	Střední	Nejnižší
Přehlednost sítě	Malá	Střední	Velká
Zpětné napětí při rozpojení	Ano	Ano	Ne
Poruchy v síti VN	Neovlivní napájení	Výpadek napětí	Výpadek napětí
Poruchy v síti NN	Neovlivní napájení	Neovlivní napájení	Výpadek napětí

2.3 DLOUHÉ VÝVODY V SÍTÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Budování distribučních sítí se, podle jejich účelu, realizuje venkovním vedením nebo vedením kabelovým. Těmito vedeními jsou propojeny jednotlivé transformátory a jsou jimi připojeni odběratelé elektrické energie. Jak kabelová, tak i venkovní vedení jsou používána ve velkém rozsahu aplikací a jejich použití závisí na technických a ekonomických podmínkách a způsobu napájení dané oblasti.

Vedení nízkého napětí se jmenovitým napětím 0,4 kV slouží k distribuci elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až ke spotřebitelům. Hlavní vedení NN se navrhují a provozují v okružním provedení, rozpojené na jednotlivé paprsky. Problém může nastat na konci těchto paprsků v případě, že se jedná o samostatné vedení, které napájí vzdálený odběr. V tomto bodě vlivem parametrů vedení může dojít k podpětí, tj. k poklesu napětí pod dovolenou mez. Toto podpětí lze řešit standardními technickými řešeními jako je zvětšením průřezu vývodu s podpětím, stavbou nové trafostanice v blízkosti problematického odběru, přepnutím odbočky vinutí VN u distribučního transformátoru nebo použitím stabilizátorů střídavého napětí respektive linkových kondicionérů. Všechna tato řešení mají své pro a proti, například výstavba nové trafostanice je velice nákladná, ale umožňuje významné navýšení výkonu v dané lokalitě.

Dále je možnost řešit podpětí nestandardními technickými řešeními. Jedním z takovýchto řešení je zvětšení průřezu nulového vodiče u vývodu VN. Při nesymetrickém jednofázovém zatížení dlouhých vývodu nízkého napětí vzniká na nulovém vodiči úbytek napětí, důsledkem zpětného toku proudu směrem ke zdroji. Tento proud posune střed hvězdy napětí o úbytek na nulovém vodiči. Poté vzniká nesymetrie napětí, mezi zatíženou fází a nezatíženými fázemi, která může přesahovat dovolené meze (viz kap. 2. 1). Dalším nestandardním řešením je provozování vedení NN na napětěové hladině 1 kV. Tento způsob byl zvažován už v roce 2002, kde byl vypracován projekt, který sice nebyl realizován, ale ukázal, že tento způsob přenosu je efektivní a poměrně účinný. Schématický je toto řešení znázorněno na Obrázku 2–6. Toto řešení v porovnání se standardními řešeními má nejnižší náklady na realizaci [7].



Obrázek 2-6: Principiální řešení NN vývodu na napětěové hladině 1000 V

2.4 ZÁKLADNÍ PRVKY DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ

V distribučních sítích jsou používány hladiny sdruženého napětí 110, 22, 35, 0,4 kV aj. Základními prvky elektrizační soustavy, potažmo distribučních sítí jsou vedení, transformátory, tlumivky a kondenzátory. Pro řešení poměrů v těchto sítích je potřeba znát parametry jednotlivých prvků. Některé z těchto parametrů lze stanovit na základě použitých materiálů a geometrického uspořádání prvků s pomocí výpočtu nebo měřením [1].

Elektrické poměry v sítích jsou obecně nejvíce ovlivňovány třemi komplexními veličinami.

Podélná impedance:

$$\bar{Z}_v = (R_k + jX_k) \cdot l, \quad (2-1)$$

kde \bar{Z}_v je podélná impedance vedení (Ω), R_k je měrný odpor vedení (Ω/km), X_k je měrná reaktance vedení (Ω/km) a l je délka (km).

Příčná admitance u vedení:

$$\bar{Y}_v = (G_k + jB_k) \cdot l, \quad (2-2)$$

kde \bar{Y}_v je podélná admitance vedení (S), G_k je měrná konduktance vedení (S/km), B_k je měrná susceptance vedení (S/km).

Příčná admitance u transformátorů:

$$\bar{Y}_t = G_t - jB_t, \quad (2-3)$$

kde \bar{Y}_t je příčná admitance transformátoru (S), G_t je konduktance transformátoru (S), B_t je susceptance transformátoru (S).

2.4.1 VENKOVNÍ A KABELOVÉ VEDENÍ NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Elektrická vedení jsou jedním ze základních prvků přenosových i distribučních sítí a zahrnují do sebe vodiče, izolační materiály a konstrukce, které jsou určeny pro přenos elektrické energie mezi dvěma uzly elektrické sítě. Elektrická vedení je možné dělit na kabelová a venkovní. Použití kabelového či venkovního vedení je závislé na topografických či technických podmínkách. Použití je dále závislé na stanovených požadavcích na bezpečnost i spolehlivost provozu vedení, popřípadě se bere v potaz ekologická otázka související s výstavbou a provozem distribučních soustav.

2.4.1.1 VENKOVNÍ VEDENÍ

Venkovní vedení je ve většině případů tvořeno holými vodiči, které jsou vedeny nad terénem. Tyto vodiče jsou podpírány vhodnými podpěrnými prvky (konzole, stožáry...) na těchto bodech jsou přichyceny k izolátorům. Venkovní (nadzemní) vedení jsou používány tam, kde je pro ně dostatek prostoru.

Vedení používající napěťovou hladinu 0,4 kV má omezenou přenosovou kapacitu výkonu, která je limitována úbytkem napětí na vedení. Budování nových venkovních sítí NN se provádí v malých obcích s malou zástavbou, u síťových výběžků a samot nebo případech, kde by pokládka zemních kabelů, způsobovala velké technické potíže a byla zbytečně finančně náročná. Při budování těchto vedení se využívají holé vodiče typu AlFe, izolované vodiče nebo závěsné kabely [3]. Používané typy vedení ve společnosti E. ON se řídí prováděcím předpisem ECZR-PP-SDS-062. Holé vodiče venkovního vedení o průřezech uvedených v tabulce č. 1 se používají jako náhrada při obnově sítě za staré vodiče při zachování stávajících podpěrných bodů (betonové sloupy a střešníky) bez domovních přípojek, na které se používají závěsné kabely o daných průřezech (viz tab. č. 1). Dále se holé vodiče používají na nově budované podpěrné body. Izolované vodiče se používají jak na nové, tak i na staré podpěrné body, všude tam, kde nelze použít kabelová vedení a je potřeba zachovat bezpečnost před úrazem elektrickým proudem a zároveň všude tam, kde nelze použít standardní holé vodiče, jako jsou lesní úseky se špatnou dostupností aj., kde použití izolovaných vodičů výrazně zvýší provozní spolehlivost sítě. Dle podnikových norem PNE 34 7659 – 3 [9], PNE 34 7509 [11] a PNE 34 7659 – 5 [10], které jsou závazné pro všechny distribuční společnosti, jsou všechna vedení, kabelová s PE a PVC izolací a izolované holé vodiče s PE izolací, (viz Tabulka 2-2) zkoušena stejnosměrným napětím o velikosti 12 kV po dobu pěti minut. Lze je tedy provozovat stejně jako holé neizolované vodiče na stejnosměrné napěťové hladině 1 kV. Tato napěťová hladina vyhovuje české legislativě, respektive normě ČSN 33 0010 ed. 2 [13], která definuje soustavy nízkého napětí o napěťových hladinách 1 kV u střídavých a 1,5 kV u stejnosměrných soustav. Nad tyto napěťové hladiny se už nejedná o nízké napětí, ale o napětí vysoké. Stávající infrastruktura venkovních a kabelových vedení lze bezproblémově použít pro vedení stejnosměrného napětí.

Tabulka 2-2: Používané průřezy venkovního vedení používané u společnosti E. ON

Venkovní vedení NN		
Holé vodiče	Izolované vodiče	Závěsné kabely
4 x AlFe 25/4	4 x 50 mm ²	4 x 16 mm ²
4 x AlFe 42/7	4 x 90 mm ²	4 x 25 mm ²
4 x AlFe 70/11-1	4 x 120 mm ²	4 x 35 mm ²

2.4.1.2 KABELOVÁ VEDENÍ

Kabelová vedení se zpravidla ukládají do země, avšak v některých případech je kabelové vedení zavěšeno ve vnějším prostředí nad zemí. Kabelové vedení se používají na rozvod elektrické energie v místech, kde je velká hustota odběru (města aj.), kde je nedostatek prostoru a v případech, kde je potřeba zachovat bezpečnost na frekventovaných trasách nebo při velkém zatížení. Ve většině případů se kombinuje venkovní vedení s vedením kabelovým, kde ke krajním transformačním stanicím je přivedena venkovním vedením linka VN a z transformační stanice je vedeno nízké napětí kabelovým vývodem. Propojení městských transformačních stanic se většinou provádí kabelovým vedením. I přes větší investiční náklady kabelových vedení oproti vedením venkovním, se kabelová vedení používají stále častěji.

Kabelová vedení VN a NN jsou použita v zastavěných oblastech v centrech měst a průmyslových komplexech. Kabelové vedení jsou ukládána v podzemních kolektorech a na kabelových lávkách nebo bývají uložena v zemi v pískovém loži nebo s jinou mechanickou ochranou. Distribuční soustava je tvořena různými typy kabelů a kompletní výměna kabelů za nové kabely je ekonomicky nerentabilní, jsou dnes provozovány kabely s izolací termoplastickou, papírovou i olejovou. Nové kabely používají polyetylenovou izolaci s vyšší elektrickou pevností. [8]. Používané typy kabelů ve společnosti E. ON se řídí prováděcím předpisem ECZR-PP-SDS-062. Nejpoužívanějším typem kabelu je kabel s označením NAYY jedná se o kabel s hliníkovým jádrem a PVC izolací. Jádro kabelu tvoří čtyři nezávislé vodiče trojúhelníkového tvaru s PVC izolací. Tento kabel je znázorněn, viz Obrázek P-2.[8]

Použití těchto kabelů v městských zástavbách aj. se v praxi provádí s hustotou: 40 skříní na kilometr délky bez zádlažby nebo bez skříní a dále ve volném terénu s hustotou 20 skříní na kilometr délky nebo bez skříní. Nejpoužívanější průřezy kabelů, které používá společnost E. ON jsou v Tabulce (2-3). Dle podnikových norem PNE 34 7659 – 3 [9] a PNE 34 7659 – 5 [10], které jsou závazné pro všechny distribuční společnosti, jsou kabelová vedení s PE a PVC izolací a zkoušena stejnosměrným napětím o velikosti 12 kV po dobu pěti minut. Lze je tedy provozovat na stejnosměrné napěťové hladině 1 kV. Stávající infrastruktura kabelových vedení lze bezproblémově použít pro vedení stejnosměrného napětí.

Tabulka 2-3: Nejpoužívanější průřezy kabelového vedení u společnosti E. ON

Kabelové vedení NN
Používané průřezy
4 x 16 mm ²
4 x 25 mm ²
4 x 50 mm ²
4 x 95 mm ²
4 x 150 mm ²
4 x 240 mm ²

Co se týče hlavního domovního vedení (HDV) v dané lokalitě, je zde použito vedení s označením NYY-J (CYKY 4x10) s průřezem 4 x 10 mm². Jedná se o instalační měděné kabely se zesílenou PVC izolací. Napěťová dimenzace tohoto vedení je dle výrobce 600 V střídavých nebo 1000 V stejnosměrných. Proto je možné vedení HDV zachovat společně s distribučním kabelovým vedením NAYY nebo lany AES.

2.5 ELEKTROINSTALACE V BUDOVÁCH

Pro připojení nového odběrného místa k distribuční soustavě je potřeba splnit několik podmínek. Po přivedení vedení (kabelového nebo venkovního) k hranici pozemku, respektive k novému přípojnému místu, je potřeba vybudovat hlavní domovní skříň (HDS), umístěnou dle daných podmínek uvedených v podmínkách o připojení k síti NN. Elektroměr umístěný v připojovaném objektu je s HDS připojen hlavním domovním vedením (HDV), které musí

splňovat několik podmínek: musí být provedeno v soustavě TN-C, musí být proveden v souladu s platnými technickými normami, musí být vedeno co nejkratší trasou atd. [12].

Soustavy, kterými má být připojeno nové odběrné místo, stejně tak provedení elektroinstalace v budovách se řídí normou ČSN 33 2000-1 ed. 2 [13], kde označení typu soustavy je dáno třemi písmeny.

a) „První písmeno – vyjadřuje vztah sítě a uzemnění

I – oddělení všech částí od země, nebo spojení jednoho bodu sítě se zemí přes velkou impedanci

T – bezprostřední spojení jednoho bodu sítě se zemí

b) Druhé písmeno – vyjadřuje vztah neživých částí rozvodu a uzemnění

N – přímé spojení neživých částí s uzemněným bodem sítě (ve střídavých sítích je uzemněným bodem obvykle střed (uzel) zdroje, nebo pokud není, fázový vodič)

T – přímé spojení neživých částí se zemí

c) Třetí písmeno – vyjadřují uspořádání středních a ochranných vodičů

C – funkce středního vodiče a ochranného vodiče je sloučena v jediném vodiči (PEN vodič)

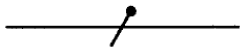
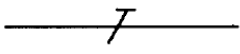
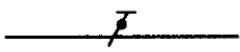
S – funkce ochranného vodiče je zajišťována vodičem vedeným odděleně od středního vodiče (nebo od uzemněného fázového vodiče u střídavých či uzemněného krajního vodiče u stejnosměrných sítí)“ [13].

Kde nulový (střední) vodič je vodič, který je spojen se středem (uzlem) zdroje, bez ohledu na to jestli je spojen se zemí nebo není. Ochranný vodič je vodič pro spojení částí neživých za účelem ochrany před nebezpečným dotykovým napětím bez ohledu na to, zda je současně vodičem pracovním či nikoliv. PEN vodič je vodič spojující funkci nulového a ochranného vodiče [13].

2.5.1 DRUHY SÍTÍ POUŽÍVANÝCH V ELEKTROINSTALACÍCH

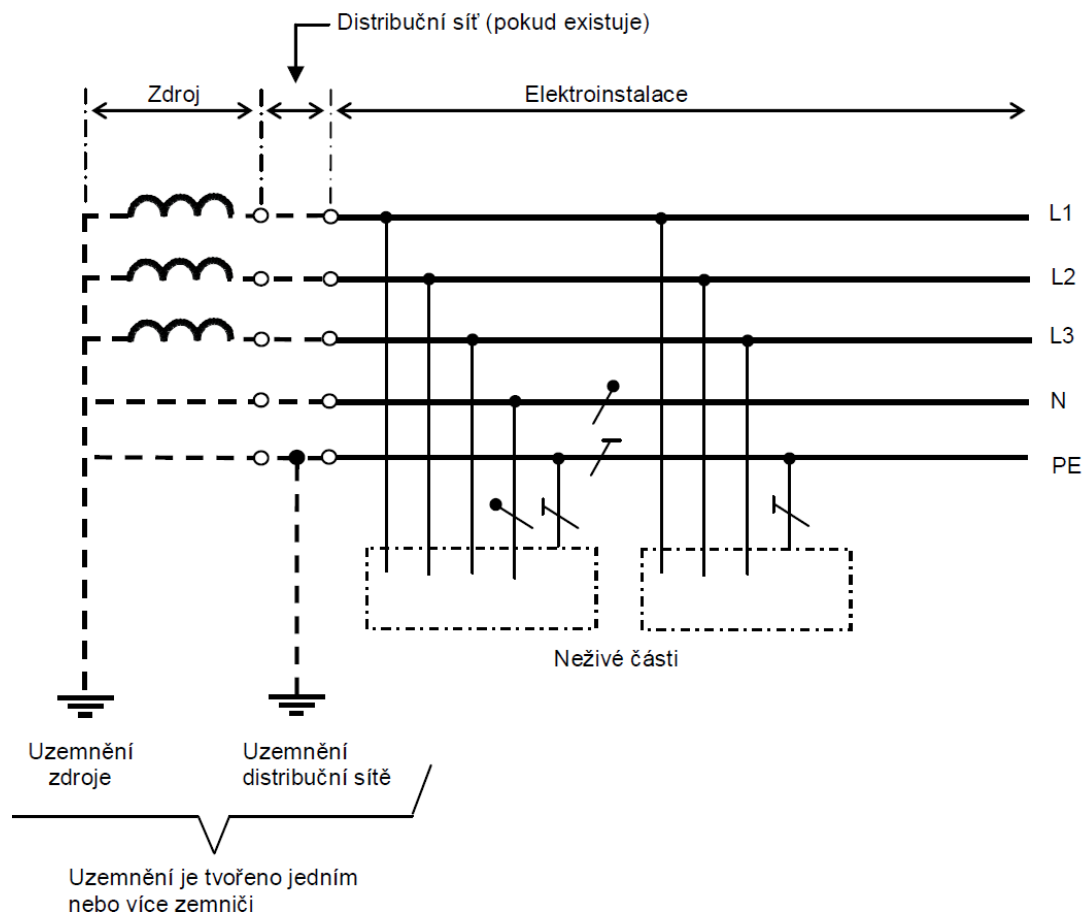
Elektroinstalace v budovách, viz Obrázky 3-7, 3-8 a 3-9, jsou nejčastěji využívávané sítě v distribučním území celé České republiky, avšak některé už nelze v nově stavěných budovách používat, takovou sítí je TN – C.

Tabulka 2-4: Vysvětlivky ke schémátům dle IEC 60617 - 11[13]

Využití značek pro obrázky v souladu s IEC 60617-11	
	Nulový vodič (N); střední vodič (M)
	Ochranný vodič (PE)
	Vodič s kombinovanou ochrannou funkcí a funkcí nulového vodiče (PEN)

2.5.1.1 TN – S

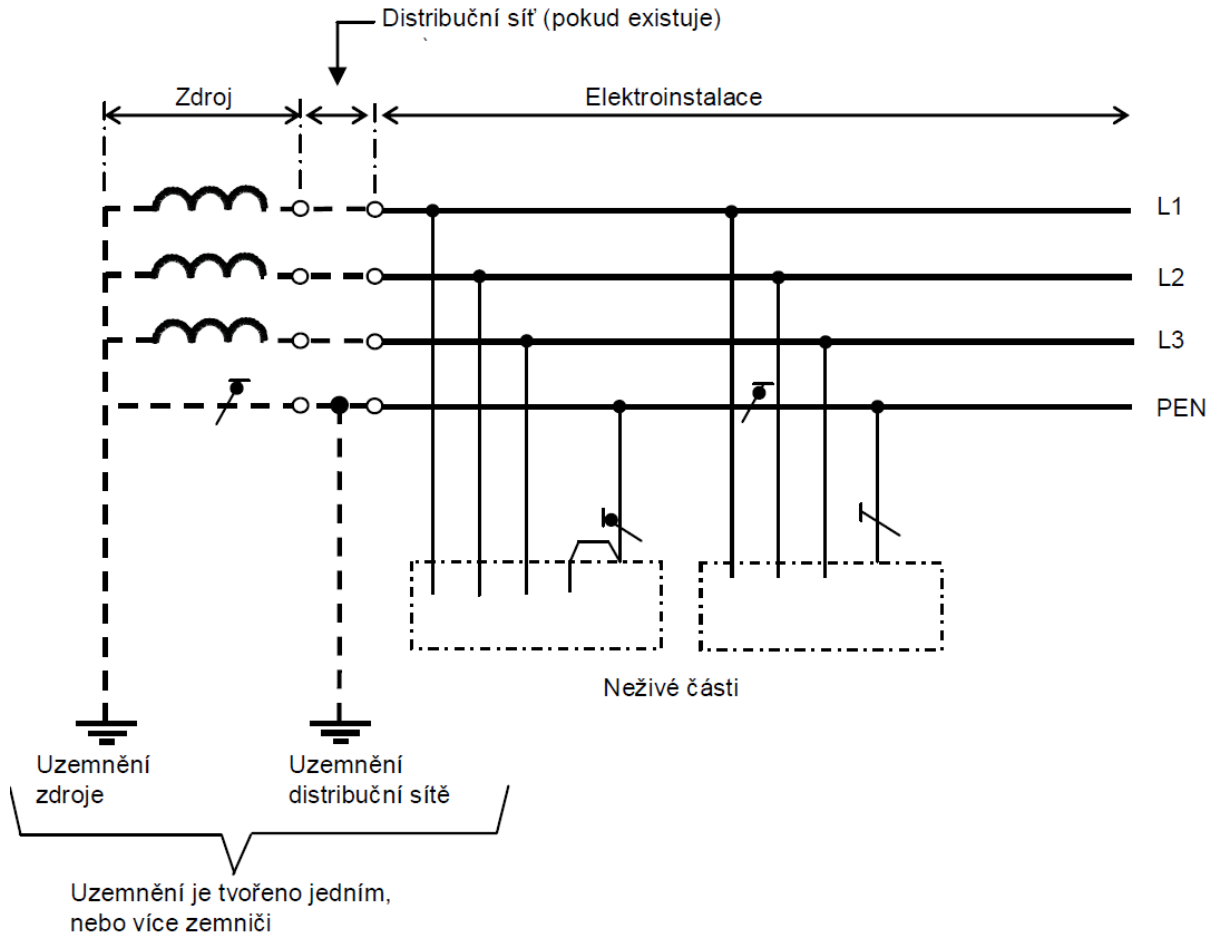
Trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem, ochranný vodič a nulový vodič jsou vedeny odděleně.



Obrázek 2-7: Znázornění sítě TN - S [13]

2.5.1.2 TN – C

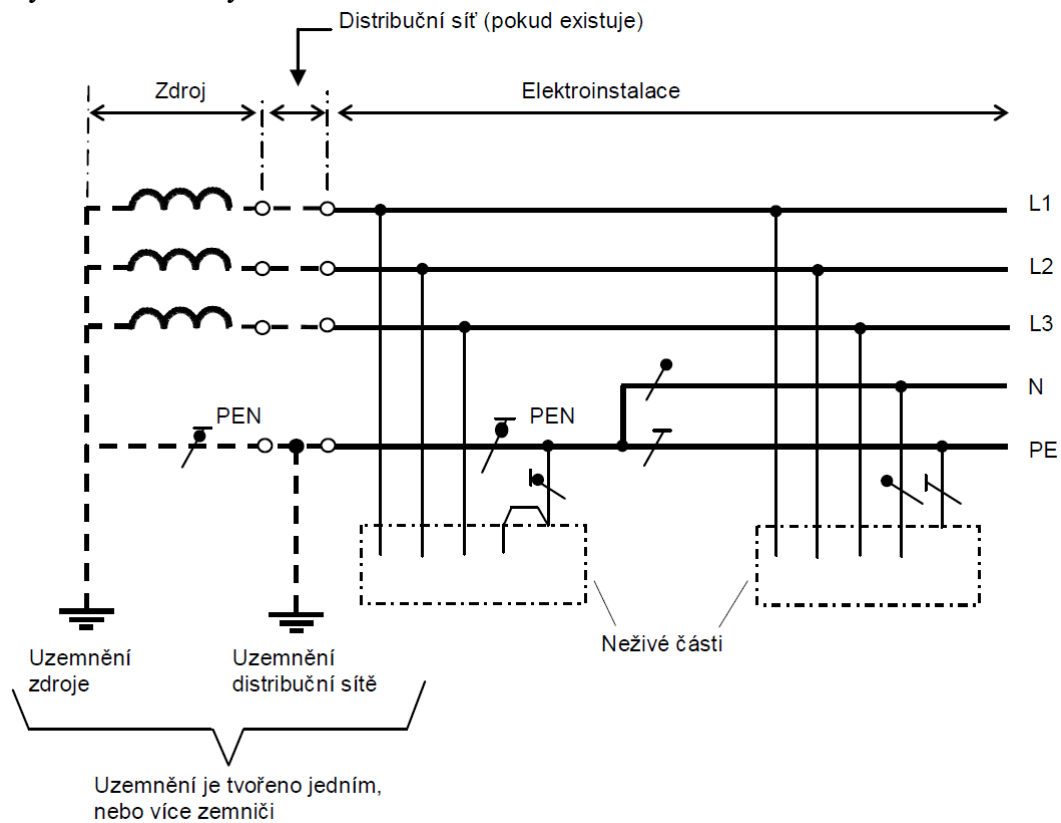
Síť TN-C je trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem. PEN vodič plní současně funkci středního (nulového) i ochranného vodiče.



Obrázek 2-8: Znárodnění sítě TN - C [13]

2.5.1.3 TN – C – S

Síť TN-C-S je trojfázová síť s uzemněným středním bodem, v první části vodič PEN současně plní funkci nulového i ochranného vodiče, v druhé části je vodič PEN rozdělen na ochranný vodič a nulový vodič.



Obrázek 2-9: Znárodnění sítě TN - C - S [13]

2.6 METODY PRO VÝPOČET CHODU SÍTĚ

Znalost napěťových poměrů, činných a jalových výkonů a ztrát na jednotlivých prvcích sítě, respektive v uzlech distribuční soustavy je velice důležité pro řízení provozu, navrhování jejího dalšího rozvoje, řešení přechodných dějů či optimalizačních úloh. Výpočtem chodu sítě rozumíme výpočet ustáleného stavu. Program PASS DAISY OFF-LINE Bizon, kterým bude řešena střídavá analýza zadané lokality, využívá Newtonovy iterační metody, též zvané Newton-Raphsonova metoda.

Program PASS DAISY OFF-LINE Bizon patří mezi základní softwarové vybavení ve společnosti E. ON. Tento program bude využit pro výpočet úbytků napětí a výkonových ztrát v dané lokalitě. Tyto údaje budou následně sloužit k porovnání poměrů mezi střídavou sítí se jmenovitým napětím 400/230 V a stejnosměrnou sítí se jmenovitým napětím 1000 V

2.6.1 NEWTONOVA ITERAČNÍ METODA

Popis této metody je uveden ve zdrojích [23] a [24].

Je uvažována soustava nelineárních rovnic (2-4).

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) &= y_2 \\ f_n(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (2-4)$$

Pro řešení této soustavy rovnic jen nutné provést odhad jejich kořenů v nulté iteraci $x_1^{(0)}$ až $x_n^{(0)}$. Rozdíl odhadu od skutečné hodnoty se značí Δx_1 až Δx_n .

Úprava rovnic (2-4).

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (2-5)$$

Pro každou rovnici ze soustavy (2-5) lze napsat rozvoj pomocí Taylorovy řady pro více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$, viz rovnice (2-6)

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \cdot \Delta x_n + \Phi_1 = y_1, \quad (2-6)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ a Φ_1 zahrnuje všechny členy s vyššími mocninami spolu s druhou a vyšší derivací f_l . Pokud je proveden správný odhad kořenů, tj. blíží se k správné hodnotě, tak budou difference Δx_i malé, lze zanedbat členy s vyššími mocninami Δx_i , protože Φ_1 se v limitě blíží nule.

Jeli rovnici (2-6) upravena s pomocí výrazu (2-7) lze pak rovnici (2-6) upravit na tvar (2-8).

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)} \dots x_n^{(0)}) = y_0 \quad (2-7)$$

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \cdot \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)}, \quad (2-8)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$, která je určena dosazením odhadu do rovnice (2-6). Tímto způsobem lze upravit všechny rovnice v soustavě (2-5). Výsledkem této úpravy je soustava lineárních rovnic, ze kterých lze určit neznámé diference $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Soustavu lze poté napsat v následujícím maticovém tvaru.

