VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZKRATOVÝ VÝPOČET A NASTAVENÍ OCHRAN GENERÁTORŮ VODNÍ ELEKTRÁRNY LIPNO I

SHOORT CIRCUIT CALCULATION AND GENERATOR PROTECTIONS SETTINGS FOR HYDRO PLANT LIPNO I

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Tomáš Guliš

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Tomáš Guliš ***ID:*** 154728
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Zkratový výpočet a nastavení ochran generátorů vodní elektrárny Lipno I

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. V návaznosti na rekonstrukci turbín a generátorů provést zkratový výpočet minimálních a maximálních hodnot
2. Zhodnocení zkratových poměrů v rozvodně 110 kV a 25 kV
3. Konfigurace a nastavení nových elektrických ochran v rámci rekonstrukce
4. Porovnání výsledků před a po rekonstrukci turbín a generátorů
5. Analýza využitelnosti dostupných programů pro výpočet zkratových poměrů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.6.2017 ***Termín odevzdání:*** 18.8.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
Konzultant:

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

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

Poďakovanie

Na tomto mieste by som chcel poďakovať vedúcej diplomovej práce doc. Ing. Jaroslave Orságovej, Ph.D. za metodickú, pedagogickú, odbornú pomoc a vedenie a ďalšie cenné rady, ktoré mi poskytla počas spracovávania mojej diplomovej práce. Ďakujem aj zamestnancom firmy SAG Elektrovod za odbornú pomoc a rady pri spracovávaní diplomovej práce.

Bibliografická citace práce:

GULIŠ, T. *Zkratový výpočet a nastavení ochran generátorů vodní elektrárny Lipno I.*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 92s.Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Zkratový výpočet a nastavení ochran generátorů vodní elektrárny Lipno I.* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 18.08.2017 ……

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou chránenia generátorov pri poruchách, skratmi a ich výpočtom podľa platnej normy ČSN EN 60909-0 ed.2. Praktická časť obsahuje výpočet minimálnych a maximálnych skratových prúdov vodnej elektrárne Lipno I. na rôznych miestach pomocou výpočtového programu NetCalc a pre porovnanie funkčnosti programu rieši aj manuálny výpočet. Ďalšia kapitola sa zaoberá výpočtom nastavenia jednotlivých funkcii elektrickej ochrany SIEMENS typu Siprotec 7UM622, ktorá slúži na chránenie hlavných generátorov tejto vodnej elektrárne.

KLÍČOVÁ SLOVA: Vodná elektráreň, chránenie generátora, skratový výpočet, elektrická ochrana

ABSTRACT

This Master 's thesis deals with the topic of protection of generators in case of faults, short circuits and their calculation according to the valid standard ČSN EN 60909-0 ed.2. The practical part includes the calculation of the minimum and maximum short-circuit currents of the Lipno I hydroelectric power plant at various locations using the NetCalc calculation program and for comparison of program funcionality provides the manual calculation. Next chapter deals with the calculation of settings of each protection function of the SIEMENS Siprotec 7UM622 protection relay, which is used to protect main generators of this hydropower plant.

KEY WORDS: Water power plant, protection of generator, short-circuit calculation, electric protection relay

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV **8**

ZOZNAM TABULIEK **10**

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK **12**

1 ÚVOD **16**

2 VODNÉ DIELO LIPNO **17**

3 GENERÁTORY **19**

3.1 SYNCHRÓNNE GENERÁTORY **19**

3.1.1 HYDROALTERNÁTORY VE LIPNO 20

3.2 PORUCHY GENERÁTOROV **21**

3.2.1 IZOLAČNÉ PORUCHY 21

3.2.2 ABNORMÁLNE PODMIENKY CHODU 21

3.3 CHRÁNENIE GENERÁTOROV **22**

3.3.1 ROZDIELOVÁ OCHRANA 23

3.3.2 ZEMNÁ OCHRANA STATORU ALTERNÁTORA 24

3.3.3 ZEMNÁ OCHRANA ROTORU ALTERNÁTORA 25

3.3.4 NADPRÚDOVÁ SKRATOVÁ OCHRANA 25

3.3.5 OCHRANA PROTI PRÚDOVÉMU PREŤAŽENIU 25

3.3.6 OCHRANA PROTI SPÄTNÉMU VÝKONU 26

3.3.7 OCHRANA PRI NESYMETRICKEJ ZÁŤAŽI 26

3.3.8 NADPÄŤOVÁ OCHRANA 26

3.3.9 PODPÄŤOVÁ OCHRANA 26

3.3.10 OCHRANA PROTI STRATE BUDENIA 26

3.3.11 OCHRANA PROTI SAMOBUDENIU 27

3.3.12 OCHRANA PROTI LOŽISKOVÝM PRÚDOM 27

3.3.13 PODFREKVENČNÁ A NADFREKVENČNÁ OCHRANA 27

3.3.14 OCHRANA PROTI STRATE STABILITY (SYNCHRONIZMU) 27

4 SKRATY **28**

4.1 ČASOVÝ PRIEBEH SKRATOVÉHO PRÚDU **29**

4.2 ČASOVÉ PRIEBEHY ZLOŽIEK SKRATOVÝCH PRÚDOV **30**

4.3 CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY SKRATOVÉHO PRÚDU **32**

4.3.1 POČIATOČNÝ SÚMERNÝ RÁZOVÝ SKRATOVÝ PRÚD 32

4.3.2 SÚMERNÝ VYPÍNACÍ SKRATOVÝ PRÚD 33

4.3.3 DOBA TRVANIA SKRATU 34

4.3.4 NÁRAZOVÝ SKRATOVÝ PRÚD 34

4.3.5 JEDNOSMERNÁ ZLOŽKA SKRATOVÉHO PRÚDU 35

4.3.6 EKVIVALENTNÝ OTEPĽOVACÍ SKRATOVÝ PRÚD 35

4.3.7 USTÁLENÝ SKRATOVÝ PRÚD 36

5 VÝPOČET SKRATOVÝCH PRÚDOV **38**

5.1 METÓDA VÝPOČTU **38**

5.2 PREDPOKLADY VÝPOČTU **38**

5.3 POSTUP VÝPOČTU **39**

5.4 MAXIMÁLNE A MINIMÁLNE SKRATOVÉ PRÚDY 40
5.4.1 MAXIMÁLNY SKRATOVÝ PRÚD 40
5.4.2 MINIMÁLNY SKRATOVÝ PRÚD 40
5.5 SKRATOVÉ IMPEDANCIE ELEKTRICKÝCH ZARIADENÍ 41
5.5.1 SIEŤOVÉ NAPÁJAČE 41
5.5.2 TRANSFORMÁTORY 42
5.5.3 SYNCHRÓNNE GENERÁTORY 45
5.5.4 VONKAJŠIE VEDENIA A KÁBLE 46
6 SKRATOVÝ VÝPOČET 47
6.1 SCHÉMA VODNEJ ELEKTRÁRNE LIPNO I. 47
6.2 NÁHRADNÁ SCHÉMA VE LIPNO I. 48
6.3 VÝPOČET SKRATOVÝCH IMPEDANCII ELEKTRICKÝCH ZARIADENÍ 49
6.3.1 SIEŤOVÉ NAPÁJAČE 49
6.3.2 SYNCHRÓNNE GENERÁTORY 50
6.3.3 TRANSFORMÁTORY 52
6.3.4 VEDENIA 55
6.4 VÝPOČET POČIATOČNÝCH RAZOVÝCH SKRATOVÝCH PRÚDOV 56
6.4.1 SKRAT V ROZVODNI 110 KV 56
6.4.2 SKRAT V ROZVODNI 22 KV 65
6.4.3 SKRAT V ROZVODNI 15 KV 68
6.5 POROVNANIE VÝSLEDKOV DOSIAHNUTÝCH MANUÁLNYM VÝPOČTOM A VÝPOČTOVÝM PROGRAMOM NETCALC. 70
7 NASTAVENIE OCHRÁN HLAVNÝCH GENERÁTOROV VE LIPNO I. 72
7.1 NASTAVENIE OCHRANY SIPOROTEC 7UM622 73
7.1.1 NADPRÚDOVÁ OCHRANA PRIDRŽIAVANÁ PODPÄTÍM 73
7.1.2 NADPRÚDOVÁ OCHRANA ZO STRANY SIETE 74
7.1.3 ROZDIELOVÁ OCHRANA GENERÁTORA 75
7.1.4 OCHRANA PROTI NESYMETRII 76
7.1.5 OCHRANA PROTI PRÚDOVÉMU PREŤAŽENIU STATORA (TERMICKÁ) 78
7.1.6 OCHRANA PRI SPÄTNOM TOKU VÝKONU 79
7.1.7 MAXIMÁLNA A MINIMÁLNA WATTOVÁ OCHRANA 79
7.1.8 PODIMPEDANČNÁ OCHRANA 80
7.1.9 OCHRANA PRI PODBUDENÍ A STRATE BUDENIA GENERÁTORA 82
7.1.10 OCHRANA PROTI PREKLZU GENERÁTORA 84
7.1.11 PREPÄŤOVÁ OCHRANA GENERÁTORA 86
7.1.12 PODPÄŤOVÁ OCHRANA GENERÁTORA 87
7.1.13 ZEMNÁ OCHRANA ROTORA 88
7.1.14 ZEMNÁ OCHRANA STATORA 95% A 100% 89
7.1.15 PODFREKVENČNÁ A NADFREKVENČNÁ OCHRANA GENERÁTORA 90
8 ZÁVER 91
POUŽITÁ LITERATÚRA 92

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 - Hrádza vodnej nádrže Lipno 17
Obr. 2 - Budova prevádzky a rozvodňa 110 kV VE Lipno I. 18
Obr. 3 - Rotor a stator hlavného generátora VE Lipno I. počas rekonštrukcie 20
Obr. 4 - Pomocný generátor VE Lipno I. 20
Obr. 5 - Izolačné poruchy statora [4] 21
Obr. 6 - Izolačné poruchy rotora [4] 21
Obr. 7 - Schéma zapojenia pozdĺžnej rozdielovej ochrany 23
Obr. 8 - Zapojenie priečnej rozdielovej ochrany 23
Obr. 9 - Striedavá a jednosmerná superpozícia 25
Obr. 10 - Trojfázový a jednofázový skrat 28
Obr. 11 - Dvojfázový a dvojfázový zemný skrat 29
Obr. 12 - Priebeh skratového prúdu elektricky vzdialeného skratu [12] 29
Obr. 13 - Priebeh skratového prúdu elektricky blízkeho skratu 92[12] 30
Obr. 14 - Rázová a prechodná zložka skratového prúdu [12] 31
Obr. 15 - Ustálená a jednosmerná zložka skratového prúdu [12] 31
Obr. 16 - Časový priebeh súmerného skratového prúdu 31
Obr. 17 - Časový priebeh nesúmerného skratového prúdu 32
Obr. 18 - Súčiniteľ pre tepelný účinok jednosmernej zložky skratového prúdu [10] 35
Obr. 19 - Súčiniteľ pre tepelný účinok striedavej zložky skratového prúdu [10] 36
Obr. 20 - λ pre stroje s hladkým rotorom [10] 37
Obr. 21 - λ pre stroje s vyniknutými pólmi [10] 37
Obr. 22 - Trojvinuťový transformátor a jeho náhradná schéma 44
Obr. 23 - Schéma VE Lipno I. 47
Obr. 24 - Náhradná schéma VE Lipno I. 48
Obr. 25 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 110 kV 56
Obr. 26 - Náhradná schéma pre prípad trojfázového skratu v rozvodni 110 kV 58
Obr. 27 - Náhradná schéma pre prípad dvojfázového skratu v rozvodni 110 kV 59
Obr. 28 - Náhradná schéma pre prípad jednofázového skratu v rozvodni 110 kV 60
Obr. 29 - Schéma zdroje prispievajúce do skratu 62
Obr. 30 - Náhradná schéma pre prípad trojfázového skratu v rozvodni 110 kV 63
Obr. 31 - Náhradná schéma pre prípad dvojfázového skratu v rozvodni 110 kV 63
Obr. 32 - Náhradná schéma pre prípad jednofázového skratu v rozvodni 110 kV 64

Obr. 33 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 22 kV 65
Obr. 34 - Schéma s uvažovanými prvkami pre minimálne skraty v rozvodni 22 kV 66
Obr. 35 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 15 kV 68
Obr. 36 - Schéma s uvažovanými prvkami pre minimálne skraty v rozvodni 15 kV 69
Obr. 37 - Vypínacia charakteristika rozdielovej ochrany generátora 76
Obr. 38 - Vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany 81
Obr. 39 - Vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany 82
Obr. 40 - Charakteristika ochrany pri podbudení a strate budenia 83
Obr. 41 - Charakteristiky ochrany pri preklze rotora [14] 86

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 - Hodnoty napäťového súčiniteľa [10] *41*
Tab. 2 - Parametre a vypočítané reaktancie sieťových napájačov *49*
Tab. 3 - Parametre hlavných generátorov TG1 a TG2 ..... *50*
Tab. 4 - Vypočítané hodnoty reaktancií hlavných generátorov TG1 a TG2 ..... *51*
Tab. 5 - Parametre pomocných generátorov PG1 a PG2 ..... *51*
Tab. 6 - Parametre a vypočítané hodnoty dvojvinuťových transformátorov *52*
Tab. 7 - Parametre a vypočítané hodnoty trojvinuťových transformátorov *53*
Tab. 8 - Zdroje prispievajúce do skratu v rozvodni 110 kV *56*
Tab. 9 - Prepočítané hodnoty reaktancií *57*
Tab. 10 - Zdroje prispievajúce do skratu 110 kV *62*
Tab. 11 - Prepočítané hodnoty reaktancií *62*
Tab. 12 - Zdroje prispievajúce do skratu 22 kV *65*
Tab. 13 - Zdroje prispievajúce do skratu 22 kV *66*
Tab. 14 - Zdroje prispievajúce do skratu 15 kV *68*
Tab. 15 - Zdroje prispievajúce do skratu 15 kV *69*
Tab. 16 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat na zberni rozvodne 110kV *70*
Tab. 17 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat v zberni rozvodne 22 kV *70*
Tab. 18 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat na zberni rozvodne 15 kV *70*
Tab. 19 - Funkcie ochrany SIEMENS SIPOROTEC 7UM62 ..... *72*
Tab. 20 - Nastavenie nadprúdovej ochrany pridržiavanej podpätím *73*
Tab. 21 - Nastavenie nadprúdovej ochrany zo strany siete *74*
Tab. 22 - Nastavenie rozdielovej ochrany generátora *75*
Tab. 23 - Nastavenie ochrany pri nesymetrii *76*
Tab. 24 - Nastavenie ochrany proti prúdovému preťaženiu statora *78*
Tab. 25 - Nastavenie ochrany pri spätnom toku výkonu *79*
Tab. 26 - Nastavenie maximálnej a minimálnej wattovej ochrany *80*
Tab. 27 - Nastavenie podimpedančnej ochrany *80*
Tab. 28 - Nastavenie ochrany pri podbudení a strate budenia generátora *82*
Tab. 29 - Nastavenie ochrany proti preklzu generátora *84*
Tab. 30 - Nastavenie prepäťovej ochrany generátora *86*
Tab. 31 - Nastavenie podpäťovej ochrany generátora *87*
Tab. 32 - Nastavenie zemnej ochrany rotora *88*

