

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav ČÍŽEK**  
Osobní číslo: **E18N0037P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

### Zásady pro vypracování

Diplomová práce „Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN“ bude zaměřena na tyto body:

1. Popište stávající stav kabelové sítě s uzlem uzemněným přes nízkoohmový odpor.
2. Popište problém vydělení malé části sítě s vlastním zdrojem s možným přechodem na izolovaný uzel.
3. Provedte výpočty napěťových a proudových poměrů v síti při jednofázové poruše.
4. Navrhněte řešení a nastavení ochran při oddělení části sítě s vlastním zdrojem.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.
2. ČN.
3. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
\_\_\_\_\_  
**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na problematiku hladiny vysokého napětí. V první části diplomové práce s názvem „Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN“ jsem popsal elektrické sítě, vedení a jejich poruchy. V další části je popsán způsob provozu uzlu transformátoru v distribuční části. Třetí část je zaměřena na výpočet napěťových a proudových poměrů v kabelové síti VN. Výpočet poměrů kabelové sítě byl proveden pomocí metody Fourtescue ve výpočtovém programu Microsoft Excel.

## **Klíčová slova**

Přenosová síť, distribuční síť, nepřímo uzemněná síť, izolovaná síť, kompenzovaná síť, odporník, způsob provozu uzlu transformátoru, napěťové a proudové poměry, poruchový proud, Fourtescue metoda.

## **Abstract**

The master thesis is focused on the issue of high voltage levels. In the first part of the master thesis "The design of the solution of the operation of the HV cable network node", I described the electrical networks, lines and their failures. The next section describes the method of operation of the transformer node in the distribution section. The third part is focused on the calculation of voltage and current ratios in the MV cable network. The calculation of the cable network ratios was performed using the Fourtescue method in the Microsoft Excel calculation program.

## **Key words**

Transmission network, distribution network, earth connection, indirectly grounded network, isolated network, compensated network, resistor, mode of operation of transformer node, voltage and current ratios, fault current, Fourtescue method.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Bc. Václav Čížek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí své diplomové práce Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za její rady při konzultacích textu této práce. Dále bych chtěl také poděkovat mému konzultantovi Ing. Františku Žákovi, Ph.D. za rady a pomoc při řešení výpočtů napěťových a proudových poměrů v kabelové síti VN a s výpočtovým programem.

## Obsah:

Seznam obrázků .....	
Seznam tabulek.....	
Seznam symbolů a zkratk .....	
Úvod:.....	1
1. Elektrické sítě a vedení.....	2
1.1. Napěťové úrovně v ČR.....	2
1.2. Druhy rozvodů elektrických sítí .....	3
1.3. Elektrická vedení.....	5
1.3.1. Venkovní vedení.....	5
1.3.2. Kabelové vedení.....	5
1.4. Uzly sítě.....	8
1.5. Kvalita elektrické energie.....	10
2. Poruchové stavy .....	12
2.1. Zkrat .....	12
2.2. Zemní spojení .....	13
2.2.1. Druhy zemního spojení .....	14
2.2.2. Kapacitní proudy .....	14
3. Způsob provozu uzlu transformátoru v distribučních sítích.....	15
3.1. Izolovaný uzel v síti VN.....	17
3.2. Neúčinně uzemněný uzel v síti VN.....	20
4. Výpočet proudových a napěťových poměrů v kabelové síti VN .....	27
4.1. Metoda souměrných složek.....	27
4.2. Řešení konkrétní sítě .....	33
4.3. Výpočet parametrů náhradního schéma .....	34
4.6. Ochrana ABB REF 615 .....	49
4.6.1. Nastavení ochrany .....	49
4.7. Výpočtový program.....	50
Závěr.....	51
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	52
Přílohy .....	53



## Seznam obrázků

Obr. č. 1 Přenosová soustava ČR [18].....	2
Obr. č. 2 Druhy rozvodů elektrické sítě .....	3
Obr. č. 3 Tvary jader vodičů.....	7
Obr. č. 4 Vinutí transformátoru zapojené do hvězdy .....	9
Obr. č. 5 Zapojení transformátoru Dyn1 .....	9
Obr. č. 6 Zemní spojení v izolované síti.....	13
Obr. č. 7 Systémy uzemnění sítí v distribučních soustavách vn.....	16
Obr. č. 8 Obecné schéma izolované soustavy .....	17
Obr. č. 9 Fázorový diagram proudů a napětí v izolované síti v bezporuchovém stavu.....	17
Obr. č. 10 Zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	18
Obr. č. 11 Fázorový diagram napětí a proudů jednopólové zemní poruchy v izolované síti .....	19
Obr. č. 12 Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení.....	20
Obr. č. 13 Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení .....	20
Obr. č. 14 Obecné schéma neúčinně izolované soustavy uzemněné přes kompenzační tlumivku.....	21
Obr. č. 15 Zemní spojení v kompenzované síti se zhášecí tlumivkou.....	21
Obr. č. 16 Fázorový diagram napětí a proudu ideální kompenzované soustavy .....	22
Obr. č. 17 Fázorový diagram napětí a proudu skutečné kompenzované soustavy .....	22
Obr. č. 18 Schéma zhášecí tlumivky s automatikou připínání .....	23
Obr. č. 19 Rezonanční křivka a) venkovní vedení b) kabelové vedení .....	24
Obr. č. 20 Obecné schéma neúčinně izolované soustavy uzemněné přes odporník.....	25
Obr. č. 21 Zemní spojení nepřímo uzemněné síti přes odporník.....	25
Obr. č. 22 Fázorový diagram napětí a proudu při uzemnění s odporníkem .....	26
Obr. č. 23 Rozložení nesymetrické soustavy na tři symetrické.....	27
Obr. č. 24 Obecný model sítě s obecnou impedancí $ZN$ .....	28
Obr. č. 25 Obecné náhradní schéma.....	29
Obr. č. 26 Obecný model VN soustavy při vzniku jednopólové poruchy .....	29
Obr. č. 27 Složkové schéma u jednopólové poruchy příčné nesymetrie .....	30
Obr. č. 28 Netočivá složka impedance jednopólové poruchy příčné nesymetrie.....	30
Obr. č. 29 Schéma netočivé složky pro uzel uzemněný přes odporník.....	32
Obr. č. 30 Zadané schéma VN soustavy s uzemněním přes odporník .....	33
Obr. č. 31 Zadané schéma VN soustavy s označenými místy poruchy .....	35
Obr. č. 32 Náhradní složkové schéma soustavy s jednopólovou poruchou v místě B .....	36
Obr. č. 33 Závislost napětí na odporu poruchy v odporově uzemněné síti .....	39
Obr. č. 34 Závislost netočivé složky napětí na přechodovém odporu poruchy a zobrazení působení ochrany v odporově uzemněné síti .....	40

Obr. č. 35 Závislost proudu na přechodovém odporu poruchy a zobrazení působení ochrany v odporově uzemněné síti.....	41
Obr. č. 36 Závislost $U_0$ na $R_p$ pro různé proudy odporníku.....	41
Obr. č. 37 Přechod na izolovaná uzel s poruchou v místě A, C .....	42
Obr. č. 38 Náhradní schéma jednopólové poruchy v bodě A, C s přechodem na izolovanou soustavou .....	43
Obr. č. 39 Závislost fázových napětí na přechodovém odporu u izolované síti .....	46
Obr. č. 40 Závislost $I_p$ na $R_p$ a zobrazení působení ochrany v izolované síti.....	47
Obr. č. 41 Závislost $U_0$ na $R_p$ a zobrazení působení ochrany v izolované síti.....	47
Obr. č. 42 Průběhy $Q_0$ bezporuchy a $Q_0$ porucha v izolované síti .....	48
Obr. č. 43 Ochrana ABB REF 615 [17] .....	49
Obr. č. 44 Umístění ochran ABB REF 615 .....	50

## Seznam tabulek

Tabulka 1 uvádí normalizované hladiny napěťových úrovní, kde jsou hodnoty střídavých třífázových napětí sdružené.....	3
Tabulka 2 Parametry transformátoru TR-1 40 MVA, $110 \pm 8 \times 2\%$ / 23 kV ETD.....	33
Tabulka 3 Parametry transformátoru TR-2 630 kVA, 22 / 0,4 kV.....	33
Tabulka 4 Parametry kabelu, AXEKVCEz 3x1x240/25 .....	33
Tabulka 5 Přehled hodnot $I_{POR}$ a $U_0$ v závislosti na $R_P$ v síti uzemněného pomocí odporníku.....	39
Tabulka 6 Přehled hodnot $I_{POR}$ a $U_0$ v závislosti na $R_P$ v izolované síti.....	46

## Seznam symbolů a zkratek

Zkratka:	Celý název:	Jednotka:
ZVN	zvláště vysoké napětí	
VVN	Velmi vysoké napětí	
VN	Vysoké napětí	
NN	Nízké napětí	
ES	Elektrizační soustava	
DS	Distribuční síť	
LDS	Lokální distribuční síť	
ZS	Zemní spojení	
R <sub>P</sub>	Přechodový odpor poruchy	
$\bar{Z}_N$	Impedance uzlu proti zemi	( $\Omega$ )
$\bar{I}_P$	Poruchový proud	(A)
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	Fázory fázového napětí A,B,C	(V)
$\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$	Proudy ve fázích A,B,C	(A)
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_C$	Proud kapacitou sítě proti zemi	(A)
$\bar{U}_{12}, \bar{U}_{23}, \bar{U}_{31}$	Fázory mezifázových napětí sítě	(V)
C <sub>1</sub>	Kapacita sítě proti zemi	( $\mu$ F)
R <sub>C1</sub>	Činný svodový odpor	( $\Omega$ )
$\bar{I}_{BP}, \bar{I}_{CP}$	Proud fázemi B,C při poruše	(A)
$\bar{Z}_T$	Impedance transformátoru	( $\Omega$ )
$\bar{Z}_V$	Impedance vedení	( $\Omega$ )
$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$	Fázory napětí sousledné, zpětné a netočivé (nulové) složky	(V)
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$	Složkové proudy sousledné, zpětné a netočivé	
1, 2, 0	Index označující souslednou, zpětnou a netočivou (nulovou) složku	
L <sub>TL</sub>	Indukčnost tlumivky	(mH)
R <sub>TL</sub>	Činný odpor tlumivky	( $\Omega$ )
$\bar{I}_{TL}$	Proud tlumivkou	(A)
$\bar{I}_{LTL}$	Induktivní složka proudu tlumivkou	(A)
$\bar{I}_{RTL}$	Činná složka proudu tlumivkou	(A)
C	Kapacita	( $\mu$ F)
L	Indukčnost	(mH)
$\omega$	Úhlová rychlost	(rad.s <sup>-1</sup> )

$\bar{I}_L$	Induktivní proud	(A)
$\bar{I}_C$	Kapacitní proud	(A)
$R_N$	Odpor uzlového odporníku	( $\Omega$ )
$\bar{I}_{RN}$	Proud odporníkem	(A)
$\bar{U}_f$	Fázové napětí	(V)
$\bar{a}$	Operátor složkové soustavy, který udává natočení	
$\bar{F}$	Matrice Fourtescue	
$\bar{E}$	Zdroj napětí	(V)
$S_{NT}$	Jmenovitý výkon transformátoru	(MVA)
$u_K$	Napětí nakrátko	(%)
$i_0$	Proud naprázdno	(%)
$dP_0$	Ztráty naprázdno	(kW)
$dP_K$	Ztráty nakrátko	(kW)
$p$	Převod	
$U_N$	Jmenovité napětí	(V)

## Úvod:

Nedílnou součástí každého z nás a zejména pak našich domovů je elektrická energie. Elektrická energie se vyrábí v elektrárnách a pomocí přenosové a distribuční soustavy, neboli pomocí venkovního či kabelového vedení je přes elektrické stanice a transformátory přivedena až k jednotlivým odběratelům. Elektrická energie je přiváděna přes různé hladiny napětí a jednou z hladin napětí je distribuční hladina VN. Na hladině VN kvůli nepříznivým vlivům mohou vznikat poruchy. O jaký typ poruchy se jedná záleží na mnoho faktorech. Jeden z faktorů je druh vedení. Důležité je zde taky vědět, jaký způsob uzemnění je v dané síti použit.

Provozovatele distribučních soustav se snaží zvýšit spolehlivost a kvalitu elektrické energie dané sítě, a to tím, že se snaží snížit počet, dobu a velikost poruch. Proto se volí vhodný typ provozu uzlu transformátoru.

V první části diplomové práce se proto budu zabývat elektrickými sítěmi a vedením a některými náležitostmi s nimi spojenými. Dále pak poruchovými stavy, jako je zemní spojení a jeho druhy.

Druhá část bude zaměřena na popis způsobu provozu uzlu transformátoru v distribuční soustavě, se zaměřením na izolovaný a neúčinně uzemněný uzel, který bude zahrnovat uzemnění pomocí odporníku a zhašecí tlumivky.

Hlavní cíl diplomové práce bude popsán v poslední části, kdy pomocí metody Fourtescue budu řešit problematiku konkrétního příkladu odporově uzemněné sítě s nastavením ochran. Dalším cílem je přechod dané sítě z odporově uzemněné sítě na oddělení malé sítě s vlastním zdrojem a přechod na izolovaný uzel a opětovné nastavení ochran.

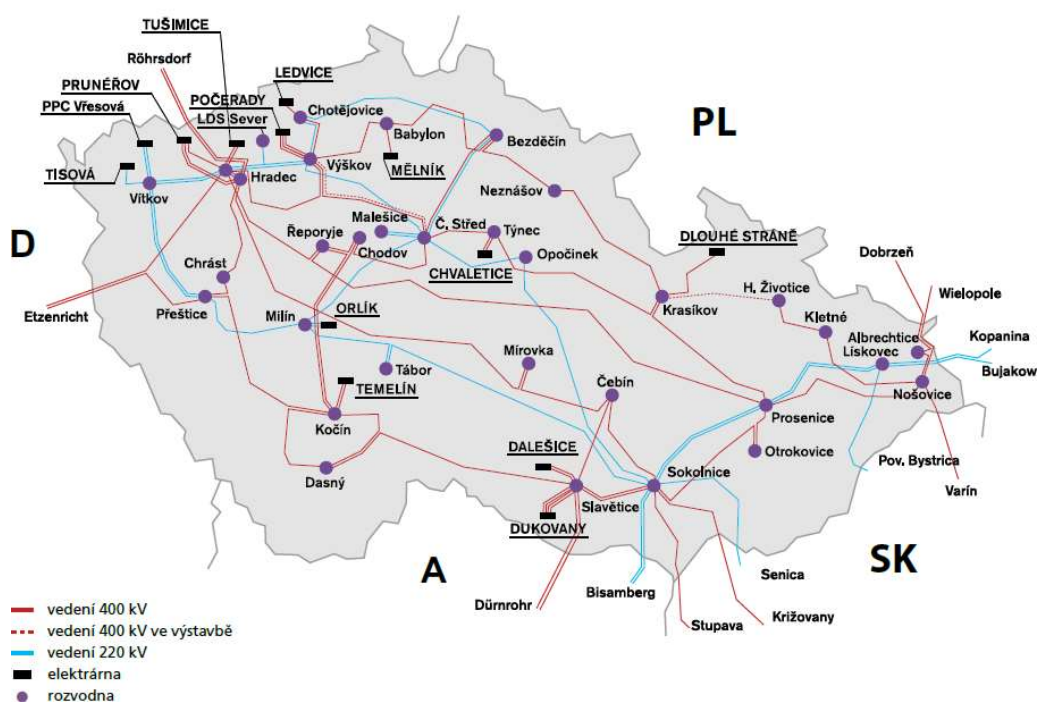
# 1. Elektrické sítě a vedení

## 1.1. Napět'ové úrovně v ČR

Elektrizační soustava v ČR slouží k přenosu a rozvodu elektrické energie, a to z místa výroby do místa spotřeby elektrické energie. Elektrizační soustava zahrnuje elektrické stanice, výrobní elektrické energie a elektrickou síť. Dále můžeme elektrizační soustavu rozdělit na Přenosovou a Distribuční soustavu. [1,6]

Přenosová soustava je v České republice zastoupená hladinou napětí 400 kV nebo 220 kV. Tato soustava slouží k přenosu elektrické energie po celé ČR do uzlů, ze kterých je rozváděna do rozvodných soustav tak, aby rozdělení výkonů bylo všude optimální z hlediska nákladů na výrobu a přenos. Také slouží k propojení se zahraničními přenosovými soustavami. Většinou je provozována jako okružní síť. [1,6]

Schéma sítí 400 a 220 kV



Obr. č. 1 Přenosová soustava ČR [18]

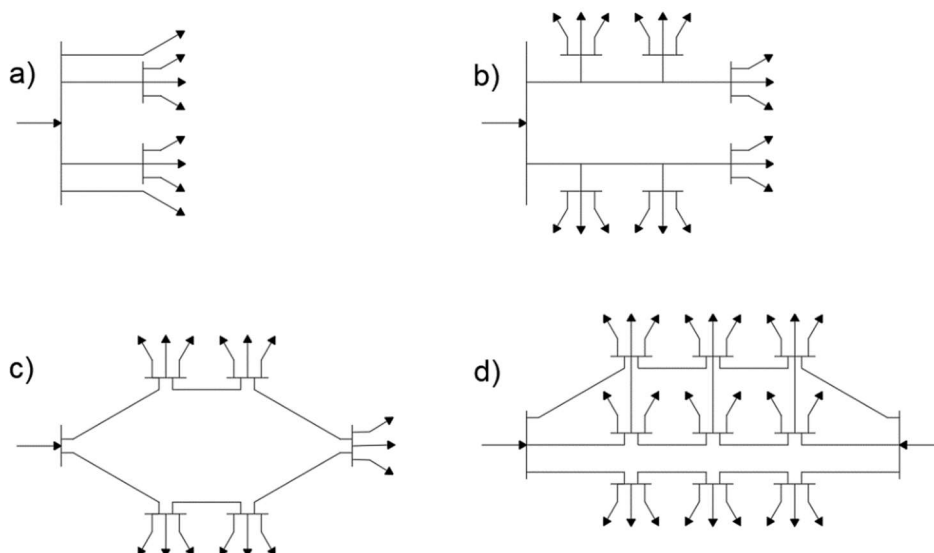
Distribuční soustava slouží k rozvodu elektrické energie k jednotlivým spotřebitelům. Distribuční soustava má hladiny napětí 110 kV, VN a NN, které jsou provozovány jako okružní nebo paprskové. Do distribuční soustavy jsou připojovány výrobní zdroje malých výkonů, jako jsou obnovitelné zdroje (využívající k získání elektrické energie přeměnu z energií větru, vody, slunce a biomasy), kogenerační jednotky a malé průmyslové elektrárny. [1,6]

Tabulka 1 uvádí normalizované hladiny napěťových úrovní, kde jsou hodnoty střídavých třífázových napětí sdružené

Zkratka:	Pojmenování:	Hladina napětí [kV]	Typ uzemnění soustavy:	Elektrizační soustava:	Uzel transformátoru:	Elektrizační soustava:
ZVN	Zvláště vysoké napětí	400 – 800	Účinně uzemněná	Přenosová	Okružní	Přenosová
VVN	Velmi vysoké napětí	110, 220		Distribuční/ Přenosová	Okružní / paprskový	Distribuční/ Přenosová
VN	Vysoké napětí	3, 6, 10, 22, 35	Izolovaná/ neúčinně uzemněná	Distribuční	Průběžný, paprskový	Distribuční
NN	Nízké napětí	0,4, 0,5	Účinně uzemněná	Distribuční	Průběžný, paprskový, mřížový	Distribuční

## 1.2. Druhy rozvodů elektrických sítí

Typologie sítě ukazuje vlastnosti a možnosti daného silnoproudého rozvodu. Topologii sítě můžeme rozdělit na tyto druhy rozvodů: paprskový, průběžný, okružní a mřížový. [1,6]



Obr. č. 2 Druhy rozvodů elektrické sítě



a) Paprskový rozvod

Paprskový rozvod představuje nejjednodušší a zároveň nejlevnější rozvod elektrické energie. Hlavní použití nalezneme v distribučním rozvodu NN nebo u menších průmyslových závodů, kde nejsou kladeny větší požadavky na spolehlivost dodávky elektrické energie. Přívod elektrické energie je totiž veden pouze jedou cestou. To ovšem znamená, že v případě poruchy je daná část sítě za poruchou bez elektrické energie. Pokud ovšem víme, že daná část sítě je bez elektrické energie, je snadné danou poruchu lokalizovat. [1]

b) Průběžný rozvod

Typickým použitím průběžného rozvodu je osvětlování komunikace, napájení jednotlivých maloobděratelů, napájení rozlehlých průmyslových závodů, anebo osvětlení rozměrné plochy. Charakteristickými rysy jsou dlouhá průběžná vedení s odbočkami. Vzhledem k velkým vzdálenostem vedení je nutno počítat s úbytkem napětí na vedení. Průběžný rozvod má stejně jako paprskový rozvod velmi malou spolehlivost dodávky elektrické energie. [1]

c) Okružní rozvod

Okružní rozvod je zapojen do kruhu, ze kterého jsou vyvedeny odbočky pro jednotlivé paprskové anebo průběžné rozvody. Používá se v místech velkých nároků na spolehlivost dodávky elektrické energie, protože zde napájíme danou spotřebu alespoň ze dvou stran. V případě poruchy se pak okružní rozvod chová jako průběžný rozvod. Vyskytuje se především ve velkých průmyslových rozvodech a městských obytných částí. [1]

d) Mřížový rozvod

Mřížový rozvod je napájen alespoň dvěma napájecími místy a zahuštěnou sítí s odbočkami. Vzhledem k vícenásobným přívodům je mřížový rozvod používán tam, kde jsou kladeny velké nároky na dodávku elektrické energie. V případě poruchy je dodávka elektrické energie stálá, ovšem z jiného přívodu. To ovšem souvisí s vysokou pořizovací cenou. Většinou se nachází ho ve velkých průmyslových rozvodech a hustě obydlených městských částí. [1]

Abych mohl uvést hlavní problematiku zadání DP, zaměřil jsem se nyní na elektrická vedení.

### **1.3. Elektrická vedení**

Elektrická vedení dělíme na vedení venkovní a kabelové. Výběr druhu vedení závisí na několika hlediscích. Konkrétně na dispozici místa, kde má být vedení vedeno, ekonomické náročnosti stavby, možnosti údržby a na nákladech na údržbu daného vedení. Vzhledem k nynějšímu trendu zvyšování elektrického výkonu ve městech a hustě obydlených místech, se omezuje výstavba venkovního vedení a používá se kabelové vedení. [11]

#### **1.3.1. Venkovní vedení**

Venkovní vedení slouží především k přenosu a rozvodu elektrické energie na velké vzdálenosti. U venkovního je proto dobré se zaměřit na přenášený elektrický výkon s interakcí na hospodárnost (velikost ztrát), spolehlivost (malá poruchovost provozu) a bezpečnost (lidských i ostatních). [11]

U venkovního vedení závisí jednak na elektrických vlastnostech pro přenos energie, ale také na vlastnostech mechanických, jednak pro samotný vodič, tak pro nosný stožár.

