

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ SÍTĚ VN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

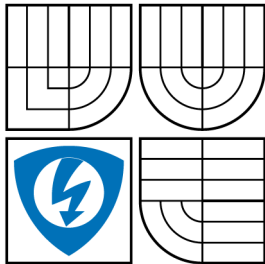
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAGMAR KNÁPKOVÁ

Brno 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ SÍTĚ VN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

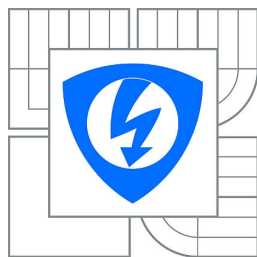
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAGMAR KNÁPKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Studentka: Dagmar Knápková

ID: 134334

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet zkratových poměrů sítě vn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Poruchy v elektrických sítích
2. Teorie zkratových výpočtů
3. Výpočet zkratových poměrů zadané části sítě vn

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá poruchami v distribučních sítích se zaměřením na zkraty jako nejčastější a nejvýznamnější druhy poruch. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretickém úvodu jsou popsány typy poruch v distribučních sítích se zaměřením na zkraty, jejich příčiny a vliv na zařízení distribučních sítí. Následuje popis časového průběhu zkratových proudů, zjednodušující předpoklady výpočtu zkratů, vzorce pro výpočet impedancí jednotlivých prvků náhradního schématu zkratových obvodů a metody výpočtů zkratových proudů v souladu s ČSN EN 60909-0.

V praktické části je uveden příklad výpočtu na jednoduché konfiguraci sítě. Následuje rozbor reálné sítě včetně analýzy způsobu provozování a výběru vhodné metody pro výpočet zkratů. Následně jsou provedeny praktické výpočty zkratových poměrů ve čtyřech místech sítě a třech různých typech zkratů. U jednofázových zkratů je následně provedeno rozdělení proudů do paralelních větví vedení.

V závěru práce je provedeno zhodnocení výsledků a analýza dat získaných výpočtem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Poruchy v distribučních sítích, zkrat, souměrný zkrat, nesouměrný zkrat, zemní spojení, zkratové proudy, časový průběh zkratových proudů, charakteristické hodnoty zkratových proudů, uzemnění uzlu zdroje, metoda souměrných složek, metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu, soustava neúčinně uzemněná přes rezistor.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the faults in the distribution networks, focusing on short-circuits as the most common and the most significant types of faults. The thesis is divided into theoretical and practical part. In the theoretical introduction, describes the types of faults in distribution networks with a focus on the short-circuits, their causes, and the impact on distribution networks. Follows a description of the time course of short-circuit currents, short-circuit calculation simplification assumptions, the formula for calculating the impedance of the various elements of the short-circuits schema and the calculation methods of short-circuit currents in accordance with ČSN EN 60909-0. In the practical part, there is an example of the calculation of simple network configuration. Follows an analysis of the real network, including the analysis of the method of operation and the selection of appropriate method for the calculation of the short-circuit. After that are carried out practical calculations short-circuit conditions in four places on the network, and three different types of short circuits. For one-phase short-circuit is subsequently carried out the distribution of currents in a parallel branch of the distribution lines. At the conclusion of the bachelor's thesis is carried out evaluation the results and analysis of the data obtained by calculation.

KEYWORDS

Faults in the distribution networks, short-circuit, symmetrical short-circuit, asymmetrical short-circuit, Earth connection, short-circuit currents, time course of short-circuit currents, characteristic values of short-circuit currents, earthing of neutral point, method of symmetrical components, method of the equivalent voltage source at the short-circuit point, the system ineffectively grounded through resistor

KNÁPKOVÁ, Dagmar *Výpočet zkratových poměrů sítě vn*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2015. 70 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Výpočet zkratových poměrů sítě vn“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu doc.Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále chci poděkovat panu Pavlovi Kachlířovi a panu Ing. Petru Vaculíkovi ze společnosti E.ON Dispečink - Brno za ochotu, pomoc a poskytnutí podkladů nezbytných pro řešení praktické části mé práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Základní pojmy	12
2 Zkratky	13
2.1 Poruchy v ES	13
2.2 Definice zkratů	14
2.3 Rozdělení zkratů	14
2.4 Příčiny vzniku zkratů	16
3 Teorie zkratů	17
3.1 Charakteristické hodnoty zkratového proudu	17
3.2 Časový průběh zkratového proudu	18
3.3 Vliv zkratu na ES	19
4 Výpočet zkratových poměrů	22
4.1 Zjednodušující předpoklady výpočtů zkratů ve skutečných distribučních sítích	22
4.2 Skutečné, poměrné a procentuální hodnoty parametrů a veličin	22
4.3 Prvky náhradních schémat zkratových obvodů	25
4.4 Metody výpočtu zkratů	26
5 Praktický příklad výpočtu	27
5.1 Schéma zapojení řešené sítě – zkrat na úrovni 110 kV	27
5.2 Výpočet zkratových poměrů dané sítě na úrovni 110 kV	27
5.3 Schéma zapojení řešené sítě – zkrat na konci vedení 22 kV	29
5.4 Výpočet zkratových poměrů dané sítě na konci vedení 22 kV	30
5.5 Vyhodnocení výpočtů	34
6 Výpočet zkratových poměrů reálné sítě vn	35
6.1 Reálné zapojení sítě vn Brno - Vinohrady	37
6.2 Parametry sítě Brno - Vinohrady	39
6.3 Řešení trojfázových zkratů v dané síti	42
6.4 Řešení dvoufázových zkratů v dané síti	48
6.5 Řešení jednofázových zkratů v dané síti	53
6.5.1 Řešení jednofázových zkratů v dané síti - rozložení proudů po vedeních	63

7 Závěr	67
Literatura	69
Seznam symbolů a zkratek	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Druhy zkratů	16
3.1	Složky zkratového proudu	19
3.2	Časový průběh symetrického zkratového proudu	21
3.3	Časový průběh nesymetrického zkratového proudu	21
5.1	Schéma zapojení sítě - zkrat na 110 kV	27
5.2	Schéma zapojení sítě - zkrat na 22 kV	29
6.1	Reálné schéma zapojení sítě Brno - Vinohrady	37
6.2	Reálné schéma zapojení transformátorů 110/22 kV	38
6.3	Náhradní schéma zapojení sítě vn Brno - Vinohrady	39
6.4	Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě A	42
6.5	Náhradní zjednodušené schéma zapojení - 3f zkrat v místě A	43
6.6	Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 3f zkrat	44
6.7	Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě B	44
6.8	Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě C	46
6.9	Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě D	47
6.10	Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě A	49
6.11	Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 2f zkrat	49
6.12	Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě B	50
6.13	Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě C	51
6.14	Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě D	52
6.15	Ekvivalentní obvod transformátoru T101 v sousledné a netočivé soustavě	53
6.16	Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě A	55
6.17	Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 1f zkrat	57
6.18	Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě B	58
6.19	Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě C	60
6.20	Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě D	62
6.21	Rozložení proudů ve větvích vedení - místo zkratu A	63

SEZNAM TABULEK

5.1	Tabulka vypočtených hodnot - ukázkový příklad	34
6.1	Parametry kabelových vedení vn	41
7.1	Tabulka vypočtených hodnot - síť Brno Vinohrady	67

ÚVOD

Současná moderní společnost je stále více závislá na elektrické energii. Tento trend se projevuje i v oblastech, které byly dříve na dodávkách elektřiny nezávislé.

V oblasti elektroenergetiky je kladen vyšší důraz na ekologickou stránku výroby, především na využití obnovitelných zdrojů, což klade zvýšené nároky na přenosovou a distribuční soustavu z hlediska přenosové schopnosti a především provozní spolehlivosti.

Z výše uvedených skutečností vyplývá nutnost omezení poruchových stavů vedoucích k výpadkům přenosové a distribuční soustavy na nejnižší možnou míru a to jak z hlediska četnosti a doby trvání poruchy, tak i z hlediska rozsahu poruchy a tedy i území ovlivněného výpadkem. Vezmeme-li v úvahu členění poruch v elektrizační soustavě uvedené v kapitole 2.1, je nejvážnější poruchou ztráta stability generátorů a jejich následný výpadek ze synchronismu. Porucha zasáhne rozsáhlá území a její postupné odstranění může trvat v závislosti na rozsahu řádově i několik dní. Jde však o poměrně vzácný typ poruchy, kterým se nebudu v této práci podrobněji zabývat. Pokud se týká přepětí, tyto jsou v převážné většině případů zachyceny přepětiovými ochranami a nevedou k výpadkům elektrizační soustavy. Zbývající přepětí nezachycená ochranami, se projeví poruchou izolačního stavu zařízení, což vede k následnému vzniku zkratu. Podpětí mají vliv na chod spotřebičů a pro elektrizační soustavu nepředstavují nebezpečný stav.

Zkratky jsou typem poruchy, který je na základě hodnocení podle výše uvedených kritérií nejnebezpečnější. Jednak jde u typ poruchy, který se v elektrizační soustavě vyskytuje poměrně často a navíc vždy vede k nutnosti vypnutí poškozené části zařízení. Proto se ve své práci zabývám mimo jiné příčinami vzniku zkratů, současnou normou řešící výpočty zkratových poměrů v elektrizační soustavě a v praktické části také příkladem výpočtu zkratů v části distribuční soustavy.

1 ZÁKLADNÍ POJMY

Elektrizační soustava (ES) je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení a systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky [1]. Obecně se elektrizační soustava dělí na přenosovou a distribuční soustavu.

Přenosová soustava (PS) je definována, jako vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení 110 kV, které slouží pro přenos elektřiny pro celé území ČR a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států [1], tedy zejména pro přenos elektřiny od velkých zdrojů (elektráren) do velkých rozvodů.

Distribuční soustava (DS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy) a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužících k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR [1], tedy pro distribuci elektřiny z rozvodů k odběratelům.

Distribuční sítě vn jsou součástí DS. Jsou tvořeny venkovními a kabelovými vedeními, provozovanými v převážné míře s napětím 22 kV, případně 10 a 35 kV. Způsob provozování a systém ochrany při poruchách těchto sítí, je dán systémem spojení nulového bodu vn vinutí napájecího transformátoru se zemnicí soustavou. Z tohoto hlediska obecně rozlišujeme soustavy účinně uzemněné, uzemněné přes uzlový odpor, neúčinně uzemněné a izolované. V případě bezporuchového stavu symetrické sítě se způsob uzemnění nijak prakticky neprojeví. Zásadní rozdíl je v případě poruchy.

V elektrizační soustavě ČR je převážná většina distribučních sítí vn provozována jako sítě neúčinně uzemněné přes zhášecí tlumivku. Výhodou tohoto způsobu provozování je skutečnost, že při poruše, kdy dojde ke spojení jedné fáze se zemí, protéká obvodem pouze zbytkový kapacitní proud, daný naladěním indukčnosti tlumivky proti kapacitě sítě. Tento proud dosahuje řádově velikosti pouze desítek ampér, tudíž při poruše lze tuto síť nadále provozovat bez nutnosti okamžitého vypnutí.

2 ZKRATY

2.1 Poruchy v ES

V reálných distribučních sítích se vyskytují různé typy poruch, které mají vliv na jejich bezpečnost a provozní spolehlivost. Poruchou se rozumí natolik významná změna parametrů provozních veličin sítě (napětí a proudu), že je nutný zásah obsluhy, nebo ochranných zařízení, aby se předešlo poškození sítě, nebo úrazu osob. Dovolené meze změn těchto parametrů jsou dané normou, nebo provozním předpisem.

Existují i méně významné změny parametrů, které rovněž překračují dovolené provozní meze, ale neohrožují zařízení ani osoby. Tyto změny nejsou klasifikovány jako poruchy, mají vliv pouze na kvalitu dodávky elektrické energie.

Z hlediska provozních veličin lze poruchy rozdělit na napěťové, proudové a poruchy stability soustavy.

Napěťové

- *Přepětí* - je zvýšení velikosti napětí v síti nad dovolenou mez. Vzniká lokálně, nebo se šíří formou přepětové vlny a má nepříznivý vliv na namáhání izolace.
 - Atmosférická přepětí vznikají buď přímým úderem blesku, nebo indukovaným napětím po úderu blesku v blízkosti zařízení.
 - Provozní přepětí vznikající spínacími pochody při provozování zařízení.
- *Podpětí* - je naopak snížení napětí pod dovolenou mez. Často vzniká jako důsledek jiných poruchových stavů, jako jsou například zkraty.

Proudové

- *Nadproud* - jde o přetížení, tedy zvýšení velikosti proudu nad dovolenou mez. Při tomto provozním stavu není nutné zařízení okamžitě vypnout, protože zařízení v ES jsou dimenzována na určitou přetížitelnost, při které je možno zařízení po nějakou dobu provozovat.
- *Zkraty* - jsou výrazná zvýšení proudu v síti, která několikanásobně přesahují dovolené meze a zařízení je nutné okamžitě vypnout. Zkraty vznikají v případě, že dojde k vodivému spojení dvou, nebo více bodů v obvodu, které mají při normálním provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci.

Všechny tyto typy poruch mohou navzájem souviset a jedna může být příčinou vzniku druhé. Například zkrat může vyvolat podpětí v síti, přepětí může být příčinou vzniku zkratu a podobně, viz. kapitola 3.3.

2.2 Definice zkratů

Zkratky jsou nevýznamnějším a nejčastějším typem poruch, které se při provozování elektrických sítí mohou projevit.

Obecně je zkrat definován jako elektromagnetický přechodový děj, který vzniká náhodným, nebo úmyslným vodivým spojením dvou, nebo více bodů v obvodu, které mají při normálním provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci.[2] Po vzniku zkratu je rozdíl napětí těchto dvou bodů v obvodu nulový, nebo blízký nulové hodnotě.

V případě vodivého spojení jedné fáze se zemí v distribuční síti, se projeví rozdíly ve způsobu uzemnění uzlu zdroje.

U sítí účinně uzemněných se jedná o jednofázový zkrat. Velikost poruchového proudu dosahuje několikanásobku provozních hodnot. Tím je vyloučena možnost dalšího provozování postižené části soustavy a zařízení je nutno v co nejkratším čase odpojit.

V případě sítí neúčinně uzemněných a izolovaných mluvíme o zemním spojení. Velikost poruchového proudu dosahuje v tomto případě několika desítek ampér. Díky tomu není nutné okamžité vypnutí postižené části sítě, čímž se zabrání přerušení dodávek energie odběratelům. Z tohoto důvodu jsou v ČR veřejné distribuční sítě většinou provozovány jako neúčinně uzemněné a malé průmyslové distribuční sítě jako izolované.

2.3 Rozdělení zkratů

Zkratky obecně dělíme na souměrné a nesouměrné, toto rozdělení je zásadní pro způsob výpočtu zkratových poměrů.

Souměrné zkratky - jsou poruchy, při kterých jsou zkratem postiženy všechny tři fáze. Tento typ zkratů se vyskytuje zejména u kabelových vedení, vlivem působení elektrického oblouku. Méně často se vyskytují u venkovních vedení. Rozlišujeme zkratky trojfázové a trojfázové zemní.

Nesouměrné zkratky - jsou všechny ostatní typy zkratů, tedy poruchy, při kterých je postižena pouze jedna, nebo dvě fáze soustavy. Ve všech soustavách se tento typ zkratů vyskytuje častěji, než zkratky souměrné. V síti vn se tato porucha může kvalitativně lišit od zkratu, v závislosti na způsobu uzemnění soustavy.

Souměrné i nesouměrné zkraty ještě rozdělujeme do dílčích kategorií, podle způsobu spojení živých částí se zemí, viz Obr 2.1.

- *Jednofázový zkrat* – je spojení jedné z fází se zemí. V soustavě s uzemněným nulovým bodem a vyvedeným středním vodičem může jít o spojení jedné fáze se středním vodičem.
- *Dvoufázový zkrat* – je spojení libovolných dvou fází soustavy v jednom místě.
- *Dvoufázový zemní zkrat* – je spojení dvou fází soustavy společně se zemí, případně středním vodičem.
- *Trojfázový zkrat* – je spojení všech tří fází soustavy v jednom místě.
- *Trojfázový zemní zkrat* – je spojení všech tří fází soustavy a jejich současné spojení se zemí, nebo středním vodičem.

Dále zkraty můžeme rozdělit na dokonalé a nedokonalé, podle přechodového odporu v místě poruchy.

