



# 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

## NÁVRH ÚPRAV NAPÁJENÍ MĚSTA MODŘICE A OKOLÍ

TECHNICAL MODIFICATION DESIGN OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEMS FOR MODŘICE AND ITS SURROUNDINGS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Šerý

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2017



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Petr Šerý

**ID:** 155242

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh úprav napájení města Modřice a okolí

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište zásady rozvoje a výstavby sítí vysokého napětí.
2. Popište metodiku výpočtů ustáleného chodu sítí vysokého napětí.
3. Vypočtete stávající napěťové a výkonové poměry sítě vysokého napětí města Modřice a okolí.
4. Navrhněte úpravy sítě vysokého napětí města a okolí s ohledem na plánovaný rozvoj.
5. Vypočtete napěťové a výkonové poměry v oblasti po úpravách sítě.
6. Navrhněte optimální konfiguraci sítě po úpravách sítě.
7. Zkontrolujte optimální konfigurace na tepelné účinky při zkratu.

#### 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:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 22.5.2017

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

**Konzultant:**

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

ŠERÝ, P. Návrh úpravy napájení města Modřice a okolí. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017, 53 stran, 3 přílohy.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh úpravy napájení města Modřice a okolí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 22. května 2017

.....

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem úpravy napájení města Modřice a okolí. V práci je popsáno základní teoretické rozdělení elektrizační soustavy a samotné distribuční soustavy. Následně je prostor věnován rozvoji a výstavbě samotných VN sítí a vysvětleny jsou i metody a způsoby výpočtu ustáleného chodu sítě. Tyto metody jsou pak využity ve výpočetních programech, které jsou uvedeny v další kapitole této práce.

Cílem praktické části práce je nejprve zjistit aktuální stav sítě v zadané lokalitě. Dále je dle požadavků na navýšení příkonu případně připojení nových odběrných míst navrženo několik úprav. Navržené úpravy jsou dále posouzeny pro různé provozní stavy. Výsledkem je poté síť, která je funkční, provozuschopná a spolehlivá. Celá analýza probíhá ve výpočetním programu PAS DAISY Off-line V4 Bizon.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** distribuční soustava; ustálený chod sítě; vysoké napětí; venkovní vedení; rekonstrukce distribuční sítě,

## **ABSTRACT**

This thesis is concerned with a technical modification of design of the electrical power systems for Modřice and its surroundings. The thesis describes a basic theoretical distribution of the electricity network and the distribution network itself. Following chapters are devoted to the development and construction of the HV networks and to the methods and ways of calculating the steady operation of the network. These methods are then used in the computational programs that are presented in the next chapter of this paper.

The aim of the practical part of the thesis is to first determine the current state of the network in the given location. Furthermore, several modifications are proposed according to the requirements for increasing the power consumption or connecting the new supply places. The proposed modifications are further assessed for the different operating conditions. The result is a network that is functional, operational and reliable. The whole analysis is carried out in the PAS DAISY Off-line V4 Bizon computing program.

**KEY WORDS:** electric distribution network, steady state, high voltage, overhead line, reconstruction of electric distribution networks;

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Ptáčkovi Ph.D. za teoretické i praktické poznatky a připomínky. Poděkování dále patří panu Ing. Janu Benešovi za praktické zkušenosti, které mi předával tvorbě praktické části práce. Poděkování patří dále také mojí kamarádce Mgr. Karolíně Winklerové za jazykovou korekturu a oporu při psaní této práce zejména na počátku, kdy mě podpořila, abych tuto práci začal psát. V neposlední řadě velké díky patří rodičům, kteří mě podporovali po celou dobu studia. Poděkování si také zaslouží celý ústav elektroenergetiky za důsledné a pečlivé vzdělávání budoucích absolventů.

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 DĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY V ČR.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 DISTRIBUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 DĚLENÍ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY.....</b>	<b>14</b>
3.1.1 PODLE NAPĚTÍ.....	14
3.1.2 PODLE USPOŘÁDÁNÍ SÍTĚ.....	14
3.1.3 PODLE ZAPOJENÍ UZLU TRANSFORMÁTORU.....	16
<b>3.2 ELEKTRICKÉ STANICE V DS.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 MOŽNOSTI VEDENÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ .....</b>	<b>17</b>
3.3.1 VENKOVNÍ VEDENÍ .....	18
3.3.2 KABELOVÉ VEDENÍ .....	18
<b>3.4 POUŽÍVANÉ VN KABELY DLE STANDARDU E.ON .....</b>	<b>19</b>
<b>4 ZÁSADY ROZVOJE A VÝSTAVY SÍTÍ VN .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 OBECNÉ PRAVIDLA PRO ROZVOJ SÍTÍ VN .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 DIMENZOVÁNÍ SÍTÍ VN .....</b>	<b>21</b>
<b>4.3 VÝSTAVBA NOVÝCH SÍTÍ VN .....</b>	<b>22</b>
<b>4.4 REKONSTRUKCE STÁVAJÍCÍCH SÍTÍ VN .....</b>	<b>22</b>
4.4.1 OBNOVA VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	23
4.4.2 OBNOVA KABELOVÉHO VEDENÍ.....	23
<b>5 METODY VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU SÍTÍ VN .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....</b>	<b>25</b>
5.2.1 GAUSA-SEIDLOVOU METODA .....	26
5.2.2 NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODA .....	27
<b>6 SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ .....</b>	<b>32</b>
<b>6.1 PAS DAISY OFF-LINE V4 BIZON.....</b>	<b>32</b>
6.1.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ – LFOFF.....	33
6.1.2 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ SÍTĚ – ZKOFF .....	33
6.1.3 DALŠÍ MODULY .....	33
<b>7 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ SÍTĚ MĚSTA MODŘICE A OKOLÍ.....</b>	<b>34</b>
<b>7.1 VÝZNAMNÉ ODBĚRY V ZADANÉ OBLASTI .....</b>	<b>35</b>
<b>7.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ .....</b>	<b>35</b>
<b>7.3 ZATÍŽENÍ KMENOVÝCH LINEK.....</b>	<b>36</b>

---

7.4 ÚBYTKY NAPĚTÍ NA VEDENÍ .....	37
<b>8 PROVEDENÉ ÚPRAVY V SÍTI .....</b>	<b>38</b>
8.1 PŘEPOJENÍ VD NA LINKU VN164 A ZATAŽENÍ LINKY VN161 DO ROZVODNY SO .....	38
8.2 ZAČLENĚNÍ LINKY VN1275 DO CTP MODŘICE.....	39
8.3 ÚPRAVA ZAPOJENÍ VE VR MODŘICE.....	41
8.4 ZDVOJENÍ VN161 A PROVOZ SÍŤE V ZÁKLADNÍ STAVU PO ÚPRAVÁCH.....	43
8.5 NAPĚŤOVÉ A VÝKONOVÉ POMĚRY PO PROVEDENÝCH ÚPRAVÁCH .....	44
<b>9 KONTROLA NA TEPELNÉ ÚČINKY PŘI ZKRATU .....</b>	<b>46</b>
9.1 ÚPRAVY NEVYHOVUJÍCÍCH ÚSEKŮ .....	49
<b>10 ZÁVĚR.....</b>	<b>50</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>53</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 2-1 Uspořádání elektrizační soustavy (Upraveno podle [1])</i> .....	12
<i>Obr. 2-2 Rozdělení distribučních území v ČR (Upraveno podle [1])</i> .....	13
<i>Obr. 3-1 Paprsková síť (Upraveno podle [1])</i> .....	15
<i>Obr. 3-2 Okružní síť (Upraveno podle [1])</i> .....	15
<i>Obr. 3-3 Mřížová síť (Upraveno podle [1])</i> .....	15
<i>Obr. 3-4 Způsoby uzemnění v DS (Upraveno podle [1])</i> .....	16
<i>Obr. 3-5 Ukázka kabelu NA2XS(F)2Y</i> .....	19
<i>Obr. 3-6 Ukázka kabelu AXEKVCEY</i> .....	20
<i>Obr. 3-7 Ukázka kabelu AXAL TT PRO</i> .....	20
<i>Obr. 5-1 Náhradní schéma sítě (Upraveno podle [4])</i> .....	24
<i>Obr. 7-1 Situační mapa s významnými odběrateli</i> .....	34
<i>Obr. 7-2 Ukázka zatížení linek v programu Bizon</i> .....	36
<i>Obr. 8-1 Přepojení Vodňanských drůbežáren</i> .....	38
<i>Obr. 8-2 Zaústění VN161 do rozvodny Sokolnice</i> .....	39
<i>Obr. 8-3 Provedené úpravy na ulici Vídeňská</i> .....	40
<i>Obr. 8-4 Provedené úpravy kolem TS 3081 Modřice REMET</i> .....	40
<i>Obr. 8-5 Odbočení VN1275 do VR Modřice</i> .....	41
<i>Obr. 8-6 Rekonstrukce vstupní rozvodny Modřice</i> .....	42
<i>Obr. 8-7 Zdvojení vedení VN161</i> .....	43
<i>Obr. 8-8 Přepojení konce VN83 do VR Modřice</i> .....	44
<i>Obr. 9-2 Uvažované místa zkratů na vývodů VN161</i> .....	47
<i>Obr. 9-3 Uvažované místa zkratů na vývodů VN1275</i> .....	48
<i>Obr. 10-1 Porovnání hodnoty proudů na vývodech před a po úpravách</i> .....	50



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 4-1 Doporučené a závazné hodnoty (Upraveno podle [6])</i> .....	22
<i>Tab. 5-1 Znaménková konvekce výkonu (Upraveno podle [4])</i> .....	26
<i>Tab. 7-1 Přehled významných odběrů</i> .....	35
<i>Tab. 7-2 Zatížení transformátorů v aktuálním stavu</i> .....	35
<i>Tab. 7-3 Zatížení vývodů z rozvodny</i> .....	36
<i>Tab. 7-4 Zatížení vybraných úseků linek v aktuálním stavu</i> .....	36
<i>Tab. 7-5 Úbytek napětí na vybraných TS 22/0,4 kV v aktuálním stavu</i> .....	37
<i>Tab. 8-1 Nejvýznamnější požadavky na navýšení nebo připojení odběrných míst</i> .....	38
<i>Tab. 8-2 Zatížení transformátorů po provedených úpravách</i> .....	44
<i>Tab. 8-3 Zatížení vývodů z rozvodu po provedených úpravách</i> .....	45
<i>Tab. 8-4 Zatížení vybraných úseků linek po provedených úpravách</i> .....	45
<i>Tab. 8-5 Úbytek napětí na vybraných TS 22/0,4 kV po úpravách</i> .....	45
<i>Tab. 9-1 Převzaté zkratové výkony v síti 110 kV z nadřazené soustavy</i> .....	47
<i>Tab. 9-2 Vyhodnocení minimální průřezu</i> .....	48
<i>Tab. 9-3 Nová kontrola na minimální průřez</i> .....	49

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AlFe	ocelohliníkové lano	(-)
ČEPS	provozovatel české energetické přenosové soustavy	(-)
ČSN	Česká technická norma	(-)
ČR	Česká republika	(-)
DS	distribuční soustava	(-)
ECD	E. ON Distribuce, a.s.	(-)
ES	elektrizační soustava	(-)
$f_x$	funkce proměnné $x$	(-)
$i$	označení uzlu – dolní index	(-)
$\vec{I}_i^*$	komplexně sdružený fázor daného proudu v $i$ -tém uzlu	(A)
J	Jacobián	(-)
$j$	označení uzlu – dolní index	(-)
$k$	pořadí iterace	(-)
nn	nízké napětí	(-)
$P_i$	činný výkon v uzlu $i$	(W)
PNE	podniková norma energetiky	(-)
PS	přenosová soustava	(-)
$Q_i$	jalový výkon v uzlu $i$	(VAr)
$\bar{S}_i$	zdánlivý výkon v $i$ -tém uzlu soustavy	(VA)
$\bar{S}_i^*$	komplexně sdružený fázor zdánlivý výkon	(VA)
$U$	napětí	(V)
$\bar{U}_i$	fázor napětí v uzlu $i$	(S)
vn	vysoké napětí	(-)
vvv	velmi vysoké napětí	(-)
$\bar{Y}_{ij}$	podélná admitance mezi uzly $i$ a $j$	(S)
$\varepsilon$	zadaná přesnost výpočtu	(-)
$\varphi$	fázový posun mezi fázory napětí a proudu	(-)
$\vartheta$	parciální derivace	(-)

# 1 ÚVOD

Elektrická energie v každé domácnosti je dnes samozřejmostí a běžným standardem. Elektřinu využíváme denně a už se bez ní nedokážeme obejít. Relativně nedávno však situace byla zcela odlišná. První elektrifikace na území České republiky bychom mohli datovat do 19. století, kdy elektrifikace postupně povolna prostupovala do všech měst i vesnic. Elektrifikace obcí byla dokončena až v 60. letech 20. století. Zprvu byly rozvody elektrické energie lokální a zásobovaly elektrickou energií jednotlivá města. V dnešní době máme vyspělou elektrizační soustavu, která nám umožňuje spolehlivou dodávku elektrické energie po celém území České republiky. Tato soustava zahrnuje procesy výroby, přenosu, distribuce a spotřeby elektrické energie. Elektrizační soustava slouží tedy pro přenos elektrické energie od jeho výrobce až k samotnému spotřebiteli, dělí se na přenosovou a distribuční soustavu.

Tato práce se zaměřuje na právě distribuční soustavu města Modřice a okolí. V Modřicích je rychle expandující průmyslová a obytná zóna. Před výstavbou je však potřeba zajistit dostatečný přívod elektrické energie. Důležité je tedy nejenom udržovat distribuční soustavu a dbát na její funkčnost, ale zároveň také reagovat na požadavky odběratelů a udržet tak i následně krok s průmyslovým rozvojem.

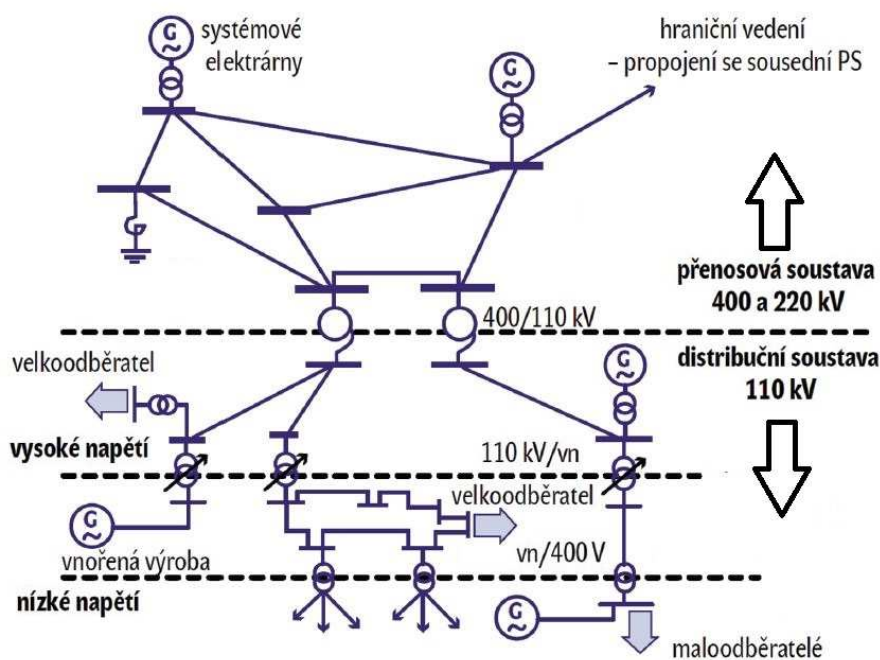
## 2 DĚLENÍ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY V ČR

Elektrizační soustava představuje vzájemně propojený soubor elektrických zařízení. Tento soubor můžeme rozdělit do čtyř skupin [1]:

- Výroba - (jaderné elektrárny, uhelné elektrárny, teplárny apod.)
- Přenos - (transformace a distribuce elektrické energie, elektrické přípojky domů)
- Spotřeba - (zařízení na přeměnu elektrické energie na světlo, teplo apod.)
- Systém měření a zabezpečení - (ochranné, řídicí a informační funkce)

Struktura a podoba dnešní elektrizační soustavy se ustálila na podobě, kterou znázorňuje schematicky Obr. 3-1. Velké elektrárenské bloky dodávají výkon do přenosové soustavy, tato soustava následně přenáší energii na velké vzdálenosti a v předávacích místech tj. elektrických stanicích je propojena s distribuční soustavou. Distribuční soustava následně přivádí výkon ke koncovým zákazníkům. Do této soustavy mohou být připojeny zdroje menšího výkonu [1].