Tab. 33 - Nastavenie zemnej ochrany statora *89*
Tab. 34 - Nastavenie podfrekvenčnej a nadfrekvenčnej ochrany generátora *90*

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Označovanie veličín

V tejto diplomovej práci sú:

- Veličiny v skalárnom tvare písané kurzívou (napr. rezitancia X)
- Veličiny v komplexnom tvare písané kurzívou a podtrhnuté (napr. impedancia $\underline{Z}$)
- Označenie veľkými písmenami je väčšinou používané pre veličiny vo fyzikálnych jednotkách (napr. skutočná reaktancia X [Ω])
- Označenie malými písmenami je väčšinou používané pre veličiny v pomerných jednotkách (napr. pomerná reaktancia x [-])

Pre jednotlivé zložkové sústavy sa používa index v zátvorke umiestnený vpravo dole, a to:

- (1) - pre súslednú sústavu
- (2) - pre spätnú sústavu
- (0) - pre nulovú sústavu

Pre rozlíšenie druhu skratu sa používa index bez zátvorky umiestnený vpravo dole, a to:

- 3 - pre trojfázový skrat
- 2 - pre dvojfázový skrat
- 2E - pre zložku dvojfázového zemného skratu, ktorá tečie do zeme
- E2E - pre zložku dvojfázového zemného skratu, ktorá tečie medzi fázami
- 1E - pre jednofázový skrat

Pre rozlíšenie maximálnych a minimálnych hodnôt, index bez zátvorky umiestnený vpravo dole a to:

- MAX - pre maximálne hodnoty
- MIN - pre minimálne hodnoty

Pre rozlíšenie o aké elektrické zariadenie ide sa používa index bez zátvorky umiestený vpravo dole a to:

- TG - pre hlavné generátory
- PG - pre pomocné generátory
- T - pre transformátory
- Q - pre sieťové napájače
- V - pre vedenia a káble

Použité symboly

A	-	začiatočná hodnota jednosmernej zložky $i_{d.c.}$ [A]
$\underline{a}$	-	operátor natočenia [-]
c	-	napäťový súčiniteľ [-]
c_{max}	-	napäťový súčiniteľ pre maximálne skratové prúdy [-]
c_{min}	-	napäťový súčiniteľ pre minimálne skratové prúdy [-]
d	-	geometrická stredná vzdialenosť medzi vodičmi či stredom zväzku [m]
f	-	frekvencia [Hz]
$I_{(2)}$›	-	maximálna trvale dovolená hodnota spätnej zložky statorového prúdu [A]
I_{Alarm}	-	hodnota prúdu pre vydanie varovného signálu [A]
I_b	-	súmerný skratový vypínací prúd [A]
I_{EE}›	-	prúd výstražného stupňa zemnej ochrany rotora [A]
I_{EE}››	-	prúd vypínacieho stupňa zemnej ochrany rotora [A]
I_k	-	ustálený skratový prúd [A]
$I_k^{''}$	-	počiatočný súmerný rázový skratový prúd [A]
I_{Max}	-	maximálny konštantný prúd preťaženia [A]
I_{nG}	-	menovitý prúd generátora [A]
I_{nPG}	-	menovitý prúd pomocného generátora [A]
I_{nTG}	-	menovitý prúd hlavného generátora [A]
I_{nT}	-	menovitý prúd transformátora [A]
I_{nBG}	-	menovitý prúd budenia generátora [A]
$I_{PTPprim}$	-	menovitý prúd primárnej strany PTP [A]
I_{PTPsek}	-	menovitý prúd sekundárnej strany PTP [A]
I_{th}	-	ekvivalentný otepľovací skratový prúd [A]
I›	-	maximálna prípustný prevádzkový prúd pre nadprúdovú ochranu [A]
I››	-	štartovací prúd pre nadprúdovú ochranu zo strany siete [A]
$i_{d.c.}$	-	jednosmerná zložka skratového prúdu [A]
i_k	-	nesúmerný skratový prúd [A]
$i_k^{'}$	-	prechodná (tranzitná) zložka skratového prúdu [A]
$i_k^{''}$	-	rázová (subtranzitná) zložka skratového prúdu [A]
i_{ks}	-	súmerný skratový prúd [A]
i_{ku}	-	ustálená zložka skratového prúdu [A]
i_p	-	nárazový skratový prúd [A]
K_F	-	konštanta nesymetrie alternátora [s]
K	-	korekčný súčiniteľ pre impedancie [-]
k_R	-	dosah ochrannej zóny [%]
k_F	-	maximálne dovolené preťaženie generátora v prevádzke [-]
k_{TF}	-	maximálne dovolené preťaženie stojaceho generátora [-]
l_V	-	dĺžka vedenia [m]
m	-	činiteľ pre tepelné účinky jednosmernej zložky [-]
n	-	činiteľ pre tepelné účinky striedavej zložky [-]
n_V	-	počet vodičov vo zväzku [-]
p_{T10}	–	prevod transformátora T10

P_{knT}	-	menovité straty transformátora nakrátko [W]
P_n	-	menovitý činný výkon [W]
q_n	-	menovitý prierez [mm^2]
R	-	rezistancia [Ω]
R_E	-	izolačný odpor [Ω]
R_{20}	-	rezistancia pri teplote 20 °C [Ω]
r	-	polomer jednoduchého vodiča [m]
S_n	-	menovitý zdanlivý výkon [VA]
S_v	-	vzťažný zdanlivý výkon [VA]
T_{Cd}	-	čas potrebný na schladenia zariadenia z teploty pri poruche na počiatočnú [s]
$T_{d.c}$	-	časová konštanta jednosmernej zložky skratového prúdu [s]
T_k	-	doba trvania skratu [s]
$T_k^{'}$	-	časová konštanta prechodnej zložky skratového prúdu
$T_k^{''}$	-	časová konštanta rázovej zložky skratového prúdu [s]
$T_{I_DIFF›}$	-	čas vybavenia rozdielovej ochrany pre I_{-DIFF}› [s]
$T_{I_DIFF››}$	-	čas vybavenia rozdielovej ochrany pre I_{-DIFF}›› [s]
$T_{I›}$	-	doba časového oneskorenia nadprúdovej ochrany [s]
$T_{I››}$	-	doba časového oneskorenia nadprúdovej ochrany zo strany siete [s]
$T_{U‹}$	-	doba časového oneskorenia prvého stupňa podpäťovej ochrany [s]
$T_{U‹‹}$	-	doba časového oneskorenia druhého stupňa podpäťovej ochrany [s]
$T_{U›}$	-	doba časového oneskorenia prvého stupňa prepäťovej ochrany [s]
$T_{U››}$	-	doba časového oneskorenia druhého stupňa prepäťovej ochrany [s]
T_{Warn}	-	čas vydaniu varovného signálu ochrany pri nesymetrii [s]
T_{Z1}	-	časové oneskorenie prvého stupňa podimpedančnej ochrany [s]
T_{Z1B}	-	časové oneskorenie externe riadeného stupňa podimpedančnej ochrany [s]
T_{Z2}	-	časové oneskorenie druhého stupňa podimpedančnej ochrany [s]
t_{max}	-	maximálna doba prevádzky stroja pri nesymetrickej záťaži [s]
U_n	-	menovité napätie [V]
U_{nG}	-	menovité napätie generátora [V]
U_{nTG}	-	menovité napätie hlavného generátora [V]
U_{nQ}	-	menovité napätie v bode pripojenia sieťového napájača [V]
$U_{PTNprim}$	-	menovité napätie primárnej strany PTN [V]
U_{PTNsek}	-	menovité napätie sekundárnej strany PTN [V]
U_v	-	vzťažné napätie [V]
$U‹$	-	najnižšie dovolené prevádzkové napätie [V]
$U‹‹$	-	napätie druhého stupňa podpäťovej ochrany [V]
$U›$	-	napätie prvého stupňa prepäťovej ochrany [V]
$U››$	-	napätie prvého stupňa prepäťovej ochrany [V]
u_{kT}	-	menovité napätie nakrátko transformátora [%]
u_{Rn}	-	činná zložka napätia transformátoru nakrátko [%]
X	-	reaktancia [Ω]
X_d	-	pozdĺžna synchrónna reaktancia generátora [Ω]
X_q	-	priečna synchrónna reaktancia generátora [Ω]
$X_d^{'}$	-	pozdĺžna prechodová reaktancia generátora [Ω]
$X_d^{''}$	-	pozdĺžna rázová reaktancia generátora [Ω]

$X_q^{'}$	-	priečna prechodová reaktancia generátora [Ω]
$X_q^{''}$	-	priečna rázová reaktancia generátora [Ω]
x	-	pomerná reaktancia [%]
x_d	-	pomerná synchrónna reaktancia [%]
$x_d^{''}$	-	pomerná rázová reaktancia [%]
$x_d^{'}$	-	pomerná prechodová reaktancia [%]
Z	-	impedancia [Ω]
Z_1	-	impedancia prvého stupňa podimpedančnej ochrany [Ω]
Z_{1B}	-	impedancia externe riadeného stupňa podimpedančnej ochrany [Ω]
Z_2	-	impedancia druhého stupňa podimpedančnej ochrany [Ω]
$\underline{Z}_{(0)}$	-	netočivá impedancia v mieste skratu [Ω]
$\underline{Z}_{(1)}$	-	súsledná impedancia v mieste skratu [Ω]
$\underline{Z}_{(2)}$	-	spätná impedancia v mieste skratu [Ω]
Z_a	-	impedancia a charakteristiky ochrany proti preklzu generátora [Ω]
Z_b	-	impedancia b charakteristiky ochrany proti preklzu generátora [Ω]
Z_c	-	impedancia c charakteristiky ochrany proti preklzu generátora [Ω]
Z_d	-	impedancia d charakteristiky ochrany proti preklzu generátora [Ω]
$\underline{Z}_k$	-	výsledná skratová impedancia v mieste skratu [Ω]
$\underline{Z}_n$	-	impedancia pri menovitom napätí [Ω]
$\underline{Z}_p$	-	prepočítaná impedancia [Ω]
λ	-	súčiniteľ pre výpočet ustáleného skratového prúdu [-]
μ	-	súčiniteľ pre výpočet súmerného skratového prúdu [-]
κ	-	súčiniteľ pre výpočet nárazového skratového prúdu [-]
τ	-	termálna časová konštanta generátora [s]
Θ_{Alarm}	-	percentuálna hodnota oteplenia pre vydanie varovného signálu [%]
θ_e	-	teplota vodiča na konci skratu [°C]
φ	-	uhol fázového posunu [°]
ρ	-	rezistivita vodiča [Ω.mm^2/m]

Použité skratky

VE	-	vodná elektráreň
PTN	-	prístrojový transformátor napätia
PTP	-	prístrojový transformátor prúdu
RS	-	označenie bistabilného klopného obvod typu reset set

1 ÚVOD

Premena energie vody na elektrickú patrí k obnoviteľným, ekologicky nezávadným a vysoko účinným zdrojom elektrickej energie. V súčasnosti sú kladené čoraz väčšie nároky na jej bezporuchovú prevádzku, bezpečnosť osôb aj samotných elektrických zariadení. Celkový stav a vek elektrických ochrán, riadiacich a elektrických zariadení boli podnetom k modernizácii vodnej elektrárne (VE) Lipno I. Účelom tejto modernizácie je zaistenie bezporuchového stavu a bezpečnej prevádzky, VE Lipno I. a Lipno II., ktoré sú súčasťou Vltavskej kaskády a zabezpečujú sekundárnu reguláciu, 5 minútovú zálohu a 15 minútovú zálohu. Okrem toho je VE schopná poskytovať aj ďalšie služby ako ostrovná prevádzka, black start, reguláciu napätia a iné, ak by bol prejavený záujem zo strany prevádzkovateľa siete 110 kV.

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je skratový výpočet na minimálne a maximálne skratové prúdy VE Lipno I a výpočet nastavenia elektrických ochrán hlavných generátorov. VE Lipno I prechádza rekonštrukciou výrobných zariadení elektrickej energie, riadiacich zariadení a elektrických ochrán. Elektrické ochrany inštalované vo VE Lipno I. sú Siemens verzie 2, ktorých nasadzovanie skončilo v roku 1998 a v súčasnej dobe sú už bez podpory výrobcu. Ochrany nie je možné ďalej rozvíjať, z dôvodu nedostupnosti náhradných dielov.

Teoretická časť sumarizuje informácie o elektrických generátoroch, ich možných poruchách a spôsoboch chránenia proti škodám, ktoré môžu vzniknúť týmito poruchami. Ďalej je v teoretickej časti zhrnutý skratový výpočet na minimálne a maximálne skratové prúdy podľa platnej normy ČSN EN 60909-0, ktorá sa zaoberá výpočtom skratových prúdov.