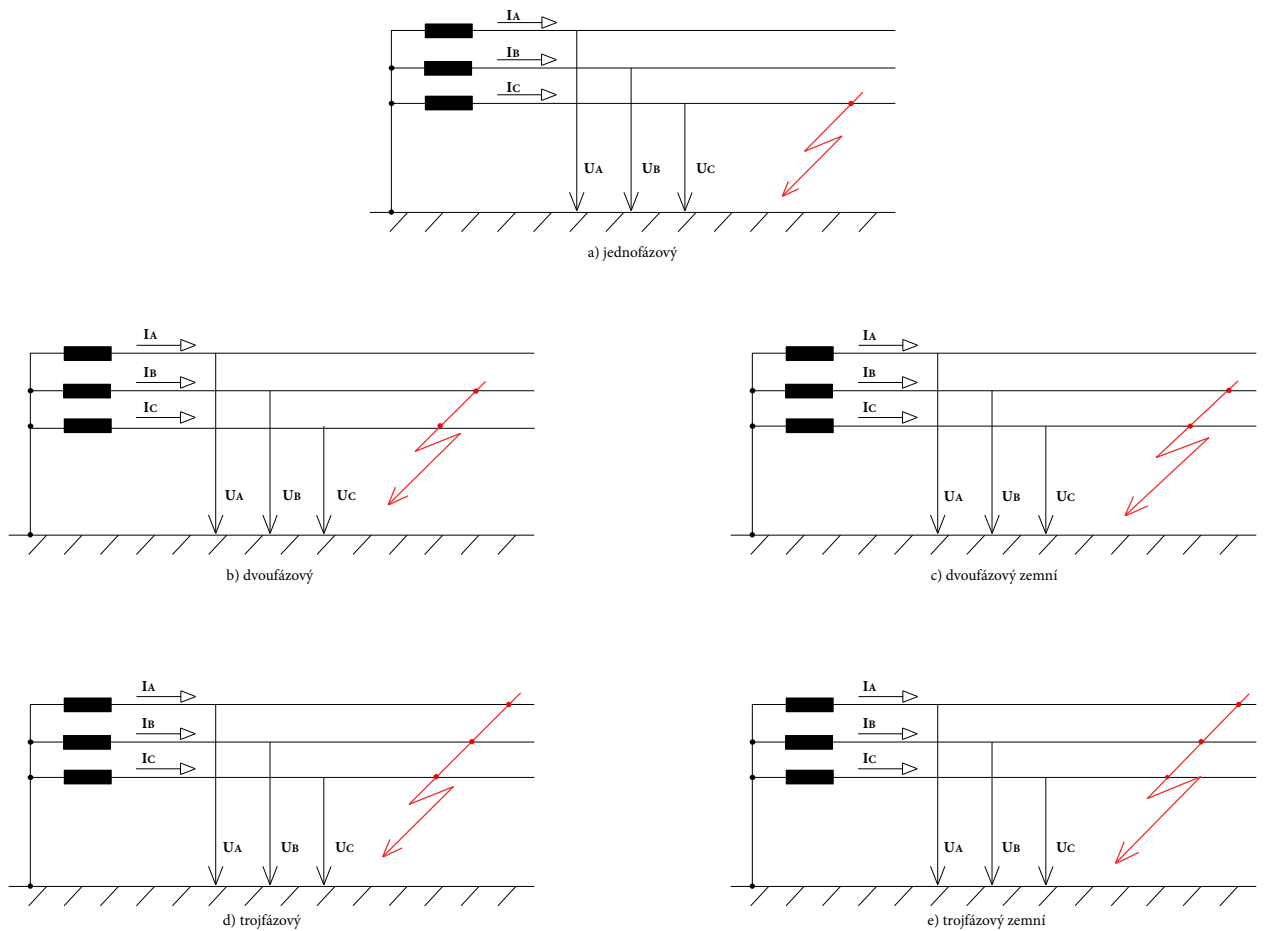
Dokonalý zkrat – je typ zkratu, u kterého je přechodový odpor zanedbatelný. Z tohoto důvodu je zkratový proud omezen pouze impedancí zkratového obvodu a dosahuje proto nejvyšší možné velikosti. V těchto případech jsou tedy nejneprůzračnější mechanické a tepelné účinky zkratového proudu.

Nedokonalý zkrat – je typ zkratu, u kterého se naopak projevuje veliký přechodový odpor, často doprovázený vznikem el. oblouku. Impedance oblouku snižuje velikost zkratových proudů. Hořící oblouk však dosahuje vysokých teplot, čímž zvyšuje nebezpečí vzniku požáru.

Jako další rozlišujeme typy zkratu, podle místa vzniku zkratu v síti.

Eklekticky vzdálený zkrat – nastává v případě, že je místo, kde zkratová porucha vznikla, dostatečně elektricky vzdáleno od zdroje zkratového proudu. V tomto případě se prakticky neprojevuje rázová a přechodná složka zkratového proudu a souměrná složka se po dobu trvání poruchy téměř nemění.

Elektricky blízký zkrat – v tomto případě se projevuje vliv rázové a přechodné složky zkratového proudu způsobeného generátory, nebo asynchronními motory zapojenými v síti. Souměrná složka zkratového proudu snižuje exponenciálně s časem svoji velikost. V případě, že porucha trvá dostatečně dlouho, sníží se až na hodnotu ustálené složky.



Obr. 2.1: Druhy zkratů

2.4 Příčiny vzniku zkratů

Nejčastější příčinou vzniku zkratu je porušení izolace vodičů. Poruchy izolace bývají způsobeny zejména poruchovými stavy na vedení jako je přepětí, nebo dlouhodobým přetěžováním vodičů při nadproudech kde působí větší teploty a ty vedou k rychlejšímu stárnutí izolačního materiálu. Dalšími příčinami poruch izolace mohou být také výrobní vady, nebo vady způsobené nesprávnou manipulací, nebo montáží.

Dalším významným faktorem, způsobujícím zkraty jsou cizí zásahy. Zde uvažujeme vlivy lidského působení, jako je například překopnutí kabelu při zemních pracích a také přírodní vlivy, jako může být například přímý úder blesku, pád stromu na venkovní vedení, znečištění izolátorů vlivem prostředí a podobně.

3 TEORIE ZKRATŮ

3.1 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Zkratový proud má v časové závislosti neharmonický průběh, daný vznikem aperiodické složky. Jedná se o přechodný děj, kde nejvyšších hodnot dosahuje zkratový proud ihned po vzniku zkratu a s časem se jeho hodnota zmenšuje.

Zejména kvůli výpočtům je nutné popis tohoto přechodného děje zjednodušit a rozdělit do několika lépe popsatečných složek. K tomuto účelu slouží charakteristické hodnoty zkratového proudu, definované normou [3].

Předpokládaný zkratový proud - proud, který by měl protékat obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení

Souměrný zkratový proud - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' - pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$

Stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu $i_{d.c.}$ - střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule

Nárazový zkratový proud i_p - maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu

Souměrný zkratový vypínací proud I_b - efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení

Ustálený zkratový proud I_k - efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu

Ekvivalentní elektrický obvod - model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků

Jmenovité napětí sítě U_n - sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky

Rázová reaktance synchronního stroje X_d'' - reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d''

Minimální doba vypnutí t_{min} – nejkratší čas, mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se nemění

3.2 Časový průběh zkratového proudu

Časový průběh zkratového proudu je, jak už bylo řečeno, přechodný děj. Z hlediska reálného průběhu tohoto proudu rozlišujeme dva typy a to symetrický a nesymetrický zkratový proud.

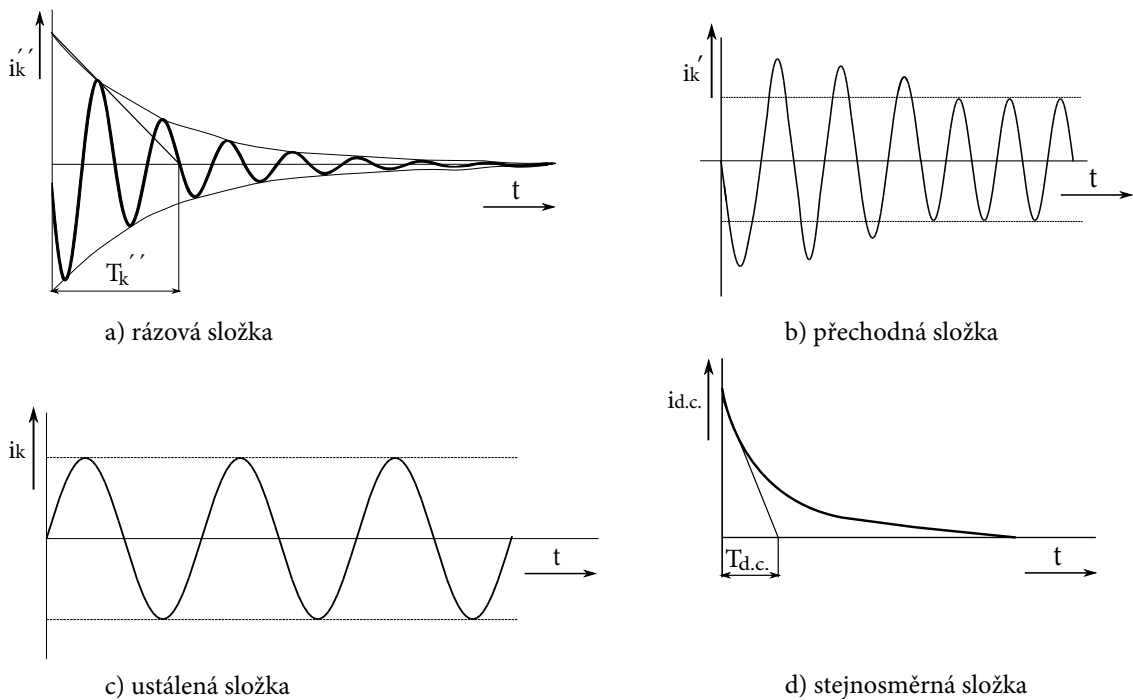
Symetrický zkratový proud – vzniká v případě, že ke zkratu dojde v okamžiku, kdy napětí dosahuje své maximální hodnoty a zkratový proud potom začíná od nuly, jak je schematicky znázorněno na Obr. 3.2. Tento typ zkratového proudu má sinusový průběh, frekvenci dané soustavy a v závislosti na elektrické vzdálenosti místa poruchy může obsahovat tři složky.

- *Rázová složka $i_k'(t)$* - jež se projevuje na začátku zkratu, proto se také někdy nazývá počáteční složkou, velmi rychle odeznívá (řádově méně než desetina sekundy) a její amplituda exponenciálně klesá s časem. Tato složka se projeví pouze v případě elektricky blízkého zkratu, nebo vlivem velkých asynchronních motorů.
- *Přechodná složka $i_k'(t)$* - jejíž amplituda rovněž exponenciálně klesá s časem, ale odeznívá mnohem pomaleji, než rázová složka (řádově sekundy), a stejně jako rázová složka se projeví pouze v případě elektricky blízkého zkratu, nebo vlivem velkých asynchronních motorů.
- *Ustálená složka $i_k(t)$* - jejíž amplituda je, na rozdíl od předchozích složek, konstantní. Tato složka se projeví při každém zkratu.

Nesymetrický zkratový proud – vzniká, pokud dojde ke zkratu v okamžiku, kdy napětí dosahuje nulové hodnoty a zkratový proud potom začíná od své maximální hodnoty, což schematicky znázorňuje Obr. 3.3. V tomto případě vzniká aperiodická složka. Díky ní má zkratový proud má na svém počátku neharmonický průběh, po odeznění této složky se průběh ustálí na harmonický. Má frekvenci dané soustavy a stejně, jako je tomu u symetrického zkratového proudu se zde u elektricky blízkých zkratů projeví rázová a přechodná složka a ustálenou složku obsahuje vždy.

- *stejnosměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}(t)$* - jež má exponenciální průběh, klesající s časem.

Jednotlivé složky zkratového proudu jsou zobrazeny na Obr. 3.1



Obr. 3.1: Složky zkratového proudu

3.3 Vliv zkratu na ES

Zkratové poruchy mají nepříznivý vliv na chod elektrizační soustavy. Při zkratech se v daných místech několikanásobně zvětšují procházející proudy, a právě díky své velikosti mají tyto proudy výrazný vliv na chod elektrických sítí. Mezi nejzásadnější patří vlivy tepelné a mechanické.

Tepelné působení - se u zkratových proudů nejhůře projevuje v případě vzniku elektrického oblouku, kde díky hoření oblouku mohou vzniknout požáry, nebo může dojít k těžkým úrazům osob. Negativní je tepelné působení i v případě, kdy nedojde ke vzniku el. oblouku, zde se zvýšená teplota projeví na rychlejším opotřebení materiálů, jako je stárnutí izolace, nebo zmenšování mechanické pevnosti vodivých částí vedení.

Mechanické působení - zkratové proudy se také projevují působením silného elektromagnetického pole, které vyvolá dynamické síly, jež způsobují mechanické namáhání všech částí dané soustavy, jako je ohýbání vodičů, kývaní lanových vodičů, porušení podpěrných izolátorů a další.

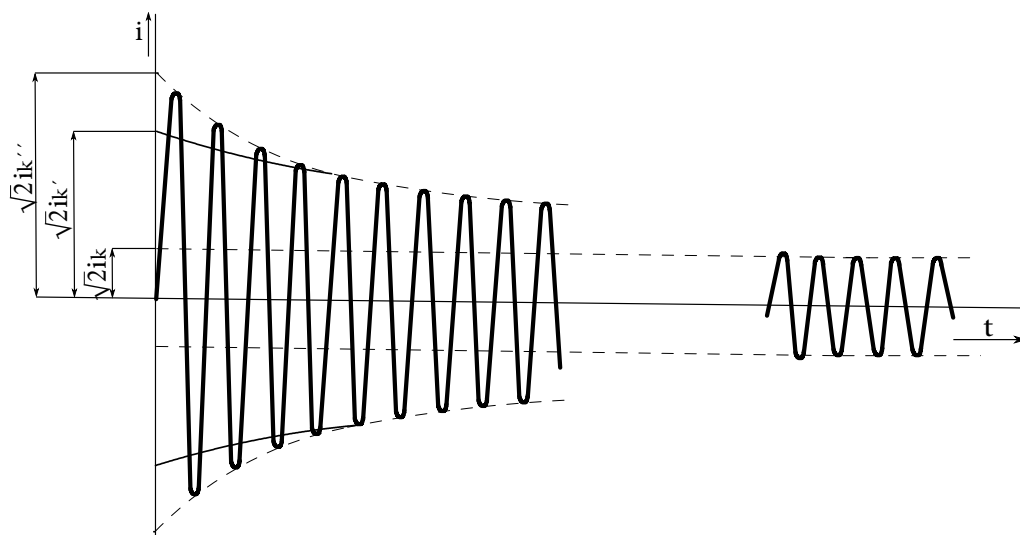
Dalšími nepříznivými vlivy, které se projevují v elektrizační soustavě při zkratech, jsou např:

Podpětí - náhlý pokles impedance a současný náhlý nárůst proudu v obvodu vyvolají značné snížení napětí v místech blízkých zkratu, tzv. podpětí. Toto podpětí se přenáší do celé soustavy a nepříznivě ovlivňuje provoz řady elektrických spotřebičů, jako jsou indukční motory, světelné spotřebiče a jiné.

Přepětí – při vypínání poruchových stavů, nebo provozních manipulacích vznikají v rozvodech přepětí, která dosahují až velikosti dvojnásobku jmenovitého napětí. Dalším typem přepětí je také tzv. zotavené napětí, které vzniká při odepnutí zkratů vypínačem, toto napětí může způsobit zapálení oblouku na kontaktech vypínače, a jeho následné poškození.

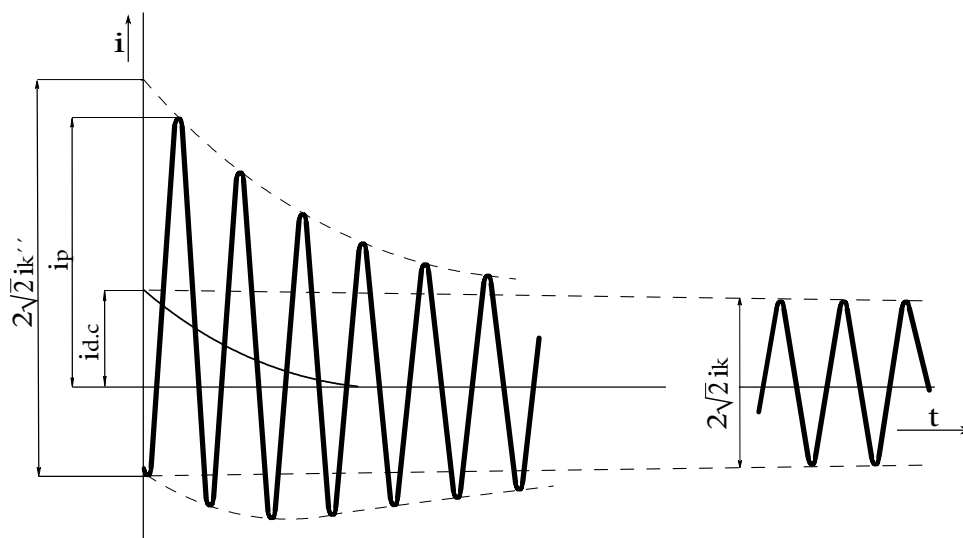
Porušení synchronismu generátorů paralelně spolupracujících do ES – při zkratech a jejich následném vypnutí nastane nerovnováha mezi mechanickým momentem poháněcích soustrojí (turbín) a elektrickým momentem generátorů. Tím dochází ke změnám zátěžných úhlů generátorů a jejich následnému kývání, což by mohlo vést až k výpadku jednotlivých strojů ze synchronismu a následnému lavinovitému šíření poruchy vedoucímu až k rozpadu celé ES.

Indukované napětí – tok zkratového proudu v silových vedeních také vyvolá silné magnetické pole, které může naindukovat napětí na různá sdělovací zařízení a tím omezit jejich funkčnost.



Obr. 3.2: Časový průběh symetrického zkratového proudu

kde: i_k'' - počáteční souměrný rázový zkratový proud
 i_k' - počáteční přechodný zkratový proud
 i_k - ustálený zkratový proud



Obr. 3.3: Časový průběh nesymetrického zkratového proudu

kde: i_k'' - počáteční souměrný rázový zkratový proud
 i_k - ustálený zkratový proud
 i_p - nárazový zkratový proud
 $i_{d.c.(poč.)}$ - počáteční hodnota ss složky zkratového proudu

4 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ

4.1 Zjednodušující předpoklady výpočtů zkratů ve skutečných distribučních sítích

Časový průběh zkratového proudu je složitý přechodný děj a jeho přesný popis vede k řešení soustavy diferenciálních rovnic, které popisují chování jednotlivých prvků soustavy. Toto řešení je však zdlouhavé. V technické praxi není nutné vyšetřovat přesné průběhy zkratových proudů, proto je zde několik zjednodušení, která vedou k vyšetření zkratových poměrů v soustavě s dostatečnou přesností.