Elektrizační soustavu můžeme tedy rozdělit na přenosovou soustavu (PS) a distribuční soustavu (DS).



Obr. 2-1 Uspořádání elektrizační soustavy (Upraveno podle [1])

### 2.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava je základním pilířem pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti při vysokém výkonu. Můžeme ji nazvat subsystémem elektrizační soustavy České republiky. Provozovatelem soustavy je státem vlastněná firma ČEPS, a.s., která ji provozuje na napěťových hladinách 400 kV, 220 kV a vybraných linkách 110 kV. PS také zajišťuje propojení s přenosovými soustavami okolních států včetně předávání veškerých informací o jejím stavu. ČEPS také řídí systémové služby, mezi ně patří například regulace výkonu a kmitočtu, regulace napětí, potřebná výkonová rezerva atd. Dále také zpracovává a testuje plán obrany přenosové soustavy proti šíření poruch, plán obnovy při rozsáhlém výpadku a případném teroristickém útoku. Soustava je takticky zřizována a provozována ve veřejném zájmu [1].

## 2.2 Distribuční soustava

Distribuce elektrické energie je pomocí distribuční soustavy zajišťována třemi společnostmi. Největší území patří polostátní firmě ČEZ Distribuce, a.s., následuje E.ON Distribuce, a.s. a nejmenší území má PREdistribuce, a.s., která zajišťuje napájení hlavního města Prahy. Přehledné rozdělení znázorňuje Obr. 3-2. Tato soustava je tvořena nižšími napěťovými hladinami než PS, hladiny jsou vzaty z normalizované řady a jsou vybírány podle nejvhodnějších podmínek a dosažení optimálních podmínek pro spolehlivé zásobení eklektickou energií [2].



Obr. 2-2 Rozdělení distribučních území v ČR (Upraveno podle [1])

## 3 DISTRIBUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Distribuční síť slouží k dodávání elektrické energie ke koncovým zákazníkům. V České republice máme distribuční soustavu na hladině velmi vysokého napětí 110 kV, vysokého napětí 22 kV (35 kV) a nízkého napětí 230/400 V. První dvě jmenované hlady jsou určeny pro velkoobdoběratele a poslední je určena pro malooobdoběratele [2].

### 3.1 Dělení distribuční soustavy

Distribuční soustavu můžeme dělit dle několika kritérií, mezi hlavní kritéria dělení patří napěťová hladina na níž DS pracuje, uspořádání sítě a v neposlední řadě také uzemnění nulového bodu transformátoru.

#### 3.1.1 Podle napětí

Velikosti napětí v distribučních sítích jsou tedy dána normalizační řadou, která vede k dosažení optimálních podmínek pro distribuci elektrické energie.

➤ Vedení na napěťové hladině 110 kV

Distribuční síť na hladině 110 kV je provozována s uzemněným uzlem transformátoru. Sítí jsou přenášeny velké výkony na poměrně dlouhé vzdálenosti z předávacích stanic PS 400(220)/110 kV k velkoobdoběratelům a do transformačních stanic 110/22 kV. Na této napěťové hladině jsou velkoobdoběratelé, což jsou například velké průmyslové podniky [2].

➤ Vedení na napěťové hladině 22 (35) kV

Distribuční síť na hladině 22 kV se provozuje s izolovaným uzlem, s uzlem připojeným přes zášsecí tlumivku nebo spojení se zemí přes rezistor. Síť zásobuje elektrickou energii menší podniky a distribuční transformátory na okrajích obcí a měst [2].

➤ Vedení na napěťové hladině 400/230 V

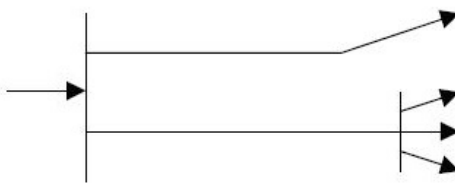
Distribuční síť na hladině 400/230 V se provozuje převážně jako přímo uzemněná a slouží k dodávce elektrické energie jednotlivým domácnostem (malooobdoběratelé). Rozlehlost sítě je dána zastavěnou plochou obce nebo města, kterou tato síť napájí [2].

#### 3.1.2 Podle uspořádání sítě

Distribuční síť zapojujeme dle požadavků na spolehlivost a kvalitu dodávky elektrické energie. Síť vvn a vn provozujeme nejčastěji jako paprskovité, případně průběžným rozvodem. U nn sítě v menších obcích a městech paprskovité a husté zástavbě jako síť mřížové.

➤ Paprskové síť

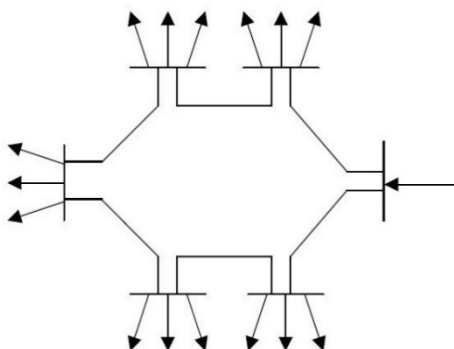
Jedná se o síť, které vycházejí z napájecí trafostanice nebo spínací stanice, zásobují jednotlivé odběry Obr. 4-1. Každý vývod je veden zvlášť a nelze je vzájemně spojovat. Nevýhoda této sítě je ve spolehlivosti, ale na druhou stranu jedná se o nejlevnější síť, co se týče nákladů na výstavbu. Použita je pro napájení venkovských obcí, malých měst na hladině 22 kV, v průmyslu na napětí 6 kV, ale také na hladině nn 400/230 V [5].



Obr. 3-1 Papřsková síť (Upraveno podle [1])

#### ➤ Okružní síť

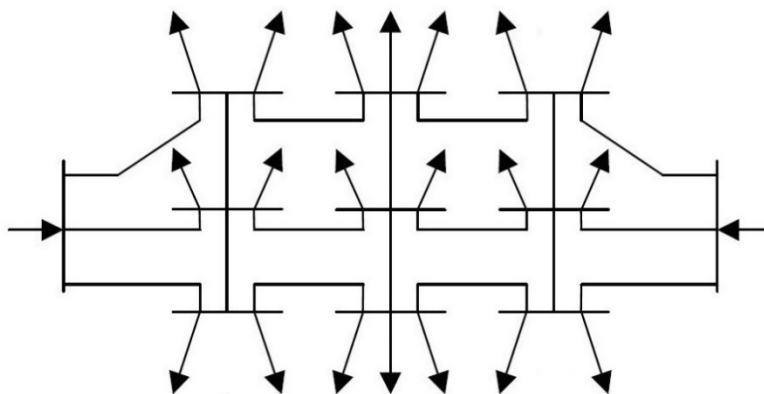
Využití okružních sítí najdeme v napájení velkých měst a větších obcí na nízkém napětí, ale také i vysokém napětí. Okružní síť je složena z vedení, které má oba konce přivedeny na stejné napájecí místo. Díky tomuto způsobu zapojení můžeme odběry napájet z obou stran, což nám zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie. Délka trvání poruchy je dána pouze časem vymezením místa poruchy.



Obr. 3-2 Okružní síť (Upraveno podle [1])

#### ➤ Mřížové síť

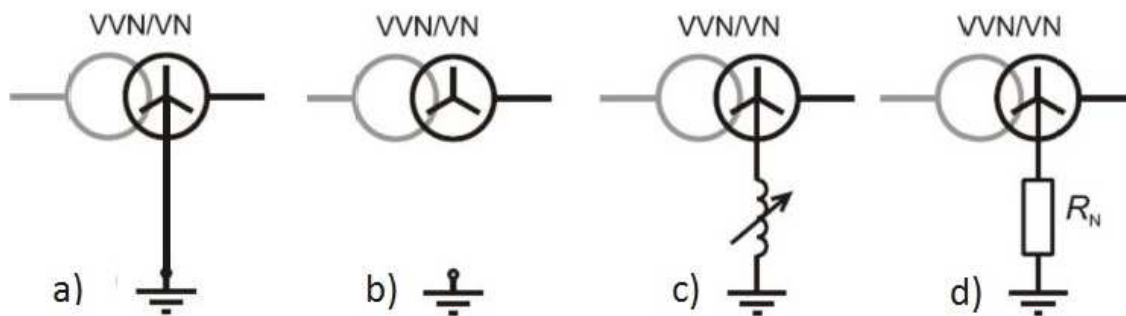
Užití této sítě najde uplatnění především ve velkých městech s hustou zástavbou. V této síti je velmi vysoká spolehlivost dodávky elektrické energie, zaprvé z důvodu napájení z více stran a zadruhé vzájemným propojením jednotlivých uzlů. Pro napěťové poměry je tato síť nejvýhodnější, kolísání napětí je malé a rovnoměrně rozloženo na celou síť. Rozšíření této sítě je velmi jednoduchá možnost, avšak její hlavní nevýhoda tkví ve velkých zkratových proudech [5].



Obr. 3-3 Mřížová síť (Upraveno podle [1])

### 3.1.3 Podle zapojení uzlu transformátoru

Jedním z důležitých technicko-ekonomických ukazatelů je způsob, jakým způsobem je transformátoru spojen ze zemí. Toto zapojení má vliv na chování sítě během vodivého spojení jedné fáze ze zemí, a to především na velikost poruchového proudu a velikosti napětí mezi fázovými vodiči a zemí. Posouzení velikosti poruchového proudu vede k rozhodnutí o způsobu dimenzování a chránění v soustavě. V bezporuchovém stavu neteče zemí zemní proud, napětí mezi fázemi je sdružení a mezi fází a uzlem je fázové. Zapojit uzel transformátoru můžeme následujícími způsoby Obr. 3-4.



Obr. 3-4 Způsoby uzemnění v DS (Upraveno podle [1])

#### ➤ Účinně uzemněné sítě

V DS jde o sítě na hladině  $v_{vN}$  a  $nn$ , kde je uzel transformátoru spojen přímo ze zemí Obr. 3-4 a). Napětí na vinutí uzlu transformátorů zůstává při poruše vůči zemi prakticky nulové a napětí na nepoškozených fázích vůči zemi nabývá fázové hodnoty. Izolace na fázových vodičích se proto dimenzuje na fázovou hodnotu, což je ekonomicky velmi výhodné, ale při poruše jedné fáze musí být v krátkém čase vedení odpojeno, protože zemní proud dosahuje nebezpečných hodnot. V tomto případě se jednofázová porucha nazývá jednofázový zkrat [3].

#### ➤ Neúčinně uzemněné sítě

Z důvodu snížení kapacitního proudu se do nulového bodu transformátoru připojí proti zemi zhášecí tlumivka Obr. 3-4 c). Fázové napětí mezi zemí a nulovým bodem transformátoru je nulové a tlumivka je pro síť zdrojem induktivního proudu, pokud je tento proud stejně velký jako kapacitní proud tekoucí zemí při zemním spojení, dojde k úplnému vykompenzování a místem poruchy neteče žádný proud. Zhášecí tlumivka musí být laditelná, protože kapacitní proud sítě se mění dle aktuální konfigurace sítě. Tento způsob uzemnění má i ekonomický dopad a to díky nižším nákladům na uzemnění, to se pouze dimenzuje na zbytkový proud. V ČR takto provozujeme venkovní vedení a kabelové sítě malého rozsahu [3].

Pokud spojíme síť se zemí přes rezistor Obr. 3-4 d), dosáhneme stejného výsledku jako u tlumivky. Tento způsob najde uplatnění u kabelových sítích velkého rozsahu, kde poruchové kapacitní proudy nabývají velkého rozsahu. Omezím tím přepětí, ale velkou nevýhodou je v případě zemního spojení nutnosti vypnout postižený vývod [3].

#### ➤ Izolované sítě

V izolované sítě není uzel transformátoru spojen ze zemí Obr. 3-4 b). Při poruše jedné fáze, vzroste napětí uzlu vinutí transformátoru vůči zemi na napětí fázové a napětí na zdravých fázích na hodnotu sdruženého. V tomto případě se taktéž jedná o zemní spojení. Velkou výhodou této sítě je provozuschopnost při této poruše, ale vedení musí být dimenzováno na sdružené napětí, což vede



k vyšší nákladům na výstavbu. Při vzniku poruchy dochází k značnému přepětí, které může způsobit dvojitě zemní spojení, což už je ale dvoufázový zkrat. Při této poruše musí být vedení odpojeno. Tento způsob uzemnění se nejčastěji využívá ve vlastní spotřebě elektráren, průmyslových a důlních provozů.

### 3.2 Elektrické stanice v DS

Elektrické stanice můžeme nazvat jako souhrn staveb a zařízení v uzlech elektrizační soustavy, které elektrickou energii transformují na jiné napětí, mění konfiguraci sítě nebo mění na střídaných proud na jiný kmitočet případně na proud stejnosměrný. Další účel může být kompenzace [3].

#### ➤ Transformovny

Transformovna slouží k propojení dvou a více sítí s rozdílným napětím pomocí výkonových transformátorů. Uskutečňuje se v ní tedy transformace elektrické energie na jiné napětí a její rozvod. Dispoziční a konstrukční uspořádání je stanoveno na základě toho, na jaké napěťové hladině se pohybujeme. Transformovna se skládá z elektrické, pomocné a stavební části. V elektrické části najdeme transformátory, rozvodné zařízení, kompenzační zařízení a společné zařízení. Pomocná část zabezpečuje provoz a údržbu a do stavební části patří pozemky, budovy, venkovní a vnitřní stavební konstrukce apod. Při řešení uspořádání transformovny se vyžaduje optimální rozmístění všech strojů a přístrojů vzhledem k co nejúspornějšímu využití obestavěného prostoru a k jednoduchému rozmístění [3].

#### ➤ Spínací stanice

Spínací stanice nám umožňuje spínat elektrické obvody stejného jmenovitého napětí a stejné proudové soustavy a tím nám umožňují potřebný rozvod elektrické energie. Ve spínací stanici jsou spínací přístroje, přípojnice a mohou zde být i výkonové transformátory pro vlastní spotřebu. Budují se jako samostatné stavby nebo jako součástí transformovny [3].

#### ➤ Měničny

V měničce se přeměňuje střídavý elektrický proud na proud jiného kmitočtu, případně na stejnosměrný proud a zajišťuje jeho rozvod. Dále stanice může konat opačnou funkci a to měnit proud stejnosměrný na proud střídavý. Do hlavní skupiny elektrických zařízení patří frekvenční měniče ke změně kmitočtu a usměrňovače k usměrnění střídavého proudu. Ostatní elektrické přístroje obstarávají bezproblémový chod celé stanice [3].

#### ➤ Kompenzační stanice

Kompenzační stanice slouží ke kompenzaci jalového výkonu. Kompenzace může být buď paralelní nebo sériová. Sériová se téměř nevyužívá, proto jsou dominantní paralelní kompenzační stanice. Tyto stanice většinou jsou v majetku odběratele elektrické energie, aby dodržoval požadovaný účinník 0,95, jinak v opačném případě mu hrozit penalizace od provozovatele DS [2], [3].

### 3.3 Možnosti vedení v distribuční soustavě

Elektrické vedení je základním prvkem distribuční i přenosových sítí, je to soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí určených pro přenos elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě. Tyto vedení můžeme rozdělit na venkovní a kabelové. To jaký typ vedení se použije, závisí na místních topografických či technických podmínkách, dále také na stanovených

požadavcích spolehlivosti a v poslední řadě na bezpečnosti provozu. V poslední době dochází k dynamickému růstu izolovaných vedení [1].

### 3.3.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení má přenášet elektrický výkon hospodárně, spolehlivě, bezpečně a s nejmenším dopadem na životní prostředí. Z největší části je venkovní vedení tvořeno nejčastěji z holých vodičů případně izolovaných vodičů, které jsou vedeny nad terénem. Izolované vodiče jsou použity tam, kde nelze dodržet minimální bezpečné vzdálenosti. Vodiče jsou přichyceny k podpěrným bodům venkovního vedení pomocí izolátorů a jsou použity především tam, kde je pro ně dostatek prostoru pro výstavbu. I přes vyšší náklady na provoz a údržbu jsou preferována častěji než kabelová z důvodu nižší pořizovacích nákladů na výstavbu [1].