Praktická časť obsahuje konkrétny skratový výpočet so skratmi na rôznych miestach VE pomocou výpočtového programu NetCalc a pre porovnanie aj ručný výpočet. Ďalšia kapitola praktickej časti tejto práce sa zaoberá výpočtom a popisom nastavenia elektrických ochrán hlavných generátorov tejto VE.

2 VODNÉ DIELO LIPNO

Vodné dielo Lipno sa nachádza v Juhočeskom kraji asi 30 kilometrov južne od Českého Krumlova. Je súčasťou Vltavskej kaskády a jeho nádrž má rozlohu asi 50 km^2 čo ju robí najväčším umelým jazerom na území Českej republiky. Vodná nádrž bola budovaná v rokoch 1953 až 1958 z vodohospodárskych a energetických dôvodov. Cieľom stavby bolo využitie spádu ako zdroja špičkovej a regulačnej elektrickej energie, ochrana pred povodňami, ovplyvnenie zimného prietokového režimu, zlepšenie hygienických podmienok v rieke Vltava pod vodným dielom, dodávka vody pre obec Loučovice a papiereň v tejto obci. Okrem toho sa táto vodná nádrž využíva aj k rekreácii, rybolovu a lodnej doprave.

K zadržaniu vody slúži priehradová hrádza ktorá je 296 metrov dlhá a 25 metrov vysoká a je kombináciou zemnej a gravitačnej hrádze. Maximálny objem vody ktorá sa môže v nádrži nachádzať je 306 miliónov metrov kubických a reguláciou jej odtoku cez základové výpuste sa zväčšujú minimálne prietoky, obmedzujú povodňové špičky a reguluje výkon v ostatných vodných elektrárňach Vltavskej kaskády. Samotná VE sa nachádza v blízkosti hrádze v podzemnej kaverne, umiestnenej v hĺbke 160 metrov pod terénom. Jej rozmery sú 65 x 22 metrov a výška 37 metrov. Do prevádzky bola uvedená v roku 1959. Voda je k turbínam privádzaná cez vtokový objekt dvoma tlačnými šachtami z ocele s priemerom 4,5 metra a dĺžkou 160 m. Na odvod slúži 3,6 kilometra dlhý odpadový tunel so šírkou 8,4 metra a výškou 7,8 metra, ktorý ústi do vyrovnávacej nádrže Lipno II. Personál a technologické zariadenie sa do podzemia dostanú pomocou šikmého tunela s dĺžkou 200 metrov [1][2].

Obr. 1 - Hrádza vodnej nádrže Lipno

Energetický význam VE Lipno I. spočíva vo výrobe lacnej, ekologicky nezávadnej, špičkovej elektrickej energie ktorá je využívaná pre reguláciu výkonu celkovej celoštátnej elektrizačnej sústavy. Elektráreň je diaľkovo ovládateľná z centrálneho dispečingu VE v Štechoviciach a je schopná nabehnúť na plný výkon do 150 sekúnd a preto je ňou možné ovplyvniť bilanciu elektrizačnej sústavy Českej republiky. V podzemí VE Lipno I. sa nachádzajú dve plno automatické sústavy vybavené Francisovými turbínami s 24 rozvádzacími lopatkami a potrebné elektrické zariadenia. Maximálny prietok cez jednu turbínu je 46 m^3 vody za sekundu. Inštalovaný výkon jednej sústavy VE Lipno I. je 69,5 MW a elektrická energia vyrobená generátormi s napätím 15 kV sa vyvádza pomocou káblov do nadzemných transformátorov umiestených vo vonkajšej rozvodni, kde je transformovaná na napätie 110 kV. Z tejto rozvodne vedú štyri linky 110 kV do

rozvodne Dasný pri Českých Budejoviciach. V rozvodni sa nachádzajú dva transformátory 110/22 kV, ktoré sú vyvedené do rozvodne 22 kV. Táto rozvodňa zásobuje elektrickou energiou celé Lipensko.

Obr. 2 - Budova prevádzky a rozvodňa 110 kV VE Lipno I.

Neoddeliteľnou súčasťou VE je prietoková VE Lipno II. ktorá slúži hlavne k vyrovnaniu odtoku zo špičkovej VE Lipno I. Z tohto dôvodu bola vybudovaná vodná nádrž s rovnakým názvom o objeme 1,68 milióna metrov kubických a 11,5 metra vysoká hrádza. Táto hrádza je opäť kombinovaná, z časti zemná a z časti betónová. Lipno II. je osadená jedným agregátom skladajúceho sa z Kaplanovej turbíny o maximálnej pohltivosti 20 m^3 za sekundu a generátoru s výkonom 1,5 MW [1][2].

3 GENERÁTORY

Generátory sú točivé elektrické stroje, ktoré patria k jedným z najdôležitejších a najvýznamnejším zariadení v elektrárni. Slúžia k premene mechanickej energie na elektrickú na základe princípu elektromagnetickej indukcie. Vyrobená elektrická energia je pomocou prenosových sústav a transformátorov distribuovaná ku konečným užívateľom. Generátory je možné rozdeliť podľa princípu činnosti a konštrukcie na synchrónne a asynchrónne.

3.1 Synchrónne generátory

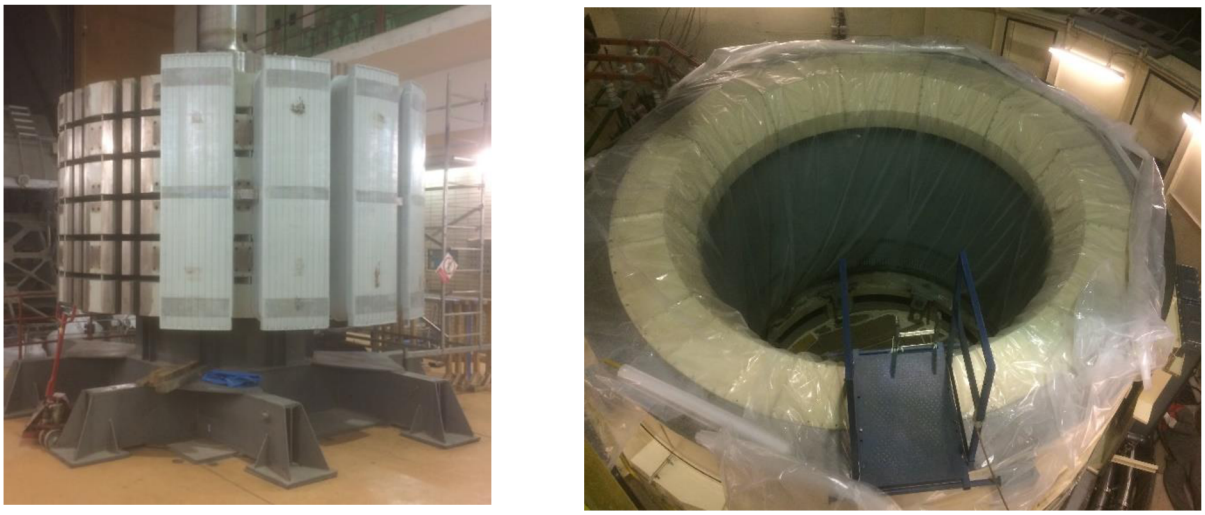
V elektrárňach sa pri výrobe striedavej elektrickej energie používajú hlavne synchrónne generátory, ktoré sa nazývajú aj alternátory. Synchrónny stroj je tvorený dvoma hlavnými časťami, statorom a rotorom. Obe časti sú vybavené vinutím, ktoré je umiestnené v drážkach rozmiestnených ekvidistančne pozdĺž jeho vnútorného obvodu. Obvykle je v statore alternátora umiestnené striedavé vinutie zložené z troch cievok zodpovedajúce jednotlivým fázam a v rotore zase budiace vinutie napájané jednosmerným prúdom. Ich názov je odvodený od toho, že rotor sa otáča rovnakou rýchlosťou ako točivé magnetické pole statoru [3]. Z hľadiska otáčok a s nimi súvisiacimi prevedeniami sa členia na 2 základné typy. A to na:

- Turboalternátory
  - Stroje s hladkým rotorom
  - Malý počet pólov (obvykle 2 alebo 4)
  - Poháňané väčšinou rýchlo bežiacimi parnými turbínami
  - Vyznačujú sa menším priemerom a väčšou osovou dĺžkou
  - Rotor má tvar plného valca, do ktorého obvodu sú vyfrézované drážky a v nich uložené budiace vinutie
- Hydroalternátory
  - Rotor s vyniknutými pólmi
  - Veľký počet pólov (až 80)
  - Poháňané väčšinou pomaly bežiacimi turbínami
  - Typickým znakom je veľký priemer a malá osová dĺžka

Keďže vo VE sa nachádzajú väčšinou pomaly bežiace turbíny sú hydroalternátory ideálnym zdrojom elektrickej energie.

3.1.1 Hydroalternátory VE Lipno

Vo VE Lipno I. sú umiestnené dva hlavné generátory TG1 a TG2 so zdanlivým výkonom 77,2 MVA. Jedná sa o hydroalternátory s menovitými otáčkami 375 otáčok za minútu, čo znamená, že majú 8 pólových dvojíc. Oba generátory sú po generálnej oprave, TG2 prešiel opravou v rokoch 2013/2014 a TG1 prešiel generálnou opravou v rokoch 2015-2017. Generálnou opravou boli zvýšené menovité parametre z hodnoty zdanlivého výkonu 71,4 MVA na hodnotu už spomínanú vyššie.



Obr. 3 - Rotor a stator hlavného generátora VE Lipno I. počas rekonštrukcie

Okrem týchto generátorov sú vo VE ďalšie dva pomocné generátory PG1 a PG2 (Obr. 4). Sú umiestnené na spoločných hriadeľoch s hlavnými generátormi a slúžia v čase prevádzky VE na napájanie vlastnej spotreby. Zdanlivý výkon týchto generátorov je 600 kVA. Súčasťou VE je aj alternátor umiestený v povodí Vltavy.

Obr. 4 - Pomocný generátor VE Lipno I.

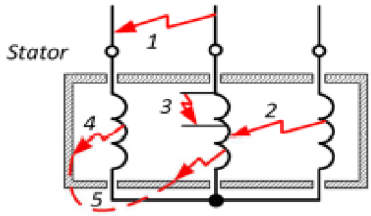
3.2 Poruchy generátorov

Pri prevádzke generátora môže dôjsť k jeho poruche a následne k poškodeniu alebo úplnému zničeniu elektrického stroja, čo môže mať okrem škôd spôsobených na zariadení vplyv aj na prevádzku celej elektrizačnej sústavy. Preto by mal byť generátor v okamihu zistenia poruchy vyradený z prevádzky. Poruchy synchrónnych generátorov je možné rozdeliť podľa [4] do dvoch skupín a to na izolačné poruchy a abnormálne podmienky chodu stroja.

3.2.1 Izolačné poruchy

Poruchy statora

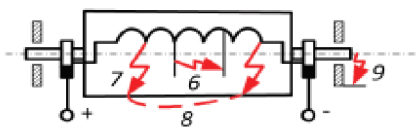
1. Vnútorný skrat
2. Vonkajší skrat
3. Závitový skrat
4. Zemné spojenie
5. Druhé zemné spojenie



Obr. 5 - Izolačné poruchy statora [4]

Poruchy rotora

6. Závitový skrat
7. Zemné spojenie
8. Druhé zemné spojenie



Obr. 6 - Izolačné poruchy rotora [4]

3.2.2 Abnormálne podmienky chodu

Poruchy statora

9. Preťaženie
10. Prepätie
11. Samobudenie
12. Podsynchrónne otáčky

Poruchy rotora

13. Strata budenia
14. Nesúmerné zaťaženie generátoru

Poruchy pohonného zariadenia

15. Spätný tok výkonu
16. Nadsynchrónne otáčky
17. Posuny rotoru
18. Kmitanie stroja
19. Strojné poruchy turbíny

3.3 Chránenie generátorov

Systém chránenia generátora musí byť podľa [4] navrhnutý tak aby pri vzniku poruchy zabránil škodám na zariadení. V praxi to znamená, že väčšina vnútorných izolačných porúch generátora musí byť odpojená ihneď, vonkajšie poruchy alebo abnormálne podmienky chodu je možné tolerovať po určitú dobu prevádzky do odstavenia tj. odpojenia od siete, zareagovania strojových ochrán a podobne.

Synchrónny generátor sa vybavuje súborom ochrán, ktorý má za úlohu alternátor buď odstaviť z prevádzky, ak je ohrozený stroj alebo môže byť narušená stabilita elektrizačnej sústavy alebo len signalizovať druh poruchy, ak nie je ohrozený chod stroja ani sústavy.

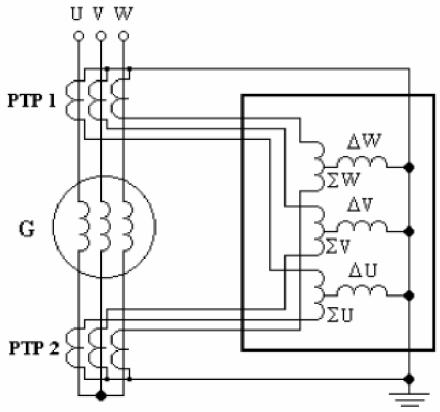
Na chránenie generátorov sa podľa [4],[5] používajú nasledujúce ochrany

- Rozdielová ochrana
- Zemná ochrana statora
- Zemná ochrana rotora
- Nadprúdová skratová ochrana
- Ochrana proti prúdovému preťaženiu
- Spätná wattová ochrana
- Ochrana pri nesymetrickom zaťažení
- Nadpäťová ochrana
- Podpäťová ochrana
- Ochrana proti samobudeniu
- Ochrana proti strate budenia
- Ložiskové prúdy
- Podfrekvenčná a nadfrekvenčná ochrana
- Ochrana proti strate stability (synchronizmu)

3.3.1 Rozdielová ochrana

Rozdielová ochrana sa využíva na zachytenie vnútorných skratov generátora. Podľa [5] je ich možné rozdeliť na pozdĺžne rozdielové ochrany a priečne rozdielové ochrany.

