

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výpočet zkratových proudů v průmyslové síti

Autor práce: **Martin Klíma**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin KLÍMA**
Osobní číslo: **E19B0140P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Výpočet zkratových proudů v průmyslové síti**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Uveďte příčiny a průvodní jevy zkratových poruch, dále průběh a charakteristické hodnoty zkratového proudu.
2. Popište metodu ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu (ČSN EN 60909-0) a uveďte, v jakých případech je možné při výpočtech zanedbat motory.
3. Aplikujte výše zmíněnou metodu pro výpočet zkratových poměrů v průmyslové síti, nejprve odhadněte zkratové poměry na rozváděčích při třífázovém zkratu pomocí zjednodušeného výpočtu, po té proveďte přesný výpočet podle normy.
4. Výsledky porovnejte a zhodnoťte s ohledem na pracnost výpočtu, přesnost výsledku aj.

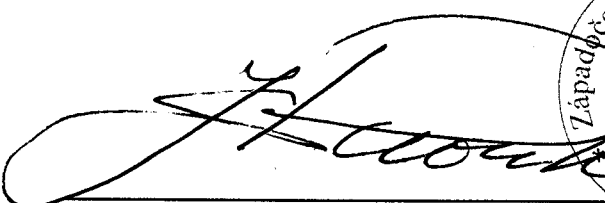
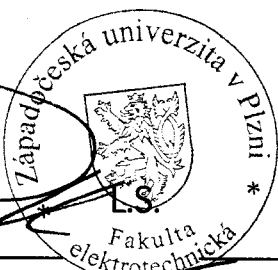
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

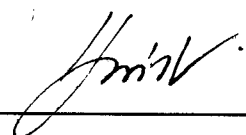
Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 60909-0 – Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů, 2002.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato práce se v teoretické části věnuje popisu zkratových poruch v elektrických sítích, jednotlivých druhů zkratů, jejich příčin, průvodních jevů, časového průběhu zkratového proudu, jeho složek a charakteristických hodnot. Dále popisuje postup výpočtu zkratových proudů pomocí metody ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu dle technické normy ČSN EN 60909-0 s uvedením možných zjednodušení postupu a podmínek jejich užití.

Praktická část práce se zabývá výpočtem zkratových poměrů při několika zkratech v průmyslové síti dle konkrétního zadání se zaměřením na dopady zjednodušení postupu výpočtů na přesnost výsledku. Zkratové poměry jsou určeny pomocí přesného výpočtu dle technické normy ČSN EN 60909-0 a také pomocí výpočtů různě zjednodušenými postupy. Výsledky výpočtů jsou poté porovnány s následným vyhodnocením dopadů možných zjednodušení postupu výpočtu na přesnost výsledku.

Klíčová slova

poruchový stav, zkrat, zkratový proud, metoda ekvivalentního zdroje napětí, výpočet, porovnání přesnosti

Abstract

In theoretical part, this thesis describes types, causations and consequences of short - circuits in electrical networks and time progression, components and characteristic values of short - circuit current. It also describes calculation of short - circuit current using method of equivalent voltage source in the place of the short - circuit according to the technical standard ČSN EN 60909-0 and specifies possible simplifications of the calculation with conditions of their use.

The practical part of this thesis contains calculations of several short - circuit in specified industrial network with focus on impact of simplifications of calculations on results accuracy. The values are calculated using the accurate process described in the technical standard and also with use of various simplifications. The results are then compared and the impact of simplifications on results accuracy is evaluated.

Key Words

fault condition, short-circuit, short-circuit current, equivalent voltage source method, calculation, accuracy comparison

Obsah

1Vznik zkratu a jeho druhy.....	11
1.1Vznik zkratu.....	11
1.2Rozdělení zkratů.....	12
1.3Příčiny vzniku zkratu.....	14
1.4Následky zkratů.....	16
2Časový průběh a charakteristické hodnoty zkratového proudu.....	19
3Výpočet zkratových proudů.....	24
3.1Metoda ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu.....	24
3.2Zjednodušující předpoklady výpočtu.....	26
3.3Zkratové impedance.....	26
3.3.1Síťové napáječe.....	26
3.3.2Dvouvinutové transformátory.....	27
3.3.3Trojvinutové transformátory.....	28
3.3.4Zanedbání činného odporu transformátorů.....	29
3.3.5Korekční součinitele pro impedance síťových transformátorů.....	30
3.3.6Venkovní vedení a kabely.....	31
3.3.7Tlumivky omezující zkratový proud (reaktory).....	32
3.3.8Synchronní generátory, motory a kompenzátory.....	32
3.3.9Odvození korekčního součinitele pro impedanci synchronních generátorů.....	33
3.3.10Elektrárenský blok.....	35
3.3.11Asynchronní motory.....	37
3.3.12Zanedbání příspěvku zkratových proudů od asynchronních motorů.....	37
3.4Výpočet zkratových proudů.....	38
3.4.1Souměrný počáteční rázový zkratový proud.....	38
3.4.2Nárazový zkratový proud.....	38

3.4.3	Stejnosemřná složka zkratového proudu.....	39
3.4.4	Souměrný vypínací zkratový proud.....	39
3.4.5	Stejnosemřná složka vypínacího zkratového proudu.....	40
3.4.6	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud.....	40
4	Výpočet zkratových proudů v sítích dle zadaného příkladu.....	43
4.1	Průmyslová síť 400 V.....	43
4.1.1	Zadání.....	43
4.1.2	Výpočet postupem dle normy (bez zjednodušení).....	44
4.1.3	Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí.....	51
4.1.4	Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí s fiktivními převody transformátorů.....	52
4.1.5	Výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitým převodem transformátorů.....	53
4.1.6	Výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů.....	55
4.1.7	Porovnání výsledků.....	56
4.2	Sítě 110 kV a 22 kV.....	57
4.2.1	Zadání.....	57
4.2.2	Výpočet postupem dle normy (bez zjednodušení).....	60
4.2.3	Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí.....	92
4.2.4	Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí s fiktivními převody transformátorů.....	99
4.2.5	Výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitými převody transformátorů.....	106
4.2.6	Výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů.....	112
4.2.7	Porovnání výsledků.....	118

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Popisek	Jednotka
C_{\max}	součinitel napětí pro výpočet maximálního zkratového proudu	
C_{\min}	součinitel napětí pro výpočet minimálního zkratového proudu	
f	kmitočet	[Hz]
f_c	ekvivalentní kmitočet	[Hz]
I_b	souměrný vypínací zkratový proud	[kA]
I^b	nejvyšší provozní proud před zkratem	[kA]
$I_{bd.c.}$	stejnsměrná složka vypínacího zkratového proudu	[kA]
I_{bns}	vypínací zkratový proud	[kA]
$i_{d.c.}$	okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	[kA]
i_k	okamžitá hodnota zkratového proudu	[kA]
I_k	ustálený zkratový proud	[kA]
I_k''	počáteční rázový zkratový proud	[kA]
I_{kG}''	příspěvek počátečního rázového zkratového proudu od generátoru	[kA]
I_{km}	nárazový zkratový proud, staré značení	[kA]
I_{ks}	efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu	[kA]
i_{ks}	okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu	[kA]
i_{ks0}	okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu v $t = 0$	[kA]
I_{LR}	záběrný proud asynchronního motoru	[kA]
I_n	proud před zkratem	[kA]
i_p	nárazový zkratový proud	[kA]
I_{rG}	jmenovitý proud generátoru	[kA]
I_{rM}	jmenovitý proud motoru	[kA]
I_{rR}	jmenovitý proud tlumivky	[kA]
I_{rT}	jmenovitý proud transformátoru	[kA]
i_s	okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	[kA]
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud	[kA]
K_S	korekční součinitel pro zkratovou impedanci elektrárenského bloku s přepínačem odboček pod zatížením	
K_{SO}	korekční součinitel pro zkratovou impedanci elektrárenského bloku bez přepínače odboček pod zatížením	

K_T	korekční součinitel pro zkratovou impedanci dvuvinut'ového transformátoru	
$K_{TAB}, K_{TBC}, K_{TAC}$	korekční součinitele pro zkratovou impedanci mezi dvěma stranami trojvinut'ového transformátoru	
m, n	součinitele pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu	
p	počet pólových dvojic motoru	
P_{krT}	činné ztráty transformátoru nakrátko	[MW]
$P_{krTAB}, P_{krTBC}, P_{krTAC}$	činné ztráty trojvinut'ového transformátoru nakrátko mezi dvěma stranami	[MW]
P_{rM}	jmenovitý činný výkon motoru	[MW]
$\sum P_{rM}$	součet jmenovitých činných výkonů motorů	[MW]
q	součinitel pro výpočet příspěvku asynchronních motorů k vypínacímu zkratovému proudu	
q_n	jmenovitý průřez vodiče	[mm ²]
R	činný odpor	[Ω]
R_L	činný odpor vodiče na jednotku délky	[Ω/m]
R_{L20}	odpor při teplotě 20 °C	[Ω]
S_k''	počáteční rázový zkratový výkon	[MVA]
S_{rG}	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru	[MVA]
S_{rM}	jmenovitý zdánlivý příkon motoru	[MVA]
S_{rT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	[MVA]
$\sum S_{rT}$	součet jmenovitých zdánlivých výkonů transformátorů	[MVA]
$S_{rTAB}, S_{rTBC}, S_{rTAC}$	jmenovité zdánlivé výkony trojvinut'ového transformátoru mezi dvěma stranami	[MVA]
t	čas	[s]
T_k	doba trvání zkratu	[s]
T_s	časová konstanta stejnosměrné složky časového proudu	[s]
t_{min}	minimální doba vypnutí zkratu	[s]
T_s	časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	[s]
U^b	nejvyšší provozní napětí před zkratem	[kV]
u_{kR}	poměrné impedanční napětí tlumivky	[%]
u_{kr}	poměrné napětí transformátoru nakrátko	[%]
$u_{krAB}, u_{krBC}, u_{krAC}$	poměrná napětí nakrátko měřená mezi dvěma stranami trojvinut'ového transformátoru při třetí odpojené	[%]
U_n	jmenovité napětí sítě	[kV]
U_{rG}	jmenovité napětí generátoru	[kV]
U_{rM}	jmenovité napětí motoru	[kV]

U_{rT}	jmenovité napětí transformátoru	[kV]
U_{rTHV}	jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího napětí	[kV]
U_{rTLV}	jmenovité napětí transformátoru na straně nižšího napětí	[kV]
X	reaktance	[Ω]
X_d	synchronní reaktance synchronního stroje	[Ω]
X_d'	přechodná reaktance synchronního stroje	[Ω]
X_d''	rázová reaktance synchronního stroje	[Ω]
x_d''	poměrná rázová reaktance generátoru	[%]
X_L	reaktance vodiče na jednotku délky	[Ω /m]
x_T	poměrná reaktance transformátoru	[%]
$X_{TAB}, X_{TBC}, X_{TAC}$	poměrné impedance mezi dvěma stranami trojvinutového transformátoru	[%]
Z	impedance	[Ω]
Z_A, Z_B, Z_C	impedance jedné strany trojvinutového transformátoru (v náhradním schématu s impedancemi uspořádanými do hvězdy)	[Ω]
Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC}	impedance mezi dvěma stranami trojvinutového transformátoru	[Ω]
Z_G	zkratová impedance generátoru	[Ω]
Z_k	výsledná impedance zkratového obvodu	[Ω]
Z_M	zkratová impedance motoru	[Ω]
Z_Q	zkratová impedance síťového napáječe připojeného do bodu Q	[Ω]
Z_R	zkratová impedance síťového napáječe připojeného do bodu R	[Ω]
Z_T	impedance transformátoru	[Ω]
Z_{TK}	korigovaná impedance transformátoru	[Ω]
Z_V	impedance vedení	[Ω]
α	teplotní součinitel odporu	[K ⁻¹]
θ_e	teplota vodiče na konci zkratu	[°C]
μ	součinitel pro výpočet vypínacího zkratového proudu	
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
ρ	rezistivita materiálu vodiče při teplotě 20 °C	[Ω mm ² /m]
ρ_G	rozsah regulace napětí generátoru	
ρ_T	rozsah regulace napětí transformátoru	
φ_{rG}	jmenovitý fázový posuv napětí vůči proudu generátoru	[°]
φ_T^b	fázový posuv napětí vůči proudu před zkratem	[°]

Úvod

Vyjma běžných provozních stavů mohou v každém elektrickém obvodu nastat těž stavy poruchové, s nimiž je nutno počítat. Velmi významnou poruchou je pak zkrat, tedy nežádoucí vodivé spojení mezi částmi obvodu s rozdílnými potenciály, jímž je obvykle spojení fází elektrizační soustavy vzájemné či se zemí. Proud v tomto poruchovém stavu protéká přes zkratový obvod tvořený jen impedancemi zdrojů napětí a přívodů k místu zkratu, což má za následek nežádoucí nárůst proudu nad obvyklou provozní hodnotu, tento nadměrný proud se nazývá proud zkratový. Zkratové proudy pak působí na elektrická zařízení nežádoucími tepelnými a silovými účinky, kterým vzhledem ke zpoždění ochran, zajišťujících vypínání zkratů, nelze zcela zamezit. Elektrická zařízení je tedy nutné dimenzovat tak, aby byla schopna účinkům zkratových proudů po omezenou dobu odolávat.

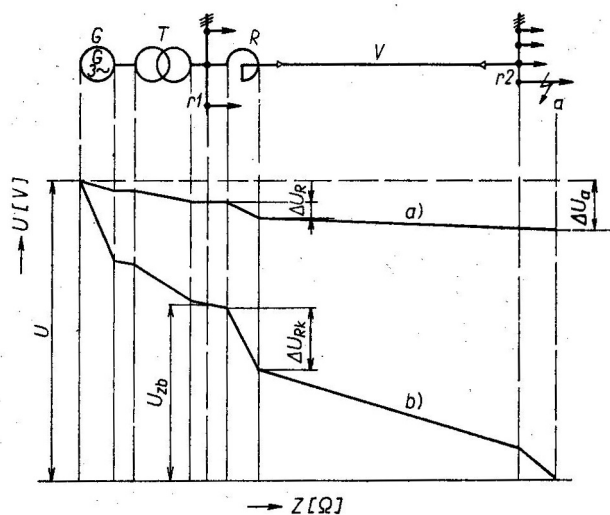
Aby bylo možné zařízení vhodně dimenzovat, je nutné znát alespoň přibližné charakteristické hodnoty časových průběhů zkratových proudů, kteréžto hodnoty se obvykle určují výpočtem, pro nějž je pak běžně užívaná metoda ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu. Pro výpočty existuje mnoho zjednodušených postupů, které zanedbáním některých méně významných jevů umožňují za cenu různě velkého zhoršení přesnosti výsledků snížit pracnost výpočtu, což mělo velký význam zejména před rozšířením výpočetní techniky. Pro praktickou použitelnost výsledků je pak důležité, aby snížení přesnosti nebylo příliš velké, a zjednodušení postupů výpočtů jsou volena tak, aby vypočtené hodnoty vycházely méně příznivé, nežli jsou hodnoty skutečné, a nehrozilo tak poddimenzování elektrických zařízení.

Tato práce má za cíl porovnat přesnost výpočtů zkratových proudů metodou ekvivalentního zdroje napětí, prováděných postupem dle normy ČSN EN 60909-0 a postupy různě zjednodušenými.

1 Vznik zkratu a jeho druhy

1.1 Vznik zkratu

Zkratem se rozumí poruchový stav spočívající v nežádoucím spojení dvou či více vodivých částí elektrického zařízení s různými potenciály. Toto vodivé spojení způsobí snížení impedance obvodu v místě zkratu na velmi nízkou hodnotu, v případě dokonalého zkratu až nulovou, což má za následek přechodový děj, při kterém dojde v částech obvodu obsahujících zdroje napětí spojených s místem, v němž ke zkratu došlo, k výraznému nárůstu protékajícího proudu nad hodnotu v ustáleném provozním stavu. V případě obvodu s ideálními zdroji napětí a s vedením i transformátory s nulovými podélnými odpory a reaktancemi by dle Ohmova zákona protékal místem zkratu nekonečný proud, ve skutečných případech je pak zkratový proud omezen právě zmíněnými impedancemi zdrojů, vedení a dalších prvků elektrizační soustavy. Napětí v místě zkratu je během jeho trvání výrazně sníženo v případě zkratu nedokonalého, v případě kovového zkratu pak teoreticky až nulové při nulové impedanci v místě zkratu. V postižených částech obvodu tak dochází k poklesu napětí (znázorněno na obrázku 1), který je v místě zkratu největší a směrem ke zdrojům se vlivem úbytků na prvcích obvodu snižuje. Snížená napětí v jednotlivých místech zasažených částí obvodu se nazývají napětí zbytková.



Obr. 1 Úbytky napětí ve zkratovém obvodu a) běžný provozní stav, b) zkrat, U_{zb} je tzv. zbytkové napětí [1]

1.2 Rozdělení zkratů

Druhy zkratů, jež mohou v elektrizační soustavě vzniknout, jsou určeny způsobem provozu soustavy. U soustav třífázových rozlišujeme následující zapojení:

- **Sít' s izolovaným uzlem** má uzel (nulový bod) transformátoru oddělený od země. V případě spojení jedné fáze se zemí vzniká zemní spojení. Zkraty v této síti mohou vzniknout pouze mezi jednotlivými fázemi. V ČR se v tomto zapojení provozují sítě vn a důlní sítě.
- **Sít' s neúčinně uzemněným uzlem** má uzel transformátoru uzemněn přes tlumivku či odporník (u kabelových sítí). Při zemním spojení přes tlumivku teče proud induktivního charakteru, který v místě spojení vyruší kapacitní poruchový proud. V ČR se v tomto zapojení provozují sítě vn.
- **Sít' s účinně (přímo) uzemněným uzlem** má uzel transformátoru přímo spojený se zemí. Při spojení jedné fáze se zemí vzniká jednofázový zkrat. V ČR se v tomto zapojení provozují sítě vvn, zvn a nn.

Dle impedance spojení v místě zkratu lze zkraty rozdělit na dokonalé a nedokonalé:

- **Dokonalý zkrat** se vyznačuje velmi nízkou impedancí spojení, jež je vůči impedanci zbytku zkratového obvodu zanedbatelná a téměř nemá vliv na velikost zkratového proudu. Tento druh zkratu je způsoben spojením částí obvodu, jako třeba dvou a více fází či jedné fáze a země, dobře vodivým, například kovovým, předmětem. K dokonalému zkratu nedochází příliš často a mnohdy přechází ve zkrat obloukový, což může nastat například přetavením vodivého předmětu, jenž spojení způsobil.
- U **zkratu nedokonalého** je impedance spojení výrazně vyšší nežli u zkratu dokonalého a zanedbatelně ovlivňuje velikost zkratového proudu. Tento druh zkratu může být způsoben spojením částí obvodu předmětem s vyšším odporem, například větví ležící na vedení, nebo elektrickým obloukem, kdy se jedná o zkrat obloukový. Tento druh zkratu převažuje u venkovních vedení, kde se často jedná o přechodné poruchy, způsobené třeba přeskokem na izolátoru, jež lze odstranit vypnutím postižené části obvodu a automatickým opětovným zapnutím.

Zatímco u venkovních vedení převažují obloukové zkraty přechodného charakteru, u vedení kabelových jde o poruchy trvalé, poněvadž tepelnými účinky zkratu dochází k nevratnému poškození izolace vodičů (propálení obloukem, roztavení).

Zkraty v trojfázových elektrizačních soustavách se dělí na několik druhů dle způsobu spojení jednotlivých vodičů:

- **Trojfázový zkrat** je spojení vodičů všech tří fází v jednom místě. U venkovních vedení jde o nejméně častý druh zkratu, avšak u kabelových vedení se vyskytuje ve většině případů, poněvadž v něj ostatní druhy zkratů přecházejí vlivem tepelného poškození izolace. Hodnoty proudů při tomto druhu zkratu bývají obvykle nejvyšší, proto se s nimi počítá při návrhu elektrických zařízení [2].
- **Trojfázový zemní zkrat** je spojení všech tří fázových vodičů v jednom místě navzájem a zároveň se zemí.
- **Dvojfázový zkrat** nastává při spojení vodičů libovolných dvou fází v jednom místě.
- **Dvojfázový zemní zkrat** nastává při spojení dvou libovolných fázových vodičů v jednom místě navzájem a zároveň se zemí.
- **Jednofázový zkrat** je spojení jednoho fázového vodiče s nulovým bodem, a to buď přes střední vodič, je-li v soustavě vyveden, či přes zem v soustavě s účinně uzemněným nulovým bodem. Tento druh zkratu je nejčastějším u venkovních vedení a způsobuje největší rušení zařízení [2].
- **Simultánní zkrat** je spojení dvou fází třífázové soustavy na dvou různých místech se zemí.

Trojfázový zkrat se nazývá zkratem souměrným, neboť postihuje stejně všechny fáze, všechny ostatní uvedené druhy zkratů jsou zkraty nesouměrné.

Zvláštním druhem poruchového stavu je zemní spojení. Jedná se o spojení vodiče jedné fáze se zemí v soustavě s izolovaným nebo neúčinně uzemněným nulovým bodem, při kterém protékají síť kapacitní proudy dané kapacitou fázových vodičů vůči zemi v celé jejich délce. Tyto proudy nedosahují tak vysokých hodnot jako proudy zkratové a síť může být se zemním spojením po omezenou dobu do odstranění poruchy dále provozována. Tento poruchový stav se nepovažuje za zkrat. Zemní spojení je často obloukové, přičemž

oblouk může během trvání poruchy střídavě zhasínat a opětovně se zapalovat, pak se jedná o přerušované zemní spojení. Při něm vzniká díky přechodovým jevům na zasažené fázi přepětí, jehož velikost je obvykle 3 až 4,5násobkem napětí jmenovitého [1].

Zkraty lze dále rozdělit dle místa jejich vzniku v síti na blízké a vzdálené. Dojde - li ke zkratu blízko alternátoru či dokonce na jeho svorkách, jde o **zkrat elektricky blízký**. U tohoto zkratu se v počátku projevuje rázová reaktance alternátoru, což má za následek vyšší počáteční střídavou složku, která rychle klesá na ustálenou hodnotu. **Zkrat elektricky vzdálený** nastává v takové vzdálenosti od alternátoru, kdy je díky působení impedancí dalších prvků zkratového obvodu tento jev zanedbatelný.

1.3 Příčiny vzniku zkratu

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratů na elektrických zařízeních patří [1],[2]:

- nedokonalosti a vady izolace, způsobené například přepětím či zestárnutím,
- poruchy elektrický zařízení, například popraskání izolátorů, znečištění a opálení kontaktů či chybná montáž,
- nedostatečná zkratová odolnost a nedostatečné vzdušné vzdálenosti,
- poškození zařízení cizími zásahy, například narušení kabelu při výkopových pracích, a povětrnostními vlivy,
- chybná manipulace, například vypínání velkých proudů odpojovačem nebo spojení dvou nesynchronizovaných sítí,
- cizí vodivé předměty na holých spojích,
- přepětí.

Nejčastější příčinou zkratů jsou přepětí [1]. Ke zkratům jím způsobeným dochází zejména při nedostatečné izolaci nebo nedostatečných vzdušných vzdálenostech, riziko zkratu dále zvyšují nepříznivé povětrnostní podmínky, například kondenzace par v důsledku poklesu teploty. Přepětí se dělí na provozní (vnitřní) a atmosférická (vnější).

Atmosférická přepětí mohou vznikat u venkovních vedení elektrostatickou indukcí v důsledku výbojů v blízkosti vedení či přímým zásahem blesku do vedení, bouřková přepětí trvají dobu do 100 μ s [1]. Přepětí způsobená přímým úderem blesku do vedení mohou dosahovat hodnot, jež není schopna žádná izolace vydržet. Přepětí způsobené

elektrostatickou indukci může ojediněle dosahovat vrcholové hodnoty až 300 kV, přičemž hodnot nad 100 kV dosahuje jen přibližně 1 % indukovaných přepětí, většina jich pak na našem území nepřesahuje hodnotu 20 kV [1].

Provozní přepětí vznikají v zařízení při spínacích pochodech, náhlé ztrátě zatížení, nesouměrných stavech, zemních spojení a zkratech. Při zemních spojeních se jedná o přepětí vzniklé při zapalování a zhášení oblouku, které může, hlavně při opakovaném zemním spojení, mít za následek únavu izolace s následným průrazem a vznikem zkratu.

Při vypínání malých indukčních proudů, jako třeba proudů transformátorů naprázdno, vznikají obvykle přepětí o velikosti nejvýše 2,5 až 5násobku provozního napětí. Při náhlé ztrátě zatížení nebo nesouměrných poruchách za alternátory s vyniklými póly bez tlumicího vedení mohou vznikat přepětí až o 3,5násobku provozního napětí. Vysoká přepětí mohou vznikat při vypínání kapacitních zátěží.[1]

Velký vliv na riziko vzniku zkratu v důsledku přepětí má jejich četnost. Je-li izolace elektrického zařízení namáhána opakovanými přepět'ovými rázy, její izolační schopnost klesá, a to dokonce až pod hodnotu zkušebního napětí.[1]

Další nejčastější příčinou vzniku zkratů je poškození elektrického zařízení cizími zásahy. U kabelů se jedná hlavně o poškození při výkopových a jiných stavebních pracích, u vedení venkovních jsou příčinou poškození hlavně povětrnostní a přírodní vlivy, například dotyk větví při větru, pád stromu či ptactvo.[1]

Jednotlivé příčiny zkratů se nemusí nutně vyskytovat samostatně, často je zkrat způsobem dvěma a více příčinami současně.