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Ekvivalentní zápis matice (2-9) lze vyjádřit pomocí rovnice (2-10).

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (2-10)$$

V rovnici (2-10) vyjadřuje matice J matici parciálních derivací tzv. Jakobián, někdy též Jakobiho determinant. Tento determinant vyjadřuje funkci pro integrální počet pracující s více proměnnými zejména ve větě o substituci.

Z rovnice (2-9) a (2-10) lze vypočítat vektor Δx hledaných diferencí a podle rovnice (2-11) nové, opravné odhady kořenů, které budou použity pro následující krok iterace. Hodnoty diferencí Δx_i nejsou zcela přesné, protože v Taylorově rozvoji je uvažována pouze 1. iterace.

$$x_i^{(1)} = \bar{x}_i^{(0)} + \Delta x_i \quad (2-11)$$

Proces iterace zajišťuje postupné zpřesnění kořenů soustavy rovnic, poté lze rovnice (2-10) a (2-11) zapsat v iteračním tvaru. V rovnicích (2-12) a (2-13) určuje index k pořadí iterace.

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} = [\Delta y^{(k)}] \quad (2-12)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i \quad (2-13)$$

Za předpokladů že je parciální derivace $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ spojitá pro j a i od 1 do n a rovnice (2-9) má jednoznačné řešení, tj. iterační proces konverguje, platí výše uvedené rovnice a lze aplikovat tuto iterační metodu na rovnice, které popisují ustálený chod sítě a přepsat do tvaru rovnice (2-14)

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j, \quad (2-14)$$

kde hodnoty s pruhem $\overline{\quad}$ jsou fázory daných veličin.

Rozepsáním vektorů rovnice (2-14) na reálnou a imaginární část v polárním tvaru: $\overline{U}_i = \angle \delta_i$; $\overline{U}_i^* = \angle -\delta_i$; $\overline{Y}_{ij} = \angle \alpha_{ij}$ a následným dosazením polárního tvaru admitancí a napětí do rovnice (2-14).

Po úpravě lze tuto rovnici rozepsat na následující tvar

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-15)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-16)$$

Soustava rovnic (2-15) a (2-16) je soustava $2 \cdot (n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Za předpokladu, že jsou známy (zadány) odebrané činné a jalové výkony v uzlech sítě, kromě bilančního uzlu, kde je známo napětí U_l a jeho úhel δ_l . Při iteračním výpočtu diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ dle rovnice (2-10) s použitím rovnic (2-15) a (2-16) je získána maticová soustava (2-17), kde výraz ΔU_i neznamená úbytek napětí, ale rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou hodnotou uzlového napětí.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Maticová soustava (2-17) lze zapsat ve zkráceném tvaru, viz (2-18).

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

Výpočet jednotlivých parciálních derivací Jakobiánu derivací rovnic (2-15) a (2-16) dle jednotlivých proměnných.

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right]$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial P}{\partial U} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \gamma_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-19)$$

Mimodiagonální prvky:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-20)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-21)$$

Mimodiagonální prvky:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-22)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial U}\right]$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \gamma_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-23)$$

Mimodiagonální prvky:

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-24)$$

Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right]$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-25)$$

Mimodiagonální prvky:

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2-26)$$

Důvodem rozšířené Newtonovy iterační metody je její velmi rychlá konvergence. Délka výpočtu je daná počtem potřebných iterací a je málo závislá na rozlehlosti sítě. Délka výpočtu je prakticky určena pouze požadovanou přesností výpočtu. Nároky na výpočetní techniku, zejména na operační paměť, jsou dány výpočtem diferenciálních kořenů a při řešení rovnice (2-16). Ustálený stav je možné počítat buď pro soustavu lineárních, nebo nelineárních rovnic, a to podle toho, o jak rozsáhlou se síť jedná, respektive na jaké napěťové hladině probíhá výpočet [24].

2.7 ZTRÁTY PŘI PŘENOSU ENERGIE

2.7.1 STŘÍDAVÝ PŘENOS VÝKONU

Přenos střídavého zdánlivého výkonu se dá vyjádřit jako rozdíl příkonu a činných a jalových ztrát daných reaktancí, indukčností a kapacitou vedení [18]

$$S_{AC} = 3 \cdot U_{AC} \cdot I_{AC}^* - (\Delta P_{\xi} + j\Delta Q_j) = P_{\xi} + jQ_j, \quad (2-27)$$

kde S_{AC} je střídavý zdánlivý výkon (VA), U_{AC} je střídavé (fázové) (V), I_{AC}^* je komplexně sdružený proud (A), ΔP_{ξ} jsou ztráty činného výkonu (W), ΔQ_j jsou jalové ztráty výkonu (Var), P_{ξ} je činný střídavý výkon (W) a Q_j je jalový výkon (VAr).

Dále jednotlivé části ztrát při střídavém přenosu výkonu.

Činné ztráty výkonu

$$\Delta P_{\xi} = 3 \cdot I_{AC}^2 \cdot R_k \cdot l, \quad (2-28)$$

kde I_{AC} je střídavý proud (A), R_k je měrný odpor vedení (Ω/km) a l je délka vedení (km).

Jalové ztráty výkonu

$$\Delta Q_j = 3 \cdot I_{AC}^2 \cdot \omega \cdot L_k \cdot l - 3 \cdot U_{AC}^2 \cdot \omega \cdot C_k \cdot l, \quad (2-29)$$

kde ω je úhlová rychlost (rad/s); L_k měrná reaktance (H/km) a C_k měrná kapacita (F/km).

3 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY - STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ

Jak je uvedeno v úvodu, je tomu přibližně sto dvacet let od doby, kdy se vedl boj o budoucnost pojetí elektrických sítí. Koncem 19. století se elektrické sítě od těch dnešních velice lišily. Elekřina byla distribuována pomocí stejnosměrného proudu, který prosazoval Thomas Alva Edison. Tento systém však trpěl řadou problémů, například změna velikosti stejnosměrného napětí byla obtížná, a proto byli odběratelé připojeni přímo na napětí generované v elektrárně. Tehdejší rozvodná soustava měla veliké ztráty a to takové, že se elekřina dala rozvádět přibližně na vzdálenost dvou kilometrů. Postupem času se do popředí začal dostávat proud střídavý, která byl podporován podnikatelem Georgem Westinghousem a zejména vynálezcem Nikolou Teslou.

O prosazení střídavého proudu nad stejnosměrným bylo rozhodnuto výstavbou elektrárny na Niagarských vodopádech, kde se naplno projevíly výhody střídavého napětí. Za největší výhodu lze považovat jednoduchou změnu napětí pomocí transformátorů. Je tedy možné přenášet velké výkony při vyšším napětí a při nízkých proudech, což má za následek výrazně nižší ztráty výkonu i při přenosu na větší vzdálenosti.

V současné době se stejnosměrné sítě dostávají do popředí. Kde paradoxně nachází využití v oblastech, ve kterých byl v minulosti naprosto nepoužitelný a to při přenosu velkého výkonu na velké vzdálenosti. Tuto technologii nazýváme High Voltage Direct Current (HVDC), kde se k přenosu elektrické energie využívá stejnosměrné napětí v řádu stovek kilovoltů. Hlavní výhodou HVDC přenosu, oproti střídavému, jsou nižší ztráty elektrické energie. Kvůli nutnosti transformace stejnosměrného proudu na střídavý a naopak, se tato technologie používá v omezené míře ve specifických aplikacích. Mnoho společností ve spolupráci s dalšími partnery se snaží vyvinout řešení, které by umožnilo větší rozšíření stejnosměrných rozvodů v budovách. V budoucnu by mohl být stejnosměrný proud k dispozici i v obyčejné zásuvce.

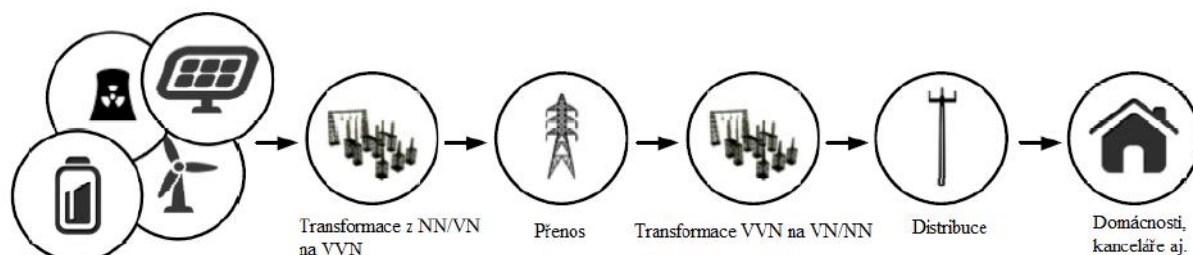
Důvod zavedení stejnosměrných sítí malého nebo nízkého napětí je prostý, velké množství menších elektrických spotřebičů využívá ke svému chodu stejnosměrný proud (napětí). Ať už jde o televize, počítače, či notebooky, tak prakticky veškerá moderní elektronika je vybavena spínaným zdrojem, který transformuje střídavé napětí 230 V na požadované stejnosměrné napětí. Stejně tak i osvětlení využívající diody, které je ve většině případů vybaveno usměrňovačem, který mění střídavé napětí na stejnosměrné. Rostoucí počet těchto světelných zdrojů je jednou z příčin vývoje stejnosměrných rozvodů v budovách.

Tato transformace není bezztrátová, i když jsou ztráty na jednotlivých prvcích poměrně malé, v součtu je zanedbat nelze. Odhaduje se, že centrální usměrňování střídavého napětí několika usměrňovači by mohlo přinést úspory v řádech jednotek procent elektrické energie. Cílem dalšího vývoje je snaha vyvinout technologie, které by takto efektivní rozvod stejnosměrného proudu umožnily zrealizovat. To znamená mimo jiné účinnější usměrňovače, ale i řadu monitorovacích a ochranných prvků, včetně zabezpečovacího systému a systému správy stejnosměrné sítě. Důraz na energetickou efektivitu bude jedna z důležitých věcí v

budoucnu. Trendem do budoucna bude to, aby měly nově postavené budovy menší energetické ztráty, respektive snížily svojí spotřebu elektrické energie. Stejnospěrné rozvody jsou tak vhodné nejen díky vyšší účinnosti, ale například i s ohledem na solární panely na střechách budov, které umí vyrábět pouze stejnosměrný proud [14].

3.1 STEJNOSPĚRNÉ SOUSTAVY NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Stejnospěrné soustavy nízkého napětí, tj. soustavy o napětí 0,12 až 1,5 kV stejnosměrných dle normy ČSN EN 60038 [15], nejsou radikálně odlišné od současných střídavých soustav nízkého napětí. I když některé komponenty soustavy, respektive sítě se mohou lišit vlastnostmi nebo funkcí, základní koncepce zůstává stejná, tj. přenos elektřiny na hladině nízkého napětí pro odběratele prostřednictvím kabelů a jiných komponent (transformátory atd.). Na Obrázku 3-1 [16] je znázorněn řetězec od výroby elektrické energie v elektrárně aj. přes transformaci, přenos a distribuci k odběratelům, Z tohoto důvodu, je rozdíl mezi stejnosměrným a střídavým přenosem dán konfigurací systému přenosu [16].

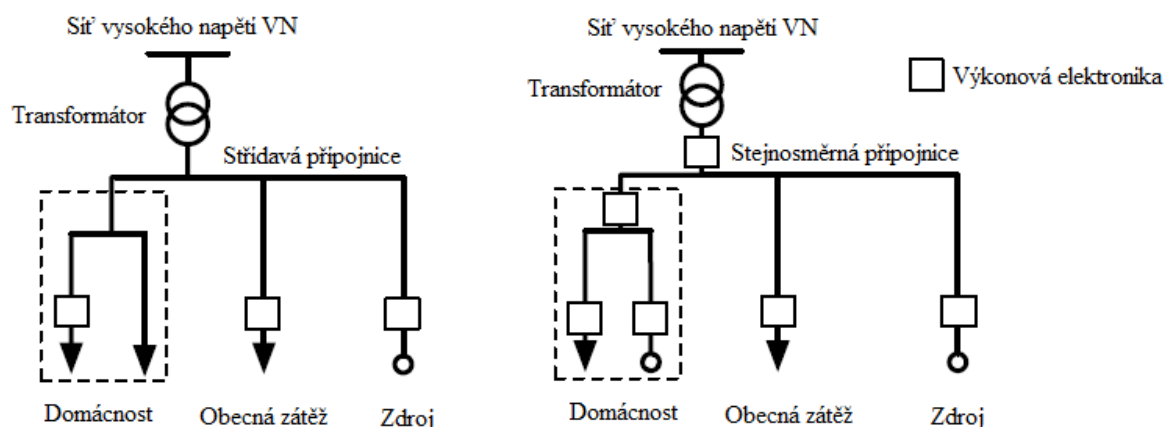


Výroba elektřiny v elektrárnách aj.

Obrázek 3-1: Řetězec dodávky elektřiny [16]

3.1.1 TOPOLOGICKÁ STRUKTURA STEJNOSPĚRNÝCH SÍTÍ

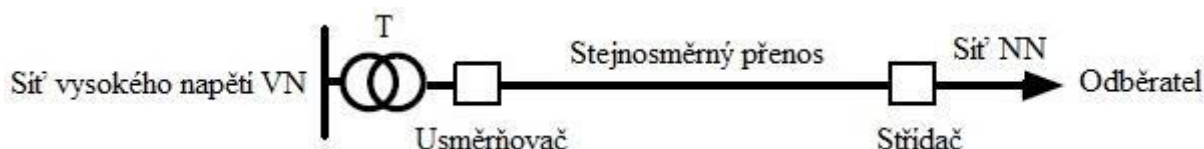
Mnoho distribučních soustav je stavěno v paprskové topologii, tj. mají radiální strukturu. Pro stejnosměrné soustavy nízkého napětí bude tento trend nejspíše pokračovat, tj. většina ze stejnosměrných soustav nízkého napětí bude připojena na hlavní stejnosměrnou přípojnicí se jmenovitým napětím stejně tomu, jak je to u sítí střídavých. Podobnost paprskové (radiální) struktury stejnosměrných a střídavých soustav je znázorněno na Obrázku 3-2 [16].



Obrázek 3-2: Topologická struktura paprskového rozvodu u střídavých (vlevo) a stejnosměrných (vpravo) sítí [16]

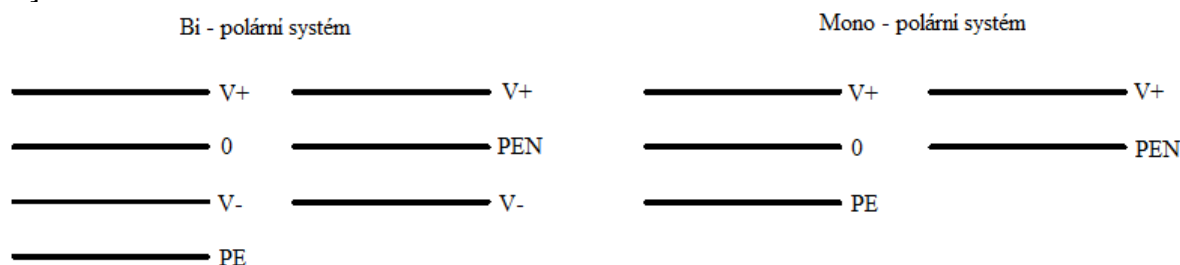
Obě dvě řešení jsou si podobná, střídavá i stejnosměrná soustava je připojena na VN hladinu napětí. Poté je prostřednictvím distribučního transformátoru sníženo napětí na hladinu NN. U střídavé síti rozvod pokračuje na přípojnicích a napájí danou oblast bez jakékoli úpravy napětí. U sítě stejnosměrné se potřebné napětí získá usměrněním pomocí usměrňovače aj., poté je toto napětí přivedeno na přípojnicích a pro napájení objektu se úroveň napětí přizpůsobuje danému zařízení pomocí měničů. Usměrňovače, měniče popřípadě spínané zdroje zařazujeme do výkonové elektroniky, viz Obrázek 3-2 [16]. Tuto elektroniku obsahuje mnoho spotřebičů, zdrojů napětí aj., toto bylo zmíněno v úvodu kapitoly.

Alternativní koncept stejnosměrného rozvodu nízkého napětí je připojení dlouhých vývodů obdobně jak popisuje kapitola 2.3. Kde, místo transformátorů zvyšujících napětí na začátku vývodu a poté snížení u odběratele, je použito usměrnění napětí na začátku přenosu a následná transformace, pomocí střídače, na napětí střídavé u odběratele. Tento koncept je znázorněn na Obrázku 3-3 [16].



Obrázek 3-3: Koncept stejnosměrného napájení dlouhých vývodů NN [16]

Stejnosměrné sítě nízkého napětí mají v zásadě dva způsoby zapojení, respektive ve dvou topologických variantách, které jsou ukázány na Obrázku 3-4 [16], jedná se o mono - polární a bi - polární způsob zapojení stejnosměrné sítě. Mono - polární systém využívá tři nebo dva vodiče, kde třívodičový systém má pracovní vodič [$V+$ ($L+$)] nulový [0 (M)] a ochranný vodič (PE) a dvouvodičový systém používá jeden pracovní vodič a jeden vodič, který v sobě kombinuje vodič nulový a ochranný [PEN (PEM)]. Bi - polární systém využívá čtyři nebo tři vodiče, kde čtyřvodičový systém má dva pracovní vodiče [$V+$ ($L+$) a $V-$ ($L-$)] jeden nulový [0 (M)] a ochranný vodič (PE) a třívodičový systém má dva pracovní vodiče [$V+$ ($L+$) a $V-$ ($L-$)] a jeden kombinující funkci ochranného a nulového vodiče [PEN (PEM)] [16].



Obrázek 3-4: Principiální řešení dvou systémů stejnosměrných sítí [16]

Mezi výhody mono - polárního systému patří menší množství vodičů, tj. úspora materiálu. Mezi nevýhodou se patří vyšší nároky na jištění z důvodu, že celý výkon teče jedním vodičem.

U bi - polárního systému lze za výhodu považovat flexibilitu při přenosu výkonu, kde systém dvou pracovních vodičů dovoluje vést polovinu energie v případě poruchy na jednom

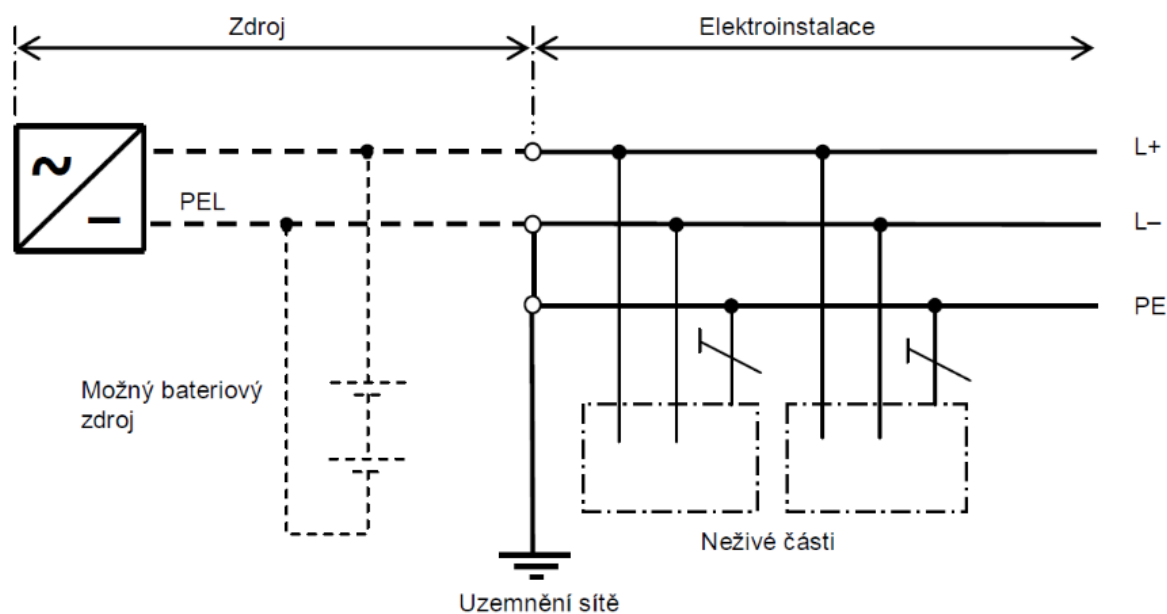
z nich. Flexibilita spočívá v připojení zátěže buď jedním, nebo dvěma póly to zaručuje variabilní použití při propojování různých zátěží [16].

3.1.2 Elektroinstalace v budovách

Dle normy ČSN 33 2000 -1 ed. 2 je možné stejnosměrnou elektroinstalaci v budovách provést stejně jako u sítě střídavé a to TN – S, TN – C, TN – C – S aj. Rozhodnutí o uzemnění pólu stejnosměrné sítě závisí na okolnostech daných připojením a dalších podmínkách, které určí, je – li výhodnější uzemnit kladný nebo záporný pól, například zabránění korozivním účinkům na vodiče uzemnění[13]. Znázornění možného zapojení stejnosměrných sítí s jedním usměrňovačem je ukázáno na Obrázcích 3-5, 3-6a a 3-7 [13]. Znázornění možného zapojení stejnosměrných sítí s dvěma usměrňovači je ukázáno na Obrázku 3-6b [13].

3.1.2.1 TN – S

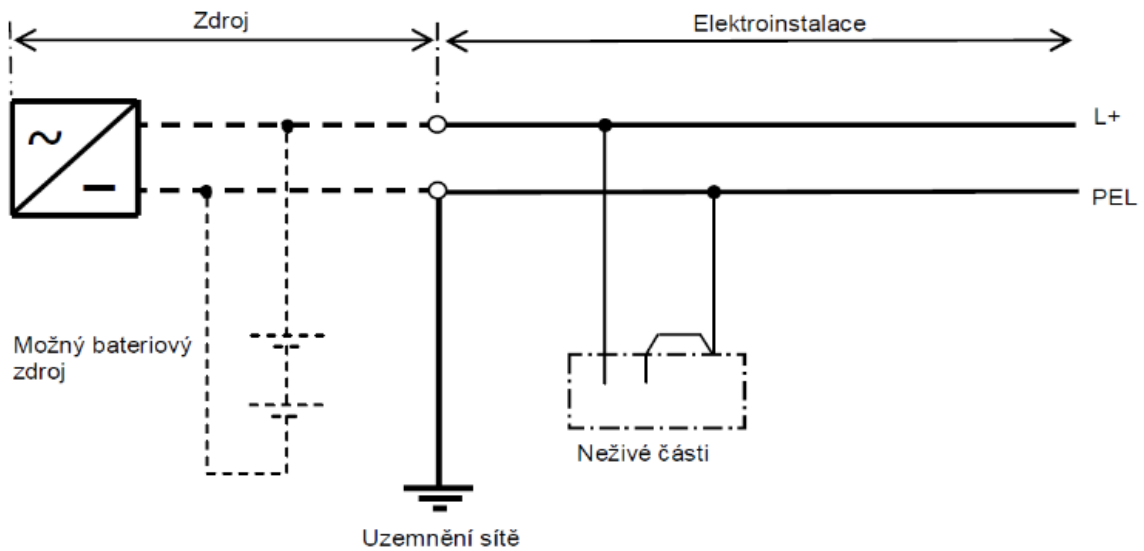
Uzemněný vodič vedení například L- (V-) je oddělený od ochranného vodiče elektroinstalace [13].



Obrázek 3-5: Stejnosměrná síť typu TN - S [13]

3.1.2.2 TN – C

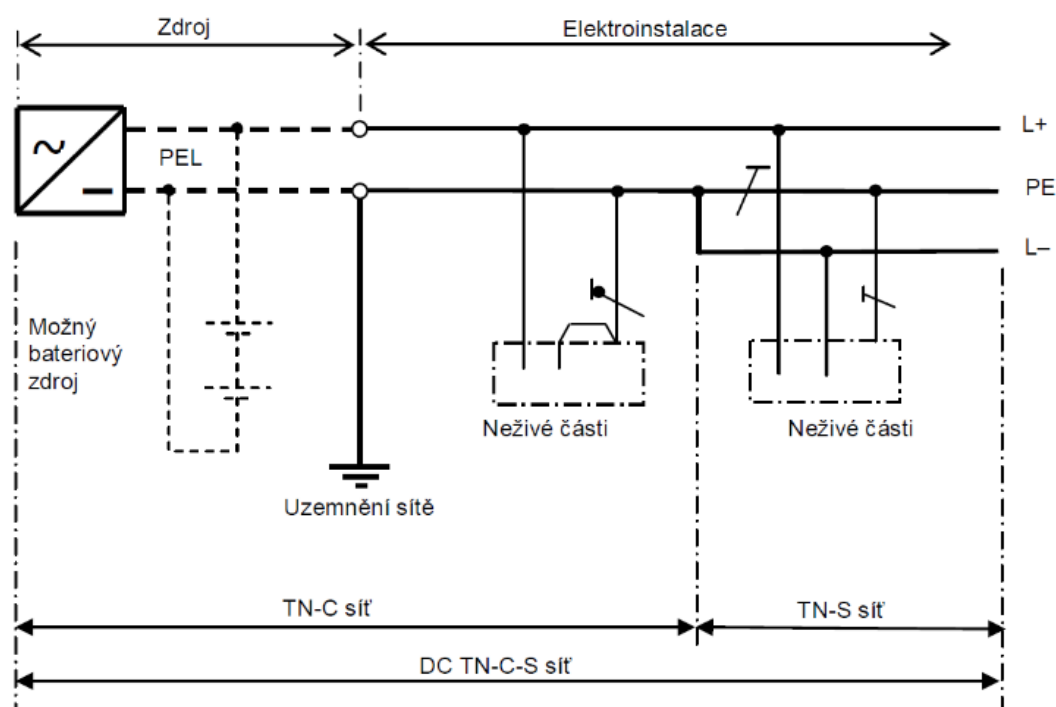
Funkce uzemněného vodiče vedení a ochranného vodiče je sloučena do vodiče PEL (PEN) [13].



Obrázek 3-6 a) :Stejnosemerna sit typu TN – C [13]

3.1.2.3 TN – C – S

Funkce uzemněného vodiče vedení a ochranného vodiče je částečně elektroinstalace sloučena do vodiče PEL (PEN) [13].



Obrázek 3-7: Stejnosměrná síť typu TN - C - S [13]

3.2 NAPĚŤOVÉ HLADINY A POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÝCH SÍTÍ

3.2.1 NAPĚŤOVÉ HLADINY

Diskuse ohledně napěťových hladin použitelných stejnosměrných sítí byla a bude komplikovaná. Napěťová úroveň stejnosměrných sítí je jedna z hlavních odlišností mezi navrhovanými systémy použití. Prvotní návrhy se zabývaly myšlenkou, omezit používané napětí pod 120 V stejnosměrných. Existují také pilotní projekty s použitím napěťových hladin 24 a 48 V stejnosměrných. Tento přístup je v souladu s normou ČSN EN 60038, kde použití takto nízkého napětí zaručuje bezpečnost uživatele.