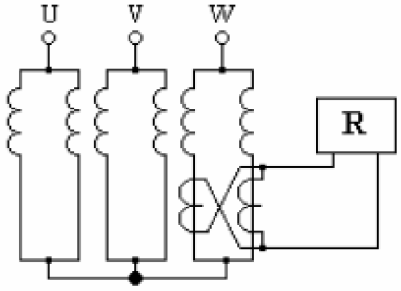
Pozdĺžna rozdielová ochrana - porovnáva vstupné a výstupné prúdy daného chráneného objektu. Oblasť chránenia je vymedzená prístrojovými transformátormi prúdu (PTP 1 a PTP 2), ktoré sú zdrojom informácii pre ochranu. Princíp zapojenia pozdĺžnej rozdielovej ochrany je zobrazený na Obr. 7.



Obr. 7 - Schéma zapojenia pozdĺžnej rozdielovej ochrany

Pri normálnej prevádzke sú prúdy na vstupe aj výstupe alternátora rovnaké. Rozdielový prúd je rovný nule. Ak nastane porucha vo vnútri chráneného objektu, vznikne nerovnováha prúdov, rozdielový prúd tečúci meracím zariadením nebude nulový a koncový člen ochrany zapôsobí na vypínač, ktorý má za úlohu vypnúť tj. odpojiť alternátor (chránený objekt) od siete. Ochrana musí pôsobiť okamihovo a výkonový vypínač vypína celú sústavu, dôjde k odbudeniu alternátora a zastaveniu prívodu pohonnej látky do turbíny. V praxi je táto ochrana používaná ku chráneniu iba samotného alternátora alebo sústavy (blok alternátora + transformátor). Aby nedošlo pri vonkajšom skrate vplyvom nesúmernosti k chybnému zareagovaniu ochrany, býva vybavená kompenzačným článkom, ktorý blokuje ochranu, ak sa porucha nenachádza vo vnútri chráneného objektu.

Priečna rozdielová ochrana - podľa [5] princíp tejto ochrany spočíva v tom, že porovnáva prúdy dvoch zhodných objektov, ktoré pracujú pri rovnakých podmienkach paralelne. Chráneným objektom môžu byť napríklad paralelne vetvy statorového vinutia synchrónneho generátora ak sú uzly paralelných vetví vyvedené. Na Obr. 8 je zapojenie priečnej rozdielovej ochrany ako závitovej ochrany statorového vinutia alternátora s vyvedenými paralelnými vetvami statora.



Obr. 8 - Zapojenie priečnej rozdielovej ochrany

3.3.2 Zemná ochrana statoru alternátora

Zemná ochrana je veľmi dôležitým prvkom v súbore ochrán bloku. Hlavnou príčinou väčšiny závažných porúch alternátorov býva podľa [4] poškodenie izolácie vinutia. Tieto poruchy vo väčšine prípadov začínajú ako zemné spojenie alebo medzizávitový skrat, ktorý postupne v zemné spojenie prechádza. Podľa spôsobu uzemnenia nuly statorového vinutia môžu nastať tieto prípady:

a) Generátor má uzemnený stred
- Nula statoru je so zemou spojená cez veľkú impedanciu, prúdy zemného spojenia dosahujú hodnôt do 10 A
- Nula statoru je so zemou spojená cez nízku impedanciu, prúdy zemného spojenia dosahujú hodnôt od 50 A do 600 A
- Nula statoru je spojená priamo so zemou

b) Generátor nemá uzemnený stred, pracuje do izolovanej sústavy bez uzemneného stredu

c) Generátor nemá uzemnený stred, pracuje do izolovanej sústavy s nízko impedančným uzemnením uzlu a prúdy zemného spojenia dosahujú hodnôt od 50 A do 600 A

Pri veľkých elektrárenských blokoch sa podľa [4] takmer vždy využíva zapojenie kde má generátor nulu statora spojenú so zemou cez veľkú impedanciu. Ostatné zapojenia sú používané pri malých strojoch, ktoré slúžia väčšinou ako záložné zdroje.

Pri zapojení cez veľkú impedanciu sa využíva meranie napätia alebo prúdu na impedancii, ktorá spojuje stred statorového vinutia so zemou. Ak dôjde k zemnému spojeniu na vývode generátora bude napätie na impedancii podľa [7] rovné:

$$U_{0MAX} = \frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{PTNsek}}{U_{PTNprim}} \tag{3.1}$$

kde: U_{nG} - menovité napätie generátora [V]

U_{PTNsek} - menovité napätie sekundárnej strany PTN [V]

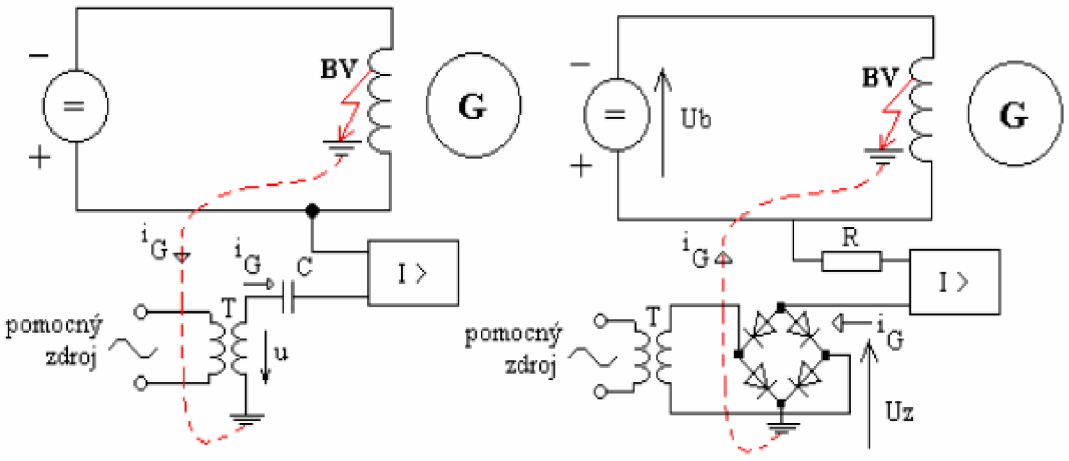
$U_{PTNprim}$ - menovité napätie primárnej strany PTN [V]

Ak postupujeme po statorovom vinutí od vývodu smerom k uzlu hodnota prúdu zemného spojenia klesá až k nule. Nie je možné chrániť oblasti statorového vinutia, ktoré sú blízko stredu, lebo vypočítaná hodnota napätia je menšia ako chyba PTN a preto. V praxi teda platí že týmto typom ochrany je možné chrániť asi 90 ÷ 95 % statorového vinutia. Ku kompletnému chráneniu statorového vinutia sa používajú 100 % zemné statorové ochrany. Podľa [4] sa používa viacero princípov, jedným z najvyužívanejších je injektáž subharmonických napätí do uzla generátora a vyhodnocovanie prúdu rovnakej frekvencie. Ďalší princíp je založený na rozložení tretej harmonickej napätia na statorovom vinutí.

3.3.3 Zemná ochrana rotoru alternátora

Pri poškodení izolácie budiaceho vinutia a jeho spojením so železom rotoru dôjde k vzniku zemného spojenia alternátora. Podľa [5] rozlišujeme jednoduché zemné spojenie rotora alternátora a druhé zemné spojenie

Pre zachytenie prvého (jednoduchého) zemného spojenia rotora sa používa metóda striedavej alebo jednosmernej superpozície (Obr. 9). K jednosmernému budiacemu obvodu je pripojený pomocný striedavý obvod s prúdovým relé, cez ktoré pri výskyte poruchy preteká prúd.



Obr. 9 - Striedavá a jednosmerná superpozícia

Pri prvom zemnom spojení rotora alternátora nie je jeho prevádzka ohrozená ale alternátor je nutné odstaviť už pri ňom, z dôvodu že druhé zemné spojenie je veľmi nebezpečné a kým dôjde k odbudeniu stroja a dozneniu magnetických polí môžu vzniknuté radiálne sily spôsobiť veľmi ťažkú haváriu.

3.3.4 Nadprúdová skratová ochrana

Táto ochrana sa používa pri chránení proti vonkajším skratom mimo vinutia stroja a súčasne plní funkciu záložnej ochrany pre rozdielovú ochranu vnútorných skratov. Jej hlavnou úlohou je chrániť alternátor pri skratoch na prípojniciach a z nich odchádzajúcich vedení. Inštaluje sa nadprúdová ochrana s časovo nezávislou charakteristikou a býva blokovaná podpäťovým článkom. Aby ochrana vypla musí dôjsť k zvýšeniu prúdu mimo vinutia stroja a súčasne aj k poklesu napätia na svorkách generátora aby porucha bola vyhodnotená ako blízky skrat. Ak nedôjde k zareagovaniu podpäťovej ochrany skratová ochrana nereaguje, pretože sa jedná o vzdialený skrat alebo preťaženie [6].

3.3.5 Ochrana proti prúdovému preťaženiu

Stroje sú konštruované na menovitý prúd pri ktorom je stroj bezpečne chladený a teplo vzniknuté stratami je odvádzané. Ak ale stroj pracuje s väčším zaťažením, dodáva väčší prúd ako je menovitý I_n tak sa jedná o preťažený stav a dochádza k akumulácii tepla vo vinutí, čo je nežiadúci jav. To môže mať za následok urýchlenie starnutia izolácie a pri veľkom oteplení môže dôjsť až k jej poškodeniu a následne skratu. Stroje sú konštruované tak aby krátkodobé preťaženie zvládali jednoducho. Pri takomto malom preťažení nedochádza k vypnutiu stroja, ochrana preťaženie signalizuje obsluhe, ktorá ho má za úlohu odľahčiť generátor. Používajú sa ochrany s 1,1 až 1,3 násobkom menovitého prúdu [6].

3.3.6 Ochrana proti spätnému výkonu

Táto ochrana slúži podľa [4] na zamedzenie prechodu stroja z generátorového režimu do režimu motorického pre alternátory veľkých elektrárenských blokov. Ak sa synchrónny generátor nachádza v motorickom režime odoberá zo siete činný výkon, roztáča celú turbosústavu a ohrozuje pritom lopatky na turbíne. V takom prípade je nutné generátor ihneď odpojiť zo siete. Používaná ochrana sa nazýva wattová a meria činný výkon idúci do stroja zo sústavy. Parametrom podľa ktorého ochrana vyhodnocuje poruchový stav je pomer spätného výkonu P_{rev} k menovitému výkonu generátora S_{nG}. Ochrana má časovo závislú charakteristiku aby došlo k vylúčeniu pôsobenia ochrany pri kolísaní výkonu.

3.3.7 Ochrana pri nesymetrickej záťaži

Spätná zložka statorového prúdu vyvoláva v rotorovom vinutí prúdy s dvojnásobnou frekvenciou siete, ktoré spôsobujú oteplenie rotorového vinutia a môžu viesť k jeho poškodeniu. Zdroj [7] udáva dobu počas ktorej je možné stroj s takouto poruchou prevádzkovať a vypočíta sa ako:

$$t_{max} = \frac{K_F}{\left(\frac{I_{(2)}}{I_{nG}}\right)} \tag{3.2}$$

kde: K_F - konštanta nesymetrie alternátora [-], je udávaná výrobcom
$I_{(2)}$ - spätná zložka statorového prúdu generátora [A]
I_{nG} - menovitý prúd generátora [A]

Generátory sú ale samy o sebe zdrojom spätnej zložky napätia, čo vyvoláva určitý podiel spätnej zložky prúdu aj pri bežnej prevádzke a vtedy nemôže dôjsť k zapôsobeniu ochrany. Preto výrobca generátora udáva maximálnu trvalo dovolenú hodnotu spätnej zložky prúdu. Ochrana je teda nastavená ako nadprúdová, časovo závislá s charakteristikou $t_{max} = f(I_2)$ s maximálnou trvalou hodnotou.

3.3.8 Nadpäťová ochrana

Nadpäťová ochrana chráni generátor podľa [4] pred negatívnymi účinkami zvýšeného napätia, ktoré spôsobuje poškodenie a rýchle starnutie izolácie, prídavné straty aj zvýšenú možnosť vzniku skratov. Vyhodnocujú sa fázové aj združené napätia. Charakteristika býva dvojstupňová s nastavenými limitmi napätia pre pomalé a rýchle vybavenie.

3.3.9 Podpäťová ochrana

Tento typ ochrany býva podľa [7] používaný výhradne pri veľkých generátoroch a jej funkcia spočíva v zabránení nestabilného chovania stroja, ktoré môže vzniknúť vplyvom zníženého napätia.

3.3.10 Ochrana proti strate budenia

Strata budenia predstavuje riziko poškodenia generátora. Môže k nej dôjsť v dôsledku výpadku napájania, poškodenia budiča alebo skratu na budiacom vinutí. Výpadok budenia má za následok, že prúd budiaceho vinutia klesá exponenciálne s časovou konštantou vinutia k nule. Úmerne k tomu klesá aj vnútorné elektromotorické napätie stroja a elektromagnetická väzba medzi

statorom a rotorom. Prejavuje sa to na svorkách generátora postupným znižovaním jalového výkonu až k medzi podbudenia, pri ktorej je elektromagnetická väzba taká slabá, že dôjde k strate synchronizmu a generátor prechádza do asynchrónneho chodu. Ochrana ktorá má za úlohu predísť tejto situácii pracuje na princípe dvoj zónovej distančnej ochrany [4].

3.3.11 Ochrana proti samobudeniu

K samobudeniu môže podľa [5] dôjsť, ak alternátor napája veľkú kapacitnú záťaž, ktorou môže byť napríklad dlhé vedenie naprázdno. Dochádza k zvyšovaniu svorkového napätia stroja. Ako ochrana proti samobudeniu sa používa prepäťové relé, ktoré je blokované minimálnym prúdom budenia.