1.4 Následky zkratů

Zkrat v elektrickém zařízení má řadu nežádoucích důsledků, jež mohou jednak způsobit výrazné škody na samotném zařízení, které v krajním případě mohou znamenat až jeho zničení, a též mohou vážně ohrozit bezpečnost provozu a obsluhujících pracovníků zařízení.

Mezi účinky zkratových proudů lze řadit [1]:

- dynamické síly
- tepelné působení
- elektrický oblouk
- přepětí
- indukovaná napětí
- pokles napětí ve zkratovém obvodu
- ohrožení stability přenosů elektrické energie

Dynamické síly vznikají v důsledku vzájemného působení magnetického pole sousedních vodičů protékanych proudem, které je při zkratových proudech značné. Velikosti sil jsou těmto proudům přímo úměrné a nabývají nejvyšších hodnot při dosažení první amplitudy zkratového proudu, zvané nárazový zkratový proud. Tyto síly způsobují namáhání vodičů v ohybu, dále namáhají vinutí, upevňovací prvky a všechny přístroje umístěné ve zkratovém obvodu. Mohou mít za následek ohnutí vodičů, poškození průchodek, přichytek a dalších mechanických prvků [1]. Zmíněné projevy mohou způsobit přiblížení vodivých částí natolik, že mezi nimi dojde ke spojení či přeskoku, což způsobí další zkrat [1].

Dalším nežádoucím účinkem zkratových proudů je tepelné působení na vlastní vodiče a okolí. Obecně, při průchodu proudu vodičem s nenulovým odporem je výkonová ztráta úměrná druhé mocnině proudu, přičemž tento ztrátový výkon se přeměňuje na teplo. Při zkratu je množství vyvinutého tepla takové, že nemůže být během krátké doby jeho trvání odvedeno do okolního prostředí, což má za následek výrazné oteplení samotných vodičů, jejich izolace a předmětů v blízkém okolí, jako třeba podpěrek a průchodek. Zvýšená teplota může vést k degradaci izolace vodičů, poškození průchodek a upevňovacích prvků,

přepálení vinutí elektrických strojů a přístrojů, vytavení nedokonalých spojů a spečení spínacích kontaktů. Při přehřátí vodičů nebo částí elektrických přístrojů na teplotu 100 až 150 °C může dojít k sublimaci izolace, při níž dochází k vývinu výbušných plynů (vodíku a acetyleny). Směs těchto plynů se vzduchem se může následně vlivem dalších průvodních jevů zkratu, například elektrického oblouku, vznítit a způsobit explozi, při níž vzniká tlakový ráz se silnými ničivými účinky, jež se projeví obzvláště v uzavřených prostorech. [1]

Elektrický oblouk působí na své okolí hlavně tepelným a světelným zářením a tlakem, vzniklým ohřevem plynů energií oblouku. Tlak vyvolaný elektrickým obloukem závisí na hodnotě nárazového zkratového proudu, vyzářené energii a uspořádání okolního prostoru. Maximální hodnoty dosáhne tento tlak 10 až 15 ms po zapálení oblouku.[1]

Zatímco ostatní účinky zkratů mají za následek především škody na samotných elektrických zařízeních, elektrický oblouk vzniklý při zkratu může ohrozit i obsluhující pracovníky. Na elektrická zařízení působí oblouk zejména teplem a tlakem, obsluhující pracovníky pak ohrožuje zejména záření oblouku.[1]

Elektrický oblouk vydává záření viditelné, ultrafialové, infračervené a tepelné. Intenzita záření výboje je mezi hliníkovými elektrodami vyšší nežli mezi měděnými, poněvadž se na záření podílejí i hliníkové páry. Záření vydávané obloukem způsobuje výrazný ohřev předmětů v jeho blízkosti a ohrožuje obsluhující pracovníky zařízení. Krom silného oslnění světlem z výboje hrozí poškození kůže ultrafialovým zářením a popálení žhavými plyny. [1]

Teplota elektrického oblouku dosahuje obvykle v jeho ose 15000 K, v patách 3000 až 4500 °C a je úměrná proudu. Vysoké teploty v patách oblouku mají za následek tavení a odpařování materiálu elektrod, přičemž tlak žhavých plynů může způsobit rozstříkávání roztaveného kovu. Obdobně jako teplo vyvinuté průchodem zkratového proudu ve vodičích, působí teplo z elektrického oblouku nežádoucím způsobem na další části elektrických zařízení. Vysoké teploty v blízkosti oblouku však vylučují, aby zařízení bylo schopno snášet tento stav bez poškození. Tepelné účinky oblouku způsobují například uhelnatění izolací či opalování vyzdívky mezistěn kobkových rozveden do hloubky 1 až 2 mm.[1]

Přepětí při zkratech vznikají jak při vzniku zkratu, tak i při jeho vypínání, přičemž až na výjimky tato přepětí nepřesahují dvojnásobek provozního napětí [1]. Při vypínání

zkratových proudů pojistkami či vypínači, vytvářejícími při vypínání zřetelnou vnučenou nulu, a při vypínání dvoufázových zemních zkratů v kompenzovaných sítích mohou nastat přepětí vyšší [1]. Podstatná je zde nejen velikost přepětí, ale i strmost nárůstu napětí při jeho vzniku. Pokud při vypínání roste zotavené napětí rychleji, nežli elektrická pevnost vypínací dráhy vypínače, může dojít k opětovnému zapálení oblouku ve vypínači s následným selháním vypínacího procesu a možnou havárií vypínače.

Dalším nežádoucím následkem zkratu je pokles napětí ve zkratovém obvodu, vyvolaný úbytky napětí na impedancích mezi zdroji energie a místem zkratu. V jednotlivých bodech zkratového obvodu je pak namísto napětí provozního tzv. zbytkové napětí. Pokles napětí ovlivňuje spotřebiče připojené do sítě, přičemž způsob ovlivnění činnosti závisí na jejich typu. U elektrických motorů napájených přímo ze sítě se pokles napětí projevuje poklesem točivého momentu, a to lineárním u motorů synchronních a kvadratickým u motorů asynchronních a komutátorových. U světelných zdrojů s žárovkami a výbojkami s klasickým elektromagnetickým předřadníkem dochází s poklesem napětí ke snižování světelného toku, přičemž u výbojek dojde k jejich zhasnutí, poklesne-li napájecí napětí pod hodnotu napětí zhášecího. U tepelných spotřebičů dochází k poklesu výkonu, a to s druhou mocninou napětí. Účinky snížení napětí na spínané zdroje a další polovodičové měniče závisí na jejich konstrukci. Obvykle mají spínané zdroje stanoven určitý rozsah napájecího napětí a při jeho poklesu pod spodní mez nejsou schopny provozu.

Zkratové proudy dále způsobují indukci napětí na vedeních v okolí. Tento účinek se projevuje obzvláště při zkratech, kdy proud protéká zemí. Zasažena jsou jím hlavně slaboproudá a metalická sdělovací vedení.

2 Časový průběh a charakteristické hodnoty zkratového proudu

Při zkratu dochází vlivem skokového snížení impedance v místě jeho vzniku k přechodu obvodu mezi ustálenými stavy před a po zkratu. Vzhledem ke skutečnosti, že obvod obsahuje indukčnosti a kapacity, jež představují akumulární prvky, nemůže k této změně dojít okamžitě a nastává přechodný děj. Zkratový proud sestává ze dvou hlavních složek, a to stejnosměrné, s časem exponenciálně klesající a střídavé, kmitající kolem stejnosměrné složky s postupně klesající amplitudou. Časový průběh zkratového proudu je znázorněn na obrázku 2.

Stejnosměrná složka vzniká v důsledku působení indukčností. Proud procházející indukčností je integrálem napětí, tedy při sinusovém průběhu napětí se za ním proud o 90° zpožďuje. Dojde-li ke změně stavu obvodu mimo amplitudu napětí, proud indukčností pokračuje sinusovým průběhem z původní nenulové hodnoty v počátku přechodového děje, avšak již s odlišnou amplitudou, následkem čehož není průběh proudu souměrný dle nulové hodnoty a vzniká stejnosměrná složka, jež je elektrickými odpory v obvodu tlumena a exponenciálně klesá. Nejvyšší stejnosměrná složka vznikne, nastane-li přechodný děj při průchodu napětí nulou. Kvůli posunu fázových napětí třífázové soustavy o 120° jsou při trojfázovém zkratu velikosti stejnosměrných složek zkratových proudů v jednotlivých fázích různé.

Průběh stejnosměrné složky zkratového proudu je vyjádřen rovnicí

$$i_{d.c.} = i_{ks0} e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (1)$$

kde i_{ks0} je okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu v čase $t = 0$. Časová konstanta stejnosměrné složky T_s nabývá obvykle hodnot 0,05 až 0,3 s.[1] Zkratový proud s obsahem stejnosměrné složky se nazývá nesouměrný zkratový proud.

Střídavá složka, též souměrný zkratový proud, je souměrná dle nulové hodnoty a kmitá kmitočtem sítě. Průběh střídavé složky odpovídá průběhu zkratového proudu, u něhož nedošlo ke vzniku složky stejnosměrné.

Střídavá složka zkratového proudu se dále dělí na tři dílčí složky:

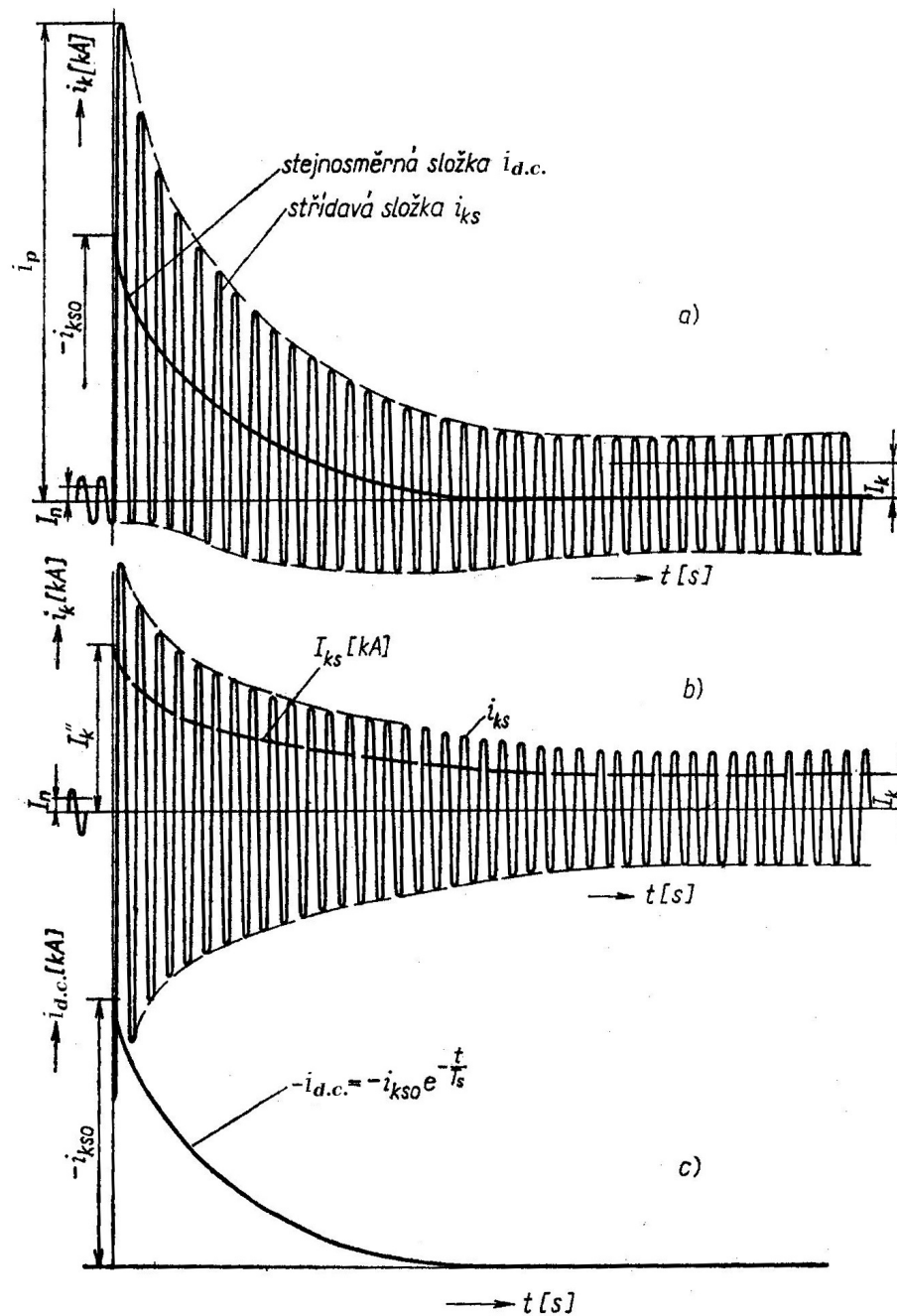
- rázová složka,
- přechodná složka,
- ustálená složka.

Všechny tyto dílčí složky mají sinusový průběh s kmitočtem sítě, amplitudy rázové a přechodné složky s časem exponenciálně klesají, každá s odlišnou časovou konstantou, zatímco amplituda ustálené složky je konstantní. Výsledná amplituda střídavé složky zkratového proudu pak v čase klesá na hodnotu amplitudy ustálené složky.

Rázové a přechodné složky souměrného zkratového proudu vznikají v důsledku vlastností synchronních generátorů. Při nárůstu proudu statorovým vinutím synchronního generátoru dochází současně k nárůstu magnetického toku, jež toto vinutí vytváří. Tato změna způsobí, že se v budicím vinutí indukuje napětí, jež vytváří proud vybuzující magnetický tok působící proti magnetickému toku statoru, v důsledku čehož dochází k vytlačování výsledného magnetického toku do vzduchové mezery, čímž roste odpor magnetického obvodu a indukčnost synchronního stroje klesá. Reaktance stroje se sníží ze synchronní reaktance X_d na hodnotu přechodné reaktance X_d' . Obdobný jev způsobuje indukce napětí do obvodu tlumiče, což nadále snižuje reaktanci stroje na hodnotu rázové reaktance X_d'' . Uvedený pokles reaktancí způsobuje vznik přechodné a rázové složky zkratového proudu. Vlivem ustálení hodnoty magnetického toku statoru dochází v čase k postupnému odeznění uvedených jevů a reaktance opět nabývá původní hodnoty X_d , rázová a přechodná složka zkratového proudu zanikají, zůstává jen složka ustálená.

Pokles amplitudy souměrného zkratového proudu v čase vlivem rázové a přechodné složky je nejvýraznější při zkratu přímo na svorkách synchronního alternátoru. Další impedance mezi alternátorem a místem zkratu, jejichž velikost je během trvání zkratu konstantní, význam změny reaktance alternátoru snižují a útlum střídavé složky zkratového proudu pak není tak výrazný. Od určité velikosti těchto dalších impedancí lze pak zmíněný útlum zanedbat, v takovém případě jde o zkrat elektricky vzdálený. V opačném případě, kdy má impedance alternátoru výrazný podíl na celkové impedanci zkratového obvodu, jde o zkrat elektricky blízký.

Dosud popisovaný průběh zkratového proudu je zjednodušený a platí jen pro konstantní buzení alternátorů, neuvažuje se v něm vliv regulátorů napětí. Dojde-li v důsledku zkratu k náhlému nárůstu proudu statorem alternátoru, vlivem úbytku napětí na jeho reaktanci poklesne jeho svorkového napětí, regulátor zareaguje zvýšením budicího proudu statoru, což má za následek opětovné zvýšení svorkového napětí alternátoru a tím pádem i zvýšení zkratového proudu. K projevu funkce rychloregulátorů napětí dochází až v době přibližně 0,02 až 0,1 s, kdy již zaniká stejnosměrná i rázová složka zkratového proudu [1].



Obr. 2 Časový průběh zkratového proudu a) nesouměrný zkratový proud, b) střídavá složka, c) stejnosměrná složka [1]

Kvůli zjednodušení výpočtů se obvykle neurčuje úplný časový průběh zkratového proudu, nýbrž pouze některé jeho charakteristické hodnoty, jež mají význam pro posouzení účinků zkratového proudu na elektrická zařízení a pro jejich dimenzování.

U zkratových proudů se určují následující hodnoty:

- počáteční rázový zkratový proud I_k'' ,
- nárazový zkratový proud i_p , dříve I_{km} ,
- ustálený zkratový proud I_k ,
- ekvivalentní oteplovací proud I_{th} ,
- vypínací zkratový proud I_{bns} sestávající ze souměrné složky I_b a stejnosměrné složky I_{bdc} .

Počáteční rázový zkratový proud je efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu.

Nárazový zkratový proud je maximální okamžitá hodnota zkratového proudu. Tato hodnota určuje maximální velikost sil, jež působí na části elektrického zařízení v důsledku zkratu.

Ustálený zkratový proud je efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu po odeznění stejnosměrné, rázové i přechodné složky.

Ekvivalentní oteplovací proud je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu o konstantní amplitudě, jež za daný čas vyvine na odporu stejné teplo jako skutečný zkratový proud. Je určen vztahem

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int_0^{T_k} i_k^2 dt}{t}} \quad (2)$$

kde i_k je okamžitá hodnota zkratového proudu v čase t a T_k doba trvání zkratu, pro níž je ekvivalentní oteplovací proud určován. Spolu s hodnotou I_{th} je pak nutné udávat i dobu T , poněvadž na ní závisí.

3 Výpočet zkratových proudů

Úplný výpočet zkratového proudu by znamenal jeho určení jakožto funkce času po celou dobu trvání zkratu. Takto přesný postup však v praxi obvykle není nutný a dle způsobu užití výsledků stačí určení některých význačných hodnot, uvedených v části 2.

Pro výpočet zkratových proudů existuje více metod, mezi nejrozšířenější patří metoda ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu, jež zde bude popisována. Tato metoda je užitá pro výpočet zkratových proudů dle technické normy ČSN EN 60909-0, v níž uvedený postup je zde popisován.

V této práci je popisován postup výpočtu jen pro souměrné třífázové zkraty.

3.1 Metoda ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu

Tato metoda spočívá v uvažování jediného zdroje napětí, jenž se nachází v místě zkratu. Pro zkratový obvod je určeno náhradní schéma, v němž jsou všechny skutečné zdroje napětí nahrazeny svými vnitřními impedancemi. Spotřebiče s výjimkou motorů, které se určitou dobu po vzniku zkratu vlivem doběhu chovají jako zdroje napětí, nejsou do náhradního schématu zahrnuty. V místě zkratu je pak v náhradním schématu uvažován fiktivní tzv. ekvivalentní zdroj napětí, z něhož je obvod napájen. Určení náhradního schématu pro zkratový obvod je znázorněno na obrázku 3.

Napětí ekvivalentního zdroje je tzv. výpočtové napětí, dané vztahem

$$U_{výp} = \frac{c U_n}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

kde c je tzv. napěťový součinitel určující poměr vůči jmenovitému napětí sítě. Hodnoty tohoto součinitele dle normy ČSN EN 60909-0 jsou uvedeny v tabulce 1.

Z tohoto napětí se pak vypočte souměrný počáteční rázový zkratový proud vztahem

$$I_k'' = \frac{U_{výp}}{Z_k} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (4)$$

kde Z_k je impedance zkratového obvodu určená z náhradního schématu, tzv. zkratová impedance.

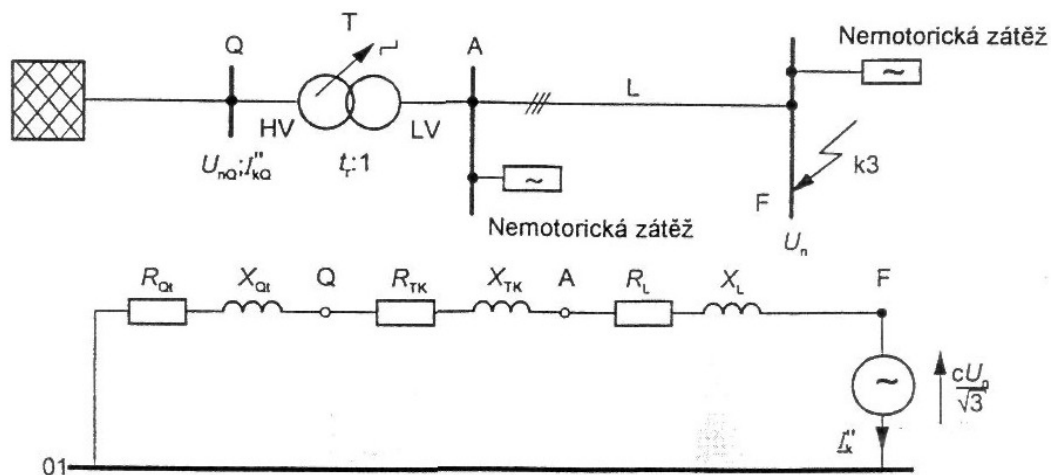
Často užívanou veličinou je zkratový výkon S_k'' , což je zdánlivý výkon dodávaný do místa zkratu počátečním rázovým zkratovým proudem při jmenovitém napětí sítě. Vypočte se vztahem (platí pro souměrný zkrat v trojfázové soustavě)

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \quad (5)$$

Tabulka 1 Hodnoty napěťového součinitele c [3]

U_n [kV]	c_{max}	c_{min}
0,1 - 1	1,10	0,90
> 1 - 230	1,10	1,00
> 230		

Součinitel c_{max} se použije pro výpočet maximálního a c_{min} pro výpočet minimálního zkratového proudu. Platí, že součin $c_{max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí pro zařízení energetických soustav.[3] U sítí 400 kV je pak součinitel c_{max} roven hodnotě 1,05.



Obr. 3 Náhradní schéma obvodu pro výpočet zkratového proudu metodou ekvivalentního zdroje napětí [3]

3.2 Zjednodušující předpoklady výpočtu

Při postupu výpočtu dle normy ČSN EN 60909-0, jež zde bude popisován, jsou uvažovány následující zjednodušující předpoklady [3]:

- Po dobu trvání zkratu se nemění jeho typ, např. dvojfázový zkrat zůstává po celou dobu dvojfázovým, nepřechází v trojfázový.
- Během trvání zkratu nedochází v síti k žádné změně.
- Impedance transformátorů odpovídají základnímu nastavení přepínačů odboček. Skutečné nastavení je respektováno zavedením korekčního součinitele impedance pro síťové transformátory K_T .
- Zanedbávají se odpory elektrických oblouků.
- Zanedbávají se všechny kapacity vedení, paralelní admitance, magnetizační reaktance a netočivé statické zátěže. Výjimku tvoří paralelní admitance v netočivé soustavě.

3.3 Zkratové impedance

3.3.1 Síťové napáječe

Je-li znám počáteční rázový souměrný zkratový proud v místě připojení napáječe I_k'' a jmenovité napětí U_n v tomto místě, zkratová impedance napáječe v místě připojení označeném Q se určí dle následujícího vztahu.

$$Z_Q = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_k''} \quad (6)$$

Je-li udán místo proudu počáteční rázový zkratový výkon, impedance se určí vztahem

$$Z_Q = \frac{cU_n^2}{S_k''} \quad (7)$$

kde S_k'' je počáteční rázový zkratový výkon pro třífázový zkrat.

Pokud je síťový napáječ připojen přes transformátor, impedance se přepočte jmenovitým převodem transformátoru pro přepínač odboček v základní poloze.[3]

Při známém poměru odporu a reaktance R/X se reaktance vypočte vztahem

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (8)$$

V případě napájení z venkovního vedení o napětí 35 kV nebo vyšším lze činný odpor napáječe zanedbat a impedanci považovat za rovnou reaktanci [3]. V ostatních případech, nejsou-li známy přesnější hodnoty, lze uvažovat $X = 0,995 Z$, $R = 0,1 X$ pro sítě vvn a zvn a $X = 0,987 Z$, $R = 0,16 X$ pro sítě vn [4].

3.3.2 Dvouvinuťové transformátory

Impedance, činný odpor a reaktance dvouvinuťového transformátoru se určí dle následujících vztahů.

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (9)$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} \quad (10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (11)$$

kde u_{kr} je poměrné napětí transformátoru nakrátko

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně, kde je prováděn výpočet,

I_{rT} je jmenovitý proud transformátoru na příslušné straně,

S_{rT} je jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,

P_{krT} jsou činné ztráty transformátoru nakrátko.