Parametry zkratového proudu – protože pro praktické účely není nutné znát přesný průběh zkratového proudu, postačí pro tento účely zjednodušený výpočet, jehož výsledkem jsou charakteristické hodnoty zkratového proudu, popsané v kapitole 3.1. Tyto hodnoty odpovídají mezním hodnotám možného průběhu zkratového proudu pro nejnepříznivější případ.

Pro výpočty předpokládaného zkratového proudu, se podle normy ČSN EN 60909-0 [3] uvažují následující zjednodušující předpoklady:

- Po dobu trvání zkratu se nemění typ zkratové poruchy, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým, a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance KT pro síťové transformátory.
- Odpory oblouků se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

4.2 Skutečné, poměrné a procentuální hodnoty parametrů a veličin

Skutečné hodnoty

Pro účely výpočtu zkratových poměrů v síti se všechny prvky zkratového obvodu nahrazují impedancemi. Jelikož se zkratové obvody obvykle skládají z více napěťových úrovní, je nutné všechny impedance obvodových prvků přepočíst na stejnou vztažnou napěťovou úroveň. Vztažné napětí U_v se obvykle volí podle napěťové hladiny, na které nastala porucha.

Sousledné impedance prvků náhradní soustavy určíme dle následujících vzorců:

Přepočtená impedance vedení

$$\mathbf{Z}_{ved,p} = \mathbf{Z}_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2 \quad (4.1)$$

kde: $\mathbf{Z}_{ved,n}$ - impedance vedení v obvodu s napětím $U_{ved,n}$
 $U_{ved,n}$ - napěťová úroveň vedení v místě, kde se nachází prvek

Modul přepočtené náhradní impedance transformátoru

$$Z_{tr,p} = e_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}} \quad (4.2)$$

kde: e_k - napětí nakrátko
 $S_{tr,n}$ - jmenovitý výkon transformátoru

Přepočtená náhradní impedance transformátoru

$$\mathbf{Z}_{tr,p} = R_{tr,p} + jX_{tr,p} \quad (4.3)$$

kde: $R_{tr,p}$ - přepočtená náhradní rezistence transformátoru
 $X_{tr,p}$ - přepočtená náhradní reaktance transformátoru

Přepočtená náhradní rezistance transformátoru

$$R_{tr,p} = \frac{\Delta P_{Cu} U_v^2}{S_{tr,n}^2} \quad (4.4)$$

kde: ΔP_{Cu} - ztráty transformátoru nakrátko

Přepočtená náhradní reaktance transformátoru

$$X_{tr,p} = \sqrt{Z_{tr,p}^2 - R_{tr,p}^2} \quad (4.5)$$

Přepočtená náhradní impedance generátoru

$$\mathbf{Z}_{g,p} = jx_d'' \frac{U_v^2}{S_{g,n}} \quad (4.6)$$

kde: x_d'' - subtranzitní reaktance generátoru
 $S_{g,n}$ - jmenovitý výkon generátoru

Modul náhradní impedance sítě

$$Z_{s,n} = c \frac{U_{s,n}^2}{S_{ks}} \quad (4.7)$$

kde: c - koeficient pro výpočet zkratových proudů
 $U_{s,n}$ - jmenovité napětí sítě

Modul přepočtené náhradní impedance sítě

$$Z_{s,p} = c \frac{U_v^2}{S_{ks}} \quad (4.8)$$

Přepočtená náhradní impedance sítě

$$\mathbf{Z}_{s,p} = R_{s,p} + jX_{s,p} \quad (4.9)$$

kde: $R_{s,p}$ a $X_{s,p}$ - poměr těchto veličin je dán normou

Poměrné hodnoty

Další možností, při výpočtech zkratových poměrů v síti je vyjádření pomocí poměrných veličin. Vztažné napětí U_v volíme jako jmenovité napětí sítě v místě poruchy a hodnotu vztažného výkonu S_v volíme libovolně, obvykle podle velikosti součtu výkonů všech generátorů pracujících do zkratu.

Vztažný proud

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3}U_v} \quad (4.10)$$

Vztažná impedance

$$Z_v = \frac{U_v^2}{S_v} \quad (4.11)$$

Přepočtená impedance vedení

$$\mathbf{Z}_{ved,p} = \mathbf{Z}_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2 \quad (4.12)$$

Modul přepočtené náhradní impedance transformátoru

$$Z_{tr,p} = e_k \frac{S_v}{S_{tr,n}} \quad (4.13)$$

Modul přepočtené náhradní impedance generátoru

$$Z_{g,p} = x_d'' \frac{S_v}{S_{g,n}} \quad (4.14)$$

Modul přepočtené náhradní impedance sítě

$$Z_{s,p} = c \frac{S_v}{S_{ks}} \quad (4.15)$$

Vztahy pro rezistance a reaktance jednotlivých prvků náhradního schématu jsou obdobné, jako u výpočtů ve skutečných hodnotách.

Jednotlivé veličiny v poměrných hodnotách jsou pak podílem veličin ve skutečných hodnotách a příslušných vztažných veličin - jsou tedy bezrozměrné. Po dokončení výpočtu v poměrných jednotkách se provede převod výsledků zpět na skutečné hodnoty, pomocí vztažných veličin.

Procentuální hodnoty

Jedná se o stejný princip, jako při výpočtech v poměrných hodnotách, s tím rozdílem, že je poměrná hodnota vynásobena stem.

4.3 Prvky náhradních schémat zkratových obvodů

Prvky náhradních schémat zkratových obvodů jsou jednotlivá zařízení v síti. Při výpočtech zkratových poměrů, jsou tyto prvky nahrazeny jejich impedancemi viz. kapitola 4.2.

V případě výpočtu zkratových výpočtů v sítích vn a vvn lze tyto prvky z dostatečnou přesností nahradit reaktancemi, což vede ke zjednodušení výpočtu. Na napěťové hladině nn toto zjednodušení provést nelze.

4.4 Metody výpočtu zkratů

V reálných sítích se zkratové poruchy vyskytují převážně jako nesouměrné, tedy jako spojení jedné, nebo dvou fází se zemí, případně vzájemné spojení dvou fází. K souměrným zkratovým poruchám, kdy jsou spojeny všechny tři fáze, dochází zřídka a ke spojení všech tří fází se zemí dochází spíše u kabelových vedení.

U sítí vn se nejčastěji vyskytují zkraty ve formě zemního spojení, které tvoří asi 65% všech zkratových poruch v těchto sítích a zkraty dvoufázové zemní, vyskytující se asi ve 20% případů. Dále se zde v asi 10% projevují zkraty dvoufázové a asi 5% jsou zastoupeny zkraty trojfázové.

Norma ČSN EN 60909-0 uvažuje následující dvě metody výpočtu zkratových proudů.

Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

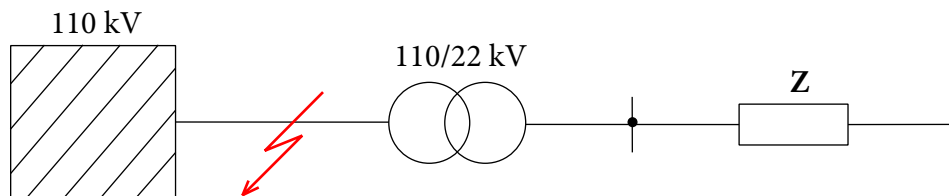
Princip této metody spočívá v tom, že jediný napěťový zdroj v celé soustavě je náhradní zdroj v místě zkratu. Napětí tohoto zdroje se určí vynásobením fázové hodnoty jmenovitého napětí sítě v místě zkratu a napěťového součinitele c . Při výpočtu se uvažují mezní hodnoty zkratového proudu, takže pro výpočet maximálního zkratu se používá napěťový součinitel c_{max} , který dle normy dosahuje doporučených hodnot 1,05 a 1,10. Pro výpočet minimálních zkratových proudů norma uvádí součinitel c_{min} o hodnotě 0,95 pro zkrat v síti nn a 1,00 pro zkrat v sítích vyšších napětí. Všechny ostatní prvky soustavy jdou nahrazeny svou vnitřní impedancí.

Metoda souměrných složek

Tato metoda spočívá ve zjednodušení použitím souměrných složek a je vhodná pro řešení souměrných i nesouměrných zkratů. Pro výpočet zkratových proudů v síti se proudy a napětí v soustavě rozloží na tři soustavy - souslednou, zpětnou a netočivou. Předpokládá se přitom souměrná struktura el. zařízení. Postup výpočtu, dle normy ČSN EN 60909-0, spočívá v určení proudu v každé fázi vedení, superponováním proudů těchto složkových soustav .

5 PRAKTICKÝ PŘÍKLAD VÝPOČTU

5.1 Schéma zapojení řešené sítě – zkrat na úrovni 110 kV



Obr. 5.1: Schéma zapojení sítě - zkrat na 110 kV

5.2 Výpočet zkratových poměrů dané sítě na úrovni 110 kV

Venkovní vedení :

$AlFe\ 95\ mm^2$

$l = 20\ km$

rovinné uspořádání

$U_v = U_n = 110\ kV$

a) 3f zkrat

$S_{ks}'' = 1840\ MVA$

$S_{tr,n} = 40\ MVA$

Modul přepočtené impedance sítě, dle vzorce (4.8)

$$Z_{s,p} = Z_{s,n} = c \frac{U_v^2}{S_{ks}''} = 1,1 \frac{(110 * 10^3)^2}{1840 * 10^6} = 7,234\ \Omega$$

kde: c - tab.1 ČSN EN 60909-0 (pro vvn)

Přepočtená impedance sítě, dle vzorce (4.9)

$$\mathbf{Z}_{s,p} = R_{s,p} + jX_{s,p} = (0,7198 + j 7,198) \Omega$$

$$X_{s,p} = 0,995 * Z_{s,p} = 0,995 * 7,234 = 7,198 \Omega$$

$$R_{s,p} = 0,1 * X_{s,p} = 0,1 * 7,198 = 0.7198 \Omega$$

kde: $R_{s,p}$, $X_{s,p}$ - dle normy ČSN EN 60909-0 (str.26)

Celková impedance obvodu

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{s,p} = (0,7198 + j 7,198) \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |Z_{s,n}|} = \frac{1,1 * (110 * 10^3)}{\sqrt{3} * (7,234)} = \underline{\underline{9657,1 A}}$$

a) 1f zkrat

$$S_{ks}'' = 1840 MVA$$

$$S_k^{(1)''} = 2180 MVA$$

$$S_{tr,n} = 40 MVA$$

Modul přepočtené impedance sítě - sousledná složka, dle vzorce (4.8)

$$Z_{s,p(1)} = c \frac{U_v^2}{S_{ks}''} = 1,1 \frac{(110 * 10^3)^2}{1840 * 10^6} = 7,234 \Omega$$

Modul přepočtené impedance sítě - zpětná složka

$$Z_{s,p(2)} = Z_{s,p(1)} = 7,234 \Omega$$

Modul přepočtené impedance sítě - netočivá složka

$$Z_{s,p(0)} = 3c \frac{U_v^2}{S_k^{(1)''}} - Z_{s,p(1)} - Z_{s,p(2)}$$

$$Z_{s,p(0)} = 3 * 1,1 \frac{(110 * 10^3)^2}{2180 * 10^6} = 7,234 - 7,234 = 3,849 \Omega$$

pozn: Není nutné počítat jednotlivé složky R a X pro $\mathbf{Z} = (R + jX)$, protože poměr $R : X$ předpokládáme stejný. Proto jsou hodnoty $Z_{s,p(1)}$ a $Z_{s,p(2)}$ stejné, jako v předchozím případě. Rovněž lze za tohoto předpokladu moduly impedancí $Z_{s,p(1)}$, $Z_{s,p(2)}$ a $Z_{s,p(0)}$ sečíst algebraicky.

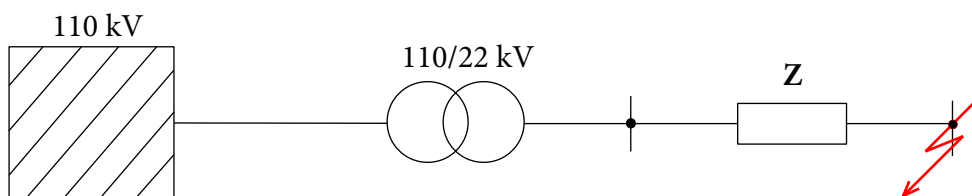
Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{|\mathbf{Z}_{s,p(1)} + \mathbf{Z}_{s,p(2)} + \mathbf{Z}_{s,p(0)}|}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{(Z_{s,p(1)} + Z_{s,p(2)} + Z_{s,p(0)})}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * 1,1 * (110 * 10^3)}{(7,234 + 7,234 + 3,849)} = \underline{11441,7 A}$$

5.3 Schéma zapojení řešené sítě – zkrat na konci vedení 22 kV



Obr. 5.2: Schéma zapojení sítě - zkrat na 22 kV

5.4 Výpočet zkratových poměrů dané sítě na konci vedení 22 kV

Venkovní vedení :

$$AlFe \ 95 \text{ mm}^2$$

$$l = 20 \text{ km}$$

rovinné uspořádání

$$R_k = 0,319 \ \Omega * \text{km}^{-1}$$

$$X_k = 0,35 \ \Omega * \text{km}^{-1}$$

$$U_v = U_n = 22 \text{ kV}$$

Transformátor 110/22 kV SIEMENS :

$$S_{tr,n} = 40 \text{ MVA}$$

$$e_k = 9,8\% = 0,098 \ [-]$$

$$i_k = 2\% = 0,02 \ [-]$$

$$\Delta P_{Cu} = 86 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{Fe} = 35 \text{ kW}$$

a) 3f zkrat

$$S_{ks}'' = 1840 \text{ MVA}$$

Modul přepočtené impedance sítě, dle vzorce (4.8)

$$Z_{s,p} = c \frac{U_v^2}{S_{ks}''} = 1,1 \frac{(22 * 10^3)^2}{1840 * 10^6} = 0,2893 \ \Omega$$

kde: c - tab.1 ČSN EN 60909-0 (pro vn)

Přepočtená impedance sítě, dle vzorce (4.9)

$$Z_{s,p} = R_{s,p} + jX_{s,p} = (0,0288 + j 0,2879) \ \Omega$$

$$X_{s,p} = 0,995 * Z_{s,p} = 0,995 * 0,2893 = 0,2879 \ \Omega$$

$$R_{s,p} = 0,1 * X_{s,p} = 0,1 * 0,2879 = 0,0288 \ \Omega$$

kde: $R_{s,p}$, $X_{s,p}$ - dle normy ČSN EN 60909-0 (str.26)

Modul přepočtené náhradní impedance transformátoru, dle vzorce (4.2)

$$Z_{tr,p} = e_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}} = 0,098 * \frac{(22 * 10^3)^2}{40 * 10^6} = 1,1858 \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru, dle vzorce (4.3)

$$\mathbf{Z}_{tr,p} = R_{tr,p} + jX_{tr,p} = (0,026 + j 1,1855) \Omega$$

$$R_{tr,p} = \frac{\Delta P_{Cu} * U_v^2}{S_{tr,n}^2} = \frac{86 * 10^3 (22 * 10^3)^2}{(40 * 10^6)^2} = 0,026 \Omega$$

$$X_{tr,p} = \sqrt{Z_{tr,p}^2 - R_{tr,p}^2} = \sqrt{1,1858^2 - 0,026^2} = 1,1855 \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k} = \mathbf{Z}_{tr,p} * K_t = (0,026 + j 1,1855) \cdot 0,987 = (0,0257 + j 1,17) \Omega$$

$$K_t = \frac{0,95 * c_{max}}{1 + 0,6 * 0,09798} = 0,987 [-]$$

$$x_t = \frac{X_{tr,p}}{\frac{U_n^2}{S_{tr,n}}} = \frac{1,1855}{\frac{(22*10^3)^2}{40*10^6}} = 0,09798 [-]$$

kde: K_t , x_t - dle normy ČSN EN 60909-0

c_{max} - tab.1. ČSN EN 60909-0 (pro 22 kV)

Přepočtená impedance vedení, dle vzorce (4.1)

$$\mathbf{Z}_{ved,p} = \mathbf{Z}_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2 = \mathbf{Z}_{ved,n}$$

$$\mathbf{Z}_{ved,p} = \mathbf{Z}_{ved,n} = R_{ved,n} + j X_{ved,n} = (6,38 + j 7) \Omega$$

$$R_{ved,n} = R_k * l = 0,319 * 20 = 6,38 \Omega$$

$$X_{ved,n} = X_k * l = 0,35 * 20 = 7 \Omega$$

Celková impedance obvodu

$$\begin{aligned}\mathbf{Z} &= \mathbf{Z}_{s,p} + \mathbf{Z}_{tr,p,k} + \mathbf{Z}_{ved,p} \\ \mathbf{Z} &= (0,0288 + j 0,2879) + (0,0257 + j 1,17) + (6,38 + j 7) \\ \mathbf{Z} &= (R + j X) = (6,435 + j 9,058) \Omega\end{aligned}$$