Hlavním úkolem stožáru kromě udržení váhy vodičů a přidružených komponentů je udržovat vodiče v požadované vzdálenosti, jednak od sebe, pak od vlastní konstrukce stožáru a i od země či jiných předmětů. Vzhledem k hladině napětí, které vodiče přenášejí se mění parametry stožáru. [11]

Při návrhu jak stožáru, tak i vedení je důležité se zaměřit především na použitý materiál, kde se opět střetávají mechanické a ekonomické hledisko. Při návrhu stožáru se musí speciálně dbát na vlastnosti terénu a povětrnostních podmínek místa určení pro výstavbu. Návrh vedení musí brát v potaz nejen požadovaný současný stav, ale také musí být připraven na budoucí zvyšující se nároky přenášeného výkonu. Navrhování vedení je především zaměřeno na namáhání vodičů a jejich průhyb. [11]

Vzhledem k tématu diplomové práce se dále nebudu venkovním vedením VN zabývat, ale zaměřím se na vedení kabelová.

#### **1.3.2. Kabelové vedení**

Kabelová vedení se používají především tam, kde nemůžeme použít venkovní vedení kvůli dispozicím okolí, bezpečnosti a estetice. Kabelová vedení jsou oproti venkovnímu vedení dražší, ale jejich spolehlivost je vzhledem k menšímu namáhání a minimálnímu vlivu povětrnostních podmínek. Proto se v drtivé většině používá kabelové vedení v městských zástavbách a v místech, kde z různých důvodů nelze použít venkovní vedení. [11,12]

Kabelové sítě VN jsou zapojeny do kruhové, mřížové a paprskové soustavy. Ve městech se kabelové vedení ukládá do podzemních lávek a mimo město jsou uloženy v zemi s pískovým uložením nebo jinou mechanickou ochranou. [11,12]

V současnosti se v České republice používají dva systémy značení vodičů (české starší a novější evropské)

a) Starší české značení:

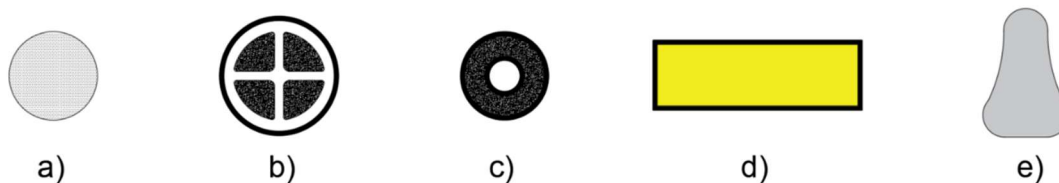
- 1. číslo udává napěťová hladina [kV]
- 1. písmeno udává materiál jádra  
A – hliník, C – měď
- 2. písmeno udává materiál jádra  
Y – PVC, G – pryž, E – polyetylén, XE – zesíťovaný polyetylén
- 3. písmeno udává druh vodiče  
K – kabel, L – lehká šňůra, S – střední šňůra, T – těžká šňůra, V – vodič pro VN
- 4. písmeno udává společnou izolaci, která je stejná jako u druhého písmena
- Dále pak pokračuje značení dalších vrstev (pancíř, plášť, stínění, atd.)
- Další značení udává počet žil
- Dále následuje písmeno udávající barevnou kombinaci
- Poslední značení je průřez jedné žíly

b) Evropské značení – má devět označení římskými písmeny, kde mezi šestou a devátou je pomlčka

- I – přepis  
H – harmonizovaný přepis, A – uznávaný národní typ
- II – jmenovité napětí [kV]  
3, 6, 10, 22, 35
- III – izolace žíly  
V – PVC, B – pryž, E – polyetylén, R – chloroprénový kaučuk, S – silikonový kaučuk
- IV – materiál pláště  
Stejně materiály jakou u III.
- V – vlastnosti vedení  
V – kulaté vedení, H – ploché vedení, H2 – ploché nerozdělitelné vedení
- VI – druh vodiče  
První části: Beze značky – měď, A – hliník, Z – speciální materiál,  
Druhá a třetí část: U – jeden drát, kruhový, R – vícedrátový kruhový,  
S – slané jádra, K – kabel, F – šňůra, H – velmi ohebné, R – vícedrátový
- VII – počet žil
- VIII – ochranný vodič  
X – bez ochranného vodiče, G – s ochranným vodičem
- IX – průřez vodiče

**Jádra vodičů** mohou mít následující tvary:

- a) kruhové,
- b) segmentové (kruhové výseče),
- c) trubkové,
- d) obdélníkové,
- e) trolejové.



Obr. č. 3 Tvary jader vodičů

**Provedení jádra** mohou být následující:

- a) plné jádro (malé průřezy),
- b) složené jádro (jednotlivá lanka, která omezují skinefekt).

Při průchodu střídavým proudem vodiče se ve vodiči vytváří magnetické pole, které indukuje vířivé proudy. Ty mají magnetické pole opačné vzhledem k vodiči a působí proti němu. Proud tekoucí vodičem je tak vytlačován na povrch vodiče a zvyšuje jeho odpor, což vede k oteplení vodiče a degradaci izolace. Tento jev se nazývá **skinefekt**. [11,12]

Nejčastěji používaný **materiál pro vodiče** všech průřezů je měď (Cu). U velkých průřezů a u AlFe lan se používá hliník (Al). U AlFe lan se jako nosný vodič používá ocel (Fe). [11,12]

Nejpoužívanější **izolační materiál** pro NN kabely je PVC nebo pryž (guma). Pro některé vodiče NN anebo vnější vrstvu izolace kabelů VN a VVN je polyetylen HDPE (vysokohustotní). Dále pro NN je izolace LDPE (nízkohustotní). U vodičů VN a VVN se používá zesíťovaný polyetylen – XPE. [11,12]  
Na kabelové vedení VN je kladený velký nárok z hlediska **pronikání vlhkosti**. [11,12]

Dělení kabelového vedení VN z pohledu opláštění a odolnosti proti vniknutí vodě:

- Opláštění kabelu:
  - jednoplášťový kabel,
  - dvouplášťový kabel.
  
- Odolnost proti vniknutí vody:
  - základní bariéra pod pláštěm,
  - přídatná bariéra v jádře kabelu,
  - vodotěsné provedení kabelu.

Základní ochrana je provedena ve všech typech kabelů. Přídavná bariéra v jádře kabelu je ochrana proti podélnému pronikání vody. Vodotěsné provedení kabelu je zvýšená ochrana proti vniknutí vody pod tlakem. [11,12]

Standartní kabel VN je s jedním pláštěm z lineárního polyetylenu s bariérou proti podélnému pronikání vody pod plášť. Použití tohoto typu můžeme najít v případech:

- uložení v zemi s nenatlakovanou spodní vodou,
- přívod do první distribuční trafostanice od místa napojení na dvouplášťový kabel jdoucí z rozvodny VN,
- u propojovacích distribučních vedení mezi jednotlivými distribučními trafostanicemi,
- u oprav poruch klasických kabelů.

Jednoplášťový kabel s přídavnou bariérou proti vniknutí vody se za normálních okolností nepoužívá. [11,12]

Jednoplášťový kabel ve vodotěsném provedení se používá při křížení kabelů s vodním tokem, anebo v případě uložení do země, kde se může nacházet tlaková spodní voda. [11,12]

Dvouplášťový kabel se základní bariérou proti vniknutí vody má přidaný plášť (PVC – odolnost proti plamenu), a používá se:

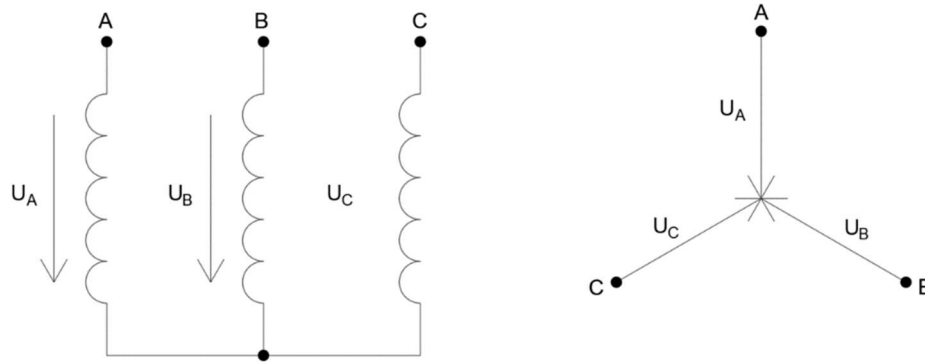
- u kolektorů,
- u propojů TR 110/22,35 kV a kobek,
- u vývodek z kobek rozvodny ke stožárům,
- u vývodek z kobek rozvodny ke spojce kabelového vedení

Dvouplášťový kabel se zvýšenou bariérou kvůli vniku vody anebo ve vodotěsném provedení se za normálních podmínek nepoužívá. [11,12]

## 1.4. Uzly sítě

Základní zapojení transformátoru je do hvězdy (Y, y), trojúhelníka (D, d) nebo lomené hvězdy (Z, z). Kde velké písmeno udává primární a malé písmeno sekundární stranu vinutí. U zapojení se také udává hodinový úhel, který vyjadřuje fázové posunutí sekundární strany napětí vůči fázovému napětí sekundární strany transformátoru. Označení fázového posuvu je po 30°, kdy 30° značí posunutí 1.

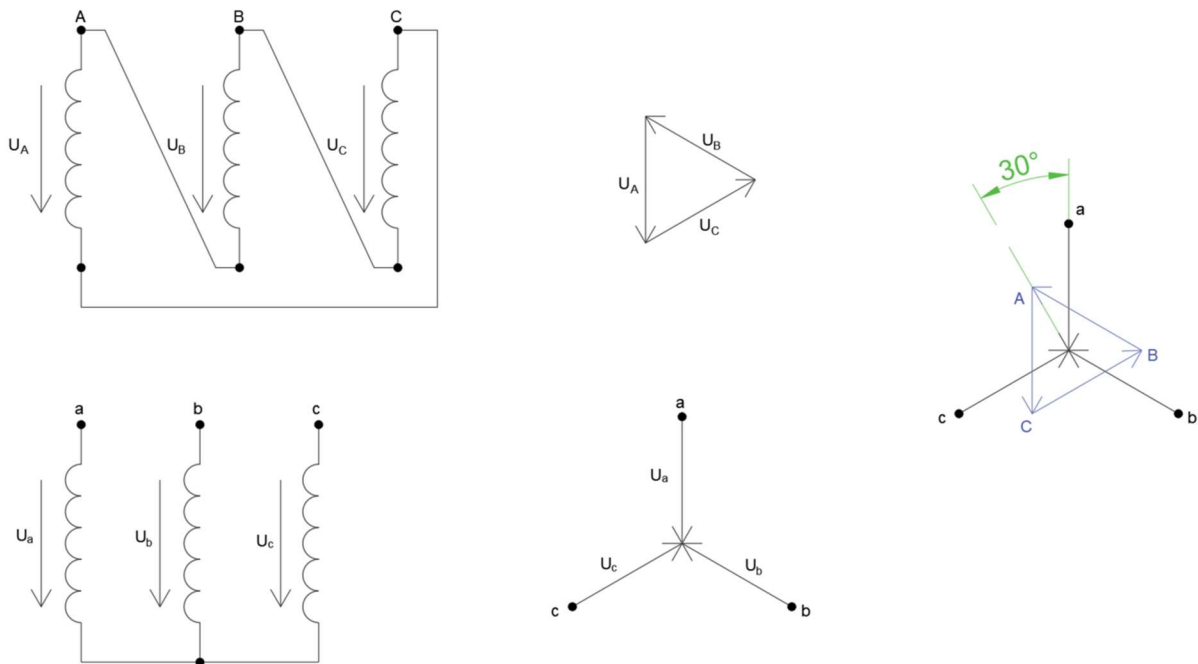
Při zapojení transformátoru do hvězdy nám vznikne střední bod sítě. U VN se rozlišuje podle způsobu uzlu, síť s izolovaným uzlem, s uzlem uzemněným přes odpor nebo uzemněným přes zhášecí tlumivku.



Obr. č. 4 Vinutí transformátoru zapojené do hvězdy

Nejčastěji se u transformátoru 22/0,4 kV používá zapojení Dyn1, které je znázorněno na obrázku č. 5. Primární vinutí transformátoru je zapojeno do trojúhelníku a sekundární vinutí do hvězdy, s fázovým posunem  $30^\circ$ .

Lomená hvězda se používá jen zřídka, především u malých výkonů transformátorů (do 100 kVA).



Obr. č. 5 Zapojení transformátoru Dyn1

## 1.5. Kvalita elektrické energie

Norma ČSN EN 50160 udává podmínky kvality elektrické energie pro připojení uživatelů do distribuční sítě za normálních provozních podmínek, jako je nepřetržitost dodávky elektrické energie a charakteristiky napětí. Norma také uvádí situace, které jsou uvedeny jako mimořádný provoz, ve kterých nemusí být dodrženy dané podmínky pro připojení. Mimořádné provozní podmínky mohou být následující:

- Dočasně zapojené sítě napájení, které mohou být následkem poruchy, údržby nebo výstavby,
- instalace, která neodpovídá podmínkám provozování distribuční sítě,
- výjimečné situace jako jsou (mimořádné povětrnostní podmínky, cizí zavinění, průmyslová činnost, vyšší moc, nedostatek výkonu, kvůli vnějším okolnostem.

Specifikace kvality elektrické energie jsou dány:

- Kmitočtem,
- velikostí,
- tvarem vlny,
- symetrií třífázových napětí.

Kvalita elektrické energie je ovlivňována vlivem zatížení na napájecí napětí a zpětným vlivem odběratelů a zdrojů na danou síť.

Typické případy rušení kvality elektrické energie je způsobeno:

- změnou frekvence
- přerušením napětí
- poklesy napětí
- přepětím
- kolísání napětí
- harmonickým zkreslení
- rázy
- elektrickým šumem

**Přerušení napájení** je stav, kdy napětí v předávacím místě je nižší než 5 % jmenovitého napětí. Lze jej dělit na plánované, poruchové (trvalé či přechodové), dlouhodobé (delší než tři minuty, kdy dojde k narušení nepřetržitosti dodávky elektrické energie) a krátkodobé (menší než tři minuty)

Ukazatel nepřetržitosti dodávky elektrické energie může být:

SAIFI – ukazatel četnost přerušení dodávky elektrické energie

SAIDI – ukazatel souhrnné doby přerušení dodávky elektrické energie

CAIDI – ukazatel průměrné doby trvání jednoho přerušení

ENS – ukazatel nedodané dodávky elektrické energie

**Pokles napětí** je dočasný pokles napájecího napětí pod hodnotu 90 %  $U_N$ , který může být způsoben poruchou v síti a následnou reakcí ochran nebo změnou zatížení v síti, která může být respektována například rozběhy motorů nebo dlouhotrvajícím zkratem.

Dovolené **odchyly napětí** jsou dány dle hladiny napětí. V případě hladiny 400 kV jsou dovolené odchyly napětí  $\pm 5\% U_N$  a u ostatních hladin napětí je dovolená odchylka  $\pm 10\% U_N$ . Pokud hodnota napětí stoupne nebo klesne nad uvedenou mez, jedná se o dočasné zvýšení, respektive pokles napětí.

**Rychlé změny napětí (flickr)**, přesněji efektivní hodnoty napětí, jsou změny mezi dvěma po sobě jdoucími úrovněmi napětí, které jsou v rozmezí  $\pm 10U_N$ . Tyto změny napětí mohou být způsobeny změnami zatížením spínáním velkých zdrojů nebo poruchou. **Kolísání napětí** je identifikována velká řada rychlých změn napětí nebo také cyklická změna napětí.

Nerovnoměrné zatížení jednotlivých fází, nesymetrie vedení nebo nesymetrie vlivem uzemnění může vést k **nesymetrii napětí**. Nesymetrie napětí se projevuje tak, že efektivní hodnoty napětí sdružené třífázové soustavy nejsou stejné, anebo jejich úhel není roven  $120^\circ$ .

Nelineární spotřebiče, které odebírají nesinusový průběh napětí, způsobují vzhledem k vyšším harmonickým napětí **harmonické zkreslení**.



## 2. Poruchové stavy

V elektrizační soustavě se mohou nacházet poruchové stavy, které ovlivňují a ohrožují bezpečnost jednotlivých prvků i celé soustavy. Poruchové stavy můžeme dělit na:

- Zkrat
- Zemní spojení
- Přetížení
- Podpětí
- Přepětí
- Nesouměrnost proudů a napětí

### 2.1. Zkrat

Nejčastějším elektromagnetickým přechodovým dějem v ES je zkrat. Zkrat se projevuje náhodným nebo úmyslným vodivým spojením mezi fázemi anebo mezi fází a zemí. [13]

U sítí účinně uzemněných se jedná o jednofázový zkrat, kde velikost poruchového proudu dosahuje několikanásobku hodnot provozního stavu. Takovýto stav omezuje další provozování dané části soustavy a musí dojít k rychlému odpojení. [13]

U sítí s neúčinně uzemněnou soustavou a izolovanou soustavou se jedná o zemní spojení. Proud tekoucí ZS dosahuje hodnot několika desítek ampér. Vzhledem k malému poruchovému proudu lze tento stav po určitou dobu dále provozovat. Doba provozu může být dána rychlostí určení místem poruchy. [13]

- Mezi hlavní příčiny vzniku zkratů patří:
  - porucha izolace,
  - porucha na elektrických zařízeních,
  - špatné dimenzování na tepelné a mechanické namáhání,
  - poškození vedení cizím zaviněním.
- Zkratové proudy působí především těmito vlivy:
  - tepelné působení,
  - mechanické síly,
  - pokles napětí do místa zkratu,
  - rušení,
  - omezené možnosti přerušování proudu vypínači.

Zkratky můžeme dělit na **souměrné** a **nesouměrné** zkratky. Toto rozdělení potřebujeme pro výpočet zkratových proudů. [13]

Souměrné zkratky jsou poruchy, kdy jsou postiženy všechny tři fáze. Nejčastějším typem souměrných zkratů jsou kabelová vedení, např.: vlivem působení elektrického oblouku. [13]

## 2.2. Zemní spojení

Zemní spojení se vyskytuje u sítí s izolovaným uzlem anebo neúčinně uzemněným uzlem. Neúčinně uzemněná síť má nulový bod transformátoru uzemněný přes impedanci. Účinně uzemněná síť má nulový bod transformátoru přímo spojen se zemí. Typy spojení uzlu transformátoru se zemí jsou důležitým ukazatelem pro vlastnosti chování sítě během vodivého spojení fáze se zemí. Hlavní vlastností ukazující na typ uzemnění, je velikost poruchového proudu a napětí mezi fázovým vodičem a zemí. [13]

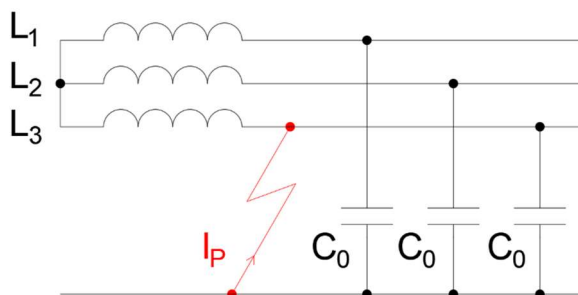
Posuzováním např.: velikosti proudu, jeho tepelným a dynamickým účinkům udává dimenzování a chránění soustavy. Podle velikosti napětí vodiče vůči zemi zjišťují potřebnou izolaci. [13]

Ke zjištění vzniku ZS můžeme využít tyto jevy:

- Pokles fázového napětí postižené fáze na nulu a u zdravých fází změny fázových napětí na hodnoty sdružené,
- vznik nulové složky napětí (napětí mezi uzlem transformátoru a zemí),
- vznik nulové složky proudu, kdy je jeho velikost třetinová oproti poruchovému proudu tekoucím přes ZS.

Hlavní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v to, že zkratový proud bývá mnohonásobně větší, než provozní proud a má indukční charakter. Oproti tomu místem ZS prochází poruchový proud  $I_P$  poměrně malý s kapacitním charakterem, který není závislý na vzdálenosti místa vzniku od zdroje. Obrázek číslo 6 zobrazuje zemní spojení v kapacitně souměrné izolované soustavě. [13]

Častou příčinou ZS u venkovního vedení VN jsou pády stromů na vedení. Další příčinou ZS bývají průrazy na izolátorech a selhání izolátorových vazů (pád vodičů na konzole). U kabelových vedení je provoz stabilnější. Nejčastější příčiny ZS jsou zde způsobeny cizími zásahy do kabelů a plášťové poruchy, které se vyskytují zejména u starších kabelů. [13]



Obr. č. 6 Zemní spojení v izolované síti

### 2.2.1. Druhy zemního spojení

Reálný pohled na ZS je velmi komplexní. V praxi se zaměřuje na ZS, která jsou charakteristická například svými průběhy netočivých složek proudů a napětí. Proto se ZS dělí podle několika vlastností:

- Podle velikosti odporu v místě ZS:
  - kovové ZS, kdy je hodnota přechodového odporu  $R_P \rightarrow 0 \Omega$  (popř. jednotky  $\Omega$ ),
  - obloukové ZS, hodnota  $R_P$  je v řádech jednotek  $\Omega$ ,
  - odporové ZS, hodnota  $R_P$  se pohybuje okolo několika stovek až tisíců  $\Omega$ .
- Podle doby trvání ZS:
  - mžiková ZS, doba působení ZS je do 0,5 s,
  - krátkodobá ZS, působení ZS je do pěti minut,
  - přerušované ZS, jedná se o mžikové nebo krátkodobé ZS, ale dochází k opětovnému zapálení oblouku, jde o nejhorší případ ZS,
  - trvalé ZS, doba trvání tohoto ZS je od 5 min. do doby odstranění poruchy.