3.3.3 Trojvinut'ové transformátory

Podélné impedance, činné odpory a reaktance mezi jednotlivými stranami, kdy se uvažuje náhradní schéma s impedancemi spojenými do trojúhelníku, přepočtené na napětí strany A se určí dle následujících vztahů.

$$Z_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (12)$$

$$Z_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (13)$$

$$Z_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (14)$$

$$R_{AB} = P_{krTAB} \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}^2} \quad (15)$$

$$R_{AC} = P_{krTAC} \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}^2} \quad (16)$$

$$R_{BC} = P_{krTBC} \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}^2} \quad (17)$$

$$X_{AB} = \sqrt[2]{Z_{AB}^2 - R_{AB}^2} \quad (18)$$

$$X_{AC} = \sqrt[2]{Z_{AC}^2 - R_{AC}^2} \quad (19)$$

$$X_{BC} = \sqrt[2]{Z_{BC}^2 - R_{BC}^2} \quad (20)$$

kde u_{krAB} , u_{krBC} , u_{krAC} jsou poměrná napětí nakrátko měřená mezi dvěma stranami transformátoru při třetí odpojené,
 U_{rTA} je jmenovité napětí strany A transformátoru,
 S_{rTAB} , S_{rTBC} , S_{rTAC} jsou jmenovité zdánlivé výkony transformátoru mezi dvěma stranami,
 P_{krTAB} , P_{krTBC} , P_{krTAC} jsou činné zráty transformátoru nakrátko mezi dvěma stranami.

Hodnoty pro náhradní schéma s impedancemi spojenými do hvězdy se pak určí následujícími vztahy [3].

$$Z_A = \frac{1}{2}(Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \quad (21)$$

$$Z_B = \frac{1}{2}(Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC}) \quad (22)$$

$$Z_C = \frac{1}{2}(Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB}) \quad (23)$$

Stejně vztahy platí pro činné odpory a reaktance.

3.3.4 Zanedbání činného odporu transformátorů

Vzhledem ke skutečnosti, že s rostoucím výkonem transformátoru roste poměr podélných reaktancí vůči činným odporům, lze u velkých transformátorů při výpočtech zkratových proudů s výjimkou proudu nárazového a stejnosměrné složky činný odpor zanedbat [3].

3.3.5 Korekční součinitele pro impedance síťových transformátorů

U síťových transformátorů je nutné impedance vypočtené vztahy (9) až (23) přenásobit korekčními součiniteli. Síťovými transformátory se rozumí transformátory spojující dvě či více sítí s rozdílným napětím. Tyto korekční součinitele nelze užít pro blokové transformátory.[3]

Pro výpočet korekčního součinitele K_T u dvouvinutových transformátorů platí vztah

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 x_T} \quad [3] \quad (24)$$

kde c_{max} je součinitel napětí dle tabulky 1 odpovídající napětí sítě připojené na stranu nižšího napětí transformátoru,

x_T je poměrná reaktance transformátoru.

Při známých dlouhodobých provozních podmínkách před zkratem lze užít následující vztah.

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_t \frac{I_T^b}{I_{rT}} \sin \varphi_T^b} \quad [3] \quad (25)$$

kde c_{max} je součinitel napětí dle tabulky 1 odpovídající napětí sítě připojené na stranu nižšího napětí transformátoru,

x_T je poměrná reaktance transformátoru,

U_n je jmenovité napětí sítě,

U^b je nejvyšší provozní napětí před zkratem,

I^b je nejvyšší provozní proud před zkratem,

I_{rT} je jmenovitý proud transformátoru,

φ_T^b je fázový posuv napětí vůči proudu před zkratem.

U trojvintu'ových transformátorů se určí korekční součinitele pro impedance mezi jednotlivými dvojicemi stran dle následujících vztahů [3].

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6 X_{TAB}} \quad (26)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6 X_{TBC}} \quad (27)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6 X_{TAC}} \quad (28)$$

kde X_{TAB} , X_{TBC} , X_{TAC} jsou poměrné impedance mezi příslušnými stranami transformátoru.

3.3.6 Venkovní vedení a kabely

Činný odpor R_L vedení při teplotě 20 °C vztažený na jednotku délky se vypočte vztahem

$$R_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (29)$$

kde ρ je rezistivita materiálu vodiče při teplotě 20 °C,

q_n je jmenovitý průřez vodiče.

Pro rezistivitu lze použít následující hodnoty:

měď $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$

hliník $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega mm^2}{m}$

slitina hliníku $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega mm^2}{m}$

Pro teploty vyšší než 20 °C se činný odpor přepočte následujícím vztahem.

$$R_L = R_{L20} [1 + \alpha(\theta_e - 20 \text{ °C})] \quad (30)$$

kde R_{L20} je odpor při teplotě 20 °C,

α je teplotní součinitel, uvažován rovný hodnotě 0,004/K, platné s dostatečnou přesností pro měď, hliník a slitinu hliníku[3],

θ_e je teplota vodiče na konci zkratu.

Reaktance vedení X_L vztažená na jednotku délky bývá u vedení udávána.

3.3.7 Tlumivky omezující zkratový proud (reaktory)

Impedance tlumivky se vypočte následujícím vztahem.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{rR}} \quad (31)$$

kde u_{kR} je poměrné impedanční napětí tlumivky,

I_{rR} je jmenovitý proud tlumivky,

U_n je jmenovité napětí sítě.

Činný odpor tlumivky se předpokládá zanedbatelný vůči reaktanci.[3]

3.3.8 Synchronní generátory, motory a kompenzátory

Jako reaktance synchronního generátoru se uvažuje rázová reaktance, určená z poměrné hodnoty vztahem

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (32)$$

kde x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru,

U_{rG} je jmenovité napětí generátoru,

S_{rG} je jmenovitý zdánlivý výkon generátoru.

Činný odpor vinutí generátoru, není-li udán výrobcem, lze uvažovat roven fiktivním odporům [3]:

$$R_G = 0,05X_d'' \text{ pro stroje s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA,}$$

$$R_G = 0,07X_d'' \text{ pro stroje s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA,}$$

$$R_G = 0,15X_d'' \text{ pro stroje s } U_{rG} \leq 1 \text{ kV.}$$

Při výpočtu stejnosměrné složky zkratového proudu nelze tyto fiktivní hodnoty odporu užít, poněvadž skutečné hodnoty jsou obvykle výrazně nižší. Pak je nutné užít hodnoty stanovené výrobcem stroje.[3]

Je-li při výpočtu zkratových proudů užít ekvivalentní zdroj napětí namísto rázového napětí generátoru, je nutné impedanci vynásobit korekčním součinitelem K_G , vypočteným dle vztahu

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad [3] \quad (33)$$

kde c_{max} je součinitel napětí dle tabulky 1,

x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru,

U_n je jmenovité napětí sítě,

U_{rG} je jmenovité napětí generátoru,

φ_{rG} je jmenovitý fázový posuv napětí vůči proudu generátoru.

Synchronní motory s napěťovou regulací jsou při výpočtu zkratových proudů uvažovány jako synchronní generátory. Synchronní kompenzátory jsou uvažovány jako generátory při výpočtech počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , nárazového zkratového proudu i_p , souměrného vypínacího zkratového proudu I_b a ustáleného zkratového proudu I_k . V jiných případech je nutné užít zvláštní postupy.[3]

3.3.9 Odvození korekčního součinitele pro impedanci synchronních generátorů

Poněvadž impedance synchronního generátoru se v jeho náhradním schématu nachází mezi zdrojem vnitřního indukovaného napětí a svorkami generátoru, dodává generátor při zkratu na svorkách proud rovný podílu právě tohoto vnitřního napětí, nikoliv napětí výpočtového, a rázové impedance generátoru. Zmíněné vnitřní napětí generátoru se pro účel výpočtů zkratových proudů označuje jako rázové napětí E'' .

Při výpočtu počátečního rázového zkratového proudu metodou ekvivalentního zdroje napětí, kdy je užito výpočtové napětí $c \cdot U_n$, se toto řeší zavedením korekčního součinitele K_G respektujícího poměr rázového napětí E'' a napětí výpočtového, kterýmžto součinitelem se násobí impedance generátoru.

Odvození korekčního součinitele vychází z rovnosti

$$I_k'' = \frac{E''}{Z_G} = \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} K_G Z_G} \quad (34)$$

Součinitel K_G je pak určen

$$K_G = \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} E''} \quad (35)$$

Rázové napětí E'' se určí z fázorového diagramu na obrázku 4 jako součet jmenovitého napětí generátoru a úbytku napětí na statorovém vinutí při jmenovitém proudu, kdy tento úbytek je zjednodušeně určen jako velikost průmětu fázoru napětí na rázové reaktanci statoru do osy fázoru svorkového napětí, jež je uvažováno rovné jmenovitému. Výsledkem je vztah

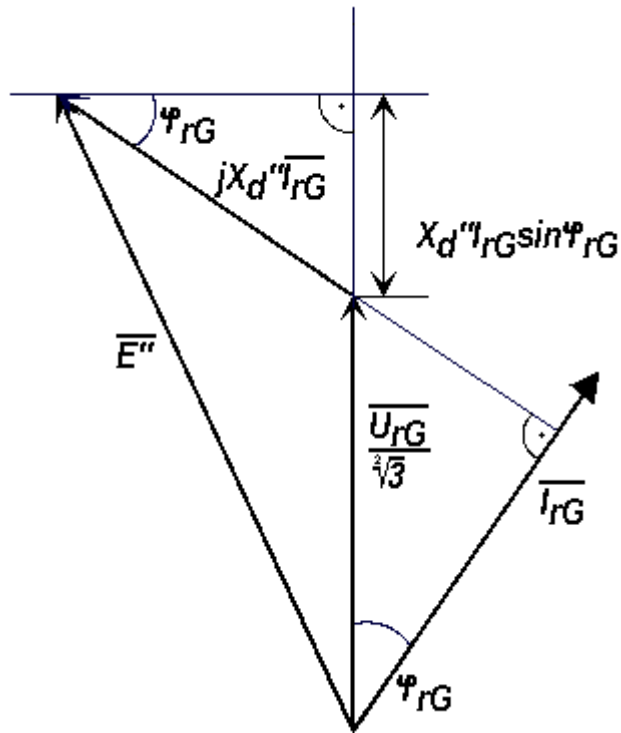
$$E'' = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} + X_d'' I_{rG} \sin \varphi_{rG} \quad (36)$$

Rázová reaktance X_d'' se nahradí poměrnou hodnotou x_d'' , čímž se vztah upraví do tvaru

$$E'' = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} + \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} I_{rG}} x_d'' I_{rG} \sin \varphi_{rG} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} (1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}) \quad (37)$$

Po dosazení do rovnice 35 pak vyjde výsledný vztah pro součinitel K_G

$$K_G = \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} (1 + x_d'' \sin \varphi_{rG})} = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (38)$$



Obr. 4 Zjednodušený fázorový diagram synchronního generátoru při provozu se jmenovitými parametry

3.3.10 Elektrárenský blok

U elektrárenských bloků je nutno výslednou impedanci, jež je součtem impedance blokového transformátoru a impedance generátoru přepočtené přes jmenovitý převod transformátoru, přenásobit korekčním součinitelem K_s či K_{SO} . Impedance generátoru ani transformátoru se v tomto případě nenásobí samostatnými korekčními součiniteli.[3]

U elektrárenského bloku s transformátorem vybaveným přepínačem odboček při zatížení se použije korekční součinitel K_S , vypočtený vztahem

$$K_S = \frac{U_n^2}{U_{rG}^2} \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}} \quad [3] \quad (39)$$

- kde U_n je jmenovité napětí sítě v místě připojení elektrárenského bloku,
 U_{rG} je jmenovité napětí generátoru,
 U_{rTLV} je jmenovité napětí transformátoru na straně nižšího napětí,
 U_{rTHV} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího napětí,
 c_{max} je součinitel napětí dle tabulky 1,
 x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru,
 x_T je poměrná reaktance transformátoru při základní poloze přepínače odboček,
 φ_{rG} je jmenovitý fázový posuv napětí vůči proudu generátoru.

U elektrárenského bloku s transformátorem, jenž nemá přepínač odboček při zatížení, se použije korekční součinitel K_{SO} , vypočtený pomocí následujícího vztahu.

$$K_{SO} = \frac{U_n}{U_{rG}(1 + \rho_G)} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} (1 \pm \rho_T) \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad [3] \quad (40)$$

- kde U_n je jmenovité napětí sítě v místě připojení elektrárenského bloku,
 U_{rG} je jmenovité napětí generátoru,
 U_{rTLV} je jmenovité napětí transformátoru na straně nižšího napětí,
 U_{rTHV} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího napětí,
 ρ_G je rozsah regulace napětí generátoru,
 ρ_T je rozsah regulace napětí transformátoru,
 c_{max} je součinitel napětí dle tabulky 1,
 x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru,
 φ_{rG} je jmenovitý fázový posuv napětí vůči proudu generátoru.

Člen $(1 \mp \rho_T)$ ve vztahu 40 musí být zaveden v případě, že je blokovaný transformátor vybaven přepínačem odboček bez zatížení a jedna z těchto odboček je trvale využívána, s výjimkou případu, kdy je vybrána hodnota tohoto členu rovná 1. Při výpočtu největšího

zkratového příspěvku elektrárenského bloku na straně vyššího napětí blokového transformátoru se tento člen zavede ve tvaru $(1 - \rho_T)$. [3]

3.3.11 Asynchronní motory

Zkratová impedance asynchronního motoru se vypočte vztahem

$$Z_M = \frac{I_{rM}}{I_{LR}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{I_{rM}}{I_{LR}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad [3] \quad (41)$$

kde I_{LR} je záběrný proud asynchronního motoru,

I_{rM} je jmenovitý proud motoru,

U_{rM} je jmenovité napětí motoru

S_{rM} je jmenovitý zdánlivý příkon motoru.

Reaktance motoru se při známém poměru činného odporu vůči reaktanci R/X vypočte následujícím vztahem.

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}} \quad (42)$$

Není-li poměr R_M/X_M znám, lze s dostatečnou přesností uvažovat:

$R_M/X_M = 0,1$ a $X_M = 0,995Z$ pro vn motory s $P_{rM} \geq 1$ MW na pólovou dvojici,

$R_M/X_M = 0,15$ a $X_M = 0,989Z$ pro vn motory s $P_{rM} < 1$ MW na pólovou dvojici,

$R_M/X_M = 0,42$ a $X_M = 0,922Z$ pro skupiny nn motorů včetně připojovacích kabelů. [3]

P_{rM} je jmenovitý činný výkon motoru.

3.3.12 Zanedbání příspěvku zkratových proudů od asynchronních motorů

U skupin asynchronních motorů nízkého napětí lze zanedbat příspěvek těch motorů, jež vzhledem k provozním podmínkám nebo způsobu blokování nemohou běžet současně. Příspěvek zkratových proudů od ostatních asynchronních motorů zanedbat nelze. [3]

3.4 Výpočet zkratových proudů

3.4.1 Souměrný počáteční rázový zkratový proud

Souměrný počáteční rázový zkratový proud I_k'' se vypočte vztahem

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (43)$$

kde c je součinitel napětí dle tabulky 1,

U_n je jmenovité napětí sítě v místě zkratu,

Z_k je výsledná impedance zkratového obvodu.

Impedance zkratového obvodu Z_k se získá postupným zjednodušováním náhradního schématu. V případě nezauzlené sítě lze vypočítat samostatné zkratové proudy pro impedance jednotlivých větví, výsledný zkratový proud je pak součtem těchto proudů.

3.4.2 Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud i_p se vypočte z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' následujícím vztahem.

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad [3] \quad (44)$$

Součinitel κ se pro jednotlivé větve nezauzlené sítě vypočte vztahem

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3 \frac{R}{X}} \quad [3] \quad (45)$$

kde R je odporová složka zkratové impedance větve obvodu,

X je reaktanční složka zkratové impedance větve obvodu.

Pro synchronní generátory se použije fiktivní činný odpor, popsany v části 3.3.8.

V nezauzlených sítích se provádí výpočet nárazového zkratového proudu samostatně pro jednotlivé větve obvodu připojené paralelně k místu zkratu, výsledná hodnota je pak součtem hodnot v těchto větvích.

3.4.3 Stejnsměrná složka zkratového proudu

Hodnota maximální stejnosměrné složky zkratového proudu $i_{d.c.}$ v čase t se určí z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' následujícím vztahem.

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (46)$$

kde I_k'' je souměrný počáteční rázový zkratový proud,

R je odporová složka zkratové impedance,

X je reaktanční složka zkratové impedance,

t je čas.

U synchronních generátorů je nutné počítat se skutečným činným odporem [3].

3.4.4 Souměrný vypínací zkratový proud

V případě elektricky vzdáleného zkratu je souměrný vypínací zkratový proud I_b roven souměrnému počátečnímu rázovému zkratovému proudu I_k'' . [3]

V případě zkratu elektricky blízkého v nezaizolovaných sítích se příspěvky I_k'' od generátorů násobí součinitelem μ zohledňujícím zmenšování I_b v čase, kterýžto součinitel se vypočte následujícími vztahy [3].

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 e^{-0,26 \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s,} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 e^{-0,3 \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s,} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} = 0,1 \text{ s,} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 e^{-0,38 \frac{I_{kG}''}{I_{rG}}} \quad \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s.} \end{aligned} \quad (47)$$

kde I_{kG}'' je příspěvek počátečního rázového zkratového proudu od generátoru,

I_{rG} je jmenovitý proud generátoru,

t_{min} je minimální doba vypnutí.

Příspěvky asynchronních motorů se též násobí součinitelem μ , v jehož výpočtu se užijí příspěvek počátečního rázového zkratového proudu a jmenovitý proud příslušného motoru. Navíc se tato hodnota násobí součinitelem q , jenž se vypočte následujícími vztahy [3].

$$\begin{aligned}
 q &= 1,03 + 0,12 \ln \frac{P_{rM}}{p} \quad \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s,} \\
 q &= 0,79 + 0,12 \ln \frac{P_{rM}}{p} \quad \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s,} \\
 q &= 0,57 + 0,12 \ln \frac{P_{rM}}{p} \quad \text{pro } t_{min} = 0,1 \text{ s,} \\
 q &= 0,26 + 0,1 \ln \frac{P_{rM}}{p} \quad \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s.}
 \end{aligned} \tag{48}$$

kde P_{rM} je jmenovitý činný výkon motoru udávaný v MW,
 p je počet pólových dvojic motoru.

Výsledná hodnota souměrného vypínacího zkratového proudu v neuzavřených sítích je součtem hodnot vypočtených pro jednotlivé větve obvodu.

3.4.5 Stejnosemřná složka vypínacího zkratového proudu

Stejnosemřná složka vypínacího zkratového proudu $I_{bd.c.}$ je rovna stejnosemřné složce zkratového proudu $i_{d.c.}$ v čase t_{min} .

3.4.6 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} se vypočte z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' s užitím součinitelů m , n . Součinitel m odráží časově závislý tepelný účinek stejnosemřné složky, součinitel n účinek složky střídavé.[3]

Výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu vychází ze vztahu

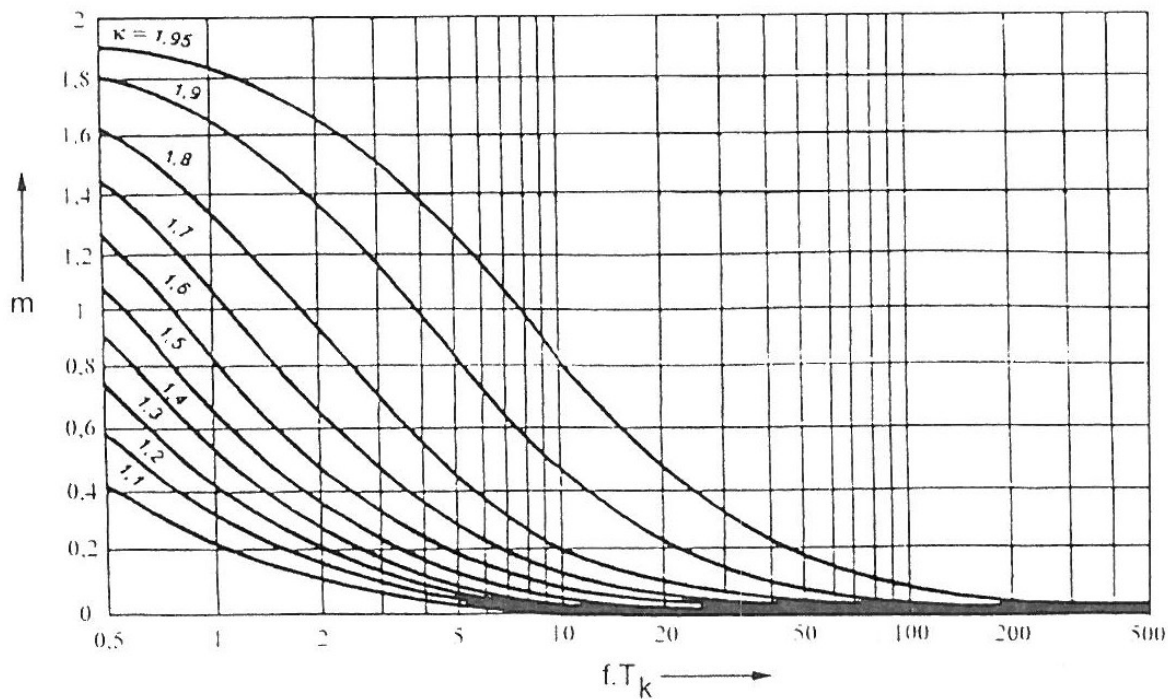
$$\int_0^{T_k} i_k^2 dt = I_k''^2 (m+n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad [3] \tag{49}$$

kde i_k je okamžitá hodnota zkratového proudu v čase t ,
 T_k je doba trvání zkratu, pro kterou je I_{th} určován,
 I_k'' je souměrný počáteční rázový zkratový proud,
 m, n jsou součinitele pro výpočet I_{th} .

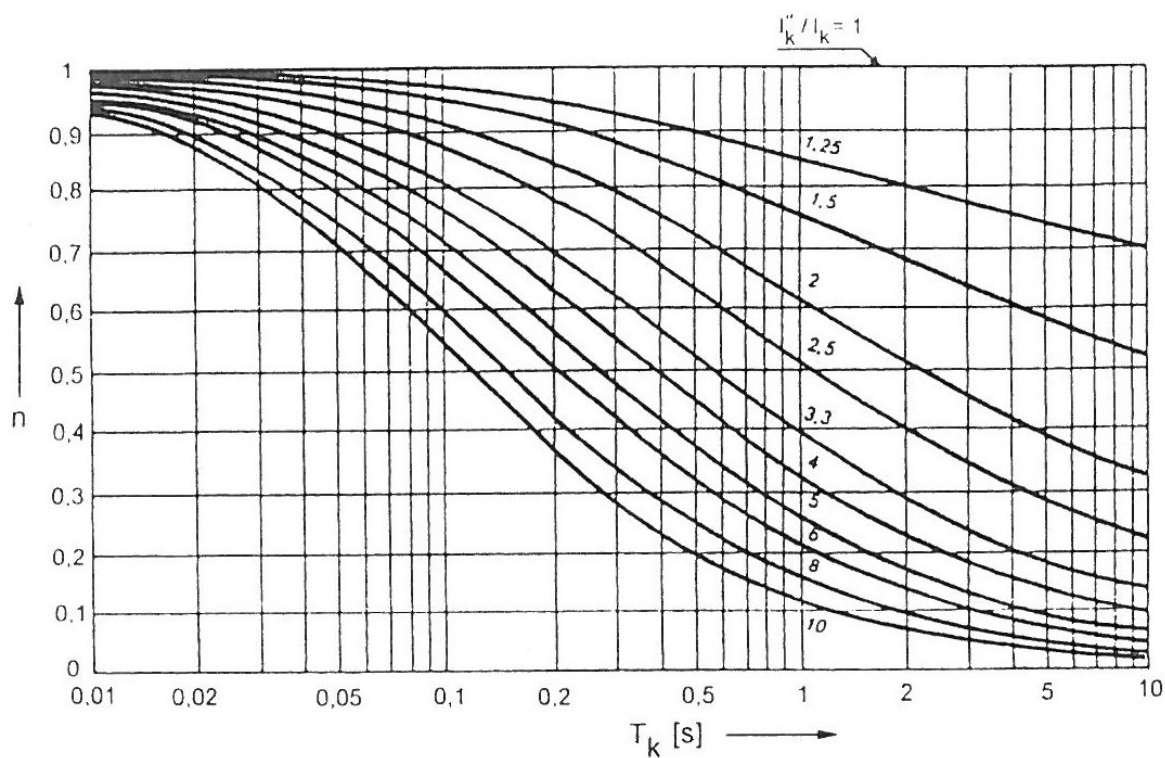
Hodnota ekvivalentního oteplovacího proudu se pak vypočte vztahem

$$I_{th} = I_k' \sqrt{m+n} \quad [3] \quad (50)$$

Hodnoty součinitelů m , n se určí z grafů na obrázcích 5 a 6. U distribučních sítí lze uvažovat $n = 1$, u elektricky vzdálených zkratů se jmenovitou dobou trvání 0,5 s či větší pak $m + n = 1$. [3]



Obr. 5 Hodnoty součinitele m odrážejícího tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu[2]



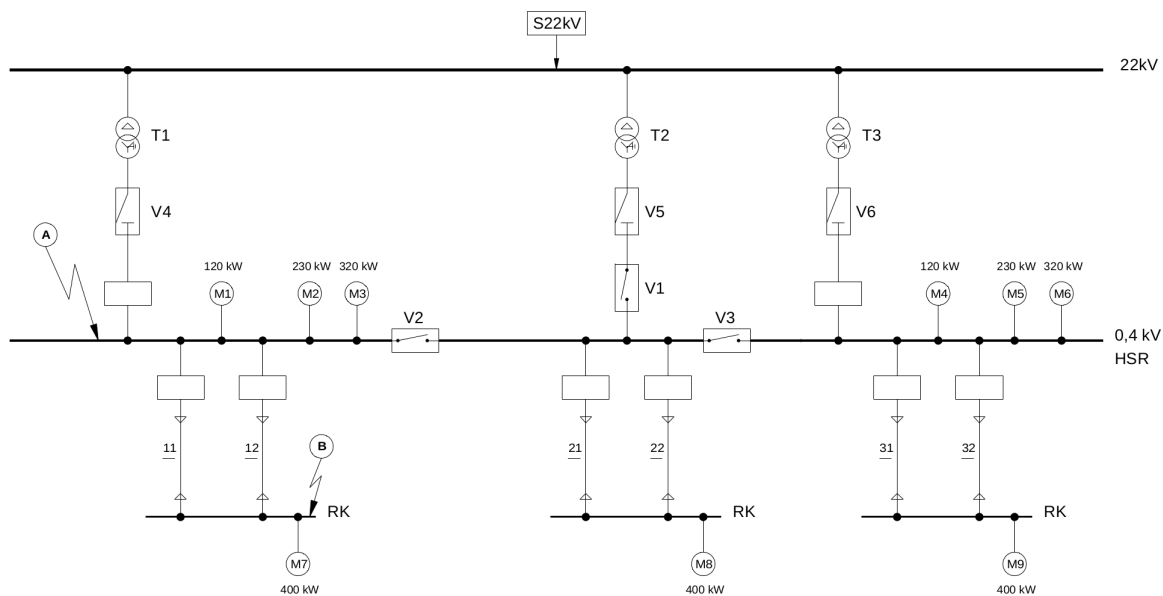
Obr. 6 Hodnoty součinitele n odrážejícího tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu[2]

4 Výpočet zkratových proudů v sítích dle zadaného příkladu

V této části práce budou uvedeny výsledky a postupy výpočtů zkratových proudů ve dvou zadaných sítích při zkratech v několika zadaných místech. Výpočty jsou prováděny postupem dle normy ČSN EN 60909-0, dále se zanedbáním korekčních součinitelů pro transformátory, generátory a elektrárenské bloky, a poté se zanedbáním činných odporů. Všechny uvedené zjednodušené postupy výpočtů jsou provedeny pro jmenovitý převod transformátoru a též pro převod fiktivní. Výsledky získané zjednodušenými postupy jsou následně porovnány s výsledky získanými postupem dle normy.