Výsledkem studie z roku 2003 je to, že optimální hladina stejnosměrného napětí je 326 V stejnosměrných. Tato hodnota je maximem usměrněného sinusového napětí, které může být optimálně dodáváno přímo do daného zařízení, respektive zátěže. Dále tato studie ukázala, že napětí pod 120V stejnosměrných je nepraktické z důvodu velkého poklesu napětí při typické spotřebě rodinného domu [16].

V roce 2008 byla provedena další studie, která shrnula klady a zápory různých napěťových úrovní, které se v té době používaly (viz Tabulka 3-1 [16]). Výsledkem této studie je, že 240 V stejnosměrných je minimální použitelné napětí, kde se dá stále efektivně přenášet výkon. Dále tato studie uvádí, že napětí 400 V stejnosměrných je nejvíce výhodnou alternativou [16].

Tabulka 3-1: Shrnutí argumentů pro volbu stejnosměrné úrovně napětí [16]

Argumenty	Navrhovaný rozsah stejnosměrného napětí [V]
-----------	---

Prizpůsobení se stávajícím sítím v budovách	$V_{DC} > 220 \text{ V}$
Prizpůsobení jednofázové zátěži	$V_{DC} < 238 \text{ V}$ nebo 457 V
Prizpůsobení tří fázové zátěži	$463 < V_{DC} < 617$
Izolace	$V_{DC} < 373$
Zařízení aj.	$V_{DC} < 350 - 450$

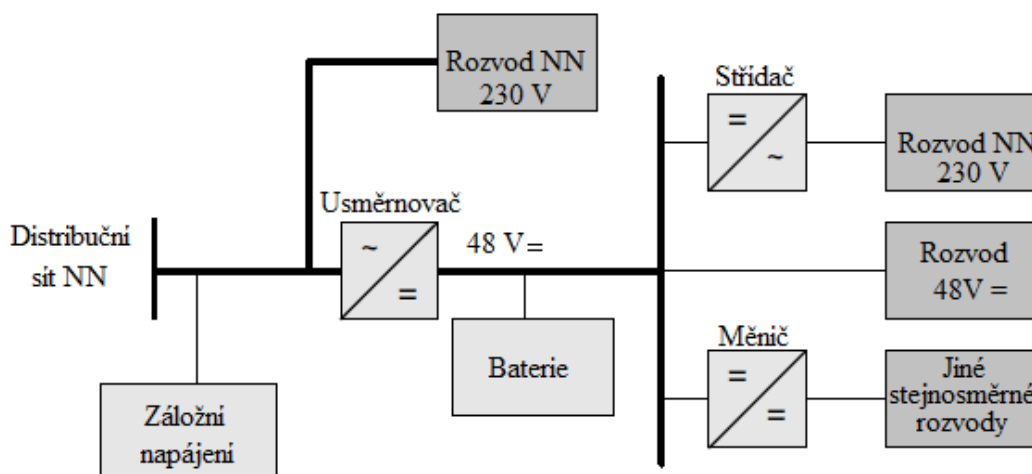
Na rozdíl od studie z roku 2008 došla jiná studie z roku 2010 k jinému závěru a to, že 48 V stejnosměrných by byla optimální úroveň napětí pro bytové aplikace. Kromě toho, tato studie dospěla k závěru, že pro komerční aplikace aj. je vhodná napěťová hladina 400 V stejnosměrných. K dnešnímu dni neexistuje všeobecná shoda na konečné úrovni stejnosměrného napětí. Nicméně, průmyslová asociace EMerge Alliance vytvořila standardy vedoucí k rychlému nasazení stejnosměrných sítí o napětí 24 a 380 V stejnosměrných v komerčních budovách [16].

Další studie z roku 2012 společně s pilotním projektem napájení data – centra stejnosměrným napětím uvádí lepší spolehlivost systému oproti klasickému řešení. Důvodem lepší spolehlivosti je odstranění některých transformačních kroků, jako je použití transformátorů, některých napájecích zdrojů, střídačů atd. Další studie provedly průzkumy a analýzy spolehlivosti výkonových měničů a dospěly k závěru, že většina z těchto měničů obsahuje jemné komponenty, jako jsou polovodičové prvky napájení a kondenzátory aj. Vzhledem k tomu, že mezi jedny z nejzajímavějších vlastností stejnosměrných sítí patří odstranění obvodů ke korekci účinnosti, ($\cos \varphi$), usměrňovačů a filtračních elektrolytických kondenzátorů by se dalo očekávat, že spolehlivost celého systému se zvýší. Nicméně, praktické zkušenosti a údaje o spolehlivosti stejnosměrných mikro - sítí neexistují, a proto nelze jednoznačně říci jeli spolehlivost stejnosměrných sítí větší. Toto bude vyžadovat další studie [16].

3.3 EXISTUJÍCÍ POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÝCH SÍTÍ

3.3.1 TELEKOMUNIKACE

Telekomunikační systémy využívají stejnosměrné napájení nízkého napětí. Tento systém je postaven na centralizovaném bateriovém systému. Jmenovité napětí tohoto systému je 48 V stejnosměrných. Stejnosměrná část sítě je napájena z elektrické střídavé sítě, která je následně usměrněná na požadovanou hodnotu stejnosměrného napětí. Tento systém také obsahuje záložní bateriový systém, který nepájí daný systém při výpadku střídavé sítě a vystačí až na osm hodin provozu. Je zde taky přítomno záložní napájení, např. dieselagregát, který je připojen k systému a je používán v případě dlouhého výpadku střídavé sítě. Typický telekomunikační systém je znázorněn na Obrázku 3-8 [17].



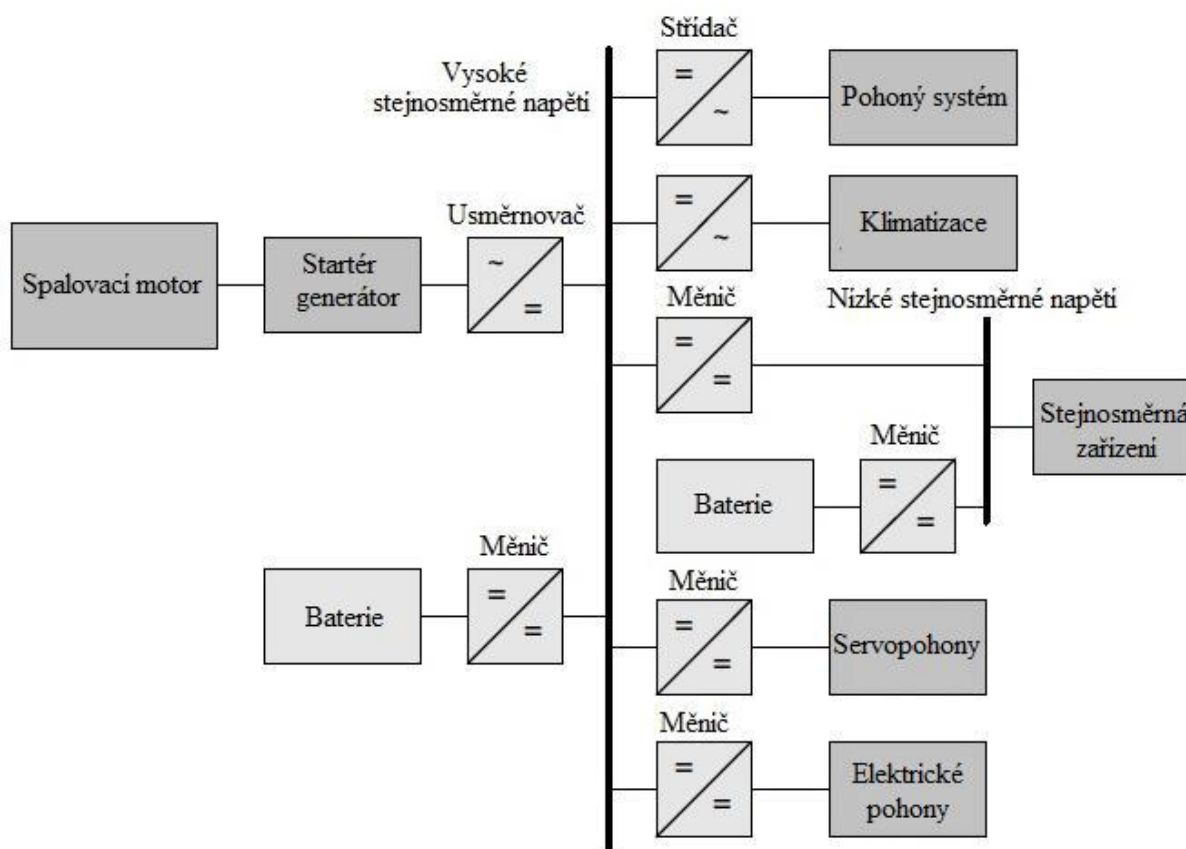
Obrázek 3-8: Znárodnění typického telekomunikačního rozvodu založeného na stejnosměrné síti [17]

3.3.2 STROJE A DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY

Vysoce výkonné stejnosměrné systémy, respektive stejnosměrné sítě jsou použity u vozidel a lodí, které mají elektrický pohon. Základní myšlenka hybridních elektrických vozidel (HEV) je použití spalovacího motoru (malého) k napájení stejnosměrného systému (většinou bateriový systém). Tento způsob je šetrnější k životnímu prostředí. Při akceleraci je síla na kola přenášena prostřednictvím elektromotoru, který odebírá výkon z baterií. Při brzdění se elektrická energie ukládá zpět do baterií. Elektrická energie se používá také pro napájení zařízení v autě. Stejnospměrný systém musí dodávat výkon do elektromotorů potřebných k pohonu, používaná stejnosměrná hladina napětí je 300 V stejnosměrných a vyšší.

Energetický systém HEV se skládá ze startéru, generátoru (motoru), elektrického měniče napětí, systému pro skladování energie (baterie nebo super kondenzátory), střadače pro zařízení vozidla (klimatizace aj.). Stejnospměrný pohon lze také použít u nákladních lodí a jiných plavidel. Elektrický výkon je generován dieslovými motory a následně je používán pro napájení elektrických zařízení a elektrických strojů, které se používají pro pohon plavidla. Elektrický systém využívá jak střídavý, tak i stejnosměrný proud v závislosti na dané aplikaci v rámci zařízení. Námořní lodě a ponorky používají jiné zdroje energie, jako je například jaderný reaktor. Tento reaktor pohání turbínu, která pohání generátor a ten generuje elektrinu pro elektrické stroje potřebné k pohonu plavidla. Tím, že je odstraněno mechanické propojení zdroje energie, respektive pohonu s lodním šroubem, je zaručeno snížení hluku a vibrací, což je důležité pro minimalizaci rizika odhalení například u ponorek [17].

Energetický systém HEV je znázorněn na Obrázku 3-9 [17]



Obrázek 3-9: Znárodnění energetického systému HEV s použitím stejnosměrného rozvodu [17]

3.3.3 TRAKČNÍ SYSTÉMY

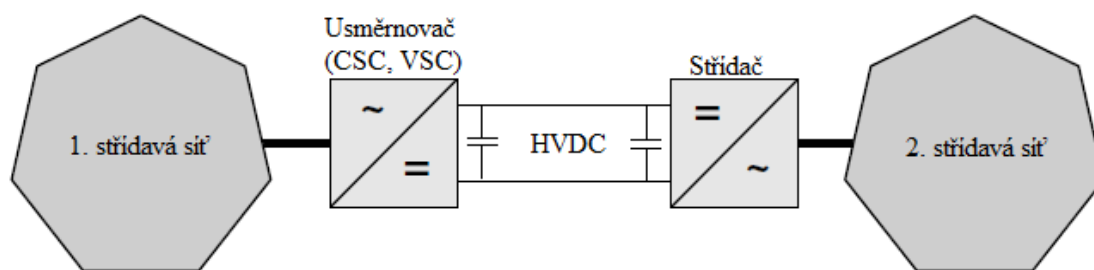
Stejnosemnné napětí v trakčních systémech se používá již dlouhou dobu, důvodem je snadná regulace stejnosměrných strojů pouhou změnou sériového odporu. Trakční systémy jsou napájeny ze střídavé sítě vysokého napětí (22/35 kV) prostřednictvím šesti, 12 nebo 24 - pulzních usměrňovačů v závislosti na konfiguraci sítě a potřebných parametrů napětí. Vyšší počet pulzů sníží aktuální zvlnění. Standardní stejnosměrné napěťové hladiny trakčních systémů jsou 600 nebo 750 V stejnosměrných pro městské aglomerace, příměstské vlaky, tramvaje, trolejbusy a metro. Stejnosemnné napětí 1,5 až 3 kV se používá u trakčních systémů vlaků pro regionální trasy. Energie je dodávána do vlaku prostřednictvím napájecí koleje (u metra aj.), uložené na izolátorech na jedné straně jízdní kolejnice, nebo prostřednictvím troleje umístěné nad dopravním prostředkem. Napájecí kolejnice nebo trolej tvoří kladný pól stejnosměrného sítě, záporný pól je tvořen kolejemi. Napájecí stejnosměrné systémy jsou chráněny jističi, které jsou ovládány pomocí relé, které vybaví jističe v případě nadproudu, zemního spojení nebo zkratu [17].

3.3.4 HVDC

Vysoko napěťové stejnosměrné systémy (přenosy) (HVDC) se používají pro přenos elektrické energie pomocí stejnosměrného napětí místo napětí střídavého. HVDC systémy

umožňují přenášet velké výkony na dlouhou vzdálenost. Absence jalového výkonu u stejnosměrného napětí snižuje ztráty. Další výhodou HVDC systému je, možnost propojení dvou střídavých systémů s různou frekvencí pomocí usměřovače (invertoru) a střídače používající tyristory nebo IGBT tranzistory závislosti na použitém systému [17].

Usměřovač založený na použití tyristorů pracuje jako říditelný zdroj proudu (CSC), což ho řadí do liniově – komutovaných měničů (usměřovačů) používající šesti nebo 12 – pulzní usměrnění. CSC potřebuje k provozu střídavé napětí (proud) odebíraný ze střídavé sítě. HVDC s CSC se používá pro vysokonapěťové stejnosměrné přenosy velkého výkonu. Stejnosemerná linka, respektive stejnosměrné vedení, je určena pro přenos výkonu, kde polarita stejnosměrného napětí se mění se směrem toku výkonu. Vzhledem k použití CSC se vyskytují v přenosu nízkofrekvenční harmonické složky. Ty mohou být odstraněny s použitím transformátorů, které zvýší počet impulsů z 6 na 12 nebo 24, popřípadě mohou být použity laditelné filtry. HVDC systém s CSC může pracovat se stejnosměrným napětím až do hodnoty 1200 kV [17]. Dražší usměřovače (měniče) používající IGBT tranzistory pracují jako říditelné zdroje napětí (VSC), což je trojfázový měnič, který reguluje amplitudu, frekvenci a fázi napětí. VSC je zdrojem harmonických v násobcích spínací frekvence. Tyto harmonické lze velice jednoduše odstranit použitím klasického filtru, filtr nemusí být laditelný. Spotřebovaný činný a jalový výkon měniče může být kontrolován jednotlivě na obou stranách HVDC systému. HVDC systém s VSC může pracovat se stejnosměrným napětím je v rozmezí od 20 do 300 kV. HVDC systém s IGBT tranzistory může být použit pro „start ze tmy“, což není možné s HVDC systémy s tyristory. Znázornění HVDC systému připojeného mezi dvě střídavé soustavy je znázorněn na Obrázku 3-10 [17] [17].



Obrázek 3-10: Liniové znázornění HVDC systému [17]

3.3.5 STEJNOSMĚRNÝ PŘENOS VÝKONU

Přenos stejnosměrného výkonu se dá vyjádřit jako rozdíl příkonu a činných ztrát na kabelech. Tyto ztráty jsou dané pouze odporem vedení

$$P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC} - 2 \cdot I_{DC}^2 \cdot R_k \cdot l, \quad (3-1)$$

kde P_{DC} je stejnosměrný výkon (W), U_{DC} je stejnosměrné napětí (V), I_{DC} je stejnosměrný proud (A), R_k měrný odpor vedení (Ω/km) a l je délka vedení (km).

Takto vyjádřená rovnice (3.1) je platná pro dvoj a třívodičový systém stejnosměrného přenosu ať už při použití bi – polárního nebo uni – polárního systému přenosu stejnosměrného výkonu (viz kapitola 3.1.1) [18].

3.4 ZTRÁTY VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE

Minimalizace ztrát ve výkonové elektronice je žádoucí jak u výrobců, tak a spotřebitelů. Na jedné straně, pro výrobce znamenají nižší ztráty menší nároky na chlazení součástek, tj. úspora materiálu, zlepšení spolehlivosti, minimalizace tepelného namáhání a kompaktnější rozměry. V neposlední řadě zvýšení spolehlivosti zařízení má pozitivní dopad na pověst výrobce. Na druhou stranu, pro spotřebitele znamenají nižší ztráty větší účinnost, což vede k lepšímu využití energie [17].

3.4.1 SPÍNACÍ ZTRÁTY

Za předpokladu, že výkonové spínací součástky (tranzistory) vyžadují konečné množství času k zapnutí a následnému vypnutí nebo naopak, tak energie pohlcená během tohoto přechodu se nazývá spínací ztráty, viz Obrázek (3-11 [17],

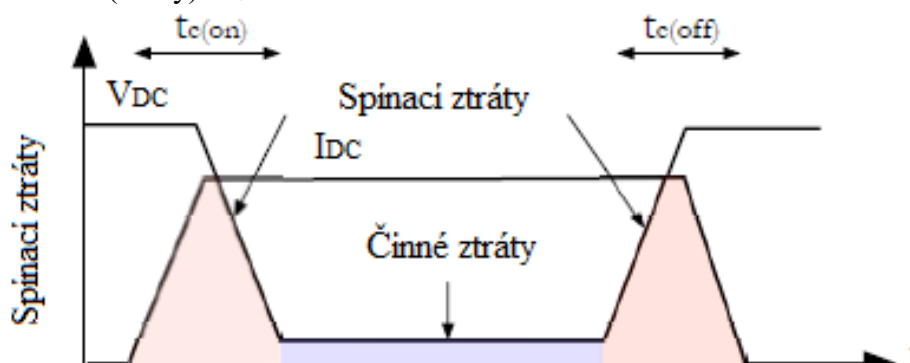
$$\Delta P_s = \frac{1}{2} \cdot U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot f_s \cdot (t_{c(on)} + t_{c(off)}), \quad (3-5)$$

kde ΔP_s jsou spínací ztráty (W), f_s je spínací frekvence (Hz), $t_{c(on)}$ čas zapnutí (s) a $t_{c(off)}$ je čas vypnutí (s).

Činné ztráty vznikají ve vodičích, vypínačích, kondenzátorech, indukčnostech a pájených spojích, všude tam vznikají ohmické (činné) ztráty, které se dají vyjádřit podle rovnice 3-6

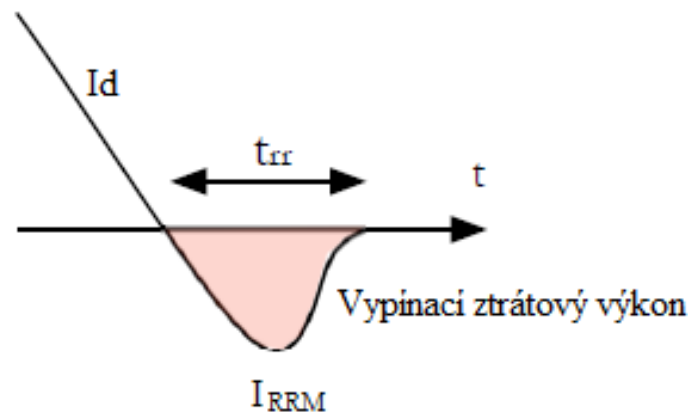
$$\Delta P = R_x \cdot I^2, \quad (3-6)$$

kde ΔP vyjadřují ohmické (činné) ztráty (W), I proud (A) a R_x představuje ekvivalentní odpor zařízení, jako je sériový odpor tranzistoru $R_{ds(on)}$, ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru R_{ESR} a odpor indukčnosti (cívky) R_L .



Obrázek 3-11: Spínací ztráty na tranzistorech [17]

Další ztráty vznikají na diodách důsledkem zotaveného napětí, tj. vypínací ztrátový výkon, ve vinutích transformátorů, v řídicích integrovaných obvodech [17].



Obrázek 3-12: Vypínací ztrátový výkon diody [17]

Na Obrázku 3-12 [17] je znázorněn vypínací ztrátový výkon diody, kde t_{rr} je doba, za kterou dioda, po změně polarity anodového napětí, obnoví svou izolační schopnost, tj. doba zotavení, která závisí na materiálu, technologii atd. A proud I_{RRM} se nazývá maximální zpětný zotavovací proud nebo také komutační proud. Tento proud má za následek vypínací ztrátový výkon diody, který je nutno uvažovat při práci na kmitočtech větších než 400 Hz [17].

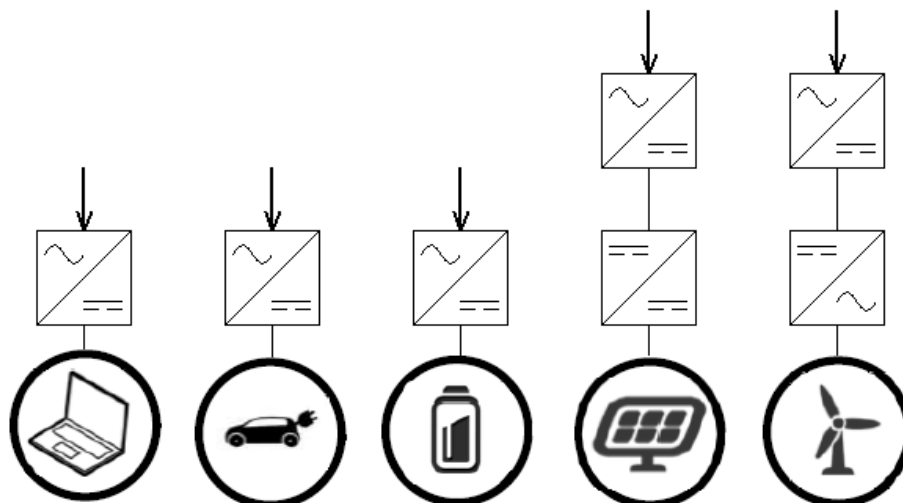
3.5 USMĚRŇOVAČE

Usměrňovače jsou elektrotechnická zařízení sloužící k přeměně střídavých napětí a proudů na stejnosměrná napětí a proudy. Usměrňovače se rozvíjely již v době, kdy se v elektrotechnice začal prosazovat střídavá síť při výrobě a rozvodu elektrické energie. Tento systém nahradil původní stejnosměrný systém. Potřeba stejnosměrného napětí a proudu v řadě aplikací byla zachována dodnes. Stejnosměrné napětí a proud se využívají při výrobě hliníku, chlóru, mědi a jiných elektrolytických aplikacích. V průběhu rozvoje techniky byla přeměna střídavého proudu na proud stejnosměrný prováděna rotačními elektrickými stroji (konvertory), motorgenerátory, kontaktními usměrňovači, rtuťovými usměrňovači a polovodičovými usměrňovači.

Rozvoj polovodičové techniky vede ke stálému zlepšování parametrů polovodičových součástek a jejich spolehlivosti. Statické měniče, tj. měniče s polovodičovými součástkami jsou nerozšířenější, protože dosahují vysoké účinnosti a mají malé nároky na údržbu. Dále mezi jejich výhody patří absence mechanického provozního opotřebování, vysoká životnost a přijatelné ceny. Mezi nevýhody usměrňovačů patří nesinusový odběr z napájecí střídavé sítě. Tato negativní vlastnost usměrňovačů je způsobena harmonickými složkami proudu a zhoršeným účínkem.

Použití usměrňovačů našlo uplatnění v technických oborech například: fotovoltaické systémy, elektrické dráhy, městská doprava, těžební a důlní stroje, válcovny, pohony stejnosměrnými stroji v průmyslu a domácnostech, nabíjení baterií, odpopílkování, buzení

elektrických stejnosměrných a střídavých strojů včetně turbo- a hydro-alternátorů, přeměna elektrického proudu při stejnosměrných přenosech elektrické energie, usměrňovače pro automobily a další, viz Obrázek 3-13 [19]. Usměrňovače se vyrábějí v rozsahu napětí několika voltů až několika set kV, v rozsahu proudů mA až 100 kA a v rozsahu výkonů W až několik stovek MW [19].



Obrázek 3-13: Využití usměrňovačů v technických oborech [16]

Usměrňovače dělíme podle následujících hledisek [21]:

a) Podle říditelnosti:

- *Neřízené* – diodové, tj. vstupní fázový proud odebíraný ze sítě je nesinusový.
- *Řízené* – tyristorové, tj. vstupní proud je nesinusový.
- *Polořízené* - tyristory i diody (úspěšná varianta řízených usměrňovačů), tj. vstupní proud je nesinusový.
- *Aktivní* - tranzistory a diody, tj. vstupní proud je téměř sinusový, s nulovým fázovým posuvem. Lze dosáhnout účinnosti až $\lambda = 0,99$. Jedná se o tranzistorový střídač (stejnosměrné na střídavé napětí) pracující s obráceným směrem toku energie (střídavé na stejnosměrné napětí),

b) Podle zapojení:

- *Místkové* – není zapojen nulový vodič sítě. Výhoda: vstupní fázový proud neobsahuje stejnosměrnou složku
- *Uzlové* – je zapojen nulový vodič sítě, zátěž je na něj jedním koncem připojena. Nevýhoda: vstupní fázový proud obsahuje stejnosměrnou složku (kterou je stejnosměrně přesycován síťový transformátor).

c) Podle počtu fází napájecí sítě m - fázové:

- *Bez použití transformátoru* - může číslo m v trojfázové napájecí soustavě nabývat hodnot pouze $m = 1, 3$.
- *S použitím speciálního transformátoru* - může číslo m v trojfázové napájecí soustavě nabývat hodnot $m = 1, 2, 3, 6$ (výjimečně i 12 u transformátorů s lomenými hvězdami).

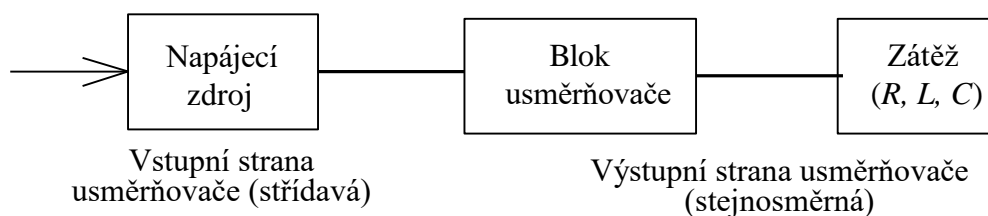
- d) Podle přítomnosti nulové diody:
- *Usměrňovače bez nulové diody* - umí pracovat v I. Q nebo IV. Q. Ve čtvrtém kvadrantu vracejí energii zpět do sítě.
 - *Usměrňovače s nulovou diodou* - umí pracovat pouze v I. Q. Neumí vracet energii zpět do sítě. Výhodou je menší zvlnění výstupního stejnosměrného napětí, tedy i výstupního proudu.
- e) Podle počtu usměrňovaných pulsů v jedné síťové periodě q -pulsní:
- *U můstkových usměrňovačů* - může číslo q nabývat hodnot $q = 2m$. Tj. v trojfázové napájecí soustavě: $q = 2, 6, 12$ (výjimečně 24).
 - *U uzlových usměrňovačů* - může číslo q nabývat hodnot $q = m$. Tj. v trojfázové napájecí soustavě: $q = 1, 2, 3, 6$, (výjimečně 12).