Velikost celkové impedance obvodu

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{6,435^2 + 8,458^2} = 10,628 \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |\mathbf{Z}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{\sqrt{3} * (10,628)} = \underline{\underline{1314,6 A}}$$

b) 2f zkrat

$$S_{ks}'' = 1840 MVA$$

Modul přepočtené impedance sítě - sousledná složka

$$Z_{s,p(1)} = Z_{s,p} = 0,2893 \Omega$$

Modul přepočtené impedance sítě - zpětná složka

$$Z_{s,p(2)} = Z_{s,p(1)} = 0,2893 \Omega$$

Přepočtená impedance sítě - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{s,p(1)} = \mathbf{Z}_{s,p} = (0,0288 + j 0,2879) \Omega$$

Přepočtená impedance sítě - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{s,p(2)} = \mathbf{Z}_{s,p(1)} = (0,0288 + j 0,2879) \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k(1)} = Z_{tr,p,k} = (0,0257 + j 1,17) \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k(2)} = Z_{tr,p,k(1)} = (0,0257 + j 1,17) \Omega$$

Přepočtená impedance vedení - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{ved,p(1)} = \mathbf{Z}_{ved,p} = (6,38 + j 7) \Omega$$

Přepočtená impedance vedení - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{ved,p(2)} = \mathbf{Z}_{ved,p(1)} = (6,38 + j 7) \Omega$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (6,435 + j 9,058) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (6,435 + j 9,058) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 2f zkrat

$$I_k^{(2)''} = \frac{c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{|(6,435 + j 9,058) + (6,435 + j 9,058)|} = \underline{\underline{6370,1 A}}$$

5.5 Vyhodnocení výpočtů

V této kapitole byl proveden praktický výpočet zkratových poměrů v distribuční síti v souladu se zadáním, a to na napěťové hladině 110 kV před transformátorem 110/22 kV a na konci venkovního vedení 22 kV s těmito výsledky:

Tab. 5.1: Tabulka vypočtených hodnot - ukázkový příklad

Místo zkratu	Napěťová hladina (jmenovité napětí) [kV]	Třífázový zkrat	Dvoufázový zkrat	Jednofázový zkrat
		Velikost zkratového proudu		
		I_{ks}'' [A]	$I_k^{(2)''}$ [A]	$I_k^{(1)''}$ [A]
A	110	9 657,1	-	11 441,7
B	22	1 314,6	1 138,5	-

Z výsledků vyplývají následující skutečnosti:

- Zkratový proud před transformátorem 110/22 kV je při trojfázovém zkratu nižší než při jednofázovém zkratu. Rozdíl činí cca. 18%. Tato skutečnost je dána tím, že modul netočivé složky impedance sítě má v zadaném příkladu nižší hodnotu oproti modulu sousledné složky impedance sítě. Velikost zkratového proudu při jednofázovém zkratu by byla použita při dimenzování zařízení z hlediska dynamických a tepelných účinků zkratového proudu. Pro nastavení ochran by bylo ještě nutné provést výpočet zkratového proudu dvoufázového zkratu a porovnat jej se zkratovým proudem trojfázového zkratu. Nižší hodnota proudu by byla použita pro nastavení ochran proti zkratu.
- Zkratový proud na konci venkovního vedení 22 kV je při trojfázovém zkratu vyšší než při dvoufázovém zkratu. Rozdíl činí cca. 13%. Pro dimenzování zařízení z hlediska tepelných a dynamických účinků zkratového proudu by byla použita hodnota zkratového proudu při trojfázovém zkratu, z hlediska nastavení ochran proti zkratu by byla použita hodnota zkratového proudu při dvoufázovém zkratu.
- Venkovní vedení vn 22 kV bývají v distribučních sítích provozována s nepřímou uzemněným nulovým bodem zdroje. Proto se zde v případě spojení jedné fáze se zemí nejedná o jednofázový zkrat, ale zemní spojení. Hodnoty proudů v případě tohoto typu poruchy jsou dány rozsahem sítě a jsou řádově srovnatelné se jmenovitými provozními proudy vedení.

6 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ REÁLNÉ SÍTĚ VN

V této kapitole jsou řešeny výpočty zkratových proudů v různých místech reálné sítě vn. Konkrétně se jedná o kabelové vedení městské části Brno - Vinohrady. Pro výpočty nejvyšších a nejnižších hodnoty zkratových proudů byly zvoleny třífázové, dvoufázové a jednofázové zkratové poruchy.

Na Obr. 6.1 je znázorněno schéma zapojení sítě vn, a to konkrétně městské části Brno - Vinohrady. Kabelová vedení propojující jednotlivé distribuční trafostanice v dané lokalitě jsou uspořádána do dvou samostatných smyček propojených přes přípojnice 22 kV.

Na Obr. 6.2 je znázorněno schéma zapojení distribučních transformátorů vvn/vn. Jde o dva transformátory stejného typu se jmenovitým převodem 110/23 kV, které pracují paralelně na straně vvn přes systém přípojnic B. Na straně VN pracuje každý transformátor do samostatného systému přípojnic. Transformátor T101 pracuje do systému A1, A2 a je na straně vn provozován s uzlem nepřímo uzemněným přes rezistor. Transformátor T102 pracuje do systému B1, B2 a je na straně vn provozován s uzlem nepřímo uzemněným přes zhasívací tlumivku.

Obě schémata spolu s doplňujícími informacemi byla poskytnuta provozovatelem distribuční sítě.

Z výše uvedených skutečností vyplývají následující podmínky pro výpočty zkratových poměrů v uvažované části sítě:

1. Zkratový výkon na přípojnicích vvn 110 kV zadaný provozovatelem zahrnuje veškerou předchozí síť včetně všech zdrojů zkratového proudu napojených na tyto přípojnice.

2. Vzhledem k rozdílnému způsobu uzemnění uzlu na straně vn nelze transformátory provozovat do stejného systému přípojnic. Pro výpočty bude uvažováno pouze s transformátorem T101, napájejícím systém A1, A2.

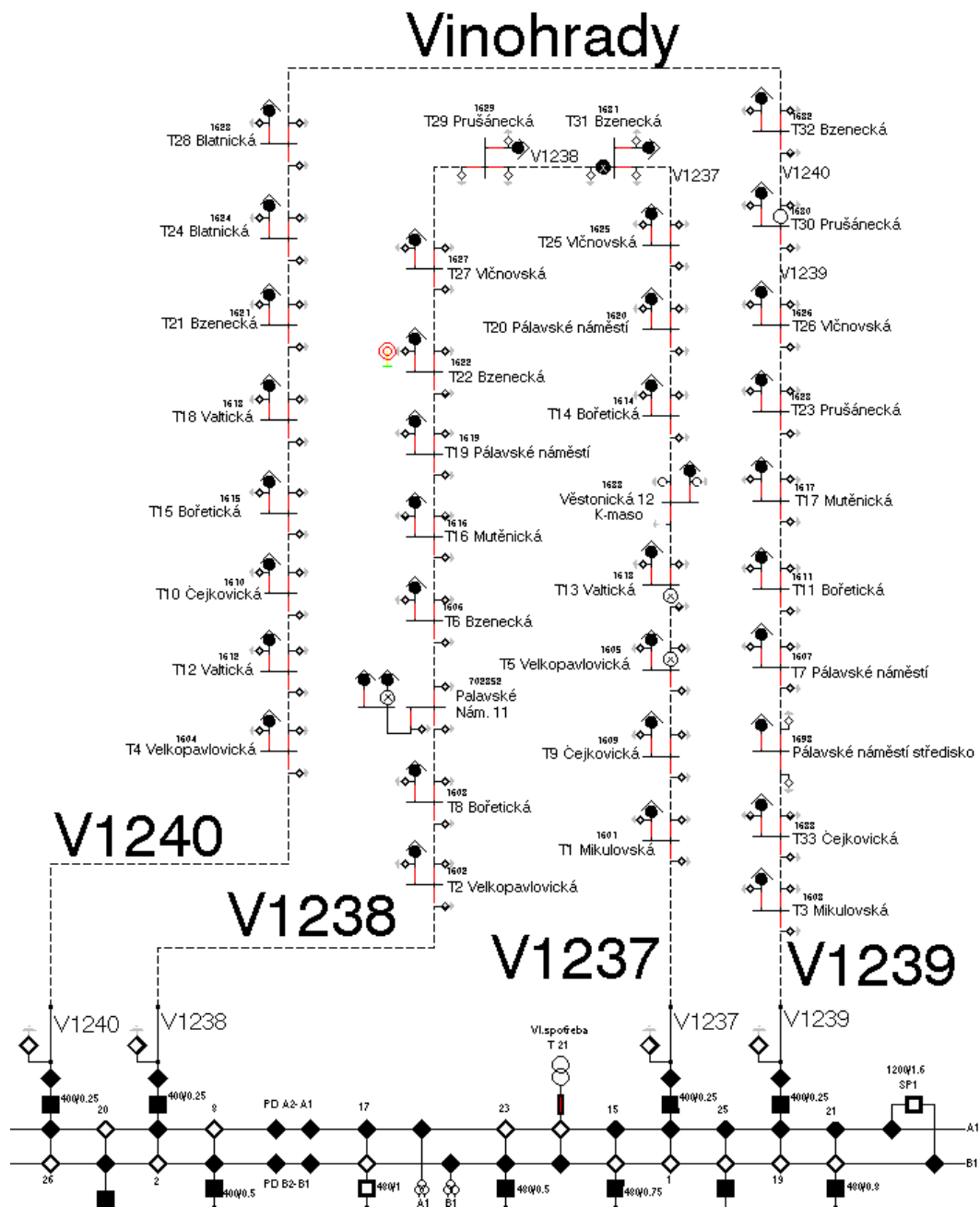
3. Všechna vedení vn uvažovaná při výpočtu zkratů (V1240, V1238, V1237 a V1239) jsou napájena ze systému A1, A2. Za tohoto předpokladu je možno vedení provozovat jako okružní při propojení vedení V1240-V1239 a V 1238-V1237 do dvou samostatných smyček.

4. Na uvažovaná vedení vn nejsou podle sdělení provozovatele napojeny žádné zdroje zkratového proudu (generátory, asynchronní motory vn). Zdroje zkratového proudu nejsou zapojeny ani na straně nn distribučních transformoven vn/nn. To umožňuje řešit uvažovaná vedení jako samostatné smyčky. Zkratové poměry v jedné smyčce tak nejsou ovlivněny druhou smyčkou a ani nemají vliv na provozní stav druhé smyčky.

5. Zkraty jsou uvažovány na přípojnicích vn distribučních transformoven vn/nn. Impedance jednotlivých úseků vedení jsou tak dány celkovou délkou příslušného úseku. V případě zkratu na kabelovém úseku by bylo nutno impedanci příslušného úseku rozdělit v poměru začátku (konce) úseku k místu poruchy.

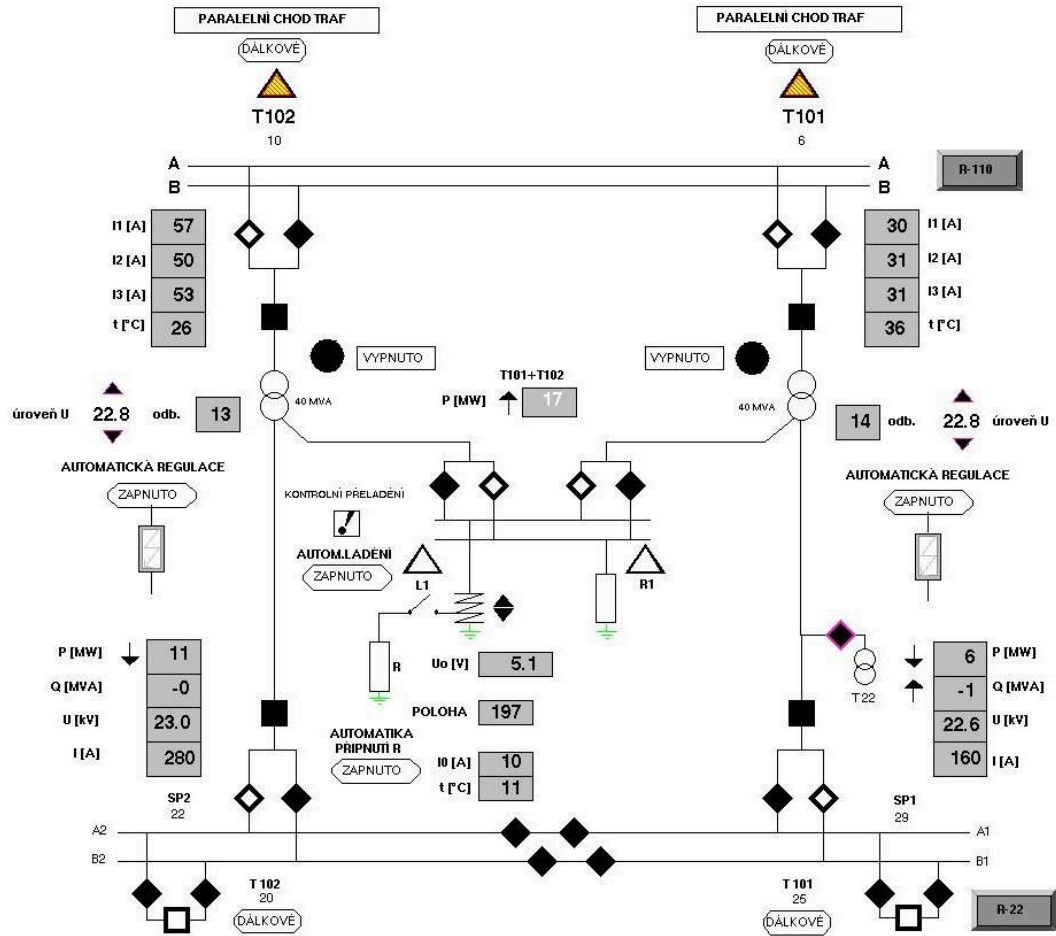
6. Do impedance zkratového obvodu nejsou zahrnuty impedance jednotlivých přípojnic. Vzhledem k jejich délkám a průřezům a s ohledem na velikost impedancí ostatních prvků zkratového obvodu je takto vzniklá chyba výpočtu zanedbatelná.

6.1 Reálné zapojení sítě vn Brno - Vinohrady



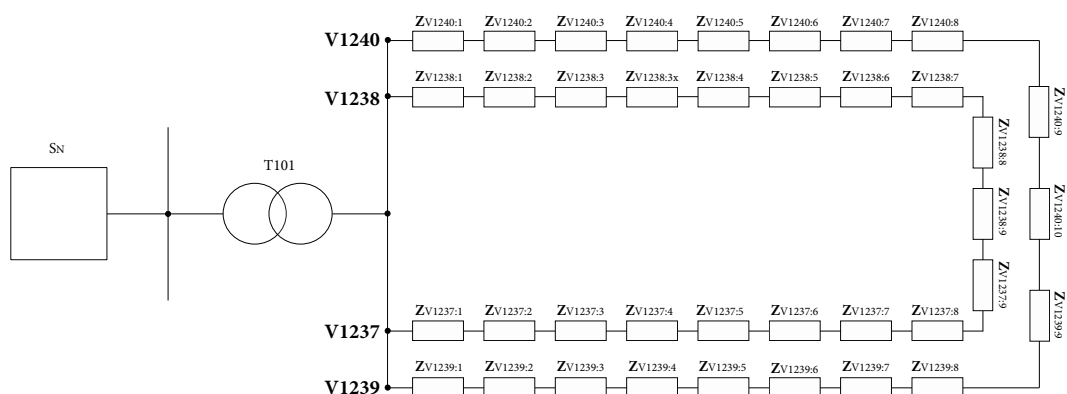
Obr. 6.1: Reálné schéma zapojení sítě Brno - Vinohrady

TR 110/22 kV - LI (DÁLKOVĚ) RIS



Obr. 6.2: Reálné schéma zapojení transformátorů 110/22 kV

6.2 Parametry sítě Brno - Vinohrady



Obr. 6.3: Náhradní schéma zapojení sítě vn Brno - Vinohrady

Parametry sítě:

$$S_{ks}'' = 1641 \text{ MVA}$$

$$S_k''^{(1)} = 1805 \text{ MVA}$$

Transformátor T101 :

$$S_{tr,n} = 40 \text{ MVA}$$

$$e_k = 10,86\% = 0,1086 [-]$$

$$\Delta P_{Cu} = 206,55 \text{ kW}$$

$$P_{\text{řevod}} = 110/23 \text{ kV}$$

Modul přepočtené náhradní impedance transformátoru, dle vzorce (4.2)

$$Z_{tr,p} = e_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}} = 0,1086 * \frac{(22 * 10^3)^2}{40 * 10^6} = 1,3141 \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru, dle vzorce (4.3)

$$\mathbf{Z}_{tr,p} = R_{tr,p} + jX_{tr,p} = (0,0625 + j 1,3126) \Omega$$

$$R_{tr,p} = \frac{\Delta P_{Cu} * U_v^2}{S_{tr,n}^2} = \frac{206,55 * 10^3 * (22 * 10^3)^2}{(40 * 10^6)^2} = 0,0625 \Omega$$

$$X_{tr,p} = \sqrt{Z_{tr,p}^2 - R_{tr,p}^2} = \sqrt{1,3141^2 - 0,0625^2} = 1,3126 \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k} = \mathbf{Z}_{tr,p} * K_t = (0,0625 + j 1,3126) \cdot 0,986 = (0,0616 + j 1,2942) \Omega$$

$$K_t = \frac{0,95 * c_{max}}{1 + 0,6 * 0,0993} = 0,986 [-]$$

$$x_t = \frac{X_{t,rp}}{\frac{U_n^2}{S_{tr,n}}} = \frac{1,3126}{\frac{(23*10^3)^2}{40*10^6}} = 0,0993 [-]$$

kde: K_t , x_t - dle normy ČSN EN 60909-0

c_{max} - tab.1. ČSN EN 60909-0 (pro 22 kV)

Kabelové vedení :

V tabulce na následující straně jsou uvedeny parametry jednotlivých úseků kabelového vedení Brno - Vinohrady, které poskytl provozovatel sítě.