4.1 Průmyslová síť 400 V

4.1.1 Zadání



Obr. 7 Schéma průmyslové sítě 0,4 kV

Vypínač s odpojovačem V1 a V5 jsou vypnuty, ostatní jsou zapnuty.

Vlastnosti prvků sítě:

Elektrizační soustava 22 kV

$$S_k'' = 450 \text{ MVA}$$

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

$$c = 1,1$$

Transformátory T1, T2, T3

$$S_{rT} = 1 \text{ MVA}$$

$$U_{rTHV} = 22 \text{ kV}$$

$$U_{rTLV} = 0,42 \text{ kV}$$

$$u_{kr} = 6 \%$$

$$P_{krT} = 10,5 \text{ kW}$$

Kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32

typ vodičů: 3x185 + 95 Cu

$$R_L = 0,16735 \Omega/\text{km}$$

$$X_L = 0,081 \Omega/\text{km}$$

$$l = 100 \text{ m}$$

Asynchronní motory

$$U_{rM} = 0,4 \text{ kV}$$

$$I_{LR}/I_{rM} = 5$$

$$R_M/X_M = 0,24$$

$$\cos\varphi_{rM} \cdot \eta_{rM} = 0,75$$

$$\text{M1, M4: } P_{rM} = 120 \text{ kW}$$

$$\text{M2, M5: } P_{rM} = 230 \text{ kW}$$

$$\text{M3, M6: } P_{rM} = 320 \text{ kW}$$

$$\text{M7, M8, M9: } P_{rM} = 400 \text{ kW}$$

4.1.2 Výpočet postupem dle normy (bez zjednodušení)

Zkratové impedance prvků sítě

Zkratové impedance zařízení jsou počítány na napěťové hladině, na níž je zařízení připojeno, u transformátorů na hladině nižšího napětí. Je-li zařízení připojeno k jiné napěťové hladině, nežli k té, na níž jsou zkratové poměry počítány, je impedance přepočtena dle převodu příslušného transformátoru. V tomto příkladu jsou zkratové poměry počítány na hladině 400 V.

Transformátory T1, T2, T3

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6\%}{100\%} \cdot \frac{0,42^2}{1} \approx 1,0584 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (51)$$

Činný odpor transformátoru:

$$R_T = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 10,5 \cdot 10^3 \frac{(0,42 \cdot 10^3)^2}{(10^6)^2} \approx 1,8522 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (52)$$

Reaktance transformátoru:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \approx \sqrt{(10,584 \cdot 10^{-3})^2 - (1,8522 \cdot 10^{-3})^2} \approx 1,0421 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (53)$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \approx \frac{10,4207 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,42^2}{1}} \approx 5,9074 \cdot 10^{-2} \quad (54)$$

Jmenovitý a fiktivní převod:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{22}{0,42} \approx 52,381 \quad (55)$$

$$t_f = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{22}{0,4} = 55 \quad (56)$$

Korekční součinitel pro impedanci transformátoru:

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 x_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 59,0741 \cdot 10^{-3}} \approx 1,009228 \quad (57)$$

Korigovaný odpor a reaktance transformátoru:

$$R_{TK} = K_T R_T \approx 1,009228 \cdot 1,8522 \cdot 10^{-3} \approx 1,8693 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (58)$$

$$X_{TK} = K_T X_T \approx 1,009228 \cdot 1,0421 \cdot 10^{-2} \approx 1,0517 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (59)$$

Elektrizační soustava 22 kV

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_{Q(22kV)} = \frac{c U_n^2}{S_k'} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{450} \approx 1,1831 \Omega \quad (60)$$

Impedance přepočtená na hladinu 0,4 kV jmenovitým převodem:

$$Z_Q = \frac{Z_{Q(22kV)}}{t_r^2} \approx \frac{1,1831}{52,381^2} \approx 4,312 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (61)$$

Reaktance a činný odpor stanovené dle tabulkových hodnot $X = 0,987 Z$, $R = 0,16 X$:

$$X_Q = 0,987 Z_Q \approx 0,987 \cdot 4,312 \cdot 10^{-4} \approx 4,2559 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (62)$$

$$R_Q = 0,16 X_Q \approx 0,16 \cdot 4,2559 \cdot 10^{-4} \approx 6,8095 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (63)$$

Asynchronní motory

Uveden je postup výpočtu pro motory M1 a M4. Stejným postupem jsou vypočteny zkratové impedance ostatních motorů.

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_{M1} = \frac{I_{rM}}{I_{LR}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{I_{rM}}{I_{LR}} \frac{U_{rM}^2 \eta \cos \varphi_{rM}}{P_{rM}} = \frac{1}{5} \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,75}{120 \cdot 10^3} = 0,2 \Omega \quad (64)$$

Reaktance motoru:

$$X_{M1} = \frac{Z_{M1}}{\sqrt[2]{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt[2]{1 + 0,24^2}} \approx 0,19448 \Omega \quad (65)$$

Činný odpor:

$$R_{M1} = \frac{R_M}{X_M} X_{M1} \approx 0,24 \cdot 0,19448 \approx 4,6675 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (66)$$

Kabelová vedení

Činný odpor a reaktance:

$$R_V = R_L \cdot l = 0,16735 \cdot 0,1 = 16,735 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (67)$$

$$X_V = X_L \cdot l = 0,081 \cdot 0,1 = 8,1 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (68)$$

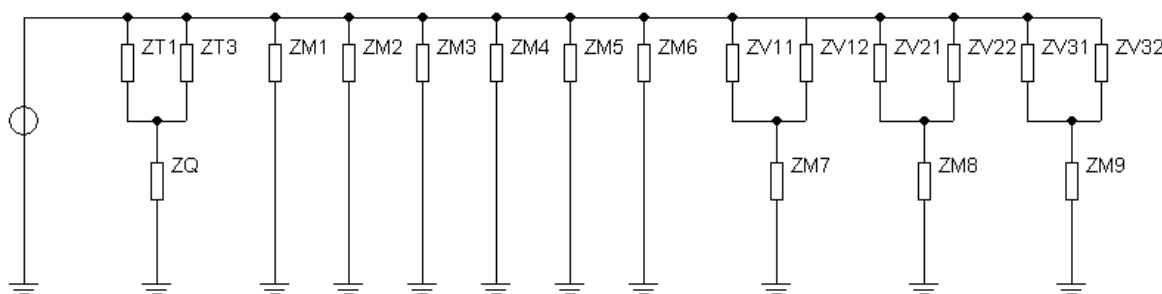
Zkratové impedance všech prvků sítě

Tabulka 2 Zkratové impedance prvků průmyslové sítě 0,4 kV pro výpočet dle normy

prvek	značení impedance	R [Ω]	X [Ω]
T1, T3 korigovaná Z	Z_{TK1}, Z_{TK3}	$1,8693 \cdot 10^{-3}$	$1,0517 \cdot 10^{-2}$
soustava 22 kV	Z_Q	$6,8095 \cdot 10^{-5}$	$4,2559 \cdot 10^{-4}$
kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32	Z_V	$1,6735 \cdot 10^{-2}$	$8,100 \cdot 10^{-3}$
M1, M4	Z_{M1}, Z_{M4}	$4,6675 \cdot 10^{-2}$	0,19448
M2, M5	Z_{M2}, Z_{M5}	$2,4352 \cdot 10^{-2}$	0,10147
M3, M6	Z_{M3}, Z_{M6}	$1,7503 \cdot 10^{-2}$	$7,2929 \cdot 10^{-2}$
M7, M8, M9	Z_{M7}, Z_{M8}, Z_{M9}	$1,4002 \cdot 10^{-2}$	$5,8343 \cdot 10^{-2}$

Zkrat v místě A

Náhradní schéma



Obr. 8 Náhradní schéma pro zkrat v místě A v průmyslové síti 0,4 kV

Výsledná zkratová impedance

Paralelní spojení \bar{Z}_{TK1} a \bar{Z}_{TK3} , \bar{Z}_Q v sérii:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{TK1,TK3,Q} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{TK1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{TK3}}} + \bar{Z}_Q = \frac{\bar{Z}_{TK1}}{2} + \bar{Z}_Q \approx \\ &\approx \frac{1,8693 \cdot 10^{-3} + j1,0517 \cdot 10^{-2}}{2} + 6,8095 \cdot 10^{-5} + j4,2559 \cdot 10^{-4} \approx \\ &\approx (1,0027 \cdot 10^{-3} + j5,684 \cdot 10^{-3}) \Omega\end{aligned}\quad (69)$$

Paralelní spojení dvou \bar{Z}_V , \bar{Z}_{M7} v sérii, stejnou hodnotu mají zkratové impedance motorů M8 a M9 s vedením:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2V,M7} &= \frac{\bar{Z}_V}{2} + \bar{Z}_{M7} \approx \\ &\approx \frac{1,6735 \cdot 10^{-2} + j8,1 \cdot 10^{-3}}{2} + 1,4002 \cdot 10^{-2} + j5,8343 \cdot 10^{-2} \approx \\ &\approx (2,237 \cdot 10^{-2} + j6,2393 \cdot 10^{-2}) \Omega\end{aligned}\quad (70)$$

Paralelní spojení $\bar{Z}_{2V,M7}$, $\bar{Z}_{2V,M8}$, $\bar{Z}_{2V,M9}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2V,M7-9} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{2V,M7}} + \frac{1}{\bar{Z}_{2V,M8}} + \frac{1}{\bar{Z}_{2V,M9}}} = \frac{\bar{Z}_{2V,M7}}{3} \approx \\ &\approx \frac{2,237 \cdot 10^{-2} + j6,2393 \cdot 10^{-2}}{3} \approx (7,4566 \cdot 10^{-3} + j2,0798 \cdot 10^{-2}) \Omega\end{aligned}\quad (71)$$

Paralelní spojení \bar{Z}_{M1} - \bar{Z}_{M6} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{M1-6} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{M1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M3}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M4}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M5}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M6}}} = \frac{1}{\frac{2}{\bar{Z}_{M1}} + \frac{2}{\bar{Z}_{M2}} + \frac{2}{\bar{Z}_{M3}}} \approx \\ &\approx \left(\frac{2}{4,6675 \cdot 10^{-2} + j0,19448} + \frac{2}{2,4352 \cdot 10^{-2} + j0,10147} + \right. \\ &\left. + \frac{2}{1,7503 \cdot 10^{-2} + j7,2929 \cdot 10^{-2}} \right)^{-1} \approx (4,1798 \cdot 10^{-3} + j1,7416 \cdot 10^{-2}) \Omega\end{aligned}\quad (72)$$

Výsledná zkratová impedance:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{TK1,TK3,Q}} + \frac{1}{\bar{Z}_{2V,M7-9}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M1-6}}} \approx \\ &\approx \left(\frac{1}{1,0027 \cdot 10^{-3} + j5,684 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{7,4566 \cdot 10^{-3} + j2,0798 \cdot 10^{-2}} + \right. \\ &\left. + \frac{1}{4,1978 \cdot 10^{-3} + j1,7416 \cdot 10^{-2}} \right)^{-1} \approx (7,7897 \cdot 10^{-4} + j3,568 \cdot 10^{-3}) \Omega \end{aligned} \quad (73)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt[2]{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{(7,7897 \cdot 10^{-4})^2 + (3,568 \cdot 10^{-3})^2} \approx 3,652 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (74)$$

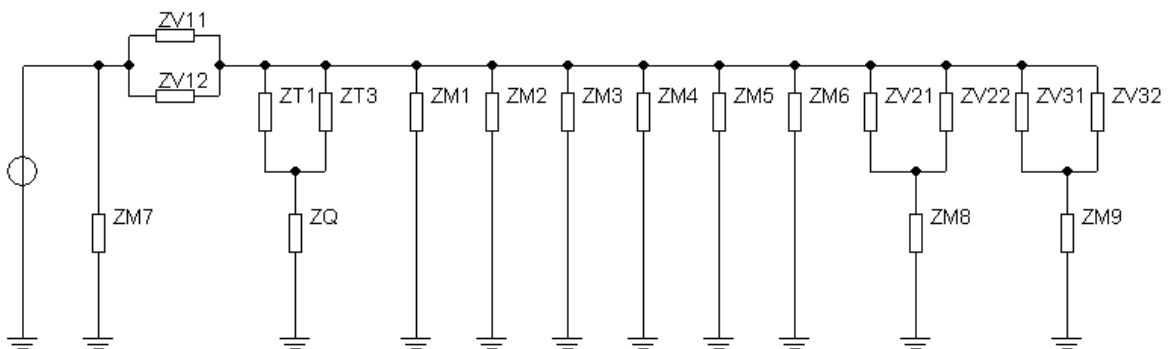
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 3,652 \cdot 10^{-3}} \approx 69,5597 \text{ kA} \quad (75)$$

$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 0,4^2}{3,652 \cdot 10^{-3}} \approx 48,1924 \text{ MVA} \quad (76)$$

Zkrat v místě B

Náhradní schéma



Obr. 9 Náhradní schéma pro zkrat v místě B v průmyslové síti 0,4 kV

Výsledná zkratová impedance

Paralelní spojení Z_{TK1} a Z_{TK3} , Z_Q v sérii:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{TK1,TK3,Q} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{TK1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{TK3}}} + \bar{Z}_Q = \frac{\bar{Z}_{TK1}}{2} + \bar{Z}_Q \approx \\ &\approx \frac{1,8693 \cdot 10^{-3} + j1,0517 \cdot 10^{-2}}{2} + 6,8095 \cdot 10^{-5} + j4,2559 \cdot 10^{-4} \approx \\ &\approx (1,0027 \cdot 10^{-3} + j5,684 \cdot 10^{-3}) \Omega\end{aligned}\quad (77)$$

Paralelní spojení dvou \bar{Z}_V , \bar{Z}_{M8} v sérii, stejnou hodnotu má zkratová impedance motoru M9 s vedením:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2V,M8} &= \frac{\bar{Z}_V}{2} + \bar{Z}_{M8} \approx \\ &\approx \frac{1,6735 \cdot 10^{-2} + j8,1 \cdot 10^{-3}}{2} + 1,4002 \cdot 10^{-2} + j5,8343 \cdot 10^{-2} \approx \\ &\approx (2,237 \cdot 10^{-2} + j6,2393 \cdot 10^{-2}) \Omega\end{aligned}\quad (78)$$

Paralelní spojení \bar{Z}_{M1} - \bar{Z}_{M6} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{M1-6} &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{M1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M3}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M4}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M5}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M6}}} = \frac{1}{\frac{2}{\bar{Z}_{M1}} + \frac{2}{\bar{Z}_{M2}} + \frac{2}{\bar{Z}_{M3}}} \approx \\ &\approx \left(\frac{2}{4,6675 \cdot 10^{-2} + j0,19448} + \frac{2}{2,4352 \cdot 10^{-2} + j0,10147} + \right. \\ &\left. + \frac{2}{1,7503 \cdot 10^{-2} + j7,2929 \cdot 10^{-2}} \right)^{-1} \approx (4,1798 \cdot 10^{-3} + j1,7416 \cdot 10^{-2}) \Omega\end{aligned}\quad (79)$$

Paralelní spojení $\bar{Z}_{TK1,TK3,Q}$, $\bar{Z}_{2V,M8}$, $\bar{Z}_{2V,M9}$ a \bar{Z}_{M1-6} v sérii s paralelním spojení dvou \bar{Z}_V :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{TK1,TK3,Q}} + \frac{2}{\bar{Z}_{2V,M8}} + \frac{1}{\bar{Z}_{M1-6}}} + \frac{\bar{Z}_V}{2} \approx \\ &\approx \left(\frac{1}{1,0027 \cdot 10^{-3} + j5,684 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2,237 \cdot 10^{-2} + j6,2393 \cdot 10^{-2}} + \right. \\ &\left. + \frac{1}{4,1798 \cdot 10^{-3} + j1,7416 \cdot 10^{-2}} \right)^{-1} + \frac{1,6735 \cdot 10^{-2} + j8,1 \cdot 10^{-3}}{2} \approx \\ &\approx (9,1631 \cdot 10^{-3} + j7,8302 \cdot 10^{-3}) \Omega\end{aligned}\quad (80)$$

Výsledná zkratová impedance:

$$\bar{Z}_k = \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_{M7}}} \approx \frac{1}{\frac{1}{9,1631 \cdot 10^{-3} + j7,8302 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1,4002 \cdot 10^{-2} + j5,8343 \cdot 10^{-2}}} \approx (7,1246 \cdot 10^{-3} + j7,4588 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad (81)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{(7,1246 \cdot 10^{-3})^2 + (7,4588 \cdot 10^{-3})^2} \approx 1,0315 \cdot 10^{-2} \quad (82)$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 1,0315 \cdot 10^{-2}} \approx 24,6283 \text{ kA} \quad (83)$$

$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 0,4^2}{1,0315 \cdot 10^{-2}} \approx 17,063 \text{ MVA} \quad (84)$$

4.1.3 Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí

V tomto výpočtu nejsou užity korekční součinitele pro impedance transformátorů, zbytek postupu je stejný jako postup dle normy.

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 3 Zkratové impedance prvků průmyslové sítě 0,4 kV pro výpočet bez korekčních součinitelů

prvek	značení impedance	R [Ω]	X [Ω]
T1, T3 nekorigovaná Z	Z_{T1}, Z_{T3}	$1,8522 \cdot 10^{-3}$	$1,0421 \cdot 10^{-2}$
soustava 22 kV	Z_Q	$6,8095 \cdot 10^{-5}$	$4,2559 \cdot 10^{-4}$
kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32	Z_V	$1,6735 \cdot 10^{-2}$	$8,1000 \cdot 10^{-3}$
M1, M4	Z_{M1}, Z_{M4}	$4,6675 \cdot 10^{-2}$	0,19448
M2, M5	Z_{M2}, Z_{M5}	$2,4352 \cdot 10^{-2}$	0,10147
M3, M6	Z_{M3}, Z_{M6}	$1,7503 \cdot 10^{-2}$	$7,2929 \cdot 10^{-2}$
M7, M8, M9	Z_{M7}, Z_{M8}, Z_{M9}	$1,4002 \cdot 10^{-2}$	$5,8343 \cdot 10^{-2}$

Zkrat v místě A

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (7,74 \cdot 10^{-4} + j3,549 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_k = 3,6324 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 69,935 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,4524 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (7,124 \cdot 10^{-3} + j7,4428 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_k = 1,0303 \cdot 10^{-2} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 24,657 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 17,0829 \text{ MVA}$$

4.1.4 Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí s fiktivními převody transformátorů

Oproti předchozím postupu výpočtu jsou zde pro přepočítání impedancí mezi napěťovými hladinami použity fiktivní převody transformátorů, zbytek postupu je totožný. Ve zde uvažované síti tím bude ovlivněna jen zkratová impedance elektrizační soustavy 22 kV.

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 4 Zkratové impedance prvků průmyslové sítě 0,4 kV pro výpočet bez korekčních součinitelů a s fiktivními převody transformátorů

prvek	značení impedance	R [Ω]	X [Ω]
T1, T3 nekorigovaná Z	Z_{T1}, Z_{T3}	$1,8522 \cdot 10^{-3}$	$1,0421 \cdot 10^{-2}$
soustava 22 kV	Z_Q	$6,1746 \cdot 10^{-5}$	$3,8603 \cdot 10^{-4}$
kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32	Z_V	$1,6735 \cdot 10^{-2}$	$8,1000 \cdot 10^{-3}$
M1, M4	Z_{M1}, Z_{M4}	$4,6675 \cdot 10^{-2}$	0,19448
M2, M5	Z_{M2}, Z_{M5}	$2,4352 \cdot 10^{-2}$	0,10147
M3, M6	Z_{M3}, Z_{M6}	$1,7503 \cdot 10^{-2}$	$7,2929 \cdot 10^{-2}$
M7, M8, M9	Z_{M7}, Z_{M8}, Z_{M9}	$1,4002 \cdot 10^{-2}$	$5,8343 \cdot 10^{-2}$

Zkrat v místě A

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (7,7017 \cdot 10^{-4} + j3,5333 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_k = 3,6163 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 70,2479 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,6692 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (7,1237 \cdot 10^{-3} + j7,4295 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_k = 1,0293 \cdot 10^{-2} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 24,6804 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 17,0991 \text{ MVA}$$

4.1.5 Výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitým převodem transformátorů

V tomto postupu výpočtu jsou použity namísto komplexních zkratových impedancí pouze reaktance. U elektrizačních soustav, transformátorů a asynchronních motorů jsou reaktance uvažovány rovné absolutním hodnotám impedancí ($R/X = 0$).