3.5.1 POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE - UZLOVÉ

Jak bylo zmíněno v úvodu, usměrňovač je druh výkonového polovodičového měniče, který je používán k přeměně střídavého proudu na stejnosměrný. Obecně je k této přeměně potřeba několik částí [20]:

- Napájecí zdroj (m -fázová střídavá napájecí síť- popř. transformátor)
- Vlastní blok usměrňovače obsahující výkonové polovodičové součástky (VPS)
- Zátěž sestávající z kombinace zapojení prvků obvodu R, L, C

Na Obrázku 3-14 [20] lze je znázorněno blokové uspořádání polovodičového usměrňovače.



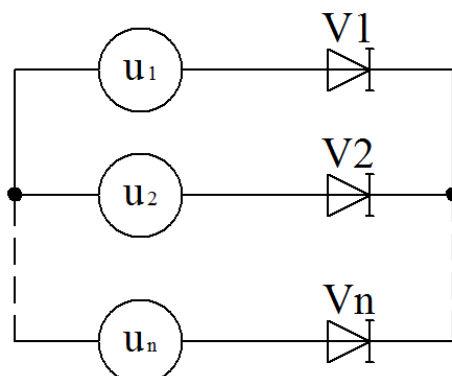
Obrázek 3-14.: Bloková sestava polovodičového usměrňovače [20]

3.5.1.1 NEŘÍZENÉ POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE V JEDNOCESTNÉM ZAPOJENÍ

Obecný více pulzní (q - pulzní) usměrňovač tvořen q větvemi s minimálně jednou polovodičovou součástkou. V případě $q > 1$ jsou použité výkonové polovodičové součástky (D-diody atd.) shodným pólem spojeny a vzniká tak katodový (+) nebo anodový (-) uzel. Každá z větví usměrňovače je napájena jednou fází m -fázového střídavého zdroje, viz Obrázek 3-15 [20].

Pro tento druh spojení platí, že počet pulzů je roven počtu fází zdroje. V tomto uzlovém zapojení je zátěž připojena mezi „uzel“ vícefázového zdroje a „uzel“ výkonových polovodičových součástek. Zdroj je tedy tvořen m - fázovou soustavou střídavých napětí, která jsou vzájemně posunuta o úhel $2\pi/m$. Většího počtu fází lze dosáhnout vhodným spojením sekundárních vinutí napájecího transformátoru. Pro toto zapojení je charakteristické, že proud na střídavé straně usměrňovače prochází jen jedním směrem [20].

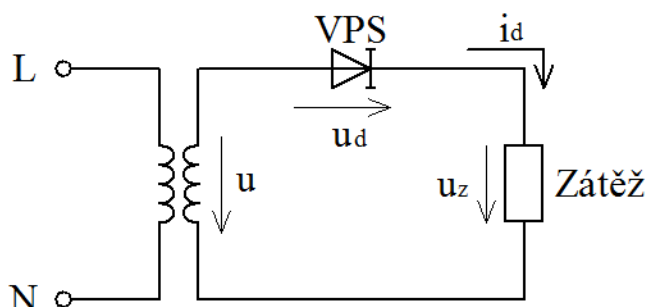
Na Obrázku 3-15 je znázorněn q -pulsní usměrňovač v jednosměrném uzlovém zapojení, který je napájen m fázemi.



Obrázek 3-15: q -pulsní usměrňovač v jednosměrném uzlovém zapojení [20]

3.5.1.2 JEDNOFÁZOVÝ JEDNOPULZNÍ USMĚRŇOVAČ

Jednofázový jednopulzní usměrňovač, který může být řízený nebo neřízený. Je to nejjednodušší možné zapojení usměrňovače, kdy v sérii se zátěží je zapojena jedna výkonová polovodičová součástka VPS. Podle Obrázku 3-16 [19] je usměrňovač napájen jednofázovým napětím. V případě, že je usměrňovač neřízen je VPS dioda, která je sepnutá v propustném směru vypnutá ve zpětném směru. Provozní vlastnosti usměrňovače jsou závislé na parametrech zátěže [20].



Obrázek 3-16: Jednopulzní usměrňovač s obecnou zátěží [19]

Zapojení je napájeno z jednofázového střídavého zdroje (sít' nebo transformátor) s harmonickým napětím [21]

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3-8)$$

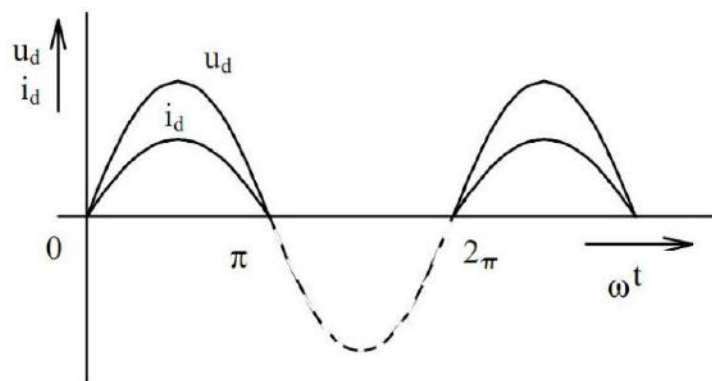
kde u je vstupní střídavé napětí (V), U_m je amplituda střídavého napětí (V), ω úhlová frekvence (rad/s) a t čas (s).

Jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí je dána vztahem [21]

$$U_d = U_a \cdot \frac{1}{\pi}, \quad (3-9)$$

kde U_d jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí (V) a U_a je amplituda sdruženého (fázového) napětí (V).

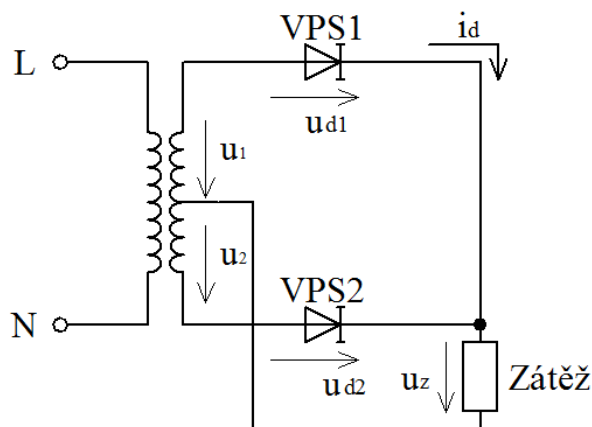
Na Obrázku 3-17 [21] je znázorněn průběh výstupních stejnosměrných veličin, tj. napětí a proud při zatížení ohmickou zátěží.



Obrázek 3-17: Průběh napětí a proudu jednopulzního usměrňovače s obecnou ohmickou zátěží [19]

3.5.1.3 JEDNOFÁZOVÝ DVOUPULZNÍ JEDNOCESTNÝ USMĚRŇOVAČ

Dvoupulzní uzlový usměrňovač je napájený z jednofázového transformátoru, z jehož sekundárního vinutí je vyveden střední vodič (střed). Tento střední vývod je připojen k jednomu přívodu zátěže. Druhý přívod zátěže je připojen k uzlu polovodičových součástek (diod). Střední vývod výstupního vinutí transformátoru tvoří uzel dvou fázových napětí [21]. Zapojení je znázorněno na Obrázku 3-18 [19].



Obrázek 3-18: Dvoupulzní usměrňovač s obecnou zátěží [19]

Zapojení je napájeno z jednofázového střídavého zdroje transformátor, s vyvedeným středem sekundárního vinutí, s harmonickým napětím [21]

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \cdot \sin(\omega \cdot t) = -u_2, \quad (3-9)$$

kde U_{ef} efektivní hodnota výstupního napětí transformátoru (V), ω úhlová frekvence (rad/s) a t čas (s).

Usměrněné napětí je složeno z kladných půlvln napětí u_1 a u_2 . V průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří dva pulsy – odtud název dvoupulzní usměrňovač. Jmenovitá střední

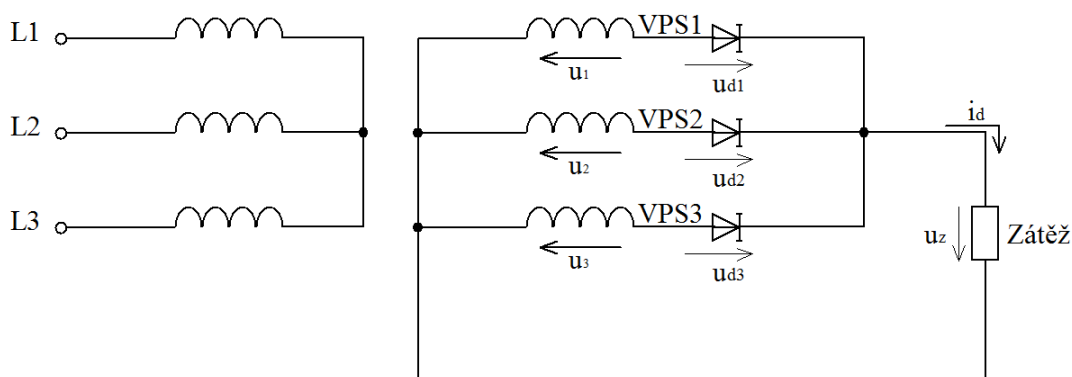
hodnota stejnosměrného napětí je dána vztahem pro q -pulsní ($q > 1$) neřízený diodový usměrňovač [21]

$$U_d = U_a \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{q} = U_{s,ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{q}, \quad (3-10)$$

kde U_d je jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí (V), q je počet pulzů, U_a je amplituda sdruženého (fázového) napětí (V) a $U_{s,ef}$ je efektivní hodnota sekundárního fázového napětí (V).

3.5.1.4 TŘÍFÁZOVÝ TROJPULZNÍ JEDNOCESTNÝ USMĚRŇOVAČ

Zapojení trojpulzního uzlového usměrňovače je znázorněno na Obrázku 3-20 [21]. Trojpulzní uzlový usměrňovač bývá v praxi napájen z trojfázového transformátoru, jehož primární vinutí je zapojeno buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka, zatímco sekundární vinutí je vždy zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem. Napájecí napětí usměrňovače tvoří trojfázovou souměrnou soustavu s vzájemným fázovým posunem $2\pi/3$, tj. 120 stupňů elektrických [20].



Obrázek 3-19: Trojpulzní usměrňovač s obecnou ohmickou zátěží [20]

Průběhy obvodových veličin pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na - Obrázku 3-21 [21].

Obecně pro napájecí (vstupní) napětí usměrňovače napájeného m -fázemi platí, že napětí n -té fáze se určí podle vztahu[20]

$$u_n = U_m \cdot \sin \left[\omega \cdot t - (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right], \quad (3-11)$$

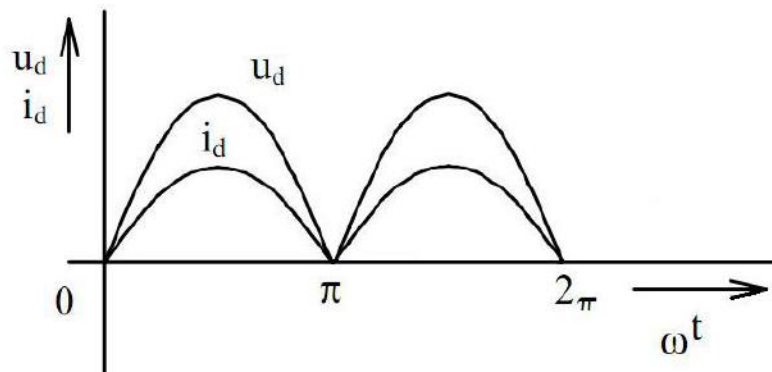
kde: U_m je amplituda střídavého napětí (V), ω úhlová frekvence (rad/s), t čas (s), m je počet fází a n je pořadí fáze.

Kladné hodnoty napětí generují v příslušné větvi proud v přímém směru polovodičové součástky. V sepnutém (vodivém) stavu je vždy ta dioda, která je připojena k fázovému napětí s největší okamžitou hodnotou. Průběh usměrňovaného napětí u_d je tvořen z kladných půlvln fázových napětí u_1 , u_2 , u_3 . V průběhu každé periody (20 ms) napájecího napětí se vytváří tři pulsy, odtud název trojpulzní usměrňovač.

Jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí je dána vztahem pro q -pulsní ($q > 1$) neřízený diodový usměrňovač [21]

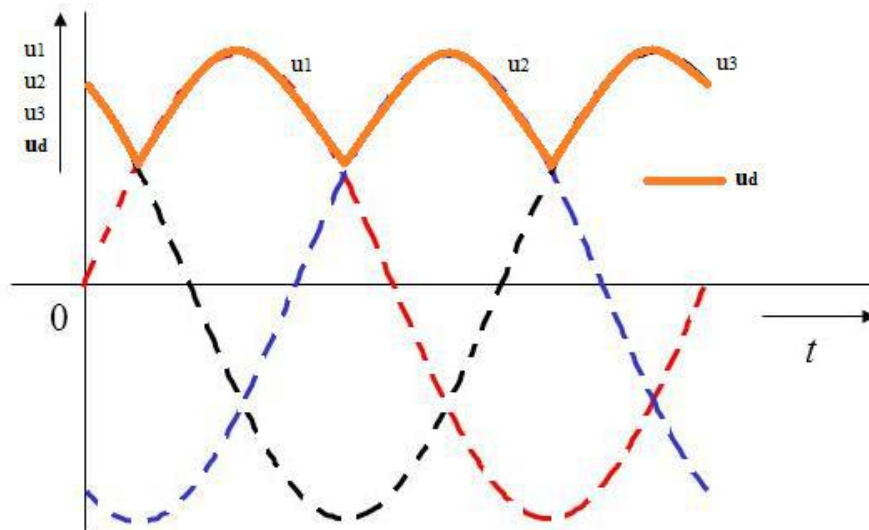
$$U_d = U_a \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{q} = U_{s,ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{q}, \quad (3-12)$$

kde: U_d je jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí (V), q je počet pulzů, U_a je amplituda sdruženého (fázového) napětí (V) a $U_{s,ef}$ je efektivní hodnota sekundárního fázového napětí (V).



Obrázek 3-20: Průběh napětí a proudu dvojpulzního usměrňovače s obecnou ohm. zátěží [19]

Průběhy obvodových veličin pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na Obrázku 3-21 [19].



Obrázek 3-21: Průběh napětí a proudu trojpulzního usměrňovače s obecnou ohmickou zátěží [19].

3.5.1.5 TŘÍFÁZOVÝ ŠESTIPULZNÍ UZLOVÝ USMĚRŇOVAČ

Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač je kombinací dvou trojpulzních usměrňovačů, kde jednotlivá napájecí napětí (vstupní) jsou vzájemně posunuta o třicet stupňů elektrických. Tohoto posunu lze docílit pomocí transformátoru s hodinovým úhlem 60 stupňů elektrických, tj. 2 hodiny, který napájí usměrňovač. Hodinový úhel je závislý na zapojení primárního

a sekundárního vinutí transformátoru (např. Dz2). Napětí v každé fázi sekundárního vinutí je posunuto o daný úhel vůči napětí téže fáze primárního vinutí. Jmenovitá střední hodnota stejnosměrného napětí je dána vztahem 3-10 a výstupní napětí je více vyhlazené, protože v jedné periodě se vytváří šest pulzů [20].

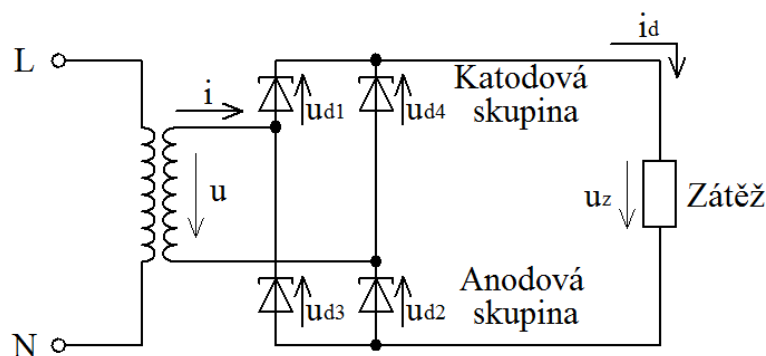
3.5.2 POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE - MŮSTKOVÉ

Usměrňovač v můstkovém zapojení je složen ze sériového spojení dvou uzlových usměrňovačů. Na vstupní svorky dvou uzlových usměrňovačů zapojených s opačnou polaritou výkonových polovodičových součástek, je přiváděno společné napájecí napětí. V praxi používají jen jednofázová a trojfázová provedení usměrňovačů [19].

3.5.2.1 JEDNOFÁZOVÝ DVOUPULZNÍ DVOUCESTNÝ USMĚRŇOVAČ

Jedná se o nejpoužívanější způsob usměrnění jednofázové sítě. Zapojení usměrňovače je znázorněno na Obrázku 3-22 [21]. Usměrňovač může být napájen, jak fázovým, tak sdruženým napětím. Výkonové polovodičové součástky jsou uspořádány do dvou skupin, katodové a anodové, po dvou součástkách [21].

Vstupní proud i bude procházet oběma směry, tj. do obou skupin a pro odporovou zátěž bude úměrný napájecímu napětí. Proud v obvodu usměrňovače bude procházet vždy tou dvojicí výkonových polovodičových součástek, na kterých je kladné napětí. Každá dvojice výkonových polovodičových součástek povede za dobu jedné periody proud v intervalu 180° [19].



Obrázek 3-22: Dvojpulzní usměrňovač v můstkovém zapojení [21]

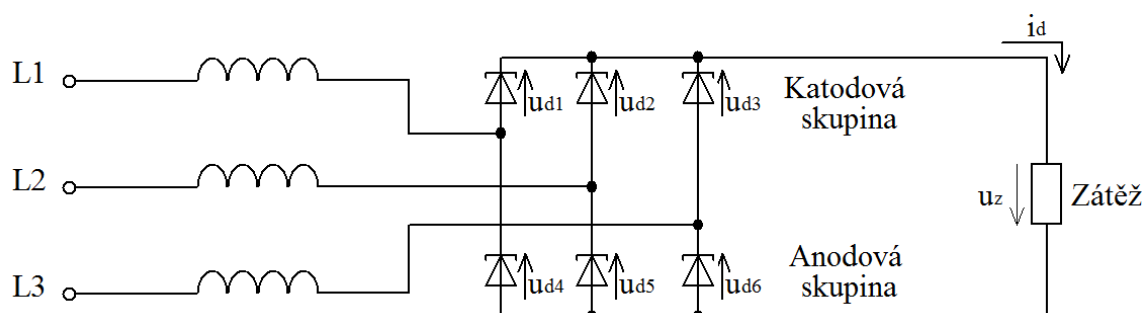
Průběhy výstupních veličin u_d a i_d jsou obdobné, jako v případě uzlového provedení, viz Obrázek 3-19 [19]. Napětí na jednotlivých výkonových polovodičových součástkách je poloviční.

3.5.2.2 TROJFÁZOVÝ ŠESTIPULZNÍ USMĚRŇOVAČ

Jedná se o nejpoužívanější způsob usměrnění třífázové sítě. Zapojení usměrňovače je znázorněno na Obrázku 3-23 [21]. Usměrňovač je napájen sdruženým napětím nikoliv

fázovým. Výkonové polovodičové součástky jsou uspořádány do tří skupin, katodové a anodové, po dvou součástkách [21].

Napětí v jednotlivých fázích působí vždy na dvojici polovodičových výkonových součástek, tvořících jednu větev usměrňovače. Vstupní proud každé fáze bude procházet oběma směry. Proud v obvodu usměrňovače bude procházet vždy tou dvojicí výkonových polovodičových součástek, na kterých je kladné napětí. Každá výkonová polovodičová součástka povede za dobu jedné periody proud v intervalu 120° a dvojice pak v intervalu 60° [19].



Obrázek 3-23: Trojfázový šestipulzní usměrňovač v můstkovém zapojení [20]

Průběhy výstupních veličin u_d a i_d jsou obdobné, jako v případě uzlového provedení, viz Obrázek 3-21 [21].

Proud odebíraný z napájecí sítě je neharmonický. Tento proud obsahuje množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí. Skutečný tvar proudu je závislý na parametrech zátěže [20].

3.5.3 POROVNÁNÍ MAXIMÁLNÍCH STŘEDNÝCH HODNOT VÝSTUPNÍCH NAPĚTÍ

Různá provedení a zapojení usměrňovačů, která nepájíme ze střídavé sítě, jak jednofázové, tak i třífázové popřípadě m – fázové, mají na výstupu různou velikost stejnosměrného napětí. Porovnání maximálních středních hodnot výstupního stejnosměrného napětí při různém síťovém napětí je zapsána v Tabulce 3-2 [21].

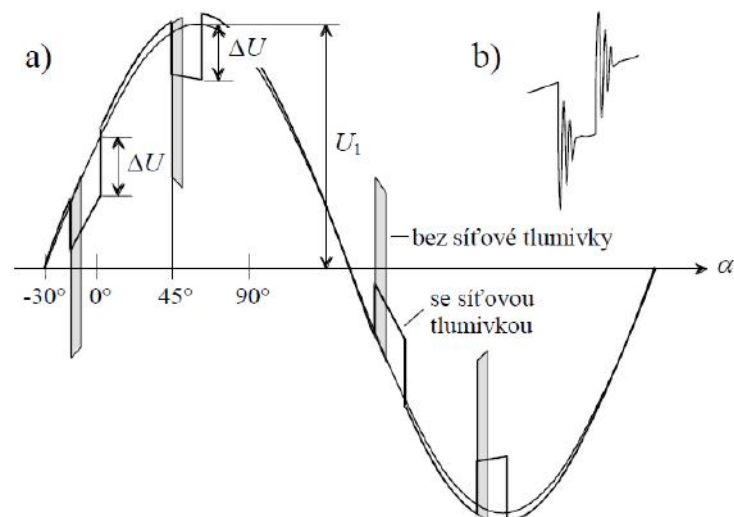
Tabulka 3-2: Maximální střední hodnoty výstupního napětí $U_{d,max}$ různých usměrňovačů [21].

Síťové napětí	Typ usměrňovače	Počet pulzů - q	Amplituda napájecího napětí - U_a	$U_{d,max}$
3 x 230 V	uzlový	3	325 V	270 V
1 x 230 V	můstkový	2	325 V	207 V
1 x 400 V	můstkový	2	565 V	360 V
3 x 400 V	můstkový	6	565 V	540 V
6 x 400 V	můstkový	12	565 V	559 V

3.5.4 KOMUTAČNÍ POKLESY

Pro provoz usměrňovačů se síťovou komutací, tj. řízených sítí je charakteristické, že se u nich vyskytuje periodický krátkodobý pokles napětí sítě. Tento pokles je způsoben zkratem mezi dvěma fázovými vodiči. Tento zkrat vzniká při každé komutaci a trvá tak dlouho, než dojde k úplnému převzetí proudu další diodou. Hloubka těchto komutačních poklesů závisí mimo jiné na řídicím úhlu α výkonových polovodičových součástek (tyristorů) u řízených usměrňovačů. Maximálních hodnoty poklesu nastávají při $\alpha = 90^\circ$. Komutační poklesy se tedy vyskytují u řízených usměrňovačů a u nařízených diodových usměrňovačů nehrají takovou roli [22].

Na Obrázku 3-24 a) [22] je znázorněn teoretický průběh fázového (vstupního) napětí šestipulzního usměrňovače, kde výkonové řízené polovodičové součástky (tyristory) mají řídicí uhel $\alpha = 45^\circ$. Na začátku a na konci poklesu jsou vidět superponované komutační zákmity, jejichž detail je vidět na Obrázku 3-24 b) [22].



Obrázek 3-24: Komutační poklesy ve fázovém napětí [22]

Komutační poklesy, viz Obrázek 3-24 a) [22], vyznačeny šedou barvou, vzniknou v případě, že je usměrňovač připojen k přímo k napájecí síti. Hloubka poklesů se zmenší předřazením síťové tlumivky, ale doba jejich trvání vzroste [22].

Komutační poklesy společně se superponovanými zákmity způsobují následující vlivy [22]:

- „akustické rušení u elektromagnetických prvků (motory, transformátory a tlumivky v elektrických přístrojích)
- přenos vyšších frekvencí přes síť do elektronických zařízení; u elektroakustických přístrojů mohou být slyšitelné z reproduktorů
- rušení obrazu na monitorech
- vyzařování do radiových zařízení
- chybný údaj času u hodin, odvozujících čas od průchodů napětí sítě nulou.“

Relativní hloubka komutačního poklesu se označuje jako d_{Kom} a je dána jako největší odchylka ΔU_{Kom} napětí sítě od okamžité hodnoty napětí základní harmonické, která je vztažena k vrcholové hodnotě U_1 , viz Obrázek 3-24 a)[22].

$$d_{Kom} = \frac{\Delta U_{kom}}{U_1} \quad (3-13)$$

Relativní hloubka komutačních poklesů d_{Kom} nemá při nejnepříznivějším provozním stavu překročit hodnoty pro sítě nízkého napětí $d_{Kom} = 0,1$ a pro sítě vysokého napětí $d_{Kom} = 0,05$ [22].

4 VÝPOČETNÍ PROGRAM BIZON

Program Bizon, který patří k základnímu softwarovému vybavení společnosti E. ON, je součástí programového řady softwaru PASS DAISY OFF-LINE. Tento program je určen pro plánování rozvoje, projektování a dlouhodobou přípravu provozu rozvodných sítí NN, VN, VVN. Tento software umožňuje výpočet pro nastavení ochran a jištění pojistkami i jističi. Základní vlastností programu patří schopnost spolupráce s geografickými informačními systémy (GIS), například s TOMS firmy BERIT. Tento systém je založen na technologii LIDS IT.

Výhodou tohoto výpočetního programu je, že zde nejsou matematické metody významně zjednodušeny a nedochází k přílišnému zanedbání u některých částí výpočtů či veličin, jako při výpočtech bez využití počítačového. Významná zjednodušení a zanedbání by mohla při výpočtu běžné rozsáhlé sítě způsobit značnou chybu výsledků a to zejména při výpočtu mezních provozních stavů [25]. Tento program je využívám pro střídavou analýzu, tj. pro výpočet ustáleného chodu pro třífázové soustavy. Při výpočtu jednofázového odběru je výpočet zatížen chybou cca 30 %, s touto chybou je nadále uvazováno, tak aby se daly porovnat výsledky. Program též neumí provádět stejnosměrnou analýzu, tj. nelze tento program využít na výpočet stejnosměrné analýzy dané lokality, proto bude stejnosměrná analýza řečena postupnou iterační metodou s učenými počátečními podmínkami.