3.3.12 Ochrana proti ložiskovým prúdom

Magnetickou neúmernosťou stroja môže podľa [5] dôjsť k vzniku napätia medzi statorom a hriadeľom rotora. Ložiskové panvy sú pri moderných strojoch izolované a v prípade poškodenia izolácie môže dôjsť k prechodu prúdu, ktorý má za následok poškodenie ložísk. Ochrana sa realizuje pomocou prevlekového transformátoru prúdu umiestneného na hriadeli stroja, ku ktorému je pripojená prúdová ochrana, ktorá sleduje nastavené medze ložiskových prúdov.

3.3.13 Podfrekvenčná a nadfrekvenčná ochrana

Sústava turbína-generátor býva navrhovaná pre trvalú prevádzku na sieťovej frekvencii. Ak je frekvencia vyššia alebo nižšia ako menovitá nepriaznivo to ovplyvňuje chod sústavy. Pri zníženej frekvencii dochádza k zvýšeným vibráciám sústavy, čo má za následok zníženie životnosti alebo zničenie lopatiek turbíny, zníženie výkonu elektromotorov na vlastnej spotrebe a zníženiu chladenia. Prevádzka pri zvýšenej frekvencii má takisto negatívne dôsledky.

Výrobcovia preto udávajú maximálnu dobu prevádzky v nadfrekvenčných a podfrekvenčných pásmach, ktoré sa nachádzajú mimo rozmedzia pre stálu prevádzku. Ak dôjde k zmene frekvenciu mimo tieto hodnoty, musí dispečer využiť reguláciu výkonu, ktorý má k dispozícii a vrátiť tak frekvenciu do daných medzí. Pre riešenie lokálnych porúch je vybudovaná sústava frekvenčných odľahčovaní záťaže. Nie je ale možné vylúčiť prechodný stav, pri ktorom môže frekvencia výrazne krátkodobo poklesnúť. Ak je systém frekvenčného odľahčovania správne nastavený dôjde k vráteniu hodnoty frekvencie do rozmedzia pre stálu prevádzku. Nastavenie tejto ochrany je niekoľko stupňové a odvodzuje sa od obmedzení daných výrobcom. Základnou požiadavkou je umožnenie dočasného poklesu frekvencie pri frekvenčnom odľahčovaní bez toho, aby došlo k neprípustným stavom z hľadiska prevádzky. Ochrana sa nastavuje tak, aby pokryla aj pásma v ktorých sa môže frekvencia pohybovať iba po určitú dobu [4].

3.3.14 Ochrana proti strate stability (synchronizmu)

Za normálnych prevádzkových podmienok majú otáčavé polia synchrónnych alternátorov rovnakú frekvenciu ako má elektrizačná sústava. Magnetické polia rotora sú fixované na točivé polia statora elektromagnetickou väzbou, ktorá má elastický charakter, čo pri malých skokoch systémových veličín umožňuje kmitanie uhlu medzi rotorom a točivým polom. Ak sú zmeny v sústave príliš veľké alebo je väzba slabá, uhol rotora voči točivému poľu statora sa nevráti do svojej pôvodnej polohy ale dôjde k preklzu tohto uhla o 360°. Vplyvom zotrvačnosti nasledujú ďalšie preklzy a rotor sa pohybuje so sklzom voči statorovému poľu. Tento jav sa chráni pomocou distančnej ochrany [7].

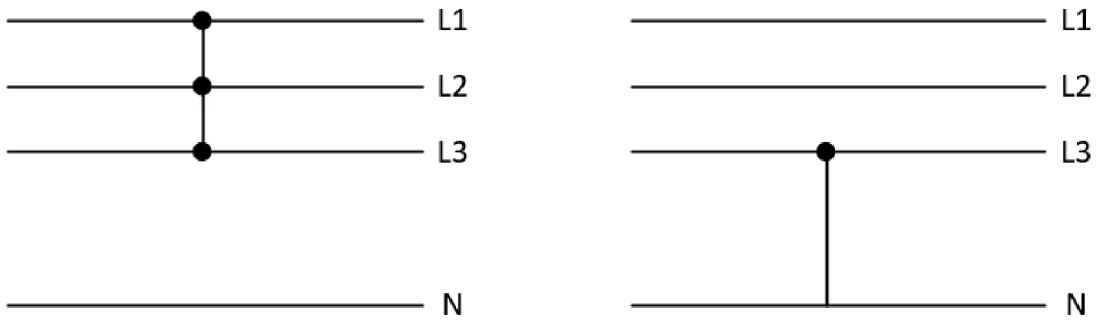
4 SKRATY

Skratovou poruchou v elektrizačnej sústave rozumieme podľa [8] elektromagnetický prechodový jav, ktorý je časovo obmedzený okamihom náhleho zmenšenia impedancie medzi krajnými vodičmi, stredným vodičom alebo zemou niektorej časti elektrizačnej sústavy a okamihom odpojenia zdroja od miesta poruchy. Tieto poruchy sú najrozšírenejšími v elektrizačnej sústave. Vznikajú poruchovým spojením fáz medzi sebou navzájom alebo so zemou v sústave s uzemneným uzlom. Dochádza tak k vzniku nežiadúcich skratových prúdov, ktoré majú za následok poškodenie alebo až úplné zničenie elektrických zariadení ale môžu spôsobiť aj úrazy či smrť osôb.

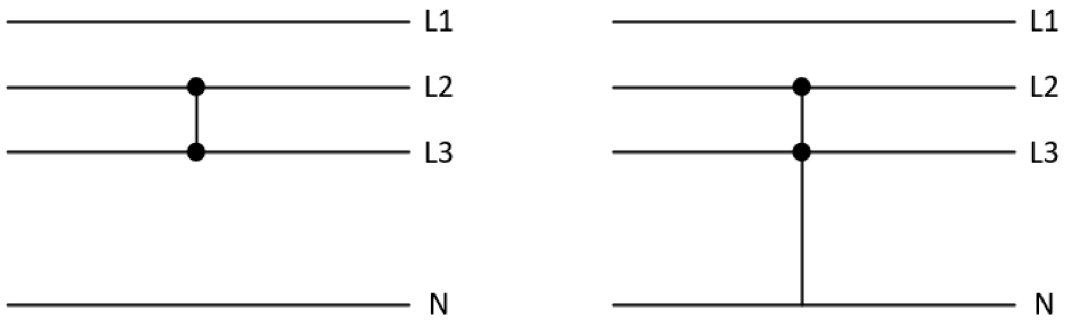
Hlavnými príčinami vzniku skratov býva chybná manipulácia s elektrickými zariadeniami, mechanické poškodenie izolácie (napr. pretrhnutie vodiča vonkajšieho vedenia, poškodenia káblu pri zemných prácach), prirodzené znehodnotenie izolácie (napr. počasie, vek) alebo poškodenie izolácie v dôsledku zvýšeného elektrického namáhania pri údere blesku alebo spínacích pochodoch [9]

Skraty je možné rozdeliť podľa [8]

1. Prechodového odporu v mieste poruchy
   - Dokonalé skraty (kovové) – so zanedbateľným prechodovým odporom
   - Nedokonalé skraty – s horiacim oblúkom, alebo inak nedokonalým stykom vodičov, ohrozujúcich okolie miesta poruchy požiarom
2. Podľa počtu spojených fáz a ich spôsobu spojenia so zemou
   - Trojfázové – súčasné spojenie všetkých troch fáz
   - Dvojfázové – spojenie dvoch fáz
   - Dvojfázové zemné – spojenie dvoch fáz v kombinácii s zemou
   - Jednofázové – spojenie jednej fázy so zemou
3. Podľa spôsobu zaťažovania trojfázových zdrojov
   - Súmerné – trojfázové
   - Nesúmerné – dvojfázové, dvojfázové zemné, jednofázové



Obr. 10 - Trojfázový a jednofázový skrat



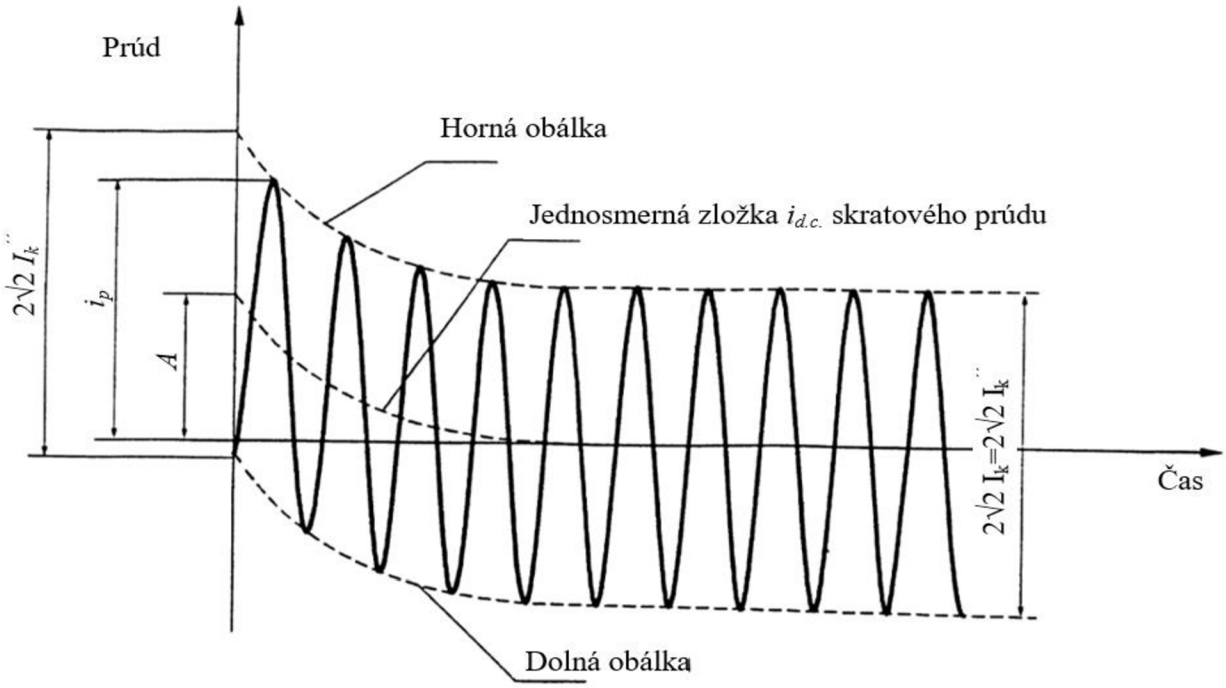
Obr. 11 - Dvojfázový a dvojfázový zemný skrat

4.1 Časový priebeh skratového prúdu

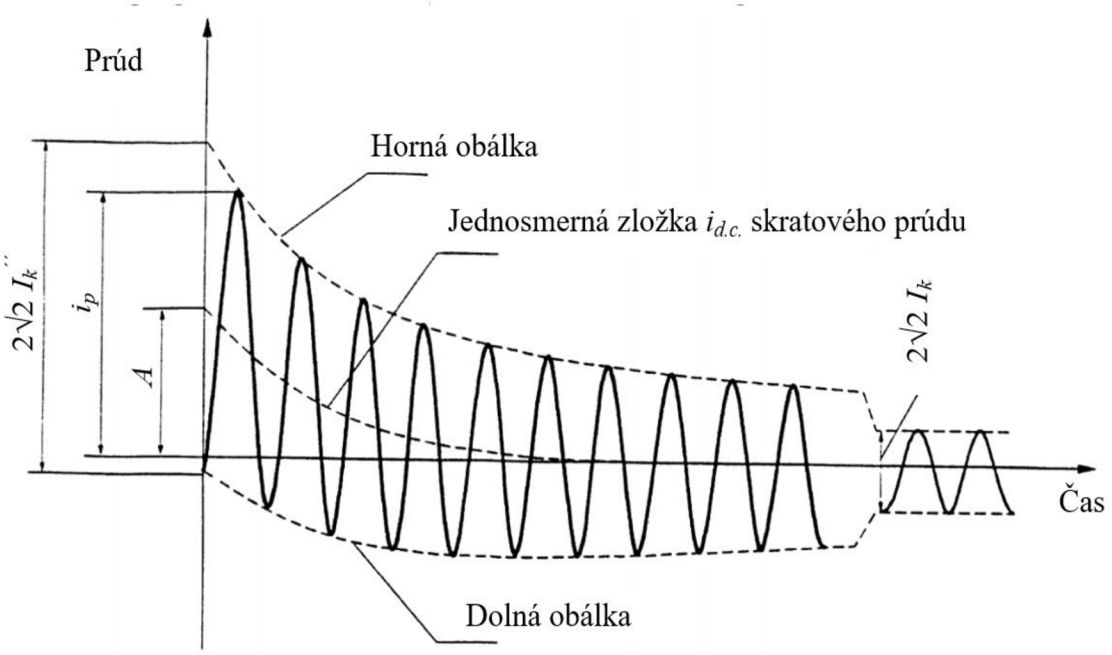
Norma ČSN EN 60909-0 ed.2 [10] rozoznáva elektricky blízky a vzdialený skrat.

Priebeh **elektricky vzdialeného skratu**, je znázornený na Obr. 12 a je to skrat, ktorého veľkosť striedavej zložky je v podstate konštantná. Vo väčšine praktických prípadov nie je jeho výpočet potrebný. Zaujíma nás hlavne hodnota nárazového skratového prúdu i_p po vzniku skratu.

Elektricky blízky skrat je podľa [11] skrat, pri ktorom príspevok aspoň jedného synchrónneho stroja k predpokladanému počiatočnému súmernému rázovému skratovému prúdu prekračuje dvojnásobok menovitého prúdu stroja, alebo skrat, pri ktorom príspevok asynchrónnych motorov prekračuje 5% počiatočného súmerného nárazového skratového prúdu I_k'' bez motorov. Jeho priebeh je znázornený na Obr. 13.