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 5 Zkratové impedance prvků průmyslové sítě 0,4 kV pro výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitými převody transformátorů

prvek	značení impedance	X [Ω]
T1, T3 nekorigovaná Z	X_{T1}, X_{T3}	$1,0584 \cdot 10^{-2}$
soustava 22 kV	X_Q	$4,312 \cdot 10^{-4}$
kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32	X_V	$8,100 \cdot 10^{-3}$
M1, M4	X_{M1}, X_{M4}	0,2
M2, M5	X_{M2}, X_{M5}	0,10435
M3, M6	X_{M3}, X_{M6}	0,075
M7, M8, M9	X_{M7}, X_{M8}, X_{M9}	0,06

Zkrat v místě A

Výsledná zkratová impedance

$$X_k = 3,6049 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 70,4689 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,8223 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B

Výsledná zkratová impedance

$$X_k = 6,9573 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 36,5131 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 25,297 \text{ MVA}$$

4.1.6 Výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 6 Zkratové impedance prvků průmyslové sítě 0,4 kV pro výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů

prvek	značení impedance	X [Ω]
T1, T3 nekorigovaná Z	X_{T1}, X_{T3}	$1,0584 \cdot 10^{-2}$
soustava 22 kV	X_Q	$3,9111 \cdot 10^{-4}$
kabelová vedení 11, 12, 21, 22, 31, 32	X_V	$8,100 \cdot 10^{-3}$
M1, M4	X_{M1}, X_{M4}	0,2
M2, M5	X_{M2}, X_{M5}	0,10435
M3, M6	X_{M3}, X_{M6}	0,075
M7, M8, M9	X_{M7}, X_{M8}, X_{M9}	0,06

Zkrat v místě A

Výsledná zkratová impedance

$$X_k = 3,589 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 70,782 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 49,0392 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B

Výsledná zkratová impedance

$$X_k = 6,9434 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 36,5867 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 25,348 \text{ MVA}$$

4.1.7 Porovnání výsledků

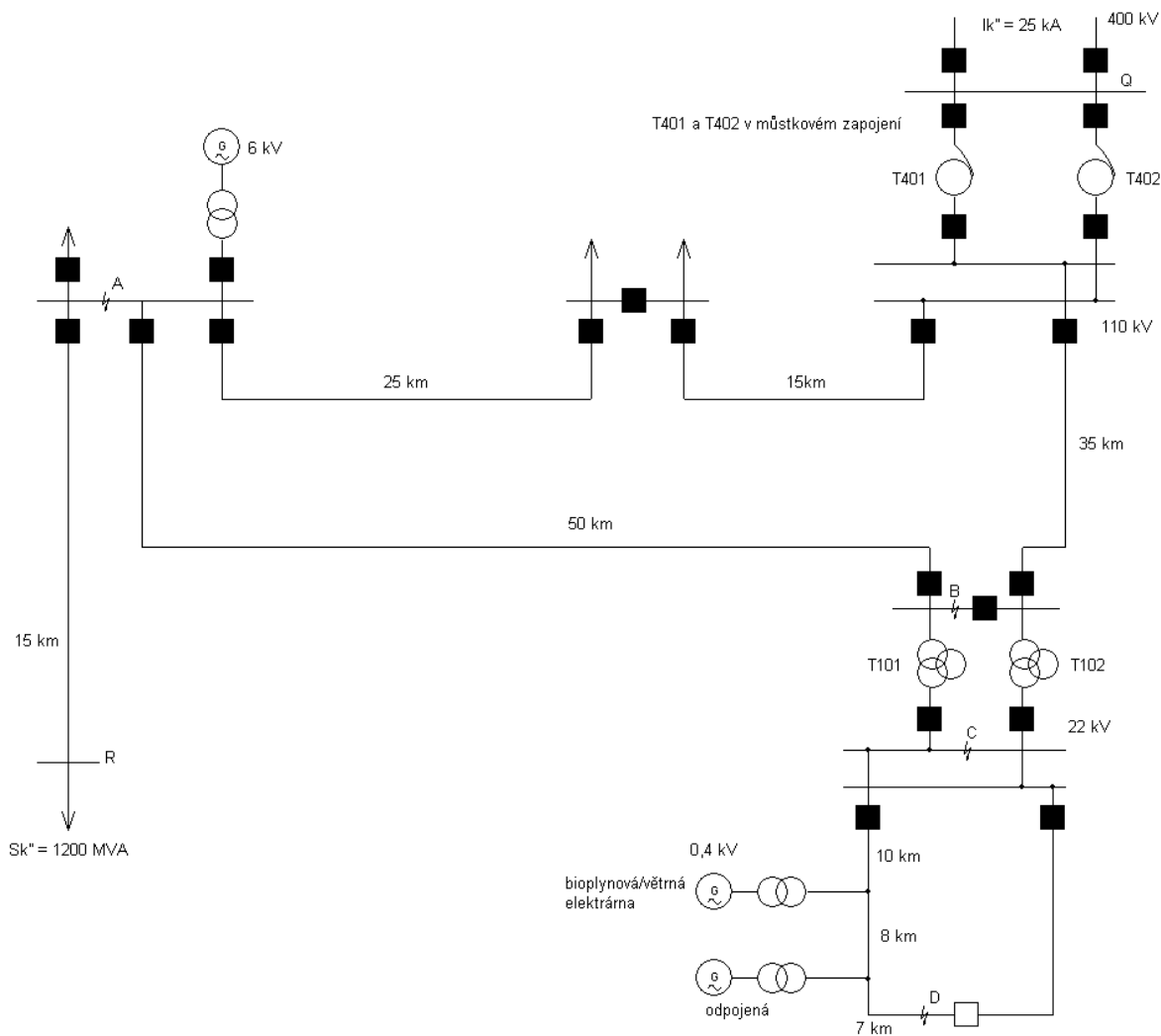
Tabulka 7 Výsledky výpočtů zkratových proudů v průmyslové síti 0,4 kV provedených s různými zjednodušeními

místo zkratu	metoda	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	odchylka [%]
A 0,4 kV	dle normy	69,5597	48,1924	+0,00
	R,X, jm. př, bez K	69,9350	48,4524	+0,54
	R,X, f. pře, bez K	70,2479	48,6692	+0,99
	jen X, jm. př, bez K	70,4689	48,8223	+1,31
	jen X, f. př, bez K	70,7820	49,0392	+1,76
B 0,4 kV	dle normy	24,6283	17,0630	+0,00
	R,X, jm. př, bez K	24,6570	17,0829	+0,12
	R,X, f. př, bez K	24,6804	17,0991	+0,21
	jen X, jm. př, bez K	36,5131	25,2970	+48,26
	jen X, f. př, bez K	36,5867	25,3480	+48,56

U zkratu v místě B vychází při zanedbání činných odporů zkratový proud téměř o polovinu vyšší, nežli při výpočtu dle normy, zatímco u zkratu v místě A není rozdíl výrazný. Příčinou je skutečnost, že v místě A je zkrat napájen z elektrizační soustavy jen přes transformátor, přičemž činný odpor obou těchto prvků je vůči jejich reaktanci zanedbatelný, zatímco v místě B je zkrat napájen přes kabelové vedení, u nějž činný odpor reaktanci převyšuje a nelze jej tudíž zanedbat.

4.2 Síťe 110 kV a 22 kV

4.2.1 Zadání



Obr. 10 Schéma sítí 110 kV a 22 kV

Spínač v bodě D je rozpojen.

Vlastnosti prvků sítě:

Elektrizační soustava 400 kV

$$I_k'' = 25 \text{ kA}$$

$$U_n = 400 \text{ kV}$$

$$c = 1,05$$

$$X/Z = 0,995$$

$$R/X = 0,1$$

Elektrizační soustava 110kV

$$S_k'' = 1200 \text{ MVA}$$

$$U_n = 110 \text{ kV}$$

$$c = 1,1$$

Transformátory T401, T402

S_{rT}	= 350 MVA
U_{rTHV}	= 400 kV
U_{rTLV}	= 121 kV
u_{kr}	= 14 %
P_{krT}	= 550 kW

Transformátory T101, T102

S_{rT}	= 40 MVA
U_{rTHV}	= 110 kV
U_{rTLV}	= 23 kV
u_{kr}	= 11 %
P_{krT}	= 150 kW

Vedení 110 kV venkovní

typ vodičů: AlFe6

q_n	= 185 mm ²
R_L	= 0,16 Ω/km
X_L	= 0,41 Ω/km

Vedení 22 kV, 10 km venkovní

typ vodičů: AlFe6

q_n	= 120 mm ²
R_L	= 0,26 Ω/km
X_L	= 0,37 Ω/km
l	= 10 km

Vedení 22 kV, 8 km venkovní

typ vodičů: AlFe6

q_n	= 95 mm ²
R_L	= 0,3 Ω/km
X_L	= 0,37 Ω/km
l	= 8 km

Vedení 22 kV, 7 km venkovní

typ vodičů: AlFe6

q_n	= 70 mm ²
R_L	= 0,41 Ω/km
X_L	= 0,38 Ω/km
l	= 7 km

Vedení 22 kV, 10 km kabelové

q_n	= 120 mm ²
R_L	= 0,253 Ω/km
X_L	= 0,126 Ω/km
l	= 10 km

Vedení 22 kV, 8 km kabelové

q_n	= 95 mm ²
R_L	= 0,32 Ω/km
X_L	= 0,132 Ω/km
l	= 8 km

Vedení 22 kV, 7 km kabelové

$$q_n = 70 \text{ mm}^2$$

$$R_L = 0,443 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_L = 0,138 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$l = 7 \text{ km}$$

Elektrárenský blok 6 kV

generátor:

$$S_{rG} = 35 \text{ MVA}$$
$$U_{rG} = 6,3 \text{ kV}$$
$$U_n = 6 \text{ kV}$$
$$x_d'' = 12 \%$$
$$R/X = 0,07$$
$$\cos\varphi_{rG} = 0,95$$

transformátor: s přepínačem odboček pod zatížením

$$S_{rT} = 40 \text{ MVA}$$
$$U_{rTHV} = 110 \text{ kV}$$
$$U_{rTLV} = 6,3 \text{ kV}$$
$$u_{kr} = 11 \%$$
$$P_{krT} = 200 \text{ kW}$$

Elektrárenský blok 0,4 kV

synchr. generátor (bioplynová elektrárna):

$$S_{rG} = 1 \text{ MVA}$$
$$U_{rG} = 0,42 \text{ kV}$$
$$U_n = 0,4 \text{ kV}$$
$$x_d'' = 12 \%$$
$$R/X = 0,15$$
$$\cos\varphi_{rG} = 0,95$$

asynch. generátor (větrná elektrárna):

$$S_{rG} = 1 \text{ MVA}$$
$$U_{rG} = 0,42 \text{ kV}$$
$$U_n = 0,4 \text{ kV}$$
$$I_{LR}/I_{rG} = 5$$
$$R_G/X_G = 0,15$$

transformátor: bez přepínače odboček pod zatížením ($\rho_G = 0, \rho_T = 0$)

$$S_{rT} = 1 \text{ MVA}$$
$$U_{rTHV} = 22 \text{ kV}$$
$$U_{rTLV} = 0,42 \text{ kV}$$
$$u_{kr} = 6 \%$$
$$P_{krT} = 9,6 \text{ kW}$$

4.2.2 Výpočet postupem dle normy (bez zjednodušení)

Zkratové impedance prvků sítě

Zkratové impedance zařízení jsou počítány na napěťové hladině, na níž je zařízení připojeno, u transformátorů na hladině nižšího napětí s výjimkou blokových transformátorů, kde je impedance počítána na hladině napětí připojené sítě. Je-li zařízení připojeno k jiné napěťové hladině, nežli k té, na níž jsou zkratové poměry počítány, je impedance přepočtena dle převodu příslušného transformátoru. V tomto příkladu jsou zkratové poměry počítány na hladině 110 kV u zkratů v bodech A, B a 22 kV u zkratů v bodech C, D.

Transformátory T401, T402 (hladina 110 kV)

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_{T401} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{14\%}{100\%} \cdot \frac{121^2}{350} \approx 5,8564 \Omega \quad (85)$$

Činný odpor transformátoru:

$$R_{T401} = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 550 \cdot 10^3 \frac{(121 \cdot 10^3)^2}{(350 \cdot 10^6)^2} \approx 6,5735 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (86)$$

Reaktance transformátoru:

$$X_{T401} = \sqrt{Z_{T401}^2 - R_{T401}^2} \approx \sqrt{5,8564^2 - (6,5735 \cdot 10^{-2})^2} \approx 5,8560 \Omega \quad (87)$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \approx \frac{5,8560}{\frac{121^2}{350}} \approx 0,13999 \quad (88)$$

Jmenovitý a fiktivní převod:

$$t_{r401} = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{400}{121} \approx 3,3058 \quad (89)$$

$$t_{f401} = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{400}{110} \approx 3,6364 \quad (90)$$

Korekční součinitel pro impedanci transformátoru:

$$K_{T401} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 x_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,13999} \approx 0,964027 \quad (91)$$

Korigovaný odpor a reaktance transformátoru

$$R_{TK401} = K_{T401} R_{T401} \approx 0,964027 \cdot 6,5735 \cdot 10^{-2} \approx 6,337 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (92)$$

$$X_{TK401} = K_{T401} X_{T401} \approx 0,964027 \cdot 5,8560 \approx 5,6454 \Omega \quad (93)$$

Transformátory T101, T102 (hladina 22 kV)

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_{T101} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11\%}{100\%} \cdot \frac{23^2}{40} \approx 1,4548 \Omega \quad (94)$$

Činný odpor transformátoru:

$$R_{T101} = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 150 \cdot 10^3 \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} \approx 4,9594 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (95)$$

Reaktance transformátoru:

$$X_{T101} = \sqrt{Z_{T101}^2 - R_{T101}^2} \approx \sqrt{1,4548^2 - (4,9594 \cdot 10^{-2})^2} \approx 1,4539 \Omega \quad (96)$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \approx \frac{1,4539}{\frac{23^2}{40}} \approx 0,10994 \quad (97)$$

Jmenovitý a fiktivní převod:

$$t_{r101} = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{110}{23} \approx 4,7826 \quad (98)$$

$$t_{f101} = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{110}{22} = 5 \quad (99)$$

Korekční součinitel pro impedanci transformátoru:

$$K_{T101} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 x_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,10994} \approx 0,980335 \quad (100)$$

Korigovaný odpor a reaktance transformátoru:

$$R_{TK101} = K_{T101} R_{T101} \approx 0,980335 \cdot 4,9594 \cdot 10^{-2} \approx 4,8619 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (101)$$

$$X_{TK101} = K_{T101} X_{T101} \approx 0,980335 \cdot 1,4539 \approx 1,4253 \Omega \quad (102)$$

Elektrizační soustava 400 kV (hladina 110 kV)

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_{Q(400kV)} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} I_k} = \frac{1,05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 25} \approx 9,6995 \Omega \quad (103)$$

Impedance přepočtená na hladinu 110 kV jmenovitým převodem T401:

$$Z_Q = \frac{Z_{Q(400kV)}}{t_{r401}^2} \approx \frac{9,6995}{3,3058^2} \approx 0,88756 \Omega \quad (104)$$

Reaktance a činný odpor stanovené dle zadaných hodnot $X = 0,995 Z$, $R = 0,1 X$:

$$X_Q = 0,995 Z_Q \approx 0,995 \cdot 0,88756 \approx 0,88313 \Omega \quad (105)$$

$$R_Q = 0,1 X_Q \approx 0,1 \cdot 0,88313 \approx 8,8313 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (106)$$

Elektrizační soustava 110 kV (hladina 110 kV)

Absolutní hodnota impedance:

$$Z_R = \frac{c U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{1200} \approx 11,0917 \Omega \quad (107)$$

Reaktance a činný odpor stanovené dle zadaných hodnot $X = 0,995 Z$, $R = 0,1 X$:

$$X_R = 0,995 Z_R \approx 0,995 \cdot 11,0917 \approx 11,0362 \Omega \quad (108)$$

$$R_R = 0,1 X_R \approx 0,1 \cdot 11,0362 \approx 1,1036 \Omega \quad (109)$$

Elektrárenský blok 6 kV (hladina 110 kV)

Absolutní hodnota impedance transformátoru:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{11\%}{100\%} \cdot \frac{110^2}{40} = 33,275 \Omega \quad (110)$$

Činný odpor transformátoru:

$$R_T = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 200 \cdot 10^3 \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 1,5125 \Omega \quad (111)$$

Reaktance transformátoru:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \approx \sqrt{33,275^2 - 1,5125^2} \approx 33,2406 \Omega \quad (112)$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \approx \frac{33,2406}{\frac{110^2}{40}} \approx 0,10989 \quad (113)$$

Jmenovitý a fiktivní převod:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{110}{6,3} \approx 17,4603 \quad (114)$$

$$t_f = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{110}{6} \approx 18,3333 \quad (115)$$

Reaktance generátoru:

$$X_d'' = x_d'' \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,12 \frac{6,3^2}{35} = 0,13608 \Omega \quad (116)$$

Činný odpor generátoru určený dle zadané hodnoty $R_G = 0,07X_d''$:

$$R_G = 0,07 X_d'' = 0,07 \cdot 0,13608 = 9,5256 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (117)$$

Korekční součinitel pro elektrárenský blok s přepínačem odboček pod zatížením:

$$K_{SI} = \frac{U_n^2}{U_{rG}^2} \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}} \approx \frac{110^2}{6,3^2} \frac{6,3^2}{110^2} \frac{1,1}{1 + |0,12 - 0,10989| \cdot \sin(\arccos 0,95)} \approx 1,096537 \quad (118)$$

Korigovaný odpor a reaktance elektrárenského bloku na hladině 110 kV:

$$R_{SI} = K_{SI} (R_T + t_r^2 R_G) \approx 1,096537 (1,5125 + 17,4603^2 \cdot 9,5256 \cdot 10^{-3}) \approx 4,8429 \Omega \quad (119)$$

$$X_{SI} = K_{SI} (X_T + t_r^2 X_d'') \approx 1,096537 (33,2406 + 17,4603^2 \cdot 0,13608) \approx 81,9402 \Omega \quad (120)$$

Elektrárenský blok 0,4 kV (hladina 22 kV)

Absolutní hodnota impedance transformátoru:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6\%}{100\%} \cdot \frac{22^2}{1} = 29,04 \Omega \quad (121)$$

Činný odpor transformátoru:

$$R_T = P_{krT} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 9,6 \cdot 10^3 \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{(10^6)^2} = 4,6464 \Omega \quad (122)$$

Reaktance transformátoru:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \approx \sqrt{29,04^2 - 4,6464^2} \approx 28,6659 \Omega \quad (123)$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \approx \frac{28,6659}{\frac{22^2}{1}} \approx 5,9227 \cdot 10^{-2} \quad (124)$$

Jmenovitý a fiktivní převod:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{22}{0,42} \approx 52,381 \quad (125)$$

$$t_f = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = \frac{22}{0,4} = 55 \quad (126)$$

Korekční součinitel pro impedanci transformátoru (pro provoz s asynchronním generátorem):

$$K_{TSO2} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 5,9227 \cdot 10^{-2}} \approx 1,009139 \quad (127)$$

Reaktance synchronního generátoru:

$$X_d'' = x_d'' \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,12 \frac{0,42^2}{1} = 2,1168 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (128)$$

Činný odpor synchronního generátoru určený dle zadané hodnoty $R_G = 0,15X_d''$:

$$R_{SG} = 0,15 X_d'' = 0,15 \cdot 2,1168 \cdot 10^{-2} = 3,1752 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (129)$$

Korekční součinitel pro elektrárenský blok bez přepínače odboček pod zatížením (pro provoz se synchronním generátorem):

$$K_{SO2} = \frac{U_n}{U_{rG}(1+\rho_G)} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} (1 \pm \rho_T) \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \approx$$

$$\approx \frac{22}{0,42(1+0)} \frac{0,42}{22} (1+0) \frac{1,1}{1+0,12 \sin(\arccos 0,95)} \approx 1,060272 \quad (130)$$

Korigovaný odpor a reaktance elektrárenského bloku se synchronním generátorem na hladině 22 kV:

$$R_{SO2} = K_{SO2} (R_T + t_r^2 R_{SG}) \approx 1,060272 (4,6464 + 52,381^2 \cdot 3,1752 \cdot 10^{-3}) \approx$$

$$\approx 14,1635 \Omega \quad (131)$$

$$X_{SO2} = K_{SO2} (X_T + t_r^2 X_d'') \approx 1,060272 (28,6659 + 52,381^2 \cdot 2,1168 \cdot 10^{-2}) \approx$$

$$\approx 91,9742 \Omega \quad (132)$$

Absolutní hodnota impedance asynchronního generátoru

$$Z_{AG} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rG}}} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{1}{5} \frac{0,42^2}{1} = 3,528 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (133)$$

Reaktance asynchronního generátoru:

$$X_{AG} = \frac{Z_{AG}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{AG}}{X_{AG}}\right)^2}} = \frac{3,528 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{1 + 0,15^2}} \approx 3,489 \cdot 10^{-2} \Omega \quad (134)$$

Činný odpor asynchronního generátoru:

$$R_{AG} = \frac{R_G}{X_G} X_{AG} \approx 0,15 \cdot 3,489 \cdot 10^{-2} \approx 5,2335 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (135)$$

Odpor a reaktance asynchronního generátoru s transformátorem na hladině 22 kV:

$$R_{SO2AG} = K_{TSO2} R_T + t_r^2 R_{AG} \approx 1,009139 \cdot 4,6464 + 52,381^2 \cdot 5,2335 \cdot 10^{-3} \approx 19,0482 \Omega \quad (136)$$

$$X_{SO2AG} = K_{TSO2} X_T + t_r^2 X \approx 1,009139 \cdot 28,6659 + 52,381^2 \cdot 3,489 \cdot 10^{-2} \approx 124,6569 \Omega \quad (137)$$

Vedení v síti 110 kV (hladina 110 kV)

Činný odpor a reaktance:

$$R_{V50km} = R_L \cdot l = 0,16 \cdot 50 = 8 \Omega \quad (138)$$

$$X_{V50km} = X_L \cdot l = 0,41 \cdot 50 = 20,5 \Omega \quad (139)$$

$$R_{V35km} = R_L \cdot l = 0,16 \cdot 35 = 5,6 \Omega \quad (140)$$

$$X_{V35km} = X_L \cdot l = 0,41 \cdot 35 = 14,35 \Omega \quad (141)$$

$$R_{V25km} = R_L \cdot l = 0,16 \cdot 25 = 4 \Omega \quad (142)$$

$$X_{V25km} = X_L \cdot l = 0,41 \cdot 25 = 10,25 \Omega \quad (143)$$

$$R_{V15km} = R_L \cdot l = 0,16 \cdot 15 = 2,4 \Omega \quad (144)$$

$$X_{V15km} = X_L \cdot l = 0,41 \cdot 15 = 6,15 \Omega \quad (145)$$

Vedení v síti 22 kV venkovní (hladina 22 kV)

Činný odpor a reaktance:

$$R_{V10km} = R_L \cdot l = 0,26 \cdot 10 = 2,6 \Omega \quad (146)$$

$$X_{V10km} = X_L \cdot l = 0,37 \cdot 10 = 3,7 \Omega \quad (147)$$

$$R_{V8km} = R_L \cdot l = 0,3 \cdot 8 = 2,4 \Omega \quad (148)$$

$$X_{V8km} = X_L \cdot l = 0,37 \cdot 8 = 2,96 \Omega \quad (149)$$

$$R_{V7km} = R_L \cdot l = 0,41 \cdot 7 = 2,87 \Omega \quad (150)$$

$$X_{V7km} = X_L \cdot l = 0,38 \cdot 7 = 2,66 \Omega \quad (151)$$

Vedení v síti 22 kV kabelové (hladina 22 kV)

Činný odpor a reaktance:

$$R_{VK10km} = R_L \cdot l = 0,253 \cdot 10 = 2,53 \Omega \quad (152)$$

$$X_{VK10km} = X_L \cdot l = 0,126 \cdot 10 = 1,26 \Omega \quad (153)$$

$$R_{VK8km} = R_L \cdot l = 0,32 \cdot 8 = 2,56 \Omega \quad (154)$$

$$X_{VK8km} = X_L \cdot l = 0,132 \cdot 8 = 1,056 \Omega \quad (155)$$

$$R_{VK7km} = R_L \cdot l = 0,443 \cdot 7 = 3,101 \Omega \quad (156)$$

$$X_{VK7km} = X_L \cdot l = 0,138 \cdot 7 = 0,966 \Omega \quad (157)$$

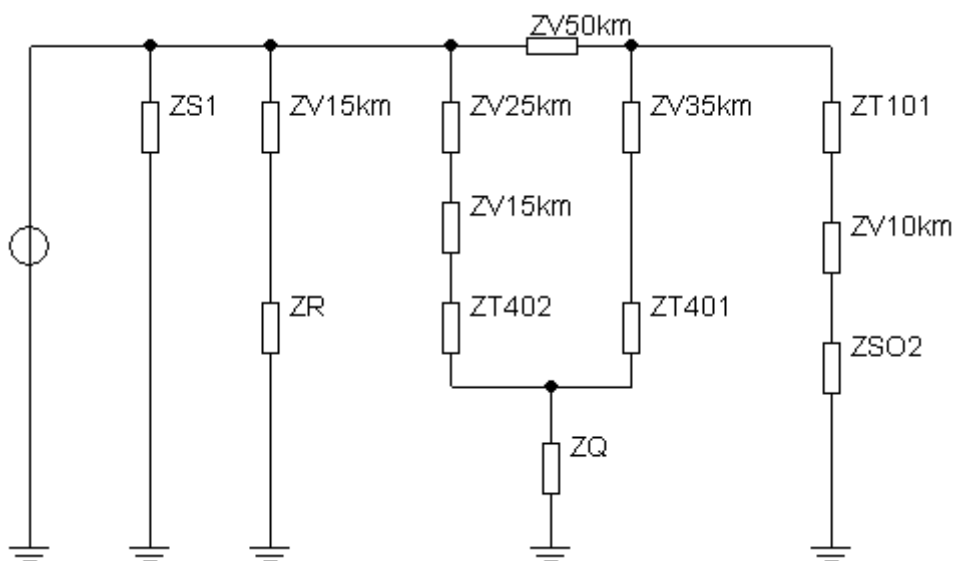
Zkratové impedance všech prvků sítě

Tabulka 8 Zkratové impedance prvků sítě 110 kV a 22 kV pro výpočet dle normy

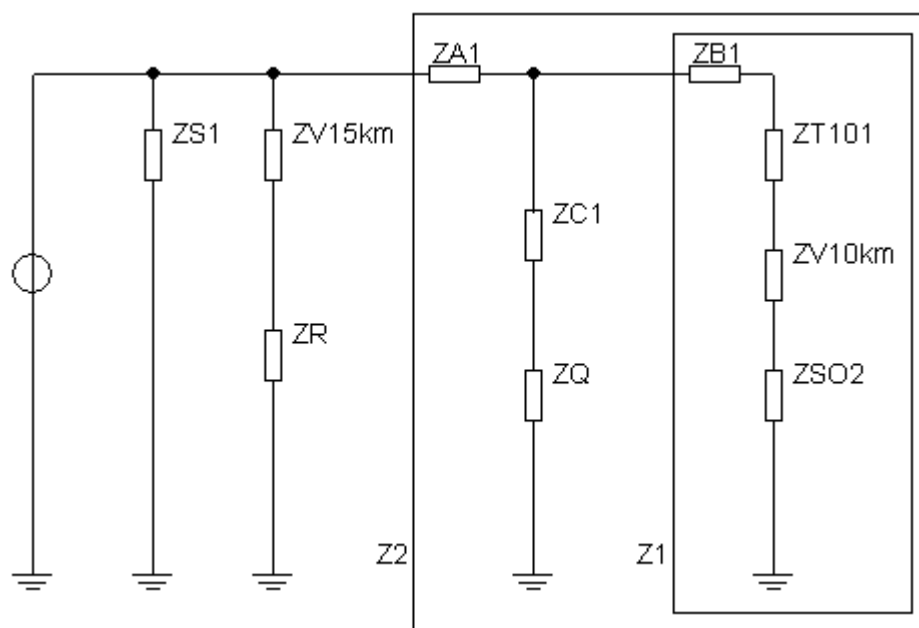
prvek	značení impedance	R [Ω] (110 kV)	X [Ω] (110 kV)	R [Ω] (22 kV)	X [Ω] (22 kV)
T401, T402 korigovaná Z	Z_{TK401}, Z_{TK402}	$6,3370 \cdot 10^{-2}$	5,6454	$2,7705 \cdot 10^{-3}$	0,24681
T101, T102 korigovaná Z	Z_{TK101}, Z_{TK102}	1,1121	32,6017	$4,8612 \cdot 10^{-2}$	1,4253
soustava 400 kV	Z_Q	$8,8313 \cdot 10^{-2}$	0,88313	$3,8609 \cdot 10^{-3}$	$3,8609 \cdot 10^{-2}$
soustava 110 kV	Z_R	1,1036	11,0362	$4,8249 \cdot 10^{-2}$	0,48249
el. blok 6 kV korigovaná Z	Z_{S1}	4,8429	81,9402	0,21172	3,5823
el. blok 0,4 kV synchronní gen. korigovaná Z	Z_{SO2}	323,9674	2103,7576	14,1635	91,9742
el. blok 0,4 kV asynchronní gen. korigovaná Z	Z_{SO2AG}	435,6965	2851,3203	19,0482	124,6569
vedení 110 kV, 50 km	Z_{V50km}	8,00	20,5	0,34975	0,89624
vedení 110 kV, 35 km	Z_{V35km}	5,60	14,35	0,24483	0,62737
vedení 110 kV, 25 km	Z_{V25km}	4,00	10,25	0,17488	0,44812
vedení 110 kV, 15 km	Z_{V15km}	2,40	6,15	0,10493	0,26887
vedení 22 kV, 10 km venkovní	Z_{V10km}	59,4707	84,6314	2,60	3,70
vedení 22 kV, 8 km venkovní	Z_{V8km}	54,8960	67,7051	2,40	2,96
vedení 22 kV, 7 km venkovní	Z_{V7km}	65,6465	60,8431	2,87	2,66
vedení 22 kV, 10 km kabelové	Z_{VK10km}	57,8696	28,8204	2,53	1,26
vedení 22 kV, 8 km kabelové	Z_{VK8km}	58,5558	24,1543	2,56	1,0560
vedení 22 kV, 7 km kabelové	Z_{VK7km}	70,9302	22,0956	3,1010	0,9660