#### ➤ Venkovní vedení vvn

Vedení 110 kV je označováno jako vedení velmi vysokého napětí a slouží pro přenos velkých výkonů z předávacích míst PS do míst s velkou koncentrací odběru. Délky mohou dosahovat až několika desítek kilometrů. U vvn vedení je kladen velký důraz na vysokou spolehlivost, s čímž souvisí vysoké investiční a pořizovací náklady. Vedení se většinou staví jako dvojitá s provozem jako okružní rozvod a jsou použity holá ocelohliníková lana AlFe [1].

#### ➤ Venkovní vedení vn

Vedení vn slouží pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, což mohou být obce, města a velkoodběratelé. Délky dosahují několik jednotek kilometrů oproti vvn vedení, avšak hustota vn sítí je daleko větší. Nejčastěji jsou provozovány jako paprskové sítě [1].

#### ➤ Venkovní vedení nn

Venkovní vedení, na nejnižší napěťové hladině, má omezené možnosti přenosu výkonu na určitou vzdálenost. Tato vzdálenost je nejvíce limitována úbytkem napětí na vedení [1].

### 3.3.2 Kabelové vedení

Kabelová vedení užíváme tam, kde nelze z prostorových, bezpečnostních případně jiných důvodů použít venkovní vedení. Náklady na výstavbu kabelového vedení jsou oproti venkovnímu několikanásobně vyšší. Jednotlivé kabelové úseky můžeme rozdělit od třech skupin na běžnou distribuční síť, přímé kabely a ostatní případy. Běžná distribuční síť slouží pro napájení distribučních a velkoodběratelských trafostanic. Přímé kabely pouze propojují transformovny a spínací stanice, nenapájí žádné odběrné místo. Ostatní případy pak slouží pro přivedení výkonu pro významné zákazníky nebo výroby.

Kabelové sítě VN se navrhují jako kruhové, kde trafostanice jsou připojovány vysmyčkováním průběžného kabelu. Každý takovýto kruh začíná na přípojnicí v rozvodně a končí jiné přípojnicí v téže nebo jiné transformovně případně spínací stanici. Kruh se provozuje jako otevřený, kde v jedné trafostanici je rozpojen a vedení se rozpadá na dva paprsky, které je možné propojit sepnutím spínače zpět do kruhu [6].

#### ➤ Kabelové vedení vvn

Tato vedení se používají pouze ojediněle vzhledem k vysokým investičním nákladům a technické realizaci. Můžeme je nalézt především v oblastech, kde je potřeba zásobit oblast velkým výkonem a není možné vystavit venkovní vedení. Takové vedení je poté realizováno většinou v kolektoru, zřídka se vyskytuje instalace kabelového vedení ve volném terénu [1].

➤ Kabelové vedení vn

Kabelová vedení vn jsou nejvíce zastoupena v kabelových rozvodech velkých měst. Jejich uložení je nejčastěji v městských kolektorech, případně v pískovém lože pod povrchem. Kabelové vedení začíná na vývodu z vn rozvodny anebo svodem z venkovního vedení a končí na svorkách distribučního transformátoru, případně jiné vn rozvodny.

➤ Kabelové vedení nn

Vedení slouží k rozvodu elektrické energie od transformátoru 22/0,4 kV až do přípojkové skříně odběratele. Kabelové vedení se nachází v obcích v zemi, ale může být použito i jako náhrada za venkovní vedení [1].

### 3.4 Používané VN kabely dle standardu E.ON

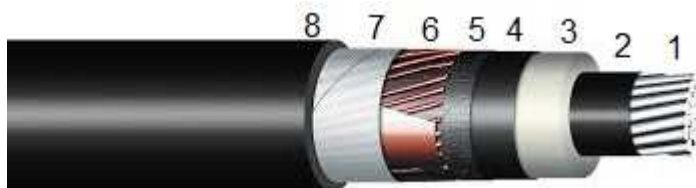
V sítích 22 kV se dle [6] volí průřezy kabelů podle následujících kritérií:

- Požadovaná zkratová odolnost se uvažuje pro transformátor 110/22 kV o výkonu 40 MVA a práci všech významných zdrojů v dané oblasti do sítě 22 kV a maximální hodnotě příspěvku ze sítě 110 kV. Trvalý paralelních chod transformátorů 110/22 kV se neuvažuje.
- Předpokládá se zatížení při náhradním napájení (výhledová výkonová bilance pro n-1)

Dle těchto kritérií se používá průřez  $1 \times 150/25 \text{ mm}^2$  se zatížitelností 319 A v zemi pro nejméně příznivý stav a  $1 \times 240/25 \text{ mm}^2$  se zatížitelností 417 A. Standardně se využívá průřezu  $150 \text{ mm}^2$ , který v běžných podmínkách vyhoví jak zkratové odolnosti, tak i přenosové schopnosti. Průřez  $240 \text{ mm}^2$  se používá ve zdůvodněných případech, kdy se výpočtem prokáže, že nižší průřez nevyhoví. Konkrétní typy stanovuje technická norma společnosti.

➤ Typ NA2XS(F)2Y

Jedná se o jednoplášťový kabel pro pevné uložení v prostředí základním a vlhkém dle ČSN 30300. Nejčastěji je použit na propojovací úsek mezi jednotlivými distribučními trafostanicemi, dále také pro kabelový svod z venkovního vedení. Nevýhoda tohoto kabelu je v tom, že se nesmí instalovat do kolektorů a kabelových prostor v budovách z důvodu požární bezpečnosti. Jednotlivé vrstvy kabelu jsou naznačeny na Obr. 3-5. Základem je laněné kruhové jádro z hliníkových vodičů (1), jádro je nanesena vnitřní polovodivá vrstva (2) a izolace ze stíněného polyethylenu (3). Izolace je poté chráněna vnější polovodivou vrstvou (4). Dále se na kabelu nachází polovodivá vodublokující páska (5), měděné stínění z drátků a vše je obmotání páskovou protispirálou (6). Vše je chráněno další vodublokující páskou (7) a mechanickou ochranu zajišťuje potah s polyethylenu černé barvy (8).



Obr. 3-5 Ukázka kabelu NA2XS(F)2Y

➤ Typ AXEKVCEY

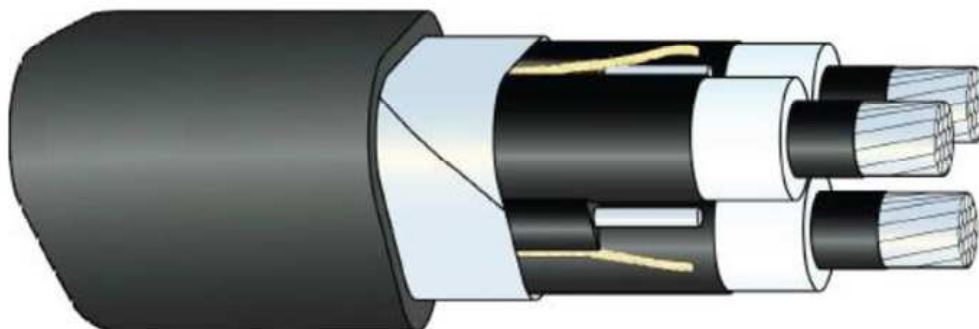
Oproti typu NA2XS(F)2Y se jedná o dvouplášťový kabel, který je doplněn o další vrstvu pláště z PVC černé barvy. Tato vrstva zaručuje ochranu proti šíření plamene po plášti a je tedy možné ho použít tam, kde typ NA2XS(F)2Y nevyhovuje. Sktruktura kabelu je znázorněna na Obr. 3-6.



Obr. 3-6 Ukázka kabelu AXEKVCEY

► Typ AXAL TT PRO

V posledních letech se ve specifických případech používá trojžilový kabel. Jeho použití je do míst s nedostatkem prostoru na uložení. Další výhodou jsou nižší pořizovací náklady, naopak nevýhodou je náročná oprava, manipulace při pokládce a absence stínění každé žíly. Na Obr. 3-7 můžeme vidět, že konstrukce je téměř totožná s předchozími typy. Navíc jsou pouze dvě kevlarová vlákna pro snadné odstranění pláště při manipulaci.



Obr. 3-7 Ukázka kabelu AXAL TT PRO

## 4 ZÁSADY ROZVOJE A VÝSTAVY SÍTÍ VN

Následující kapitola definuje zásady pro návrh a další rozvoj sítí 22 kV ve společnosti E.ON. Veškeré potřebné informace jsou čerpány z [6]. Příprava a zajišťování jednotlivých investičních akcí vychází z následujících bodů:

- územní plán,
- konkrétní požadavky zákazníka,
- aktuální stav sítě,
- vyhlášená kampaň,
- koncepce sítí 22 kV.

### 4.1 Obecné pravidla pro rozvoj sítí VN

VN sítě navrhujeme co nejjednodušší a nejpřehlednější s minimem redundantním propojením. Zásady jsou uplatňovány s cílem přehlednosti řízení provozu a lokalizaci poruch a v neposlední řadě také jako úspory investičních nákladů.

Obecný trend ve výstavbě a obnově VN sítí ve městech a pozemních přilehlých k zastaveným oblastem je příklon ke kabelovým sítím. Tento způsob je podporován s ohledem na:

- zvýšení spolehlivosti provozu,
- respektování ustanovení stavebního zákona a jeho prováděcích vyhlášek,
- snížení provozních nákladů.

Tento trend ale nelze v současné době chápat jako upuštění od výstavby venkovního vedení ani jako signál k plošné kabelizaci stávající venkovní sítě.

### 4.2 Dimenzování sítí VN

Navržené sítě se výpočtově kontrolují na stávající parametry a výhledově předpokládané parametry.

- napěťové poměry v základním řazení;
- proudové zatížení v základním řazení;
- ztráty v základním řazení;
- zkratová odolnost užitých prvků v základním řazení;
- proudová zatížitelnost při náhradním napájení (kritérium n-1);
- minimální napětí na konci vedení při náhradním napájení;
- způsob připojení uzlu transformátoru 110/VN.

Kritériem n-1 můžeme rozumět výpadek 1 link. Tento výpadek může být způsoben rozepnutím jedné kmenové linky, případně propojky v nejméně přízním místě při maximálním zimním zatížení. Kumulace dalších poruch se dále neuvažuje. Pokud je jedná o více násobné vedení, tak uvažujeme výpadek pouze jednoho vedení. Uvažované hodnoty pro výpočty shrnuje Tab. 4.1.

Tab. 4-1 Doporučené a závazné hodnoty (Upraveno podle [6])

Napětí v napájecí transformovně - základní stav	23,1 kV	Závazná hodnota
Napětí v napájecí transformovně - náhradní stav	23,5 kV	Závazná hodnota
Napětí na konci vedení - základní stav	21 kV	Doporučená hodnota
Napětí na konci vedení - náhradní stav	20,5 kV	Závazná hodnota
Maximální proudové zatížení pro venkovní síť, max. 75 % jmenovitého proudu vodičů - základní stav	160 A	Doporučená hodnota
Maximální proudové zatížení pro venkovní síť, max. 100 % jmenovitého proudu vodičů - náhradní stav	240 A	Závazná hodnota
Maximální proudové zatížení pro kabelové síť, max. 75 % jmenovitého proudu vodičů - základní stav	300 A	Doporučená hodnota
Maximální proudové zatížení pro kabelové síť, max. 100 % jmenovitého proudu vodičů - náhradní stav	400 A	Závazná hodnota
Maximální hodnota napětí v síti 22 kV	24 kV	Závazná hodnota

### 4.3 Výstavba nových sítí VN

Výstavbu nových můžeme dělit na tyto dva typy:

➤ Výstavba nových sítí v zastaveném území

S ohledem na platné předpisy pro územní plánování a stavební řád je doporučeno nové síť v zastavených územích navrhovat jako kabelové. Zastavené území je i to, kde se výstavba již připravuje. Pokud je v takovém území stávající venkovní vedení, je doporučeno ho využít a ponechat. Pokud stávající venkovní vedení v zastavené oblasti nevykazuje potřebu rozsáhlé rekonstrukce, není potřeba ho kabelizovat. Pro případ připojené nové trafostanice na stávající venkovní vedení v zastaveném území volíme přednostně kioskové nebo vestavěné trafostanice s jedním kabelovým přívodem, který je sveden z venkovního vedení. V trafostanici je poté ponechána rezerva pro druhý přívodní kabel.

➤ Výstavba nových sítí ve volné krajině

Ve volném krajině, kde není plánována výstavba, je základem pro novou síť venkovní vedení. Při výstavbě je nutné dodržet dostatečný ochranný prostor pro bezpečnost osob a údržbové práce. Pokud je výstavba provedena v lesním úseku, přednostně je potřeba vždy zvážit použití kabelu.

### 4.4 Rekonstrukce stávajících sítí VN

Obnova stávajících sítí je prováděna na základě studie dané napájecí oblasti. V této studii se vyhodnocuje stávající stav, zda není nadbytečný, neboť v minulosti došlo nebo v blízké budoucnosti je v plánu výstavba další napájecí transformovny, případně k významným změnám na straně velkoodběratele ze sítě VN. Pokud tomu tak je, je nutné ve studii k tomu příslušným způsobem reagovat.

Obdobně při návrhu nového kmenového vedení nebo kabelového propoje je třeba vždy zvážit, zda v dané lokalitě není zamýšlena do budoucna výstavba nové transformovny, po jejím zprovoznění by návrh nové vedení pozbylo smysl. Dále je nutné zvážit technicky a ekonomicky, kdy výstavbou dalších vedení odsunout realizaci nové transformovny anebo kdy urychlit realizaci nové.

#### 4.4.1 Obnova venkovního vedení

Ve volné krajině bez lesních porostů je stávající vedení opět nahrazeno venkovním vedením, a to přednostně ve stávající trase. V případě souběhu dvou vedení podobného stáří, bude obnova řešena dvojnásobným vedením.

V lesních úsecích a úsecích zarostlými náletovými dřevinami se vždy zvažuje poruchovost v minulém období. V případě úplné obnovy (výměna zahrnuje i podpěrné body) jsou úseky nahrazeny kabelovým vedením v blízkosti stávající trasy, neboť v tomto úseku je předpoklad zvýšené poruchovosti a tím i zvýšení provozních nákladů. Každý případ rekonstrukce je potřeba posoudit samostatně a zařadit daný úsek do odpovídající kampaně.

V zastavěných oblastech je důležité zvážit, do jaké míry má být rozsáhlá obnova vedení. V případě, že je zbytková životnost podpěrných bodů min. 20 let je možné vedení ponechat a provést pouze výměnu fázových vodičů a nebo přeizolaci. Pokud vedení vykazuje nutnost při rekonstrukci vyměnit i podpěrné body, tak provedeme kabelizaci vedení. Při posilování přenosové schopnosti a zbytkovém stáří podpěrných bodů pod 20 let je obnova řešena taktéž kabelizací. V případě že zbytková životnost podpěrných bodů je kratší než 20 let, je vedení udržováno na co nejnižších nákladech a je využito zbytkové životnosti podpěrných bodů, poté následuje kabelizace.

#### 4.4.2 Obnova kabelového vedení

Z pohledu volby technického řešení je výměna kabelového vedení poměrně jednoduchá záležitost. Životnost současných kabelů s olejovou izolací je dle koncepce ECD uvažovaná 40 let. Překročení této životnosti však v žádném případě není signálem k okamžité výměně kabelu. Pro výměnu kabelu po vyčerpání životnosti se vychází z poruchovosti daného úseku s přihlédnutím k obecným zkušenostem s daným typem kabelu a zejména z výsledku měření pomocí kabelového měřicího vozu.

Důvody k rozhodnutí o provedení rekonstrukce (pořadí určuje prioritu)

1. Tři a více poruch bez cizího zavinění za poslední 2 roky na daném zařízení, případě prvku.
2. Diagnostika, vizuální kontrola stavu kabelu při opravě poruchy, možnost doplnění oleje přes k tomu určené místo.
3. Častá poruchovost vinou cizím zaviněným.
4. Staří kabelu, podle zkušenosti s daným typem.
5. Urychlená rekonstrukce při souběhu více výkopových prací, zde je nutné přistoupit k výměně, pokud byla plánována v následujících 5 letech.