Všechny kabelové úseky jsou provedeny stejným typem kabelů - tedy kabelů stejného průřezu, provedení a uspořádání jednotlivých fázových vodičů. Z toho také vyplývá stejná hodnota činného odporu na kilometr R_k a reaktance na kilometr X_k . Vzhledem k nestejným délkám jednotlivých úseků jsou potom rozdílné hodnoty impedancí těchto úseků.

Dále je zde příklad výpočtu impedance úseku vedení, pro první řádek z tabulky.

Příklad výpočtu:

Přepočtená impedance jednoho úseku vedení, dle vzorce (4.1)

$$\mathbf{Z}_{ved,p} = \mathbf{Z}_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2 = \mathbf{Z}_{ved,n}$$

$$\mathbf{Z}_{V1237:1,p} = \mathbf{Z}_{V1237:1,n} = (R_{V1237:1,n} + j X_{V1237:1,n}) = (0,0320 + j 0,0219) \Omega$$

$$R_{V1237:1,n} = R_k * l_{V1237:1} = 0,149 * 0,215 = 0,0320 \Omega$$

$$X_{V1237:1,n} = X_k * l_{V1237:1} = 0,102 * 0,215 = 0,0219 \Omega$$

Tab. 6.1: Parametry kabelových vedení vn

Parametry jednotlivých úseků kabelového vedení vn						
Zadané				Vypočtené		
Označení úseku	Rk [Ω/km]	Xk [Ω/km]	l [km]	R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]
V1237						
V1237:1	0,149	0,102	0,215	0,0320	0,0219	(0,0320 + j 0,0219)
V1237:2	0,149	0,102	0,756	0,1126	0,0771	(0,1126 + j 0,0771)
V1237:3	0,149	0,102	0,591	0,0881	0,0603	(0,0881 + j 0,0603)
V1237:4	0,149	0,102	0,573	0,0854	0,0584	(0,0853 + j 0,0584)
V1237:5	0,149	0,102	0,865	0,1289	0,0882	(0,1289 + j 0,0882)
V1237:6	0,149	0,102	0,105	0,0156	0,0107	(0,0156 + j 0,0107)
V1237:7	0,149	0,102	0,54	0,0805	0,0551	(0,0805 + j 0,0551)
V1237:8	0,149	0,102	0,551	0,0821	0,0562	(0,0821 + j 0,0562)
V1237:9	0,149	0,102	0,521	0,0776	0,0531	(0,0776 + j 0,0531)
V1238						
V1238:1	0,149	0,102	0,405	0,0603	0,0413	(0,0603 + j 0,0413)
V1238:2	0,149	0,102	0,666	0,0992	0,0679	(0,0992 + j 0,0679)
V1238:3	0,149	0,102	0,622	0,0927	0,0634	(0,0927 + j 0,0634)
V1238:3x	0,149	0,102	0,054	0,0080	0,0055	(0,0080 + j 0,0055)
V1238:4	0,149	0,102	0,666	0,0992	0,0679	(0,0992 + j 0,0679)
V1238:5	0,149	0,102	0,245	0,0365	0,0250	(0,0365 + j 0,0250)
V1238:6	0,149	0,102	0,476	0,0709	0,0486	(0,0709 + j 0,0486)
V1238:7	0,149	0,102	0,655	0,0976	0,0668	(0,0976 + j 0,0668)
V1238:8	0,149	0,102	0,319	0,0475	0,0325	(0,0475 + j 0,0325)
V1238:9	0,149	0,102	0,3	0,0447	0,0306	(0,0447 + j 0,0306)
V1239						
V1239:1	0,149	0,102	0,371	0,0553	0,0378	(0,0553 + j 0,0378)
V1239:2	0,149	0,102	0,537	0,0800	0,0548	(0,0800 + j 0,0548)
V1239:3	0,149	0,102	0,63	0,0939	0,0643	(0,0939 + j 0,0643)
V1239:4	0,149	0,102	0,114	0,0170	0,0116	(0,0170 + j 0,0116)
V1239:5	0,149	0,102	0,409	0,0609	0,0417	(0,0609 + j 0,0417)
V1239:6	0,149	0,102	0,94	0,1401	0,0959	(0,1401 + j 0,0959)
V1239:7	0,149	0,102	0,833	0,1241	0,0850	(0,1241 + j 0,0850)
V1239:8	0,149	0,102	0,406	0,0605	0,0414	(0,0605 + j 0,0414)
V1239:9	0,149	0,102	0,423	0,0630	0,0431	(0,0630 + j 0,0431)
V1240						
V1240:1	0,149	0,102	0,607	0,0904	0,0619	(0,0904 + j 0,0619)
V1240:10	0,149	0,102	0,188	0,0280	0,0192	(0,0280 + j 0,0192)
V1240:2	0,149	0,102	0,572	0,0852	0,0583	(0,0852 + j 0,0583)
V1240:3	0,149	0,102	0,315	0,0469	0,0321	(0,0469 + j 0,0321)
V1240:4	0,149	0,102	1,051	0,1566	0,1072	(0,1566 + j 0,1072)
V1240:5	0,149	0,102	0,405	0,0603	0,0413	(0,0603 + j 0,0413)
V1240:6	0,149	0,102	0,452	0,0673	0,0461	(0,0673 + j 0,0461)
V1240:7	0,149	0,102	0,393	0,0586	0,0401	(0,0586 + j 0,0401)
V1240:8	0,149	0,102	0,616	0,0918	0,0628	(0,0918 + j 0,0628)
V1240:9	0,149	0,102	0,341	0,0508	0,0348	(0,0508 + j 0,0348)

6.3 Řešení trojfázových zkratů v dané síti

Modul přepočtené impedance sítě, dle vzorce (4.8)

$$Z_{s,p} = Z_{s,n} = c \frac{U_v^2}{S_{ks}} = 1,1 \frac{(22 * 10^3)^2}{1641 * 10^6} = 0,3244 \Omega$$

kde: c - tab.1 ČSN EN 60909-0 (pro vn)

Pozn: Pro všechny výpočty 3f a 2f zkratů uvažujeme max. hodnotu $c=1,1$

Přepočtená impedance sítě, dle vzorce (4.9)

$$\mathbf{Z}_{s,p} = R_{s,p} + jX_{s,p} = (0,0323 + j 0,3228) \Omega$$

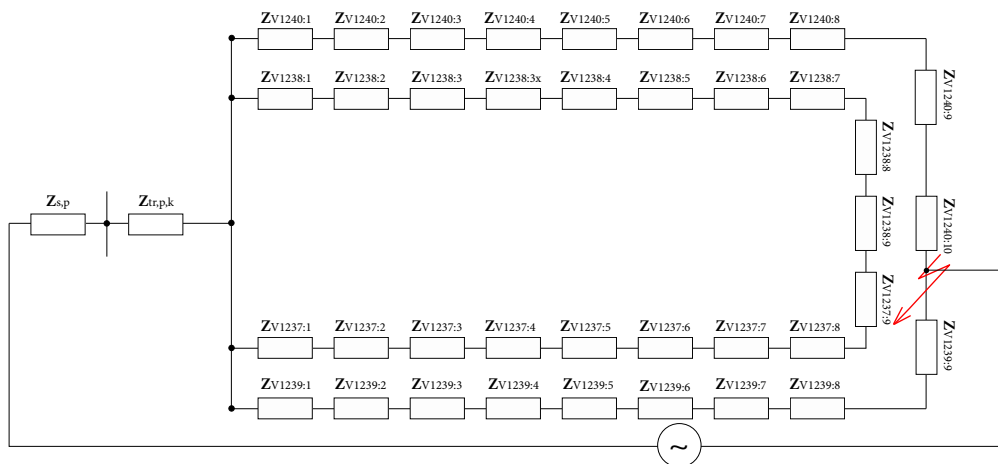
$$X_{s,p} = 0,995 * Z_{s,p} = 0,995 * 0,3244 = 0,3228 \Omega$$

$$R_{s,p} = 0,1 * X_{s,p} = 0,1 * 0,3228 = 0,0323 \Omega$$

kde: $R_{s,p}$, $X_{s,p}$ - dle normy ČSN EN 60909-0 (str.26)

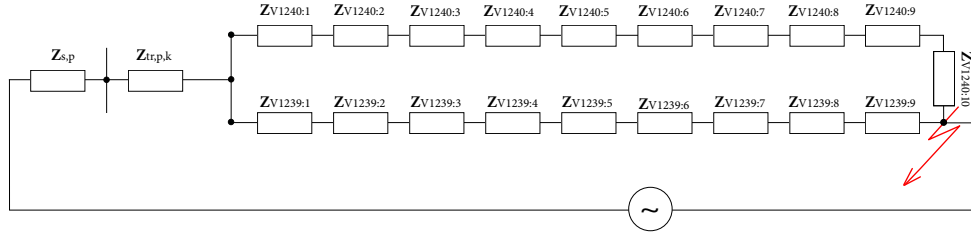
a) 3f zkrat v místě A (mezi $Z_{V1240:10}$ a $Z_{V1239:9}$)

Pozn: Pro tento konkrétní příklad je v práci uveden celý postup výpočtu, včetně vyznačení postupu při zjednodušování obvodu sítě. V ostatních případech byl postup obdobný a proto jsou dále popsány již pouze konkrétní výpočty.



Obr. 6.4: Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě A

V tomto případě je zkratovou poruchou zasažena pouze smyčka V1240 - V1239. Smyčka V1238 - V1237 nebude touto poruchou ovlivněna, proto ji v dalších výpočtech nebudeme uvažovat a schéma můžeme dále zjednodušit následujícím způsobem.



Obr. 6.5: Náhradní zjednodušené schéma zapojení - 3f zkrat v místě A

Přepočtená impedance úseků vedení

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_{s,p} + \mathbf{Z}_{tr,p,k} \quad (6.1)$$

$$\mathbf{Z}_A = (0,0323 + j 0,3228) + (0,0616 + j 1,2942) = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = \sum(Z_{V1240:1}; Z_{V1240:10}) \quad (6.2)$$

$$\mathbf{Z}_B = (0,7359 + j 0,5038) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = \sum(Z_{V1239:1}; Z_{V1239:9}) \quad (6.3)$$

$$\mathbf{Z}_C = (0,6948 + j 0,4756) \Omega$$

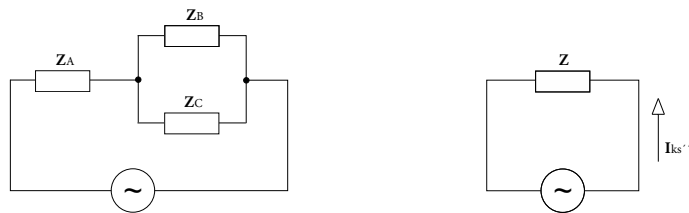
Celková impedance obvodu

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B \parallel \mathbf{Z}_C$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \frac{\mathbf{Z}_B * \mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$

$$\mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) + \frac{(0,7359 + j 0,5038) * (0,6948 + j 0,4756)}{(0,7359 + j 0,5038) + (0,6948 + j 0,4756)}$$

$$\mathbf{Z} = (0,4513 + j 1,8616) \Omega$$



Obr. 6.6: Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 3f zkrat

Velikost celkové impedance obvodu

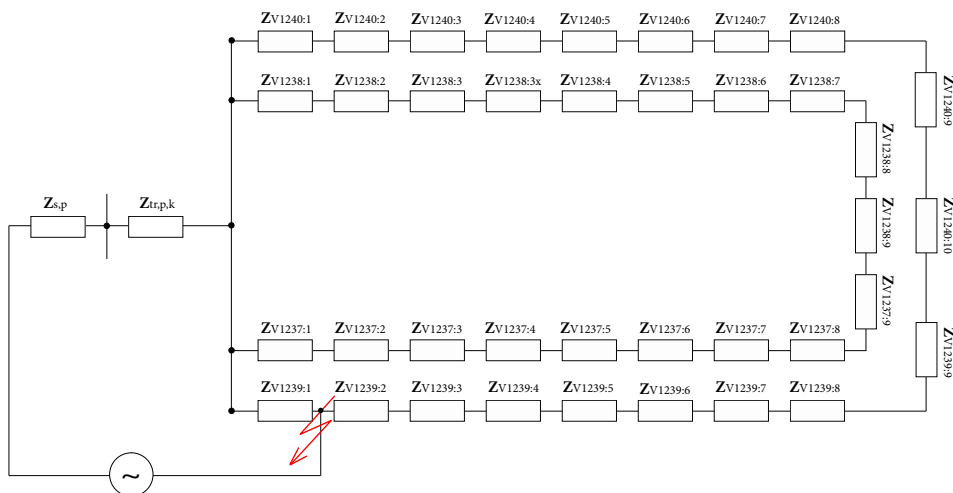
$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{0,4513^2 + 1,8616^2} = 1,9155 \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |\mathbf{Z}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{\sqrt{3} * (1,9155)} = \underline{\underline{7294,1 A}}$$

b) 3f zkrat v místě B (mezi $Z_{V1239:1}$ a $Z_{V1239:2}$)



Obr. 6.7: Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě B

Podobně, jako v minulém případě je i zde zkratovou poruchou zasažena pouze smyčka V1240 - V1239. Smyčku V1238 - V1237 tedy opět nebudeme uvažovat.

Přepočtená impedance úseků vedení

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_{s,p} + \mathbf{Z}_{tr,p,k} \quad (6.4)$$

$$\mathbf{Z}_A = (0,0323 + j 0,3228) + (0,0616 + j 1,2942) = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_D = \sum(Z_{V1239:2-9}; Z_{V1240:1-10}) \quad (6.5)$$

$$\mathbf{Z}_D = (1,3754 + j 0,9416) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_E = Z_{V1239:1} \quad (6.6)$$

$$\mathbf{Z}_E = (0,0553 + j 0,0378) \Omega$$

Celková impedance obvodu

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_D \parallel \mathbf{Z}_E$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \frac{\mathbf{Z}_D * \mathbf{Z}_E}{\mathbf{Z}_D + \mathbf{Z}_E}$$

$$\mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) + \frac{(1,3754 + j 0,9416) * (0,0553 + j 0,0378)}{(1,3754 + j 0,9416) + (0,0553 + j 0,0378)}$$

$$\mathbf{Z} = (0,1471 + j 1,6533) \Omega$$

Velikost celkové impedance obvodu

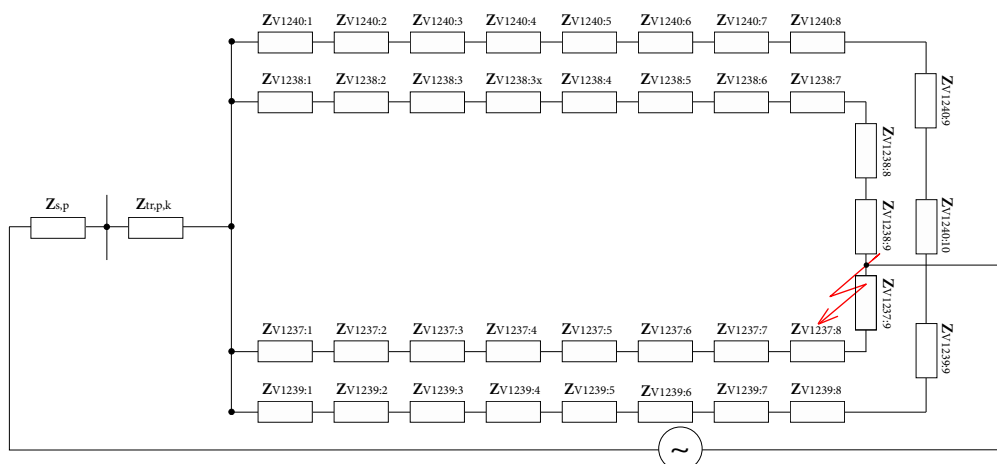
$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{0,1471^2 + 1,6533^2} = 1,6598 \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |\mathbf{Z}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{\sqrt{3} * (1,6598)} = \underline{\underline{8417,8 A}}$$

c) 3f zkrat v místě C (mezi $Z_{V1238:9}$ a $Z_{V1237:9}$)



Obr. 6.8: Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě C

Na rozdíl od dvou předchozích případů, je v tomto zkratovou poruchou postižena pouze smyčka V1238 - V1237 a smyčku V1240 - V1239 naopak nebudeme uvažovat.