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Náhradní schéma



Obr. 11 Náhradní schéma pro zkrat v místě A v síti 110 kV



Obr. 12 Náhradní schéma pro zkrat v místě A v síti 110 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Součet impedancí \bar{Z}_{V50km} , \bar{Z}_{V35km} , \bar{Z}_{V25km} , \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_{TK401} , \bar{Z}_{TK402} tvořících trojúhelník:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{D1} &= \bar{Z}_{V50km} + \bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK401} + \bar{Z}_{TK402} \approx \\ &\approx (8 + j20,5) + (5,6 + j14,35) + (4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + \\ &+ 2(6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454) \approx (20,1267 + j62,5407) \Omega \end{aligned} \quad (158)$$

Impedance \bar{Z}_{A1} , \bar{Z}_{B1} , \bar{Z}_{C1} získané transfigurací trojúhelníku:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{A1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx (159) \\ &\approx (2,6089 + j7,239) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{B1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx (160) \\ &\approx (2,2998 + j6,5699) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1} &= \frac{(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx [(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)] \cdot \\ &\cdot \frac{(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)}{20,1267 + j62,5407} \approx (161) \\ &\approx (1,7968 + j7,0412) \Omega\end{aligned}$$

Sériové spojení \bar{Z}_{B1} , \bar{Z}_{TK101} , \bar{Z}_{V10km} , \bar{Z}_{SO2} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \bar{Z}_{B1} + \bar{Z}_{TK101} + \bar{Z}_{V10km} + \bar{Z}_{SO2} \approx \\ &\approx (2,2998 + j6,5699) + (1,1121 + j32,6017) + (59,4707 + j84,6314) + \\ &+ (323,9674 + j2103,7576) \approx (386,85 + j2227,5605) \Omega\end{aligned} \quad (162)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{C1} , \bar{Z}_Q :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1,Q} &= \bar{Z}_{C1} + \bar{Z}_Q \approx (1,7968 + j7,0412) + (8,8313 \cdot 10^{-2} + j0,88313) \approx \\ &\approx (1,8851 + j7,9244) \Omega\end{aligned} \quad (163)$$

Paralelní spojení \bar{Z}_1 , $\bar{Z}_{C1,Q}$, v sérii s \bar{Z}_{A1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_2 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_{C1,Q}}} + \bar{Z}_{A1} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{386,85 + j2227,5605} + \frac{1}{1,8851 + j7,9244}} + 2,6089 + j7,239 \approx (164) \\ &\approx (4,4855 + j15,1354) \Omega\end{aligned}$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_R :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V15km,R} &= \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_R \approx (2,4 + j6,15) + (1,1036 + j11,0360) \approx \\ &\approx (3,5036 + j17,1862) \Omega\end{aligned}\quad (165)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení \bar{Z}_2 , $\bar{Z}_{V15km,R}$, \bar{Z}_{S1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_2} + \frac{1}{\bar{Z}_{V15km,R}} + \frac{1}{\bar{Z}_{S1}}} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{4,4855 + j15,1354} + \frac{1}{3,5036 + j17,1862} + \frac{1}{4,8429 + j81,9402}} \approx \\ &\approx (1,7218 + j7,3637) \Omega\end{aligned}\quad (166)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{1,7218^2 + 7,3637^2} \approx 7,5623 \Omega \quad (167)$$

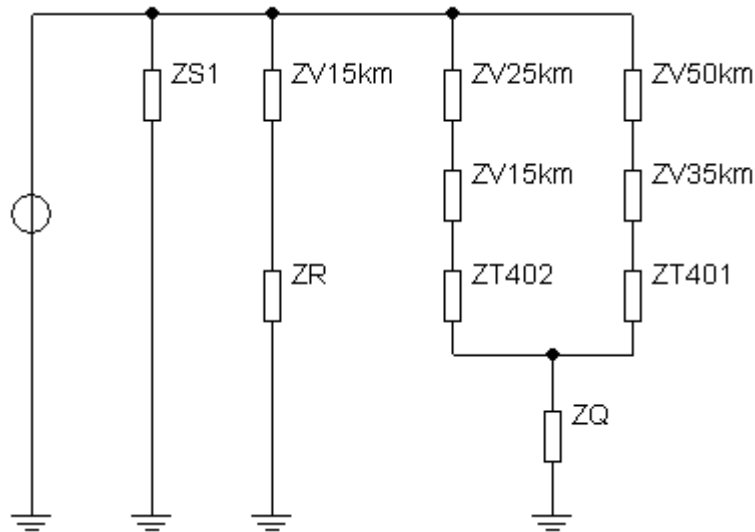
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 7,5623} \approx 9,2379 \text{ kA} \quad (168)$$

$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110^2}{7,5623} \approx 1760,0474 \text{ MVA} \quad (169)$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Náhradní schéma



Obr. 13 Náhradní schéma pro zkrat v místě A v síti 110 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledná zkratová impedance

Sériové spojení \bar{Z}_{V25km} , \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_{T402} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V25km, V15km, T402} &= \bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{T402} \approx \\ &\approx (4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454) \approx \\ &\approx (6,4634 + j22,0454) \Omega\end{aligned}\quad (170)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V50km} , \bar{Z}_{V35km} , \bar{Z}_{T401} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V50km, V35km, T401} &= \bar{Z}_{V50km} + \bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{T401} \approx \\ &\approx (8 + j20,5) + (5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454) \approx \\ &\approx (13,6634 + j40,4954) \Omega\end{aligned}\quad (171)$$

Paralelní spojení $\bar{Z}_{V25km, V15km, T402}$ a $\bar{Z}_{V50km, V35km, T401}$, v sérii s \bar{Z}_Q :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{V25km, V15km, T402}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V50km, V35km, T401}}} + \bar{Z}_Q \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{6,4634 + j22,0454} + \frac{1}{13,6634 + j40,4954}} + \\ &+ 8,8313 \cdot 10^{-2} + j0,88313 \approx (4,494 + j15,1634) \Omega\end{aligned}\quad (172)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_R :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V15km,R} &= \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_R \approx (2,4 + j6,15) + (1,1036 + j11,0360) \approx \\ &\approx (3,5036 + j17,1862) \Omega\end{aligned}\quad (173)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení \bar{Z}_1 , $\bar{Z}_{V15km,R}$, \bar{Z}_{S1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_{V15km,R}} + \frac{1}{\bar{Z}_{S1}}} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{4,494 + j15,1634} + \frac{1}{3,5036 + j17,1862} + \frac{1}{4,8429 + j81,9402}} \approx \\ &\approx (1,723 + j7,3703) \Omega\end{aligned}\quad (174)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{1,723^2 + 7,3703^2} \approx 7,569 \Omega \quad (175)$$

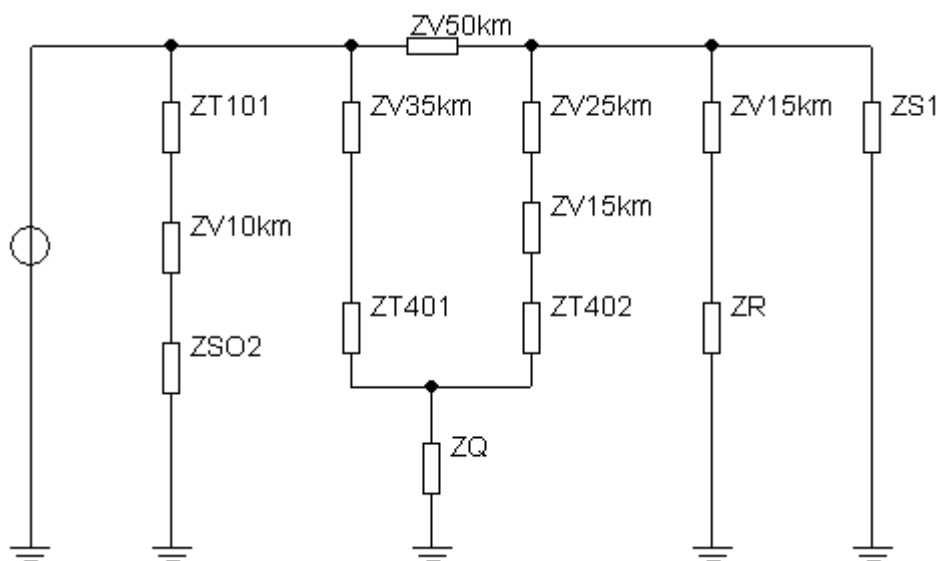
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 7,569} \approx 9,2297 \text{ kA} \quad (176)$$

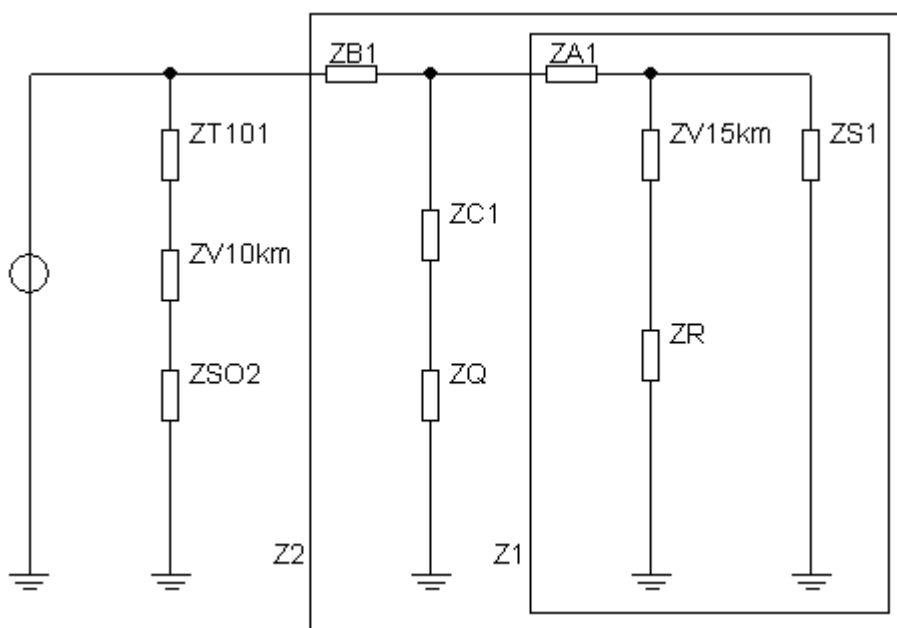
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110^2}{7,569} \approx 1758,4906 \text{ MVA} \quad (177)$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Náhradní schéma



Obr. 14 Náhradní schéma pro zkrat v místě B v síti 110 kV



Obr. 15 Náhradní schéma pro zkrat v místě B v síti 110 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Součet impedancí \bar{Z}_{V50km} , \bar{Z}_{V35km} , \bar{Z}_{V25km} , \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_{TK401} , \bar{Z}_{TK402} tvořících trojúhelník:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{D1} &= \bar{Z}_{V50km} + \bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK401} + \bar{Z}_{TK402} \approx \\ &\approx (8 + j20,5) + (5,6 + j14,35) + (4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + \\ &+ 2(6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454) \approx (20,1267 + j62,5407) \Omega \end{aligned} \quad (178)$$

Impedance \bar{Z}_{A1} , \bar{Z}_{B1} , \bar{Z}_{C1} získané transfigurací trojúhelníku:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{A1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx \\ &\approx (2,6089 + j7,239) \Omega\end{aligned}\quad (179)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{B1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx \\ &\approx (2,2998 + j6,5699) \Omega\end{aligned}\quad (180)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1} &= \frac{(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx [(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)] \cdot \\ &\cdot \frac{(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)}{20,1267 + j62,5407} \approx (1,7968 + j7,0412) \Omega\end{aligned}\quad (181)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_R :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V15km,R} &= \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_R \approx (2,4 + j6,15) + (1,1036 + j11,0360) \approx \\ &\approx (3,5036 + j17,1862) \Omega\end{aligned}\quad (182)$$

Paralelní spojení \bar{Z}_{S1} a $\bar{Z}_{V15km,R}$, v sérii s \bar{Z}_{A1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{V15km,R}} + \frac{1}{\bar{Z}_{S1}}} + \bar{Z}_{A1} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{3,5036 + j17,1862} + \frac{1}{4,8429 + j81,9402}} + 2,6089 + j7,239 \approx \\ &\approx (5,145 + j21,4879) \Omega\end{aligned}\quad (183)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{C1} , \bar{Z}_Q :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1,Q} &= \bar{Z}_{C1} + \bar{Z}_Q \approx (1,7968 + j7,0412) + (8,8313 \cdot 10^{-2} + j0,88313) \approx \\ &\approx (1,8851 + j7,9244) \Omega\end{aligned}\quad (184)$$

Paralelní spojení $\bar{Z}_1, \bar{Z}_{Cl,Q}$, v sérii s \bar{Z}_{B1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_2 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_{Cl,Q}}} + \bar{Z}_{B1} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{5,145 + j21,4879} + \frac{1}{1,8851 + j7,9244}} + 2,2998 + j6,5699 \approx \\ &\approx (3,6794 + j12,3592) \Omega\end{aligned}\quad (185)$$

Sériové spojení $\bar{Z}_{TK101}, \bar{Z}_{V10km}, \bar{Z}_{SO2}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{TK101, V10km, SO2} &= \bar{Z}_{TK101} + \bar{Z}_{V10km} + \bar{Z}_{SO2} \approx \\ &\approx (1,1121 + j32,6017) + (59,4707 + j84,6314) + \\ &+ (323,9674 + j2103,7576) \approx (384,5501 + j2220,9906) \Omega\end{aligned}\quad (186)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení $\bar{Z}_2, \bar{Z}_{TK101, V10km, SO2}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_2} + \frac{1}{\bar{Z}_{TK101, V10km, SO2}}} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{3,6794 + j12,3592} + \frac{1}{384,5501 + j2220,9906}} \approx \\ &\approx (3,6504 + j12,2919) \Omega\end{aligned}\quad (187)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{3,6504^2 + 12,2919^2} \approx 12,8225 \Omega \quad (188)$$

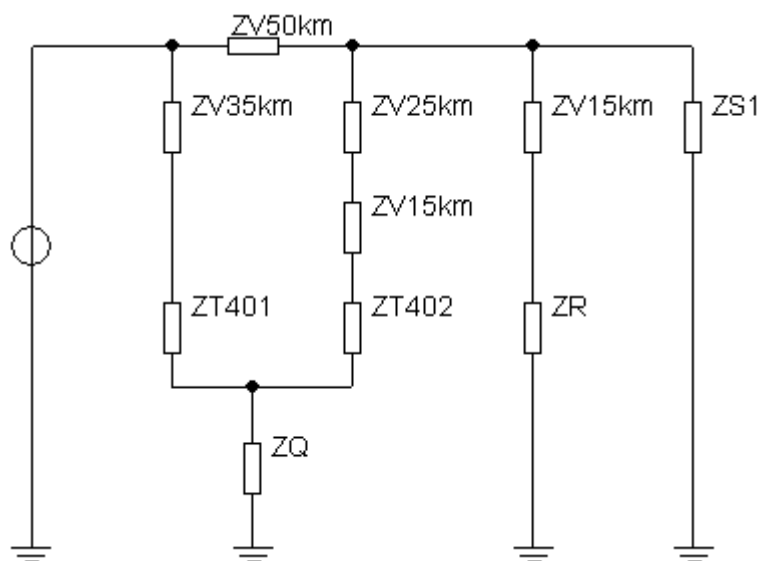
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 12,8225} \approx 5,4482 \text{ kA} \quad (189)$$

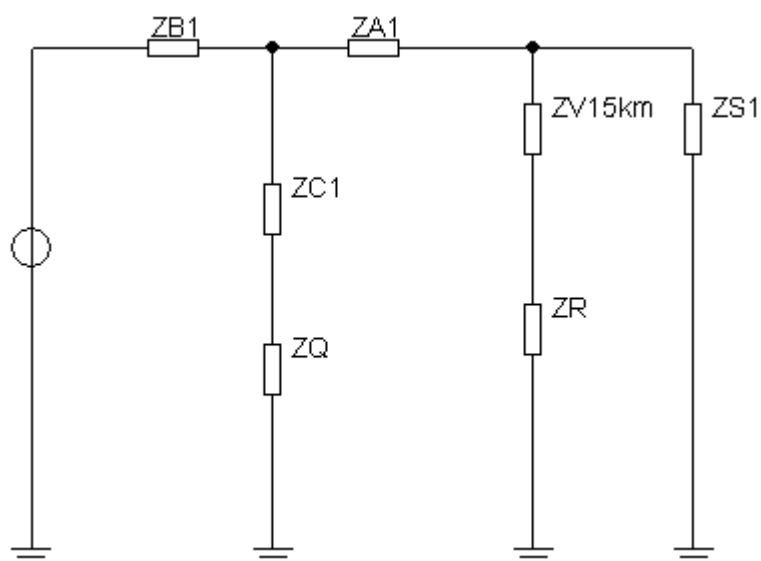
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110^2}{12,8225} \approx 1038,0225 \text{ MVA} \quad (190)$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Náhradní schéma



Obr. 16 Náhradní schéma pro zkrat v místě B v síti 110 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV



Obr. 17 Náhradní schéma pro zkrat v místě B v síti 110 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Součet impedancí \bar{Z}_{V50km} , \bar{Z}_{V35km} , \bar{Z}_{V25km} , \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_{TK401} , \bar{Z}_{TK402} tvořících trojúhelník:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{D1} &= \bar{Z}_{V50km} + \bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK401} + \bar{Z}_{TK402} \approx \\ &\approx (8 + j20,5) + (5,6 + j14,35) + (4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + \\ &+ 2(6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454) \approx (20,1267 + j62,5407) \Omega \end{aligned} \quad (191)$$

Impedance \bar{Z}_{A1} , \bar{Z}_{B1} , \bar{Z}_{C1} získané transfigurací trojúhelníku:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{A1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx (192) \\ &\approx (2,6089 + j7,239) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{B1} &= \frac{\bar{Z}_{V50km}(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx \frac{(8 + j20,5)[(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)]}{20,1267 + j62,5407} \approx (193) \\ &\approx (2,2998 + j6,5699) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1} &= \frac{(\bar{Z}_{V25km} + \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_{TK402})(\bar{Z}_{V35km} + \bar{Z}_{TK401})}{\bar{Z}_{D1}} \approx \\ &\approx [(4 + j10,25) + (2,4 + j6,15) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)] \cdot \\ &\cdot \frac{(5,6 + j14,35) + (6,337 \cdot 10^{-2} + j5,6454)}{20,1267 + j62,5407} \approx (194) \\ &\approx (1,7968 + j7,0412) \Omega\end{aligned}$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V15km} , \bar{Z}_R :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V15km,R} &= \bar{Z}_{V15km} + \bar{Z}_R \approx (2,4 + j6,15) + (1,1036 + j11,0360) \approx \\ &\approx (3,5036 + j17,1862) \Omega\end{aligned} \quad (195)$$

Paralelní spojení \bar{Z}_{S1} a $\bar{Z}_{V15km,R}$, v sérii s \bar{Z}_{A1} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{V15km,R}} + \frac{1}{\bar{Z}_{S1}}} + \bar{Z}_{A1} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{3,5036 + j17,1862} + \frac{1}{4,8429 + j81,9402}} + 2,6089 + j7,239 \approx (196) \\ &\approx (5,145 + j21,4879) \Omega\end{aligned}$$

Sériové spojení \bar{Z}_{C1} , \bar{Z}_Q :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{C1,Q} &= \bar{Z}_{C1} + \bar{Z}_Q \approx (1,7968 + j7,0412) + (8,8313 \cdot 10^{-2} + j0,88313) \approx \\ &\approx (1,8851 + j7,9244) \Omega\end{aligned} \quad (197)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení $\bar{Z}_1, \bar{Z}_{Cl,Q}$, v sérii s \bar{Z}_{BI} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_1} + \frac{1}{\bar{Z}_{Cl,Q}}} + \bar{Z}_{BI} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{5,145 + j21,4879} + \frac{1}{1,8851 + j7,9244}} + 2,2998 + j6,5699 \approx \\ &\approx (3,6794 + j12,3592) \Omega\end{aligned}\quad (198)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{3,6794^2 + 12,3592^2} \approx 12,8953 \Omega \quad (199)$$

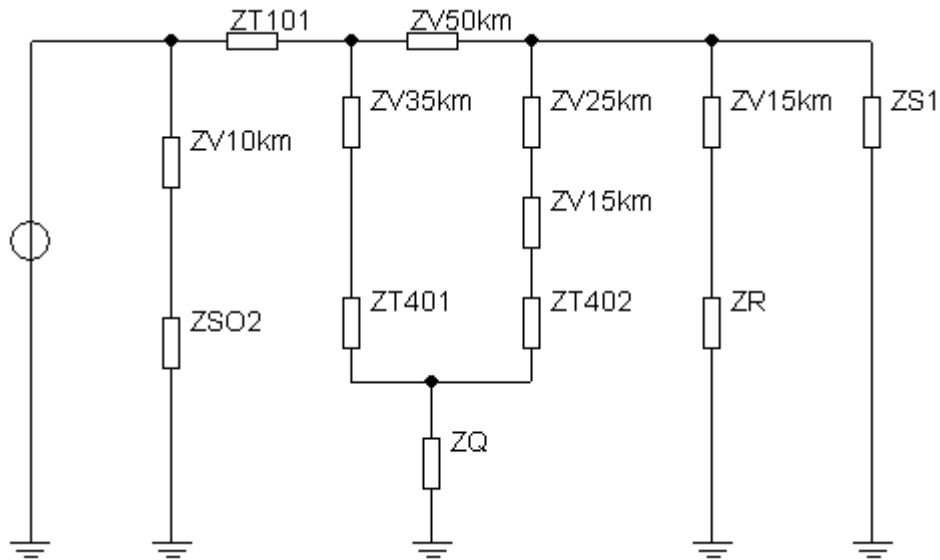
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 12,8953} \approx 5,4174 \text{ kA} \quad (200)$$

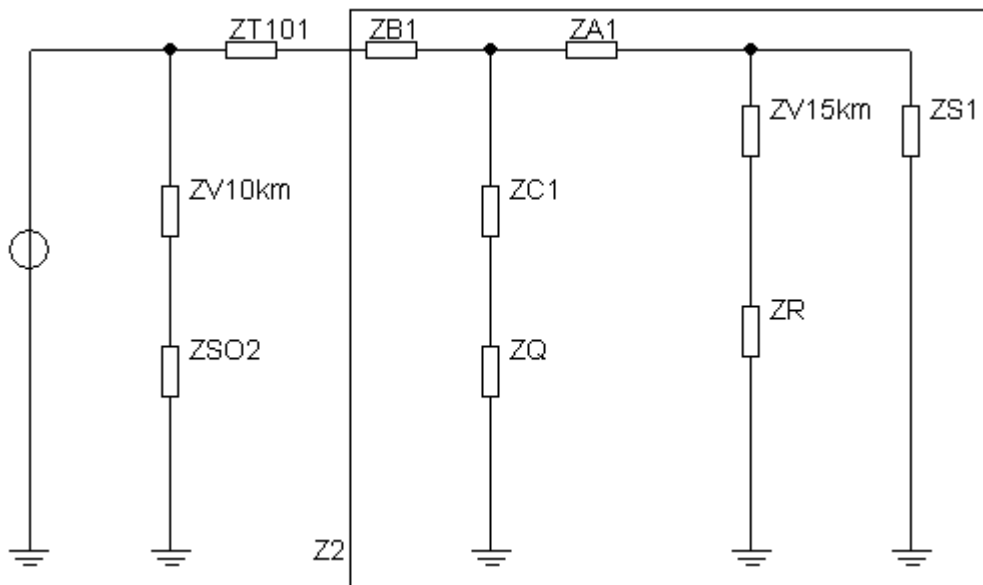
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 110^2}{12,8953} \approx 1032,1583 \text{ MVA} \quad (201)$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Náhradní schéma



Obr. 18 Náhradní schéma pro zkrat v místě C v síti 22 kV



Obr. 19 Náhradní schéma pro zkrat v místě C v síti 22 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Impedance části náhradního schématu za transformátorem T101 je shodná s impedancí \bar{Z}_2 z výpočtu zkratu v bodě B přepočtenou na hladinu 22 kV.