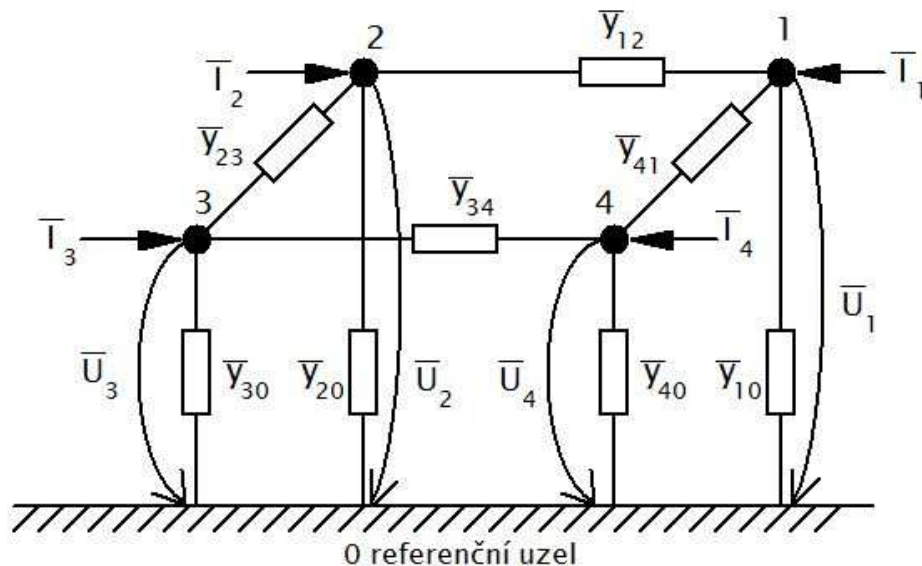
## 5 METODY VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU SÍTÍ VN

Tato kapitola vychází z [4]. Základem pro výpočet přechodových dějí a výkonových toků je ustálený chod. Tento chod sice v reálné soustavě nikdy nenastane, a to z důvodu kolísání dodávek a odběrů. Tyto změny jsou nicméně pomalé a není nutné je uvažovat. Při ustáleném chodu sítě známe činné a jalové výkony, ztráty a napěťové poměry na prvcích a uzlech ES. Výpočet se provádí pro krajní stavy tj. pro minimální a maximální zatížení sítě. Při výpočtu se zjišťuje přetížitelnost prvků. Při požadované malé přesnosti výpočtu, lze síť linearizovat, kdy jsou výkony převedeny na proudy. Takový výpočet může poté sloužit pro plánovaný rozvoj ES nebo výpočet spolehlivosti. Při požadované vyšší přesnosti se počítá se zadaným činným a jalovým výkonem. To má za následek nemožnost popsat síť soustavou lineárních rovnic a matematická formulace poté vede na soustavu nelineárních rovnic. Pro takovou soustavu rovnic je nutné použít některou z iteračních metod, které jsou výpočtově náročnější a dosti často špatně konvergují nebo nekonvergují vůbec.

### 5.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Pro výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha zavádíme následující předpoklady:

- Jsou zadány dodávané a odebírané proudy do uzlů sítě
- Prvky sítě jsou zadány svými podélnými impedancemi a příčnými admitancemi
- Vedení modelujeme jako  $\Pi$  články a transformátory jako  $\Gamma$  nebo  $\Pi$  články
- Příčné admitance spojujeme s příslušným uzlem a uzlem referenčním „zem“ o nulovém potenciálu
- Všechny parametry jsou přepočítány na jedno společné napětí, tím pádem můžeme všechny prvky propojit podle Obr. 6-1



Obr. 5-1 Náhradní schéma sítě (Upraveno podle [4])

Z Obr. 6-1 můžeme matematicky popsat a s použitím metody uzlových napětí sestavit následující maticovou rovnici (6.1):



$$\begin{array}{l} 1. \text{ uzel} \\ 2. \text{ uzel} \\ 3. \text{ uzel} \\ 4. \text{ uzel} \end{array} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{41} \\ \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{42} \\ \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{43} \\ \bar{Y}_{14} & \bar{Y}_{24} & \bar{Y}_{34} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

kde  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$  jsou zadané uzlové proudy, kdy kladně značený proud je dodávka a záporně značený je odběr daného uzlu

$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$  jsou neznámá hledaná uzlová napětí

Rovnice 6.1 můžeme také zapsat ve zkráceném tvaru (6.2) nebo jako sumu (5.3)

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}] \quad (5.2)$$

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5.3)$$

Prvky z admitanční uzlové matice  $[\bar{Y}]$  jsou složeny podle pravidel druhého Kirchoffova zákona. Diagonální prvky jsou tvořeny součtem admitancí, které náležejí tomuto uzlu, mimodiagonální prvky matice jsou pak dány součtem všech admitancí spojující požadované uzly. Pro přehlednost jsou prvky matice značené velkými písmeny a admitance ve schématu malými písmeny. Následující příklad ukazuje výpočet jednoho diagonálního a mimodiagonálního prvku.

$$\bar{Y}_{11} = \bar{y}_{12} + \bar{y}_{41} + \bar{y}_{10}$$

$$\bar{Y}_{21} = \bar{Y}_{12} = -\bar{y}_{12}$$

Při neuvažování příčné admitance je admitanční matice singulární a rovnice (5.1) je závislá, tuto závislost odstraníme eliminací bilančního uzlu. Taková eliminace uzlu spočívá v tom, že jeden z uzlů nám hradí neznáme proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnává tak bilanci mezi dodávkou a odběrem. Tento uzel má známé napětí, ale neznámý uzlový proud. Pro náš případ Obr. 5-1 volíme jako bilanční uzel 1 a (5.1) můžeme přepsat do tvaru (5.4). Následující rovnici poté odpovídá dále (5.5).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \cdot \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{42} \\ \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{43} \\ \bar{Y}_{24} & \bar{Y}_{34} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \cdot \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (5.5)$$

## 5.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

V praxi jsou dodávky a odběry z uzlů zadávány pomocí činného a jalového výkonu, kde pak zdánlivý výkon v  $i$ -tém uzlu je (5.6).

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (5.6)$$

Znaménka jsou v rovnici (5.6) se poté řídí, následující konvekci, která je dána Tab. 5-1.

Tab. 5-1 Znaménková konvekce výkonu (Upraveno podle [4])

Posun proudu	Uzel	
	Zdroj P > 0	Zdroj P < 0
Induktivní $\varphi > 0$	Q > 0	Q < 0
Kapacitní $\varphi < 0$	Q < 0	Q > 0

Z rovnice (5.6) vyjádříme proud a poté dosadíme do (5.5), dostaneme rovnici, která obsahuje eliminaci bilančního uzlu. V tomto případě bilanční uzel hradí také rozdíl dodávky a odběru, současně také ztráty činného a jalového výkonu v síti.

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (5.7)$$

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (5.8)$$

Z rovnic (5.7) a (5.8) vycházejí následující dvě popsané metody.

### 5.2.1 Gausa-Seidlovou metoda

Obecný popis této metody vychází z následujícího řešení soustavy nelineárních rovnic ve tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (5.9)$$

Vhodně zvolenou úpravou lze tyto rovnice přepsat do následujícího tvaru:

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_2 &= y_2 + \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ x_n &= y_n + \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Iterační postup k výpočtu kořenů bude pak:

$$x_1^{(k+1)} = y_1 + \phi_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned}
 x_2^{(k+1)} &= y_2 + \phi_2(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 x_n^{(k+1)} &= y_n + \phi_n(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_n^{(k)})
 \end{aligned}$$

Horní index  $(k+1)$  v rovnici (5.11) označuje pořadí iterace, při  $k=0$  vycházíme z nulté aproximace, kde kořeny odhadujeme.

Výpočet je poté ukončen, když je splněna podmínka v rovnici (5.12), kde  $\varepsilon$  je požadovaný přesnost výpočtu.

$$|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}| \leq \varepsilon \text{ pro všechna } i = 1, 2, \dots, n \quad (5.12)$$

Následující obecný postup použije na řešení soustavy (5.8), kde si rovnice upravíme do následujícího tvaru (5.13).

$$\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j + \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad (5.13)$$

Pro výpočet požadovaného napětí  $\bar{U}_i$  si rovnice upravíme do tvaru (5.14) a převedeme na iterační tvar (5.15), počet iterací je poté závislý na nastavené podmínce (5.16).

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \cdot \left( \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \right) \quad (5.14)$$

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

$$\bar{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \cdot \left( \frac{P_i - jQ_i}{(\bar{U}_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j^{(k)} \right) \quad (5.15)$$

$$|\bar{U}_i^{(k+1)} - \bar{U}_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (5.16)$$

Pokud je tedy podmínka splněna pro všechny  $i$ , kde  $\varepsilon$  je požadovaná přesnost, je výpočet ukončen.

Gauss-Seidlova metoda vychází z jednoduchého algoritmu a pro výpočet je potřeba kratší doba pro jeden iterační krok než u jiných iteračních metod. Nevýhoda této metody spočívá v poměrně malé konvergenci, a proto se nejčastěji využívá u málo zauzlených sítí, kde je malý počet uzlů.

### 5.2.2 Newtonovou iterační metoda

Řešení Newtonovy iterační metody vychází taktéž z výše zmíněné rovnice (5.9), kterou upravuje na následující tvar:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_1 \quad (5.17)$$

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

V nulté iteraci provádíme odhad kořenu  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ , tyto odhady poté zpřesňujeme o hodnoty  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ . Zpřesněná hodnota kořenů budou poté  $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}$ .

Rovnice z (5.17) je možné popsat Taylorovou řadou funkce více proměnných v bodě  $x_1^{(0)}$ . Pro první rovnici můžeme tedy psát:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \cdot \Delta x_n + \phi_1 = y_1 \quad (5.18)$$

Pokud jsou odhady kořenů přesné, pak všechny difference  $\Delta x_i$  jsou malé a členy s vyšší mocninou  $\Delta x_i$  můžeme zanedbat, jelikož  $\phi_1 \rightarrow 0$ .

Pokud první rovnici z (5.17) položíme rovnu  $y_1^{(0)}$  můžeme (5.18) upravit do následujícího tvaru.

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \cdot \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (5.19)$$

Stejně lze upravit všechny další rovnice a dostáváme maticový zápis (5.20) a jeho můžeme zkrátit na (5.21).

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$[\Delta y] = [J] \cdot [\Delta x] \quad (5.21)$$

Matrice parciálních derivací  $J$  se nazývá Jacobián. Soustava rovnic 5.30 slouží k vypočítání diferencí  $\Delta x_i$ , ze kterým poté vypočítám nové kořeny pro další krok iterace dle (5.22).

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (5.22)$$

Následující obecný postup aplikujeme na rovnici popisující ustálený chod (5.8) a převede ji do následujícího tvaru:

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (5.23)$$

Pravou stranu rovnice poté upravíme do následujících dvou tvarů:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \cdot \bar{U}_i \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})$$

pro  $i = 2, 3, \dots, n$  (5.24)

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \cdot \bar{U}_i \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})$$

Pro výpočet diferencí  $\Delta U_i$  a  $\Delta \delta_i$  podle (5.20) a užitím rovnic (5.24) dostáváme soustavu matic (5.25), její zkrácený zápis je uveden jako (5.26).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Pomocí rovnic (5.27 – 5.34) vypočítáme jednotlivé parciální derivace Jacobiánu:

a) Prvky  $\frac{\partial P}{\partial U}$

➤ Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.27)$$

➤ Mimodiagonální prvky  $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.28)$$

b) Prvky  $\frac{\partial P}{\partial \delta}$

- Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.29)$$

- Mimodiagonální prvky  $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.30)$$

c) Prvky  $\frac{\partial Q}{\partial U}$

- Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.31)$$

- Mimodiagonální prvky  $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.32)$$

d) Prvky  $\frac{\partial Q}{\partial \delta}$

- Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.33)$$

- Mimodiagonální prvky  $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (5.34)$$

Opakování postupu výpočtu:

1. Odhad napětí v nultém kroku iterace, většinou se volí stejné jako v bilančním uzlu.
2. Do rovnic (5.24) dosadíme odhadnutá napětí a vypočítám difference výkonů.
3. Z odhadnutých napětí vypočítáme jaké jednotlivé prvky Jacobiánu.
4. Vyřešíme soustavu matic (5.26) a dostaneme difference napětí a jejich úhly v nulté iteraci.
5. Difference napětí a jeho úhlu dosadíme do následujících dvou rovnic:

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

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

6. Nově zpřesněná napětí dosadíme opět do rovnice (5.24) a od kroku 3 provedeme další iterační krok, následně je provedena kontrola na přesnost a pokud je podmínka splněna výpočet je u konce.

$$\varepsilon \geq \left| P_i^{(k+1)} - P_i^{(k)} \right| \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n$$

$$\varepsilon \geq \left| Q_i^{(k+1)} - Q_i^{(k)} \right|$$

Newtonova iterační metoda také můžeme nazývat Newton-Raphonova, velmi rychle konverguje k řešení. Velikost sítě téměř neovlivňuje počet iterací k dosažení požadované přesnosti  $\varepsilon$ . V minulosti bylo stěžejní nevýhodou kladení důrazu na paměť počítačů, která neměla tak vysoký výkon jako v dnešní době, díky tomuto faktu tato dřívější nevýhoda plně odpadá.

## 6 SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ

Pro usnadnění řešení ustálených sítě můžeme použít celou řadu výpočetních programů. Následující kapitola se věnuje programům pro simulaci a analýzu ustáleného chodu sítě.

Pro výpočet přechodových dějů v ES se používá nejčastěji program MODES, který využívá pro výpočet ustáleného chodu sítě Newton-Raphsonov iteraci metodu. Dále také počítá krátkodobé dynamické stavy generátory při různých typech zkratů, včetně vyhodnocení rizika výpadku generátoru ze synchronismu. Simuluje střednědobou dynamiku spojenou s působením primární regulace a regulátoru otáček při odlehčení sítě činným výkonem a případným přechodem ES do ostrovního režimu. Vypočítává také dlouhodobou dynamiku spojenou ze sekundární regulací výkonu a frekvence po výpadku zdroje činného výkonu, dále také automatikou změny odbočky transformátoru a omezovače proudového regulátoru buzení po výpadku dodávky jalového výkonu změnou zatížení, výpadku vedení či bloku elektrárny. Posuzuje statickou stabilitu jako odezvu soustavy na nepatrné změny stavových veličin. Při samonajíždění a spouštění asynchronních motorů prověřuje dynamickou stabilitu [7].

Mezi další programy se řadí program LUG. Program původně sloužil pro operační systém MS-DOS, v současné době je ale upraven na operační systém Windows. V programu můžeme řešit propojení rozlehlých sítí na vše hladinách kromě nn. Výhoda programu je jeho grafická interpretace výsledků přímo do schématu sítě. Program slouží pro řešení analýzy napěťových a zkratových poměrů v síti, výpočet ustáleného chodu střídané i stejnosměrné elektrické sítě, kontrola na kritérium N-1, kontrola dodržení na zadané meze napětí, zatížitelnost vedení a transformátorů, zobrazení toků výkonu jednotlivými prvky sítě a grafického zobrazení analyzované sítě [8].

Pro posouzení možnosti připojení zařízení do sítě vn a nn se používá program E-vlivy. Program posuzuje změny elektrických veličin pře a po připojení a to zejména parametr kvality. Program dle výpočtu je schopen vypočítat hodnoty, které jsou potřebné pro studii připojitelnosti nových zdrojů do sítě vn a nn. Výpočetní metody programu vycházejí z norem ČSN A PNE. K výpočtu řešení program využívá Gaussovu eliminační metodu, kde k výpočtu je použita metoda uzlových napětí a využit princip superpozice. Ze vstupních prvků program sestaví jednodílný matematický model, který poté popíše soustavou lineárních rovnic s komplexními koeficienty [9].

### 6.1 PAS DAISY OFF-LINE V4 BIZON

Program Bizon patří do produktové řady PAS DAISY Off-line a slouží pro výpočet různých režimů elektroenergetických sítí. Jeho využití je pro plánovaných rozvoj, dlouhodobou přípravu provozu a projektování rozvodných sítí na všech napěťových hladinách. Program vypočítává proud, napětí v uzlech, úbytky napětí, ztráty, zkraty, dále taky obsahuje výpočet pro nastavení ochran v sítích vvn a vn a jištění pro vn a nn. Dále obsahuje podporu pro nastavení ochran, jištění pojistkami a jističi. Program je uživatelský velmi jednoduchý, po zakreslení části sítě je ihned možné provést výpočet.



Hlavní přednosti programu jsou:

- Rychlé vyhodnocení a zobrazení analyzované sítě;
- Grafické odlišení venkovních a kabelových sítí, jejich typů a funkce;
- Snadné vytvoření a modifikace řešené sítě, kdy při dokreslení se vytváří i databáze a je možné ihned provést výpočet;
- Kontrola selektivity jištění a automatický návrh jištění v síti nn;
- Rozpočet odběrů na kmenové lince a možnost přiřazení odběrného místa do uzlu;
- Analýza ustáleného chodu s možností kontroly přetížení linek;
- Zobrazení výsledků ve schématu sítě, dále možnosti tabulkového exportu;
- Snadné napojení na reálné data ze SCADA a PAS DAISY On-line.