Přepočtená impedance úseků vedení

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_{s,p} + \mathbf{Z}_{tr,p,k} \quad (6.7)$$

$$\mathbf{Z}_A = (0,0323 + j 0,3228) + (0,0616 + j 1,2942) = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_F = \sum(Z_{V1238:1}; Z_{V1238:9}) \quad (6.8)$$

$$\mathbf{Z}_F = (0,6566 + j 0,4495) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_G = \sum(Z_{V1237:1}; Z_{V1237:9}) \quad (6.9)$$

$$\mathbf{Z}_G = (0,7028 + j 0,4810) \Omega$$

Celková impedance obvodu

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_F \parallel \mathbf{Z}_G$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A + \frac{\mathbf{Z}_F * \mathbf{Z}_G}{\mathbf{Z}_F + \mathbf{Z}_G}$$

$$\mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) + \frac{(0,6566 + j 0,4495) * (0,7028 + j 0,4810)}{(0,6566 + j 0,4495) + (0,7028 + j 0,4810)}$$

$$\mathbf{Z} = (0,4334 + j 1,8494) \Omega$$

Velikost celkové impedance obvodu

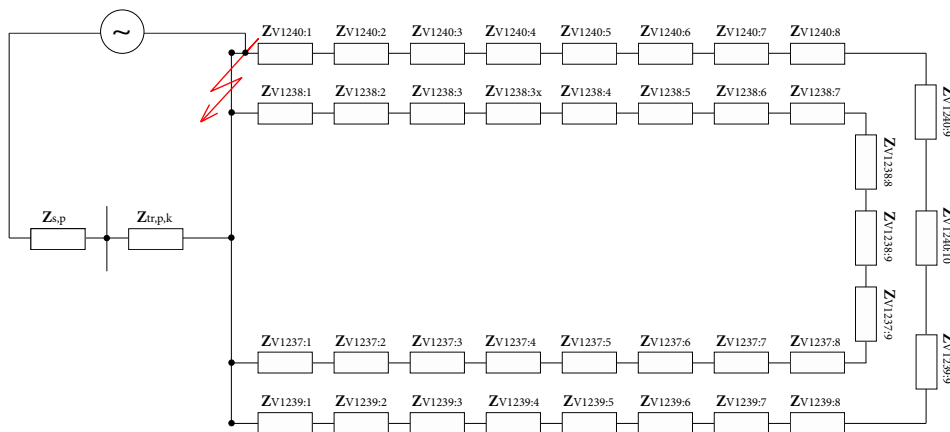
$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{0,4334^2 + 1,8494^2} = 1,8995 \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |\mathbf{Z}|} = \frac{1,1 * (22 * 10)^3}{\sqrt{3} * (1,8995)} = \underline{7355,6 A}$$

d) 3f zkrat v místě D (ve vývodovém poli)



Obr. 6.9: Náhradní schéma zapojení sítě - 3f zkrat v místě D

V tomto případě není zkratovou poruchou zasažena ani jedna smyčka kabelového vedení a celková impedance zkratového obvodu se tedy rovná součtu impedancí transformátoru T101 a síťového napáječe.

Celková impedance obvodu

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_A = \mathbf{Z}_{s,p} + \mathbf{Z}_{tr,p,k} \quad (6.10)$$

$$\mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

Velikost celkové impedance obvodu

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{0,0939^2 + 1,6170^2} = 1,6197 \Omega$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I_{ks}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} |\mathbf{Z}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{\sqrt{3} * (1,6197)} = \underline{\underline{8626,2 A}}$$

Při výpočtu maximálních hodnot zkratových proudů nezbytných pro správné dimenzování zařízení, tedy trojfázových a dvoufázových zkratových proudů, není nutné provádět výpočet rozdělení proudů ve vedení.

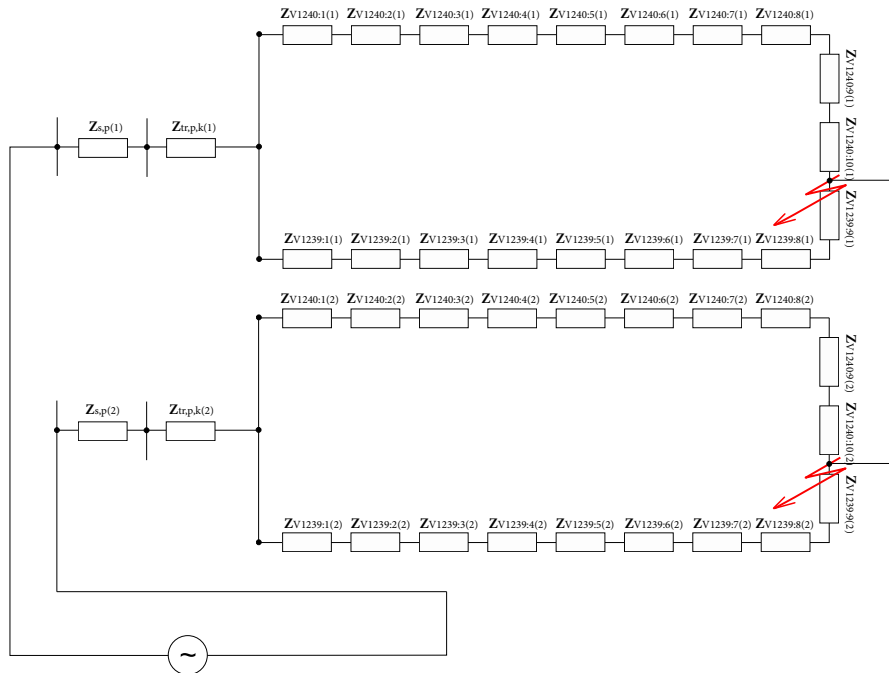
Tento výpočet bude realizován v řešení jednofázových zkratů.

6.4 Řešení dvoufázových zkratů v dané síti

Dvoufázové zkratové poruchy budeme vyšetřovat ve stejných místech sítě, jako zkraty trojfázové. Každá zkratová porucha bude tedy opět ovlivňovat pouze tu smyčku, ve které se vyskytla. Dále zde budeme uvažovat elektricky vzdálené zkraty, z čehož vyplývá, že se sousledné složky impedancí budou rovnat složkám zpětným.

a) 2f zkrat v místě A (mezi $\mathbf{Z}_{V1240:10}$ a $\mathbf{Z}_{V1239:9}$)

Pozn: Obdobně jako u trojfázových zkratů je i zde pro tento konkrétní příklad uveden postup při zjednodušování obvodu sítě. Při výpočtech se vychází z výpočtů pro 3f zkraty.



Obr. 6.10: Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě A

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

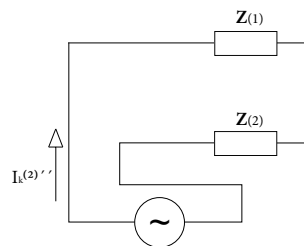
$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,4513 + j 1,8616) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

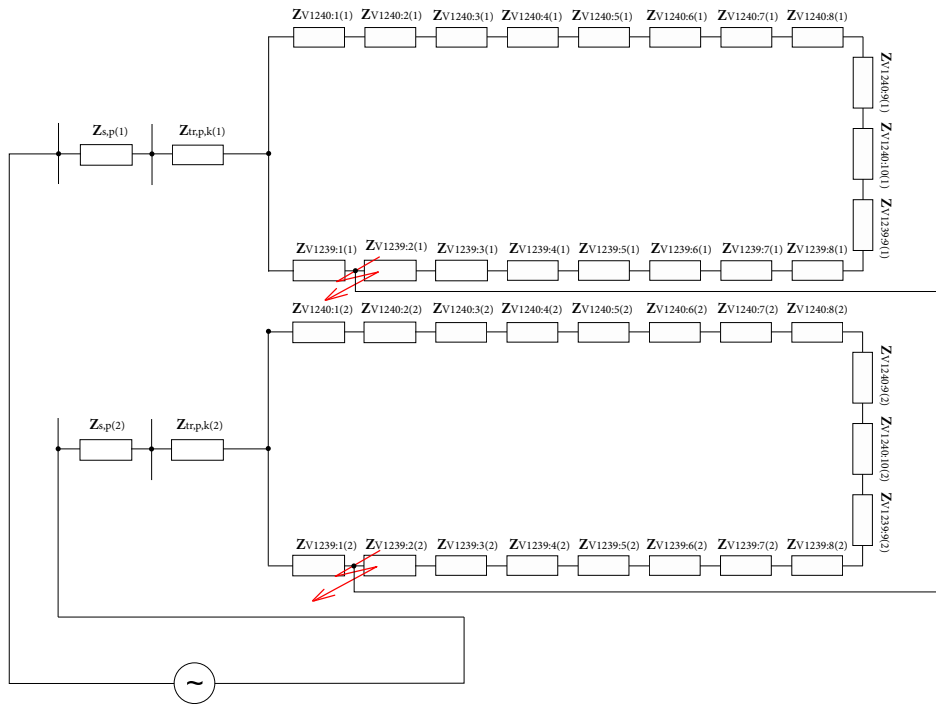
$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,4513 + j 1,8616) \Omega$$



Obr. 6.11: Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 2f zkrat

Počáteční rázový zkratový proud pro 2f zkrat

$$I_k^{(2)''} = \frac{c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{|(0,4513 + j 1,8616) + (0,4513 + j 1,8616)|} = \underline{\underline{6316,9 \text{ A}}}$$



Obr. 6.12: Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě B

b) 2f zkrat v místě B (mezi $Z_{V1239:1}$ a $Z_{V1239:2}$)

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,1471 + j 1,6533) \Omega$$

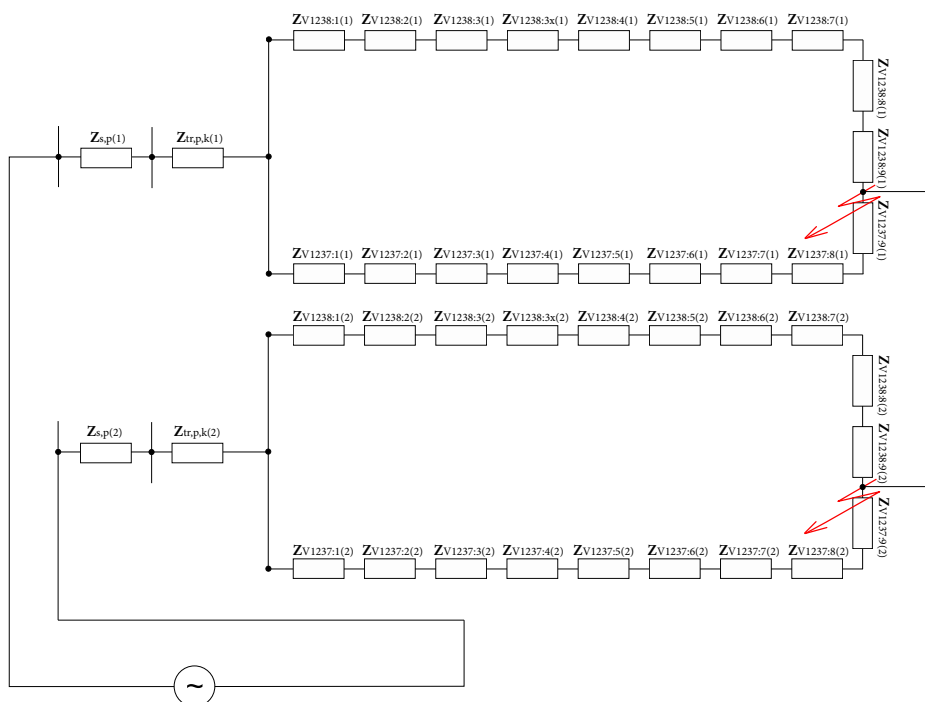
Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,1471 + j 1,6533) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 2f zkrat

$$I_k^{(2)''} = \frac{c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{|(0,1471 + j 1,6533) + (0,1471 + j 1,6533)|} = \underline{7290,0 A}$$

c) 2f zkrat v místě C (mezi $Z_{V1238:9}$ a $Z_{V1237:9}$)



Obr. 6.13: Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě C

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,4334 + j 1,8494) \Omega$$

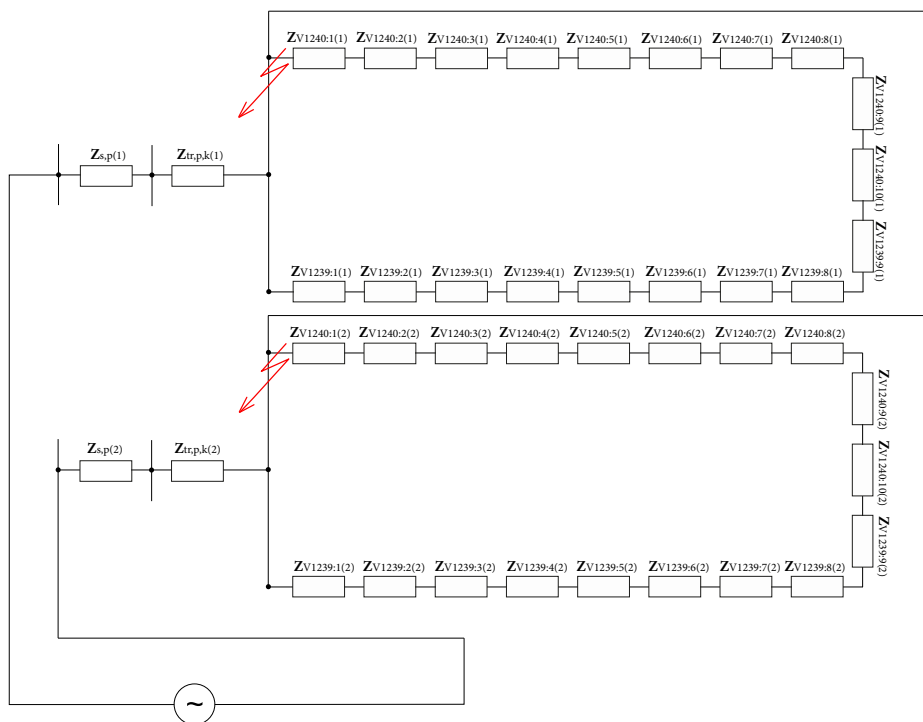
Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,4334 + j 1,8494) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 2f zkrat

$$I_k^{(2)''} = \frac{c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{|(0,4334 + j 1,8494) + (0,4334 + j 1,8494)|} = \underline{\underline{6370,1 \text{ A}}}$$

d) 2f zkrat v místě D (ve vývodovém poli)



Obr. 6.14: Náhradní schéma zapojení sítě - 2f zkrat v místě D

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 2f zkrat

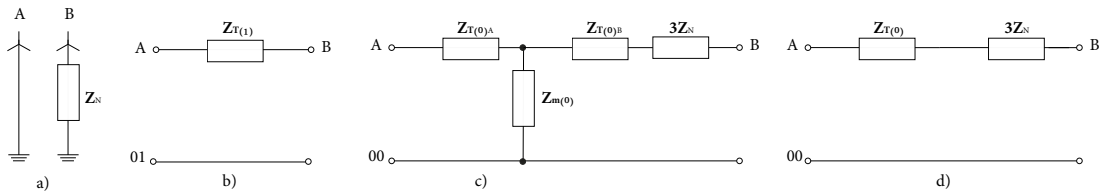
$$I_k^{(2)''} = \frac{c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 * (22 * 10^3)}{|(0,0939 + j 1,6170) + (0,0939 + j 1,6170)|} = \underline{\underline{7470,5 \text{ A}}}$$

6.5 Řešení jednofázových zkratů v dané síti

Stejně jako u trojfázových a dvoufázových zkratů, budeme jednofázové zkratové poruchy vyšetřovat opět ve stejných místech sítě. I zde budeme uvažovat elektricky vzdálené zkraty, z čehož vyplývá, že se sousledné složky impedancí budou rovnat složkám zpětným, ovšem při řešení jednofázových zkratů je nutno uvažovat navíc složku netočivou. Tato složka se nerovná složce sousledné a zpětné a je velmi závislá na konkrétním provedení řešené sítě. Navíc zde významnou roli hraje velikost rezistance uzemnění uzlu zdroje a konfigurace.

V normě PNE 33 3042 [5] a v literatuře [6] jsou uvedeny příklady ekvivalentních obvodů transformátorů v sousledné a netočivé soustavě. Z údajů poskytnutých provozovatelem vyplývá, že transformátor je provozován jako dvouvinuťový zapojení YNyn0/(d). Náhradní schéma tohoto zapojení není v literatuře uvedeno. Z ekvivalentního obvodu No. 7 v Tab.1. PNE 33 3042 a zapojení č.5 v příloze C literatury [6] byl odvozen ekvivalentní obvod T101, znázorněný na následujícím obrázku, kde:

- spojení uzlu transformátoru se zemí, A - strana vvn, B - strana vn
- ekvivalentní obvod - sousledná soustava
- ekvivalentní obvod - netočivá soustava
- ekvivalentní obvod - netočivá soustava při zanedbání impedance mag. větve



Obr. 6.15: Ekvivalentní obvod transformátoru T101 v sousledné a netočivé soustavě

Protože velikost impedance magnetizační větve $Z_{m(0)}$ je ve srovnání s ostatními impedancemi zkratového obvodu mnohonásobně vyšší, lze ji při výpočtech zkratových poměrů zanedbat. Proto je v dalších schématech pro ekvivalentní obvod transformátoru T101 v netočivé soustavě použito schéma d), a impedance Z_N je v souladu s předchozím textem reprezentována rezistorem R_N .