Obr. 12 - Priebeh skratového prúdu elektricky vzdialeného skratu [12]



Obr. 13 - Priebeh skratového prúdu elektricky blízkeho skratu 92[12]

kde: I_k'' - počiatočný rázový skratový prúd [A]

i_p - nárazový skratový prúd [A]

I_k - ustálený skratový prúd [A]

$i_{d.c.}$ - jednosmerná zložka skratového prúdu [A]

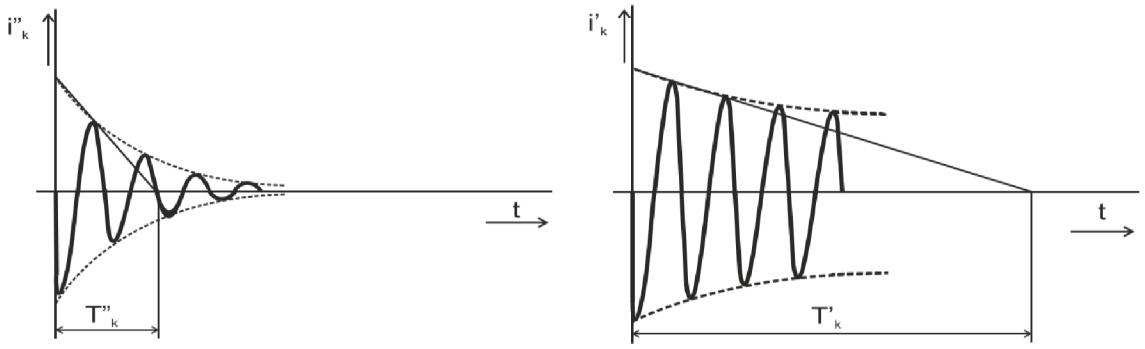
A - začiatočná hodnota jednosmernej zložky $i_{d.c.}$ [A]

4.2 Časové priebehy zložiek skratových prúdov

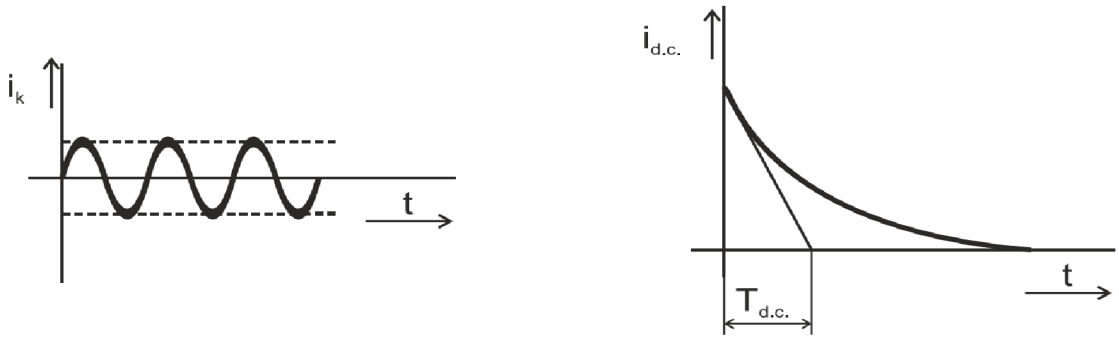
Náhla zmena impedancie počas skratu má za následok vznik prechodného javu v synchrónnych strojoch a v ostatných prvkoch elektrizačnej sústavy. Nie je možné aby sa energia magnetického poľa v týchto prvkoch menila skokom a preto má skratový prúd v závislosti na čase neharmonický priebeh. Najväčšie hodnoty dosahuje skratový prúd v prvých okamihoch od vzniku skratu a klesá s rastúcim časom až kým sa ustáli na harmonickom priebehu [11].

Reálny časový priebeh skratového prúdu obsahuje viaceré zložky. Zdroj [12] uvádza nasledujúce:

- **Rázová** (subtranzitná) zložka $i_k''(t)$ - má sínusový priebeh s frekvenciou sústavy a exponenciálne klesá s časovou konštantou T_k''. Jej priebeh je zobrazený na Obr. 14, prejavuje sa na začiatku skratu a je to zložka ktorá má krátku dobu trvania (menej než desatina sekundy) a teda rýchlo doznieva.
- **Prechodná** (tranzitná) zložka $i_k'(t)$ - má sínusový priebeh s frekvenciou sústavy a exponenciálne klesá s časovou konštantou T_k'. Jej priebeh je zobrazený na Obr. 14, je to zložka ktorá pomaly doznieva (doba trvania v sekundách).
- **Ustálená** zložka $i_{ku}(t)$ - má sínusový priebeh s frekvenciou sústavy a konštantnou amplitúdou. Jej priebeh je zobrazený na Obr. 15.
- **Jednosmerná** zložka $i_{d.c.}(t)$ - je exponenciálne klesajúci jednosmerný prúd s časovou konštantou $T_{d.c.}$. Jej priebeh je zobrazený na Obr. 15.



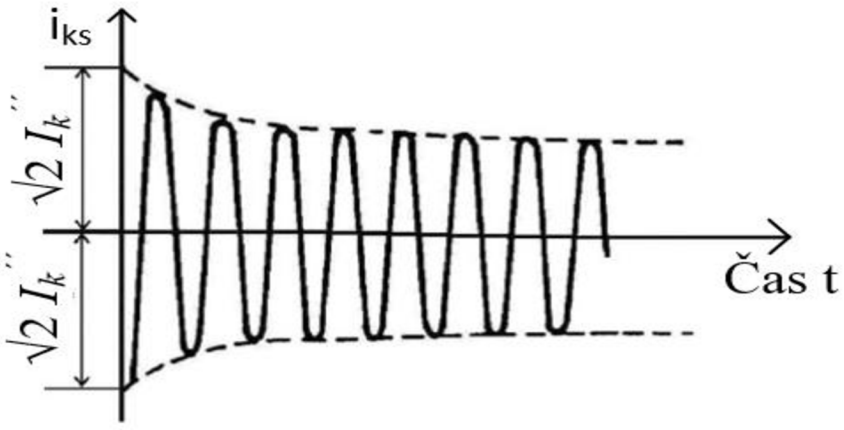
Obr. 14 - Rázová a prechodná zložka skratového prúdu [12]



Obr. 15 - Ustálená a jednosmerná zložka skratového prúdu [12]

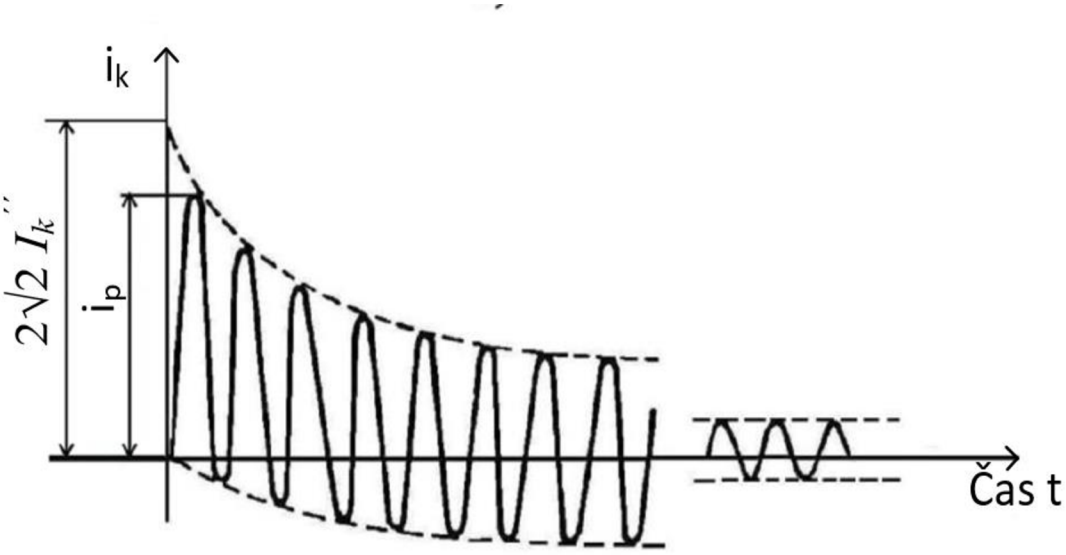
Platí $T_k^{'} > T_{d.c} > T_k^{''}$ pre obvyklé podmienky v elektrizačnej sústave.

Súmerný skratový prúd i_{ks} je daný súčtom rázovej prechodnej a ustálenej zložky skratového prúdu aj je súmerný podľa časovej osi.



Obr. 16 - Časový priebeh súmerného skratového prúdu

Súčtom súmerného skratového prúdu a jednosmernej zložky dostaneme **nesúmerný skratový prúd i_k.**



Obr. 17 - Časový priebeh nesúmerného skratového prúdu

4.3 Charakteristické veličiny skratového prúdu

Pre potreby dimenzovania elektrických zariadení proti účinkom skratových prúdov a nastavenie elektrických ochrán nie je potrebné vedieť celkový časový priebeh skratového prúdu, ale len charakteristické veličiny. Medzi ne patria podľa [12]

- Počiatočný súmerný rázový skratový prúd $I_k^{''}$
- Súmerný skratový vypínací prúd I_b
- Doba trvania skratu T_k
- Nárazový skratový prúd i_p
- Jednosmerná (aperiodická) zložka skratového prúdu $i_{d.c.}$
- Ekvivalentný otepľovací skratový prúd I_{th}
- Ustálený skratový prúd I_k

4.3.1 Počiatočný súmerný rázový skratový prúd

Podľa [11] $I_k^{''}$ je efektívna hodnota striedavej súmernej zložky predpokladaného skratového prúdu v okamihu vzniku skratu, pri konštantnej impedancii

Pre výpočet pomocou metódy ekvivalentného zdroja udáva [10] pre výpočet $I_k^{''}$ v mieste skratu nasledovné vzťahy.

- **Všeobecne**

$$I_k^{''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_k|} \quad [\text{A}] \tag{4.1}$$

kde: c - napäťový súčiniteľ [-] (Tab. 1)

U_n - menovité napätie v mieste skratu [V]

$\underline{Z}_k$ - výsledná impedancia v mieste skratu [Ω]

- **Trojfázový skrat**

$$I_{k3}^{''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} \quad [\text{A}] \tag{4.2}$$

kde: $\underline{Z}_{(1)}$- výsledná zložka súslednej impedancie v mieste skratu [Ω]

- **Dvojfázový skrat**

$$I_{k2}^{''} = \frac{\sqrt{3}}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \tag{4.3}$$

kde: $\underline{Z}_{(2)}$ – výsledná zložka spätnej impedancie v mieste skratu [Ω]

- **Dvojfázový skrat so zemným spojením**

Skratový prúd tečúci do zeme a zemou

$$I_{kE2E}^{''} = \left| \frac{3 \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \right| * \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \tag{4.4}$$

kde: $\underline{Z}_{(0)}$ – výsledná zložka nulovej impedancie v mieste skratu [Ω]

Skratový prúd z fáze L2

$$I_{k2EL2}^{''} = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot \left(\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \cdot \underline{Z}_{(2)}\right)}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \right| * \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \tag{4.5}$$

kde: $\underline{a}$ – operátor natočenia [-]

Skratový prúd z fáze L3

$$I_{k2EL3}^{''} = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot \left(\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \cdot \underline{Z}_{(2)}\right)}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \tag{4.6}$$

- **Jednofázový skrat**

$$I_{k1}^{''} = \frac{3}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \tag{4.7}$$

4.3.2 Súmerný vypínací skratový prúd

Súmerný vypínací skratový prúd I_b udáva podľa [11] veľkosť nesymetrického skratového prúdu v okamihu vypínania skratu. Je to dôležitá hodnota z hľadiska výkonových vypínačov, pretože pri nich je udávaný I_{nvyp}, čo je maximálny skratový prúd, ktorý vypínacie zariadenie bezpečne vypne a malo by platiť že $I_b \leq I_{nvyp}$.

Pri elektricky vzdialených skratoch majú súmerné vypínacie skratové prúdy rovnakú veľkosť ako počiatočné rázové skratové prúdy.

$$I_b = I_k^{''} \quad [\text{A}] \tag{4.8}$$

Pri elektricky blízkom skrate sa zmenšovanie súmerného vypínacieho skratového prúdu synchrónneho generátoru zohľadňuje pomocou súčiniteľa μ

$$I_b = \mu \cdot I''_{kmax} \quad [\text{A}] \tag{4.9}$$

kde: μ – súčiniteľ pre výpočet súmerného vypínacieho skratového prúdu [-], ktorý závisí na pomere počiatočného súmerného rázového skratového prúdu k menovitému prúdu generátora I''_{kG}/I_{nG}, minimálnej dobe vypnutia a spočíta sa podľa nasledujúcich rovníc:

pre t_{min} = 0,02 s

$$\mu = 0{,}84 + 0{,}26e^{-0{,}26 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}} \tag{4.10}$$

pre t_{min} = 0,05 s

$$\mu = 0{,}71 + 0{,}51e^{-0{,}30 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}} \tag{4.11}$$

pre t_{min} = 0,10 s

$$\mu = 0{,}62 + 0{,}72e^{-0{,}32 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}} \tag{4.12}$$

pre $t_{min} \geq$ 0,25 s

$$\mu = 0{,}56 + 0{,}94e^{-0{,}38 \cdot \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}} \tag{4.13}$$

Ak pomer I''_{kG}/I_{nG} nie je väčší ako 2, platí že hodnota $\mu = 2$.

4.3.3 Doba trvania skratu

Doba trvania skratu T_k [s] je podľa [10] čas od začiatku vzniku do okamihu oddelenia kontaktov posledného pólu spínacieho zariadenia.

4.3.4 Nárazový skratový prúd

Nárazový skratový prúd i_p je podľa [11] najväčšia vrcholová hodnota skratového prúdu, ktorá nastáva pri prvom maxime v čase $t = 0{,}01$ s po vzniku skratu. Je to dôležitá hodnota z hľadiska dimenzovania elektrických zariadení na silové účinky skratových prúdov, lebo tie sú najväčšie práve v okamihu, keď dosiahnu svoju prvú amplitúdu. Z Obr. 13 je viditeľné že ide o hodnotu na začiatku skratu.