Návrh úpravy napájené VN sítě v Modřicích a okolí bude prováděn ve výše uvedeném programu. Program má dva režimy činnosti. Prvním režim je editační a slouží pro úpravy a změny v řešené síti. Druhý režim je výpočtový, zde můžeme využít celou řadu možností, jakým způsobem prezentovat dosažené výsledky.

### 6.1.1 Výpočet ustáleného chodu sítě – LFOFF

Tento modul počítá ustálené chody v elektrických sítích. Dává přehled o současném stavu sítě a umožňuje porovnávat jednotlivé stavy s ohledem např. na napěťový profil nebo minimální ztráty v síti. Program používá modifikovanou metodu Newton-Raphson, to zaručuje rychlou a spolehlivou konvergenci výpočtu. Podle zadané přesnosti a stavu sítě výpočet končí za 3-6 iterací [10].

### 6.1.2 Výpočet zkratových poměrů sítě – ZKOFF

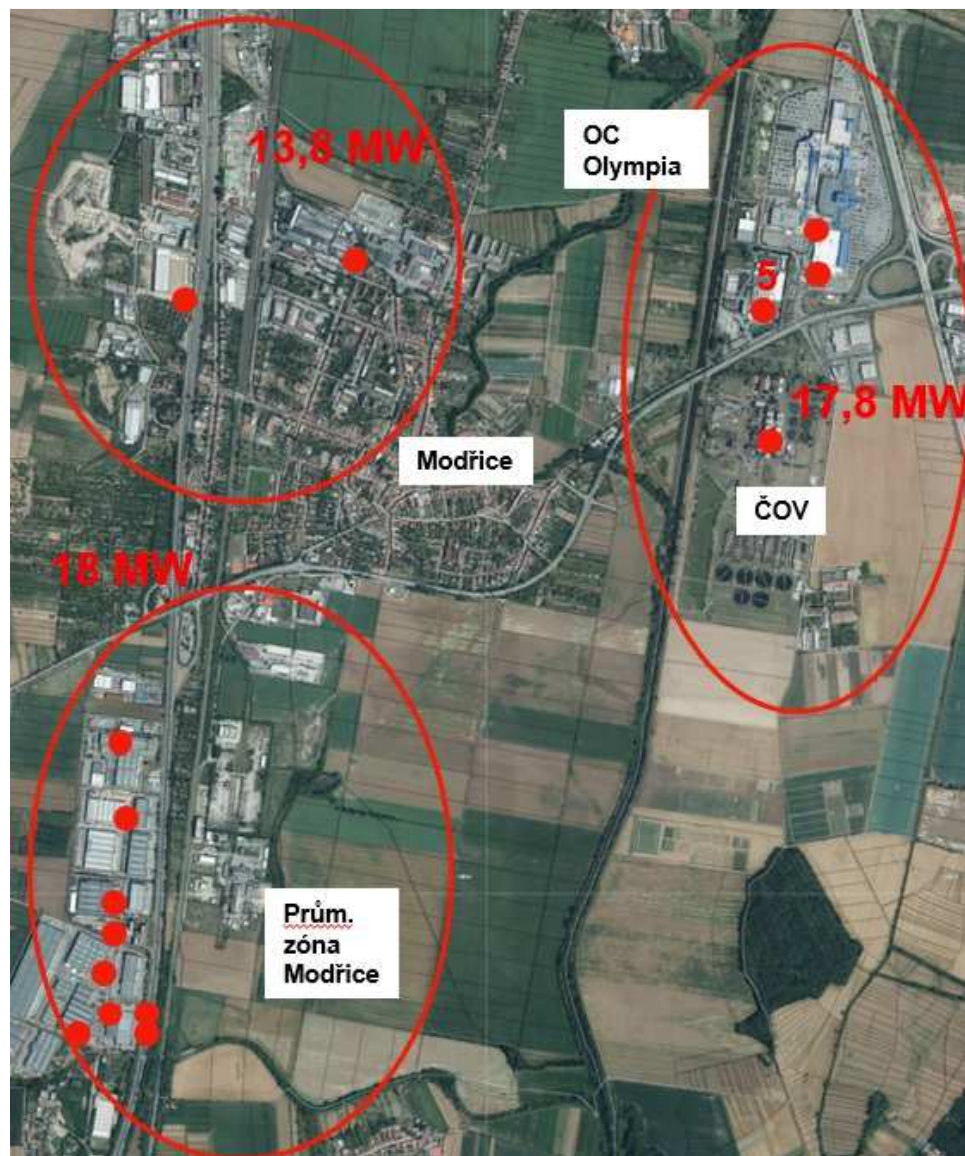
Modul je určen pro určení zkratových poměrů v síti. Dává přehled na aktuální stav sítě a porovnává jednotlivé provozní stavy s ohledem na nastavení ochran například. Program počítá s metodou souměrných složek. Můžeme provést jakýkoliv druh zkratu (třífázový, jednofázový, dvoufázová a dvoufázový zemní).

### 6.1.3 Další moduly

- CNOFF - modul pro zabezpečení chodu sítě,
- IKP - modul pro dopočet kapacitních proudů,
- PJOFF - modul pro výpočet nastavená pojistek.

## 7 CHARAKTERISTIKA DISTRIBUČNÍ SÍTĚ MĚSTA MODŘICE A OKOLÍ

Cílem kapitoly je popsat napěťové a výkonové poměry v zadané oblasti. Problematickou oblastí je tedy město Modřice a okolí. Tato oblast je napájena v základním stavu ze třech rozvodů. Jedná se o rozvodnu Sokolnice (R\_SO), rozvodnu Moravany u Brna (R\_MOB) a Hrušovany u Brna (R\_HB). Z těchto rozvodů vedou do zadané oblasti čtyři kmenové linky. Jde o linky VN83 z R\_HB, VN1275 z R\_MOB a VN164 a VN166 z R\_SO. Dále je tu ještě linka VN161, která je napájena z kmenové linky VN162. Na Obr. 7-1 můžeme vidět, kde se nachází významní odběratelé. Výchozí stav sítě pochází z roku 2016. Zatížení v jednotlivých vývodech v rozvodnách pochází ze zimního období v roce 2016, kdy bylo největší zatížení. Tyto hodnoty proudů byly nastaveny jako výchozí. Dále se bylo nastaveno napětí na přípojnicích v napájecích rozvodnách na 23 kV. Poté byl proveden výpočet ustáleného chodu s následujícími výsledky. Celkové řešené jednopólové schéma je v příloze A.



Obr. 7-1 Situační mapa s významnými odběrateli

## 7.1 Významné odběry v zadané oblasti

Přehled významných odběratelů znázorňuje Tab. 7-1. Je patrné, že nejvíce je zatížen konec linky VN83, kde se nachází více než 5 MW cílem úpravy tedy bude tento výkon přenést na jinou linku a zbytečně nepřetěžovat vývod VN83 z rozvodny Hrušovany. Dále za zmínku stojí odběratel ČOV Modřice, zde je potřeba držet potřebných výkon na obou linkách VN162 a VN166, jelikož se nachází ve druhém stupni zabezpečení dodávky.

Tab. 7-1 Přehled významných odběrů

Popis	Kmenová linka	$S_{int}$ (kVA)	$P_o$ (kW)	$Q_o$ (kVAr)	$S_o$ (kVA)
3094 Modřice Kovolit TS1	VN164	5 000	3404,00	691,00	3473,42
9471 Modřice Mergon + PMS	VN83	2 500	1518,82	308,41	1549,81
9463 Modřice Xaloy	VN83	1 100	630,19	127,96	643,05
9459 Modřice IMI Norgen	VN83	1 040	595,81	120,98	607,97
9470 Modřice Danhen	VN83	2 000	1145,80	232,66	1169,18
3097 ČOV Modřice	VN162, VN166	4 000	1518,82	308,41	1549,81
9469 Modřice Andrew	VN161	1 600	609,60	123,78	622,04
9431 Želešice Kamenolom	VN83	1 260	480,00	97,48	489,79
3073 Modřice CTP	VN166	3 950	2859,83	304,55	2876,00
704126 Vodňanské drůbežárny	VN164	2 500	2102,12	345,63	2130,35

( $S_i$  – instalovaný výkon,  $P_o$  – odebíraný činný výkon,  $Q_o$  – odebíraný jalový výkon,  $S_o$  – odebíraný zdánlivý výkon)

## 7.2 Zatížení transformátorů

Zatížení jednotlivých transformátorů v rozvodnách 110/22 kV jsou uvedeny v Tab. 7-2. Ve všech třech rozvodnách se nachází dostatečný transformační výkon, kdy v případě výpadku jednoho transformátoru je možné zajistit dostatečný výkon pro všechny vývody.

Tab. 7-2 Zatížení transformátorů v aktuálním stavu

Název rozvodny	Transformátor	Přípojnice	$S_n$ (MVA)	$P_z$ (MW)	$Q_z$ (MVAr)	$S_z$ (MVA)	$S_{z\%}$ (%)
Sokolnice	T101	SO_WB	40	22,99	3,92	23,32	58,30
	T102	SO_WC	25	4,59	-0,55	4,63	18,50
	T103	SO_WB	40	0	0	0	0
Moravany u Brna	T101	MOB_WA	40	1,70	0,07	1,70	4,22
	T102	MOB_WB	40	20,65	3,40	20,93	52,35
Hrušovany u Brna	T101	HB_WA	40	0	0	0	0
	T102	HB_WA	40	13,85	3,65	14,32	35,86

( $S_n$  – jmenovitý výkon transformátoru,  $P_z$  – dodávaný činný výkon,  $Q_z$  – dodávaný jalový výkon,  $S_z$  – dodávaný zdánlivý výkon,  $S_{z\%}$  – poměrné zatížení transformátoru k jmenovitému výkonu)

Příklad výpočtu pro R\_SO transformátor T101 pracující do přípojnice SO\_WB:

$$S_z = \sqrt{P_z^2 + Q_z^2} = \sqrt{22,99^2 + 3,92^2} = 23,32 \text{ MVA} \quad (7.1)$$

$$S_{z\%} = \frac{S_z}{S_n} \cdot 100 = \frac{23,32}{40} \cdot 100 = 58,32 \% \quad (7.2)$$

### 7.3 Zatížení kmenových linek

Ze zjištěných proudů ve vývodech v rozvodnách Tab 7-3 lze konstatovat, že pouze tři vývody dodržují firemní koncepci. Další dva vývody jsou na hranici možnosti doporučeného proudu a dva tuto hranici výrazně převyšují. Nicméně sekundární podmínka provozu do 75 % svého zatížení není překročena viz. Tab. 7-4, kde jsou vypsány nejvíce zatížené úseky. Na Obr. 7-2 interpretováno grafické znázornění zatížení jednotlivých úseků.

Tab. 7-3 Zatížení vývodů z rozvodny

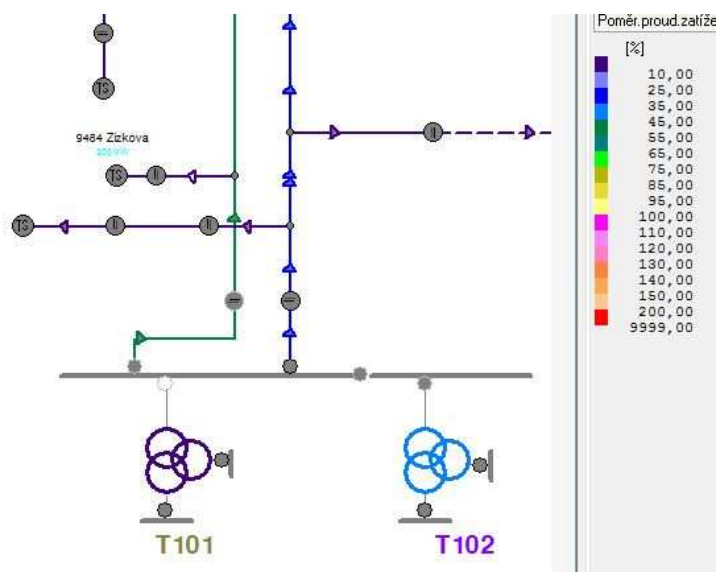
Název vedení	Typ vedení	$I_{dopučený}$ (A)	$I_z$ (A)
VN83	Venkovní	160	208,71
VN161	Venkovní	160	105,39
VN164	Venkovní	160	166,79
VN166	Venkovní	160	169,14
VN1232	Kabelové	300	21,21
VN1275	Kabelové	300	192,8

( $I_{dopučený}$  – doporučené zatížení dle koncepce provozu sítě 22 kV,  $I_z$  – odebíraný proud)

Tab. 7-4 Zatížení vybraných úseků linek v aktuálním stavu

Název vedení	Úsek vedení	Délka úseku (m)	Typ vedení	Použitý vodič	$I_{max}$ (A)	$I_z$ (A)	$I_z\%$ (%)
VN83	1_VN83_04	6073	Venkovní	V_SAX_izol_120	430	208,71	50
VN164	VEDK52941	5715	Venkovní	V_AlFe_95	309	166,79	54
VN166	VEDK 86807	420	Venkovní	V_AlFe_95	309	169,79	55
VN83	1_VN83_15_001	72	Venkovní	V_SAX_120	430	201,92	49
VN83	1_VN83_25	2366	Venkovní	V_AlFe_110/22	409	201,92	49
VN83	USV_005294	180	Venkovní	V_SAX_W_120	430	188,92	44
VN166	VEDK87145	3156	Venkovní	V_AlFe_110/22	409	169,23	44

( $I_{max}$  – maximální zátěžný proud,  $I_z$  – odebíraný proud,  $I_z\%$  – poměrný proud k proudu  $I_{max}$ )



Obr. 7-2 Ukázka zatížení linek v programu Bizon

## 7.4 Úbytky napětí na vedení

Hodnocení na úbytek napětí bylo provedeno v jednotlivých TS 22/0,4 kV. V Tab. 7-5 jsou vedeny ty, které se nacházely na konci linek, nebo v nich byl významný odběr, který by mohl potenciálně způsobit pokles napětí. Pod závaznou hodnotu 21 kV se žádná TS nedostala, proto lze konstatovat, že úbytek napětí na všech linkách je vyhovující. Nejblíže se k hranici 21 kV dostává konec linky VN83, kde je jednak velká vzdálenost od rozvodny Hrušovany u Brna a také je zde velký odběr.