Výhody programu Bizon [26]:

- Snadné vytváření a následná úprava schématu sítě přímo v okně programu.
- Velikost počítané sítě je takřka neomezena (může být omezena licenčními podmínkami).
- Databáze je vytvářena současně s tvorbou schématu – okamžitě lze provádět výpočty.
- Snadné propojení s reálnými daty ze systémů PAS DAISY On-line nebo jiných zdrojů.
- Možnost přiřazovat odběrová místa uzlům,
- Plnohodnotný výpočetní model trojvinutového transformátoru a souběžného vedení.
- Grafické odlišení venkovních a kabelových vedení.
- Kontrola sítě proti náhodným výpadkům (contingency analysis)
- Ověření zamýšlených změn v síti (zatížení linek, transformátorů...).
- Zobrazení výsledků s analýzy sítě v tabulkách.
- Tisk výsledků do tabulek a grafů, při tisku jsou zachováno barevné rozložení schématu.
- V jednom okamžiku lze zpracovávat několik nezávislých sítí nebo jejich variant.
- Do programu lze doplnit další funkce dle potřeb konkrétního zákazníka.
- Všechny zobrazované informace jsou ukládány v reálných souřadnicích (milimetrech).
- Mapové podklady lze zpracovávat obdobným způsobem jako systémech GIS: spolupráce s katalogem map s využitím jak rastrových, tak i vektorových formátů elektronických map.

- Podpora týmové spolupráce celých skupin uživatelů se schopností správy a používání referenčních dat.
- Okamžité vyhodnocení a zobrazení topologie,
- Analýza zkratových poměrů v síti: úplný výpočet symetrických, nesymetrických zkratů.

4.1 VÝPOČETNÍ METODY PROGRAMU BIZON

4.1.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ (LFOFF)

Cílem této metody je poskytování přehledu stavu sítě a umožněno porovnávání jednotlivých provozních variant s ohledem na minimalizaci ztrát v síti, na napěťový profil aj. Výpočet probíhá Newton-Raphson iterační metodou, která je v základech popsána v kapitole 2.6.1, čímž je zaručena rychlá a spolehlivá konvergence výpočtu. V této metodě není nutné provádět sestavení Jacobiánu v každé iteraci. Výpočet probíhá samostatně pro každý uzel v soustavě či síti [25].

4.1.2 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ SÍTĚ – ZKOFF

Cílem této metody je poskytování provozního přehledu o současném stavu sítě a umožňuje ověřovat přípustnost plánovaných zásahů do provozu sítě. Dále umožňuje porovnávání jednotlivých provozních variant s ohledem na nastavení ochran atd. Výpočet probíhá metodou souměrných složek. Pro jednotlivé složkové soustavy je sestavena imedanční matice, která se triangularizuje a jsou připraveny transformační vektory pro zpětný chod. S pomocí těchto matic se pro každý požadovaný uzel sítě provede pouze zpětný chod a určí se složková napětí v soustavě. Z těchto napětí jsou vypočteny zkratové poměry v požadovaném rozsahu sítě. Veškeré vytvořené matice jsou komplexní, jsou tedy uvažovány u všech síťových prvků reálné a imaginární složky vodivosti. Vždy je možné počítat kterýkoliv druh zkratu (třífázový, jednofázový, dvoufázový, nebo dvoufázový zemní zkrat) [25].

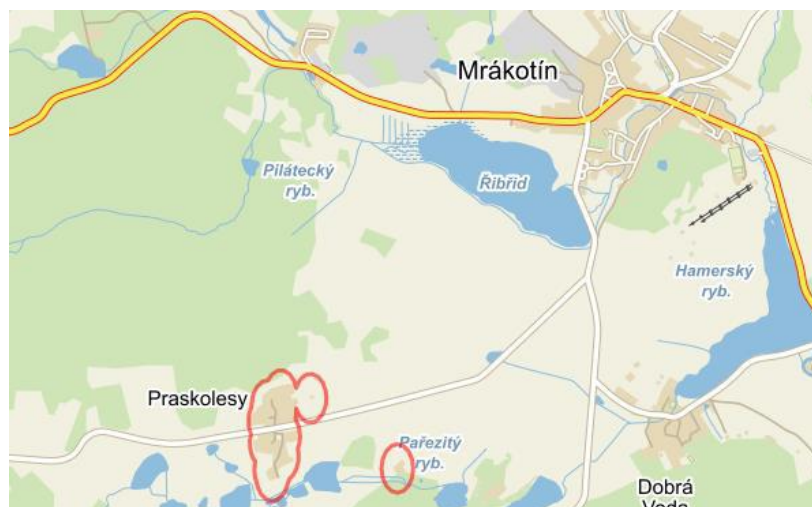
5 CHARAKTERISTIKA OBLASTI

Na výběr oblasti bylo kladeno několik požadavků. Jelikož na navrhování a provoz stejnosměrných distribučních sítí neexistují konečná pravidla, tj. normy atd., byla vybrána pouze malá obec, pro kterou bude proveden teoretický návrh stejnosměrné sítě společně. Teoretický návrh bude doplněn o výpočet ztrát v zadané oblasti. Výpočet provozního chodu sítě pro střídavou analýzu distribuční sítě v zadané oblasti bude proveden pomocí Newtonovy iterační metody s pomocí softwarové podpory výpočetního programu Bizon. Stejnosměrná analýza zadané distribuční oblasti bude provedena prostou iterační metodou, protože stejnosměrná analýza je, díky absenci frekvence, jednodušší.

Při výběru oblasti bylo potřeba vzít v úvahu možné použití stejnosměrné sítě v soustavách nízkého napětí. Nejvýhodnější použití stejnosměrných sítí v soustavách nízkého napětí je v distribučních oblastech, kde se vyskytují dlouhé vývody například k chatové oblasti, hájence atd. Tyto vývody jsou realizovány pomocí nadzemního vedení pomocí holých vodičů na podpěrných bodech. Holé vedení má oproti kabelovému vedení horší provozní parametry (odpor a reaktanci) tudíž na něm vznikají větší ztráty. Dlouhý vývod, potažmo velký rozsah venkovního vedení je jeden z požadavků při výběru dané oblasti. Dalším požadavkem je oblast, která je napájena za pomoci jednoho transformátoru. Posledním požadavkem je co nejmenší počet odběrných míst, to v kombinaci s velkým rozsahem venkovního vedení zajišťuje ideální distribuční oblast pro tento teoretický návrh stejnosměrné sítě.

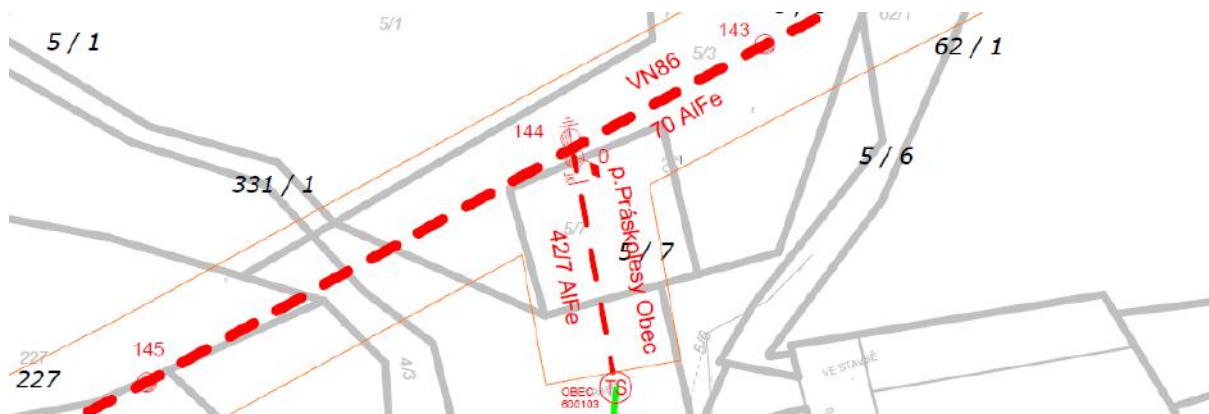
5.1 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ OBLASTI OBCE PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA

Výše uvedeným požadavkům vyhovovalo, na území distribuční společnosti E. ON, několik menších obcí. Vybrána byla obec, která nejvíce vyhovovala požadavkům. Obec Praskolesy u Mrákotína je malá vesnice, která se nachází u městyse Mrákotín. Městys Mrákotín leží v okrese Jihlava nedaleko města Telč v kraji Vysočina. Poloha obce Praskolesy u Mrákotína je vidět na Obrázku 5-1 [27].



Obrázek 5-1: Poloha obce Praskolesy u Mrákotína [27]

Obec Praskolesy u Mrákotína je napájena z transformační stanice 110/22 kV TELČ, přesněji vývodem z této transformační stanice, tj. venkovním (70 ALFe) kmenovým vedením s označením VN 86, viz Obrázek 5-2.



Obrázek 5-2: Kmenové vedení VN 86 - napájení obce Praskolesy u Mrákotína

Z kmenového vedení VN86, přesněji z podpěrného bodu č. 144 je vyvedena odbočka pro napájecí transformátor o výkonu 100 kVA. Transformátory o výkonu 100 kVA se používají pro napájení míst s malou hustotou odběru, například samoty aj. Tento transformátor je umístěn na betonovém podpěrném sloupu, na kterém je umístěna stožárová transformační stanice (viz Obrázek P-3) dimenzována na výkon transformátoru až 400 kVA. Transformační stanice je v katastrálních mapách společnosti E. ON označena číslem 600103. Transformační stanice prošla rekonstrukcí společně s distribuční sítí (nadzemní vedení atd.), kde většina nadzemního vedení s holými či izolovanými vodiči na podpěrných bodech byla nahrazena kabelovým vedením uloženým v zemi. Rekonstrukce proběhla v roce 2012.

Parametry použitého napájecího transformátoru v transformační stanici obce Praskolesy u Mrákotína jsou uvedeny v Tabulce 5-1.

Tabulka 5-1: Parametry použitého distribučního transformátoru

Parametry transformátoru - 1006101084	Jednotka
Jmenovitý výkon	100 kVA
Jmenovité napětí - primární vinutí	22 kV
Jmenovité napětí - sekundární vinutí	0,4 kV
Maximální proud - primární vinutí	2,62 A
Maximální proud - sekundární vinutí	144,5 A
Ztráty naprázdno	0,23 kW
Proud naprázdno	0,867 A
Ztráty nakrátko	1,75 kW
Napětí nakrátko (%)	4%

Ze stožárové transformační stanice jsou vyvedeny celkem tři vývody, kterými je napájena celá obec Praskolesy u Mrákotína. Tyto vývody jsou rozděleny na celkem 35 úseků vedených kabelovým vedením uloženým v zemi a jedním dlouhým vývodem venkovním vedením

s izolovanými vodiči na podpěrných bodech. Tento dlouhý vývod napájí samotou vzdálenou cca 500 metrů od poslední rozpínací skříně v obci Praskolesy u Mrákotína, viz Obrázek 6-4. Kabelová vedení použitá pro napájení obce mají celkovou délku cca 1510 metrů a venkovní vedení zaujímá délku cca 485 metrů. Celková délka vedení nízkého napětí, ať už kabelového nebo venkovního, je cca 1990 metrů. Tyto vedení napájí celkem 19 odběrných míst z toho 17 z nich je používáno. Odměrná místa mají charakteristické hodnoty proudu hlavního jisticího prvku od 1x16 do 3x60 A. Dále 9 odběrných míst je zapojeno do systému hromadného dálkového ovládání (HDO), tj. dvoutarifní měření spotřeby. Spotřeba odběrných míst se pohybuje v rozmezí od 20 do 12530 kWh. Popis odběrných míst jsou uvedeny v Tabulce 5-2.

Tabulka 5-2: Odběrná místa v obci Praskolesy u Mrákotína

Označení	<i>I_n</i>	Spotřeba	Spotřeba VT	Spotřeba NT
	(A)	[kWh]	[kWh]	[kWh]
4190087455	3x16	3710	3710	0
4190099795	3x32	7510	3140	4370
4190553819	3x25	3340	490	2850
4190553821	1x16	0	0	0
4190553823	3x16	0	0	0
4190553825	3x25	3730	1340	2390
4190553830	3x20	4300	3250	1050
4190553832	3x25	1110	630	480
4190553834	1x16	280	280	0
4190553838	3x25	190	90	100
4190553842	3x20	1440	1440	0
4190553844	3x25	400	400	0
4190553850	3x25	6850	2330	4520
4190567013	3x20	12530	8790	3740
4190567344	3x25	180	180	0
4190567920	3x25	2490	1610	880
4190571574	3x25	2010	2010	0
4190573588	1x25	570	570	0
4190573589	3x60	20	20	0

V obci Praskolesy u Mrákotína se používají pro rozvod elektrické energie vesměs kabelová vedení, tj. napájí 18 odběrných míst celkem třemi kabelovými vývody z distribučního transformátoru. Pouze jedno odběrné místo je napájeno dlouhým vývodem, který je realizován venkovním vedením s izolovanými vodiči na podpěrných bodech. Použité průřezy vedení, jak kabelového tak i venkovního, jsou uvedeny v Tabulce 5-3.

Tabulka 5-3: Používané typy vedení v obci Praskolesy u Mrákotína - technické parametry

Vedení	Typ vedení	Průřez	R_k	X_k	B_k	I_{max}
		(mm ²)	(Ω/km)	(Ω/km)	(μS/km)	(A)
Kabelové	NAYY-J_4x95	95	0,32	0,082	1	215
Kabelové	NAYY-J_4x50	50	0,641	0,085	1	144
Kabelové	NAYY-J_4x25	25	1,2	0,088	1	102
Kabelové	AYKY_4x16	16	1,93	0,088	1	61
Kabelové	CYKY_4x10	10	1,88	0,3	1	81
Venkovní	NFA2X_4x50	50	0,641	0,25	-	150

Rozdělení typů vedení použitých na jednotlivé úseky v obci Praskolesy u Mrákotína je uvedeno v Tabulce 5-4.

Tabulka 5-4: Rozdělení použitého typu vedení na jednotlivé úseky

Vedení	Typ vedení	Počet úseků
Kabelové	NAYY-J_4x95	11
Kabelové	NAYY-J_4x50	1
Kabelové	NAYY-J_4x25	3
Kabelové	AYKY_4x16	9
Kabelové	CYKY_4x10	10
Venkovní	NFA2X_4x50	1

Dle prováděcího pokynu, PP-DS-139 - Koncepce sítí nízkého napětí, společnosti E. ON Česká republika, s.r.o. se využívají pro kabelové sítě vodiče o průřezu:

Hliníkové:

- 4 x 95 mm² – pro hlavní okruhy a vedlejší větve.
- 4 x 50 mm² – pro přípojky u energeticky náročných objektů.
- 4 x 25 mm² – pro T-přípojky.
- 4 x 16 mm² – pro přípojky.

Měděné:

- 4 x 10 mm² – pro hlavní domovní vedení (HDV) jako náhrada stávajících HDV při rekonstrukci

Použití nadzemního vedení je možné pouze při rekonstrukci stávajících nadzemních vedení a v případech u nichž není možné projednat náhradu kabelem. Poté je nadzemní vedení realizováno izolovanými slaněnými vodiči o průřezu:

Hliníkové:

- 4x50 mm² – pro odbočky.

V tomto výčtu nejsou vyjmenovány všechny průřezy použitých vodičů, ať už nadzemního vedení nebo vedení uloženého v zemi. Jsou zde uvedeny pouze ty vodiče, které se vyskytují v dané lokalitě, tj. v obci Praskolesy u Mrákotína [29].

Všechny výše uvedené skutečnosti jsou zohledněny při výpočtu ustáleného chodu obce Praskolesy u Mrákotína.

6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY OBCE PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA

Ustálený chod distribuční soustavy obce Praskolesy u Mrákotína byl vypočten za normálních provozních podmínek dle společnosti E. ON Distribuce, a.s. Výpočet byl proveden programem PAS Off-line Bizon v4.0.

Dle prováděcího pokynu PP-DS-139 - Koncepce sítí nízkého napětí, společnosti E. ON Česká republika, s.r.o. je při výpočtu uvažován koeficient soudobosti $\beta = 0,12$ a $0,15$. Tato soudobost vychází z podkladů pro vypracování technických návrhů distribučních sítí z prováděcího pokynu PP-DS-139 [29]. Tento materiál určuje orientační zatížení bytových odběrů dle stupně elektrifikace domácnosti a charakteru zástavby. Stupně elektrifikace se označují písmeny A až C a číslicí 1 až 3, například označení písmeno A označuje základní složku odběru, tj. osvětlení a drobné spotřebiče, písmeno B označuje elektrické vaření a elektrický ohřev teplé vody, C pak označuje vytápění.

Pro tyto stupně je v prováděcím pokynu [29] je určen charakteristický odběr s přihlédnutím k počtu obyvatel, druhu lokality (města či obce), druh zástavby, rozsah počtu bytových jednotek, charakteristika bytové zástavby a její hustota.

Pro venkovské obce s řadovou zástavbou či rodinnými domky s hustotou zástavby 20 až 80 bytových jednotek na jeden kilometr sítě s průměrnou plochou bytu 100 m^2 v rozsahu od 10 do 1000 bytových jednotek odpovídá měrné zatížení pro rok 2016 například ve stupni elektrifikace A hodnotě $1,86 \text{ kW}$ na bytovou jednotku a pro stupeň elektrifikace C odpovídá hodnotě $11,54 \text{ kW}$ na bytovou jednotku. Tyto hodnoty jsou pouze orientační, ale při výpočtu je na ně brán zřetel, tj. velikost soudobostí a odběrových výkonů vychází z tohoto prováděcího předpisu [29].

Dále je při výpočtech uvažován účinník $\cos\varphi = 0,95$ a doba užití odběrného místa 4000 hodin.

6.1 ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ

6.1.1 ODBĚRNÁ MÍSTA

Pro odběrná místa byla určena soudobost dle výše zmíněných skutečností. Na základě jmenovitého proudu jisticího prvku odběrného místa, koeficientu soudobosti lze určit činný a jalový výkon v odběrném místě dle vzorce:

Činný výkon:

$$P_{\check{c}} = \beta \cdot \sqrt{3} \cdot U_{AC} \cdot I_n \cdot \cos\varphi, \quad (7-1)$$

kde $P_{\check{c}}$ je činný výkon (W), β je koeficient soudobosti (-), U_{AC} je střídavé napětí a I_n je jmenovitý proud jističího prvku (A).

Jalový výkon:

$$P_j = \beta \cdot \sqrt{3} \cdot U_{AC} \cdot I_n \cdot \sin\varphi, \quad (7-2)$$

kde P_j je jalový výkon (W).

Tabulka 6-1: Výchozí vypočtené hodnoty odběrů a proudů při ustáleném chodu

Označení	I_n (A)	$\cos\varphi$ -	β -	$P_{\check{c}}$ (kW)	Q_j (kVAr)	$I_{\check{c}}$ (A)	I_j (A)
4190087455	3x16	0,95	0,12	1,2637	0,4154	1,92	1,92
4190099795	3x32	0,95	0,12	2,5274	0,8307	3,84	3,84
4190553819	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190553821	1x16	0,95	0,15	0	0	0	0
4190553823	3x16	0,95	0,15	0	0	0	0
4190553825	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190553830	3x20	0,95	0,15	1,9745	0,649	3,00	3,00
4190553832	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190553834	1x16	0,95	0,15	1,5796	0,5192	2,40	2,40
4190553838	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190553842	3x20	0,95	0,15	1,9745	0,649	3,00	3,00
4190553844	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190553850	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190567013	3x20	0,95	0,15	1,9745	0,649	3,00	3,00
4190567344	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190567920	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190571574	3x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190573588	1x25	0,95	0,15	2,4682	0,8112	3,75	3,75
4190573589	3x60	0,95	0,15	5,9236	1,947	9,00	9,00

Z činných a jalových odběrů byly vypočteny činné a jalové proudy, které figurují při výpočtu ztráty ve vedení aj. Tyto proudy budou též použity pro výpočet stejnosměrné části, kde budeme uvažovat jejich algebraický součet za proud v odběrném místě.

Proudy z Tabulky 7-1 byly vypočteny podle vzorců (6-3) a (6-4)

Pro činný proud platí:

$$I_{\zeta} = \frac{P_{\zeta} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{AC} \cdot \cos\varphi}, \quad (6-3)$$

kde I_{ζ} činný odběrový proud (A), $P_{odběr}$ činný odběr odběrného místa (kW) a U_{AC} je střídavé napětí (V)

Pro jalový proud platí:

$$I_j = \frac{Q_j \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{AC} \cdot \sin\varphi}, \quad (6-4)$$

kde I_j jalový odběrový proud (A), $Q_{odběr}$ jalový odběr odběrného místa (kW).

6.1.2 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTOR

Při výpočtu ustáleného chodu bylo určeno zatížení transformátoru s ohledem na výkony odběrných míst. Dále byly vypočteny odebírané výkony na primární a sekundární straně distribučního transformátoru a dále byly vypočteny ztráty, jak činná tak ve vinutí. Všechny tyto hodnoty jsou zaznamenány v Tabulce 6-2.

Tabulka 6-2: Vypočtené hodnoty při ustáleném chodu - distribuční transformátor

Označení		Typ		
TRAFO1006101084		22_04_100		
Primární strana				
U	$Fáze - U$	I	P_{ζ}	Q_j
[kV]	[°]	(A)	(kW)	(kVAr)
22	0	1	-40,5	-14,5
Sekundární strana				
U	$Fáze - U$	I	P_{ζ}	Q_j
[kV]	[°]	(A)	(kW)	(kVAr)
0,395	-0,7	61	40	13,5
Ztráty				
Činné ztráty		Ztráty ve vinutí	Naprázdno	
(kW)		(kW)	(kW)	
0,548		0,321	0,227	
Celkové zatížení				
(%)				
43				

6.1.3 ÚSEKY VEDENÍ

Tabulka 6-3: Vypočtené hodnoty při ustáleném chodu - úseky vedení

Č.	Označení	Typ vodiče	Průřez [mm ²]	l [m]	R [Ω]	X [Ω]	B [Ω]	U [V]	P _{odběr} [kW]	Q _{odběr} [kVAr]	I _ε [A]	I _l [A]	Zatížení [%]	ΔP _ε [W]	ΔQ _l [W]	ΔU [V]
1	KABK1022412359	NAYY-J_4x95	95	66,61	0,0213	0,0055	0,0666	390	2,4	0,8	3,74	1,25	2	0,89	0,03	0,09
2	ROZVED1	NAYY-J_4x95	95	57,13	0,0183	0,0047	0,0571	394,5	20,7	6,8	31,89	32,00	15	55,83	14,44	0,73
3	ROZVED10	NAYY-J_4x95	95	24,36	0,0078	0,002	0,0244	393	11,2	3,6	17,32	17,00	8	7,02	1,73	0,17
4	ROZVED11	NAYY-J_4x95	95	155,88	0,0499	0,0128	0,1559	390,5	8,7	2,8	13,54	16,00	6	27,44	9,83	0,88
5	ROZVED2	NAYY-J_4x95	95	67,05	0,0215	0,0055	0,0671	392	18,2	6	28,22	28,00	13	51,35	12,94	0,76
6	ROZVED3	NAYY-J_4x95	95	184,84	0,0591	0,0152	0,1848	393	15,8	5,2	24,43	20,00	9	105,84	18,24	1,75
7	ROZVED4	NAYY-J_4x95	95	67,99	0,0218	0,0056	0,068	391	12,6	4,1	19,58	24,00	11	25,08	9,68	0,56
8	ROZVED5	NAYY-J_4x95	95	141,70	0,0453	0,0116	0,1417	390	0,4	0,1	0,62	1,00	0	0,05	0,03	0,04
9	ROZVED6	NAYY-J_4x95	95	63,65	0,0204	0,0052	0,0637	390	2,4	0,7	3,74	4,00	2	0,86	0,25	0,10
10	ROZVED7	NAYY-J_4x95	95	36,12	0,0116	0,003	0,0361	390	4,8	1,5	7,48	7,00	3	1,95	0,44	0,11
11	ROZVED8	NAYY-J_4x95	95	114,49	0,0366	0,0094	0,1145	395	17,4	5,7	26,77	27,00	12	78,69	20,56	1,23
12	ROZVED9	NAYY-J_4x95	95	168,61	0,054	0,0138	0,1686	393	12,5	4,1	19,33	19,00	9	60,53	14,95	1,31
13	KABK1022412364	NAYY-J_4x50	50	17,28	0,0111	0,0015	0,0173	395	2,4	0,6	3,08	3,00	2	0,32	0,04	0,04
14	ZAVKABK1022411982	NFA2X_4x50	50	483,12	0,3097	0,0481	0,4831	399	2,4	0,8	3,66	4,00	2	12,42	2,02	1,30
15	KABP1022412096	NAYY-J_4x25	25	17,91	0,0215	0,0016	0,0179	398	2,4	0,8	3,66	4,00	4	0,87	0,08	0,09
16	KABP1022413115	NAYY-J_4x25	25	91,19	0,1094	0,008	0,0912	393	0	0	0	0	0	0	0	0
17	KABP1022413520	NAYY-J_4x25	25	23,30	0,028	0,0021	0,0233	389,5	8,2	2,6	12,79	4,00	5	13,75	0,10	0,37
18	KABP1022412430	AYKY_4x16	16	1,00	0,0019	0,0005	0,001	394	2,4	0,8	3,70	4,00	6	0,08	0,02	0,01
19	PROPOJ1022412401	AYKY_4x16	16	20,25	0,0392	0,0018	0,0203	395	2	0,6	3,08	3,00	5	1,11	0,05	0,13
20	PROPOJ1022412428	AYKY_4x16	16	5,72	0,0111	0,0005	0,0057	394	2,4	0,8	3,70	4,00	6	0,46	0,02	0,04
21	PROPOJ1022413265	AYKY_4x16	16	7,29	0,0141	0,0007	0,0073	391	2,4	0,8	3,73	4,00	6	0,59	0,03	0,06
22	PROPOJ1022413660	AYKY_4x16	16	11,21	0,0217	0,001	0,0112	390	1,9	0,6	2,96	3,00	5	0,57	0,03	0,07
23	PROPOJ1022413666	AYKY_4x16	16	4,14	0,008	0,0005	0,0041	390	2,4	0,8	3,74	4,00	6	0,34	0,02	0,03
24	PROPOJ1022413711	AYKY_4x16	16	17,85	0,0345	0,0016	0,0179	390	2,4	0,8	3,74	4,00	6	1,45	0,08	0,14
25	PROPOJ1022413908	AYKY_4x16	16	2,04	0,0039	0,0005	0,002	392	1,2	0,4	1,86	2,00	3	0,04	0,01	0,01
26	PROPOJ1022414177	AYKY_4x16	16	14,96	0,0289	0,0013	0,015	390	2,4	0,8	3,74	4,00	6	1,21	0,06	0,11
27	KABP1022412433	CYKY_4x10	10	10,60	0,0199	0,0032	0,0106	393	2,4	0,8	3,71	4,00	6	0,82	0,15	0,09
28	KABP1022413042	CYKY_4x10	10	32,09	0,0603	0,0096	0,0321	393	2,4	0,8	3,71	4,00	6	2,49	0,46	0,26
29	KABP1022413113	CYKY_4x10	10	20,68	0,0389	0,0062	0,0207	393	2,4	0,8	3,71	4,00	6	1,61	0,30	0,17
30	KABP1022413208	CYKY_4x10	10	3,00	0,0056	0,0009	0,003	392	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
31	KABP1022413223	CYKY_4x10	10	13,03	0,0245	0,0039	0,013	390,5	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
32	KABP1022413264	CYKY_4x10	10	1,17	0,0022	0,0005	0,0012	391	2,4	0,8	3,73	4,00	6	0,09	0,02	0,01
33	KABP1022413522	CYKY_4x10	10	18,15	0,0341	0,0054	0,0181	390	2,4	0,8	3,74	4,00	6	1,43	0,26	0,15
34	KABP1022413533	CYKY_4x10	10	6,83	0,0128	0,002	0,0068	389	8,2	2,6	12,81	13,00	16	6,30	1,01	0,19
35	KABP1022413665	CYKY_4x10	10	1,00	0,0019	0,0005	0,001	390	2,4	0,8	3,74	4,00	6	0,08	0,02	0,01
36	KABP1022413684	CYKY_4x10	10	18,31	0,0344	0,0055	0,0183	390	1,5	0,5	2,34	2,00	3	0,56	0,07	0,09

Při výpočtu ustáleného chodu pro úseky vedení, viz Tabulka 6-3, je vycházeno z rovnic pro výpočet ztrát při přenosu střídavého výkonu (2-27) a (2-28) v kapitole (2-7). Hodnoty parametrů vedení, napětí, zatížení a činného a jalového výkonu jsou převzaty z výpočtů ustáleného chodu programem Bizon. Hodnoty proudů jsou vypočteny podle vzorců (6-3) a (6-4).