### 2.2.2. Kapacitní proudy

Kapacitní proudy jednotlivých fází jsou dány velikostí a uspořádáním celého systému sítě. Dle platných norem, se uvažuje, že u venkovního holého vedení 22 kV bez zemního lana, je kapacitní proud 6 A / 100 km. U kabelových vedení 22 kV s izolací XLPE o průřezu vodiče 150 mm<sup>2</sup>, která jsou uspořádána do trojúhelníkového svazku je počítáno s kapacitním proudem v hodnotě 276 A / 100 km. Kapacita kabelového vedení roste oproti venkovnímu vedení zhruba 20 – 80x. [7]

V distribuční soustavě 22 kV za posledních několik let vzrostly hodnoty kapacitních proudů. Toto zvýšení kapacitního proudu není pouze důsledek vyšší míry kabelizace, ale také kvůli způsobu řízení soustavy. Hlavním cílem DS je nepřetržitost dodávky elektrické energie, které se snažíme dosáhnout s co největší bezporuchovostí. Tato snaha velmi příznivě ovlivňuje ukazatele SAIDI a SAIFI. Nyní se nastoluje trend provozování kabelových sítí se zhasací tlumivkou, protože nové kabely VN s izolací ze stíněného polyetylénu nejsou v takové míře náchylné na opakované poruchy, jako dřívější typy kabelů s izolací papíru. Díky tomuto novému trendu, může být kapacitní proud sítě do 400 A / 100 km. [7]

Zemní kapacitní proudy v sítích VN můžeme omezovat pomocí proměnné indukčnosti, která působí proti kapacitním proudům. Jako proměnné indukčnosti používáme zhasací tlumivku (nebo také kompenzační či Petersonovu tlumivku), která je připojena mezi nulový uzel sítě a zem. [7]

Podrobněji je kompenzační tlumivka rozebrána v kapitole 3.2.2.

### 3. Způsob provozu uzlu transformátoru v distribučních sítích

V přenosové soustavě má vinutí transformátoru vždy uzel účinně uzemněn.

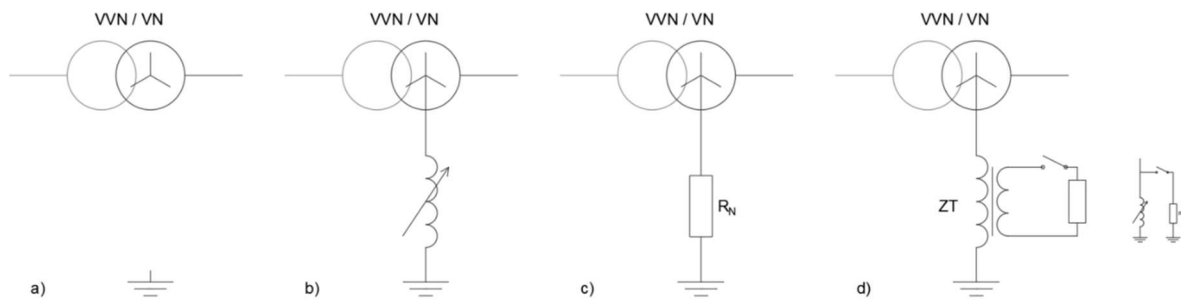
Na hladině napětí VN v distribuční soustavě, kvůli převažujícímu kabelovému vedení, máme uzly převážně zapojeny jako neúčinně uzemněny. Některé malé části distribuční soustavy VN, průmyslové sítě VN a vlastní spotřeba elektráren jsou provozovány s uzlem izolovaným. Ve velkých městech, u kabelového vedení VN, se používá zapojení uzlu přes rezistor. Vedení NN má způsob uzemnění pomocí uzemněného uzlu s vyvedeným nulovým vodičem. [7]

Dle typu uzemnění se dají zjistit informace o bezpečnosti, chránění dimenzování a nepřetržitosti dodávky elektrické energie dané sítě. V případě zdravých symetrických sítí se způsob uzemnění v bezporuchovém stavu neprojeví na provozu, ovšem při poruchovém stavu, kdy dojde k spojení jedné fáze se zemí, se do značné míry projeví způsob uzemnění. U sítě účinně uzemněné či uzemněné přes rezistor se tato porucha projeví jednofázovým zkratem. Jednofázový zkrat je charakteristický svojí vysokou hodnotou poruchového proudu, a proto je nutné ihned postiženou část sítě odepnout. V případě neúčinně uzemněných sítí nebo sítí izolovaných se u poruchy jedná o zemní spojení, které nabývá nižších hodnot proudu. Ovšem u zdravých nepostižených fází dojde ke zvýšení hodnot napětí na hodnoty sdružené. Vzhledem k nižším hodnotám proudu není nezbytně nutné tuto poruchu ihned vypnout. Lze ji v tomto poruchovém stavu ponechat na nezbytně nutnou dobu pro lokalizaci místa vzniku poruchy. [7]

Velikost poruchového proudu tedy závisí na typu systému sítě, proto mohou říci, že je důležitým ukazatelem. Nejčastější poruchy v DS jsou poruchy přechodného charakteru, které se vyskytují v drtivé většině u venkovního vedení. [7]

Způsob provozování uzlu soustavy:

- Izolovaná síť (obr. 7. a),
- nepřímo uzemněná síť – rezistor (obr. 7. c),
- nepřímo uzemněná síť (kompenzovaná síť) – přes zhášecí tlumivku (obr. 7. b),
  - laděná zhášecí tlumivka s připínáním pomocného odporu (obr. 7. d), kvůli navýšení činné složky poruchového proudu,
  - zhášecí tlumivka vybavená automatikou pro přizemnění postižené fáze v rozvodně.



Obr. č. 7 Systémy uzemnění sítí v distribučních soustavách vn

Každá možnost uzemnění uzlu transformátoru vykazuje různé vlastnosti, a proto se používá pro různé provozu DS (distribuční sítě) či LDS (lokální distribuční sítě). Nejčastějším neúčinně uzemněným typem v ČR je způsob se zhášecí tlumivkou. [7]

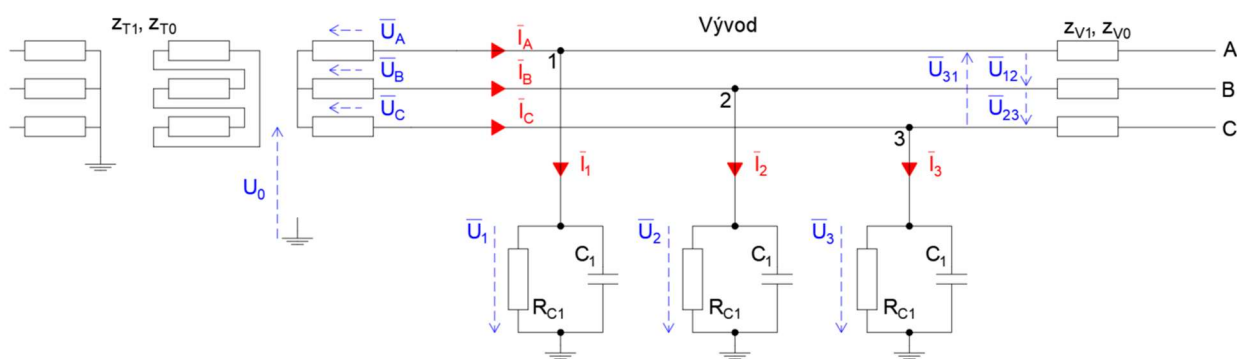
O způsobu uzemnění uzlu transformátoru v konkrétní vysokonapěťové síti je možné rozhodnout na základně některých důležitých kritérií, jako jsou například:

- Výsledný kapacitní proud soustavy,
- poruchový proud,
- poruchové napětí,
- přepětí,
- ferorezonanční přepětí, přenesená napětí,
- zamezení poruch,
- citlivosti ochran,
- omezení pomocných obvodů,
- investičních a provozních nákladů,
- bezpečnosti.

### 3.1. Izolovaný uzel v síti VN

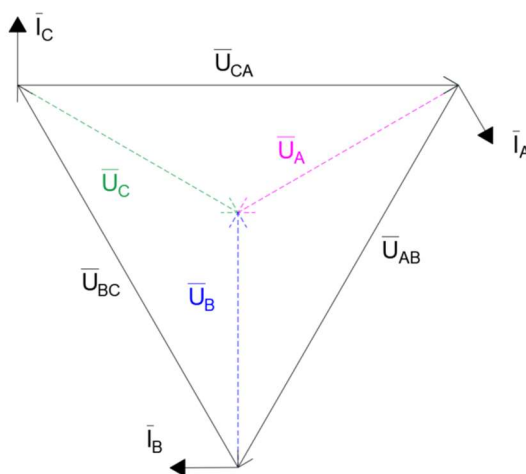
Izolovaný uzel transformátoru v síti VN se vyznačuje tím, že v ideálním případě je impedance mezi uzlem sítě a zemnicí soustavou nekonečná  $\bar{Z}_N \rightarrow \infty$ . S izolovaným uzlem se můžeme setkat u malých sítí VN a NN, kde hladina napětí bývá 0,5 kV a 0,69 kV. Jde ve většině případů o průmyslové závody, kde zemní poruchový proud bývá  $I_p < 20$  A. Pokud poruchový proud přesahuje 20 A, je nutné ho kompenzovat. [10]

V této síti nejsou připojeny žádné impedance mezi uzlem a zemí a ani mezi fázemi (obrázek č. 7 a). Výjimku tvoří přístrojové transformátory napětí, síťové kapacity proti zemi a svodové odpory vedení. [7,15]



Obr. č. 8 Obecné schéma izolované soustavy

V bezporuchovém stavu sítě, při napájení symetrickým zdrojem napětí, jsou u jednotlivých fází vedení kapacity proti zemi i svodové odpory přibližně symetrické. Dále jsou symetrická i napětí fází proti zemi a uzel má proti zemi téměř nulové napětí. Proudy síťových kapacit vzhledem k zemi mají stejnou velikost, ale jejich posunutí o  $120^\circ$  způsobí, že je jejich součet nulový. [7,15]



Obr. č. 9 Fázorový diagram proudů a napětí v izolované síti v bezporuchovém stavu

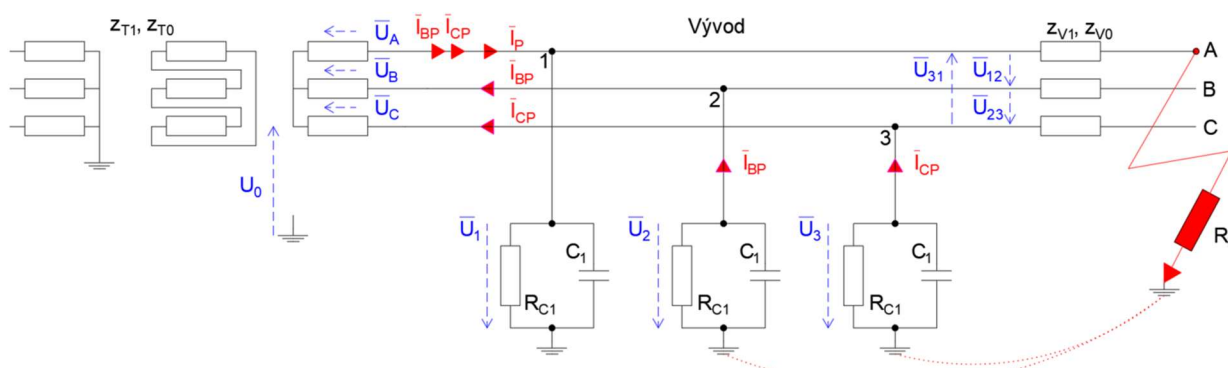
## Kovové zemní spojení

Kovová zemní porucha je taková porucha, při které zemní spojení má velmi malý přechodový odpor neboli velmi dobré uzemnění (např.: spínací stanice VN, trafostanice VVN/VN), kdy se jeho velikost blíží hodnotě 0.

Kapacitní proudy se určují měřením nebo výpočtem, v závislosti na délce vedení a na velikosti měrné kapacity proudu, kdy u kabelových vedení je velikost měrné kapacity proudu mnohonásobně větší, než je u venkovního vedení. Hodnota kapacitního proudu u kabelového vedení dosahuje jednotek A/km.

Kvůli kapacitnímu charakteru poruchového proudu dochází k znovu-zapalování oblouku, a proto je jeho zhášení náročné. Dále je zde nebezpečí krokového napětí. Hodnoty kapacitního proudu dle norem přípustější hodnoty pohybující se do 20 A.

Obrázek 10 znázorňuje zemní spojení v síti s izolovaným uzlem. Jde o 1-pólové kovové zemní spojení, které se nachází na fázi A.



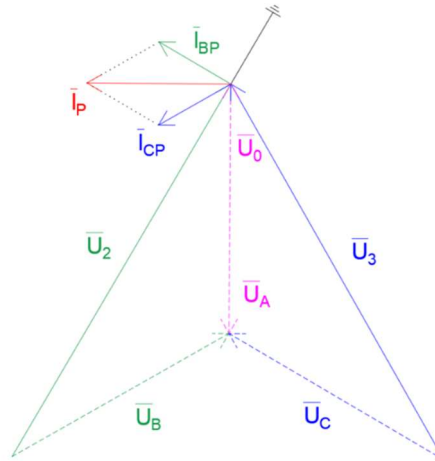
Obr. č. 10 Zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

Velká výhoda sítí s izolovaným uzlem je ta, že je zde snadná detekce zemní poruchy a také, že izolovanou síť může být v provozu po nezbytně nutnou dobu poruchy.

Poruchový proud je v izolované soustavě vyjádřen vztahem:

$$\bar{I}_p = j3\omega C \bar{U}_f \quad (4.01)$$

Jednopolové kovové zemní spojení v izolované síti má fázorový diagram dle obrázku 11.



Obr. č. 11 Fázorový diagram napětí a proudů jednofázové zemní poruchy v izolované síti

Pokud u jednofázového kovového zemního spojení platí, že se jedná o ideální a  $R_p = 0 \Omega$ , jsou platná následující fakta:

- Napětí postižené fáze je rovno 0,
- napětí zdravých fází vůči zemi vzroste z hodnot fázových na hodnoty sdružené,
- napětí na uzlu vzroste na fázovou hodnotu,
- poruchový proud s kapacitním charakterem sítě závisí na rozsahu sítě, tzn: úroveň poruchového proudu **nezávisí** na místě poruchy.

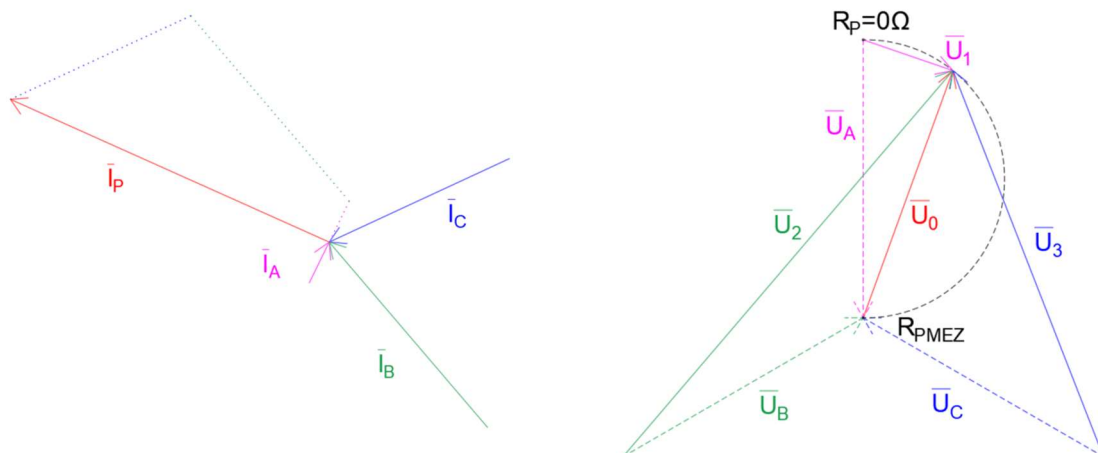
### Odporové a obloukové zemní spojení

Obloukové zemní spojení je velmi nebezpečné zemní spojení vzhledem ke krátkodobým přepětím a s tím souvisejícím proudovým špičkám. Tento typ ZS dosahuje hodnot přechodového odporu desítek až stovek  $\Omega$ . Vznik obloukového zemního spojení je spojeno s nestabilitou hoření oblouku, kdy se oblouk mžikově přerušuje.

Odporové zemní spojení dosahuje hodnot přechodového odporu stovek až tisíců  $\Omega$ . V případech, kdy má přechodový odpor hodnotu nad 1 k $\Omega$ , pak již mluvíme o tzv. vysoko-odporovém zemním spojení.

Drtivá většina jednofázových poruch má charakter odporového zemního spojení. Hodnota odporu má velký vliv na charakter poruchy a s tím souvisejících přechodových dějů, např.: přepětí, změny strmosti napětí a vybíjecí proud místem zemního spojení. Ovlivňuje také ustálenou hodnotu napětí a proudu místem zemního spojení.





Obr. č. 12 Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení

Obr. č. 13 Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení

Na obrázku 13 lze vidět změnu napětí v závislosti na hodnotě poruchového odporu při zemním spojení. Pokud hodnota odporu  $R_p=0\Omega$ , je fázor napětí systému roven fázovému napětí. Změna odporu poruchy je znázorněna pomocí opisu Thaletovy kružnice s průsečíkem v nulovém bodě systému, kdy hodnota odporu nabývá mezní hodnoty  $R_{PMEZ}$  a bodu fázoru napětí bez poruchy. V případě vzniku poruchy, kdy odpor nabývá hodnoty  $R_{PMEZ}$ , se systém zdá jako bezporuchový, protože místem poruchy protéká jen malý poruchový proud a napětí v uzlu se blíží nulové hodnotě.

### 3.2. Neúčinně uzemněný uzel v síti VN

V síti s neúčinně uzemněným uzlem transformátoru je nulový bod transformátoru se zemnicí soustavou spojen pomocí nenulové impedance  $\bar{Z}_N \neq 0$ . Nenulová impedance může být zhášecí tlumivka nebo odporník. [10]

#### 3.2.1. Neúčinně uzemněný uzel v síti VN pomocí zhášecí tlumivky

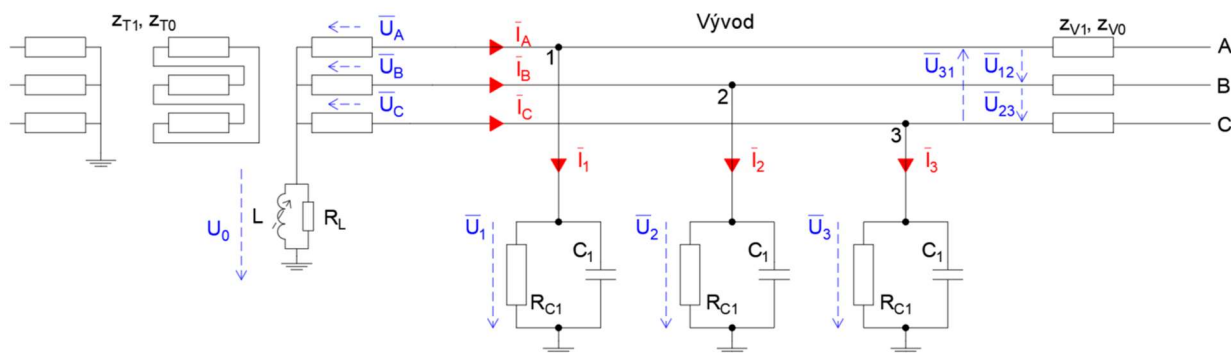
Sítě, kde zemní proud nabývá hodnoty 5 A, je doporučováno kompenzovat. Síť, kde poruchový proud nabývá hodnot 10 A nebo vyšší, je kompenzace nutná. [10,15]

Tato kompenzovaná síť má spojený nulový bod transformátoru se zemí přes kompenzační tlumivku (obrázek 7. b)). Kompenzační tlumivka kompenzuje poruchový zemní kapacitní proud pomocí induktivního proudu, poté místem poruchy protéká tzv. reziduální (zbytkový) proud, který nabývá hodnot do 10 % původního nevykompenzovaného proudu a jeho charakter je ve většině případů činný. [7,15]

Obvykle jsou sítě provozovány s hodnotou kapacitního proudu:

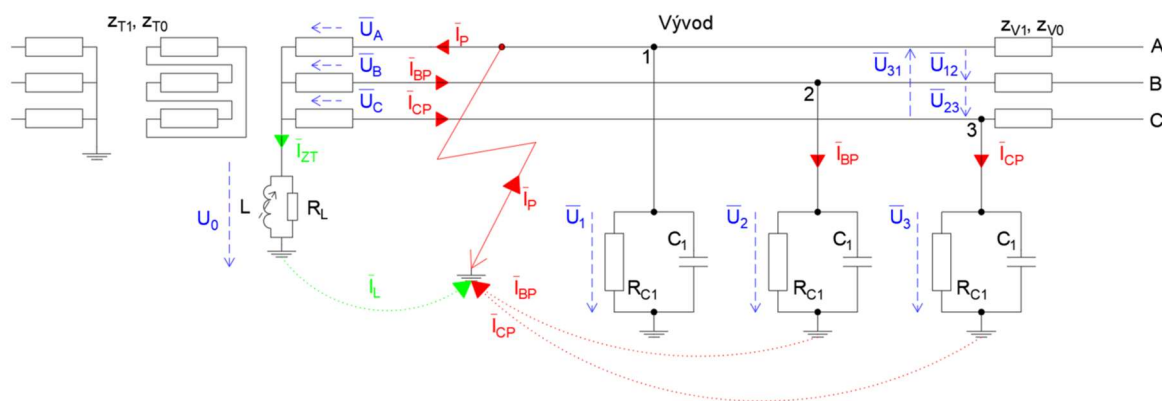
- Do 100 A jsou sítě venkovní, venkovní síť je tvořena alespoň 98 % celé sítě,
- do 300 A jsou sítě smíšené, ve kterých se nachází alespoň 10 % venkovního vedení, anebo alespoň 2 % vedení kabelového,
- do 450 A jsou sítě kabelové, kde kabelové sítě jsou tvořeny alespoň 90 % celé sítě.