Tab. 7-5 Úbytek napětí na vybraných TS 22/0,4 kV v aktuálním stavu

Kmenová linka	Název TS 22/0,4 kV	$S_{int}$ (kVA)	$P_o$ (kW)	$Q_o$ (kVAr)	U (kV)
VN83	9450 Modřice Damas	115	65,88	13,37	21,27
VN83	9459 Modřice IMI Norgen	1 040	595,80	120,98	21,26
VN83	9403 Xaloy Modřice - Bernex	1 100	630,19	127,86	21,26
VN161	94310 Želešice - Kamenolomv III	1 260	480,05	97,48	21,84
VN161	70311 Ořechov Polcar DTS	80	30,48	6,18	21,88
VN1275	703369 Moravany k Pegasu DTS	200	59,24	12,03	22,72
VN1275	9046 Modřice Brněnská	160	47,39	9,63	22,64
VN1275	9128 Střelice Vršovice	400	118,49	24,06	22,38
VN164	3094 Modřice Kovolit TS1	5 000	3404,25	691,2	22,03
VN164	9288 Příznice OSPAP	250	170,21	34,30	22,04
VN166	9475 Příznice Lisovna Plas	900	341,73	69,39	22,20
VN166	3097 ČOV Modřice	4 000	1518,82	308,4	22,30
VN166	3073 Modřice CTP	3 950	2859,83	304,55	22,19

( $S_i$  – instalovaný výkon,  $P_o$  – odebíraný činný výkon,  $Q_o$  – odebíraný jalový výkon,  $U$  – napětí v TS na primární straně transformátoru 22/0,4 kV)

## 8 PROVEDENÉ ÚPRAVY V SÍTI

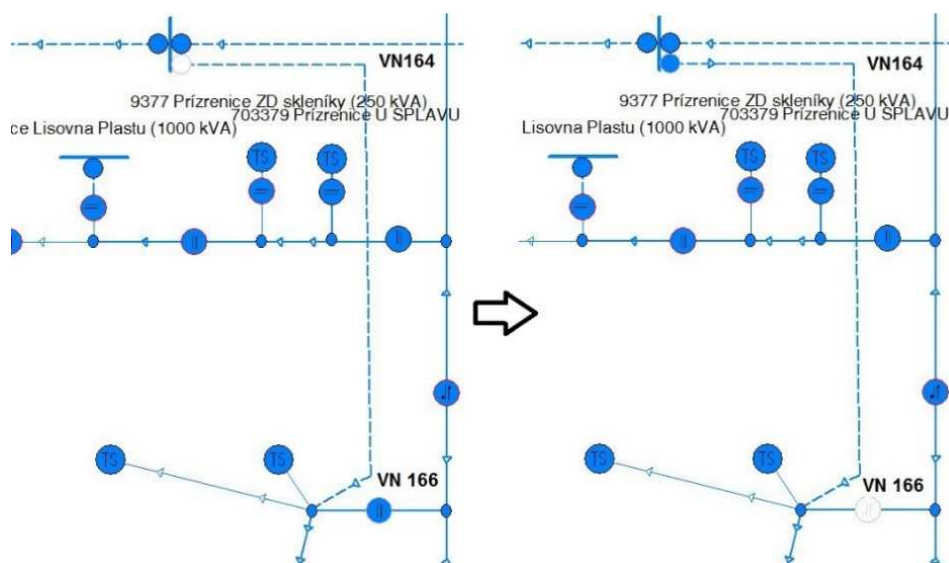
V oblasti kolem města Modřice docházelo v letech 2010 – 2014 k průměrnému nárůstu zatížení o cca 700 kW ročně. Pro tento růst zatížení bylo uvažováno využití stávajících kapacit s postupným odlehčováním vedení VN166. Rozsáhlejší investice pro tuto oblast byly plánovány až na rok 2020. V roce 2015 ale přišel požadavek na připojení 5 MW v následujících dvou letech na další 2,3 MW. Požadavky na připojení nebo navýšení jsou uvedeny v Tab. 8-1. S přihlédnutím na volnou kapacitu a plánovaným odlehčováním linky VN166 však není možné zajistit připojení tak velkého výkonu. VN166 byla po odlehčení plánována navíc jako záloha pro vedení VN83 a VN161. Následující navržené úpravy mají zajistit navýšení příkonu a připojení nových odběrných míst při zachování bezpečného chodu sítě i při náhradním stavu.

Tab. 8-1 Nejvýznamnější požadavky na navýšení nebo připojení odběrných míst

Odběr	Požadovaný příkon (MW)	Typ požadavku
1) Nová CTP hala	1,2 + 2,3	Připojení
2) Vodňanské drůbežárny	0,5	Navýšení
3) Mergon Czech	1	Navýšení
4) IFE-ČR	1,14	Navýšení
5) Kolmorgen	0,8	Navýšení
6) Bachl	0,3	Navýšení

### 8.1 Přepojení VD na linku VN164 a zatažení linky VN161 do rozvodny SO

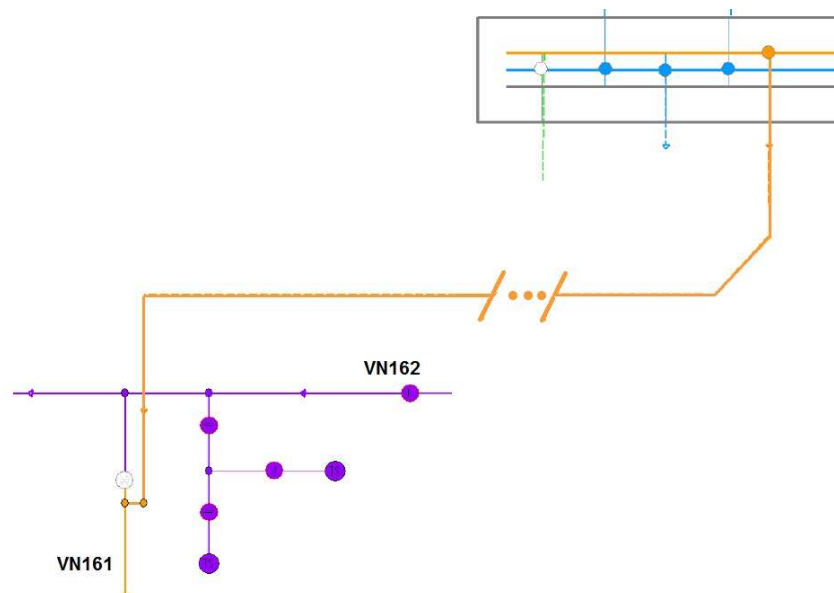
Z důvodu nedostatku kapacity k distribuci elektrické energie na hladině 22 kV v oblasti průmyslové zóny Modřice je touto úpravou řešeno přepojení Vodňanských drůbežáren na jinou kmenovou linku. Dále je řešeno zaústění kmenového vedení č. VN161 do rozvodny Sokolnice. Tyto úpravy umožní další navyšování příkonu a připojení nových odběrných míst, pokud by k realizaci této úpravy nedošlo, nelze zajistit zejména připojení haly CTP dle smlouvy o připojení se současným požadovaným příkonem 1 200 kW a plánovaným navýšením na hodnotu 3 500 kW.



Obr. 8-1 Přepojení Vodňanských drůbežáren

V prvním kroku tedy dojde k přepojení Vodňanských drůbežáren z linky VN166 na VN164, jak je naznačeno na Obr. 8-1. Touto manipulací dojde k odlehčení linky VN166 o 20 A na hodnotu 164 A.

Další úpravou je posílit kapacitu k distribuci elektrické elektřiny a připojení nových odběru na linku VN161. Navrhují zaústit stávající kmenové vedení VN161, které v současném stavu odbočuje z kmenového venkovního vedení VN162 do rozvodny 22 kV Sokolnice u Brna. Z rozvodny 22 kV Sokolnice bude vývod vyveden z vhodné rezervní nevybavené kobky. Tato kobka bude vybavena v rámci této úpravy výkonovým třípólovým vypínačem, odpojovačem se zemními noži, měřicími transformátory proudu a napětí, pohony, řídicím systémem a ochranami. Z této kobky bude poté kabelový vývod vyveden stávajícím multikanálem. Pro vyvedení nového kabelového vedení z rozvodny navrhují kabel AXAL TT PRO 3x240mm<sup>2</sup> v délce cca 6300m. Od vyústění vedení z multikanálu bude nové kabelové vedení uloženo ve volném terénu. Pokládka bude provedena metodou pluhování, případně dle potřeby kopaným výkopem.



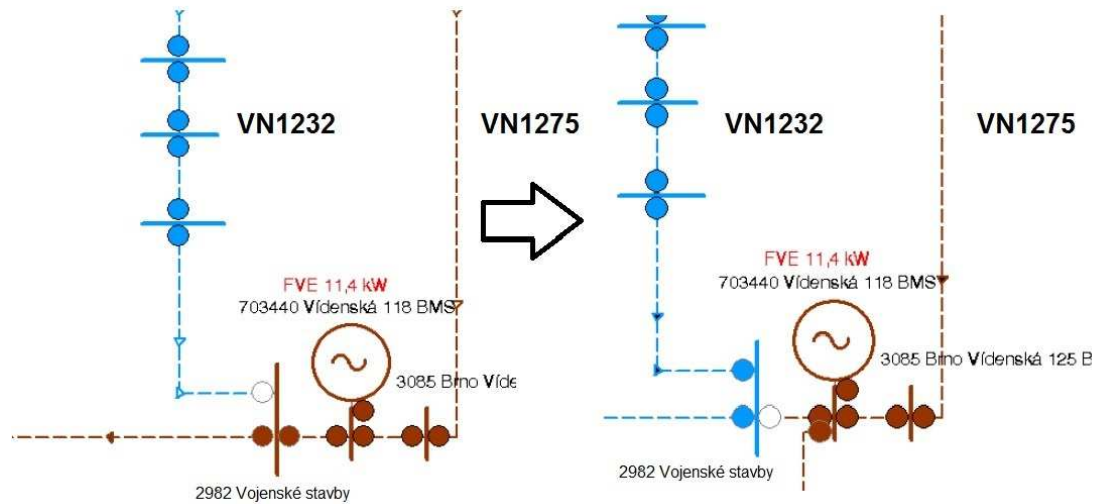
Obr. 8-2 Zaústění VN161 do rozvodny Sokolnice

## 8.2 Začlenění linky VN1275 do CTP Modřice

Tato úprava je navržena primárně ze dvou důvodů. Z nedostatku kapacity v napěťové hladině vysokého napětí, přeneseně v napěťové hladině nízkého napětí v oblasti města Brna u ulice Vídeňská a to z důvodu nedostatku kapacity v průmyslové zóně města Modřice.

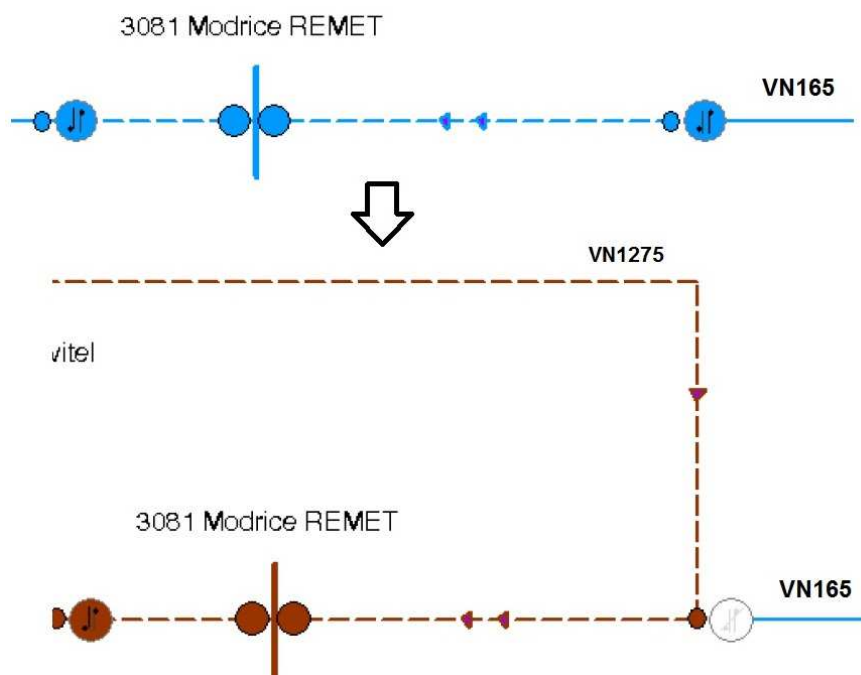
V prvním případě budou úpravou vyřešena rizika spojená s vysokým zatížením sítě 22 kV v oblasti ulice Vídeňská a bude umožněno navyšovat příkony stávajícím odběratelům a připojovat nové odběratele, což nelze v současnosti nelze zajistit. Ve druhém případě úprava zajistí s koordinací výstavby nového vedení VN161 z transformovny Sokolnice dostatek kapacity pro navyšování příkonů a připojování nových odběrných míst v průmyslové zóně Modřice.

V úpravě je navrženo využití dvou stávajících zemních kabelových vývodů 22 kV (VN1232 a VN1275) z rozvodny TR Moravany, které jsou ukončeny v trafostanici č. 2982 Vojenské stavby. Tato trafostanice bude převedena na napájení z vývodu VN1232, původní kabelové vedení z trafostanice č. 703440 bude sloužit pro náhradní stav, viz Obr. 8-3.



Obr. 8-3 Provedené úpravy na ulici Víděňská

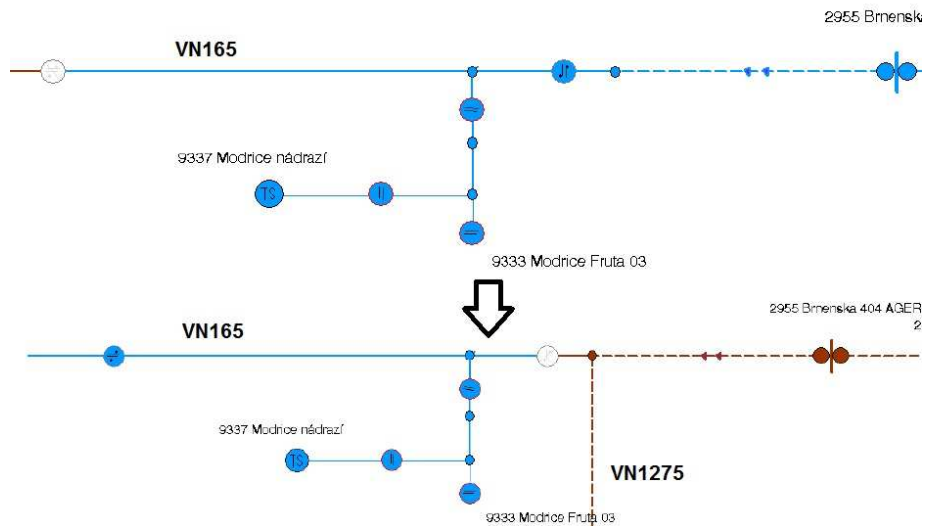
Z trafostanice č. 703440 bude vyveden kabelový vývod kabelem 3x 22-NA2XS2Y 1x240 mm<sup>2</sup> v délce 110 m, který bude ukončen u podpěrného bodě venkovního vedení VN165. Na tomto místě venkovní vedení VN165 přechází do země. VN165 bude rozpojeno a kabelové vedení k trafostanici č. 3081 Modřice REMET bude naspojováno na přivedený kabel VN1275. Venkovní vedení VN165 v úseku podpěrných bodů 22, 23 a 24 bude demontováno. Úprava je znázorněna na Obr. 8-4.



Obr. 8-4 Provedené úpravy kolem TS 3081 Modřice REMET



Další pokračování úprav spočívají v ukončení stávajícího zemního kabelového vedení VN165 na podpěrném bodě 37. V místě rozpojení na kabelové vedení naspojovat nové vedení, které povede do vstupní rozvodny Modřice. Nové kabelové vedení v délce 2750 m bude provedeno kabelem 3x 22-NA2XS2Y 1x240 mm<sup>2</sup> a bude označeno jako VN1275. Úprava je znázorněna na Obr. 8-5.



Obr. 8-5 Odbočení VN1275 do VR Modřice

V závěru bude realizována výstavba nového zemního kabelového vedení 22kV s označením VN161. Použit bude kabel 3x 22AXEKVCEY 1x240 mm<sup>2</sup> v délce 500 m. Toto kabelové vedení bude vyvedeno z VR Modřice pole č. 6 a povede do odběratelské trafostanice Modřice U vlečky CTP, ve které pro zaústění tohoto kabelu připraveno vývodové pole.

### 8.3 Úprava zapojení ve VR Modřice

Následující bod se věnuje vstupní rozvodně Modřice. Stávající VN rozváděč Siemens 8DH10 je z pohledu ovládacího napětí a ochrany nevyhovující. Z důvodu sjednocení technologie a snížení požadovaného prostoru je navrženo stávající rozváděč VN o dvou přívodních a jednom vývodovém poli ve VR Modřice nahradit novým rozváděčem VN. Tento nový rozváděč bude mít čtyři přívodní/vývodní pole, podélné dělení, uzemňovač přípojnic a kabelový vývod na odběratelskou stanici CTP Modřice. Jednopolové schéma toho rozváděče je v příloze B, Obr. 8-6 vyobrazuje změnu v programu Bizon.