6.1.3.1 VYPOČTENÉ ZTRÁTY

Vypočtené ztráty jsou důležité pro porovnání stejnosměrné analýzy dané lokality, tj. Praskolesy u Mrákotína. Celkové vypočtené ztráty se liší od ztrát určených programem Bizon, a to o cca 1,5 W. Chyba je způsobená výpočtovým modelem, kde výpočetní model uvažuje jednofázové odběry za třífázové. Chyba mezi jednofázovým a třífázovým výpočtem činí cca 30 %. Tato chyba je zanedbatelně malá a nebude na ni brát zřetel.

Celkové ztráty na vedení jsou uvedeny v Tabulce 6-4.

Tabulka 6-4: Celkové ztráty na vedení

	ΔP_{ξ}	ΔQ_j
	(W)	(W)
Celkové ztráty	462,14	107,96

7 NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO ŘEŠENÍ V OBLASTI PRASKOLESY U MRÁKOTÍNA

Návrh stejnosměrného řešení v oblasti Praskolesy u Mrákotína budeme vycházet z hodnot zadaných v práci, tj. z hodnoty zadaného napětí 1000 V stejnosměrných. Dále se bude návrh vycházet z výkonu odběrných míst, viz Tabulka (5-2) a (6-1). Tyto třífázové výkony jsou uvažovány při výpočtu ustáleného chodu, proto pro pozdější porovnání jednotlivých řešení je nutné zachovat stejný výkon v oblasti Praskoles u Mrákotína. Třífázový výkon je složen z činné a jalové části. Tyto části jsou součástí komplexního čísla zdánlivého výkonu, viz vzorec (7-1)

$$S_{AC} = P_{\xi} + jQ_j, \quad (7-1)$$

kde S_{AC} je střídavý zdánlivý výkon (VA), P_{ξ} je činný střídavý výkon (W) a Q_j je jalový výkon (VAr).

Pro stejnosměrnou analýzu bude použit modul komplexního čísla, z Tabulky 6-1, výkonu v odběrných místech obce Praskolesy u Mrákotína. Modul, komplexního čísla se vypočte dle vzorce (7-2)

$$|S_{AC}| = \sqrt{P_{\xi}^2 + Q_j^2}, \quad (7-2)$$

kde $|S_{AC}|$ je modul střídavého zdánlivého výkonu.

Jelikož u stejnosměrného výkonu pojem zdánlivý výkon neexistuje, bude hodnota $|S_{AC}|$ považována za stejnosměrný výkon v odběrném místě. Hodnoty stejnosměrného výkonu v odběrných místech jsou uvedeny v Tabulce 7-1.

Z takto převzatého výkonu P_{DC} je vypočten odběrný proud pro dané odběrné místo. Výpočet proudu je proveden dle vzorce (7-3)

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{U_{DC}}, \quad (7-3)$$

kde I_{DC} je stejnosměrný proud (A), P_{DC} je stejnosměrný výkon (W) a U_{DC} je stejnosměrné napětí (V).

Při analýze uvažujeme pouze měrný odpor vedení.

7.1 VARIANTY NÁVRHU STEJNOSMĚRNÉ SÍTĚ

7.1.1 VARIANTA 1

V případě **Varianty 1** bude pro výpočet, jak zmíněno v úvodu, použito 1000 V stejnosměrných. Toto napětí je použito pro všechna odběrná místa bez ohledu na velikost proudu jisticího prvku, kterou mělo odběrné místo při řešení ustáleného chodu (střídavá síť). Toto řešení neumožní variabilitu použitého stejnosměrného napětí v odběrném místě.

7.1.2 VARIANTA 2

Varianta 2 počítá s variantou dvou různých napětí v odběrném místě. Pro odběrná místa bude k dispozici stejnosměrné napětí jak 500 V stejnosměrných, pro spotřebiče s menším výkonem, tak napětí 1000 V stejnosměrných pro spotřebiče s velkým výkonem. Záleží na tom, na které vstupní svorky bude spotřebič připojen. Pro tuto variantu budeme uvažovat to, že odběrná místa s malou hodnotou jisticího prvku (3x16A a jednofázové), kterou mělo odběrné místo při řešení ustáleného chodu (střídavá síť) bude uvažováno napětí 500 V stejnosměrných (šedě) v Tabulce 7-1. Pro zbytek odběrných míst bude uvažováno napětí 1000 V stejnosměrných.

Velikosti odběrových proudů pro obě varianty v případě výkonové bilance oblasti pro jednotlivá odběrná místa jsou uvedeny v Tabulce 7-1.

Tabulka 7-1: Stejnosměrné výkony v odběrných místech

Č.	Označení	In (A)	P odběr (kW)	Q odběr (kVAr)	S _{AC} [kVA]	P _{DC} (W)	Varianta 1	Varianta 2
							I _{DC1} (A)	I _{DC2} (A)
1	4190087455	3x16	1,2637	0,4154	1,3302	1330,2	1,3302	2,6604
2	4190099795	3x32	2,5274	0,8307	2,6604	2660,4	2,6604	2,6604
3	4190553819	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
4	4190553821	1x16	0	0	0	0	0	0
5	4190553823	3x16	0	0	0	0	0	0
6	4190553825	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
7	4190553830	3x20	1,9745	0,649	2,0784	2078,4	2,0784	2,0784
8	4190553832	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
9	4190553834	1x16	1,5796	0,5192	1,6627	1662,7	1,6627	3,3255
10	4190553838	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
11	4190553842	3x20	1,9745	0,649	2,0784	2078,4	2,0784	2,0784
12	4190553844	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
13	4190553850	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
14	4190567013	3x20	1,9745	0,649	2,0784	2078,4	2,0784	2,0784
15	4190567344	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
16	4190567920	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
17	4190571574	3x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	2,5981
18	4190573588	1x25	2,4682	0,8112	2,5981	2598,1	2,5981	5,1962
19	4190573589	3x60	5,9236	1,947	6,2354	6235,4	6,2354	6,2354

Obec Praskolesy u Mrákotína je napájena z distribuční trafostanice celkem třemi paprsky. Každé odběrné místo je připojeno metodou smyčkování do přípojkové skříně před odběrným místem, ze které je hlavním domovním vedením připojeno dané odběrné místo.

7.2 MODEL SÍTĚ PRO VÝPOČET ZTRÁT A ÚBYTKU NAPĚTÍ

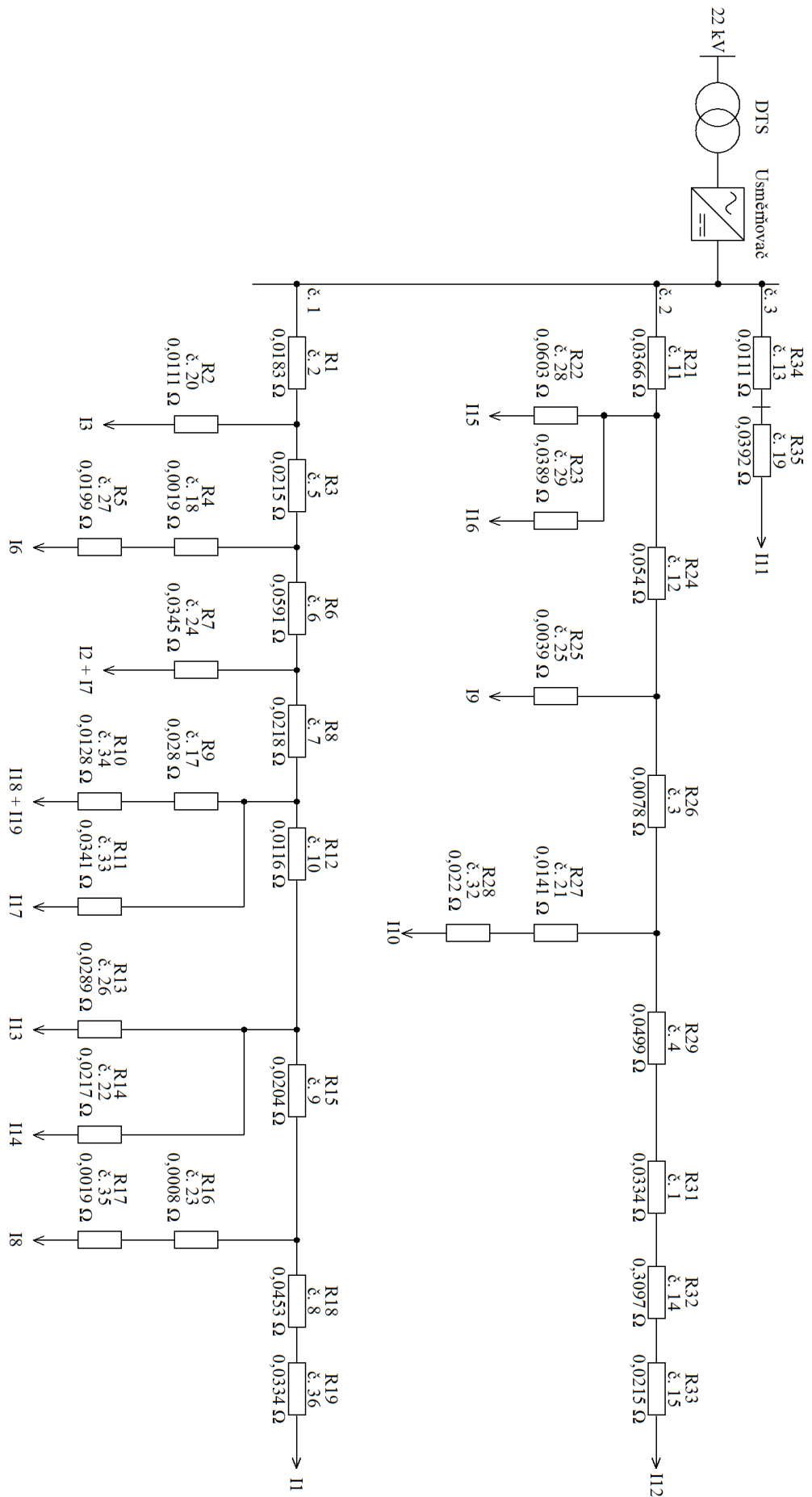
V této kapitole bude uvedeno zjednodušené jednopólové schéma soustavy obce Praskolesy u Mrákotína. Podrobné jednopólové schéma poskytnuté společností E. ON Česká republika je uvedeno v příloze D.

První paprsek je dlouhý 618,48 metrů a tvoří ho kmenové vedení s průřezem 95 mm². Druhý paprsek je dlouhý 463,35 metrů kmenového vedení s průřezem 95 mm². Tyto paprsky jsou spojeny do kruhu v rozpínací skříni (SR542) s označením R632094. A třetí paprsek je dlouhý 17,28 metrů a tvoří ho vedení o průřezu 50 mm². Tyto paprsky jsou tvořeny úseky vedení, viz Tabulka 6-3. Úseky kmenového vedení jsou mezi přípojkovými skříněmi u jednotlivých odběrných míst. Z těchto skříní jsou vedením o menším průřezu připojena jednotlivá odběrná místa.

První paprsek je tvořen ze sedmi úseků kmenového vedení s průřezem 95 mm², mezi přípojkovými skříněmi a je ukončen ve skříni s označením R632064. Na tento paprsek je též připojeno deset odběrných míst z celkových devatenácti. Osm odběrných míst je připojeno na druhý paprsek a jedno odběrné místo na třetí paprsek.

Pro analýzu budeme uvažovat tři samostatné paprsky, na výpočet ztrát nebude mít rozpojení vliv.

Model stejnosměrné sítě pro obec Praskolesy u Mrákotína je znázorněn na Obrázku 7-1, kde číslo (č. x) pod hodnotou odporu označuje číslo úseku z Tabulky 6-3 a číslo u odběrového proudu znamená číslo odběrného místa z Tabulky 6-1. Hodnota činného odporu vychází z Tabulky 6-3. Spodní paprsek je v práci označován jako číslo 1, prostřední jako číslo 2 a horní jako číslo 3.



Obrázek 7-1: Celkové náhradní jednopólové schéma oblasti Praskolesy u Mrákotína pro stejnosměrnou analýzu

Výpočet probíhá dle schématu, kde uvažujeme na konci paprsku číslo jedna napětí 1000 V stejnosměrných, a postupnou iterací jsou navyšovány výkony v uzlech. Výkony jsou vzaty z Tabulky 6-1. Z výkonů, dle vzorce (7-3), je vypočten proud a s pomocí činného odporu úseku vedení je vypočten úbytek napětí a činné ztráty.

Činné ztráty jsou počítány ze vzorce (7-4)

$$\Delta P_{DC} = 2 \cdot I_{DC}^2 \cdot R_k \cdot l, \quad (7-4)$$

kde ΔP_{DC} jsou ztráty stejnosměrného výkonu (W), I_{DC} je stejnosměrný proud (A), R_k měrný odpor vedení (Ω/km) a l je délka vedení (km).

Poté co vyjdeme z předpokladu, že na konci paprsku číslo jedna, který je nejvíce zatížen, je 1000 V stejnosměrných, poté určíme napětí, které musí být na začátku obce v DTS, respektive na výstupu z usměrňovače. Toto napětí budeme uvažovat v celé síti a poté vypočteme ztráty v ostatních paprscích.

7.3 VÝSLEDKY STEJNOSMĚRNÉ ANALÝZY – VARIANTA 1

Výsledky pro jednotlivé paprsky stejnosměrné sítě v obci Praskolesy Mrákotína – Varianta 1.

7.3.1 PAPERSEK ČÍSLO 1

Tabulka 7-2: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 1

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	P _{DC} (W)	Varianta 1			
						I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
2	ROZVED1	95	57,13	0,0183	30060,51	29,89	32,71	1,09	1005,55
20	PROPOJ1022412428	16	5,72	0,0111	2598,09	2,59	0,15	0,06	1005,55
5	ROZVED2	95	67,05	0,0215	27400,92	27,28	32,00	1,17	1004,37
18	KABP1022412430	16	1,00	0,0019	2598,35	2,59	0,03	0,01	1004,37
27	KABP1022412433	10	10,60	0,0199	2598,09	2,59	0,27	0,10	1004,36
6	ROZVED3	95	184,84	0,0591	24802,54	24,77	72,50	2,93	1001,45
24	PROPOJ1022413711	16	17,85	0,0345	4738,84	4,74	1,55	0,33	1001,45
7	ROZVED4	95	67,99	0,0218	20044,65	20,03	17,50	0,87	1000,57
17	KABP1022413520	25	23,30	0,028	8835,45	8,83	4,37	0,49	1000,57
33	KABP1022413522	10	18,15	0,0341	2598,09	2,60	0,46	0,18	1000,57
34	KABP1022413533	10	6,83	0,0128	8833,46	8,83	2,00	0,23	1000,39
10	ROZVED7	95	36,12	0,0116	8606,29	8,60	1,72	0,20	1000,37
22	PROPOJ1022413660	16	11,21	0,0217	2078,43	2,08	0,19	0,09	1000,37
26	PROPOJ1022414177	16	14,96	0,0289	2598,09	2,60	0,39	0,15	1000,37
9	ROZVED6	95	63,65	0,0204	3928,57	3,93	0,63	0,16	1000,21
23	PROPOJ1022413666	16	4,14	0,008	2598,11	2,60	0,11	0,04	1000,21
35	KABP1022413665	10	1,00	0,0019	2598,09	2,60	0,03	0,01	1000,17
8	ROZVED5	95	141,70	0,0453	1330,35	1,33	0,16	0,12	1000,09
36	KABP1022413684	10	18,31	0,0344	1330,22	1,33	0,12	0,09	1000

Celkové ztráty v tomto paprsku činí 166,87 W a celkový úbytek napětí činí 6,64 V.

7.3.2 PAPERSEK ČÍSLO 2

Tabulka 7-3: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 1

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 1				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
11	ROZVED8	95	114,49	0,0366	12078,05	12,009	10,556	0,879	1005,76
28	KABP1022413042	10	32,09	0,0603	2598,09	2,583	0,805	0,312	1005,76
29	KABP1022413113	10	20,68	0,0389	2598,09	2,583	0,519	0,201	1005,76
12	ROZVED9	95	168,61	0,054	6864,98	6,831	5,039	0,738	1005,03
25	PROPOJ1022413908	16	2,04	0,0039	1662,74	1,655	0,021	0,013	1005,03
3	ROZVED10	95	24,36	0,0078	5201,80	5,176	0,418	0,081	1004,95
21	PROPOJ1022413265	16	7,29	0,0141	2598,12	2,585	0,188	0,073	1004,95
32	KABP1022413264	10	1,17	0,0022	2598,09	2,598	0,030	0,011	1004,87
4	ROZVED11	95	155,88	0,0499	2602,82	2,591	0,670	0,259	1004,69
1	KABK1022412359	95	66,61	0,0213	2602,53	2,595	0,287	0,111	1004,58
14	ZAVKABK1022411982	50	483,12	0,3097	2598,38	2,591	4,157	1,605	1002,97
15	KABP1022412096	25	17,91	0,0215	2598,09	2,598	0,290	0,112	1002,86

Celkové ztráty v tomto paprsku činí 22,99 a celkový úbytek napětí činí 2,9 V.

7.3.3 PAPERSEK ČÍSLO 3

Tabulka 7-4: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 3 – Varianta 1

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 1				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
13	KABK1022412364	50	17,28	0,0111	2078,76	2,066	0,095	0,047	1006,59
19	PROPOJ1022412401	16	20,25	0,0392	2078,4	2,0652	0,334	0,167	1006,38

Celkové ztráty v tomto paprsku činí 0,43 W a celkový úbytek napětí činí 0,26 V.

7.3.4 VYHODNOCENÍ – VARIANTA 1

Výsledkem stejnosměrné analýzy pro Variantu 1 jsou tři Tabulky 7-2, 7-3 a 7-4, v každé tabulce jsou uvedeny hodnoty přenášeného výkonu daným úsekem vedení a protékající proud. Z těchto hodnot jsou postupnou iterací určeny hodnoty úbytku napětí na jednotlivých úsecích, potažmo v celém paprsku složeným z daných úseků, dále jsou také určeny ztráty na úsecích, potažmo v celém paprsku. Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát jsou uvedeny v Tabulce 7-5.

Z výpočtu je patrné, že výsledné ztráty v celé síti jsou cca 190,3 W, tyto ztráty jsou, v porovnání s činnými ztrátami v ustáleném chodu (střídavá síť), o cca 58,8 % menší.

Relativní maximální úbytek napětí v stejnosměrné síti, v porovnání s úbytkem v ustáleném chodu (střídavá síť), je o cca 340 % menší, tj. 2,26 % (5,1 V) u střídavé sítě ze jmenovité

hodnoty napětí 230V oproti 0,66 4% (6,64 V) ze jmenovité hodnoty napětí 1000 V u stejnosměrné sítě.

Tabulka 7-5: Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát: Praskolesy u Mrákotína - Varianta 1

	Varianta 1	
	ΔP_{DC}	ΔU
	(W)	(V)
Paprsek č. 1	166,868	6,640
Paprsek č. 2	22,981	2,904
Paprsek č. 3	0,429	0,261
Celkové ztráty	190,278	

7.4 VÝSLEDKY STEJNOSMĚRNÉ ANALÝZY – VARIANTA 2

Výsledky pro jednotlivé paprsky stejnosměrné sítě v obci Praskolesy Mrákotína – Varianta 2.

7.4.1 PAPERSEK ČÍSLO 1

Tabulka 7-6: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 2 – 500 V

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 2				
					500 V				
					P_{DC} (W)	I_{DC} (A)	ΔP_{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
2	ROZVED1	95	57,13	0,0183	3944,56	7,8545	2,2543	0,29	502,20
20	PROPOJ1022412428	16	5,72	0,0111	-	-	-	-	-
5	ROZVED2	95	67,05	0,0215	3941,91	7,8545	2,6528	0,34	501,87
18	KABP1022412430	16	1,00	0,0019	-	-	-	-	-
27	KABP1022412433	10	10,60	0,0199	-	-	-	-	-
6	ROZVED3	95	184,84	0,0591	3934,62	7,8545	7,2922	0,93	500,94
24	PROPOJ1022413711	16	17,85	0,0345	-	-	-	-	-
7	ROZVED4	95	67,99	0,0218	3931,93	7,8545	2,6898	0,34	500,59
17	KABP1022413520	25	23,30	0,028	2598,78	5,1920	1,5096	0,29	500,53
33	KABP1022413522	10	18,15	0,0341	-	-	-	-	-
34	KABP1022413533	10	6,83	0,0128	2598,1	5,1906	0,6897	0,13	500,53
10	ROZVED7	95	36,12	0,0116	1331,64	2,6604	0,1642	0,06	500,53
22	PROPOJ1022413660	16	11,21	0,0217	-	-	-	-	-
26	PROPOJ1022414177	16	14,96	0,0289	-	-	-	-	-
9	ROZVED6	95	63,65	0,0204	1331,35	2,6604	0,2888	0,11	500,42
23	PROPOJ1022413666	16	4,14	0,008	-	-	-	-	-
35	KABP1022413665	10	1,00	0,0019	-	-	-	-	-
8	ROZVED5	95	141,70	0,0453	1330,71	2,6604	0,6413	0,24	500,18
36	KABP1022413684	10	18,31	0,0344	1330,2	2,6604	0,4870	0,18	500

Celkové ztráty v tomto paprsku, na napěťové hladině 500 V stejnosměrných, činí 18,67 W a celkový úbytek napětí činí 2,49 V.

Tabulka 7-7: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 1 – Varianta 2 – 1000 V

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 2				
					1000 V				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
2	ROZVED1	95	57,13	0,0183	26113,847	25,997	24,736	0,951	1004,498
20	PROPOJ1022412428	16	5,72	0,0111	2598,087	2,586	0,149	0,057	1004,498
5	ROZVED2	95	67,05	0,0215	23462,755	23,381	23,507	1,005	1003,492
18	KABP1022412430	16	1,00	0,0019	2598,354	2,589	0,025	0,010	1003,492
27	KABP1022412433	10	10,60	0,0199	2598,087	2,589	0,267	0,103	1003,482
6	ROZVED3	95	184,84	0,0591	20864,375	20,843	51,349	2,464	1001,028
24	PROPOJ1022413711	16	17,85	0,0345	4738,841	4,734	1,546	0,327	1001,028
7	ROZVED4	95	67,99	0,0218	16112,676	16,107	11,312	0,702	1000,326
17	KABP1022413520	25	23,30	0,028	6236,366	6,234	2,177	0,349	1000,326
33	KABP1022413522	10	18,15	0,0341	2598,087	2,597	0,460	0,177	1000,326
34	KABP1022413533	10	6,83	0,0128	6235,371	6,236	0,995	0,160	999,977
10	ROZVED7	95	36,12	0,0116	7275,586	7,274	1,228	0,169	1000,157
22	PROPOJ1022413660	16	11,21	0,0217	2078,425	2,078	0,187	0,090	1000,157
26	PROPOJ1022414177	16	14,96	0,0289	2598,087	2,598	0,390	0,150	1000,157
9	ROZVED6	95	63,65	0,0204	2598,221	2,598	0,275	0,106	1000,051
23	PROPOJ1022413666	16	4,14	0,008	2598,113	2,598	0,108	0,042	1000,010
35	KABP1022413665	10	1,00	0,0019	2598,087	2,598	0,026	0,010	1000
8	ROZVED5	95	141,70	0,0453	-	-	-	-	-
36	KABP1022413684	10	18,31	0,0344	-	-	-	-	-

Celkové ztráty v tomto paprsku, na napěťové hladině 1000 V stejnosměrných, činí 118,74 W a celkový úbytek napětí činí 5,44 V.

7.4.2 PAPERSEK ČÍSLO 2

Tabulka 7-8: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 2 – 500 V

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 2				
					500 V				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
11	ROZVED8	95	114,49	0,0366	1663,93	3,313	0,803	0,243	502,25
28	KABP1022413042	10	32,09	0,0603	-	-	-	-	-
29	KABP1022413113	10	20,68	0,0389	-	-	-	-	-
12	ROZVED9	95	168,61	0,054	1662,74	3,313	1,185	0,358	501,89
25	PROPOJ1022413908	16	2,04	0,0039	1662,74	3,313	0,086	0,026	501,89
3	ROZVED10	95	24,36	0,0078	-	-	-	-	-
21	PROPOJ1022413265	16	7,29	0,0141	-	-	-	-	-
32	KABP1022413264	10	1,17	0,0022	-	-	-	-	-
4	ROZVED11	95	155,88	0,0499	-	-	-	-	-
1	KABK1022412359	95	66,61	0,0213	-	-	-	-	-
14	ZAVKABK1022411982	50	483,12	0,3097	-	-	-	-	-
15	KABP1022412096	25	17,91	0,0215	-	-	-	-	-

Celkové ztráty v tomto paprsku, na napěťové hladině 500 V stejnosměrných, činí 2,074 W a celkový úbytek napětí činí 0,24 V.

Tabulka 7-9: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 2 – Varianta 2 – 1000 V

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 2				
					1000 V				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
11	ROZVED8	95	114,49	0,0366	10413,16	10,365	7,863	0,759	1004,69
28	KABP1022413042	10	32,09	0,0603	2598,09	2,586	0,806	0,312	1004,69
29	KABP1022413113	10	20,68	0,0389	2598,09	2,586	0,520	0,201	1004,69
12	ROZVED9	95	168,61	0,054	5202,22	5,181	2,899	0,560	1004,13
25	PROPOJ1022413908	16	2,04	0,0039	-	-	-	-	-
3	ROZVED10	95	24,36	0,0078	5201,80	5,181	0,419	0,081	1004,13
21	PROPOJ1022413265	16	7,29	0,0141	2598,12	2,588	0,189	0,073	1004,13
32	KABP1022413264	10	1,17	0,0022	2598,09	2,588	0,029	0,011	1004,05
4	ROZVED11	95	155,88	0,0499	2602,83	2,593	0,671	0,259	1003,87
1	KABK1022412359	95	66,61	0,0213	2602,54	2,593	0,286	0,110	1003,76
14	ZAVKABK1022411982	50	483,12	0,3097	2598,38	2,593	4,164	1,606	1002,15
15	KABP1022412096	25	17,91	0,0215	2598,09	2,598	0,290	0,112	1002,04

Celkové ztráty v tomto paprsku, na napěťové hladině 1000 V stejnosměrných, činí 12,09 W a celkový úbytek napětí činí 3,41 V.