Konkrétní hodnoty poměrů netočivých složek ku sousledným poskytl provozovatel sítě:

Parametry Transformátoru T101:

$$S_n = 40 \text{ MVA}$$

$$\mathbf{Z}_0 : \mathbf{Z}_1 = (2, 6380 + j 1, 3800) [-]$$

$$K_{R,tr} = R_{tr(0)} : R_{tr(1)} = 2, 6380 [-]$$

$$K_{X,tr} = X_{tr(0)} : X_{tr(1)} = 1,3800 [-]$$

Parametry kabelů:

$$\mathbf{Z}_0 : \mathbf{Z}_1 = (6,8831 + j 7,1264) [-]$$

$$K_{R,v} = R_{v(0)} : R_{v(1)} = 6,8831 [-]$$

$$K_{X,v} = X_{v(0)} : X_{v(1)} = 7,1264 [-]$$

Nominální rezistance uzlového rezistoru:

$$R_N = 22,1 \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k} = (0,0616 + j 1,2942) \Omega$$

Přepočtená impedance transformátoru korigovaná - netočivá složka

$$\mathbf{Z}_{tr,p,k(0)} = \mathbf{Z}_{tr,p,k} * K_{tr} = (0,1625 + j 1,7860) \Omega$$

$$R_{tr,p,k(0)} = R_{tr,p,k} * K_{R,tr} = 0,0616 * 2,6380 = 0,1625 \Omega$$

$$X_{tr,p,k(0)} = X_{tr,p,k} * K_{X,tr} = 1,2942 * 1,3800 = 1,7860 \Omega$$

Modul přepočtené impedance sítě - netočivá složka

$$Z_{s,p(0)} = 3c \frac{U_v^2}{S_k^{(1)^{1/c}}} - Z_{s,p(1)} - Z_{s,p(2)}$$

$$Z_{s,p(0)} = 3 * 1 \frac{(22 * 10^3)^2}{1805 * 10^6} - 0,3244 - 0,3244 = 0,1556 \Omega$$

kde: c - tab.1 ČSN EN 60909-0 (pro vn)

Pozn: Pro všechny výpočty 1f zkratů uvažujeme min. hodnotu $c=1$

Přepočtená impedance sítě, dle vzorce (4.9)

$$\mathbf{Z}_{s,p(0)} = R_{s,p(0)} + jX_{s,p(0)} = (0,0155 + j 0,1548) \Omega$$

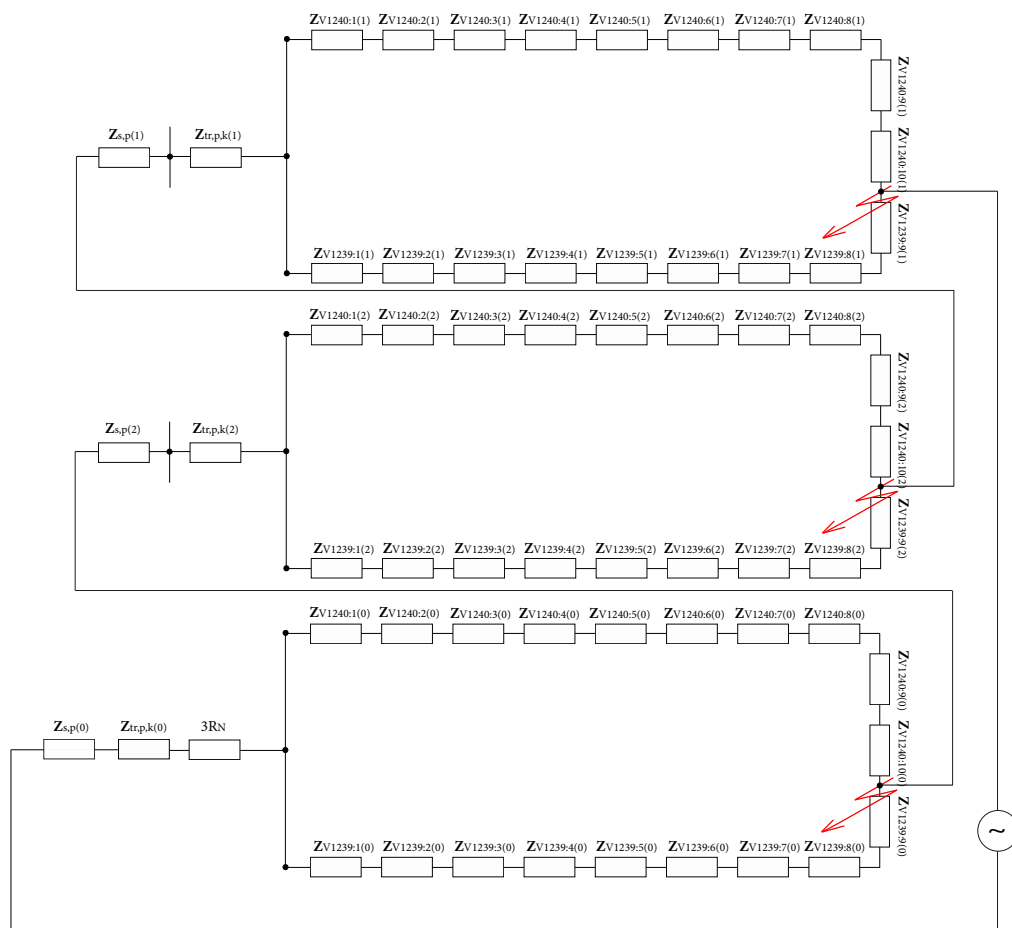
$$X_{s,p(0)} = 0,995 * Z_{s,p(0)} = 0,995 * 0,1556 = 0,1548 \Omega$$

$$R_{s,p(0)} = 0,1 * X_{s,p(0)} = 0,1 * 0,1548 = 0,0155 \Omega$$

kde: $R_{s,p}$, $X_{s,p}$ - dle normy ČSN EN 60909-0 (str.26)

a) 1f zkrat v místě A (mezi $Z_{V1240:10}$ a $Z_{V1239:9}$)

Pozn: Opět je i zde pro tento konkrétní případ uveden celý postup při zjednodušování obvodu sítě. Při výpočtech se vychází z výpočtů pro 3f a 2f zkraty.



Obr. 6.16: Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě A

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,4513 + j 1,8616) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,4513 + j 1,8616) \Omega$$

Pro výpočet netočivé složky je nutno provést přepočít jednotlivých impedancí a uvažovat také hodnotu rezistance uzlového rezistoru.

$$\mathbf{Z}_{H(0)} = \mathbf{Z}_{s,p(0)} + \mathbf{Z}_{tr,p,k(0)} + 3 * R_N$$

$$\mathbf{Z}_{H(0)} = (0,0155 + j 0,1548) + (0,1625 + j 1,7860) + 3 * 22,1$$

$$\mathbf{Z}_{H(0)} = (66,4780 + j 1,9408) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_B = (0,7359 + j 0,5038) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{B(0)} = \mathbf{Z}_B * K_v = (5,0653 + j 3,5903) \Omega$$

$$R_{B(0)} = R_B * K_{R,v} = 0,7359 * 6,8831 = 5,0653 \Omega$$

$$X_{B(0)} = X_B * K_{X,v} = 0,5038 * 7,1264 = 3,5903 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_C = (0,6948 + j 0,4756) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{C(0)} = \mathbf{Z}_C * K_v = (4,7824 + j 3,3893) \Omega$$

$$R_{C(0)} = R_C * K_{R,v} = 0,6948 * 6,8831 = 4,7824 \Omega$$

$$X_{C(0)} = X_C * K_{X,v} = 0,4756 * 7,1264 = 3,3893 \Omega$$

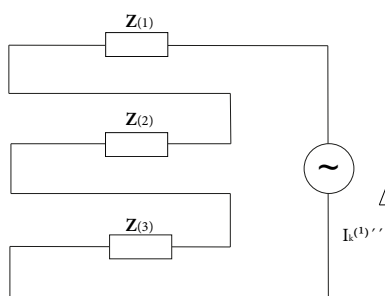
Celková impedance obvodu - netočivá složka

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \mathbf{Z}_{B(0)} \parallel \mathbf{Z}_{C(0)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \frac{\mathbf{Z}_{B(0)} * \mathbf{Z}_{C(0)}}{\mathbf{Z}_{B(0)} + \mathbf{Z}_{C(0)}}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (66,4780 + j 1,9408) + \frac{(5,0653 + j 3,5907) * (4,7824 + j 3,3893)}{(5,0653 + j 3,5907) + (4,7824 + j 3,3893)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (68,9380 + j 3,6843) \Omega$$



Obr. 6.17: Výsledné zjednodušení náhradního schématu sítě - 1f zkrat

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)} + \mathbf{Z}_{(0)}|}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * 1 * (22 * 10^3)}{|(0,4513 + j 1,8616) + (0,4513 + j 1,8616) + (68,9380 + j 3,6843)|} = \underline{542,6 \text{ A}}$$

b) 1f zkrat v místě B (mezi $\mathbf{Z}_{V1239:1}$ a $\mathbf{Z}_{V1239:2}$)

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

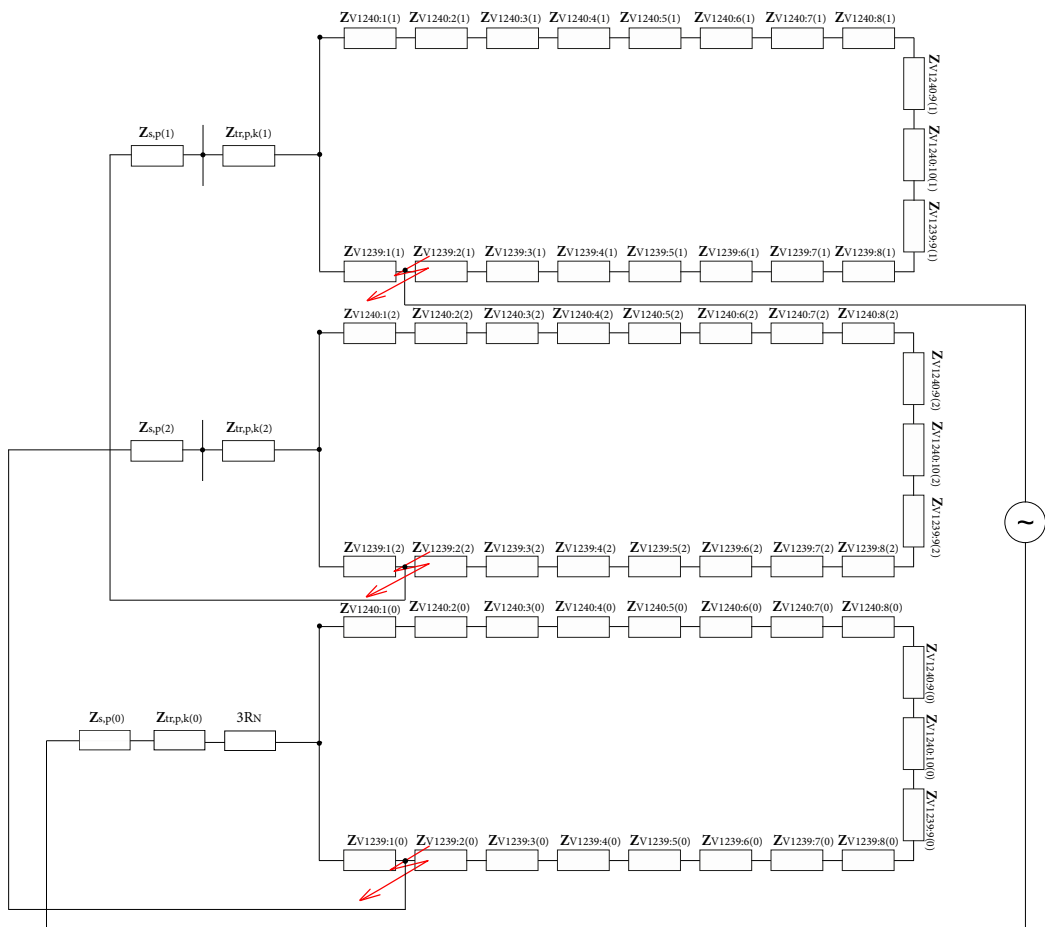
$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,1471 + j 1,6533) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,1471 + j 1,6533) \Omega$$



Obr. 6.18: Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě B

Výpočet netočivé složky

$$\mathbf{Z}_D = (1,3754 + j 0,9416) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{D(0)} = \mathbf{Z}_D * K_v = (9,4670 + j 6,7102) \Omega$$

$$R_{D(0)} = R_D * K_{R,v} = 1,3754 * 6,8831 = 9,4670 \Omega$$

$$X_{D(0)} = X_D * K_{X,v} = 0,9416 * 7,1264 = 6,7102 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_E = (0,0553 + j 0,0378) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{E(0)} = \mathbf{Z}_E * K_v = (0,3806 + j 0,2694) \Omega$$

$$R_{E(0)} = R_E * K_{R,v} = 0,0553 * 6,8831 = 0,3806 \Omega$$

$$X_{E(0)} = X_E * K_{X,v} = 0,0378 * 7,1264 = 0,2694 \Omega$$

Celková impedance obvodu - netočivá složka

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \mathbf{Z}_{D(0)} \parallel \mathbf{Z}_{E(0)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \frac{\mathbf{Z}_{D(0)} * \mathbf{Z}_{E(0)}}{\mathbf{Z}_{D(0)} + \mathbf{Z}_{E(0)}}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (66,4780 + j 1,9408) + \frac{(9,4670 + j 6,7102) * (0,3806 + j 0,2694)}{(9,4670 + j 6,7102) + (0,3806 + j 0,2694)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (66,8440 + j 2,1998) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)} + \mathbf{Z}_{(0)}|}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * 1 * (22 * 10^3)}{|(0,1471 + j 1,6533) + (0,1471 + j 1,6533) + (66,8440 + j 2,1998)|} = \underline{565,7 A}$$

c) 1f zkrat v místě C (mezi $\mathbf{Z}_{V1238:9}$ a $\mathbf{Z}_{V1237:9}$)

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

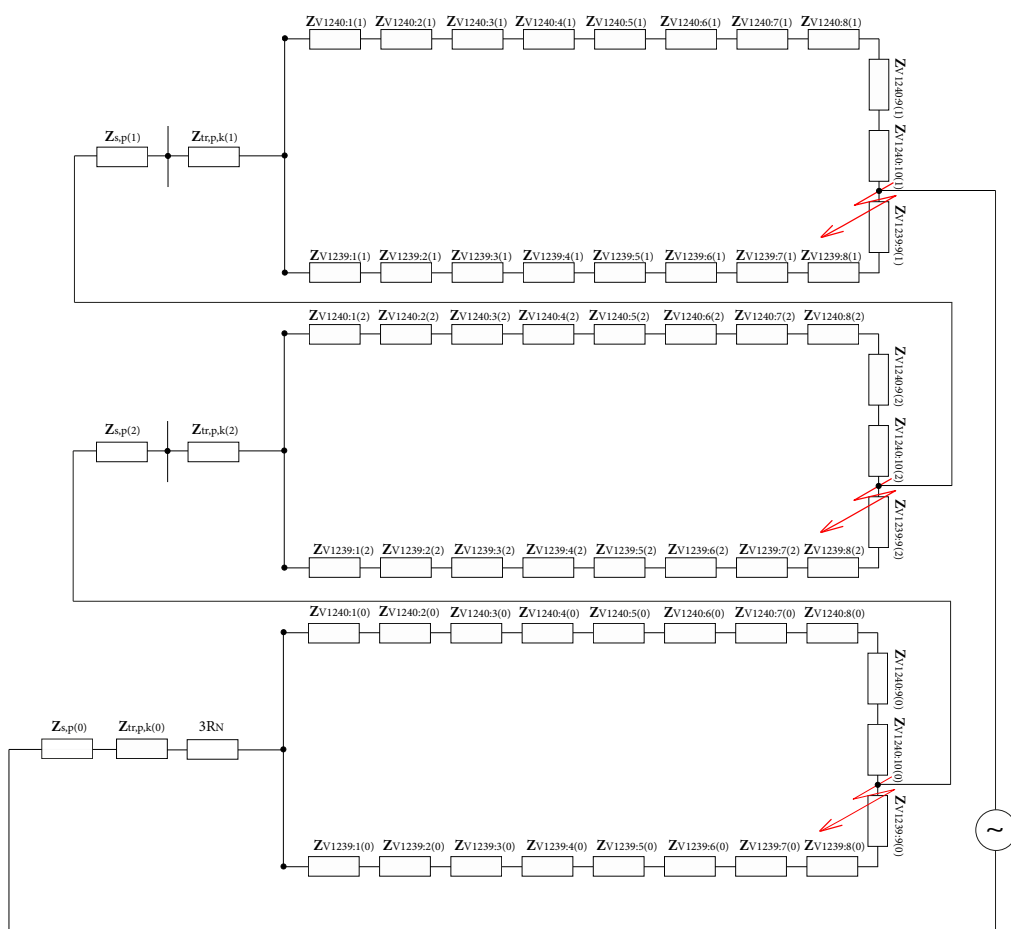
$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,4334 + j 1,8494) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,4334 + j 1,8494) \Omega$$



Obr. 6.19: Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě C

Výpočet netočivé složky

$$\mathbf{Z}_F = (0,6566 + j 0,4495) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{F(0)} = \mathbf{Z}_F * K_v = (4,5194 + j 3,2033) \Omega$$

$$R_{F(0)} = R_F * K_{R,v} = 0,6566 * 6,8831 = 4,5194 \Omega$$

$$X_{F(0)} = X_F * K_{X,v} = 0,4495 * 7,1264 = 3,2033 \Omega$$

$$\mathbf{Z}_G = (0,7028 + j 0,4810) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{G(0)} = \mathbf{Z}_G * K_v = (4, 8374 + j 3, 4278) \Omega$$

$$R_{G(0)} = R_G * K_{R,v} = 0, 7028 * 6, 8831 = 4, 8374 \Omega$$

$$X_{G(0)} = X_G * K_{X,v} = 0, 4810 * 7, 1264 = 3, 4278 \Omega$$

Celková impedance obvodu - netočivá složka

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \mathbf{Z}_{F(0)} \parallel \mathbf{Z}_{G(0)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} + \frac{\mathbf{Z}_{F(0)} * \mathbf{Z}_{G(0)}}{\mathbf{Z}_{F(0)} + \mathbf{Z}_{G(0)}}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (66, 4780 + j 1, 9408) + \frac{(4, 5194 + j 3, 2033) * (4, 8374 + j 3, 4278)}{(4, 5194 + j 3, 2033) + (4, 8374 + j 3, 4278)}$$

$$\mathbf{Z}_{(0)} = (68, 8146 + j 3, 5967) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat

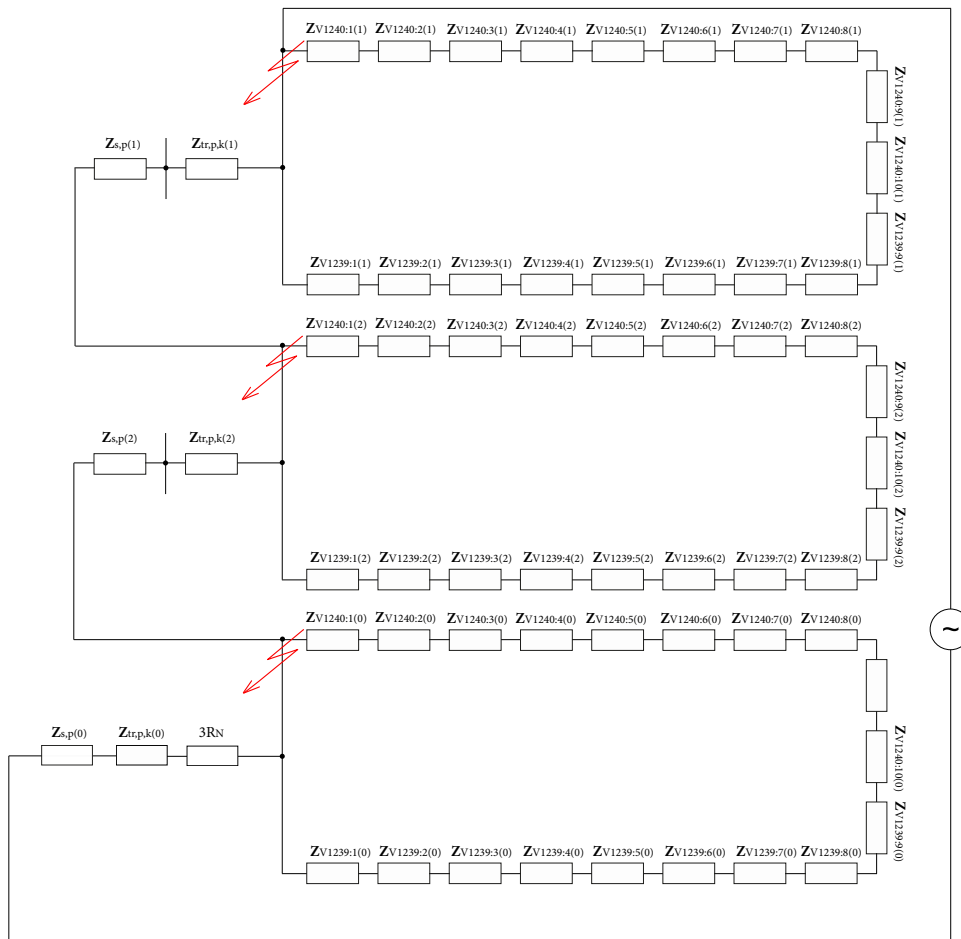
$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{|\mathbf{Z}_{s,p(1)} + \mathbf{Z}_{s,p(2)} + \mathbf{Z}_{s,p(0)}|}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * 1 * (22 * 10^3)}{|(0, 4334 + j 1, 8494) + (0, 4334 + j 1, 8494) + (68, 8146 + j 3, 5967)|} = \underline{543, 9 A}$$

d) 1f zkrat v místě D (ve vývodovém poli)

Obdobně jako u předchozích typů zkratu místě D není zkratovou poruchou zasažena ani jedna smyčka kabelového vedení vn.

Celková impedance zkratového obvodu je v sousledné a zpětné složkové soustavě ovlivněna impedancemi transformátoru T101 a síťového napáječe, v netočivé soustavě impedancí transformátoru T101 a rezistancí uzlového rezistoru.



Obr. 6.20: Náhradní schéma zapojení sítě - 1f zkrat v místě D

Uvažujeme elektricky vzdálený zkrat, tedy sousledná složka impedance se rovná zpětné složce.

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}$$

Celková impedance obvodu - sousledná složka

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \mathbf{Z} = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

Celková impedance obvodu - zpětná složka

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \mathbf{Z}_{(1)} = (0,0939 + j 1,6170) \Omega$$

Celková impedance obvodu - netočivá složka

$$\mathbf{Z}_{(0)} = \mathbf{Z}_{H(0)} = \mathbf{Z}_{s,p(0)} + \mathbf{Z}_{tr,p,k(0)} + 3 * R_N = (66,4780 + j 1,9408) \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat

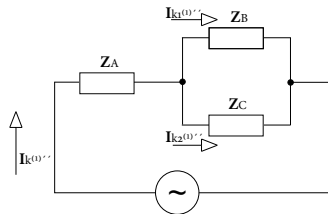
$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{|\mathbf{Z}_{(1)} + \mathbf{Z}_{(2)} + \mathbf{Z}_{(0)}|}$$

$$I_k^{(1)''} = \frac{\sqrt{3} * 1 * (22 * 10^3)}{|(0,0939 + j 1,6170) + (0,0939 + j 1,6170) + (66,4780 + j 1,9408)|} = \underline{569,9 \text{ A}}$$

6.5.1 Řešení jednofázových zkratů v dané síti - rozložení proudů po vedeních

Pro výpočet minimálních hodnot zkratových proudů, nezbytných pro správné nastavení ochran před zkraty, je nutné provést výpočet rozdělení proudů ve vedení. V paralelních větvích náhradního schématu zkratového obvodu budou tyto proudy rozděleny v nepřímém poměru paralelních impedancí.

a) 1f zkrat v místě A (mezi $\mathbf{Z}_{V1240:10}$ a $\mathbf{Z}_{V1239:9}$) – rozložení proudů



Obr. 6.21: Rozložení proudů ve větvích vedení - místo zkratu A

Pro zkrat v místě A tedy platí:

$$\mathbf{I}_k^{(1)''} = \mathbf{I}_{k1}^{(1)''} + \mathbf{I}_{k2}^{(1)''}$$

$$\frac{\mathbf{I}_{k2}^{(1)''}}{\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}} = \frac{\mathbf{I}_{k,C}^{(1)''}}{\mathbf{I}_{k,B}^{(1)''}} = \frac{\mathbf{Z}_{B(1)} + \mathbf{Z}_{B(2)} + \mathbf{Z}_{B(0)}}{\mathbf{Z}_{C(1)} + \mathbf{Z}_{C(2)} + \mathbf{Z}_{C(0)}}$$

Protože jde o kabely stejných parametrů a tedy i stejného poměru R/X, lze rozdělení proudů do jednotlivých větví určit z poměru modulů impedancí:

$$\frac{I_{k2}^{(1)''}}{I_{k1}^{(1)''}} = \frac{|\mathbf{Z}_{B(1)} + \mathbf{Z}_{B(2)} + \mathbf{Z}_{B(0)}|}{|\mathbf{Z}_{C(1)} + \mathbf{Z}_{C(2)} + \mathbf{Z}_{C(0)}|}$$

Dosazením za:

$$|\mathbf{I}_{k2}^{(1)''}| = |\mathbf{I}_k^{(1)''}| - |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}|$$

Po úpravě získáme výsledný vztah:

$$|\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{|\mathbf{I}_k^{(1)''}|}{\frac{|\mathbf{Z}_{B(1)} + \mathbf{Z}_{B(2)} + \mathbf{Z}_{B(0)}|}{|\mathbf{Z}_{C(1)} + \mathbf{Z}_{C(2)} + \mathbf{Z}_{C(0)}|} + 1}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1240

$$I_{k1}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{542,6}{\frac{7,9921}{7,5454} + 1} = \underline{263,5 A}$$

Kde:

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{B(1)} + \mathbf{Z}_{B(2)} + \mathbf{Z}_{B(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{B(1)} + Z_{B(0)})^2 + (2 * X_{B(1)} + X_{B(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 0,7359 + 5,0653)^2 + (2 * 0,6984 + 3,5903)^2} = 7,9921 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{C(1)} + \mathbf{Z}_{C(2)} + \mathbf{Z}_{C(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{C(1)} + Z_{C(0)})^2 + (2 * X_{C(1)} + X_{C(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 0,6948 + 4,7824)^2 + (2 * 0,4756 + 3,3893)^2} = 7,5454 \Omega \end{aligned}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1239

$$I_{k2}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k2}^{(1)''}| = |\mathbf{I}_k^{(1)''}| - |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = 542,6 - 263,5 = \underline{279,1 A}$$

b) 1f zkrat v místě B (mezi $Z_{V1239:1}$ a $Z_{V1239:2}$) - rozložení proudů

Obdobně vypočteme rozložení proudů v místě B:

$$|\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{|\mathbf{I}_k^{(1)''}|}{\frac{|\mathbf{Z}_{D(1)} + \mathbf{Z}_{D(2)} + \mathbf{Z}_{D(0)}|}{|\mathbf{Z}_{E(1)} + \mathbf{Z}_{E(2)} + \mathbf{Z}_{E(0)}|} + 1}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1240; V1239:2-V1239:9

$$I_{k1}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{565,7}{\frac{14,9372}{0,6003} + 1} = \underline{21,9 \text{ A}}$$

Kde:

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{D(1)} + \mathbf{Z}_{D(2)} + \mathbf{Z}_{D(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{D(1)} + Z_{D(0)})^2 + (2 * X_{D(1)} + X_{D(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 1,3754 + 9,4670)^2 + (2 * 0,9416 + 6,7102)^2} = 14,9372 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{E(1)} + \mathbf{Z}_{E(2)} + \mathbf{Z}_{E(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{E(1)} + Z_{E(0)})^2 + (2 * X_{E(1)} + X_{E(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 0,0553 + 0,3806)^2 + (2 * 0,0378 + 0,2694)^2} = 0,6003 \Omega \end{aligned}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1239:1

$$I_{k2}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k2}^{(1)''}| = |\mathbf{I}_k^{(1)''}| - |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = 565,7 - 21,9 = \underline{543,8 \text{ A}}$$

c) 1f zkrat v místě C (mezi $Z_{V1238:9}$ a $Z_{V1237:9}$) - rozložení proudů

Obdobně vypočteme rozložení proudů v místě C:

$$|\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{|\mathbf{I}_k^{(1)''}|}{\frac{|\mathbf{Z}_{F(1)} + \mathbf{Z}_{F(2)} + \mathbf{Z}_{F(0)}|}{|\mathbf{Z}_{G(1)} + \mathbf{Z}_{G(2)} + \mathbf{Z}_{G(0)}|} + 1}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1238

$$I_{k1}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = \frac{543,9}{\frac{7,1308}{7,6319} + 1} = \underline{281,2 \text{ A}}$$

Kde:

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{F(1)} + \mathbf{Z}_{F(2)} + \mathbf{Z}_{F(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{F(1)} + Z_{F(0)})^2 + (2 * X_{F(1)} + X_{F(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 0,6566 + 4,5194)^2 + (2 * 0,4495 + 3,2033)^2} = 7,1308 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{Z}_{G(1)} + \mathbf{Z}_{G(2)} + \mathbf{Z}_{G(0)}| &= \sqrt{(2 * R_{G(1)} + Z_{G(0)})^2 + (2 * X_{G(1)} + X_{G(0)})^2} = \\ &= \sqrt{(2 * 0,7028 + 4,8374)^2 + (2 * 0,4810 + 3,4278)^2} = 7,6319 \Omega \end{aligned}$$

Počáteční rázový zkratový proud pro 1f zkrat, protékající smyčkou V1237

$$I_{k2}^{(1)''} = |\mathbf{I}_{k2}^{(1)''}| = |\mathbf{I}_k^{(1)''}| - |\mathbf{I}_{k1}^{(1)''}| = 543,9 - 281,2 = \underline{262,7 \text{ A}}$$

d) 1f zkrat v místě D (ve vývodovém poli) - rozložení proudů

Rozdělení proudů v případě zkratu v místě D nemá smysl. Jde o zkrat na přípojnících vn rozvodny a proud neprotéká paralelními větvemi náhradního schématu zkratového obvodu.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nastínit některá základní témata týkající se problematiky zkratů s důrazem na řešení zkratů v elektrizační soustavě. V úvodu práce je rozebrána problematika poruch v elektrizační soustavě s podrobnějším zaměřením na zkraty. Bylo zde rovněž provedeno rozdělení zkratů v souladu s normou ČSN EN 60909-0 a rozebrány příčiny vzniku zkratů v distribuční a přenosové soustavě.

V následující části je popsána teorie zkratu jako elektromagnetického přechodového děje s důrazem na jeho časový průběh a je zde rovněž nastíněn vliv zkratu na elektrizační soustavu. Jsou zde také uvedeny charakteristické hodnoty zkratového proudu, potřebné pro dimenzování jednotlivých prvků elektrizační soustavy z hlediska odolnosti vůči tomuto typu poruchy.

Další část popisuje praktické postupy při výpočtu zkratových poměrů v elektrizační soustavě, zjednodušující předpoklady a metody výpočtu uvedené v ČSN EN 60909-0. V této části byl rovněž proveden praktický výpočet zkratových poměrů v distribuční síti v souladu se zadáním, a to na napěťové hladině 110 kV před transformátorem 110/22 kV a na konci venkovního vedení 22 kV.

Následující část obsahuje popis reálné distribuční sítě městské části Brno - Vinohrady se schémata zapojení sítě vn a distribučních transformátorů 110/22 kV. Na této síti jsou pak praktikovány postupy z předchozích kapitol při výpočtu zkratových poměrů na napěťové hladině 22 kV. Byly zvoleny čtyři místa výskytu poruchy a v každém z nich byly provedeny výpočty pro třífázový, dvoufázový a jednofázový zkrat (zemní spojení). Dvoufázový zemní zkrat nebyl z důvodu rozsahu práce počítán. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7.1: Tabulka vypočtených hodnot - síť Brno Vinohrady

Místo zkratu	Třífázový zkrat	Dvoufázový zkrat	Jednofázový zkrat	Jednofázový zkrat	
	Velikost celkového zkratového proudu			Rozdělení proudu po vedeních	
	I_{ks}'' [A]	$I_k^{(2)''}$ [A]	$I_k^{(1)''}$ [A]	$I_{k1}^{(1)''}$ [A]	$I_{k2}^{(1)''}$ [A]
A	7 294,1	6 316,9	542,6	263,5	279,1
B	8 417,8	7 290,0	565,7	21,9	543,8
C	7 355,6	6 370,1	543,9	281,2	262,7
D	8 626,2	7 470,5	569,9	-	-

Z výsledků vyplývají následující skutečnosti:

- Zkratový proud při trojfázovém zkratu v libovolném místě distribuční sítě vn je vyšší než proud dvoufázového a jednofázového zkratu ve stejném místě. Z toho

plyne, že tato distribuční síť je z hlediska zkratové odolnosti jednotlivých prvků dimenzována na trojfázový zkratový proud.

- Nejvyšší hodnota zkratového proudu při libovolném typu zkratu je v místě D - na přípojnicích vn 22 kV v rozvodně.

- Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou proudu vypočtenou při trojfázovém zkratu činí cca. 15%. Vzhledem k tomu, že pravděpodobně nebylo vybráno místo s nejnižší hodnotou zkratového proudu při tomto typu zkratu, může být rozdíl ještě o něco vyšší.

- Přibližně stejný procentní rozdíl je i v případě dvoufázového zkratu. Jde o logický důsledek rovnosti sousledné a zpětné složky impedancí při elektricky vzdálených zkratech. Přibližnost je pravděpodobně dána chybou při zaokrouhlování výsledků.

- V případě jednofázového zkratu (zemního spojení) je procentní rozdíl cca. 5%. Zmenšení rozdílu je dáno velkou hodnotou rezistance uzlového rezistoru, která má podstatný vliv na velikost netočivé složky impedance při výpočtu jednofázových zkratů (zemních spojení).

- Nejnižší hodnoty zkratových proudů jsou při jednofázových zkratech. Tyto hodnoty by s použitím pro nastavení ochran proti zkratu.

- Vzhledem k velikosti rezistance uzlového rezistoru jsou hodnoty proudů při jednofázových zkratech v libovolném místě kabelové sítě vn poměrně nízké. Navíc zkratový proud teče k místu poruchy dvěma paralelními větvemi, což jeho velikost v místě zapojení ochran (na začátcích jednotlivých kabelových vedení) ještě snižuje až na hodnoty srovnatelné se jmenovitými proudy vedení. Proto by bylo chránění těchto vedení samotnými nadproudovými ochranami nedostatečné a je potřeba zvolit vhodnou kombinaci ochran, které jsou schopny vyhodnotit tento typ poruchy.

LITERATURA

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA *Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů: Energetický zákon..* Česká Republika. , 2000, In: 131/2000. 2000, 458/2000 Sb.
- [2] TOMAN, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., ORSÁGOVÁ, J., PAAR, M., TOPO-LÁNEK D., A KOLEKTIV *Provoz distribučních soustav.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] ČESKÁ REPUBLIKA *ČSN EN 60909-0: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů.* Český normalizační institut, 2002, idt IEC 60909-0:2001 + idt IEC 60909-0:2001/Cor. 1:2002-02.
- [4] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie.* Skripta VUT Brno, 2010, 138s.
- [5] ROŠKOTA S. *PNE 33 3042: Příklady výpočtů zkratových proudů ve střídavých sítích.* Energoprojekt Praha a.s., REASY ČR a VSE, ZSE, ČEPs, 2003.
- [6] MEŠTER, M. *Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách.* 1. vydanie. Banská Bystrica: ABB Elektro s.r.o., Redakčná úprava 2005 PRO s.r.o. ISBN 80-89057-10-1.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ES Elektrizační Soustava

PS Přenosová soustava

DS Distribuční soustava

nn Nízké napětí

vn Vysoké napětí

vvn Velmi vysoké napětí

Pozn: Všechna komplexní čísla v této práci jsou značena tučným písmem