#### Jednotlivá pole budou vybavena následovně:

Pole č. 1 – Přívodní/vývodové pole pro VN166 – kabelový vývod na venkovní vedení

- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Třípolohový spínač
- Kapacitní systém indikace napětí
- Měřicí transformátor proudu

Pole č. 2 – Přívodní/vývodové pole pro VN83 – kabelový vývod na venkovní vedení

- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Třípolohový spínač
- Kapacitní systém indikace napětí
- Měřicí transformátor proudu
- Zapouzdřený měřicí transformátor napětí na přípojnicích

Pole č. 3 – Pole uzemňovače přípojnic

- Kapacitní systém indikace napětí
- Třípolohový spínač

Pole č. 4 – Pole podélného dělení

- 2x Třípolohový vypínač s motorickým pohonem
- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Kapacitní systém indikace napětí

Pole č. 5 – Přívodní/vývodové pole pro VN1275 – kabelový vývod k TS 2955

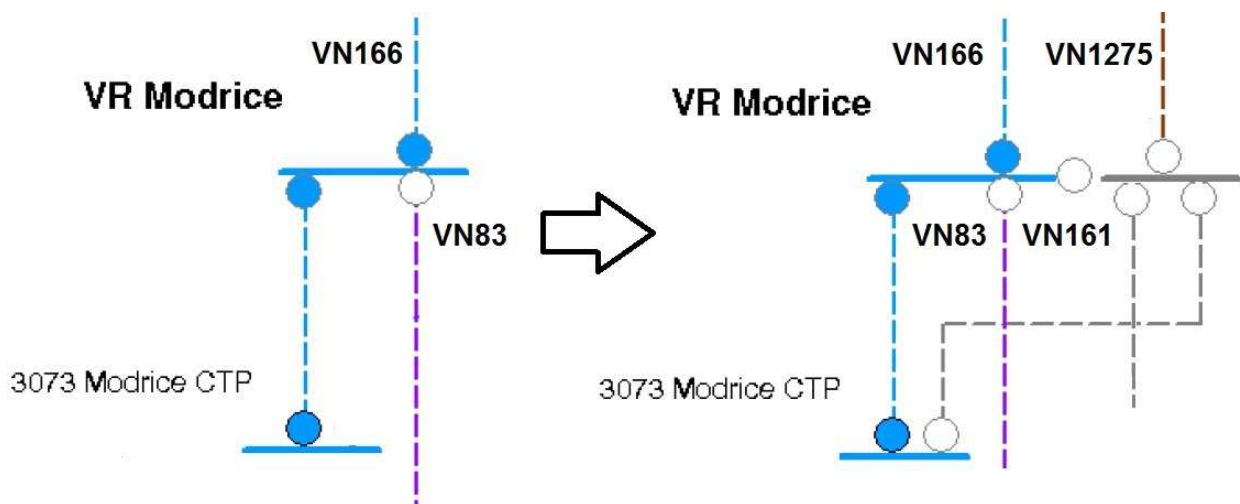
- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Třípolohový spínač
- Kapacitní systém indikace napětí
- Měřicí transformátor proudu
- Zapouzdřený měřicí transformátor napětí na přípojnicích

Pole č. 6 – Přívodní/vývodové pole pro VN161 – kabelový vývod k TS CTP

- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Třípolohový spínač
- Kapacitní systém indikace napětí
- Měřicí transformátor proudu
- Zapouzdřený měřicí transformátor napětí na přípojnicích

Pole č. 7 – Vývodové pole – kabelový propoj na TS 3073

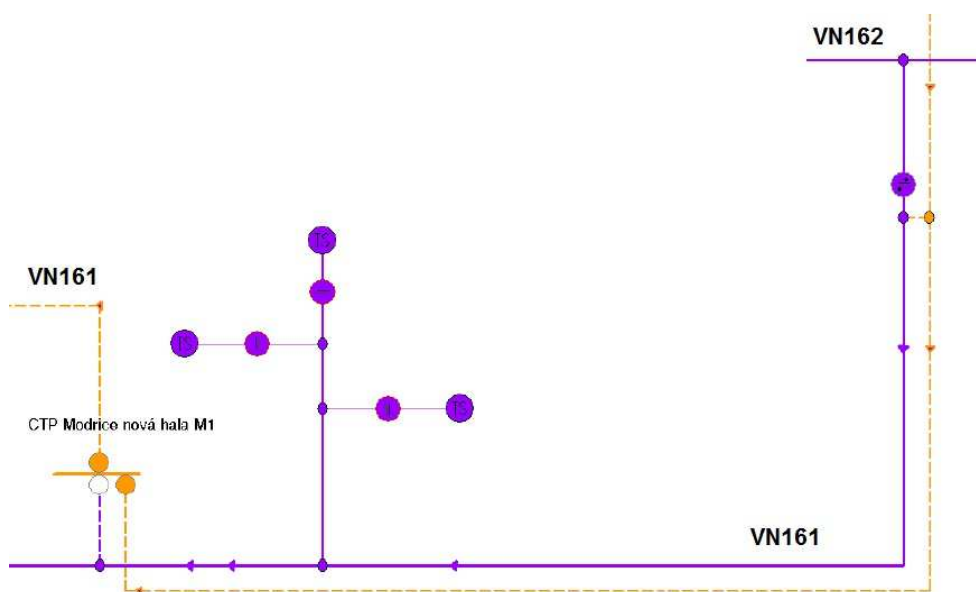
- Výkonový vypínač s motorovým pohonem
- Třípolohový spínač
- Kapacitní systém indikace napětí
- Měřicí transformátor proudu



Obr. 8-6 Rekonstrukce vstupní rozvodny Modřice

## 8.4 Zdvojení VN161 a provoz sítě v základní stavu po úpravách

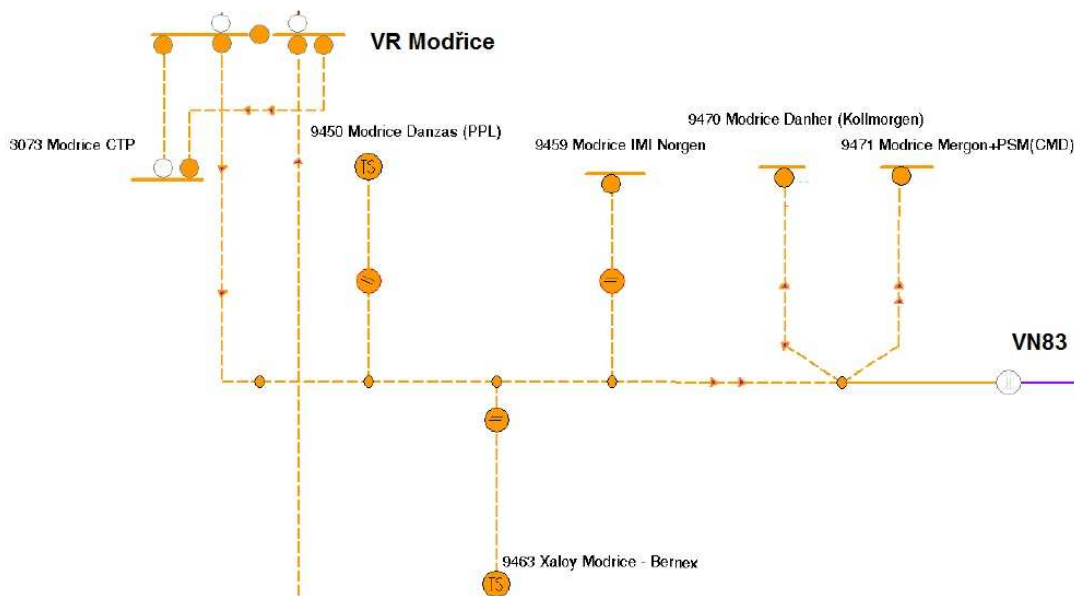
Z důvodu staří a technického řešení stávajícího venkovního nadzemního kmenového vedení vysokého napětí VN161 s vodiči AlFe 95 z roku 1975 navrhuji v úseku od podpěrného bodu č. 1 k podpěrnému bod č. 13 výměnu vodičů AlFe 95 za standardní vodiče AlFe 110/22. Nedostatečná kapacita a dokončení koncepčního řešení napájení oblasti, v návaznosti na související úpravy projektují od ukončení navrženého vedení VN161 z rozvodny Sokolnice po novou trafostanici společnosti CTP výstavbu zemního kabelového vedení VN161. Pro pokládku v délce cca 1 500 m bude položen kabel standartním způsobem (do výkopu s pískovým ložem) konkrétně 3x NA2XS2Y 1x240 mm<sup>2</sup> nebo metodou pluhování použit kabel AXAL TT PRO 3x240 mm<sup>2</sup>. Z původního plánu na kabelizaci stávajícího nadzemního vedení a zrušení nadzemního se upouští z důvodu výrazného nárůstu požadavků na zajištění příkonu elektrické energie. Pokud by se nadzemní vedení zrušilo, není napájení pro oblast dostačující.



Obr. 8-7 Zdvojení vedení VN161

Po realizaci navržených úprav dojde k překonfigurování celé sítě, v tomto novém stavu bude síť provozována. Novým vybudovaným vedením VN161 bude napájena nová hala a VR Modřice. Tímto dojde k výraznému odlehčení linky VN166 a VN164. Jediná VN83 nebyla nijak odlehčena, abychom snížili proud tekoucí v této lince. Navrhuji provést výměnu ručně ovládaného úsečníku za dálkově ovládaný úsečník. Tento úsečník se nachází téměř na samém konci kmenového vedení VN83. V základním stavu bude rozpojen a konec linky bude napájen z VR Modřice, tím dojde ke snížení zatížení. Dálkově ovládaný úsečník bude poté možné spínat dálkově z dispečinku pod zatížením a bez vypisování B-příkazu. Stav po rozepnutí úsečníku je ilustrován Obr. 8-8.

Nově vybudované kabelové vedení VN1275 bude připravena převzít celé zatížení v případě výpadku VN161.



Obr. 8-8 Přepojení konce VN83 do VR Modřice

## 8.5 Napěťové a výkonové poměry po provedených úpravách

Nový provozní stav sítě byl podroben výpočtu ustáleného chodu. Zatížení na transformátorech Tab. 8-2 se zvýšilo, stále je však zajištěna dodávka výkonu z rozvodny při výpadku jednoho transformátoru. V Tab. 8-3 můžeme vidět, že navrhované úpravy splnily svůj účel a všechny vývody na kmenové lince dodržují proud předepsaný koncepcí. Důsledkem toho došlo i ke snížení proudu v dílčích úsecích. V Tab. 8-4 můžeme pozorovat vyšší zatížení kabelových vedení, nicméně stále se nachází pod hranicí 75 %, která je závazná. Došlo i ke zvýšení hodnoty napětí v koncových TS 22/0,4 kV viz. Tab.8-5.

Tab. 8-2 Zatížení transformátorů po provedených úpravách

Název rozvodny	Transformátor	Přípojnice	$S_n$ (MVA)	$P_z$ (MW)	$Q_z$ (MVar)	$S_z$ (MVA)	$S_z\%$ (%)	$S_{zp\%}$ (%)
Sokolnice	T101	SO_WB	40	16,39	2,63	16,60	41,51	58,32
	T102	SO_WC	25	12,86	0,54	12,87	51,48	18,52
	T103	SO_WB	40	0	0	0	0	0
Moravany u Brna	T101	MOB_WA	40	9,34	1,38	9,44	23,60	4,26
	T102	MOB_WB	40	16,52	2,53	16,71	41,78	52,32
Hrušovany u Brna	T101	HB_WA	40	0	0	0	0	0
	T102	HB_WA	40	9,64	2,22	9,89	24,74	35,81

Tab. 8-3 Zatížení vývodů z rozveden po provedených úpravách

Název vedení	Typ vedení	I <sub>dopučený</sub> (A)	I <sub>z</sub> (A)
VN83	Venkovní	160	96,8
VN161 odbočka z VN162	Venkovní	160	104,87
VN161 vývod z R_SO	Kabelové	300	259,43
VN164	Venkovní	160	108,88
VN166	Venkovní	160	146,97
VN1232	Kabelové	300	214,75
VN1275	Kabelové	300	86,75

Tab. 8-4 Zatížení vybraných úseků linek po provedených úpravách

Název vedení	Úsek vedení	Typ vedení	Použitý vodič	I <sub>max</sub> (A)	I <sub>z</sub> (A)	I <sub>z%</sub> (%)
VN161	USV_000512	Kabelové	NA2XS(F)2Y_240	417	258	62
VN161	USV_000513	Kabelové	NA2XS(F)2Y_240	417	258	62
VN83	ZAVKAB13978	Kabelové	SAXKA_120	208	96,3	46
VN1232	USV_000196	kabelové	NA2XS(F)2Y_240	417	213,7	52

Tab. 8-5 Úbytek napětí na vybraných TS 22/0,4 kV po úpravách

Kmenová linka	Název TS 22/0,4 kV	S <sub>int</sub> (kVA)	P <sub>z</sub> (kW)	Q <sub>z</sub> (kVAr)	U (kV)
VN83	9047 Modřice motel Bobrava	215	123,17	25,01	22,42
VN161	703711 Ořechov Polcar DTS	80	30,48	6,19	21,99
VN166	3080 Modřice Nádražní 296 PVD	370	140,49	28,52	22,64
VN166	9475 Přiznice Lisovna Plas	900	341,74	69,39	22,66
VN164	9288 Přiznice OSPAP	250	170,21	34,30	22,24
VN164	3094 Modřice Kovolit TS1	5 000	3404,25	691,26	22,23
VN1232	9128 Střelice Vršovice	400	118,49	24,06	22,53
VN1275	3073 Modřice CTP	3 950	2859,83	304,55	22,70

## 9 KONTROLA NA TEPELNÉ ÚČINKY PŘI ZKRATU

Tato kapitola se věnuje posouzení, zda navržené změny v síti vyhoví tepelným účinkům při zkratu. Kontrola bude provedena na nových kabelových vedeních. Jedná se tedy o vývod z rozvodny Sokolnice VN161 a VN1275 z rozvodny Moravany u Brna. Zbytek sítě nevyžaduje provést kontrolu. Bude vypočítán počáteční rázový zkratový proud v místě poruchy (9.1) a z něj určen minimální průřez (9.3). Pro výpočet minimální průřezu dále potřebujeme znát impedanci od zdroje do místa zkratu. Impedance se skládá dle Obr.9-1 z náhradní reaktance soustavy (9.5), náhradní reaktance transformátoru (9.6) a impedance samotného kabelového případně venkovního vedení.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_z} \quad (9.1)$$

( $I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud,  $c$  - napěťový součinitel,  $U_n$  - napájecí napětí,  $Z_z$  - impedance zkratu)

$$I_{th} = I_k'' \cdot 1,01 \quad (9.2)$$

( $I_{th}$  - ekvivalentní zkratový proud)

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_v}}{k} \quad (9.3)$$

( $S_{min}$  - minimální průřez vodiče,  $t_k$  - doba zkratu,  $k$  - koeficient respektující teplotu před zkratem a po zkratu a fyzikální vlastnosti materiálu)

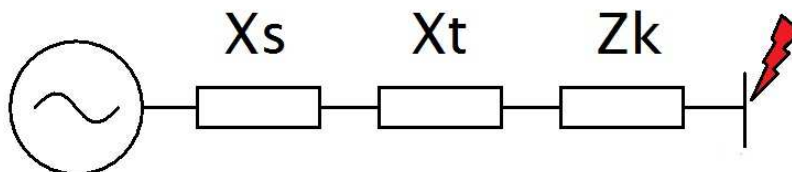
$$k = \sqrt{\frac{(\vartheta + 20) \cdot c_o}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta + \vartheta_k}{\vartheta + \vartheta_1}} \quad (9.4)$$

( $\vartheta$  - fiktivní teplota,  $c_o$  - specifické měrné teplo,  $\rho_{20}$  - specifický odpor,  $\vartheta_k$  - nejvyšší dovolená teplota při zkratu,  $\vartheta_1$  - nejvyšší dovolená teplota před zkratem)

$$X_s = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k3}''} \quad (9.5)$$

( $S_{k3}''$  - příspěvek z nadřazené soustavy)

$$X_t = \frac{ek \cdot U_n^2}{S_n} \quad (9.6)$$

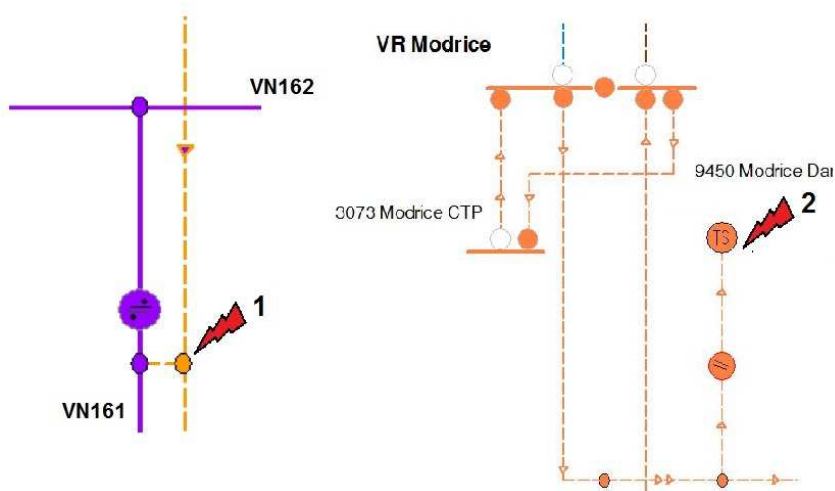


Obr. 9-1 Uvažované místa zkratů na vývodu

Tab. 9-1 Převzaté zkratové výkony v síti 110 kV z nadřazené soustavy

Rozvodna	Označení LS	Majetek	výhled pro rok 2017			
			3-f. (MVA)	3p (kA)	1p (MVA)	1p (kA)
			$S''_{k3}$	$I''_{k3}$	$S''_{k1}$	$I''_{k1}$
HRUŠOVANY u B.	HB	E.ON	1 990	10,50	1 850	9,70
SOKOLNICE	SO	E.ON	5 880	30,80	6 620	34,80
MORAVANY	MOB	E.ON	2 940	15,50	3 150	16,50

Příklad výpočtu minimální průřezu při zkratu na odpojovači v lince VN161 bod č. 1 na Obr. 9-2. Pro výpočet reaktance soustavy je použita hodnota zkratové přispěvku z hladiny 110 kV, která už respektuje paralelní chod transformátorů 400/110 kV případně 220/110 kV. Napěťový součinitel  $c$  se volí 1,1. Hodnoty pro koeficient  $k$  se volí dle daného typu vedení, pokud se vedení skládá z více typů, volí se hodnoty vždy pro ten úsek, který je má nejnižší. To znamená, při kombinaci kabelové a venkovního vedení, použijeme hodnoty respektující fyzikální vlastnosti a maximální teploty při zkratu a před zkratem pro venkovní vedení.