7.4.3 PAPERSEK ČÍSLO 3

Tabulka 7-10: Výsledky stejnosměrné analýzy pro paprsek číslo 3 – Varianta 2 – 1000 V

Č.	Označení	Průřez (mm ²)	l (m)	R (Ω)	Varianta 1				
					P _{DC} (W)	I _{DC} (A)	ΔP _{DC} (W)	ΔU (V)	U (V)
					13	KABK1022412364	50	17,28	0,0111
19	PROPOJ1022412401	16	20,25	0,0392	2078,4	2,0677	0,335	0,168	1005,19

Celkové ztráty v tomto paprsku činí 0,43 W a celkový úbytek napětí činí 0,26 V.

7.4.4 VYHODNOCENÍ – VARIANTA 2

Výsledkem stejnosměrné analýzy pro Variantu 2 je pět Tabulek 7-6, 7-7, 7-8, 7-9 a 7-10 v každé tabulce jsou uvedeny hodnoty přenášeného výkonu daným úsekem vedení a protékající proud při obou variantách napětí. Z těchto hodnot jsou postupnou iterací určeny hodnoty úbytku napětí na jednotlivých úsecích, potažmo v celém paprsku složeným z daných úseků, dále jsou také určeny ztráty na úsecích, potažmo v celém paprsku. Tyto hodnoty jsou opět uvedeny pro obě varianty napětí. Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát jsou uvedeny v Tabulce 7-11 a 7-12.

Z výpočtu je patrné, že výsledné ztráty v celé síti jsou cca 158,05 W, tyto ztráty jsou, v porovnání s činnými ztrátami v ustáleném chodu (střídavá síť), o cca 65,8 % menší.

Relativní maximální úbytek napětí v stejnosměrné síti, v porovnání s úbytkem v ustáleném chodu (střídavá síť), nelze spolehlivě srovnat, protože jsou použita dvě různá napětí. Ale je možno uvést, že úbytek napětí u střídavé sítě je 2,26 % (5,1 V) ze jmenovité hodnoty napětí 230 V, u stejnosměrné sítě 0,49 % (4,99 V) ze jmenovité hodnoty napětí 500 V a 0,54 % (5,45) ze jmenovité hodnoty napětí 1000 V.

Tabulka 7-11: Výsledné hodnoty úbytků napětí a ztrát: Praskolesy u Mrákotína - Varianta 2

	Varianta 2 - 500 V		Varianta 2 - 1000 V	
	ΔP_{DC}	ΔU	ΔP_{DC}	ΔU
	(W)	(V)	(W)	(V)
Paprsek č. 1	18,670	2,490	118,738	5,439
Paprsek č. 2	2,074	0,243	18,138	2,904
Paprsek č. 3	-	-	0,430	0,263
Celkové ztráty	20,744		137,305	

7.4.5 Porovnání obou variant

Porovnáním obou variant, respektive porovnáním výsledků jednotlivých analýz lze stanovit výhodnost či nevýhodnost jednotlivých variant. Z pohledu výkonových ztrát lze říci, že Varianta 2 má oproti Variantě 1 o cca 17 % menší ztráty, viz Tabulka 7-12.

Tabulka 7-12: Celkové ztráty v síti - Varianta 1 a 2

	Varianta 1	Varianta 2
	ΔP_{DC}	ΔP_{DC}
	[W]	[W]
Celkové ztráty	190,278	158,050

Z tohoto pohledu je výhodnější Varianta 2, kde použitím dvou různých napětí, při použití více vodičů docílíme lepšího rozložení výkonu a tím i snížení proudu ve vodičích, tj. snížení úbytku napětí a menší ztráty.

Rozdíl 17 % ve ztrátách při porovnání obou variant je maximální rozdíl, ve skutečnosti nebude tento rozdíl tak velký, při výpočtech není uvažováno to, že jeden z pracovních vodičů je stejný pro obě varianty napětí a způsobuje dodatečné ztráty i ve vodiči sloužící pro rozvod 1000 V. Rozdíl bude teoreticky poloviční, tj. cca 9 %.

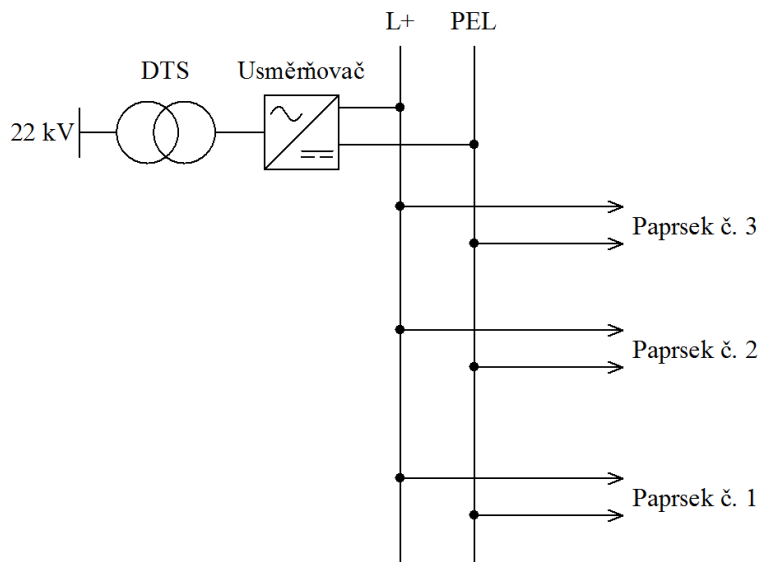
Ztráty jsou uvažovány při zatížení čistě ohmickou zátěží, při zatížení induktivního nebo kapacitního charakteru se mohou ztráty diametrálně lišit.

7.5 Technické řešení jednotlivých variant

Barevné označení jednotlivých vodičů není v souladu s normou, kde vodiče L+, L-, PEL, atd. mají jiné barvy než je tomu u střídavých distribučních sítí. Pro situaci, kdy budou použity stávající rozvody pro distribuci elektrické energie, barvy černá, hnědá, šedá a zelenožlutá, by mohla být vydána příslušná výjimka, která by umožnila pro stejnosměrný systém použití těchto barev. Toto však na požadavek společnosti E. ON nebude řešen v této práci.

7.5.1 VARIANTA 1

Technické řešení Varianty 1, tj. použití stejnosměrného napětí 1000 V pro všechna odběrná místa, vyžaduje použití můstkového šestipulzního usměrňovače s tyristorovým řízením. Tento typ usměrňovače bude moci regulovat napětí v rozsahu ± 1000 V stejnosměrných. Zapojení tohoto třífázového můstku je znázorněno na Obrázku 3-23. Tato varianta využívá pouze dva vodiče. To znamená, že při použití stávajících rozvodů střídavého napětí, většinou kabel NAYY, se využije pouze dvou vodičů a to jedné fáze (černý vodič) a zemnicího vodiče (zelenožlutý vodič). Distribuce v obci Praskolesy bude v této variantě provedena stejnosměrným rozvodem v konfiguraci TN – C, viz Obrázek 3-6 a) [13]. V této konfiguraci bude tedy černý vodič reprezentovat funkci vodiče L+ a zelenožlutý vodič bude reprezentovat vodič PEL. Jedná se tedy o mono – polární stejnosměrný systém. Vyvedení výkonu z DTS je znázorněno na Obrázku 7-2.



Obrázek 7-2: Vyvedení výkonu z DTS - Varianta 1

Nevýhodou tohoto řešení je, že pro usměrněné stejnosměrné napětí o velikosti 1000 V je potřeba, aby výstupní sekundární fázové napětí distribučního transformátoru, dle [19] (vztah 2-25), dosahovalo hodnoty minimálně 430 V, tj. sdružené napětí 740 V (Pro pokrytí úbytku napětí a komutačních poklesů minimálně 500 V (866 V)). Tohoto napětí nelze dosáhnout u normalizované řady distribučních transformátoru, kde klasický převod napětí je 22/04 kV, kde 0,4 kV je sdružená hodnota napětí. Řešením tohoto problému je použití trakčních

transformátorů (vyrábí například firma ČKD) pro železniční trakci 1500 V i 3000 V stejnosměrných. Tyto transformátory vyrábí několik firem v obdobných výkonových řadách jako je tomu u distribučních transformátorů. Tyto transformátory mají výstupní sekundární napětí větší než je pro tuto variantu potřebné, to však není problém, protože navržený tyristorový usměrňovací můstek obsahuje řídicí systém (řídicí úhel tyristorů), díky kterému lze nastavit na výstupu z usměrňovače potřebné napětí. Při použití drážních transformátorů však hrozí riziko horších parametrů napětí (zvlnění, harmonické aj.), protože řídicí úhel tyristorů bude dosahovat větších hodnot, než kdyby měl DT napětí blíže potřebné hodnoty. Dále hrozí riziko přerušovaného proudu při řídicím úhlu tyristorů větším než je 60° [19].

Distribuční transformátor musí být dimenzován na efektivní proud odebíraný stejnosměrnou sítí (usměrňovačem), který má obdélníkový tvar [19]. Vyjdeme z předpokladu použitého distribučního transformátoru v dané lokalitě, to znamená, že nový transformátor s jiným sekundárním napětím by měl být schopen přenášet minimálně 144 A.

Dále je potřeba, aby se usměrňovač choval jako dostatečně „tvrdý“ elektrický zdroj, proto je nutné dimenzovat usměrňovač na šestinásobek maximálního odebíraného proudu, respektive šestinásobek proudu hlavního jisticího prvku v oblasti s maximální velikostí. V této variantě je potřeba proudové dimenzování polovodičových součástek na hodnotu 360 (240) A. Napěťové dimenzování polovodičových součástek je, dle [19] (vztah 2-51), $\sqrt{6}$ násobek fázové hodnoty sekundárního napětí DT, tj. minimálně 1200 V. Obecně se polovodičové součástky dimenzují s ohledem na trvalá přepětí v síti, tj. $\pm 10\%$ a na krátkodobé přepětí při atmosférických jevech, tj. $+50\%$, zároveň je uvažováno s komutačním přepětím, proto se polovodičové součástky dimenzují na dvojnásobek amplitudy sdruženého napětí, tj. minimálně 1600 V v našem případě [21].

Ztráty na usměrňovači, respektive na tyristorech (vždy spínají tři najednou) jsou orientačně, dle [19], tři násobek absolutní hodnoty přenášeného proudu, v našem případě cca 140 W. Tyto ztráty zaleží na mnoha faktorech, od charakteru zátěže po parametry použitých polovodičových součástek [19].

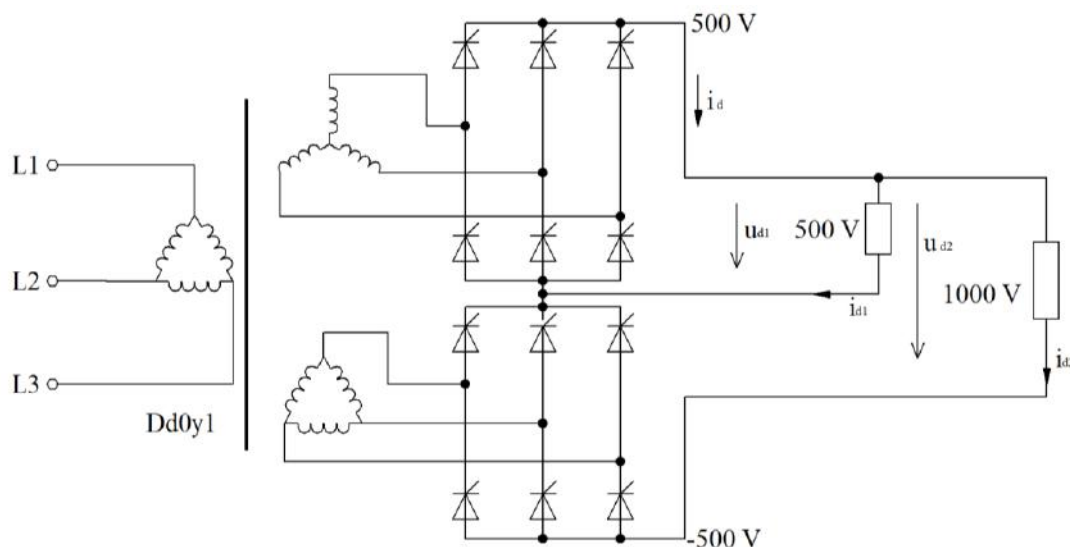
Komutační úbytek při plném zatížení usměrňovače vycházíme z maximálního proudu použitého transformátoru, tj. 144 A a napětí nakrátko, viz Tabulka 5-1, může dosahovat, dle [19] (vztah 2-63), hodnoty cca 23,5 V. Společně s úbytky na vedení v dané oblasti (cca 6 V) by měl mít usměrňovač říditelné výstupní napětí alespoň do hodnoty 1030 V stejnosměrných v závislosti na zatížení dané oblasti [19].

Z pohledu kvality eklektické energie (EMC) lze považovat šestipulzní můstek za generátor harmonických v řádech $6n \pm 1$, kde n označuje základní harmonickou, tj. v řádu o jeden vyšší a o jeden nižší (5. a 7., 11. a 13. atd.) než je šestinásobek základní harmonické (50 Hz) **Chyba! N enalezen zdroj odkazů.** Tyto harmonické způsobují dodatečné ztráty v transformátoru (vliv vířivých proudů) v jeho primárním i sekundárním vinutí. Ztráty zvyšují nároky na transformátor o cca 5 % z jeho typového (štítkového) výkonu. [21].

Výhodou tohoto řešení je, že využívá nejpoužívanější typ usměrňovacího můstku. Další výhodou je, že tato varianta využívá pouze dva vodiče (materiálová úspora), tj. při stávajících distribučních rozvodech polovinu vodičů, než konvenční třífázový distribuční systém (rozvod). Nevýhodou je, že při poruše na tomto vedení dojde k výpadku zásobování celého paprsku (části DS).

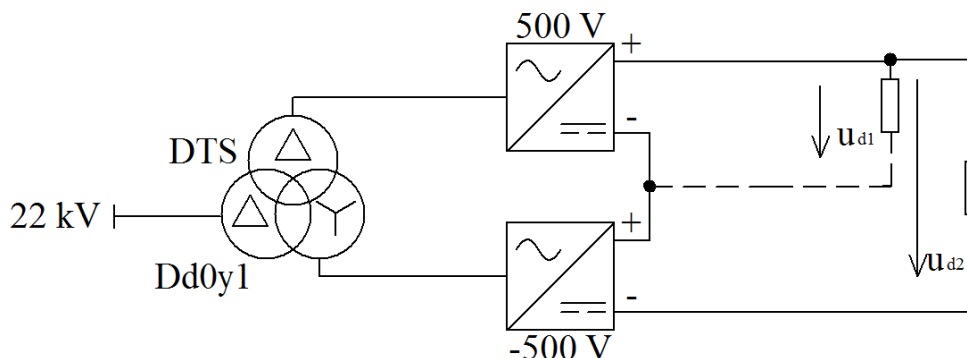
7.5.2 VARIANTA 2

Technické řešení Varianty 2, tj. použití dvou stejnosměrného napětí 500 a 1000 V pro všechna odběrná místa, kde 500 V se využije pro odběrná místa s menším odběrem a 1000 V pro odběrná místa s odběrem vyšším, rozdělení je uvedeno v kapitole 7.1.2. Technické řešení této varianty je provedeno s použitím dvou sériově spojených šestipulzních usměrňovačů s tyristorovým řízením. Při tomto způsobu se bude moci regulovat napětí v rozsahu ± 1000 V, a zároveň bude v odběrném místě k dispozici napětí jak 500 V, tak 1000 V. Zapojení tohoto řešení je znázorněno na Obrázku 7-3.



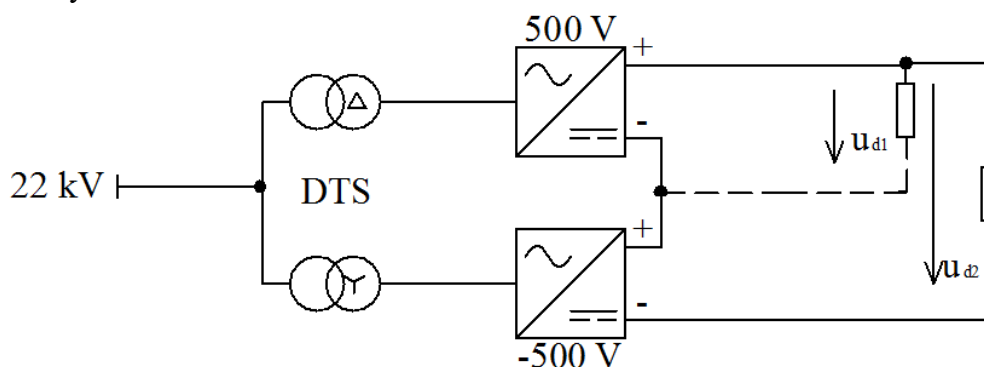
Obrázek 7-3: Schéma zapojení dvou šestipulzních usměrňovačů v sérii [19]

Na Obrázku 7-4 je znázorněno zjednodušené schéma zapojení s jedním trojvintuřovým transformátorem.



Obrázek 7-4: Zjednodušené schéma zapojení s jedním trojvintuřovým transformátorem.

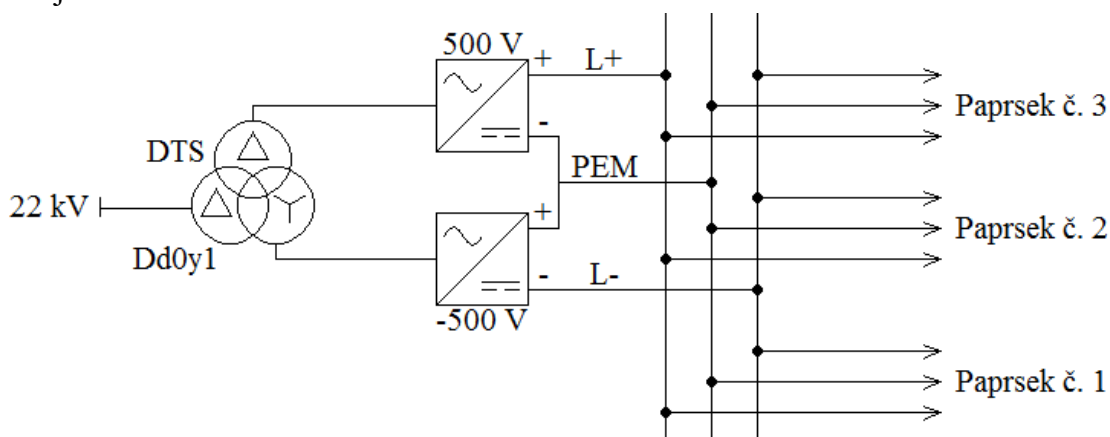
Na Obrázku 7-5 je znázorněno zjednodušené schéma zapojení se dvěma samostatnými transformátory.



Obrázek 7-5: Zjednodušené schéma zapojení se dvěma transformátory.

Tato varianta využívá tři vodičů. To znamená, že při použití stávajících rozvodů střídavého napětí, většinou kabel NAYY, se využijí pouze tři vodiče a to dvě fáze (hnědý a šedý vodič) a zemnicí vodič (zelenožlutý vodič).

Distribuce v obci Praskolesy bude při této variantě provedena stejnosměrným rozvodem v konfiguraci TN – C, viz Obrázek 3-6 b) [13]. V této konfiguraci bude tedy hnědý vodič reprezentovat funkci vodiče L+, šedý pak funkci vodiče L- a zelenožlutý vodič bude reprezentovat vodič PEM. Jedná se tedy o bi – polární stejnosměrný systém. Vyvedení výkonu z DTS je znázorněno na Obrázku 7-6.



Obrázek 7-6: Vyvedení výkonu z DTS - Varianta 2

Nevýhodou tohoto řešení je, že pro tyto dvě usměrněná stejnosměrná napětí (500 a 1000 V) jsou potřeba buď dva distribuční transformátory, které na rozdíl od Varianty 1 nemusí být nijak speciální. Nebo jeden trojvinuťový transformátor, který je ve výsledku mnohem dražší a technicky náročnější než dva distribuční transformátory 22/0,4 kV. Varianta s trojvinuťovým transformátorem se hodí jako vhodná jako náhrada za transformátory větších výkonů (630 kVA a výše). Pro tuto variantu je v obci Praskolesy u Mrákotína použit variantu s dvěma distribučními transformátory 22/0,4 kV o výkonu 100 kV. Tyto transformátory nemohou být stejné, je nutné volit takové zapojení transformátoru,

aby jejich vzájemný hodinový úhel zajistil fázový posuv mezi sekundárními napětími 30° elektrických.

Výstupní napětí z distribučních transformátorů je tedy 0,4 (0,42) kV, maximální hodnota usměrněného napětí při sériovém zapojení dvou šestipulzních usměrňovačů bude, dle [19], ± 1080 V. Pro obec Praskolesy u Mrákotína je tato hodnota dostatečná, pokryje úbytky v síti i komutační poklesy v polovodičových součástkách. Pro jiné oblasti s vyšším zatížením by mohlo dojít k tomu, že by napětí kleslo i pod hodnotu 1000 V.

Distribuční transformátory musí být dimenzovány na efektivní proud odebíraný stejnosměrnou sítí (usměrňovačem). Vyjdeme z předpokladu použitého distribučního transformátoru v dané lokalitě, to znamená, že nové transformátory by měly být schopny přenášet minimálně 144 A.

Opět platí podmínka, že usměrňovač se musí chovat jako dostatečně „tvrdý“ elektrický zdroj, proto je nutné dimenzovat usměrňovač na šestnásobek maximálního odebíraného proudu, respektive šestnásobek proudu hlavního jisticího prvku v oblasti s maximální velikostí. V této variantě je potřeba proudové dimenzování polovodičových součástek na hodnotu 360 (240) A. Napěťové dimenzování polovodičových součástek je, dle [19] (vztah 2-51), $\sqrt{6}$ násobek fázové hodnoty sekundárního napětí DT, tj. minimálně 600 V. Obecně se polovodičové součástky dimenzují s ohledem na trvalá přepětí v síti, tj. ± 10 % a na krátkodobé přepětí při atmosférických jevech, tj. +50 %, zároveň je uvažováno s komutačním přepětím, proto se polovodičové součástky dimenzují na dvojnásobek amplitudy sdruženého napětí, tj. minimálně 800 V v našem případě [21].

Ztráty na usměrňovači, respektive na tyristorech (vždy spínají tři najednou) jsou orientačně, dle [19], tři násobek absolutní hodnoty přenášeného proudu, v našem případě cca 140 W. Tato hodnota platí i pro použití dvou usměrňovačů protože dojde k rozložení proudu mezi oba usměrňovače (předpokládáme vyrovnaný odebíraný proud z obou usměrňovačů). Tyto ztráty zaleží na mnoha faktorech, od charakteru zátěže po parametry použitých polovodičových součástek [19].

Komutační úbytek při plném zatížení usměrňovače vycházíme z maximálního proudu použitého transformátoru, tj. 144 A a napětí nakrátko, viz Tabulka 5-1, může dosahovat, dle [19] (vztah 2-63), hodnoty cca 23,5 V. Společně s úbytky na vedení v dané oblasti (cca 6 V) by měl mít usměrňovač říditelné výstupní napětí alespoň do hodnoty 1055 V stejnosměrných (uvážujeme oba usměrňovače plně zatížené) v závislosti na zatížení dané oblasti [19].

Z pohledu kvality eklektické energie (EMC) je vhodné použití sériové kombinace šestipulzních můstků, protože při splnění podmínek, jako je stejné zatížení usměrňovačů, stejné impedance sekundárního vinutí a napájení harmonickým napětím (50 Hz pouze), jsou eliminovány harmonické 5., 7., 17., 19. řádku aj. Tyto harmonické způsobují dodatečné ztráty v transformátoru (vliv vířivých proudů) v jeho primárním i sekundárním vinutí. Ztráty zvyšují

nároky na transformátor o cca 3 % z jeho typového (štítkového) výkonu. Rozdíl 2 % oproti Variantě 1 je určen právě onou eliminací některých harmonických. [21].

Výhodou tohoto řešení je, že využívá nejpoužívanější typy usměrňovacích můstků. Další výhodou je, že tato varianta využívá pouze tři vodiče stávajících distribučních rozvodů a zároveň umožňuje mít v odběrných místech napětí o dvou velikostech. Toto má za následek větší spolehlivost provozu, kdy při poruše pracovního vodiče lze oblast nadále zásobovat, i když ne v plném rozsahu. Výhodou zapojení usměrňovačů do série je, že výsledné výstupní napětí je dvanáctipulzní, to znamená lepší parametry výstupního napětí (vyhlazení aj.). V tomto zapojení je ze sítě odebírán takřka sinusový proud a při použití tlumivek se účinník blíží k jedničce [19]. To znamená, že při stejném výkonovém odběru v síti budou na transformátoru menší ztráty.

Za obecnou výhodu při použití stejnosměrného napětí se dá považovat absence jalové složky (účinník roven jedné), síť je přenášen pouze činný výkon, tj. absence jalových ztrát. Absence frekvence zlepšuje přenosu na delší vzdálenosti, dále pak absence frekvence znamená menší ztráty vlivem skinefektu, tyto ztráty jsou však při NN zanedbatelné. Použití stejnosměrného napětí při odběru.

Další ztráty v obou variantách, jako jsou ztráty na sekundárním a primárním vinutí použitých transformátorů, ztráty v obvodu usměrňovače (tlumivka, nulové diody aj.). Řešení těchto ztrát nebylo požadavkem společnosti E. ON.

7.6 NÁKLADY PŘI POUŽITÍ STEJNOSMĚRNÉ SÍTĚ S NAPĚTÍM 1000 V

Obecné shrnutí nákladů za některé nejpoužívanější technické vybavení sítě.

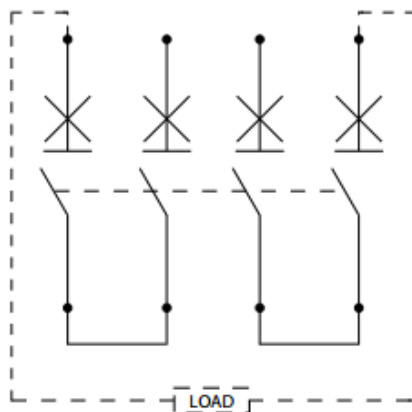
7.6.1 JIŠTĚNÍ A CHRÁNĚNÍ

Jištění obvodů ve stejnosměrné síti s napětím 1000 V klade na jisticí a ochranné prvky zvýšené požadavky. Vyšší požadavky jsou kladeny na elektrickou pevnost zařízení, stejně tak na přeskovkové vzdálenosti uvnitř jisticích prvků. Proto jištění obvodů s napětím 1000 V klade vyšší požadavky na prostor. Pro toto napětí nelze použít obyčejné stejnosměrné jističe používané například u fotovoltaických systémů, kde se používají jedнопólové jisticí prvky s provozním napětím 250 V stejnosměrných. Proto je nutné pro jištění napětí 1000 V nutné použít čtyřpólové jističe v zapojení dle Obrázku 7-7 [31]. Tyto jističe vyrábí například firma NOARK Electric, která se zabývá výrobou technického vybavení (jističe, odpínače, rozváděče, svodiče přepětí aj.) pro fotovoltaické systémy s napětím do 1000 V stejnosměrných, jejich cena je uvedena v ceníku této firmy [32]. Pro menší napětí, tj. 500 V lze využít pouze třípólové jističe, jejich cena je o cca 30 % menší než u čtyřpólových. Jmenovité proudy těchto jističů jsou ve jmenovitých řadách třífázových jističů, tj. 16 až 800 A.