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{2(110kV)}}{t_{r101}^2} \approx \frac{3,6794 + j12,3592}{4,7826^2} \approx (0,16086 + j0,54033) \Omega \quad (202)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{TK101} , \bar{Z}_2 :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{2,TK101} &= \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{TK101} \approx (0,16086 + j0,54033) + (4,8612 \cdot 10^{-2} + j1,4253) \approx \\ &\approx (0,20948 + j1,9656) \Omega\end{aligned}\quad (203)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V10km} , \bar{Z}_{SO2} :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{V10km,SO2} &= \bar{Z}_{V10km} + \bar{Z}_{SO2} \approx (2,6 + j3,7) + (14,1635 + j91,9742) \approx \\ &\approx (16,7635 + j95,6742) \Omega\end{aligned}\quad (204)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení $\bar{Z}_{2,TK101}$ a $\bar{Z}_{V10km,SO2}$:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{2,TK101}} + \frac{1}{\bar{Z}_{V10km,SO2}}} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{0,20948 + j1,9656} + \frac{1}{16,7635 + j95,6742}} \approx (0,2079 + j1,9262) \Omega\end{aligned}\quad (205)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt[2]{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt[2]{0,2079^2 + 1,9262^2} \approx 1,9374 \Omega \quad (206)$$

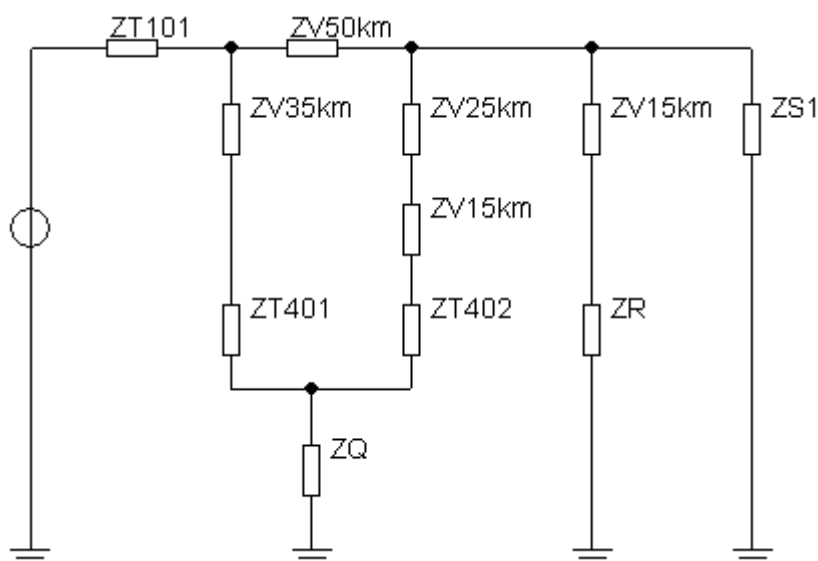
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt[2]{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt[2]{3} \cdot 1,9374} \approx 7,2115 \text{ kA} \quad (207)$$

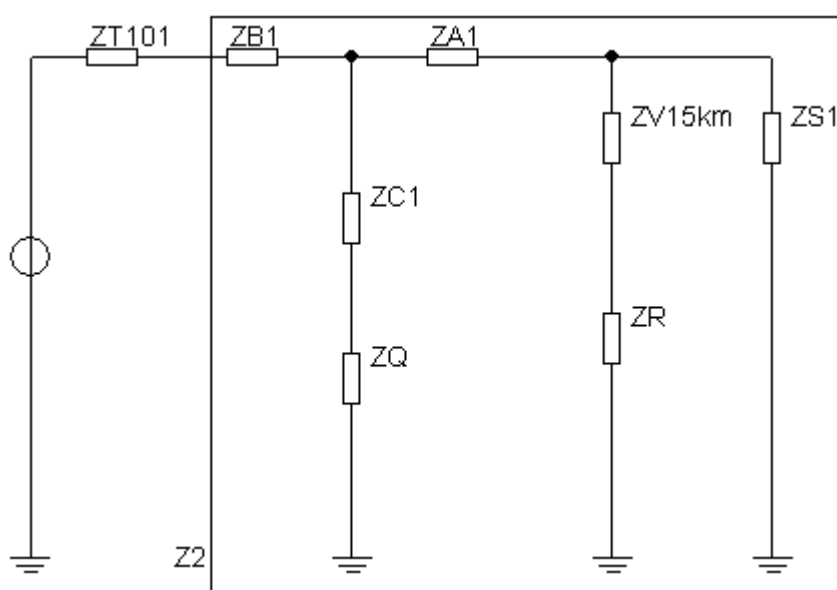
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22^2}{1,9374} \approx 274,7962 \text{ MVA} \quad (208)$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Náhradní schéma



Obr. 20 Náhradní schéma pro zkrat v místě C v síti 22 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV



Obr. 21 Náhradní schéma pro zkrat v místě C v síti 22 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Impedance části náhradního schématu za transformátorem T101 je shodná s impedancí \bar{Z}_2 z výpočtu zkratu v bodě B přepočtenou na hladinu 22 kV.

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{2(110kV)}}{t_{r101}^2} \approx \frac{3,6794 + j12,3592}{4,7826^2} \approx (0,16086 + j0,54033) \Omega \quad (209)$$

Výsledná zkratová impedance - sériové spojení \bar{Z}_{TK101} , \bar{Z}_2 :

$$\begin{aligned}\bar{Z}_k &= \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{TK101} \approx (0,16086 + j0,54033) + (4,8612 \cdot 10^{-2} + j1,4253) \approx \\ &\approx (0,20948 + j1,9656) \Omega\end{aligned}\quad (210)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{0,20948^2 + 1,9656^2} \approx 1,9768 \Omega \quad (211)$$

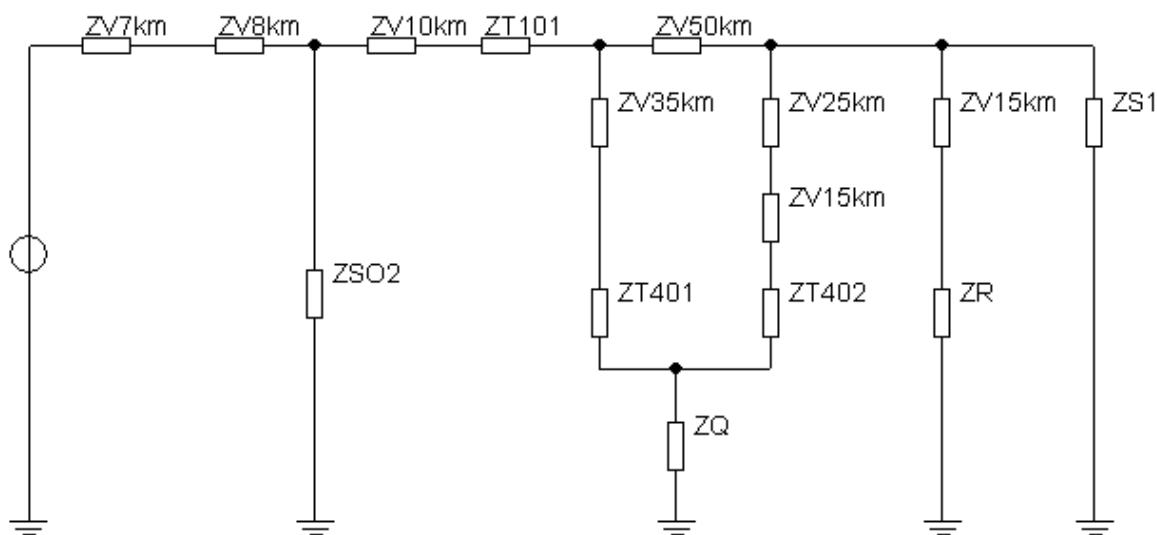
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 1,9768} \approx 7,068 \text{ kA} \quad (212)$$

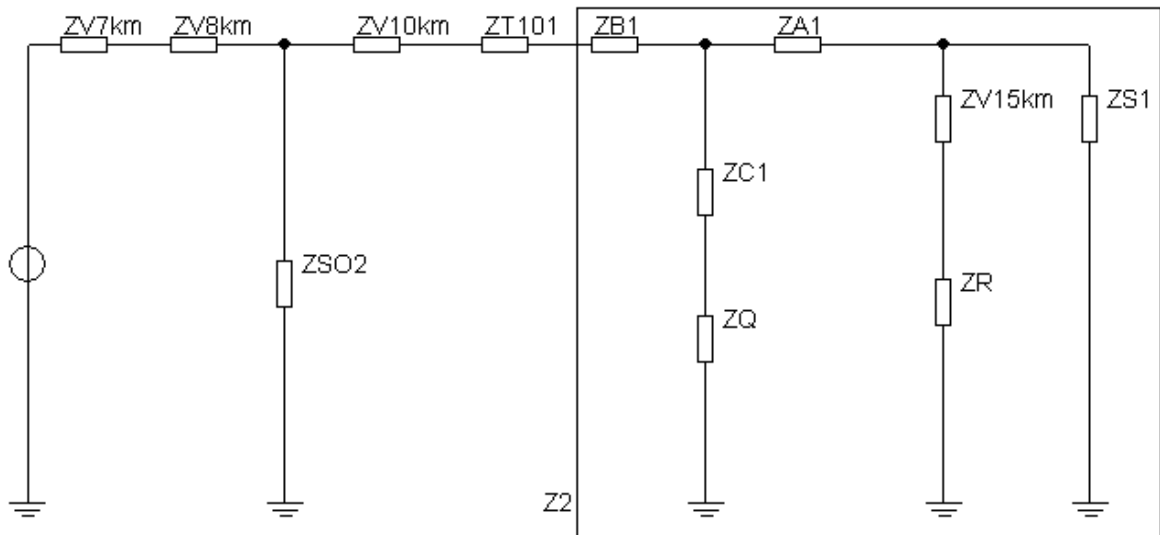
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22^2}{1,9768} \approx 269,3271 \text{ MVA} \quad (213)$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Náhradní schéma



Obr. 22 Náhradní schéma pro zkrat v místě D v síti 22 kV



Obr. 23 Náhradní schéma pro zkrat v místě D v síti 22 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Impedance části náhradního schématu za transformátorem T101 je shodná s impedancí \bar{Z}_2 z výpočtu zkratu v bodě B přepočtenou na hladinu 22 kV.

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{2(110kV)}}{t_{r101}^2} \approx \frac{3,6794 + j12,3592}{4,7826^2} \approx (0,16086 + j0,54033) \Omega \quad (214)$$

Sériové spojení \bar{Z}_{V10km} , \bar{Z}_{TK101} , \bar{Z}_2 :

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{2,V10km,TK101} &= \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{V10km} + \bar{Z}_{TK101} \approx (0,16086 + j0,54033) + \\ &+ (2,6 + j3,7) + (4,8612 \cdot 10^{-2} + j1,4253) \approx (2,8095 + j5,6656) \Omega \end{aligned} \quad (215)$$

Výsledná zkratová impedance - paralelní spojení $\bar{Z}_{2,V10km,TK101}$ a \bar{Z}_{SO2} , v sérii s \bar{Z}_{V7km} a \bar{Z}_{V8km} :

$$\begin{aligned} \bar{Z}_k &= \frac{1}{\frac{1}{\bar{Z}_{2,V10km,TK101}} + \frac{1}{\bar{Z}_{SO2}}} + \bar{Z}_{7km} + \bar{Z}_{8km} \approx \\ &\approx \frac{1}{\frac{1}{2,8095 + j5,6656} + \frac{1}{14,1635 + j91,9742}} + (2,87 + j2,66) + \\ &+ (2,4 + j2,96) \approx (7,8048 + j10,99) \Omega \end{aligned} \quad (216)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{7,8048^2 + 10,99^2} \approx 13,4794 \Omega \quad (217)$$

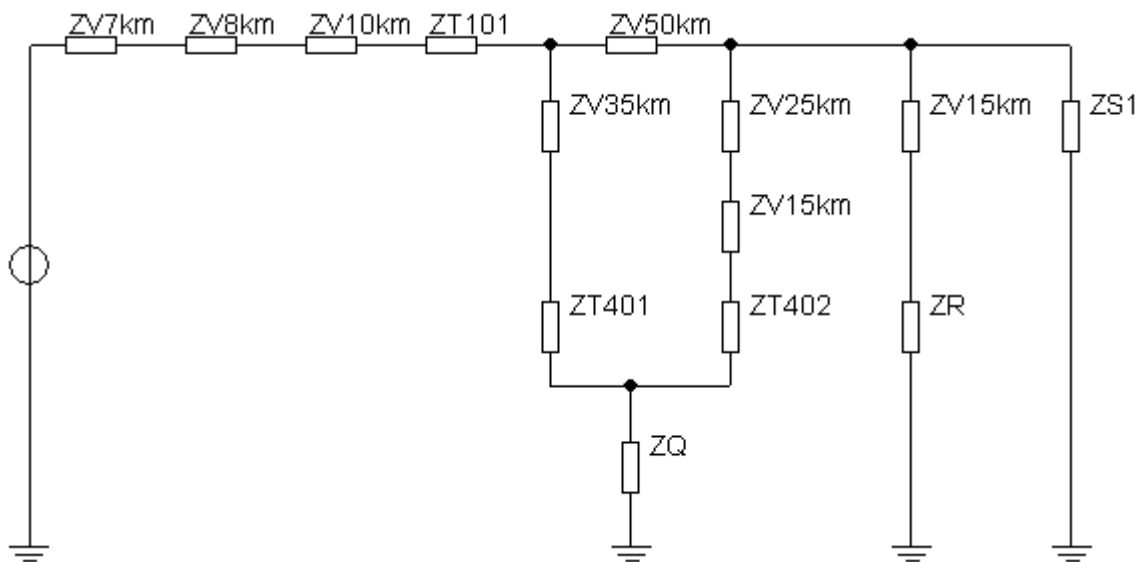
Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 13,4794} \approx 1,0365 \text{ kA} \quad (218)$$

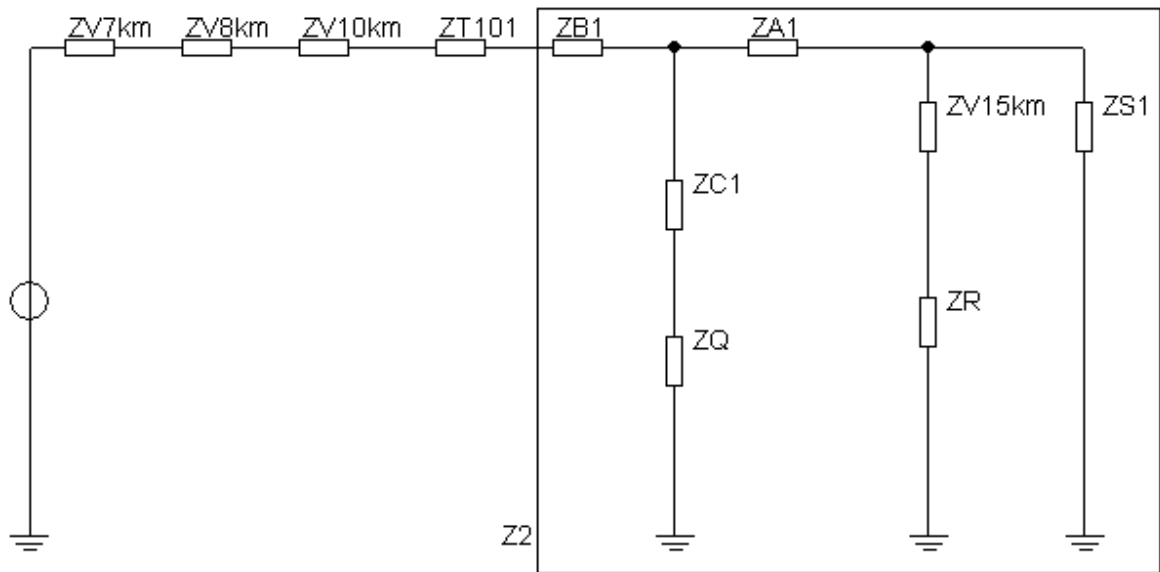
$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22^2}{13,4794} \approx 39,4972 \text{ MVA} \quad (219)$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Náhradní schéma



Obr. 24 Náhradní schéma pro zkrat v místě D v síti 22 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV



Obr. 25 Náhradní schéma pro zkrat v místě D v síti 22 kV bez elektrárenského bloku 0,4 kV s impedancemi tvořícími trojúhelník transfigurovanými do hvězdy

Výsledná zkratová impedance

Impedance části náhradního schématu za transformátorem T101 je shodná s impedancí \bar{Z}_2 z výpočtu zkratu v bodě B přepočtenou na hladinu 22 kV.

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{2(110kV)}}{t_{r101}^2} \approx \frac{3,6794 + j12,3592}{4,7826^2} \approx (0,16086 + j0,54033) \Omega \quad (220)$$

Výsledná zkratová impedance - sériové spojení \bar{Z}_2 , \bar{Z}_{TK101} , \bar{Z}_{V10km} , \bar{Z}_{V8km} a \bar{Z}_{V7km} :

$$\begin{aligned} \bar{Z}_k &= \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{TK101} + \bar{Z}_{V10km} + \bar{Z}_{V8km} + \bar{Z}_{V7km} \approx (0,16086 + j0,54033) + \\ &+ (4,8612 \cdot 10^{-2} + j1,4253) + (2,6 + j3,7) + (2,4 + j2,96) + \\ &+ (2,87 + j2,66) \approx (8,0795 + j11,2856) \Omega \end{aligned} \quad (221)$$

Absolutní hodnota \bar{Z}_k :

$$Z_k = \sqrt{\Re(\bar{Z}_k)^2 + \Im(\bar{Z}_k)^2} \approx \sqrt{8,0795^2 + 11,2856^2} \approx 13,8796 \Omega \quad (222)$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 13,8796} \approx 1,0066 \text{ kA} \quad (223)$$

$$S_k'' = \frac{c U_n^2}{Z_k} \approx \frac{1,1 \cdot 22^2}{13,8796} \approx 38,3584 \text{ MVA} \quad (224)$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (1,722 + j7,3653) \Omega$$

$$Z_k = 7,564 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2358 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1759,6582 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (3,6574 + j12,3088) \Omega$$

$$Z_k = 12,8407 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4405 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1036,5469 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (0,2081 + j1,9361) \Omega$$

$$Z_k = 1,9473 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1751 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 273,4097 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (7,8272 + j11,0651) \Omega$$

$$Z_k = 13,5797 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0289 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 39,2055 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,7218 + j7,3635) \Omega$$

$$Z_k = 7,5621 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2381 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1760,086 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6499 + j12,2901) \Omega$$

$$Z_k = 12,8206 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,449 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1038,1723 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,208 + j1,9253) \Omega$$

$$Z_k = 1,9365 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2152 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 274,9342 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2258 + j5,1862) \Omega$$

$$Z_k = 9,7242 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4368 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,7502 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,722 + j7,3652) \Omega$$

$$Z_k = 7,5639 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2359 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1759,6799 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6571 + j12,3078) \Omega$$

$$Z_k = 12,8397 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4409 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1036,6305 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,2082 + j1,9356) \Omega$$

$$Z_k = 1,9467 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1772 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 273,4863 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2699 + j5,2027) \Omega$$

$$Z_k = 9,7704 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,43 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,4913 \text{ MVA}$$

Zkrat v místech A, B, C (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledky stejné jako pro variantu s venkovním vedením, při zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV se vedení sítě 22 kV na zkratové impedanci nepodílí.

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (8,4005 + j5,2476) \Omega$$

$$Z_k = 9,9048 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4106 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 53,7515 \text{ MVA}$$

4.2.3 Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 9 Zkratové impedance prvků sítě 110 kV a 22 kV pro výpočet bez korekčních součinitelů impedancí

prvek	značení impedance	R [Ω] (110 kV)	X [Ω] (110 kV)	R [Ω] (22 kV)	X [Ω] (22 kV)
T401, T402 nekorigovaná Z	Z_{T401}, Z_{T402}	$6,5735 \cdot 10^{-2}$	5,8560	$2,8739 \cdot 10^{-3}$	0,25602
T101, T102 nekorigovaná Z	Z_{T101}, Z_{T102}	1,1344	33,2557	$4,9594 \cdot 10^{-2}$	1,4539
soustava 400 kV	Z_Q	$8,8313 \cdot 10^{-2}$	0,88313	$3,8609 \cdot 10^{-3}$	$3,8609 \cdot 10^{-2}$
soustava 110 kV	Z_R	1,1036	11,0362	$4,8249 \cdot 10^{-2}$	0,48249
el. blok 6 kV nekorigovaná Z	Z_{S1}	4,4165	74,7263	0,1931	3,2670
el. blok 0,4 kV synchronní gen. nekorigovaná Z	Z_{SO2}	305,5513	1984,1685	13,3584	86,7459
el. blok 0,4 kV asynchronní gen. nekorigovaná Z	Z_{SO2AG}	434,7252	2845,3280	19,0058	124,3949
vedení 110 kV, 50 km	Z_{V50km}	8,00	20,5	0,34975	0,89624
vedení 110 kV, 35 km	Z_{V35km}	5,60	14,35	0,24483	0,62737
vedení 110 kV, 25 km	Z_{V25km}	4,00	10,25	0,17488	0,44812
vedení 110 kV, 15 km	Z_{V15km}	2,40	6,15	0,10493	0,26887
vedení 22 kV, 10 km venkovní	Z_{V10km}	59,4707	84,6314	2,60	3,70
vedení 22 kV, 8 km venkovní	Z_{V8km}	54,8960	67,7051	2,40	2,96
vedení 22 kV, 7 km venkovní	Z_{V7km}	65,6465	60,8431	2,87	2,66
vedení 22 kV, 10 km kabelové	Z_{VK10km}	57,8696	28,8204	2,53	1,26
vedení 22 kV, 8 km kabelové	Z_{VK8km}	58,5558	24,1543	2,56	1,0560
vedení 22 kV, 7 km kabelové	Z_{VK7km}	70,9302	22,0956	3,1010	0,9660

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (1,6933 + j7,3274) \Omega$$

$$Z_k = 7,5205 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2892 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1769,829 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (3,6473 + j12,3472) \Omega$$

$$Z_k = 12,8746 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4261 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1033,8193 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (0,2088 + j1,9539) \Omega$$

$$Z_k = 1,965 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1102 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 270,9349 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (7,7894 + j11,0003) \Omega$$

$$Z_k = 13,4789 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0366 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 39,4987 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (1,6936 + j7,3294) \Omega$$

$$Z_k = 7,5225 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2867 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1769,3509 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (3,6557 + j12,3681) \Omega$$

$$Z_k = 12,897 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4167 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1032,0199 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (0,209 + j1,9663) \Omega$$

$$Z_k = 1,9774 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,0658 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 269,2424 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (7,8718 + j11,0931) \Omega$$

$$Z_k = 13,6023 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0272 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 39,1405 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (1,6945 + j7,3343) \Omega$$

$$Z_k = 7,5276 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2805 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1768,1716 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (3,6779 + j12,4191) \Omega$$

$$Z_k = 12,9522 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,3936 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1027,6226 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (0,2104 + j1,9969) \Omega$$

$$Z_k = 2,0079 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 6,9584 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 265,1518 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (8,0804 + j11,3169) \Omega$$

$$Z_k = 13,9055 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0048 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 38,2869 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,6933 + j7,3272) \Omega$$

$$Z_k = 7,5203 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2894 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1769,8724 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6467 + j12,3451) \Omega$$

$$Z_k = 12,8725 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,427 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1033,9867 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,2089 + j1,9528) \Omega$$

$$Z_k = 1,9639 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1143 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 271,0894 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2152 + j5,2111) \Omega$$

$$Z_k = 9,7286 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4362 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,7254 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,6936 + j7,3293) \Omega$$

$$Z_k = 7,5224 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2868 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1769,3727 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6555 + j12,3671) \Omega$$

$$Z_k = 12,896 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4171 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1032,1038 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,2091 + j1,9657) \Omega$$

$$Z_k = 1,9768 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,0678 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 269,3193 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2152 + j5,2111) \Omega$$

$$Z_k = 9,7286 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4362 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,7254 \text{ MVA}$$

Zkrat v místech A, B, C (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledky stejné jako pro variantu s venkovním vedením, při zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV se vedení sítě 22 kV na zkratové impedanci nepodílí.