V distribuční soustavě v ČR je používána centrální kompenzace, kdy se používá jedna zhášecí tlumivka, která je zapojena mezi uzel transformátoru a zemní uzel rozvodny. Ve výjimečných případech se používá paralelní kompenzace, kdy jsou tyto paralelně řazené tlumivky řízené automatikou. Velká výhoda kompenzované soustavy je ta, že stejně jako izolovanou soustavu, lze kompenzovanou soustavu provozovat se zemním spojením bez přerušení dodávky elektrické energie, po dobu nezbytně nutnou pro nalezení a odstranění příčiny vzniku poruchy. Ovšem při takto provozovaném stavu je vysoké riziko, že by zemní spojení mohlo přejít ve dvojité zemní spojení nebo mezifázový zkrat. [7,15]



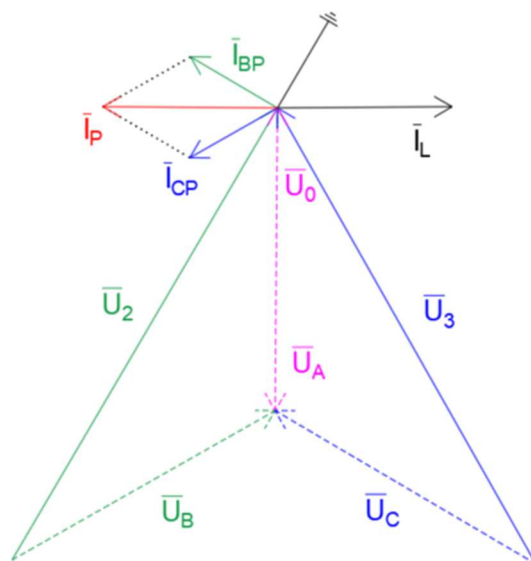
Obr. č. 14 Obecné schéma neúčinně izolované soustavy uzemněné přes kompenzační tlumivku

V bezporuchovém stavu symetrické sítě je napětí uzlu  $U_N = 0$ , při běžných nesymetriích nabývá hodnoty  $U_N < 0,001 U$ . V poruchovém stavu u dokonalého zemního spojení je napětí uzlu  $U_N = -U_A$ .



Obr. č. 15 Zemní spojení v kompenzované síti se zhášecí tlumivkou

V případě zemního spojení a dobře nastavené indukčnosti  $L$  tlumivky dojde ke kompenzaci poruchového proudu. Jelikož proud tlumivky  $I_L$  je v protifázi s kapacitními proudy zdravých fází, dojde k ideální kompenzaci, která je na obrázku 16.

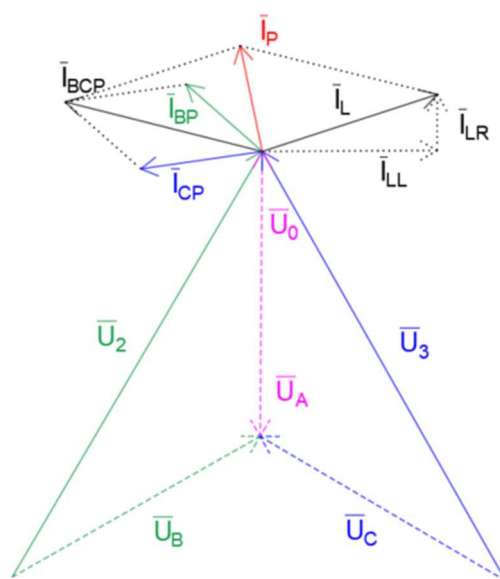


Obr. č. 16 Fázorový diagram napětí a proudu ideální kompenzované soustavy

Při ideální kompenzaci by tak netekl místem poruchy žádný poruchový proud a nevznikl by žádný oblouk. Hodnota indukčnosti zhasací tlumivky je při ideální kompenzaci v paralelní rezonanci vůči kapacitě sítě proti zemi. Hodnota indukčnosti se dá vyjádřit pomocí rovnice:

$$L = \frac{1}{3} \omega^2 C \quad (4.02)$$

Ovšem při reálné kompenzaci (obrázek 17), bude místem poruchy protékat zbytkový proud. Tento zbytkový proud je tvořen poruchovým proudem, který nebyl ideálně vykompenzován, činnou složkou zhasací tlumivky, svody vedením a vyššími harmonickými proudy.



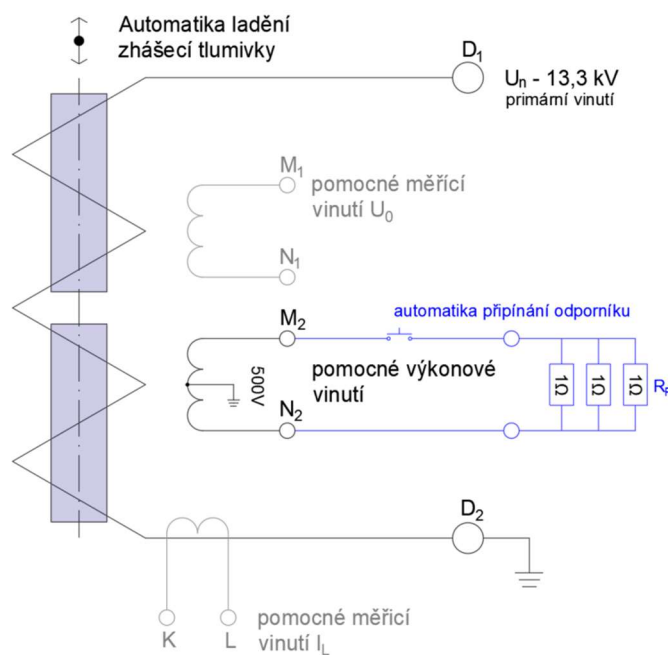
Obr. č. 17 Fázorový diagram napětí a proudu skutečně kompenzované soustavy

Poruchový proud je v případě dobře vykompenzované sítě nižší než kapacitní a má převážně činný charakter. Oblouky vzniklé v těchto podmínkách nemají tendenci se opět zapalovat a lze je lépe bezpečněji přerušit. U sítí, které mají velkou nesymetrii a malou rezistivitu může dojít k velkým hodnotám napětí na uzlu transformátoru, proto se v některých případech přidává k tlumivce paralelně odporník. Odporník sice zvýší poruchový proud, ale dojde také ke snížení napětí na uzlu transformátoru.

### 3.2.2. Zhášecí tlumivka a její rezonanční křivka

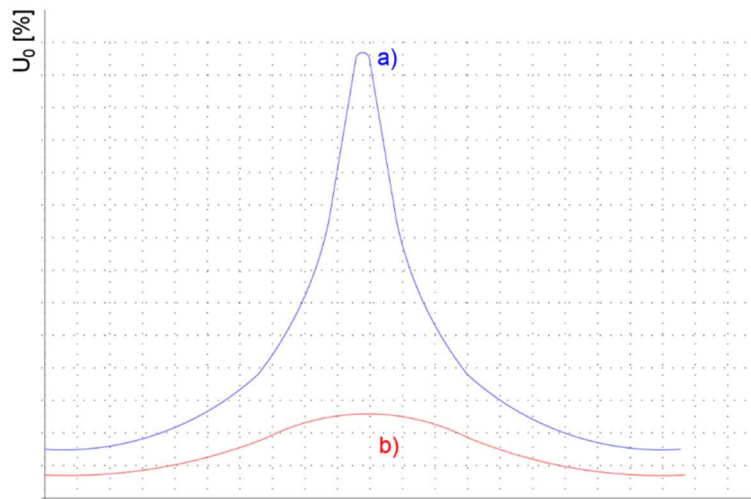
Zhášecí tlumivka se připojuje v rozvodnách DS, kde se připojuje k uzlu napájecího transformátoru. V případě, kdy uzel není vyveden, se připojuje zhášecí tlumivka k uměle vytvořenému uzlu třífázové nulové tlumivky. Počet zhášecích tlumivek se volí dle počtu napájecích transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a velikosti kapacitního proudu napájené sítě. [7,10]

Obrázek č. 8 zobrazuje běžnou zhášecí tlumivku. [7,10]



Obr. č. 18 Schéma zhášecí tlumivky s automatikou přepínání

Pro správnou kompenzaci kapacitních proudů je nutné znát rezonanční křivku soustavy. Rezonanční křivka zobrazuje závislost uzlového napětí  $U_0$  na kompenzačním proudem tlumivkou  $I_L$ . Tuto křivku zjišťujeme laděním zhášecí tlumivky, která je připojena k soustavě v bezporuchovém stavu a postupným odečítáním hodnot  $U_0$  a  $I_L$ . Rezonanční křivka u venkovního vedení má velké nesymetrie fázových napětí vůči zemi, a proto je její rezonanční křivka vysoká. Kabelová vedení mají naopak velmi dobrou symetrii fázových napětí. Dobrá symetrie se projeví nízkou rezonanční křivkou, která je vidět na obrázku číslo 19. Pro dobré nastavení, účinný chod tlumivky a vzhledem k malé rezonanční křivce se u kabelového vedení využívá tzv. umělé nesymetrie. [7,10]



Obr. č. 19 Rezonanční křivka a) venkovní vedení b) kabelové vedení

Tlumivka se nastavuje na rezonanční napětí  $U_{REZ}$ , kdy je kapacitní proud sítě zcela vykompenzován. Úplná kompenzace základní harmonické kapacitního proudu nelze provést kvůli nesymetriím příčných admitancí. Hodnota kompenzace nesymetrické soustavy tedy záleží na naladění zhášecí tlumivky a na fázi zemního spojení. V posledních letech převažují nejčastěji sítě úplně vykompenzované  $I_L = I_C$ , u kterých nabývá reziduální proud nejnižších hodnot. Ovšem lze se setkat i s případy, kdy je soustava mírně podkompenzovaná  $I_L < I_C$  nebo překompenzovaná  $I_L > I_C$ . [7,10]

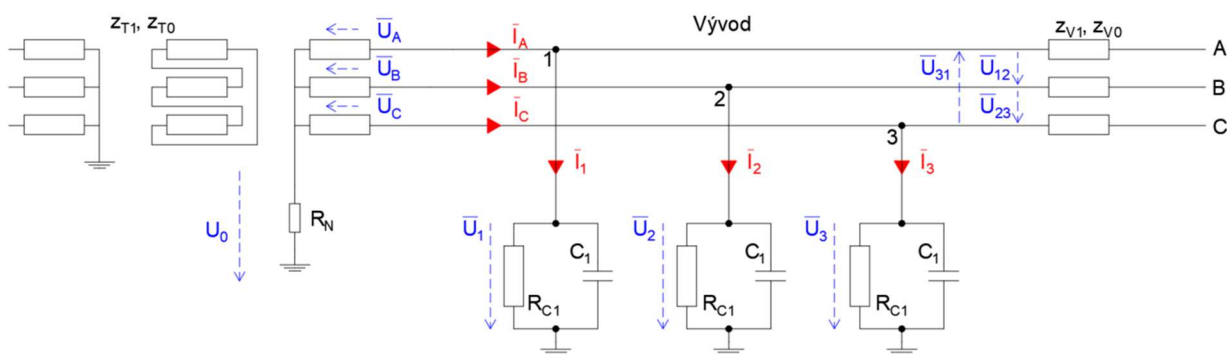
V ČR se nejčastěji setkáváme s automatickým laděním tlumivek. Hlavním úkolem automatiky je najít a zvolit hodnotu indukčnosti sítě tak, aby protékaný poruchový proud  $I_p$  byl co nejmenší. Při vyladěném stavu je na zhášecí tlumivce maximální napětí. [7,10]

Nevýhodou používaných tlumivek je možnost kompenzovat pouze základní harmonické kapacitních proudů. Vzhledem k vysokým hodnotám třetí, páté a sedmé harmonické kapacitního proudu v hustě obydlených částech a průmyslových částech, dochází ke zvýšení zbytkového proudu až na úroveň nebezpečných hodnot proudů. [7,10]

### 3.2.3. Neúčinně uzemněný uzel v síti VN pomocí odporníku

V případě venkovních vedení VN jsou výhody kompenzace velmi znatelné, ale u kabelového vedení tomu tak není. U kabelového vedení jsou poruchy nejčastěji trvalého charakteru. Při použití zhášecí tlumivky se při vzniku zemního spojení omezuje přepětí, ale v případě provozování soustavy s poruchou jsou namáhány izolace nepostižených fází hodnotou sdružených napětí, to s sebou nese riziko změny poruchy z přechodu jednopólové poruchy na vícenásobnou poruchu. Použití odporníku v soustavě se zemním spojením má za důsledek snížení poruchového proudu. Snížení poruchového proudu má výhody související s dimenzováním uzemnění, zajištění vhodného tlumení při zemním spojení, použití méně náročných ochranných a rychlé vypínání zemních proudů. Tyto vlastnosti zaručují, že se u sítí s nepřímo uzemněným uzlem přes odporník téměř nemůžeme setkat s vícenásobnou poruchou. [7]

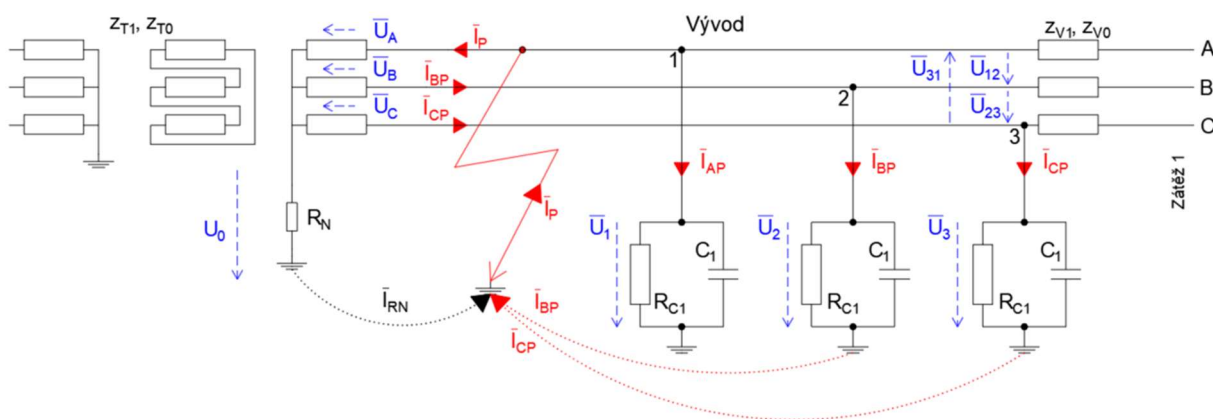
Největší vliv odporníku se projeví při jednopólových poruchách. Poměry ostatních druhů poruch odpovídají soustavě nepřímo uzemněné přes tlumivku. [7]



Obr. č. 20 Obecné schéma neúčinně izolované soustavy uzemněné přes odporník

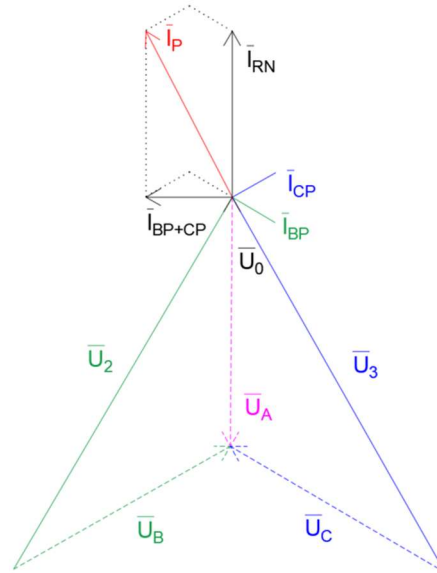
Hodnota odporníku se vzhledem k tlumení přepětí volí tak, aby jmenovitý proud odporníku byl vyšší než celkový kapacitní proud sítě. [10]

Obrázek 21 zobrazuje zemní spojení v nepřímo uzemněné síti přes odporník.



Obr. č. 21 Zemní spojení nepřímo uzemněné síti přes odporník

Fázory napětí a proudů při zemním spojení v blízkosti transformátoru, případ s největším poruchovým proudem, je znázorněné na obrázku 22. Čím vzdálenější je porucha od transformátoru, tím je poruchový proud menší, protože dojde k jeho omezení pomocí podélné impedance vedení.



Obr. č. 22 Fázorový diagram napětí a proudů při uzemnění s odporníkem

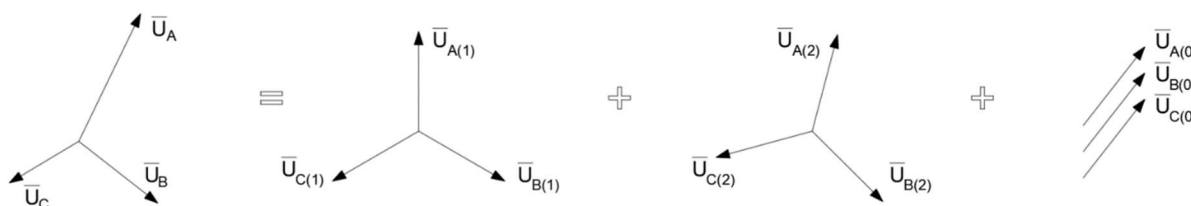
Vzhledem k potřebě snížení přepětí při zemním spojení se velikost odporníku volí tak, aby jmenovitý proud odporníku byl větší než poruchový proud sítě.

## 4. Výpočet proudových a napět'ových poměrů v kabelové síti VN

Při určování napět'ových a proudových poměrů nebo pro porovnání poměrů při různých způsobech uzemnění uzlu transformátoru v soustavách VN lze použít **metodu souměrných složek**.

### 4.1. Metoda souměrných složek

Metoda souměrných složek, nebo také metoda Fortescue, se používá pro vyhodnocení poruch v ustáleném stavu. Každá obecná nesymetrie třífázové soustavy se dá rozložit na tři souměrné soustavy, které se dělí na: **souslednou (1)**, **zpětnou (2)** a **nulovou (0)**.



Obr. č. 23 Rozložení nesymetrické soustavy na tři symetrické

Z obrázku 14 lze odvodit následující rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A(1)} + \bar{U}_{A(2)} + \bar{U}_{A(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B(1)} + \bar{U}_{B(2)} + \bar{U}_{B(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C(1)} + \bar{U}_{C(2)} + \bar{U}_{C(0)}\end{aligned}\tag{4.01.01}$$

Jako referenční hodnotu jsem si zvolil napětí  $\bar{U}_A$ , poté získám tyto rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{4.01.02}$$

kde,  $\bar{a}$  a  $\bar{a}^2$  jsou fázory napětí, které nabývají hodnot:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{a}^2 &= e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\end{aligned}\tag{4.01.03}$$

Rovnice vyjádřená pomocí Fortescue matice  $\bar{F}$  ve tvaru  $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_S$ :

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix}\tag{4.01.04}$$



Pomocí inverze matice získám maticový přepis pro jednotlivá složková napětí. Přepis matice je nyní  $\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_f$ , potom mohu zapsat matici:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.01.05)$$

Vyřešení matice mi dává následující vzorce:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \end{aligned} \quad (4.01.06)$$

Napětí zdroje lze získat sečtením symetrických napětí a symetrických úbytků:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{U}_{(2)} + \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{U}_{(0)} + \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \end{aligned} \quad (4.01.07)$$

Budu uvažovat souměrný zdroj napětí, tedy  $\bar{E}_{(2)} = \bar{E}_{(0)} = 0$  a pak platí, že:

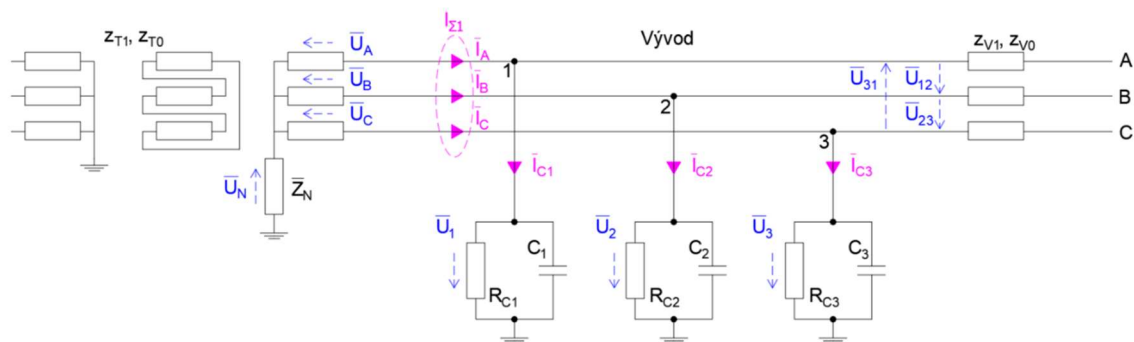
$$\begin{aligned} \bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \rightarrow \bar{U}_{(1)} = \bar{E}_{(1)} - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(2)} + \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \rightarrow \bar{U}_{(2)} = -\bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ 0 &= \bar{U}_{(0)} + \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \rightarrow \bar{U}_{(0)} = -\bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \end{aligned} \quad (4.01.08)$$

Pro výpočet proudů se použije stejný postup.

### Obecná síť s obecnou impedancí

Obecná síť s obecnou impedancí uzlu transformátoru vůči zemi  $\bar{Z}_N$  je zobrazena na obrázku č. 24. Stav uvedené sítě je bezporuchový a budu z něho vycházet při následujících výpočtech.

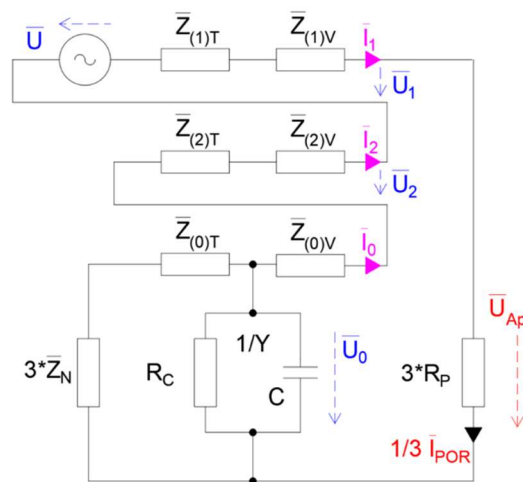
Fázorová napětí  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  znázorňují zdroj elektromotorického napětí.  $\bar{U}_{12}, \bar{U}_{23}, \bar{U}_{31}$  je znázornění mezifázových napětí. Napětí  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  a  $\bar{U}_3$  představují fázory napětí vůči zemi. Jde o připojení nesymetrického příčného članku k uzlům (1,2 a 3).