Obr. 9-2 Uvažované místa zkratů na vývodě VN161

Náhradní reaktance soustavy:

$$X_s = \frac{1,1 \cdot 22\,000^2}{5\,800 \cdot 10^6} = 0,0905 \, \Omega$$

Náhradní reaktance transformátu:

$$X_t = \frac{0,11 \cdot 22\,000^2}{25 \cdot 10^6} = 2,1296 \, \Omega$$

Náhradní impedance kabelového vedení odečtena z programu Bizon je 0,774  $\Omega$ .

Celková impedance zkratu:

$$Z_z = X_s + X_t + Z_k = 0,0905 + 2,1296 + 0,774 = 2,994 \, \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud:

$$I''_k = \frac{1,1 \cdot 22\,000}{\sqrt{3} \cdot 2,994} = 4,53 \text{ kA}$$

Ekvivalentní oteplovací proud 1 s:

$$I_{th} = 4,53 \cdot 1,01 = 4,58 \text{ kA}$$

Minimální průřez

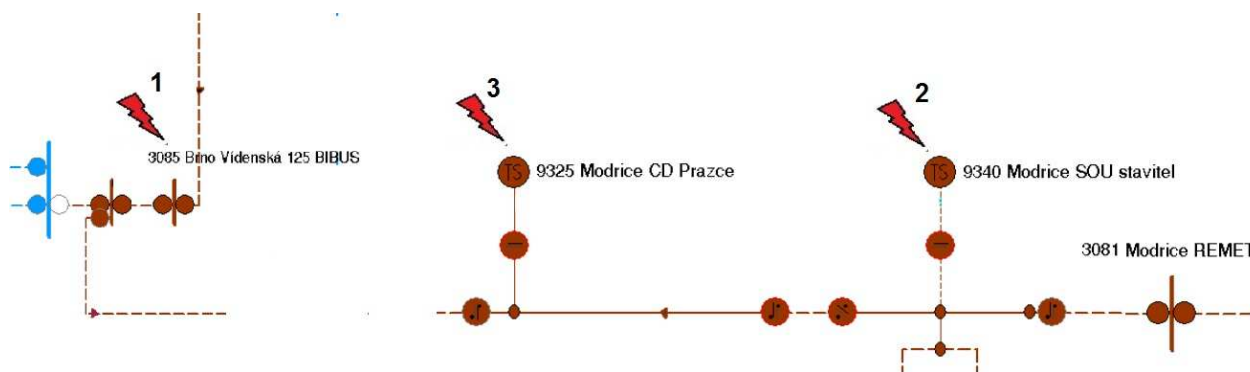
$$S_{min} = \frac{4\,580 \cdot \sqrt{1}}{141,3} = 33 \text{ mm}^2$$

Koeficient k:

$$k = \sqrt{\frac{(243,5 + 20) \cdot 3,5}{0,01786} \cdot \ln \frac{243,5 + 250}{243,5 + 90}} = 141,3 \text{ A s}^{1/2} \text{ mm}^{-2}$$

Minimální průřez pro místo 1 vyšel 33 mm<sup>2</sup>, od toho místa průřez vedení neklesne pod tuto hodnotu a nikde nepřechází na venkovní vedení. Další místem je bod 2, kde se nachází odběrná trafostanice TS č. 9450 Modřice Danzas. Tato trafostanice je připojena pomocí venkovního vedení o průřezu 70 mm<sup>2</sup>. Minimální průřez vyšel 64 mm<sup>2</sup>, tato hodnota vzhledem k použitému průřezu je vyhovující. Dále jsou na vedení další odbočky, jejich průřez je nad hodnotou 64 mm<sup>2</sup>, tím pádem je vyhovující.

Dalším zkoumaným vývodem je VN1275, zkoumané místa zkratů jsou vyznačena na Obr. 9-3. Bod číslo 1 vyhovuje, ale body 2 a 3 jsou nevyhovující viz. Tab. 9-2 a budou muset být nahrazeny vyšším průřezem.



Obr. 9-3 Uvažované místa zkratů na vývodů VN1275

Tab. 9-2 Vyhodnocení minimální průřezu.

Vedení	Místo zkratu	$I_{ke}$ (kA)	$S_{min}$ (mm <sup>2</sup> )	$S_{použitý}$ (mm <sup>2</sup> )	Vyhodnocení
VN161	1	4,71	33	240	Vyhovuje
VN161	2	4,58	64	70	Vyhovuje
VN1275	1	8,06	57	240	Vyhovuje
VN1275	2	7,74	107	70	Nevyhovuje
VN1275	3	7,02	98	70	Nevyhovuje



## 9.1 Úpravy nevyhovujících úseků

Nevyhovující venkovní vedení AlFe 70 k trafostanice TS č.9340 Modřice SOU Stavitel navrhuji od odbočení z kmenové linky VN1275 k odběratelské trafostanice v délce 100 m demontovat a nahradit kabelovým vedením 3x AXEKVCEY 1x70 mm<sup>2</sup>. Stejný postup také navrhuji pro venkovní vedení délky 70 m, které vede ze stejné kmenové linky na trafostanici TS č. 9325 Modřice ČD Pražce. Obě dvě trafostanice jsou v majetku odběratele a je nutné s projednat a odsouhlasit navržené změny. Navržená vedení po nové kontrole na minimální průřez vyhovují Tab. 9-3.

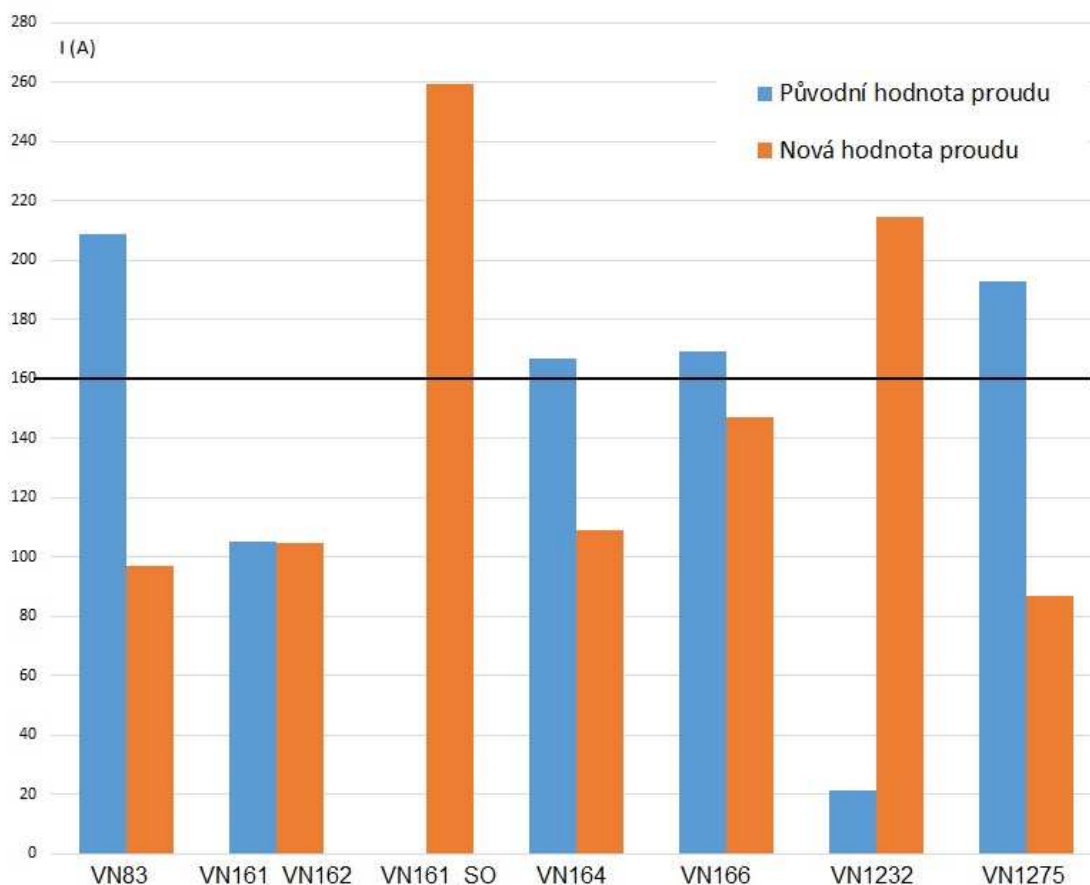
Tab. 9-3 Nová kontrola na minimální průřez.

Vedení	Číslo na název TS	$I_{ke}$ (kA)	$S_{min}$ (mm <sup>2</sup> )	$S_{použitý}$ (mm <sup>2</sup> )	Vyhodnocení
VN1275	9340 – Modřice SOU stavitel	7,58	53	70	Vyhovuje
VN1275	9325 – Modřice ČD Pražce	6,98	49	70	Vyhovuje

## 10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se ve své první části věnuje základnímu rozdělení elektrizační soustavy. Následně popisuje distribuční soustavu podle napětí, konfigurace sítě, zapojení uzlu transformátoru a dále vysvětluje způsoby, jakým je vedeno elektrické vedení v distribuční soustavě. Jsou zde také uvedeny typy kabelových vedení, které používá společnost E.ON. Další kapitola vychází z konceptu firmy E.ON, ta je zaměřena na zásady při návrhu VN sítí, jak ji vybudovat efektivně spolehlivě s minimalizací provozních nákladů, aby odpovídala požadavkům spotřebitelů v elektrizační soustavě. Následující kapitola pak seznámí čtenáře s problematikou metod výpočtu ustáleného chodu sítě. K výpočtu ustáleného chodu je možné použít způsob řešení lineárních rovnic, což je podrobně rozvedeno. V praxi jsou však zadány dodávky do jednotlivých uzlů a proto se potom soustava řeší jako nelineární úloha pomocí některé z iteračních metod. Tyto metody jsou využity pro řešení ustáleného chodu sítě v uvedených výpočetních programech. Pro řešení ustáleného chodu sítě je použit program PAS Daisy Off-line v 4.00 Bizon.

Praktická část se zabývá návrhem úpravy sítě 22 kV pro napájení města Modřice a okolí. Prvním krokem práce je popis dané lokality. Oblast je napájena ze tří transformoven a pěti linek 22 kV. Sít' je posouzena na využití transformátorů, zatížení linek a úbytek napětí. Zatížení transformátorů a úbytky napětí jsou v pořádku, ale zatížení linek není, protože nerespektuje koncepci. Tři linky jsou v základním stavu přetěžovány a nerespektují provozní koncepci. S novými žádostmi o navýšení odběru a připojení nových odběrných míst musí projít napájení oblast výraznou rekonstrukcí. Nejvíce se to odvíjí od požadavku CTP na připojení nové haly s odběrem 5 000 W.



Obr. 10-1 Porovnání hodnoty proudů na vývodech před a po úpravách

V prvním kroku dojde k přepojení odběrného místa Vodňanské drůbežárny z linky VN166 na linku VN164, která je k objektu také přivedena. Linka VN161, která je v aktuálním stavu napájena z kmenové linky VN162 bude rozpojena a dotažena novým kabelovým vedením do rozvodny Sokolnice. Tyto úpravy zajistí možnost připojení část z požadovaného příkonu nové haly. Pro zajištění připojení celého výkonu, je potřeba začlenit linku VN1275 do průmyslové zóny Modřice. Toto začlenění bude spočívat v přepojení linky VN1275, která napájí město Modřice a obec Moravany na linku VN1232 v trafostanici TS č.2982 Vojenské stavby. Poté navrhuji vybudování dvou kabelových propojek z TS č.703440 ve směru k TS č.3081 a z podpěrného bodu číslo 37 linky VN165 k vstupní rozvodně Modřice. Ve vstupní rozvodně Modřice se nachází nevyhovující VN rozváděč, proto bude demontována a nahrazen novým VN rozváděčem ze 7 poli. Vstupní rozvodnu Modřice bude možno díky nové technologii spojit novým kabelovým vedením VN161 s novou CTP halou. Pro dokončení celé koncepce napájení průmyslové zóny bude dobudováno z haly CTP kabelové vedení k již vedení VN161, které bylo výše navrženo z rozvodny Sokolnice. V závětu bude na lince VN83 vyměněn úsekový odpojovače za dálkově ovládaný a dojde k trvalému rozpojení tohoto nového odpojovače. Konec linky VN83 bude poté napájen z VR Modřice. Po dokončení úprav bude možné vyhovět všem požadavkům na navýšení a připojení odběrných míst. V oblasti Modřice a okolí bude dostatečná kapacita pro horizont 7 – 10 let. Další rozsáhlejší úpravy sítě budou dány vývojem zatížení a požadavků odběratelů.

U nově navržené sítě byl proveden v programu Bizon výpočet ustáleného chodu. Zatížení transformátorů a hodnoty napětí byly opět v pořádku. Proudové zatížení vývodů se také dostalo pod hodnoty dané koncepcí. Obr.10-1 vyobrazuje grafiky změnu proudu v kmenových linkách na vývodech z rozvoden. Nová kabelová vedení byly posouzeny na tepelné účinky při zkratu. Vedení VN161 vyhověli, ale na vedení VN1275 byly zjištěny dvě odbočky, na kterých nevyšla kontrola na minimální průřez. Nevyhovující odbočky budou, proto přezbrojeny na nové vyhovující vedení, aby vyšla kontrola na minimální průřez.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1, ČVUT v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-07-04935-8
- [2] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. Elektronický text. FEKT VUT v Brně, 2003, 138 stran.
- [3] ORSÁGOVÁ, J. *Elektrické stanice a vedení*. Elektronický text. FEKT VUT v Brně, 2015, 147 stran.
- [4] HALUZÍK, E. *Řízené provozu elektrizační soustavy*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství technické literatury, 1983, 126 s. Učební text vysoké školy. ISBN 05-018-84
- [5] PAVLOVSKÝ, B. *Elektrické sítě v městech a sídlištích*. SNTL, Praha 1975, 432 stran
- [6] MIKULÁŠ, L. *Koncepce sítí 22kV*, E.ON Česká republika, s.r.o., směrnice ECZR-PP-DS-141.0, 2014.
- [7] Program Modes – verze 2.2/12.  
Ing. Karel Máslo, CSc.
- [8] LUG – Program pro analýzu a výpočet elektrických sítí, verze 2014  
Ing. Jirí Ptáček, Ph.D. a kolektiv
- [9] Program E-vlivy. [online] 2016 [cit.2016-12-28]. Dostupné z:  
<http://www.egc-cb.cz/produkty-pro-energetiku/software/e-vlivy-3-analyza-pomeru-v-ds.html>
- [10] Daisy s.r.o. *PAS DAISY Off-Line V4 Bizon – uživatelská příručka*. 2004, 227 stran.Sds
- [11] HODINKA, M. *Elektrické sítě I.*, Brno VUT 1980

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A – Aktuální stav sítě

Příloha B – Jednopolové schéma VR Modřice – nový stav

Příloha C – Konečný stav sítě po úpravách