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (8,4014 + j5,2789) \Omega$$

$$Z_k = 9,9222 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4081 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 53,6576 \text{ MVA}$$

4.2.4 Výpočet bez korekčních součinitelů impedancí s fiktivními převody transformátorů

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 10 Zkratové impedance prvků sítě 110 kV a 22 kV pro výpočet bez korekčních součinitelů impedancí s fiktivními převody transformátorů

prvek	značení impedance	R [Ω] (110 kV)	X [Ω] (110 kV)	R [Ω] (22 kV)	X [Ω] (22 kV)
T401, T402 nekorigovaná Z	Z_{T401}, Z_{T402}	$6,5735 \cdot 10^{-2}$	5,8560	$2,6294 \cdot 10^{-3}$	0,23424
T101, T102 nekorigovaná Z	Z_{T101}, Z_{T102}	1,2398	36,3476	$4,9594 \cdot 10^{-2}$	1,4539
soustava 400 kV	Z_Q	$7,2986 \cdot 10^{-2}$	0,72986	$2,9194 \cdot 10^{-3}$	$2,9194 \cdot 10^{-2}$
soustava 110 kV	Z_R	1,1036	11,0362	$4,4145 \cdot 10^{-2}$	0,44145
el. blok 6 kV nekorigovaná Z	Z_{S1}	4,7142	78,9786	0,18857	3,1591
el. blok 0,4 kV synchronní gen. nekorigovaná Z	Z_{SO2}	356,2845	2317,4470	14,2514	92,6991
el. blok 0,4 kV asynchronní gen. nekorigovaná Z	Z_{SO2AG}	511,9397	3355,1786	20,4476	134,2071
vedení 110 kV, 50 km	Z_{V50km}	8,00	20,5	0,32	0,82
vedení 110 kV, 35 km	Z_{V35km}	5,60	14,35	0,2240	0,5740
vedení 110 kV, 25 km	Z_{V25km}	4,00	10,25	0,16	0,41
vedení 110 kV, 15 km	Z_{V15km}	2,40	6,15	0,0960	0,2460
vedení 22 kV, 10 km venkovní	Z_{V10km}	65,00	92,50	2,60	3,70
vedení 22 kV, 8 km venkovní	Z_{V8km}	60,00	74,00	2,40	2,96
vedení 22 kV, 7 km venkovní	Z_{V7km}	71,75	66,50	2,87	2,66
vedení 22 kV, 10 km kabelové	Z_{VK10km}	63,25	31,50	2,53	1,26
vedení 22 kV, 8 km kabelové	Z_{VK8km}	64,00	26,40	2,56	1,0560

vedení 22 kV, 7 km kabelové	Z_{VK7km}	77,5250	24,15	3,1010	0,9660
--------------------------------	-------------	---------	-------	--------	--------

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (1,7103 + j7,3312) \Omega$$

$$Z_k = 7,528 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2799 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1768,0596 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (3,6465 + j12,2869) \Omega$$

$$Z_k = 12,8166 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4507 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1038,4986 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (0,1954 + j1,9094) \Omega$$

$$Z_k = 1,9194 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2792 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 277,3767 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (7,7959 + j10,9761) \Omega$$

$$Z_k = 13,4629 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0378 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 39,5456 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (1,7106 + j7,3329) \Omega$$

$$Z_k = 7,5298 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2777 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1767,6453 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (3,654 + j12,3051) \Omega$$

$$Z_k = 12,8362 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4424 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1036,9139 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$\bar{Z}_k = (0,1955 + j1,9208) \Omega$$

$$Z_k = 1,9307 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2366 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 275,7499 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (7,8746 + j11,0637) \Omega$$

$$Z_k = 13,6023 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0289 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 39,2048 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (1,7113 + j7,3371) \Omega$$

$$Z_k = 7,534 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2726 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1766,6596 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (3,6728 + j12,348) \Omega$$

$$Z_k = 12,8826 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4228 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1033,1743 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (0,1965 + j1,9478) \Omega$$

$$Z_k = 1,9577 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1368 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 271,9503 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (8,0665 + j11,2678) \Omega$$

$$Z_k = 13,8576 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,0082 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 38,4194 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,7103 + j7,331) \Omega$$

$$Z_k = 7,5279 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2801 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1768,0941 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6461 + j12,2853) \Omega$$

$$Z_k = 12,8149 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4514 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1038,6337 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,1955 + j1,9085) \Omega$$

$$Z_k = 1,9185 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2828 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 277,5125 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2158 + j5,1696) \Omega$$

$$Z_k = 9,7069 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4394 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,8475 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (1,7106 + j7,3328) \Omega$$

$$Z_k = 7,5297 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,2778 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1767,6623 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (3,6538 + j12,3043) \Omega$$

$$Z_k = 12,8353 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,4427 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1036,9802 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (0,1956 + j1,9203) \Omega$$

$$Z_k = 1,9303 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2383 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 275,8162 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$\bar{Z}_k = (8,2672 + j5,1887) \Omega$$

$$Z_k = 9,7606 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4315 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 54,546 \text{ MVA}$$

Zkrat v místech A, B, C (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledky stejné jako pro variantu s venkovním vedením, při zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV se vedení sítě 22 kV na zkratové impedanci nepodílí.

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$\bar{Z}_k = (8,3875 + j5,2298) \Omega$$

$$Z_k = 9,8844 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,4135 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 53,8627 \text{ MVA}$$

4.2.5 Výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitými převody transformátorů

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 11 Zkratové impedance prvků sítě 110 kV a 22 kV pro výpočet pouze s reaktancemi a jmenovitými převody transformátorů

prvek	značení impedance	X [Ω] (110 kV)	X [Ω] (22 kV)
T401, T402 nekorigovaná Z	X_{T401}, X_{T402}	5,8564	0,25604
T101, T102 nekorigovaná Z	X_{T101}, X_{T102}	33,2750	1,4548
soustava 400 kV	X_Q	0,88756	$3,8803 \cdot 10^{-2}$
soustava 110 kV	X_R	11,0917	0,48492
el. blok 6 kV nekorigovaná Z	X_{S1}	74,7607	3,2685
el. blok 0,4 kV synchronní gen. nekorigovaná Z	X_{SO2}	1992,7259	87,12
el. blok 0,4 kV asynchronní gen. nekorigovaná Z	X_{SO2AG}	2878,3819	125,84
vedení 110 kV, 50 km	X_{V50km}	20,5	0,89624
vedení 110 kV, 35 km	X_{V35km}	14,35	0,62737
vedení 110 kV, 25 km	X_{V25km}	10,25	0,44812
vedení 110 kV, 15 km	X_{V15km}	6,15	0,26887
vedení 22 kV, 10 km venkovní	X_{V10km}	84,6314	3,70
vedení 22 kV, 8 km venkovní	X_{V8km}	67,7051	2,96
vedení 22 kV, 7 km venkovní	X_{V7km}	60,8431	2,66
vedení 22 kV, 10 km kabelové	X_{VK10km}	28,8204	1,26
vedení 22 kV, 8 km kabelové	X_{VK8km}	24,1543	1,0560
vedení 22 kV, 7 km kabelové	X_{VK7km}	22,0956	0,9660

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 7,3012 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5683 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1822,9994 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 12,3349 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6636 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1079,0526 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 1,9542 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1496 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 272,4368 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 10,9675 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2739 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,5435 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 7,3032 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5656 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1822,4886 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 12,3562 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6538 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1077,1886 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 1,9669 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1036 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 270,6845 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 11,0704 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2621 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,0921 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 7,3081 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5592 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1821,2655 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 12,4074 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6305 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1072,7465 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 1,9972 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 6,9958 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 266,5746 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 11,3172 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2346 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 47,0435 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 7,301 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5685 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1823,0462 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 12,3329 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6645 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1079,2239 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 1,9531 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1539 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 272,5986 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 5,1618 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,7068 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 103,1423 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 7,3031 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5657 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1822,5118 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 12,3552 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6542 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1077,273 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 1,9663 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1057 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 270,7634 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 5,197 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,6884 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 102,4435 \text{ MVA}$$

Zkrat v místech A, B, C (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledky stejné jako pro variantu s venkovním vedením, při zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV se vedení sítě 22 kV na zkratové impedanci nepodílí.

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 5,2792 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,6466 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 100,8488 \text{ MVA}$$

4.2.6 Výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů

Zkratové impedance prvků sítě

Tabulka 12 Zkratové impedance prvků sítě 110 kV a 22 kV pro výpočet pouze s reaktancemi a fiktivními převody transformátorů

prvek	značení impedance	X [Ω] (110 kV)	X [Ω] (22 kV)
T401, T402 nekorigovaná Z	X_{T401}, X_{T402}	5,8564	0,23426
T101, T102 nekorigovaná Z	X_{T101}, X_{T102}	36,3688	1,4548
soustava 400 kV	X_Q	0,73352	$2,9341 \cdot 10^{-2}$
soustava 110 kV	X_R	11,0917	0,44367
el. blok 6 kV nekorigovaná Z	X_{S1}	79,0130	3,1605
el. blok 0,4 kV synchronní gen. nekorigovaná Z	X_{SO2}	2326,83	93,0732
el. blok 0,4 kV asynchronní gen. nekorigovaná Z	X_{SO2AG}	3394,05	135,7620
vedení 110 kV, 50 km	X_{V50km}	20,5	0,82
vedení 110 kV, 35 km	X_{V35km}	14,35	0,5740
vedení 110 kV, 25 km	X_{V25km}	10,25	0,41
vedení 110 kV, 15 km	X_{V15km}	6,15	0,2460
vedení 22 kV, 10 km venkovní	X_{V10km}	92,50	3,70
vedení 22 kV, 8 km venkovní	X_{V8km}	74,00	2,96
vedení 22 kV, 7 km venkovní	X_{V7km}	66,50	2,66
vedení 22 kV, 10 km kabelové	X_{VK10km}	31,50	1,26
vedení 22 kV, 8 km kabelové	X_{VK8km}	26,40	1,0560
vedení 22 kV, 7 km kabelové	X_{VK7km}	24,15	0,9660

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 7,3051 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5631 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1822,0229 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 12,2745 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6914 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1084,3576 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 1,9098 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,3161 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 278,7796 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 10,945 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2765 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,643 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 7,3068 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5608 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1821,5806 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 12,2932 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6828 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1082,7157 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

Výsledná zkratová impedance

$$Z_k = 1,9214 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2719 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 277,0957 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 11,0426 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2653 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 48,2133 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 7,3109 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5555 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1820,5588 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 12,3362 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,663 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1078,9376 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 1,9482 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,1717 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 273,2781 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s venkovním vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 11,2682 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 1,2399 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 47,248 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 7,3049 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5633 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1822,06 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 12,273 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6921 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1084,4957 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 1,9088 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,3198 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 278,9219 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV synchronní (bioplynová elektrárna)

$$Z_k = 5,1233 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,7271 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 103,9174 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě A (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 7,3068 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 9,5609 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1821,5986 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě B (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 12,2924 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 5,6831 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 1082,7822 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě C (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 1,9209 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 7,2737 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 277,1636 \text{ MVA}$$

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, generátor 0,4 kV asynchronní (větrná elektrárna)

$$Z_k = 5,1561 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,7098 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 103,2556 \text{ MVA}$$

Zkrat v místech A, B, C (hladina 110 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

Výsledky stejné jako pro variantu s venkovním vedením, při zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV se vedení sítě 22 kV na zkratové impedanci nepodílí.

Zkrat v místě D (hladina 22 kV), síť 22 kV s kabelovým vedením, bez elektrárenského bloku 0,4 kV

$$Z_k = 5,2302 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud a výkon

$$I_k'' = 2,6714 \text{ kA}$$

$$S_k'' = 101,7935 \text{ MVA}$$

4.2.7 Porovnání výsledků

Tabulka 13 Výsledky výpočtů zkratových proudů v sítích 110 kV a 22 kV provedených s různými zjednodušeními, varianta s venkovním vedením sítě 22 kV

metoda dle normy	schéma	místo zkratu elektr. 0,4kV	A 110kV		B 110kV		C 22kV		D 22kV	
			bioplynová	VTE	bioplynová	VTE	bioplynová	VTE	bioplynová	VTE
	úplné	Ik" [kA]	9,2379	9,2358	5,4482	5,4405	7,2115	7,1751	1,0365	1,0289
		Sk" [kA]	1760,0474	1759,6582	1038,0225	1036,5469	274,7962	273,4097	39,4972	39,2055
		odchylka [%]	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2297	9,2297	5,4174	5,4174	7,0680	7,0680	1,0066	1,0066
		Sk" [kA]	1758,4906	1758,4906	1032,1583	1032,1583	269,3271	269,3271	38,3584	38,3584
		odchylka [%]	-0,09	-0,07	-0,56	-0,42	-1,99	-1,49	-2,88	-2,16
R,X, jm. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,2892	9,2867	5,4261	5,4167	7,1102	7,0658	1,0366	1,0272
		Sk" [kA]	1769,8290	1769,3509	1033,8193	1032,0199	270,9349	269,2424	39,4987	39,1405
		odchylka [%]	+0,56	+0,55	-0,40	-0,44	-1,41	-1,52	+0,00	-0,17
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2805	9,2805	5,3936	5,3936	6,9584	6,9584	1,0048	1,0048
		Sk" [kA]	1768,1716	1768,1716	1027,6226	1027,6226	265,1518	265,1518	38,2869	38,2869
		odchylka [%]	+0,46	+0,48	-1,00	-0,86	-3,51	-3,02	-3,06	-2,34
R,X, f. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,2799	9,2777	5,4507	5,4424	7,2792	7,2366	1,0378	1,0289
		Sk" [kA]	1768,0596	1767,6453	1038,4986	1036,9139	277,3767	275,7499	39,5456	39,2048
		odchylka [%]	+0,46	+0,45	+0,05	+0,04	+0,94	+0,86	+0,12	-0,00
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2726	9,2726	5,4228	5,4228	7,1368	7,1368	1,0082	1,0082
		Sk" [kA]	1766,6596	1766,6596	1033,1743	1033,1743	271,9503	271,9503	38,4194	38,4194
		odchylka [%]	+0,38	+0,40	-0,47	-0,33	-1,04	-0,53	-2,73	-2,01
jen X, jm. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,5683	9,5656	5,6636	5,6538	7,1496	7,1036	1,2739	1,2621
		Sk" [kA]	1822,9994	1822,4886	1079,0526	1077,1886	272,4368	270,6845	48,5435	48,0921
		odchylka [%]	+3,58	+3,57	+3,95	+3,92	-0,86	-1,00	+22,90	+22,67
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,5592	9,5592	5,6305	5,6305	6,9958	6,9958	1,2346	1,2346
		Sk" [kA]	1821,2655	1821,2655	1072,7465	1072,7465	266,5746	266,5746	47,0435	47,0435
		odchylka [%]	+3,48	+3,50	+3,35	+3,49	-2,99	-2,50	+19,11	+19,99
jen X, f. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,5631	9,5608	5,6914	5,6828	7,3161	7,2719	1,2765	1,2653
		Sk" [kA]	1822,0229	1821,5806	1084,3576	1082,7157	278,7796	277,0957	48,6430	48,2133
		odchylka [%]	+3,52	+3,52	+4,46	+4,45	+1,45	+1,35	+23,16	+22,98
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,5555	9,5555	5,6630	5,6630	7,1717	7,1717	1,2399	1,2399
		Sk" [kA]	1820,5588	1820,5588	1078,9376	1078,9376	273,2781	273,2781	47,2480	47,2480
		odchylka [%]	+3,44	+3,46	+3,94	+4,09	-0,55	-0,05	+19,62	+20,51

Tabulka 14 Výsledky výpočtů zkratových proudů v sítích 110 kV a 22 kV provedených s různými zjednodušeními, varianta s kabelovým vedením sítě 22 kV

metoda dle normy	schéma	místo zkratu elektr. 0,4kV	A 110kV		B 110kV		C 22kV		D 22kV	
			bioplynová	VTE	bioplynová	VTE	bioplynová	VTE	bioplynová	VTE
dle normy	úplné	Ik" [kA]	9,2381	9,2359	5,4490	5,4409	7,2152	7,1772	1,4368	1,4300
		Sk" [kA]	1760,0860	1759,6799	1038,1723	1036,6305	274,9342	273,4863	54,7502	54,4913
		odchylka [%]	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2297	9,2297	5,4174	5,4174	7,0680	7,0680	1,4106	1,4106
		Sk" [kA]	1758,4906	1758,4906	1032,1583	1032,1583	269,3271	269,3271	53,7515	53,7515
		odchylka [%]	-0,09	-0,07	-0,58	-0,43	-2,04	-1,52	-1,82	-1,36
R,X, jm. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,2894	9,2868	5,4270	5,4171	7,1143	7,0678	1,4362	1,4278
		Sk" [kA]	1769,8724	1769,3727	1033,9867	1032,1038	271,0894	269,3193	54,7254	54,4059
		odchylka [%]	+0,56	+0,55	-0,40	-0,44	-1,40	-1,52	-0,05	-0,16
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2805	9,2805	5,3936	5,3936	6,9584	6,9584	1,4081	1,4081
		Sk" [kA]	1768,1716	1768,1716	1027,6226	1027,6226	265,1518	265,1518	53,6576	53,6576
		odchylka [%]	+0,46	+0,48	-1,02	-0,87	-3,56	-3,05	-2,00	-1,53
R,X, f. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,2801	9,2778	5,4514	5,4427	7,2828	7,2383	1,4394	1,4315
		Sk" [kA]	1768,0941	1767,6623	1038,6337	1036,9802	277,5125	275,8162	54,8475	54,5460
		odchylka [%]	+0,45	+0,45	+0,04	+0,03	+0,94	+0,85	+0,18	+0,10
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,2726	9,2726	5,4228	5,4228	7,1368	7,1368	1,4135	1,4135
		Sk" [kA]	1766,6596	1766,6596	1033,1743	1033,1743	271,9503	271,9503	53,8627	53,8627
		odchylka [%]	+0,37	+0,40	-0,48	-0,33	-1,09	-0,56	-1,62	-1,15
jen X, jm. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,5685	9,5657	5,6645	5,6542	7,1539	7,1057	2,7068	2,6884
		Sk" [kA]	1823,0462	1822,5118	1079,2239	1077,2730	272,5986	270,7634	103,1423	102,4435
		odchylka [%]	+3,58	+3,57	+3,95	+3,92	-0,85	-1,00	+88,39	+88,00
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,5592	9,5592	5,6305	5,6305	6,9958	6,9958	2,6466	2,6466
		Sk" [kA]	1821,2655	1821,2655	1072,7465	1072,7465	266,5746	266,5746	100,8488	100,8488
		odchylka [%]	+3,48	+3,50	+3,33	+3,48	-3,04	-2,53	+84,20	+85,07
jen X, f. př., bez K	úplné	Ik" [kA]	9,5633	9,5609	5,6921	5,6831	7,3198	7,2737	2,7271	2,7098
		Sk" [kA]	1822,0600	1821,5986	1084,4957	1082,7822	278,9219	277,1636	103,9174	103,2556
		odchylka [%]	+3,52	+3,52	+4,46	+4,45	+1,45	+1,34	+89,80	+89,49
	bez el. 0,4 kV	Ik" [kA]	9,5555	9,5555	5,6630	5,6630	7,1717	7,1717	2,6714	2,6714
		Sk" [kA]	1820,5588	1820,5588	1078,9376	1078,9376	273,2781	273,2781	101,7935	101,7935
		odchylka [%]	+3,44	+3,46	+3,93	+4,08	-0,60	-0,08	+85,92	+86,81

Výrazná odchylka výsledků výpočtů zjednodušenými postupy od výsledků výpočtů dle normy se projevila při zanedbání činných odporů u zkratu v místě D sítě 22 kV. Stejně jako u průmyslové sítě 0,4 kV je zde příčinou napájení zkratu z vedení, jehož činný odpor je srovnatelný s reaktancí, či jí dokonce převyšuje (kabelové vedení). V takovém případě má zanedbání činného odporu za následek výrazný nárůst vypočtených hodnot zkratových proudů. Zkraty v místech A a B jsou napájeny z venkovního vedení 110 kV, jehož poměr činného odporu vůči reaktanci není tak vysoký a zkrat v místě C je napájen z místa B přes transformátor T101, jehož činný odpor je téměř o 2 řády nižší nežli reaktance. Zanedbání činného odporu zde tedy takový dopad na přesnost nemá.

Příliš výrazně se na přesnosti výsledků neprojevilo zanedbání elektrárenského bloku 0,4 kV, poněvadž kvůli jeho nízkému výkonu je jeho příspěvek k celkovému zkratovému proudu malý.

Závěr

Hodnoty zkratových proudů vypočtené bez užití korekčních součinitelů impedancí se od hodnot získaných výpočtem dle normy lišily o méně jak 2 %. V sítích 110 kV a 22 kV byla tato odchylka u všech zkratových proudů záporná, poněvadž u transformátorů T401, T402, T101 a T102 vycházel korekční součinitel pro impedanci nižší než 1. Užití fiktivních převodů transformátorů namísto jmenovitých pak způsobilo obdobně velkou kladnou odchylku, díky čemuž byly takto získané výsledky přesnější. V průmyslové síti 0,4 kV, kde korekční součinitele impedancí transformátorů vycházely vyšší než 1, byly obě odchylky kladné a užitím fiktivních převodů se přesnost zhoršila, avšak nepřesáhla 1 %. Uvedená zjednodušení tedy neměla podstatné dopady na přesnost výsledku, avšak úspora práce je zde minimální, poněvadž je stále nutné počítat s komplexními impedancemi.

Výrazné snížení pracnosti výpočtu přináší až zanedbání činných odporů a výpočet pouze s reaktancemi, kde nedojde k výraznému zhoršení přesnosti výsledků, jedná-li se o zkrat napájený z transformátoru či venkovního vedení, jehož reaktance je výrazně vyšší nežli činný odpor, zde se jednalo o zkraty v bodech A, B a C sítí 110 kV a 22 kV. Je-li však zkrat napájen z vedení, jehož činný odpor se blíží reaktanci, či jí dokonce přesahuje (kabelové vedení), pak takto vypočtené zkratové proudy vychází nesmyslně vysoké a výsledky nemají vypovídající hodnotu. Ve zde počítaných příkladech se jednalo o odchylky v desítkách procent, zkratový proud v bodě D sítě 22 kV s kabelovým vedením vycházel vyšší o více jak o 80 % oproti hodnotě vypočtené postupem dle normy.

Zkratové proudy v sítích 110 kV a 22 kV byly počítány navíc se zanedbáním elektrárenského bloku s generátorem 1 MVA, 0,4 kV. Vzhledem k jeho nízkému výkonu a tudíž malému podílu na dodávaném zkratovém výkonu pak v bodě D, kde se jedná o nejbližší zdroj, a tudíž se zde jeho zanedbání projeví nejvíce, vycházel zkratový proud nižší jen okolo 2 %.

Zjednodušení spočívající v zanedbání korekčních součinitelů impedancí a užití fiktivních převodů transformátorů lze použít ve všech případech při zhoršení přesnosti jen o jednotky procent, avšak úspora práce je zde minimální. Zanedbáním činných odporů se výrazně sníží pracnost výpočtu, poněvadž odpadá nutnost počítat s komplexními čísly, avšak přijatelné přesnosti bude dosaženo jen u zkratů napájených přímo z transformátorů

nebo z venkovních vedení 110 kV a vyšších hladin. U zkratů napájených z venkovních vedení nižších napěťových hladin či z vedení kabelových činný odpor již zanedbat nelze.

Literatura

- [1] Pauza J., Zkratý v elektrických rozvodech, Praha, SNTL, 1970, 248 s.
- [2] Mešter M., Výpočet skratových prúdov v elektrizačných sústavách, Banská Bystrica, PRO, 2005, 94 s., ISBN 80-89057-10-1
- [3] ČSN EN 60909-0, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: Výpočet proudů, 2. vydání, Praha, Česká agentura pro standardizaci, 2016
- [4] ČSN 33 3020, Elektrotechnické předpisy. Výpočet poměru při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě, Praha, Český normalizační institut, 1992