Obr. č. 24 Obecný model sítě s obecnou impedancí  $\bar{Z}_N$

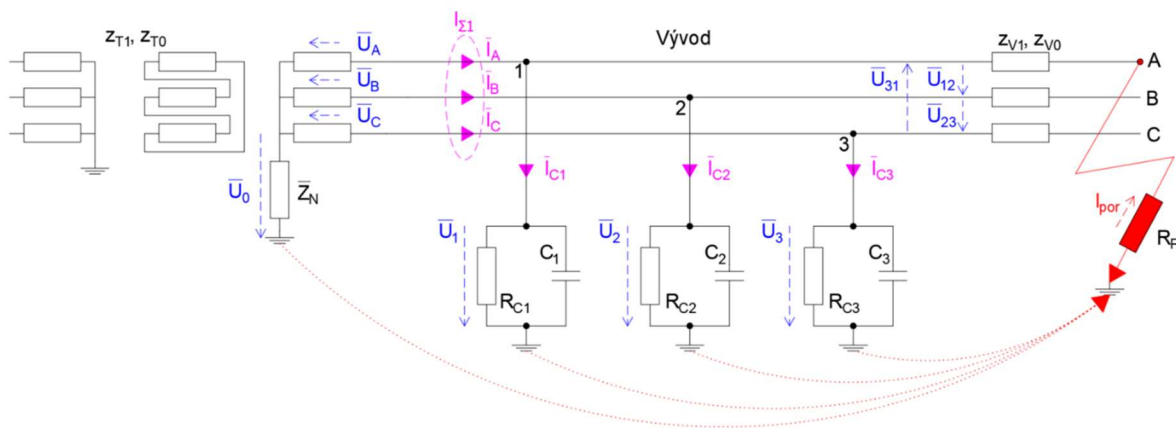
Při uvažování řešení poměrů v soustavě pomocí symetrických složek je nejprve nutné zvážit následující předpoklady, které povedou ke zjednodušení. Uvažujeme symetrický zdroj s napětím  $\bar{U}$  a mezifázové kapacity jsou zanedbány, pokud uvažujeme symetrickou soustavu, jsou si jednotlivé kapacity fází proti zemi rovny, a tedy platí, že:  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ .

Obrázek číslo 25 ukazuje obecné náhradní schéma uzemněné přes obecnou impedanci  $\bar{Z}_N$ .



Obr. č. 25 Obecné náhradní schéma

Zemní spojení poruší symetrii příčných impedancí vedení proti zemi. V místě poruchy s odporem  $R_P$  protéká poruchový proud  $\bar{I}_P$ , ovšem napětí uzlu proti zemi a velikost amplitud a fázového posunutí kapacitních proudů v jednotlivých fázích se změní. Příklad ZS je na obrázku č. 26.



Obr. č. 26 Obecný model VN soustavy při vzniku jednopólové poruchy

Dle obrázku č. 26 musí v místě napájecí rozvodny platit, že:

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_A - \bar{U}_0 = 0,$$

$$\bar{U}_2 - \bar{U}_B - \bar{U}_0 = 0,$$

$$\bar{U}_3 - \bar{U}_C - \bar{U}_0 = 0,$$

(4.01.09)

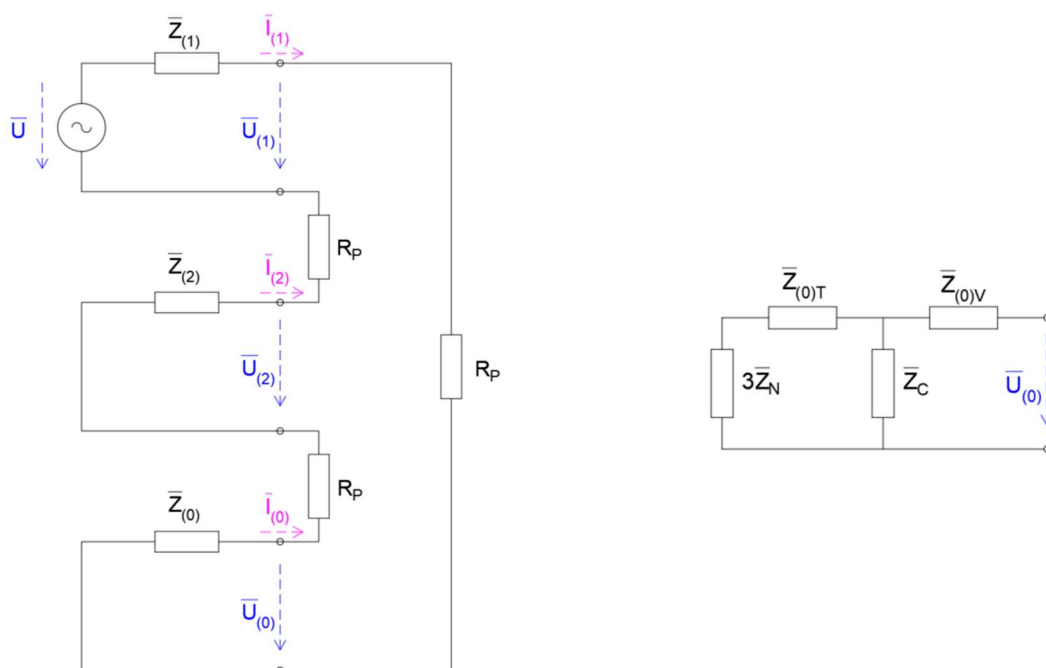
U kovového ZS pak platí pro napětí fázová v rozvodně, že jsou:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= 0, \\ \bar{U}_0 &= -\bar{U}_A, \\ \bar{U}_2 &= \bar{U}_B + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a}^2) \cdot \bar{U}_A = -\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot \bar{U}_A, \\ \bar{U}_3 &= \bar{U}_C + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a}) \cdot \bar{U}_A = -\sqrt{3} \cdot e^{-j30^\circ} \cdot \bar{U}_A,\end{aligned}\tag{4.01.10}$$

kde,  $\bar{U}_0$  je napětí uzlu vůči zemi.

Lze též vycházet z náhradního schéma soustavy ve složkovém tvaru (obrázek číslo 27) pro určení proudových a napěťových poměrů a výsledného poruchového proudu. V tomto případě je sousledná složka impedance vedení  $\bar{Z}_{(1)V}$  a transformátoru  $\bar{Z}_{(1)T}$  zahrnuta v složce impedance  $\bar{Z}_1$ , stejně tak je řešena i zpětná složka impedance  $\bar{Z}_2$ , ve které je zahrnuta zpětná složka impedance vedení  $\bar{Z}_{(2)V}$  a transformátoru  $\bar{Z}_{(2)T}$ .

Netočivá složka impedance  $\bar{Z}_0$  je znázorněna na obrázku 28. Zde bych měl zahrnout i impedanci nadřazené soustavy a impedanci generátoru, ovšem pro vyjádření poměrů na vývodu soustavy s poruchou tyto impedance vzhledem k jejich velikostem zanedbám.  $3 \cdot \bar{Z}_N$  je trojnásobek obecné impedance v uzlu transformátoru,  $\bar{Z}_{(0)T}$ ,  $\bar{Z}_{(0)V}$  impedance netočivé složky transformátoru a vedení. Impedance  $\bar{Z}_C$  znázorňuje celkovou kapacitu soustavy. Kapacitní reaktance soustavy výrazně převyšuje rezistanci a indukční reaktanci.



Obr. č. 27 Složkové schéma u jednopólové poruchy příčné nesymetrie

Obr. č. 28 Netočivá složka impedance jednopólové poruchy příčné nesymetrie

Z obrázku 27 je patrné, že:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_A = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3 \cdot R_P} \quad (4.01.11)$$

Poruchový proud  $\bar{I}_P$  se rovná proudu  $\bar{I}_A$ , ale jeho orientace je opačná.

$$\bar{I}_P = -\bar{I}_A = -3 \cdot \bar{I}_{(1)} = \frac{-3 \cdot \bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3 \cdot R_P} \quad (4.01.12)$$

Pro napětí souměrných složek tedy platí:

$$\bar{U}_{(1)} = \bar{U}_f - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} = \frac{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f, \quad (4.01.13)$$

$$\bar{U}_{(2)} = -\bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(1)} = -\bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(1)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f, \quad (4.01.14)$$

$$\bar{U}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f. \quad (4.01.15)$$

Fázová napětí jsem stanovil ze soustav rovnic 5.01.2 a 5.01.13-5.01.15:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \frac{3R_P}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f, \quad (4.01.16)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left( \bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \cdot \bar{U}_f, \quad (4.01.17)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left( \bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \cdot \bar{U}_f. \quad (4.01.18)$$

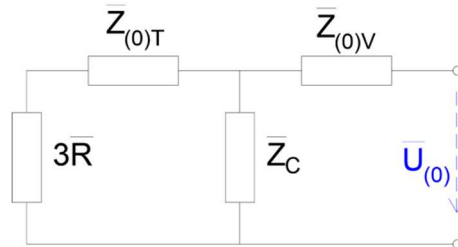
Fázor napětí uzlu je dán rovnicí:

$$\bar{U}_N = \bar{U}_0 = -\bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{3 \cdot R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f. \quad (4.01.19)$$

Dle uvedených vztahů víme, že napěťové a proudové poměry v síti jsou ovlivňovány charakterem uzemnění sítě, neboli netočivou složkou impedance.

### 4.1.1. Uzel uzemněný přes rezistor

Uzemnění nulového uzlu transformátoru přes odporník se projeví v náhradním složkovém schématu změnou obecné impedance na trojnásobek odporu odporníku. Provedl jsem zjednodušení a zanedbání podélné impedance, svodů a činné složky indukčnosti. Schéma je znázorněno na obrázku 29.



Obr. č. 29 Schéma netočivé složky pro uzel uzemněný přes odporník

Při zanedbání impedance transformátoru a vedení je velikost netočivé složky dána vztahem:

$$\bar{Z}_{(0)} = \frac{j3RX_C}{jX_C - 3R} \quad (4.01.20)$$

Vztah pro poruchový proud je dán:

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)}} = -\frac{jX_C - 3R}{jRX_C} \cdot \bar{U} = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \quad (4.01.21)$$

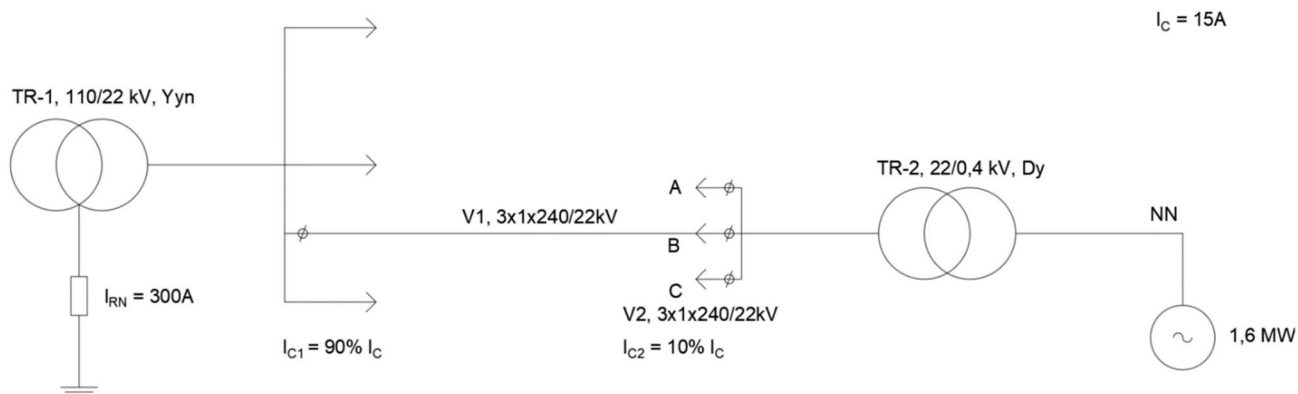
Porucha s přechodovým odporem lze vypočítat dle rovnic:

$$\bar{U}_N = -\frac{R}{R + R_p + j(3\omega C \cdot R_p \cdot R)} \cdot \bar{U}$$

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_p} = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \cdot \bar{U} \cdot \frac{R}{R + R_p + j(3\omega C \cdot R_p \cdot R)} \quad (4.01.22)$$

## 4.2. Řešení konkrétní sítě

V této kapitole se budu zabývat výpočtem nepřímo uzemněné sítě pomocí odporníku a budu používat metodu Fortescue.



Obr. č. 30 Zadané schéma VN soustavy s uzemněním přes odporník

Tabulka 2 Parametry transformátoru TR-1 40 MVA, 110 ± 8x2% / 23 kV ETD

Jmenovitý výkon	$S_{NT}$	[MVA]	40
Proud nakrátko	$u_K$	[%]	11,5
Proud naprázdno	$i_0$	[%]	15
Ztráty naprázdno	$dP_0$	[kW]	19,5
Ztráty nakrátko	$dP_K$	[kW]	110
Převod	$p$	[-]	110/23

Tabulka 3 Parametry transformátoru TR-2 630 kVA, 22 / 0,4 kV

Jmenovitý výkon	$S_{NT}$	[kVA]	630
Proud nakrátko	$u_K$	[%]	6
Proud naprázdno	$i_0$	[%]	12
Ztráty naprázdno	$dP_0$	[kW]	0,6
Ztráty nakrátko	$dP_K$	[kW]	6,2
Převod	$p$	[-]	22/0,4

Tabulka 4 Parametry kabelu, AXEKVCEz 3x1x240/25

Kapacitní proud vývodu	$I_{C0}$	[A]	15
Svody	$I_w$	[A]	0,3 (2% $I_{C0}$ )
Odpor	$R_V$	[ $\Omega$ /km]	0,125
Indukčnost	$L_V$	[mH/km]	0,34
Kapacita	$C_0$	[ $\mu$ F/km]	0,27
Délka vývodu V1	$l_{K-1}$	[km]	1,68
Délka vývodu V2	$l_{K-2}$	[km]	0,1

### 4.3. Výpočet parametrů náhradního schéma

Z tabulek číslo 2, 3 a 4 vypočítám požadované parametry náhradního schématu VN sítě, který bude potřeba k použití metody Fourtescue.

#### 4.3.1. Výpočet prvků transformátoru 110/23 kV

$$Z_{T1} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT1}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{22000^2}{40 \cdot 10^6} = 1,3915 \Omega \quad 4.03.01$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_K}{S_{NT1}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT1}} = \frac{110000}{40 \cdot 10^6} \cdot \frac{22000^2}{40 \cdot 10^6} = 0,0333 \Omega \quad 4.03.02$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{1,3915^2 - 0,0333^2} = 1,3911 \Omega \quad 4.03.03$$

#### 4.3.2. Výpočet prvků transformátoru 22/0,4 kV

$$Z_{T2} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT2}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{22000^2}{630 \cdot 10^3} = 46,0952 \Omega \quad 4.03.04$$

$$R_{T2} = \frac{\Delta P_K}{S_{NT2}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT2}} = \frac{6200}{630 \cdot 10^3} \cdot \frac{22000^2}{630 \cdot 10^3} = 7,5606 \Omega \quad 4.03.05$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = \sqrt{46,0952^2 - 7,5606^2} = 45,4710 \Omega \quad 4.03.06$$

#### 4.3.3. Výpočet vývodů sítě VN

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{22000}{\sqrt{3}} = 12701,7059 V \quad 4.03.07$$

$$C_0 = \frac{I_{C0}}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot U_f} = \frac{15}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot U_f} = 1,2530 \mu F \quad 4.03.08$$

$$X_{C0} = \frac{1}{C_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = \frac{1}{1,253 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 2540,3412 \Omega \quad 4.03.09$$

$$R_0 = X_{C0} \cdot \frac{100}{2} = 2540,3412 \cdot \frac{100}{2} = 127\,017,0592 \Omega \quad 4.03.10$$

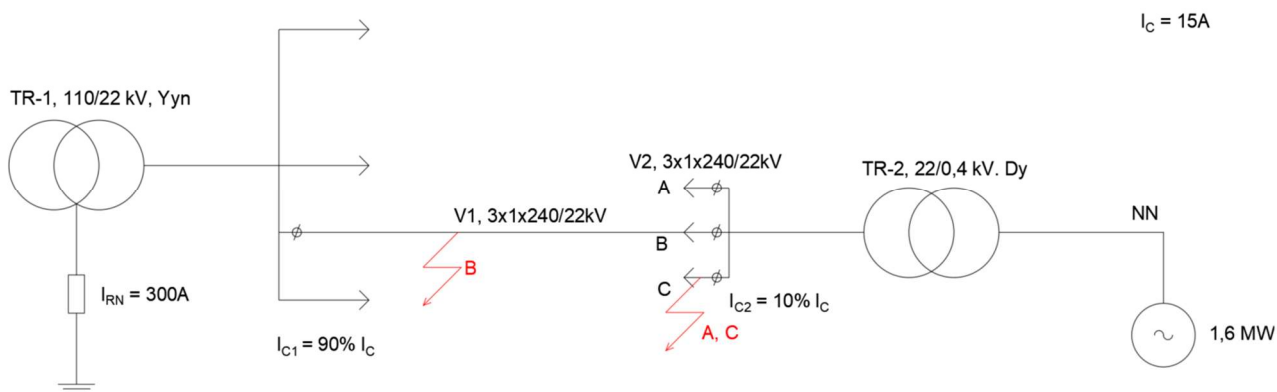
#### 4.3.4. Výpočet parametrů sítě VN

$$R_{V1} = l_{V1} \cdot R_{v\Omega} = 1,68 \cdot 0,125 = 0,2100 \Omega \quad 4.03.11$$

$$X_{V1} = l_{V1} \cdot L_{v\Omega} \cdot \omega = 1,68 \cdot 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 0,1794 \Omega \quad 4.03.12$$

$$R_{V2} = l_{V2} \cdot R_{v\Omega} = 0,1 \cdot 0,125 = 0,125 \Omega \quad 4.03.13$$

$$X_{V2} = l_{V2} \cdot L_{v\Omega} \cdot \omega = 0,1 \cdot 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 0,0107 \Omega \quad 4.03.14$$



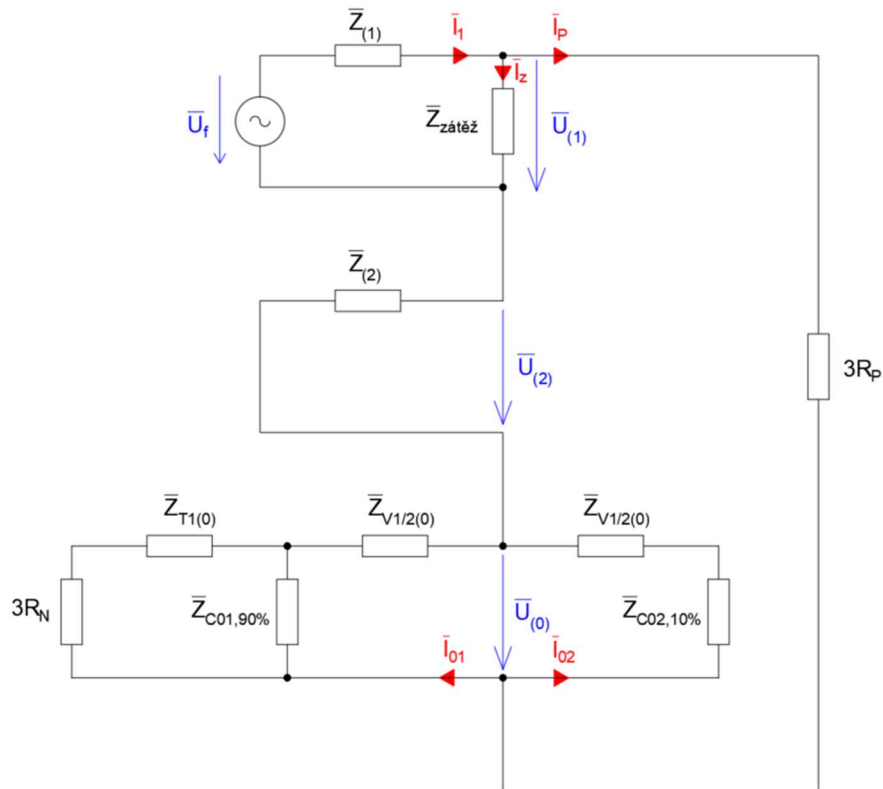
Obr. č. 31 Zadané schéma VN soustavy s označenými místy poruchy

#### 4.4. Výpočet parametrů soustavy v místě poruchy B s využitím metody Fortescue

Síť je uzemněna pomocí transformátoru TR1 s odporníkem. V případě jednopólové poruchy v místě B si nejprve převedu schéma soustavy do náhradního složkového schématu. Generátor na straně NN je v případě zemního spojení v soustavě z obrázku 31 zanedbán, protože při ZS složí pouze pro dodávání jalového výkonu od soustavy. Svodový proud je u daného kabelu roven dvěma procentům činné složky kapacitního proudu sítě, a proto svodový proud nabývá malých hodnot a je možné ho zanedbat. Místo poruchy B je zvoleno přesně uprostřed kabelového vedení. Zátěž je činného charakteru s hodnotou 20 A, transformátor TR-2 je tak zatížen na 70 %. Hodnota proudu odporníku je dle zadání 300 A, to odpovídá hodnotě odporu  $3R_N = 130 \Omega$ . Kapacitní proud celé sítě je dán součtem jednotlivých vývodů a jeho hodnota je  $I_C = 15 \text{ A}$  a je rozdělen v poměru 9/1. Na obrázku 32 je znázorněno náhradní složkové schéma soustavy s jednopólovou poruchou v bodě B. Porucha je uvažována jako kovové zemní spojení s přechodovým odporem blízkým 0.

Impedance  $Z_1$  a  $Z_2$  představuje souslednou, respektive zpětnou složku pro dané schéma, ve které je zahrnut odpor a reaktanci vedení V1 a transformátoru T1.