Finanční náročnost těchto jističů je však velice náročná v porovnání s jističi na střídavé napětí 400/690 V. Cena bez DPH, pro DC kompaktní čtyřpólové jističe Ex9MD nebo DC

instalační jističe Ex9BP-H, je cca osmi až deseti násobná oproti jističům na střídavé napětí, při stejné hodnotě proudu hlavního jisticího prvku. Pro oblast Praskoles u Mrákotína s 19 odběrnými místy by vyšlo jištění této oblasti, dle oficiálního ceníku [32], na cca 141, respektive 100 tisíc korun bez DPH v závislosti na použitém typu jističe.

Další možností je použití pojistek, dají se použít pro jištění kabelů v DTS. Cena pojistek včetně pojistkových pouzder vychází dle [32], je cca sedmkrát menší než použití jističů.



Obrázek 7-7: Provedení čtyřpólového jističe pro jištění v síti s napětím 1000 V stejnosměrných [31]

Co se týče ochrany před dotykem živých částí, tj. proudové chrániče, lze konstatovat, že ekvivalentní náhrada proudového chrániče se jmenovitým napětím 1000 V stejnosměrných neexistuje.

7.6.2 KABELOVÉ A VENKOVNÍ VEDENÍ

Za určité úspory při používání stejnosměrné sítě s napětím 1000 V lze požadovat využití stávajících rozvodů elektrické energie, kabely NAYY a AES, v obci Praskolesy u Mrákotína. V roce 2012 v obci byla provedena kompletní rekonstrukce rozvodné sítě z venkovního vedení za kabelové vedení i dlouhého vývodu. Cena za kompletní rekonstrukci se pohybuje kolem 1,5 milionu korun, kde náklady na kabelové a venkovní vedení se vyšplhali na cca 145 tisíc korun. Toto vedení je čtyřvodičové s použitím v střídavé síti, kabely pro stejnosměrné aplikace (jiné barevné značení) nenabízí žádný z dodavatelů společnosti E. ON, tudíž není známa cena. Proto vyjdeme z předpokladu, že cena bude úměrná tomu, kolik vodičů bude použito u jednotlivých variant. U Varianty 1, kde jsou využity pouze dva vodiče, bude cena za vedení cca 72,5 tisíc korun. U Varianty 2 se využívají tři vodiče, cena za vedení bude cca 97 tisíc korun. Tyto ceny platí při použití nových kabelů se správným barevným označením pro stejnosměrné aplikace. Ceny jsou pouze orientační. Použitím jiných kabelů se mohou změnit parametry v celé síti (úbytky, ztráty aj.). Kabely pro stejnosměrné aplikace (fotovoltaické systémy) vyrábí například firma NKT Cables s označením VALSUN® CYKY ve velikosti standardní řady průřezů používaných společností E. ON. Jmenovité stejnosměrné napětí je 1800 V. Dále je možno použít stínění trakční kabely vyráběné stejnou firmou. Cena

výkopových a ostatních prací spojených s natažením nového vedení bude cca stejná, tj. 350 tisíc korun. Tyto ceny vychází z poskytnutého ceníku Praskolesy, obnova TS, NN společností E. ON.

7.6.3 TRANSFORMÁTOR

Cena transformátoru pro Variantu 1 se specifickým sekundárním napětím je posuzována individuálně výrobcem transformátoru. V případě Varianty 2, kdyby byl dodán druhý transformátor o stejném výkonu, by se cena pohybovala cca 95 tisíc za samotný transformátor a cca 30 tisíc za sloupovou transformační stanicí. Dále by byla potřeba nového propojení ke stávající distribuční síti 22 kV společně s jištěním, rozváděčem atd. Tyto náklady by tvořily sumu cca 55 tisíc korun. Tyto ceny jsou pouze orientační a mohou se lišit. Tyto ceny vychází z poskytnutého ceníku Praskolesy, obnova TS, NN společností E. ON.

7.6.4 USMĚRŇOVAČE

Návrh usměrňovače nebo usměrňovačů je specifický pro každou z navržených variant. Při návrhu je nutné zohlednit navržená kritéria pro polovodičové výkonové součástky, například závěrné napětí, maximální odebíraný proud, velikost výstupního napětí, systém řízení, počet součástek, výkon transformátoru atd. Cena navrženého usměrňovače se nedá jednoznačně určit bez toho, aby byla zadána konkrétní nabídka konkrétním výrobcům. Jedním z výrobců, se zabývá výrobou stejnosměrných řešení na míru, respektive výrobou stejnosměrných technologií pro trakci aj. je dceřiná společnost ČKD Group, Elektronika.

8 ZÁVĚR

V této diplomové práci se věnuji návrhu stejnosměrné sítě se jmenovitým napětím 1000 V stejnosměrných. Pro návrh této sítě byla vybrána obec Praskolesy u Mrákotína, která vyhovovala zadání od společnosti E. ON Česká republika. Jedná se o obec s malou hustotou odběrných míst (19) a dlouhým vývodem, který je realizován venkovním vedením v celkové délce cca 485 metrů. Celková délka kabelového vedení činí cca 1505 metrů. Mezi odběrnými místy je celkem 39 úseků vedení o různých délkách, rozdělení je uvedeno v této práci.

Při návrhu se vychází z předpokladů, že bude využita stávající rozvodná síť, která prošla celkovou rekonstrukcí v roce 2012. Proto jsou v práci řešeny distribuční sítě střídavé. Návrh stejnosměrné sítě může být implementován na jinou oblast, proto jsou v kapitole č. 2 uvedeny náležitosti týkající se různých druhů sítí včetně jejich výhod a nevýhod. Dále je v této kapitole řešena problematika dlouhých vývodů v sítích střídavých, tato kapitola slouží k porovnání této problematiky u sítí stejnosměrných. Obdobně jako kapitola č. 2 popisuje kapitola č. 3 stejnosměrné distribuční soustavy. V této kapitole je popsáno použití stejnosměrných sítí společně s rešerší o studiích ohledně velikosti použitého napětí. Dále je v této kapitole uvedeny nejpoužívanější typy usměrňovačů společně s popsáním ztrát v těchto usměrňovačích. V obou kapitolách jsou popsány ztráty elektrické energie při přenosu výkonu a úbytky napětí na jednotlivých prvcích.

Prvním bodem řešení byl výpočet ztrát elektrické energie v dané lokalitě, tyto ztráty byly vypočteny pomocí programu PASS DAISY OFF-LINE Bizon, tento program slouží pro výpočet ustáleného chodu sítě. Tímto výpočtem bylo zjištěno, že ztráty elektrické energie, při odebraném činném výkonu, cca 40,5 kW a jalovém výkonu cca 14,5 kVAr, na transformátoru činí cca 0,5 kW a 1,5 kVA, na vedení cca 462 W a 108 VAr. Relativní maximální úbytek napětí dosahuje hodnoty 5,1 V (2,26 %) ze jmenovité hodnoty napětí 230 V. Tyto hodnoty budou sloužit k porovnání ztrát mezi střídavou a mnou navrženou stejnosměrnou sítí.

Druhým bodem této práce bylo navrhnutí stejnosměrné sítě pro obec Praskolesy u Mrákotína. Pro tuto obec jsem navrhnul dvě varianty řešení. Jedna z variant využije nestandardní řešení pouze s jedním tyristorově řízeným šestipulzním usměrňovačem. Toto řešení bude vyžadovat speciální transformátor se specifickým výstupním napětím. Při této variantě bude usměrňené napětí mít hodnotu 1000 V pro celou obec. Ztráty elektrické energie, při zachování výkonové bilance, jsou při této variantě cca 190 W, tj. o 58,8 % menší než v případě střídavé sítě. Úbytek napětí činí cca 6,64 (0,64 %) ze jmenovité hodnoty napětí 1000 V. Tento výpočet byl proveden na základě výše uvedených stanovených kritérií a na základě náhradního schématu dané sítě, viz kapitola 7. Pro druhou variantu jsem navrhnul použití sériové spojení dvou tyristorově řízených šestipulzních usměrňovačů, kde v odběrném místě budou k dispozici dvě hodnoty usměrňeného napětí a to 500 a 1000 V. Tato varianta využívá

dva transformátory se standartním fázovým napětím s posunem napětí 30° . Tato varianta se zdá býti z pohledu kvality vstupního usměrněného napětí, ztrát, EMC a odebíraného proudu lepší variantou. Při této variantě jsou ztráty elektrické energie cca 158 W, tj. o cca 66 % menší než v případě střídavé sítě.

Dalším bodem zadání je technické řešení jednotlivých variant s popisem výhod a nevýhod těchto variant. Touto problematikou se zabývá kapitola 7.5.

Posledním bodem této práce bylo ekonomická analýza navržené stejnosměrné sítě. Ekonomická analýza z pohledu ztrát eklektické energie je jasná, z pohledu ztrát je použití stejnosměrných sítí nízkého napětí velice výhodné, v námi vybrané obci je rozdíl v ztrátách až 66 %. Tato skutečnost dává použití stejnosměrných sítí smysl. Na druhou stranu lze konstatovat, že dodatečné náklady, ať už na transformátory a usměrňovače, tak i na absenci některých ochranných prvků na napětí 1000 V stejnosměrných, jsou neúměrně veliké v porovnání se střídavou sítí, že nasazení navrženého stejnosměrného řešení by se nevyplatilo. Pro stávající oblast vznikají problémy se spotřebiči v dané oblasti, které nejsou připraveny na dané stejnosměrné napětí. Řešením by bylo použití střídačů u každého odběrného místa, to však jsou dodatečné náklady už k tak vysokým nákladům při zavedení sítě v dané oblasti. Jako pilotní projekt pro nově budovanou oblast přizpůsobenou danému napětí by mohlo mít navržené řešení stejnosměrné sítě nějaký smysl. V tuto chvíli nemá zavedení stejnosměrných sítí velkou šanci na prosazení, ekonomicky nerentabilní, ale v budoucnu je možné, že využití stejnosměrných sítí nízkého napětí najde svoje opodstatnění.

9 POUŽITÁ LITERATURA

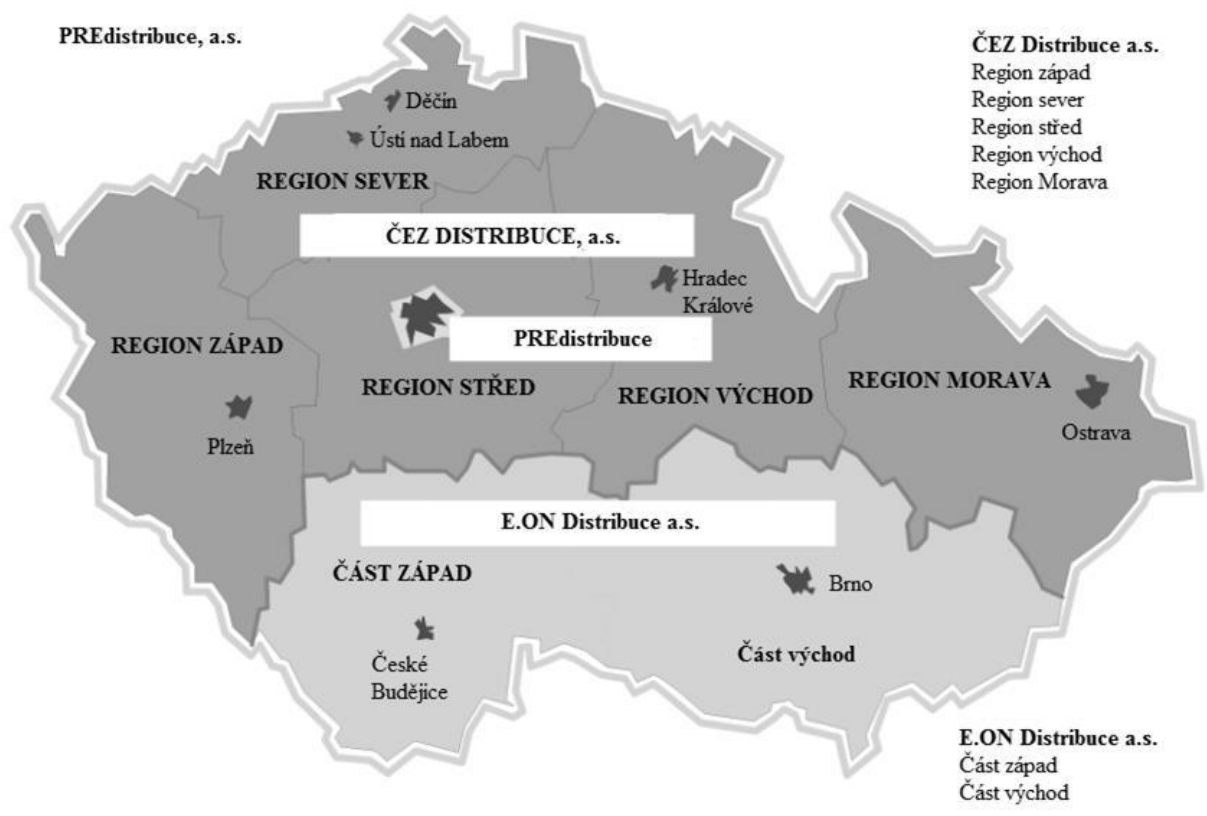
- [1] BLAŽEK, V. *Distribuce elektrické energie*, Brno, VUT, 2005
- [2] NOVÁK, V. *Návrh elektrické sítě nn v dané lokalitě*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 106 stran. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.
- [3] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] ČSN 34 1610: 1963. *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [5] NĚMEC, J. *Návrh konfigurace napájecí sítě rozsáhlého strojírenského podniku*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 69 stran.
- [6] ŠTODLOVÁ, M. *Elektrické sítě městské a průmyslové*, ZČU Plzeň, Plzeň 1994, 149 stran.
- [7] *Provozování dlouhých vývodů sítě nízkého napětí v distribučních soustavách*. CIRED 2008
- [8] FOJTÍK, M. *Návrh rekonstrukce distribuční sítě 0,4 kV E. ON v zadané oblasti*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 66 stran.
- [9] PNE 34 7659-3. *Kabely plastové pro distribuční sítě o jmenovitém napětí 0,6/1 kV – Oddíl 3: Kabely s PVC izolací bez koncentrického jádra*. Praha: ÚJZ Rež, a.s., 2006. Dostupné také z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2034%207659%20-3%20tisk.pdf>
- [10] PNE 34 7659-5. *Kabely plastové pro distribuční sítě o jmenovitém napětí 0,6/1 kV – Oddíl 5: Kabely s XLPE izolací bez koncentrického jádra*. Praha: Praha: ÚJZ Rež, a.s., 2006. Dostupné také z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2034%207659%205-tisk.pdf>
- [11] PNE 34 7509. *HOLÉ VODIČE PRO VENKOVNÍ VEDENÍ ZE SOUSTŘEDNĚ SLANĚNÝCH KRUHOVÝCH DRÁTŮ*. Praha: ÚJZ Rež, a.s., 2007. Dostupné také z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2034%207509%20def.zn%C4%9Bn%C3%AD.pdf>
- [12] E. ON DISTRIBUCE, A. S. *Požadavky na umístění, provedení a zapojení měřících souprav u zákazníků a malých výroben s připojovaným výkonem do 250 kW připojených k elektrické síti nízkého napětí*. České Budějice, 2013. Dostupné také z: <https://www.eon.cz/-a6627?field=data>
- [13] ČSN 33 2000 -1 ed. 2. *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 1: Základní hlediska, stanovení základních charakteristik, definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [14] Siemens, s.r.o. *Renesance stejnosměrného proudu* [online]. 2014 [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o_nas/inovace/Pages/renesance-proudu.aspx

- [15] ČSN EN 60038. *Jmenovitá napětí CENELEC*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [16] EVANS, Manuel A. Vargas. *Why Low Voltage Direct Current Grids?*. Delft, 2013. Diplomová práce. Delft University of Technology: Faculty of Applied Sciences. Vedoucí práce Prof.dr. Ad van Wijk.
- [17] NILSSON, Daniel. *DC Distribution Systems*. Goteborg, 2005. Diplomová práce. Chalmers University of Technology: Division of Electric Power Engineering - Department of Energy and Environment.
- [18] KENZELMANN, Stephan. *Modular DC/DC Converter for DC Distribution and Collection Networks*. Lausanne, 2012. Dizertační práce. École polytechnique fédérale de Lausanne - Faculté Sciences et Technique de l'Ingénieur: Laboratoire Électronique Industrielle.
- [19] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika.*, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [20] VŠB - TU OSTRAVA: FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY. *POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE* [online]. 2014 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://bit.ly/1UsXpwC>
- [21] PATOČKA, doc. Dr. Ing. Miroslav. *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA BVEL: 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí*. Brno, 2010
- [22] PNE 33 3430-0. *VÝPOČETNÍ HODNOCENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ ODBĚRATELŮ A ZDROJŮ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV*. České Budějice: EGC- EnerGoConsult, s.r.o, 2015. Dostupné také z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-0%205.vyd%C3%A1n%C3%AD%20definitivn%C3%AD%20zn%C4%9Bn%C3%A4D.pdf>
- [23] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 126 s.
- [24] KAPLANOVÁ, BC. Klára. *Výpočet ustáleného chodu sítě 22 kV v zadané oblasti*. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012.
- [25] DAISY S.R.O.,. *Uživatelská příručka PAS DAISY OFF- LINE BIZON*. Praha. Leden 2004.
- [26] Daisy s.r.o.: *Výpočty el. sítí všech napěťových úrovní* [online], 2016, [cit. 2016-12-04]. <http://www.daisy.cz/daisycz/1024/index.html>
- [27] *Praskolesy u Mrákotína* [online]. Seznam.cz [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: www.mapy.cz
- [28] *Stožárová trafostanice nový typ* [online]. Energetika servis s.r.o., 2006 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://bit.ly/1So0vzT>

- [29] Prováděcí pokyn PP-DS-139 společnosti E. ON Česká republika, s.r.o - *Koncepce sítě nízkého napětí*. 2014.
- [30] CHAPMAN, D. Kvalita elektrické energie- průvodce, Harmonické- Příčiny a účinky, [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>
- [31] *DC kompaktní jističe Ex9MD* [online]. NOARK Electric, 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.noark-electric.cz/cz/produkty/Kompaktn%C3%AD_jisti%C4%8De/DC_kompaktn%C3%AD_jisti%C4%8De_Ex9MD
- [32] *Oficiální ceník NOARK Electric Europe s.r.o.* [online]. NOARK Electric, 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.noark-electric.cz/uploads/cenik_noark_electric_cz_20160516.xlsm

PŘÍLOHY

A: OBRÁZKY



Obrázek P-1: Rozdělení distribučních soustav v České republice [3]



Obrázek P-2: Nejpoužívanější typ kabelu typu NAYY [8]



Obrázek P-3: Stožárová transformační stanice [28]

B: VÝSLEDKY USTÁLENÉHO CHODU

Viz příložené CD.

C: STEJNOSMĚRNÁ ANALÝZA – DATA

Viz příložené CD.

D: Jednopolové schéma pro výpočet stejnosměrných poměrů v síti

Viz nevázaná příloha a příložené CD.

E: KARTOGRAFICKÉ MAPY OBLASTI

Viz nevázaná příloha a příložené CD.

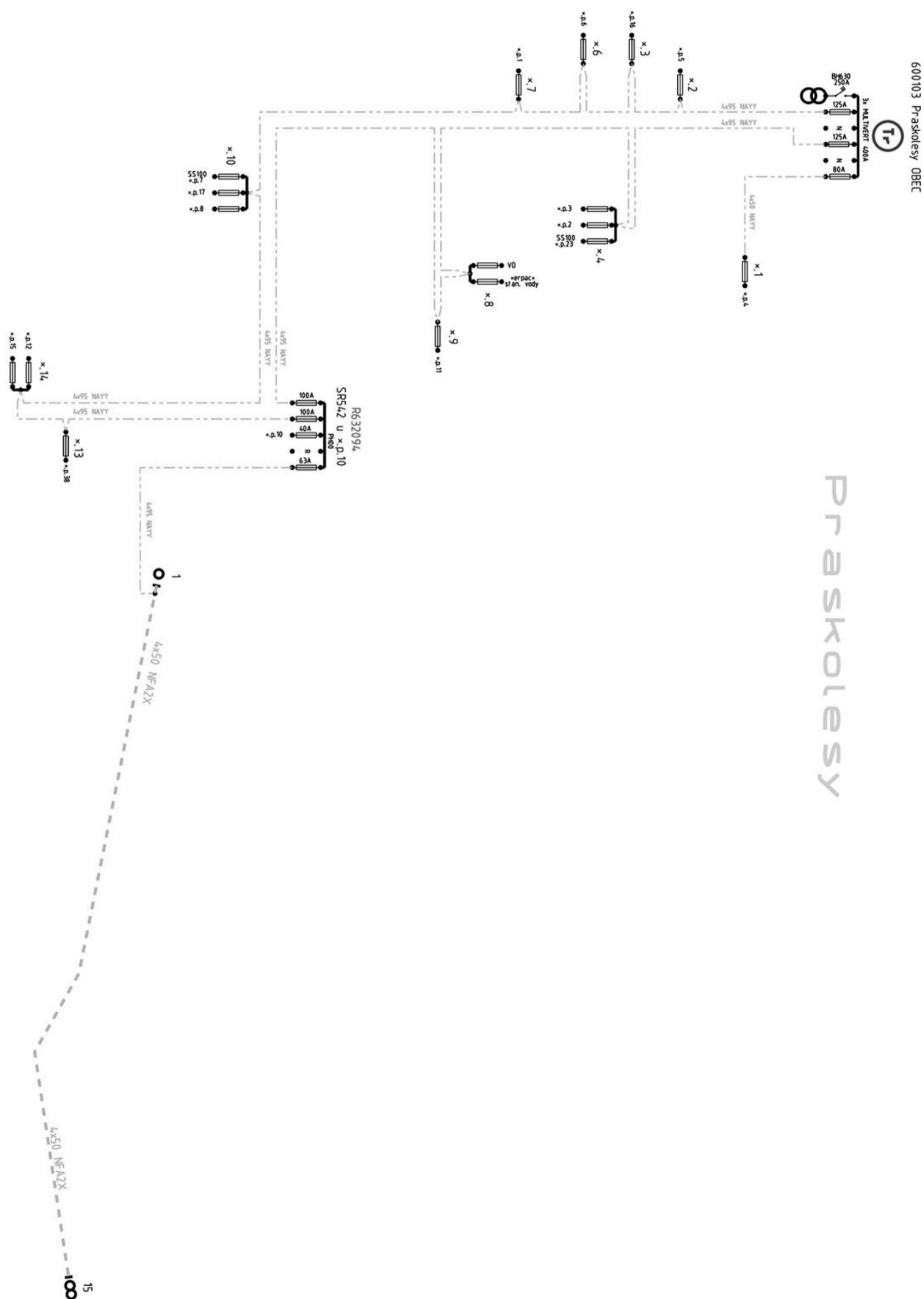
Vysvětlivky: Zelená čára – kabelové vedení

Přerušovaná zelená čára – venkovní vedení

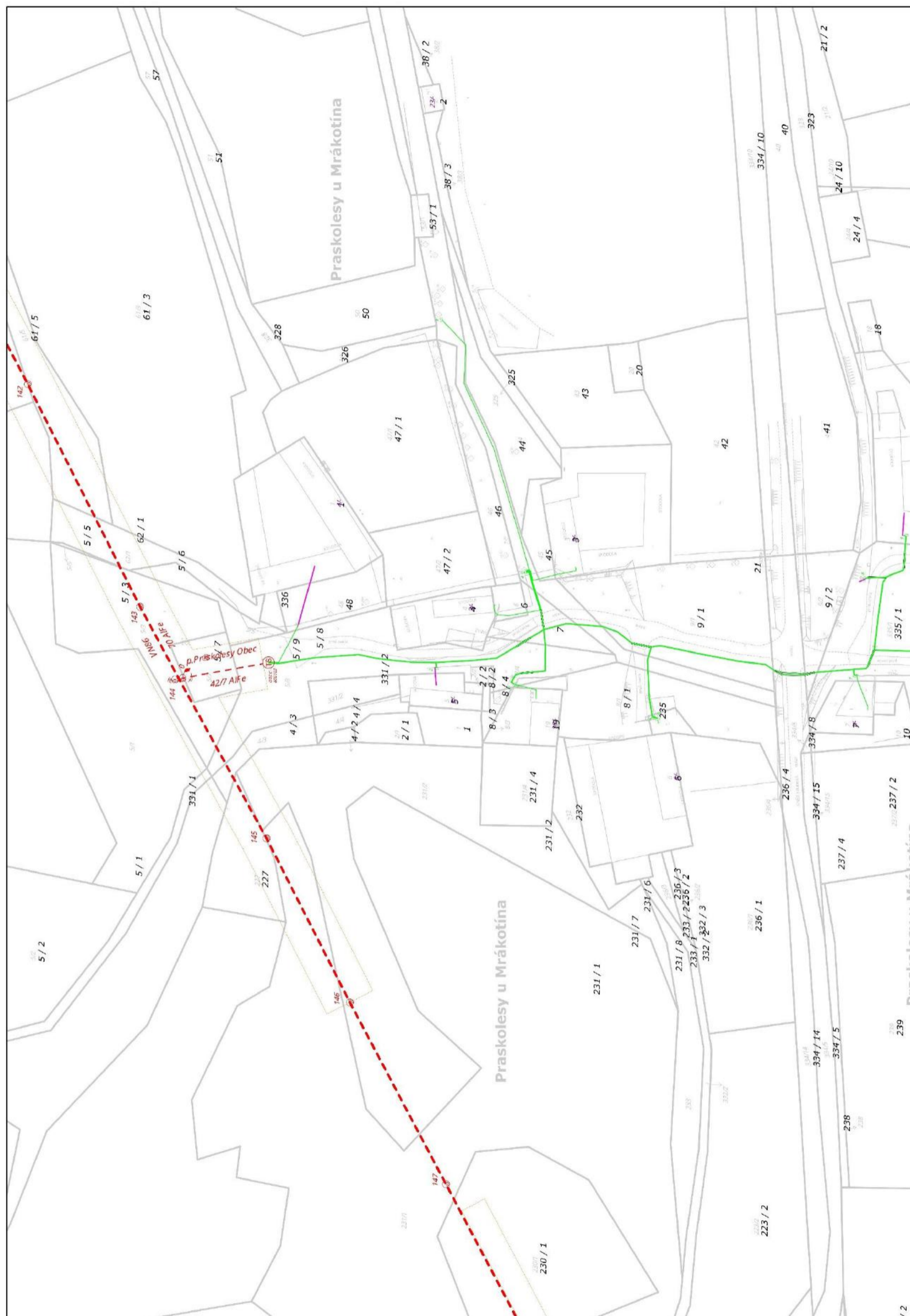
Růžová barva – hlavní domovní vedení

Přerušovaná červená čára – venkovní vedení – hlavní linka

D: Jednopolové schéma pro výpočet stejnosměrných poměrů v síti



E1: Kartografické mapy oblasti



E2: Kartografické mapy oblasti



E3: Kartografické mapy oblasti



E4: Kartografické mapy oblasti