Vychádza z hodnoty počiatočného súmerného rázového skratového prúdu I''_k

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad [\text{A}] \tag{4.14}$$

kde : κ – súčiniteľ pre výpočet nárazového skratového prúdu [-], ktorý je závislý na pomere R/X vypočíta sa ako:

$$\kappa = 1{,}02 \cdot 0{,}98^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \tag{4.15}$$

4.3.5 Jednosmerná zložka skratového prúdu

Jednosmerná zložka skratového prúdu $i_{d.c.}$ je stredná hodnota dolnej a hornej obalovej krivky priebehu skratového prúdu klesajúceho zo svojej začiatočnej hodnoty až k nule. Norma [10] udáva vzorec podľa ktorého sa vypočíta:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k^{''} \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot T_k \cdot \frac{R}{X}} \quad [\mathrm{A}] \tag{4.16}$$

kde: f - menovitá frekvencia [Hz]

T_k - čas (doba trvania skratu) [s]

$\frac{R}{X}$ - pomer podľa [10]

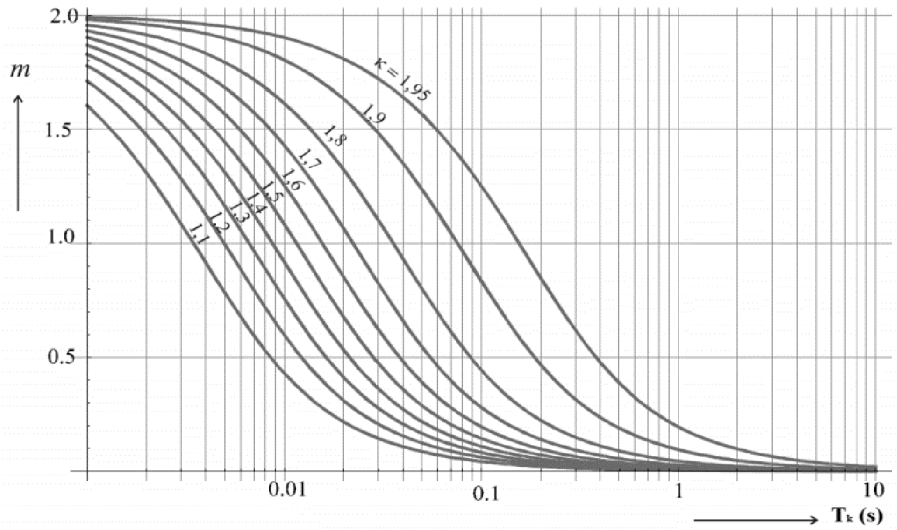
4.3.6 Ekvivalentný otepľovací skratový prúd

Ekvivalentný otepľovací skratový prúd I_{th} je podľa [11] efektívna hodnota prúdu, ktorý má rovnakú dobu trvania a tepelné účinky ako skutočný skratový prúd, ktorý sa mení s časom. Jeho hodnota je dôležitá z hľadiska dimenzovania elektrických zariadení na tepelné účinky skratového prúdu.

Vypočíta sa podľa vzťahu :

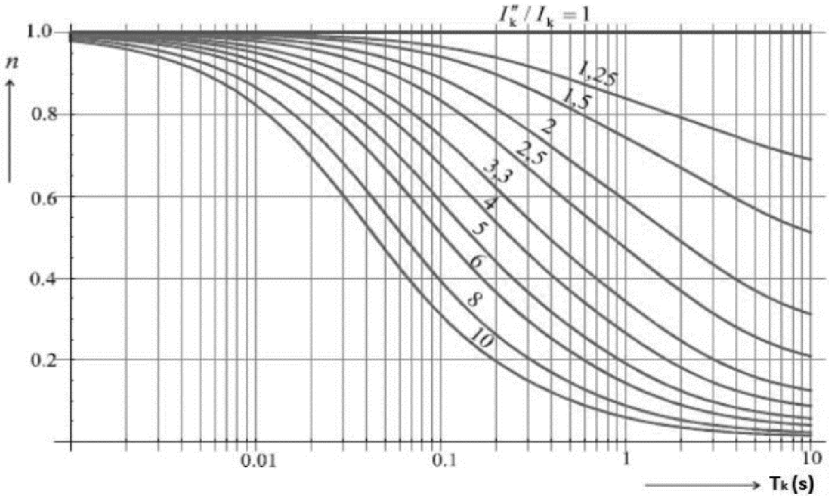
$$I_{th} = I_k^{''} \cdot \sqrt{m + n} \quad [\mathrm{A}] \tag{4.17}$$

kde: m - súčiniteľ pre tepelný účinok jednosmernej zložky skratového prúdu [-], určí sa podľa Obr. 18



Obr. 18 - Súčiniteľ pre tepelný účinok jednosmernej zložky skratového prúdu [10]

n - súčiniteľ pre tepelný účinok striedavej zložky skratového prúdu [-], určí sa podľa Obr. 19



Obr. 19 - Súčiniteľ pre tepelný účinok striedavej zložky skratového prúdu [10]

4.3.7 Ustálený skratový prúd

Ustálený skratový prúd I_k je efektívna hodnota súmerného skratového prúdu, ktorý preteká obvodom po doznení prechodových javov.

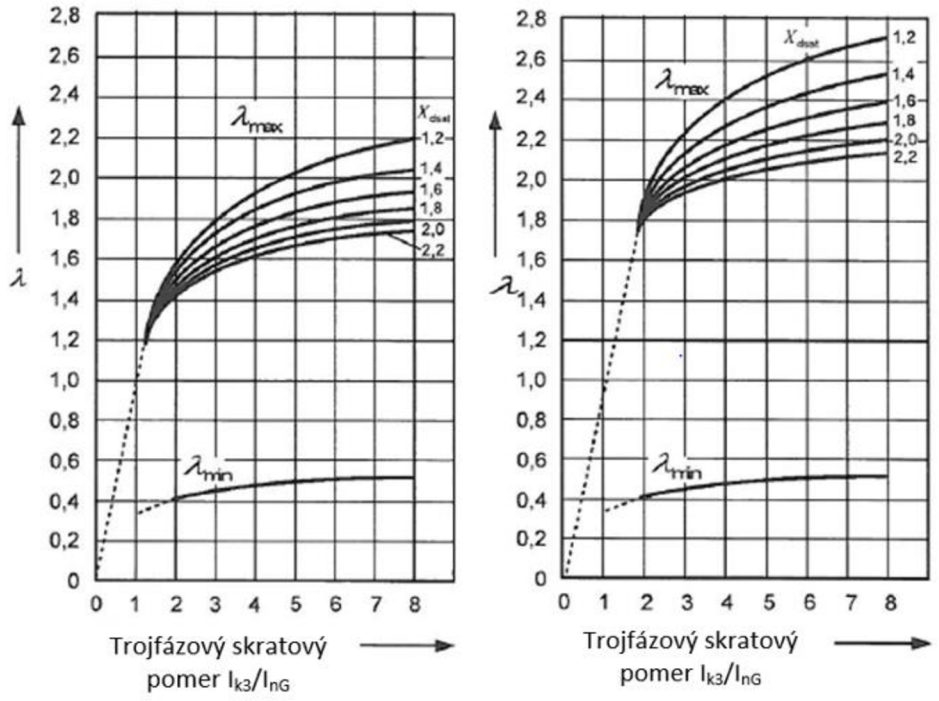
- Maximálny ustálený skratový prúd

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_{nG} \quad [\text{A}] \tag{4.18}$$

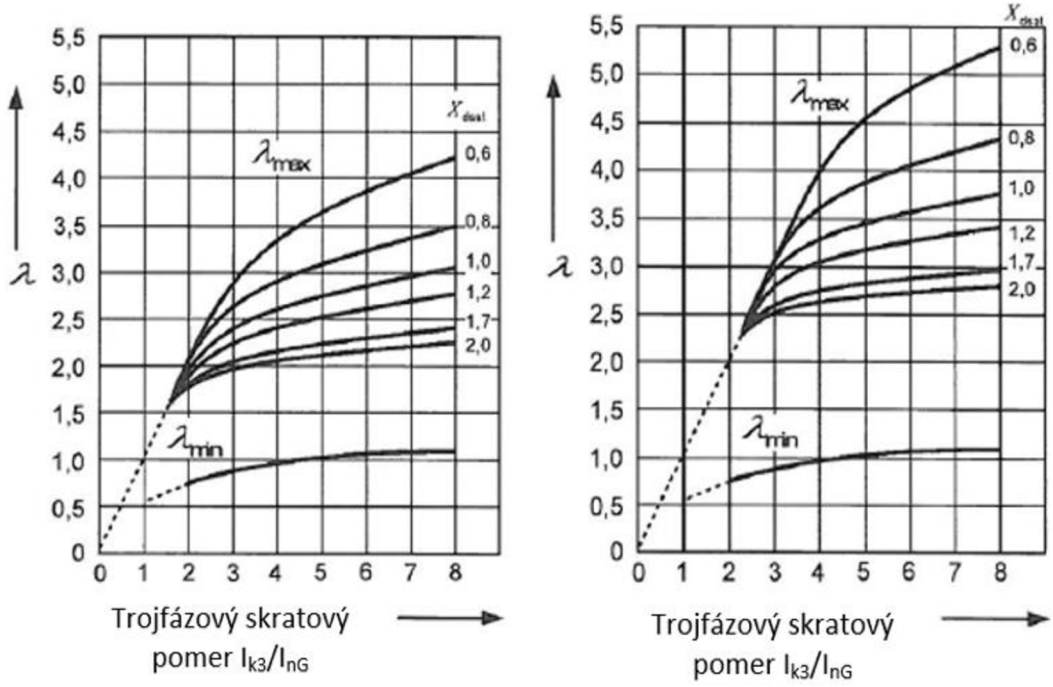
- Minimálny ustálený skratový prúd

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_{nG} \quad [\text{A}] \tag{4.19}$$

kde: λ – súčiniteľ pre výpočet ustáleného skratového prúdu [-], ktorý sa určuje podľa charakteristík a sú dané pre stroje s hladkým rotorom pre maximálny budiaci prúd 1,3, alebo 1,6 násobok budiaceho prúdu pri menovitom zaťažení (Obr. 20) a pre stroje s vyniknutými pólmi pre maximálny budiaci prúd 1,6 alebo 2 násobok budiaceho prúdu pri menovitom zaťažení (Obr. 21).



Obr. 20 - λ pre stroje s hladkým rotorom [10]



Obr. 21 - λ pre stroje s vyniknutými pólmi [10]

5 VÝPOČET SKRATOVÝCH PRÚDOV

Norma ktorá stanovuje postupy k výpočtu skratových prúdov je ČSN EN 60909-0. Platí pre výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách s frekvenciami 50 alebo 60 Hz a je použiteľná pre siete s najvyšším prevádzkovým napätím do 550 kV(nad 550 kV sa používajú zvláštne individuálne výpočtové metódy).

5.1 Metóda výpočtu

Princíp metódy ekvivalentného napäťového zdroja , ktorá je používaná pre výpočet skratových prúdov spočíva v zavedení ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu, ktorý je jediným aktívnym zdrojom napätia sústavy. Všetky napájacie body, synchrónne a asynchrónne stroje sú nahradzované ich vnútornými impedanciami.

Jedná sa o približnú metódu, bez zohľadňovania špeciálnych podmienok prevádzky siete. Jej cieľom je nájsť maximálne a minimálne skratové prúdy s dostatočnou presnosťou, s ohľadom na bezpečnosť a ekonomiku.

Výpočet je možné vykonávať dvoma spôsobmi.

- Výpočet v skutočných hodnotách. Počíta sa so skutočnými fyzikálnymi veličinami (A, V, Ω) a jednotlivé veličiny sa označujú veľkými písmenami.
- Výpočet v pomerných hodnotách. Skutočné hodnoty sú prepočítané pomocou vzťažných hodnôt menovitého napätia U_v a menovitého zdanlivého výkonu S_v. Pomerné hodnoty sú označené malými písmenami.

5.2 Predpoklady výpočtu

Výpočet maximálnych a minimálnych skratových prúdov vychádza z nasledujúcich zjednodušení, ktoré udáva norma [10].

1. Počas trvania skratového prúdu sa nemení typ skratu, t. j. trojfázový skrat zostane trojfázovým po celú dobu skratu a podobne.
2. Počas doby skratu nedochádza k žiadnej zmene v sieti.
3. Impedancie transformátorov sa uvažujú pre prípad, že prepínače odbočiek sú zapojené v základnej polohe
4. Neuvažujú sa odpory oblúku
5. Všetky paralelné admitancie netočivých záťaží sa zanedbávajú, v súslednej, spätnej aj netočivej zložkovej sústave.
6. Kapacity vedení sú zanedbané v súslednej a spätnej zložkovej sústave. Kapacity vedení v netočivej zložkovej sústave sa musia uvažovať v sieťach s uzlom spojeným so zemou cez nízku impedanciu, v ktorých je činiteľ zemného spojenia vyšší ako 1,4.
7. Magnetizačné admitancie transformátorov sú zanedbané v súslednej, spätnej aj netočivej zložkovej sústave.

5.3 Postup výpočtu

1. Nakreslí sa východisková schéma zapojenia.
2. Uvedú sa parametre uvažovaných prvkov vztiahnuté k ich menovitému napätiu a výkonu, menovité napätia sietí, prevody transformátorov a napätia jednotlivých napäťových hladín.
3. Miesta v ktorých budú počítané skraty sa vyznačia a uvedie sa druh skratu a prípadne aj maximálna doba skratu. Zvolí sa vzťažné napätie U_v a vzťažný výkon S_v. Vzťažné napätie sa väčšinou volí podľa napäťovej hladiny kde došlo ku skratu.
4. Impedancie jednotlivých prvkov sústavy sa prepočítajú na príslušnú napäťovú hladinu v mieste skratu pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_n \cdot \left(\frac{U_v}{U_n}\right)^2 \tag{5.1}$$

   kde: $\underline{Z}_p$ - prepočítaná impedancia [Ω]
   $\underline{Z}_n$ - impedancia pri menovitom napätí [Ω]
   U_v - vzťažné napätie v mieste skratu [V]
   U_n - menovité napätie daného prvku [V]

5. Z východiskovej schémy sa odvodí náhradná schéma pre jednotlivé druhy skratov. Pri trojfázovom skrate sa náhradná schéma zostaví len pre súslednú zložku. Pre nesúmerné skraty musia byť zostavené schémy aj pre spätné a netočivé impedancie. Vychádza sa z miesta skratu a postupuje sa smerom k zdrojom skratových prúdov.
6. Metódou postupného zjednodušenia sa získa výsledná impedancia v mieste skratu.
7. Z výslednej impedancie je vypočítaný počiatočný rázový skratový prúd I_k'', ktorý tečie miestom skratu.
8. Ak je to potrebné, určia sa čiastkové prúdy tečúce jednotlivými vetvami obvodu a vyhodnotia sa skratové príspevky synchrónnych a asynchrónnych motorov.
9. Stanovia sa potrebné parametre určujúce skratové pomery.