Obr. č. 32 Náhradní složkové schéma soustavy s jednopólovou poruchou v místě B

Dle obrázku 32 si pomocí metody Fourtescue vypočtu jednotlivé parametr soustavy:

Výpočet potřebných parametrů pro matici:

$$\bar{Z}_{T1(1)} = \bar{Z}_{T1(2)} = \bar{Z}_{T1(0)} = R_{T1} + jX_{T1} = 0,0333 + j1,3911 \, \Omega \quad 4.04.01$$

$$\bar{Z}_{V1(1)} = \bar{Z}_{V1(2)} = \bar{Z}_{V1(0)} = R_{V1} + jX_{V1} = 0,21 + j0,1795 \, \Omega \quad 4.04.02$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)} = \bar{Z}_{T1(1)} + \bar{Z}_{V1(1)} &= 0,0333 + j1,3911 + 0,21 + j0,1795 & 4.04.03 \\ &= 0,2433 + j1,5705 \, \Omega \end{aligned}$$

Výpočet celkové impedance soustavy:

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{T1(0)} + 3R_N = 0,0333 + j1,3911 + 130 = 130,0333 + j1,3911 \, \Omega \quad 4.04.04$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{C0190\%} &= \frac{R_{C0} \cdot jX_{C0}}{R_{C0} + jX_{C0}} = \frac{127017,0592 \cdot (-j2540,3412)}{127017,0592 - j2540,3412} & 4.04.05 \\ &= \frac{0,9}{0,9} = 56,4295 - j2821,4727 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{20} &= \frac{\bar{Z}_{10} \cdot \bar{Z}_{C0190\%}}{\bar{Z}_{10} + \bar{Z}_{C01\%}} = \frac{(130,0333 + j1,3911) \cdot (56,4295 - j2821,4727)}{(130,0333 + j1,3911) + (56,4295 - j2821,4727)} & 4.04.06 \\ &= 129,7663 - j4,5864 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{30} = \bar{Z}_{20} + \bar{Z}_{V1/2(0)} &= 129,7663 - j4,5864 + (0,21 + j0,1795) \cdot 0,5 & 4.04.07 \\ &= 129,8714 - j4,4966 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_Z = \frac{U_f}{\bar{I}_Z} = \frac{12701,7059}{20} = 650 \Omega \quad 4.04.08$$

$$\bar{Z}_{C0210\%} = \frac{R_{C0} \cdot jX_{C0}}{R_{C0} + jX_{C0}} = \frac{127017,0592 \cdot (-j2540,3412)}{127017,0592 - j2540,3412} \quad 4.04.09$$

$$= \frac{0,1}{0,1} = 507,8651 - j25393,2545 \Omega$$

$$\bar{Z}_{C02V} = \bar{Z}_{C0210\%} + \bar{Z}_{V1/2(0)} = 507,8651 - j25393,2545 + (0,21 + j0,1795) \cdot 0,5 \quad 4.04.10$$

$$= 507,9701 - j25393,1648 \Omega$$

$$\bar{Z}_{(0)} = \frac{\bar{Z}_{30} \cdot \bar{Z}_{C02V}}{\bar{Z}_{30} + \bar{Z}_{C02V}} = \frac{(129,8714 - j4,4966) \cdot (507,9701 - j25393,1648)}{(129,8714 - j4,4966) + (507,9701 - j25393,1648)} \quad 4.04.11$$

$$= 129,8087 - j5,1584 \Omega$$

$$\bar{Z}_{40} = \bar{Z}_{(0)} + \bar{Z}_{(2)} + 3 \cdot R_P = 129,8087 - j5,1584 + 0,2433 + j1,5705 + 0 \quad 4.04.12$$

$$= 130,0550 - j3,5878 \Omega$$

$$\bar{Z}_{50} = \frac{\bar{Z}_{40} \cdot \bar{Z}_Z}{\bar{Z}_{40} + \bar{Z}_Z} = \frac{(130,0550 - j3,5878) \cdot 650}{130,0550 - j3,5878 + 650} = 108,3829 - j2,4911 \Omega \quad 4.04.13$$

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{50} = 0,2433 + j1,5705 + 108,3829 - j2,4911 \quad 4.04.14$$

$$= 108,6263 - 0,9206 \Omega$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{U_f}{\bar{Z}_C} = \frac{12701,7059}{108,6263 - 0,9206} = 119,6678 + j10142 A \quad 4.04.15$$

$$\bar{I}_{(2)} = \bar{I}_P = \frac{U_f - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{40}} \quad 4.04.16$$

$$= \frac{12701,7059 - (119,6678 + 10142) \cdot (0,2433 + j1,5705)}{130,0550 - j3,5878}$$

$$= 99,7101 + j1,3037 A$$

$$\bar{I}_{(0)} = \bar{I}_P - \frac{U_f}{\bar{Z}_{C02V}} = 99,7101 + j1,3037 - \frac{12701,7059}{507,9701 - j25393,1648} \quad 4.04.17$$

$$= 99,7339 + j1,8132 A$$

$$\bar{U}_{(1)} = U_f - \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} \quad 4.04.18$$

$$= 12701,7059 - (0,2433 + j1,5705) \cdot (119,6678 + 10142)$$

$$= 12972,4806 - j188,1909 V$$

$$\bar{U}_{(2)} = -\bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)} = -(0,2433 + j1,5705) \cdot (99,7101 + j1,3037) \quad 4.04.19$$

$$= -22,2094 - j156,9169 V$$

$$\bar{U}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(0)} = -(129,8087 - j5,1584) \cdot (99,7339 + j1,8132) \quad 4.04.20$$

$$= -12949,9720 + j345,1118 V$$

Výpočet napětí pomocí Fortescue matice  $\bar{F}$ , lze vyjádřit v maticovém tvaru  $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_s$ :

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.04.21 \\ &= 12972,4806 - j188,1909 - 22,2094 - j156,9169 \\ &\quad - 12949,9720 + j345,1118 = 0,2991 + j0,0039 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.04.22 \\ &= \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (12972,4806 - j188,1909) + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &\quad \cdot (-22,2094 - j156,9169) - 12949,9720 + j345,1118 \\ &= -19452,1917 - j10736,0659 \text{ V} \end{aligned}$$

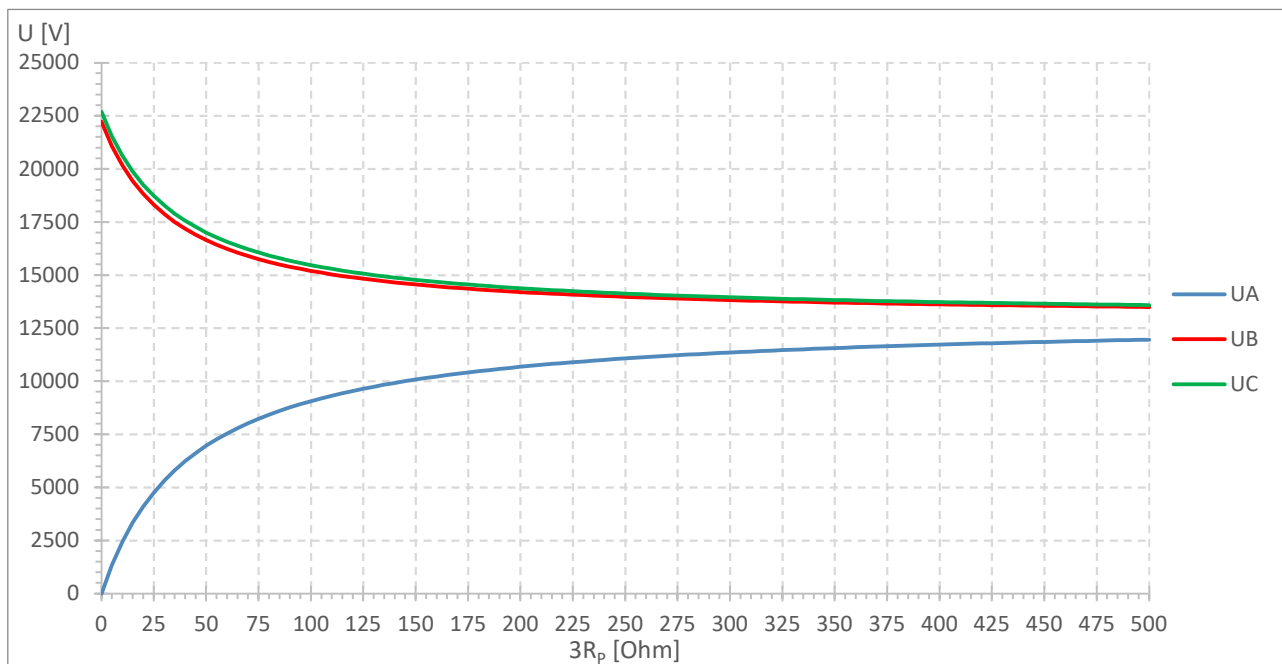
$$\begin{aligned} \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.04.23 \\ &= \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (12972,4806 - j188,1909) + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &\quad \cdot (-22,2094 - j156,9169) - 12949,9720 + j345,1118 \\ &= -19398,0234 + j11771,3975 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} & 4.04.24 \\ &= 119,6678 + j10142 + 99,7101 + j1,3037 + 99,7339 \\ &\quad + j1,8132 = 319,1119 + j4,1310 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_B &= \bar{a}^2 \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} & 4.04.25 \\ &= \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (119,6678 + j10142) + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &\quad \cdot (99,7101 + j1,3037) + (99,7339 + j1,8132) \\ &= -10,2058 - j16,6296 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_C &= \bar{a} \bar{I}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} & 4.04.26 \\ &= \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot (119,6678 + j10142) + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &\quad \cdot (99,7101 + j1,3037) + (99,7339 + j1,8132) \\ &= -9,7043 + j17,9381 \text{ A} \end{aligned}$$

Jak bylo uvedeno, výše uvedené hodnoty jsou pro odpor poruchy  $R_P = 0 \Omega$ . V případě proměnného odporu se výsledné hodnoty mění. Na obrázku 33 jsou znázorněny průběhy fázových napětí v závislosti na hodnotě přechodového odporu. Na změnu průběhů fázových napětí má vliv kapacitní proud sítě, který při jeho zvyšování způsobí větší strmost při prvotních hodnotách přechodového odporu. Dále pak na průběhy napětí má vliv hodnota odporníku, kdy při zvyšování hodnoty odporu odporníku se napětí netlumí.



Obr. č. 33 Závislost napětí na odporu poruchy v odporově uzemněné síti

Další důležité veličiny jsou vypsány v tabulce 5.

Tabulka 5 Přehled hodnot  $I_{POR}$  a  $U_0$  v závislosti na  $R_P$  v síti uzemněného pomocí odporníku

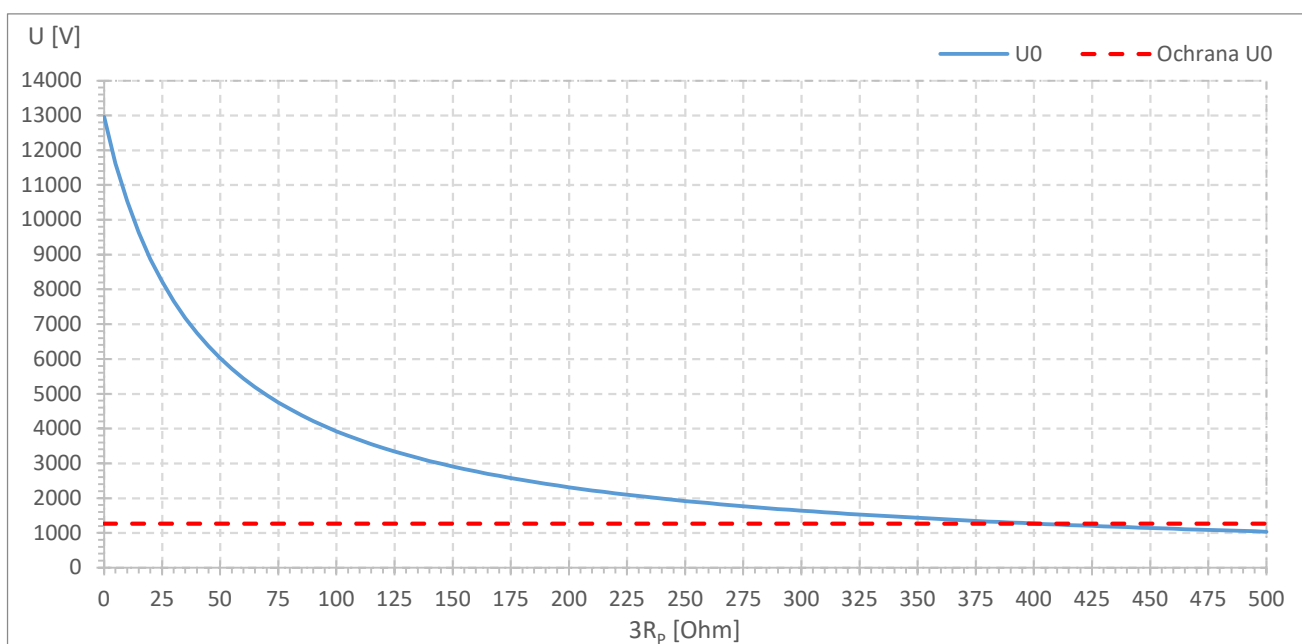
$R_P$ ( $\Omega$ )	$I_{por}$ (A)	$U_0$ (V)	$R_P$ ( $\Omega$ )	$I_{por}$ (A)	$U_0$ (V)
0	298,96	12954,87	80	105,21	4558,97
10	243,02	10530,79	90	97,32	4217,32
20	204,71	8870,85	100	90,54	3923,29
30	176,84	7662,94	200	53,35	2311,66
40	155,64	6744,54	300	37,81	1638,56
50	138,99	6022,73	400	29,29	1269,04
60	125,55	5440,47	500	23,89	1035,52
70	114,48	4960,87			

Z dalších veličin mě zajímá průběh netočivé složky napětí pro další nastavení ochran. Obrázek 35 zobrazuje průběh netočivé složky napětí s vyznačenou hodnotou nastavení ochrany, která je udaná jako 10 %  $U_f$  a odpovídá to hodnotě 1270 V. Hodnota napětí zároveň odpovídá hodnotě 390  $\Omega$  přechodového odporu, který pro hodnotu 390  $\Omega$  nastavím i pro proud odporníkem. Ten je zobrazena na obrázku 36 a odpovídá hodnotě 30 A. Součtový transformátor pro měření poruchového proudu má převod 40/1 a je tedy zatížen na 75 %. Výsledky odpovídají teoretickým předpokladům, protože proud procházející nepostiženými fázemi se blíží nulové hodnotě.

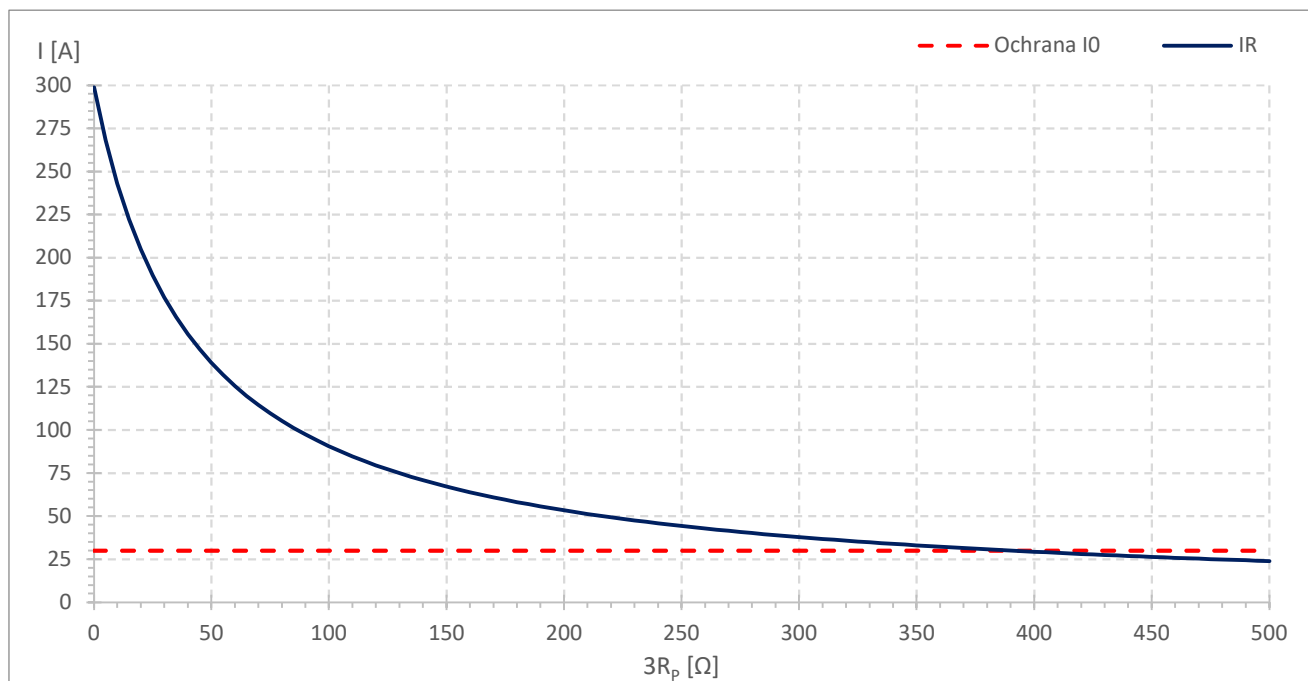
Nastavení ochran:

$$U_0 \rightarrow 10\% z U_f \rightarrow U_0 = 1270 V$$

$$I_R \rightarrow 10\% z I_{RN} \rightarrow I_R = 30 A$$

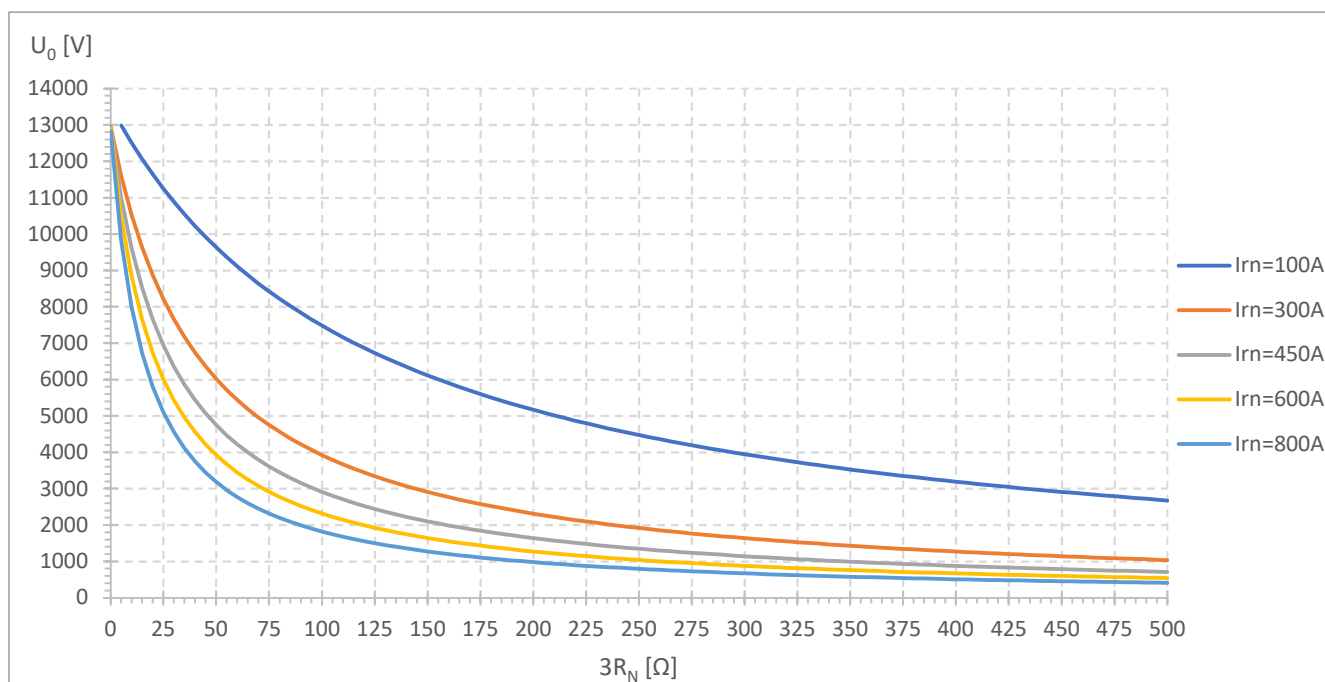


Obr. č. 34 Závislost netočivé složky napětí na přechodovém odporu poruchy a zobrazení působení ochrany v odporově uzemněné síti



Obr. č. 36 Závislost  $U_0$  na  $R_p$  pro různé proudy odporníku

Obrázek 36 ukazuje velikost  $U_0$  v závislosti na  $R_p$  při změně hodnoty odporníku. Velikost odporníku v dané síti dle grafů udává stupeň klesání  $U_0$ .



Obr. č. 35 Závislost proudu na přechodovém odporu poruchy a zobrazení působení ochrany v odporově uzemněné síti

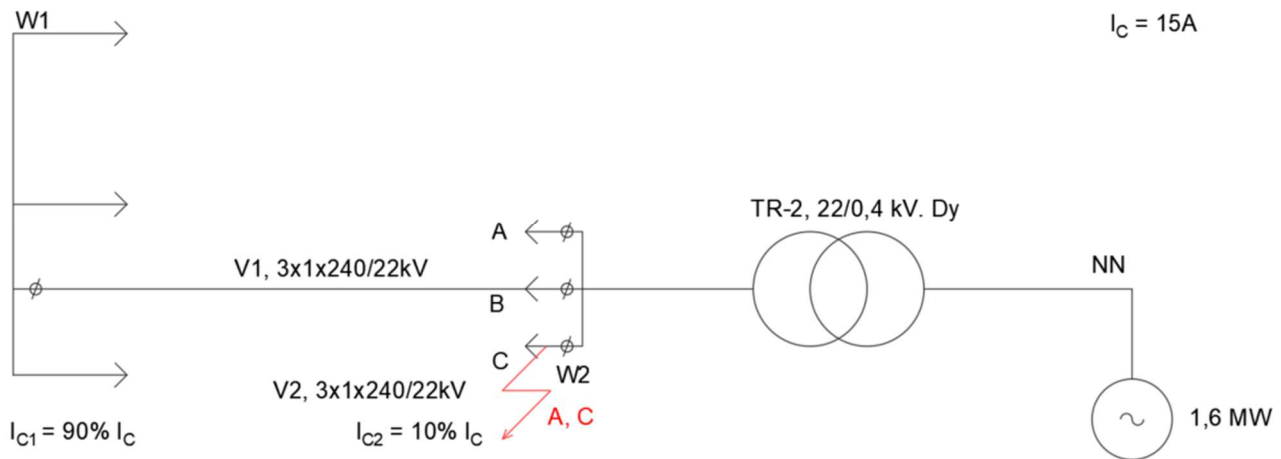
Dle teoretických předpokladů připojení zvýšení hodnoty odporu odporníku v uzlu transformátoru má za následek snížení poruchového proudu sítě. I přes snížení poruchového proudu sítě je jeho hodnota vysoká a není vhodné tuto síť provozovat se zemním spojením.

## 4.5. Vydělení malé části sítě s vlastním zdrojem a přechodem na izolovaný uzel

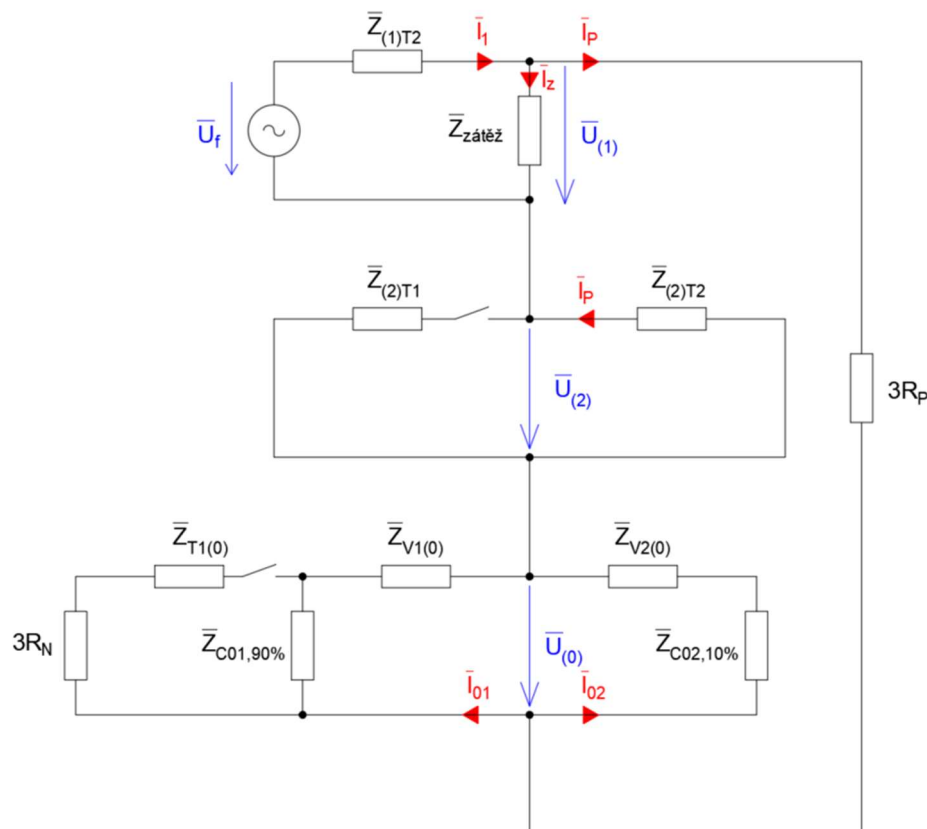
K vydělení malé části sítě s vlastním zdrojem může dojít z několika důvodů:

- při poruše na přípojnici W1 nebo před ní a následné reakci ochran,
- pokud by na přípojnice W1 byla připojena elektrárna s vlastní spotřebou ve které by došlo k zemnímu spojení,
- důvodů by mohlo být více, ale bylo by potřeba znát celou typologii sítě,

Oddělení malé části s vlastním zdrojem a přechod na izolovaný uzel je dle zadání znázorněno v místě poruchy A nebo C. Výpočet parametrů soustavy bude opět provedeno pomocí metody Fourtescue. Obrázek 37 znázorňuje danou síť.



Obr. č. 37 Přechod na izolovaná uzel s poruchou v místě A, C



Obr. č. 38 Náhradní schéma jednopólové poruchy v bodě A, C s přechodem na izolovanou soustavou

Na obrázku 38 je pomocí kontaktů znázorněna část sítě, která je s přechodem na izolovaný uzel odpojena. Nyní do sousledné a zpětné složky nezasahuje transformátor TR-1, ale transformátor TR- 2. Vzhledem k zapojení Dy transformátoru TR-2 je daná síť nyní v izolovaném stavu.

Nyní bude postup obdobný jako v místě poruchy B. Nejprve si převedu schéma soustavy s poruchou v místě A do náhradního složkového schématu. Svodový proud je opět zanedbán. Místo poruchy A je zvoleno na konci kabelového vývodu. Proud zátěží je opět 20 A se zatížením transformátoru T<sub>R</sub>-2 na 70 %. Kapacitní proud je stále rozdělen v poměru 9/1. Porucha je uvažována jako kovové zemní spojení s přechodovým odporem roven hodnoty 0. Impedance  $Z_1$  a  $Z_2$  představuje souslednou, respektive zpětnou složku pro dané schéma, ve které je zahrnut odpor a reaktance vedení V2 a transformátoru T2.

Výpočet potřebných parametrů pro matici:

$$\bar{Z}_{T2(1)} = \bar{Z}_{T2(2)} = \bar{Z}_{T2(0)} = R_{T2} + jX_{T2} = 7,5606 + j45,4710 \Omega \quad 4.05.01$$

$$\bar{Z}_{V2(1)} = \bar{Z}_{V2(2)} = \bar{Z}_{V2(0)} = R_{V2} + jX_{V2} = 0,0125 + j0,0107 \Omega \quad 4.05.02$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)} = \bar{Z}_{T2(1)} + \bar{Z}_{V2(1)} &= 7,5606 + j45,4710 + 0,0125 + j0,0107 & 4.05.03 \\ &= 7,5731 + j45,4816 \Omega \end{aligned}$$



Výpočet celkové impedance soustavy:

$$\bar{Z}_{C0210\%} = \frac{R_{C0} \cdot jX_{C0}}{R_{C0} + jX_{C0}} = \frac{127017,0592 \cdot (-j2540,3412)}{127017,0592 - j2540,3412} = 4.05.04$$

$$= \frac{0,1}{0,1} = 507,8651 - j25393,2545 \Omega$$

$$\bar{Z}_{C0190\%} = \frac{R_{C0} \cdot jX_{C0}}{R_{C0} + jX_{C0}} = \frac{127017,0592 \cdot (-j2540,3412)}{127017,0592 - j2540,3412} = 4.05.05$$

$$= \frac{0,9}{0,9} = 56,4295 - j2821,4727 \Omega$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_{C0210\%} + \bar{Z}_{V2(0)} = 507,8651 - j25393,2545 + 0,0125 + j0,0107 = 4.05.06$$

$$= 507,88 - j25393,24 \Omega$$

$$\bar{Z}_{20} = \bar{Z}_{C0190\%} + \bar{Z}_{V1(0)} = 56,4295 - j2821,4727 + 0,21 + 0,1795 = 4.05.07$$

$$= 56,6395 - j2821,2933 \Omega$$

$$\bar{Z}_{(0)} = \frac{\bar{Z}_{10} \cdot \bar{Z}_{20}}{\bar{Z}_{10} + \bar{Z}_{20}} = \frac{(507,88 - j25393,24) \cdot (56,6395 - j2821,2933)}{(507,88 - j25393,24) + (56,6395 - j2821,2933)} = 4.05.08$$

$$= 50,9567 - j2539,1799 \Omega$$

$$\bar{Z}_{30} = \bar{Z}_{T2(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3 \cdot R_P = 4.05.09$$

$$= 7,5606 + j45,4710 + 50,9567 - j2539,1799 + 3 \cdot 0$$

$$= 58,5328 - j2493,6984 \Omega$$

$$\bar{Z}_{40} = \frac{\bar{Z}_{30} \cdot \bar{Z}_Z}{\bar{Z}_{30} + \bar{Z}_Z} = \frac{(58,5328 - j2493,6984) \cdot 650}{58,5328 - j2493,6984 + 650} = 4.05.10$$

$$= 605,4568 - j156,7710 \Omega$$

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{40} = 7,5731 + j45,4816 + 605,4568 - j156,7710 = 4.05.11$$

$$= 613,0298 - j111,2894 \Omega$$

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{U_f}{\bar{Z}_C} = \frac{12701,7059}{613,0298 - j111,2894} = 20,5296 + j3,7269 A = 4.05.12$$

$$\bar{I}_{(2)} = \bar{I}_P = \bar{I}_{(0)} = \frac{U_f - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{30}} = 4.05.13$$

$$= \frac{12701,7059 - (20,5296 + j3,7269) \cdot (7,5731 + j45,4816)}{58,5328 - j2493,6984}$$

$$= 0,5079 + j5,2068 A$$

$$\bar{I}_{(01)} = \frac{U_0}{\bar{Z}_{20}} = \frac{-13247,0023 + j1024,4931}{56,6395 - j2821,2933} = 0,4572 + j4,6862 A = 4.05.14$$

$$\bar{I}_{(02)} = \frac{U_0}{\bar{Z}_{10}} = \frac{-13247,0023 + j1024,4931}{507,88 - j25393,24} = -0,0507 - j0,5207 A = 4.05.15$$

$$\bar{U}_{(1)} = U_f - \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} = 4.05.16$$

$$= 12701,7059 - (7,5731 + j45,4816) \cdot (20,5296 + j3,7269)$$

$$= 13014,0348 - j961,9425 V$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(2)} &= -\bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)} = -(7,5731 + j45,4816) \cdot (0,5079 + j5,2068) & 4.05.17 \\ &= 232,9691 - j62,5351 V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(0)} &= -\bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(0)} = -(50,9567 - j2539,1799) \cdot (0,5079 + j5,2068) & 4.05.18 \\ &= -13247,0023 + j1024,4931 V\end{aligned}$$

Výpočet napětí pomocí Fortescue matice  $\bar{F}$ , lze vyjádřit v maticovém tvaru  $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_s$ :

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.05.19 \\ &= 13014,0348 - j961,9425 + 232,9691 - j62,5351 \\ &\quad - 13247,0023 + j1024,4931 = 0,0015 + j0,0156 V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.05.20 \\ &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (13014,0348 - j961,9425) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ &\quad \cdot (232,9691 - j62,5351) - 13247,0023 + j1024,4931 \\ &= -20649,4139 - j9531,9958 V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} & 4.05.21 \\ &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (13014,0348 - j961,9425) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ &\quad \cdot (232,9691 - j62,5351) - 13247,0023 + j1024,4931 \\ &= -19091,5946 + j12605,4596 V\end{aligned}$$

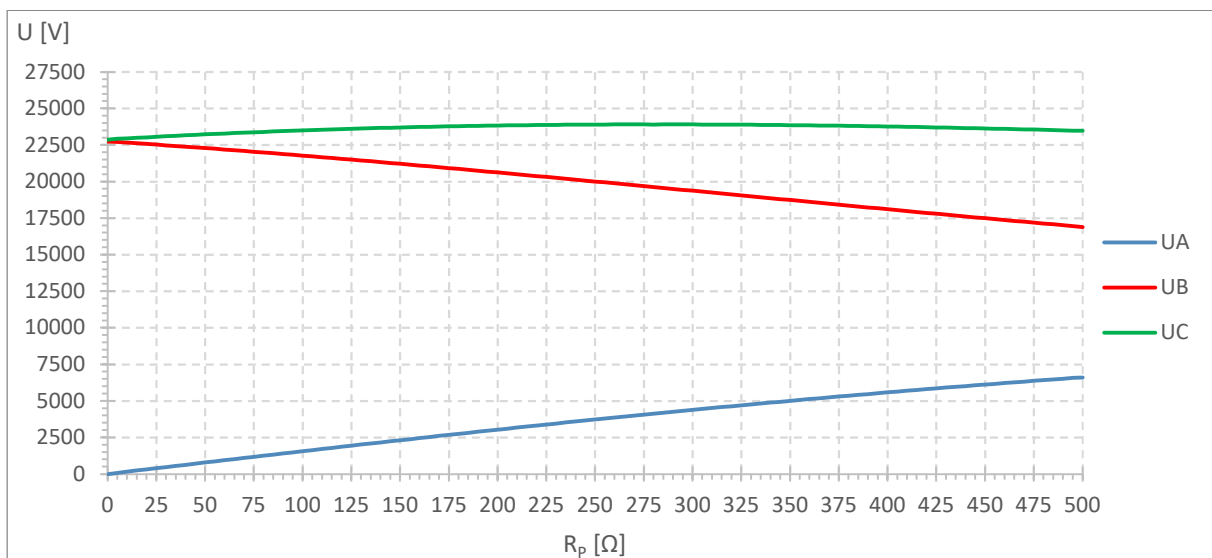
$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} & 4.05.22 \\ &= 20,5296 + j3,7269 + 0,5079 + j5,2068 + 0,4572 + j4,6862 \\ &= 21,4947 + j13,6199 A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_B &= \bar{a}^2 \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} & 4.05.23 \\ &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (20,5296 + j3,7269) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ &\quad \cdot (0,5079 + j5,2068) + (0,4572 + j4,6862) \\ &= -11,3432 - j17,1199 A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_C &= \bar{a}\bar{I}_{(1)} + \bar{a}^2\bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} && 4.05.24 \\ &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (20,5296 + j3,7269) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ &\quad \cdot (0,5079 + j5,2068) + (0,4572 + j4,6862) \\ &= -8,7799 + j17,5585 \text{ A} \end{aligned}$$

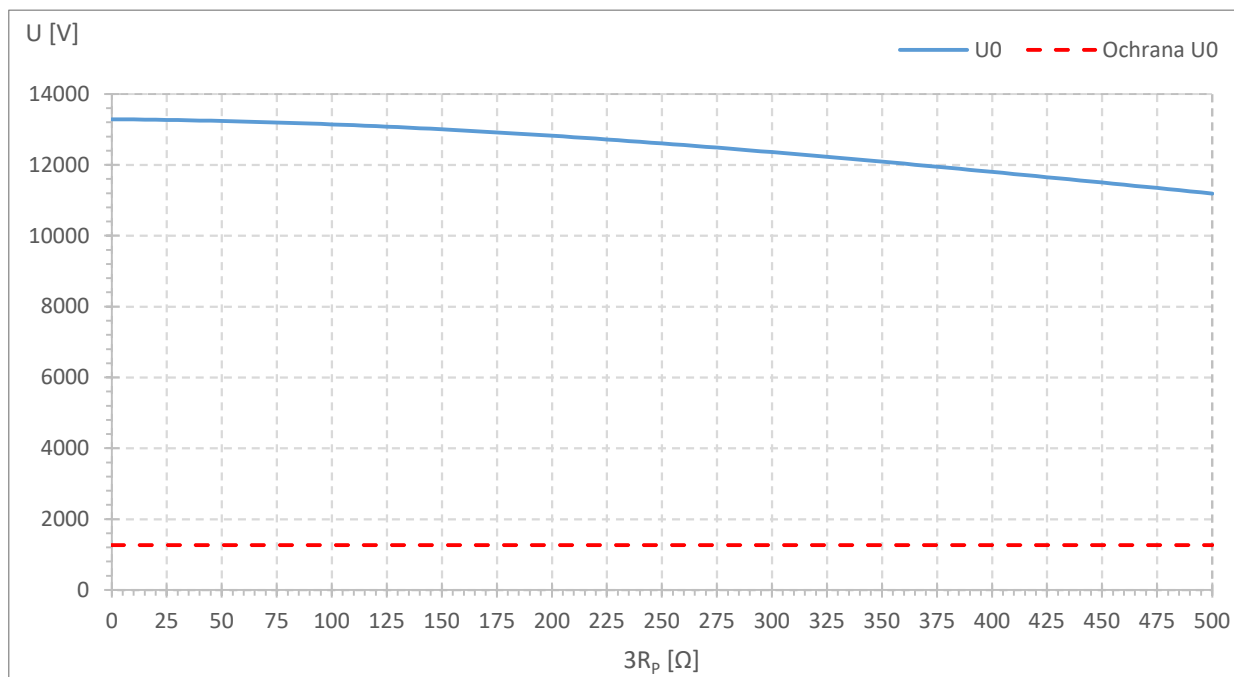
Tabulka 6 Přehled hodnot  $I_{POR}$  a  $U_0$  v závislosti na  $R_P$  v izolované síti

$R_P$ ( $\Omega$ )	$I_{por}$ (A)	$U_0$ (V)	$R_P$ ( $\Omega$ )	$I_{por}$ (A)	$U_0$ (V)
0	5,23	13286,56	80	5,19	13187,28
10	5,22	13280,98	90	5,18	13166,29
20	5,22	13273,43	100	5,17	13143,48
30	5,22	13263,91	200	5,05	12822,11
40	5,21	13252,42	300	4,87	12359,72
50	5,21	13238,99	400	4,65	11801,90
60	5,20	13223,65	500	4,41	11192,40
70	5,20	13206,40			

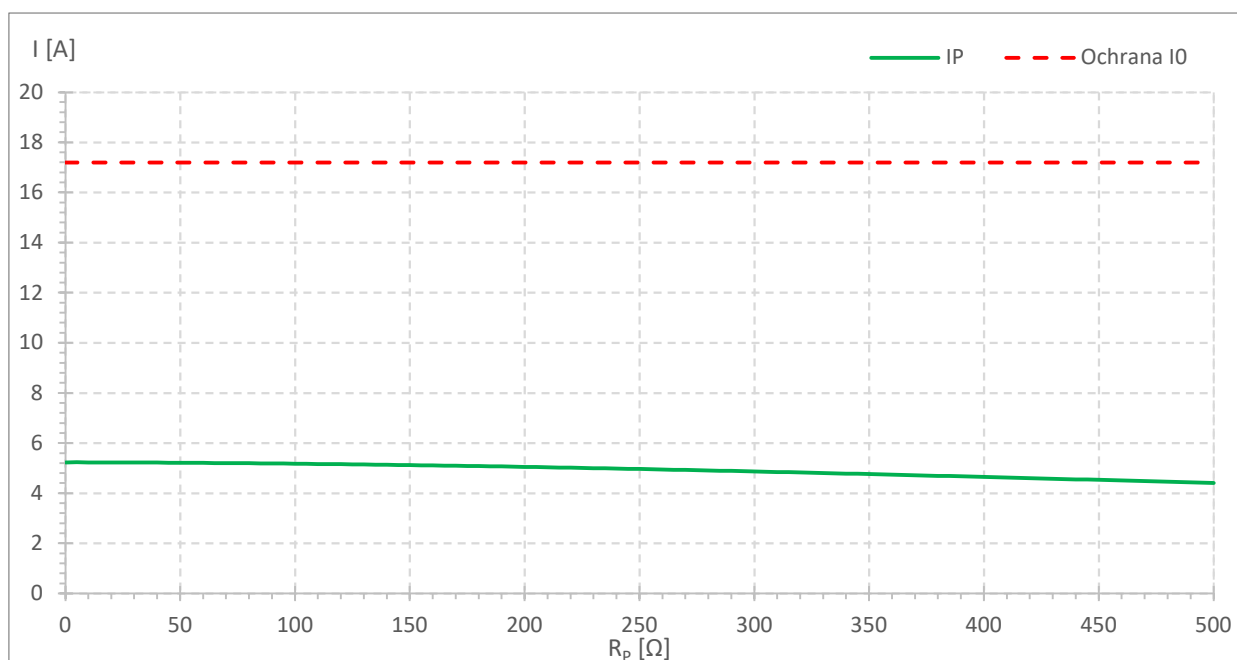


Obr. č. 39 Závislost fázových napětí na přechodovém odporu u izolované sítě

Při srovnání teoretických předpokladů a výsledků víme, že se jedná o izolovanou síť, neboť napětí  $U_A$  při jednofázové poruše je nabývá malé hodnoty.



Obr. č. 41 Závislost  $U_0$  na  $R_p$  a zobrazení působení ochrany v izolované síti



Obr. č. 40 Závislost  $I_P$  na  $R_p$  a zobrazení působení ochrany v izolované síti

Jak je patrné z příslušných průběhů z obrázku 39 a 40, tak při přechodu ze sítě odporové uzemněné na síť izolovanou je nastavení ochran nedostatečné. Ochrana v závislosti na  $U_0$  reaguje v celém rozsahu, ale proud nikoliv. Takto malou síť lze provozovat s jednopólovou zemní poruchou, kdy ochrany budou reagovat pouze signalizací, pro snadné vyhledání poruchy. Další ochranou použitou v izolované síti je **určení toku netočivé složky jalového výkonu.**

Podstata určení netočivé složky jalového výkonu spočívá v tom, že porovnává netočivou složku proudu a napětí vývodu před poruchou a během zemního spojení. V případě bezporuchového vývodu se netočivá složka napětí opožďuje za netočivou složkou proudu o  $90^\circ$ , ale v případě postiženého vývodu předbíhá netočivá složka napětí netočivou složkou proudu o  $90^\circ$ . S tím také souvisí tok jalového výkonu a to tak, že při zemním spojení dochází ke změně orientace jalového výkonu. Tento děj je vidět na obrázku 41. U bezporuchového vývodu je jalový výkon kladný a naopak u vývodu s poruchou je jalový výkon záporný. Jediným úskalím této metody může být citlivost této metody u vývodů s malou hodnotou netočivé složky proudu.

Výpočet  $Q_{0\text{bezporuchové}}$  a  $Q_{0\text{porucha}}$ :

$$A = \frac{U_{(0)}}{|U_{(0)}|} = \frac{-13247,0023 + j1024,4931}{|13286,56|} = -0,9970 + j0,0771 \quad 4.05.25$$

$$U_{0a} = \frac{U_{(0)}}{A} = \frac{-13247,0023 + j1024,4931}{-0,9970 + j0,0771} = 13286,5597 + j9,0679 \text{ V} \quad 4.05.26$$

$$I_{0\text{porucha}} = \frac{\bar{I}_{01}}{A} = \frac{0,4572 + j4,6862}{-0,9970 + j0,0771} = -0,0945 - j4,7075 \text{ A} \quad 4.05.27$$

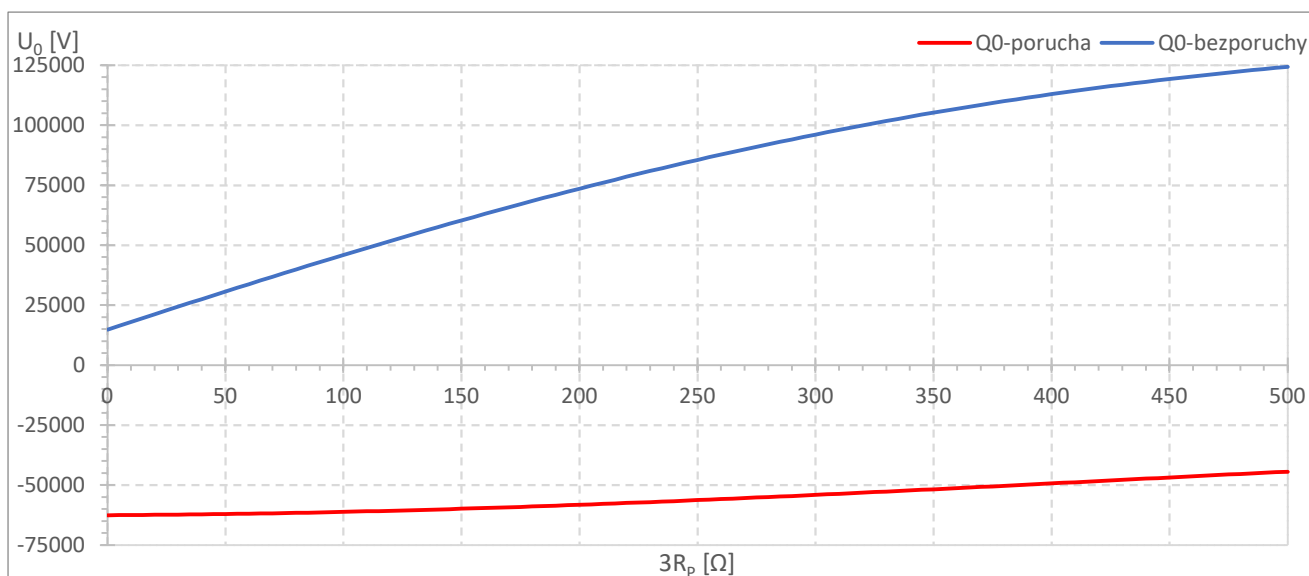
$$Q_{0\text{porucha}} = IM\left(\frac{U_{0a}}{I_{0\text{porucha}}}\right) = IM\left(\frac{13286,5597 + j9,0679}{-0,0945 - j4,7075}\right) = -62546,33 \text{ Var} \quad 4.05.28$$

$$I_{0\text{bezporuchy}} = \frac{I_A + I_B}{A} = \frac{21,4947 + j13,6199 - 11,3432 - j17,1199}{-0,9970 + j0,0771} \quad 4.05.29$$

$$= 20,0970 + j1,1143 \text{ A}$$

$$Q_{0\text{bezporuchy}} = IM\left(\frac{U_{0a}}{I_{0\text{bezporuchy}}}\right) = IM\left(\frac{13286,5597 + j9,0679}{20,0970 + j1,1143}\right) \quad 4.05.30$$

$$= 14805,62 \text{ Var}$$



Obr. č. 42 Průběhy  $Q_{0\text{bezporuchy}}$  a  $Q_{0\text{porucha}}$  v izolované síti

Obrázek 42 demonstruje určení jalového výkonu netočivé složky a změnu orientace výkonu se zemním spojením.

## 4.6. Ochrana ABB REF 615

Při rozhodování o výběru ochrany mi na základě konzultace s panem Žákem bylo doporučeno zvolit ochranu od společnosti ABB, přesný typ ABB REF 615. Tato vývodová ochrana je zařízení, které slouží k chránění, ovládání, měření a monitorování vývodů v rozvodně. Ochrana je vhodná pro kabelové i venkovní vedení s izolovanou i neúčinně uzemněnou soustavu. Ochrana nabízí základní nadproudé funkce, ochrannou funkci při zemních spojeních jako je směrová a nesměrová ochrana, chránění při přechodovém ZS, admitanční ochranu, zemní ochranu, která vyhodnocuje harmonické složky a wattmetrickou ochranu.

Ochrana vyhovuje normě IEC 61850, která zajišťuje komunikaci a vzájemnou součinnost zařízení pro automatizaci v rozvodně. Ochrana je možné mít ve 12 variantách, kdy každá varianta se liší dle kombinace zabudovaných ochran.



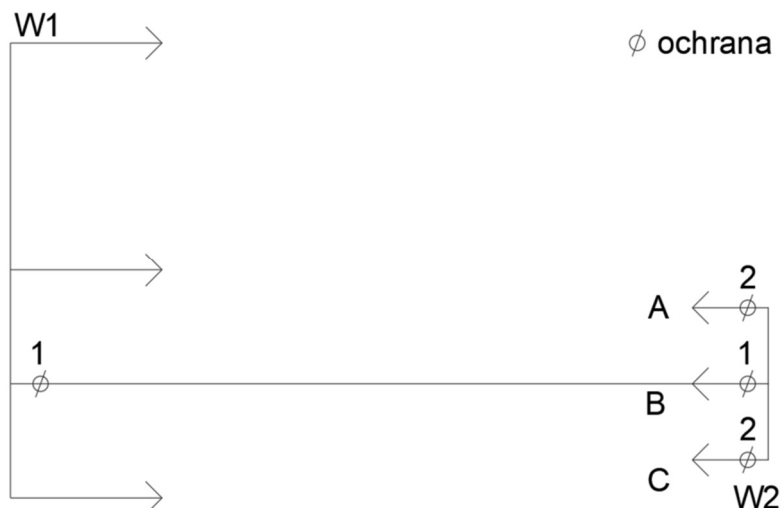
Obr. č. 43 Ochrana ABB REF 615 [17]

### 4.6.1. Nastavení ochrany

Na obrázku 44 je vidět rozmístění daných ochran ABB REF 615. Ochrany označené jako (1), které jsou umístěny mezi přípojnicemi, jsou vzájemně komunikačně propojené, propojení slouží k správnému oddělení části sítě s poruchou, tak aby nedocházelo k reakci ochran a odpojení části sítě bez poruchy. Zároveň jsou ochrany (1) nastavené na časovou reakci  $t_1 = 1$  s. Ochrany označené jako (2) jsou na začátcích vývodů druhé přípojnice a jsou nastaveny na časovou reakci  $t_2 = 0,4$ s.

Ochrana je dle kapitoly 4.4 (v síti neúčinně uzemněné pomocí odporů) nastavena na hodnotu  $U_{0-ochrana} = 1270$  V, která odpovídá hodnotě  $390 \Omega$ , a to ve grafu s poruchovým proudem odpovídá  $I_{0-ochrana} = 30$ A. Tyto hodnoty společně s časovou reakcí ochran jsou nastaveny na ochraně.

Dle kapitoly 4.5 je uvedena další ochrana pomocí toku jalového výkonu, kdy se nastavuje dle obrázku 42 orientace jalového toku netočivé složky. Kladný tok jalového výkonu zde udává bezporuchový stav a záporný tok jalového výkonu udává poruchový stav.



Obr. č. 44 Umístění ochran ABB REF 615

#### 4.7. Výpočtový program

Při výpočtu napěťových a proudových poměrů v síti jsem si vytvořil výpočtový program pomocí nástroje Microsoft Excel. V programu na listu 1 (parametry sítě) jsou zeleně vyznačeny vstupy, které lze libovolně měnit a zbylá pole jsou výpočtová, do kterých se nic nezadá. Doplňují se parametry kabelů a transformátorů, celkový svodový proud sítě a poměr rozdělení, proud zátěže, proud odporníkem, hodnota přechodového odporu a místo jednofázové poruchy.

Nejprve jsem vypočítal poruchu v místě B, ale vzhledem k měničimu se přechodovému odporu poruchy, jsem ještě využil nástroj Makra, který je součástí nástroje Microsoft Excel a naprogramoval jsem kód, který pomocí tlačítka 1 (Výpočet  $R_p$  u ZS v místě B) vypočítá všechny potřebné výstupy v závislosti s měnicím se odporem poruchy v rozsahu 0 – 500  $\Omega$ , např.:  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_0$ ,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_{POR}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$ . Tyto parametry jsou uvedené na listu 2 (Data pro grafy u ZS v místě B).

Tlačítko 3 (Změna  $3R_N$ ) v síti s odporově uzemněným uzlem (porucha B) vypočte potřebné parametry, kdy se mění pouze hodnota odporníku v závislosti na zadaných hodnotách v první části.

Pro poruchu v místě A, C a přechod na izolovaný uzel jsem použil obdobný postup, kdy pomocí doplněných parametrů na listu 1 a tlačítka 2 (Výpočet  $R_p$  u ZS v místě A, C) jsou vypočteny opět všechny potřebné parametry, v tomto případě ovšem pro izolovanou síť. Parametry, které jsou uvedeny na listu 3 (Data pro grafy u ZS v místě A, C). Navíc se zde vypočítají potřebné parametry jalového výkonu  $Q_0$  v bezporuchovém a poruchovém stavu.

Na listech 2 a 3 jsou kromě vypočítaných hodnot, které jsou uvedeny v komplexním tvaru i v absolutní hodnotě, také všechny grafy, které jsou uvedeny v diplomové práci. Ukázky z výpočtového programu jsou uvedeny v přílohách A - D.

Výpočtový program je společně s diplomovou prací odevzdán s názvem DP\_vypoctovy\_program\_Cizek.xlsm.

## Závěr

Cílem práce bylo na modelovém příkladu uzemněné sítě pomocí odporníku provést analýzu napěťových a proudových poměrů v síti s jednopólovou zemní poruchou a následné nastavení ochran. Dalším cílem práce byla opět analýza napěťových a proudových poměrů v síti s jednopólovou zemní poruchou a následné nastavení ochran, ovšem tentokrát v případě oddělení malé části sítě s vlastním zdrojem a přechodu na izolovaný uzel.

Při analýze odporově uzemněné sítě a izolované sítě jsem použil metodu Fourtescue a za pomoci nástroje MS Excel jsem docílil požadovaných výstupů, které jsem zapracoval do grafů. Ukázky z výpočtového programu jsou uvedeny v přílohách A – D.

Výsledky v soustavě 22kV s kovovým zemním spojením a kapacitním proudem sítě, který je roven 15 A odpovídají teoretickým předpokladům. V odporově uzemněné síti se napětí postižené fáze blíží k 0 V a napětí ve zdravých fázích je rovnou sdružené hodnotě napětí. Proud procházející postiženou fází je roven 300 A, naopak proud ve zbylých fázích se blíží hodnotě 0 A. Velikost poruchového proudu je pomocí odporníku snížena, ovšem ne do takové míry, aby bylo možné síť provozovat s jednofázovou zemní poruchou.

Při přechodu na izolovanou síť je hodnota napětí postižené fáze nulová a napětí nepostiženými fázemi se rovná sdružené hodnotě hladiny napětí. Proud procházející místem poruchy je roven 15 A, proud ostatními fázemi se blíží 0 A. Velikost poruchového proudu je nízká, proto lze takovouto síť provozovat s jednou zemní poruchou, kdy ochrany budou reagovat pouze signalizačně, po dobu nezbytně nutnou pro její nalezení a odstranění.

Jako nejvhodnější typ ochrany jsem zvolil ochranu od ABB REF 615. U odporově uzemněné sítě jsem nastavil hraniční hodnotu napětí 1207 V a proud 30 A. Při takto nastavených hodnotách je dle obrázků 34 a 35 vidět, že ochrany u odporově uzemněné sítě reagují při přechodovém odporu poruchy v rozmezí 0 – 390  $\Omega$ . Při přechodu na izolovaný uzel jsem doplnil ochranu toku netočivé složky jalového výkonu, kdy orientace toku netočivé složky jalového výkonu udává bezporuchový a poruchový stav sítě. Dalším nastavením ochrany je časová závislost, kdy dle obrázku 44 jsou ochrany (1) vzájemně komunikačně svázány, aby nedocházelo k vypínání nepostiženého vývodu a nastaveny na reakční dobu  $t_1 = 1$  s. a ochrany (2), které jsou umístěny na začátku chráněného vývodu, jsou nastaveny na reakční dobu  $t_2 = 0,4$  s.



## Seznam literatury a infomačních zdrojů

- [1] Jiřina MERTLOVÁ, Lucie NOHÁČOVÁ, *ELEKTRICKÉ STANICE A VEDENÍ*, FEL ZČU v Plzni 2008, 170 s.
- [2] Jiřina MERTLOVÁ, Martin KOČMICH, Pavla HEJTMÁNKOVÁ, *PŘENOS A ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE*, FEL ZČU v Plzni 1995, 130 s.
- [3] Miloslav HODINKA, Štefan FECKO, František NĚMEČEK, *PŘENOS A ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1989, 328 s.
- [4] Miloš BERAN, Josef HÁJEK, Jiřina MERTLOVÁ, *PŘENOS A ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE – PŘÍKLADY*, EDIČNÍ STŘEDISKO VŠŠE, PLZEŇ 1982, 165 s.
- [5] Zdeněk FEJT, Jaroslav ČERMÁK, *Elektroenergetika*, ČVUT v Praze 1989, 359 s.
- [6] Miloslava TESAŘOVÁ., *Přednášky z předmětu KEE/PE*, FEL ZČU v Plzni 2019
- [7] Petr TOMAN a kolektiv, *Provoz distribučních soustav*, ČVUT v Praze 2011, 265 s.
- [8] Josef TLUSTÝ a kolektiv, *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*, ČVUT v Praze 2011, 255 s.
- [9] Daniel KOUBA, *Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu*, Diplomová práce, ZČU v Plzni 2013, 144 s.
- [10] Aleš VOZKA, *Zemní ochrany v distribučních sítích*, Diplomová práce, ZČU v Plzni 2014, 88 s.
- [11] *Elektrické sítě a vodiče*, <https://publi.cz/books/260/01.html>
- [12] Ivo PALEČEK, *Diagnostika kabelů vysokého napětí*, Bakalářská práce, ZČU v Plzni 2012, 54 s.
- [13] Jan OSTRUŠKA, *Ochrany při zemních spojeních*, Diplomová práce, VUT v Brně, 2015, 106 s.
- [14] Vlastimil SOUŠEK, *Ovlivňování sítí vn přenosem poruch ze sítí vn*, Diplomová práce, ZČU v Plzni, 2012, 86 s.
- [15] C. DZIENIS, M. KEREIT, A. STÜCKER, Fault localization in medium voltage networks with compensated and isolated star-point grounding, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6007180?denied=>, 2010, 6 s.
- [16] Online norma ČSN EN 50160, <http://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/>
- [17] <https://new.abb.com/medium-voltage/cs/automatizace-rozvozen/ochranne-terminaly-pro-digitalni-rozvodny/ochrana-vyvodu/relion-pro-vysoke-napeti/ochrana-a-ovladani-podavace-ref615>
- [18] <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>

## Přílohy

### Příloha A

Ukázka výpočtového nástroje Microsoft Excel:

Pro poruchu v místě B:

<b>Porucha v místě B</b>							
IRN	300,0000		A		3RN	130	Ohm
RN	43,3333		Ohm		3RP	0,0003	Ohm
Z10	130,033275+1,39110208984639i		Ohm		Zzátěž	650,0000	Ohm
ZC01 90%	56,4294545389476-2821,47272694739i		Ohm	0,9			
Z20	129,766333945966-4,5863642132758i		Ohm				
Z30	129,871333945966-4,49664032708928i		Ohm	0,5			
ZC02 10%	507,865090850528-25393,2545425265i		Ohm	0,1	ZC02V	507,970090850528-25393,1648186403i	
Z(0)	129,808727844468-5,15837096984335i		Ohm		Z40	130,052302844468-3,58782110762391i	
ZC	108,624385293969-0,92060576630587i		Ohm		Z50	108,381110293969-2,49115562852531i	
I0	99,7359936276096+1,81326075154211i		A	99,75247535	A	1,041557216	°
I1	119,669872194502+1,01421770164403i		A	119,6741699	A	0,485577543	°
U1	12972,4801913135-188,194235098261i		V	12973,8452	V	-0,831142457	°
U2	-22,2098878426233-156,920167368156i		V	158,4841255	V	-98,05591922	°
U0	-12950,2403898078+345,114793590605i		V	12954,83811	V	178,4734691	°
IP	99,7122103617123+1,3037472941029i		A	99,72073331	A	0,749105459	°
I2	99,7122103617123+1,3037472941029i		A	99,72073331	A	0,749105459	°
a	-0,5+0,866025403784439i		-				
a2	-0,5-0,866025403784439i		-				
UA	0,0299136630765133+0,00039112418801323i		V	0,02991622	V	0,74910546	°
UB	-19452,4596786772-10736,059728031i		V	22218,48703	V	-151,1051359	°
UC	-19398,2914044093+11771,4037176786i		V	22690,51905	V	148,7495002	°
IA	319,118076183824+4,13122574728904i		A	319,144816	A	0,741695928	°
IB	-10,2057876327143-16,6295638936665i		A	19,51154777	A	-121,5380019	°
IC	-9,7043076682808+17,9381204010038i		A	20,39484618	A	118,4128557	°

## Příloha B

Ukázka výpočtového programu MAKRA:

Pro poruchu v místě B:

```
Sub tlačítko1_Kliknutí()
For i = 0 To 29
  A = i + 1
  List3.Cells(1, i + 1) = A

Next i

List3.Cells(2, 1) = "Rp"
List3.Cells(2, 2) = "UA"
List3.Cells(2, 3) = "UB"
List3.Cells(2, 4) = "UC"
List3.Cells(2, 5) = "U0"
List3.Cells(2, 6) = "IP"
List3.Cells(2, 7) = "Uf"

List3.Cells(2, 9) = "UA"
List3.Cells(2, 10) = "UB"
List3.Cells(2, 11) = "UC"
List3.Cells(2, 12) = "U0"
List3.Cells(2, 13) = "IP"

List3.Cells(2, 19) = "I0"
List3.Cells(2, 20) = "IA"
List3.Cells(2, 21) = "IB"
List3.Cells(2, 22) = "IC"
List3.Cells(2, 24) = "IA"
List3.Cells(2, 25) = "IB"
List3.Cells(2, 26) = "IC"

B = List1.Cells(34, 11)

For i = 0 To 100
  Rp = i * 5
  List1.Cells(34, 11) = Rp

  List3.Cells(i + 3, 1) = Rp
  List3.Cells(i + 3, 2) = List1.Cells(88, 3)
  List3.Cells(i + 3, 3) = List1.Cells(89, 3)
  List3.Cells(i + 3, 4) = List1.Cells(90, 3)
  List3.Cells(i + 3, 5) = List1.Cells(83, 3)
  List3.Cells(i + 3, 6) = List1.Cells(84, 3)
  List3.Cells(i + 3, 7) = List1.Cells(64, 3)

  List3.Cells(i + 3, 19) = List1.Cells(80, 3)
  List3.Cells(i + 3, 20) = List1.Cells(92, 3)
  List3.Cells(i + 3, 21) = List1.Cells(93, 3)
  List3.Cells(i + 3, 22) = List1.Cells(94, 3)

Next i

List1.Cells(34, 11) = B

End Sub
```

**Příloha C**

Ukázka výpočtového nástroje Microsoft Excel:

Pro poruchu v místě A, C přechod na izolovaný uzel:

Porucha v místě A,C - přechod na izolovaný uzel						
ZC0210%	507,865090850528-25393,2545425265i	Ohm	Z10		507,877590850528-25393,2438611115i	Ohm
Z0V2	0,0125+0,0106814150222053i	Ohm	Z20		56,6394545389476-2821,29327917502i	Ohm
Zv0190%	56,4294545389476-2821,47272694739i	Ohm	Z(0)		50,9567362126427-2539,17999512254i	Ohm
Z0V1	0,21+0,179447772373049i	Ohm	Z30		58,5301308208564-2493,69835171828i	Ohm
Zzátěže	650,0000	Ohm	Z40		605,456898627319-156,771114793363i	Ohm
Z2T2	7,57309460821366+45,4816434042625i					
Z1T2	7,57309460821366+45,4816434042625i					
ZC	613,029993235533-111,289471389101i	Ohm				
I01	0,457202259365142+4,68618709205708i	A	I02		-0,050757977485132-0,52065915908002i	A
I1	20,5295523802744+3,72693515401583i	A		20,86510404 A		10,28941769 °
U1	13014,0348932257-961,942213128808i	V		13049,53781 V		-4,227373173 °
U2	232,96909352416-62,5348056262525i	V		241,2160866 V		-15,02545014 °
U0	-13247,0038343618+1024,47858080894i	V		13286,55964 V		175,5777402 °
IP	0,507960236850271+5,20684625113709i	A		5,231564917 A		84,42807212 °
I2	0,507960236850271+5,20684625113709i	A		5,231564917 A		84,42807212 °
a	-0,5+0,866025403784439i	-				
a2	-0,5-0,866025403784439i	-				
UA	0,000152388060087105+0,001562053879524i	V		0,001569469 V		84,42807253 °
UB	-20649,4154909858-9532,01057979558i	V		22743,2976 V		-155,2214029 °
UC	-19091,5961644876+12605,4447601685i	V		22877,63715 V		146,5647559 °
IA	21,4947148764898+13,61996849721i	A		25,44653826 A		32,36009141 °
IB	-11,3431946546467-17,1199110309356i	A		20,53678209 A		-123,5273889 °
IC	-8,7799134437477+17,5585038098968i	A		19,63129991 A		116,5667781 °
A	-0,997022871058068+0,0771063848661469i			1,00		175,5777402 °
U0	13286,5596355916+4,53393509386873E-13i			13286,56 V		1,95517E-15 °
I0porucha	-0,0945061638115464-4,70748892221029i			4,71 A		-91,15009873 °
Q0porucha	-1255,6617814131-62546,3322988338i			-62546,33 Var		°
I0bezporuchy	20,0970173144872+1,11433308603265i			20,13 A		3,173668574 °
Q0bezporuchy	267020,219046451+14805,6530014856i			14805,65 Var		°

## Příloha D

Ukázka výpočtového programu MAKRA:

Pro poruchu v místě A, C přechod na izolovaný uzel:

```
Sub tlačítko2_Kliknutí()  
For i = 0 To 29  
    A = i + 1  
    List4.Cells(1, i + 1) = A  
Next i  
    List4.Cells(2, 1) = "Rp"  
    List4.Cells(2, 2) = "UA"  
    List4.Cells(2, 3) = "UB"  
    List4.Cells(2, 4) = "UC"  
    List4.Cells(2, 5) = "U0"  
    List4.Cells(2, 6) = "IP"  
    List4.Cells(2, 7) = "Uf"  
    List4.Cells(2, 9) = "UA"  
    List4.Cells(2, 10) = "UB"  
    List4.Cells(2, 11) = "UC"  
    List4.Cells(2, 12) = "U0"  
    List4.Cells(2, 13) = "IP"  
    List4.Cells(2, 14) = "I0"  
    List4.Cells(2, 20) = "IA"  
    List4.Cells(2, 21) = "IB"  
    List4.Cells(2, 22) = "IC"  
    List4.Cells(2, 24) = "IA"  
    List4.Cells(2, 25) = "IB"  
    List4.Cells(2, 26) = "IC"  
    List4.Cells(2, 32) = "I0-porucha"  
    List4.Cells(2, 33) = "Q0-porucha"  
    List4.Cells(2, 34) = "I0-bezporuchy"  
    List4.Cells(2, 35) = "Q0-bezporuchy"  
    List4.Cells(2, 37) = "Q0-porucha"  
    List4.Cells(2, 38) = "Q0-bezporuchy"  
B = List1.Cells(34, 11)  
For i = 0 To 100  
    Rp = i * 5  
    List1.Cells(34, 11) = Rp  
    List4.Cells(i + 3, 1) = Rp  
    List4.Cells(i + 3, 2) = List1.Cells(117, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 3) = List1.Cells(118, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 4) = List1.Cells(119, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 5) = List1.Cells(112, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 6) = List1.Cells(113, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 7) = List1.Cells(64, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 14) = List1.Cells(109, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 20) = List1.Cells(121, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 21) = List1.Cells(122, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 22) = List1.Cells(123, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 32) = List1.Cells(132, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 33) = List1.Cells(133, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 34) = List1.Cells(134, 3)  
    List4.Cells(i + 3, 35) = List1.Cells(135, 3)  
  
Next i  
  
List1.Cells(34, 11) = B  
  
End Sub
```