5.4 Maximálne a minimálne skratové prúdy

Výpočtom podľa postupov uvedených v norme ČSN EN 60909-0 je možné získať maximálny a minimálny skratový prúd.

5.4.1 Maximálny skratový prúd

Je dôležitý pre účely dimenzovania elektrických zariadení. Podľa [10] je pri výpočte maximálnych skratových prúdov potrebné dodržať nasledujúce podmienky:

- Počíta sa s napäťovým súčiniteľom c_{max}, jeho hodnota sa určí podľa Tab. 1
- Rezistancia vonkajších vedení a káblov sa uvažuje pri teplote 20 °C
- Uvažuje sa vplyv asynchrónnych motorov
- Konfigurácia sústavy a príspevky zdrojov sa uvažujú tak aby viedli k maximálnej veľkosti skratového prúdu v mieste skratu

5.4.2 Minimálny skratový prúd

Je dôležitý pri nastavovaní ochrán, voľbe poistiek a podobne. Podľa [10] je pri výpočte minimálnych skratových prúdov potrebné dodržať nasledujúce podmienky:

- Počíta sa s napäťovým súčiniteľom c_{min}, jeho hodnota sa určí podľa Tab. 1
- Všetky rezistancie vedení, káblov a vodičov uvažovať pri najvyššej prevádzkovej teplote a určí sa:

$$R_V = [1+\propto (\theta_e - 20)] \cdot R_{V20} \quad [\Omega] \tag{5.2}$$

kde: R_{V20} – rezistancia pri teplote 20 °C [Ω]

$\propto$ - súčiniteľ rovný 0,004/K, platný s dostatočnou presnosťou pre meď, hliník a jeho zliatiny [K^{-1}]

θ_e – teplota vodiča v stupňoch Celzia na konci skratu, pri prvom výpočte sa odporúča používať hodnotu maximálnu dovolenú prevádzkovú teplotu vodičov [°C]

- Konfigurácia sústavy a príspevky zdrojov sa uvažujú tak aby viedli k najmenšej hodnote skratového prúdu v mieste skratu
- Príspevky veterných a fotovoltaických elektrárenských blokov sú zanedbané, tak isto ako príspevky motorov

Tab. 1 - Hodnoty napäťového súčiniteľa [10]

Menovité napätie	Napäťový súčiniteľ pre výpočet	
U_n [V]	maximálnych skratových prúdov c_{max}	minimálnych skratových prúdov c_{min}
Nízke napätie 100-1000 V	1,05	0,95
	1,1	
Vysoké napätie >1 kV až 35 kV	1,1	1,1
Veľmi vysoké > 35 kV		
Hodnota 1,05 pre c_{max} pre nn sústavy s toleranciou +6%		
Hodnota 1,1 pre c_{max} pre nn sústavy s toleranciou +10%		
Súčin c_{max} a U_n by nemal prekročiť najvyššie napätie zariadenia		

5.5 Skratové impedancie elektrických zariadení

5.5.1 Sieťové napájače

Ak je trojfázový skrat napájaný zo siete a je známy jej počiatočný súmerný rázový skratový prúd I''_{kQ} v bode pripojenia záťaže Q, súsledná zložka skratovej impedancie siete $Z_{(1)Q}$ v bode pripojenia napájača Q sa určí podľa [10] zo skratového príspevku I''_{kQ3} ako:

$$Z_{(1)Q} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ3}} \ [\Omega] \tag{5.3}$$

kde: U_{nQ} - menovité napätie v bode pripojenia sieťového napájača [V]

I''_{kQ3} - počiatočný súmerný rázový skratový prúd pre trojfázový skrat v bode pripojenia sieťového napájača Q [A]

c - napäťový súčiniteľ [-], určený podľa Tab. 1

Ak je známy pomer rezistancie a reaktancie sieťového napájača, potom pre reaktanciu platí

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \ [\Omega] \tag{5.4}$$

Spätná zložka skratovej impedancie sieťového napájača je rovná súslednej.

$$\underline{Z}_{(2)Q} = \underline{Z}_{(1)Q} \quad [\Omega] \tag{5.5}$$

Netočivá zložka skratovej impedancie sa vypočíta podľa vzorca:

$$Z_{(0)Q} = \frac{c * U_{nQ}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{I''_{kQ1}} - \frac{3}{I''_{kQ3}} \right) \quad [\Omega] \tag{5.6}$$

kde: I''_{kQ1} - počiatočný súmerný rázový skratový prúd pre jednofázový skrat v bode pripojenia napájača Q [A]

V prípadoch, keď jedná o sieťové napájače s menovitým napätím väčším ako 35 kV napájaných z vonkajších vedení je možné impedanciu $\bar{Z}_Q$ považovať za čisto reaktívnu a teda platí $\underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$. Ak to neplatí a nie je známa žiadna presná hodnota pre rezistanciu R_Q sieťových napájačov, je možné podľa [10] dosadiť $R_Q = 0{,}1 \cdot X_Q$, kde hodnota reaktancie je $X_Q = 0{,}995 \cdot Z_Q$.

5.5.2 Transformátory

Dvojvinuťové transformátory

Impedancie dvojvinuťového transformátora $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ sa vypočíta z údajov na štítku podľa vzťahov:

$$Z_T = \frac{u_{kT}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad [\Omega] \tag{5.7}$$

$$R_T = \frac{u_{Rn}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_{knT}}{3 \cdot I_{nT}^2} \quad [\Omega] \tag{5.8}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad [\Omega] \tag{5.9}$$

kde: U_{nT} - menovité napätie transformátora [V]
u_{kT} - menovité napätie nakrátko transformátora [%]
S_{nT} - menovitý zdanlivý výkon transformátora [VA]
I_{nT} - menovitý prúd transformátora [A]
P_{knT} - menovité straty transformátora nakrátko [W]
u_{Rn} - činná zložka menovitého napätia transformátoru nakrátko [%]

Norma [10] uvádza, že pomer rezitancie a reaktancie transformátorov R_T/X_T sa s veľkosťou transformátoru znižuje. Pri veľkých transformátoroch je odpor taký malý, že impedancia je tvorená iba reaktanciou. Odpor je ale potrebné uvažovať pri výpočte nárazového skratového prúdu alebo pri výpočte jednosmernej zložky skratového prúdu.

Spätná zložka skratovej impedancie je rovnaká ako súsledná a podľa [10] platí, že:

$$\underline{Z}_{(2)T} = \underline{Z}_{(1)T} = \underline{Z}_T = R_T + jX_T \quad [\Omega] \tag{5.10}$$

Netočivá zložka skratovej impedancie transformátorov $\underline{Z}_{(0)T}$ [Ω] sa vypočíta ako:

- Pre plášťové transformátory:

$$\underline{Z}_{(0)T} = \underline{Z}_{(1)T} \quad [\Omega] \tag{5.11}$$

- Pre jadrové transformátory:

$$\underline{Z}_{(0)T} = 0{,}85 \cdot \underline{Z}_{(1)T} \quad [\Omega] \tag{5.12}$$

Pri výpočte reaktancie dvojvinuťového sieťového transformátoru je treba uvažovať aj korekčný súčiniteľ K_T. Sieťový transformátor je transformátor, ktorý spája dve alebo viacej sietí s rôznymi napäťovými úrovňami.

$$K_T = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_T} \quad [-] \tag{5.13}$$

kde: c_{max} - napäťový súčiniteľ [-] (Tab. 1)

x_T - pomerná reaktancia transformátora [-] a vypočíta sa ako:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} \tag{5.14}$$

Korekčný súčiniteľ sa nesmie použiť pre blokové transformátory.

Trojvinuťové transformátory

Súsledné skratové impedancie trojvinuťového transformátora sa dajú vypočítať pomocou troch skratových impedancií, ktoré sa vzťahujú na stranu A transformátora a vychádzajú z náhradnej schémy zapojenia pre trojvinuťový transformátor (Obr. 22).

$$\underline{Z}_{(1)ABT} = \left(\frac{u_{rABT}}{100} - j \cdot \frac{u_{xABT}}{100}\right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nABT}} \quad [\Omega] \tag{5.15}$$

$$\underline{Z}_{(1)ACT} = \left(\frac{u_{rACT}}{100} - j \cdot \frac{u_{xACT}}{100}\right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nACT}} \quad [\Omega] \tag{5.16}$$

$$\underline{Z}_{(1)BCT} = \left(\frac{u_{rBCT}}{100} - j \cdot \frac{u_{xBCT}}{100}\right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nBCT}} \quad [\Omega] \tag{5.17}$$

kde: U_{nTA} - menovité napätie transformátora na strane A [V]

S_{nABT} - menovitý zdanlivý výkon transformátora medzi stranami A a B [VA]

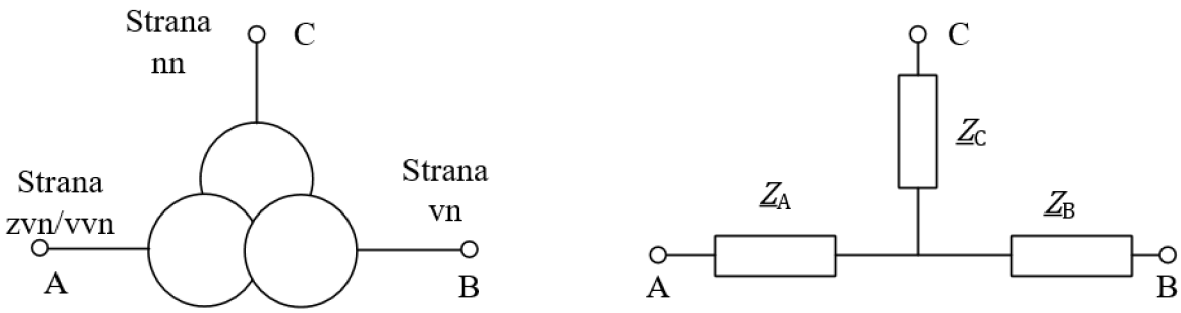
S_{nACT} - menovitý zdanlivý výkon transformátora medzi stranami A a C [VA]

S_{nBCT} - menovitý zdanlivý výkon transformátora medzi stranami B a C [VA]

u_{rABT}, u_{xABT} - činná a induktívna zložka napätia nakrátko medzi stranami A a B [%]

u_{rACT}, u_{xACT} - činná a induktívna zložka napätia nakrátko medzi stranami A a C [%]

u_{rBCT}, u_{xBCT} - činná a induktívna zložka napätia nakrátko medzi stranami B a C [%]



Obr. 22 - Trojvinuťový transformátor a jeho náhradná schéma

$$\underline{Z}_{(1)AT} = \frac{Z_{(1)ABT} + Z_{(1)ACT} - Z_{(1)BCT}}{2} \quad [\Omega] \tag{5.18}$$

$$\underline{Z}_{(1)BT} = \frac{Z_{(1)ABT} + Z_{(1)BCT} - Z_{(1)ACT}}{2} \quad [\Omega] \tag{5.19}$$

$$\underline{Z}_{(1)CT} = \frac{Z_{(1)ACT} + Z_{(1)BCT} - Z_{(1)ABT}}{2} \quad [\Omega] \tag{5.20}$$

Spätné skratové impedancie sa rovnajú súsledným. Nulové impedancie sú závislé na spôsobe zapojenia a na mieste skratu. Sú určené individuálne podľa [13].

Pri výpočte reaktancie trojvinuťových sieťových transformátorov je treba uvažovať aj korekčný súčiniteľ K_T. Výsledné korigované impedancia sú určené násobkom korekčného činiteľa a skratovej impedancie medzi danými stranami a z nich sú následne vypočítané korigované ekvivalentné impedancie. Korekčné súčinitele medzi jednotlivými stranami pre výpočet maximálnych skratových prúdov sa vypočítajú podľa [10] rovnicami 5.21,5,22 a 5.23. Pri výpočte minimálnych skratových prúdov sú korekčné súčinitele rovné 1.

$$K_{TAB} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{TAB}} \quad [-] \tag{5.21}$$

$$K_{TAC} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{TAC}} \quad [-] \tag{5.22}$$

$$K_{TBC} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{TBC}} \quad [-] \tag{5.23}$$

kde: c_{max} - napäťový súčiniteľ [-], určí sa podľa Tab. 1

$x_{TAB}, x_{TAC}, x_{TBC}$ - pomerná reaktancia transformátora [-], vypočíta sa podľa rovnice 5.14, pre jednotlivé reaktancie medzi stranami.

5.5.3 Synchrónne generátory

Podľa [10] je potrebné pri výpočte maximálnych počiatočných rázových skratových prúdov v sústavách, ktoré sú napájané priamo z generátorov bez blokových transformátorov použiť vzorec na výpočet korigovanej súslednej impedancie:

$$\underline{Z}_{(1)GK} = K_G \cdot \underline{Z}_{(1)G} = K_G \cdot \left(R_G + jX_d^{''}\right) \quad [\Omega] \tag{5.24}$$

kde: K_G - je korekčný súčiniteľ, ktorý sa vypočíta podľa vzťahu:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + \frac{x_d^{''}}{100} \cdot \sqrt{1 - cos^2\varphi_{nG}}} \quad [-] \tag{5.25}$$

kde: U_n - menovité napätie sústavy [V]

U_{nG} - menovité napätie generátora [V]

c_{max}- napäťový súčiniteľ z Tab. 1[-]

φ_{nG} - fázový uhol medzi napätím a prúdom generátora [°]

$x_d^{''}$ - pomerná rázová reaktancia generátora [%] vztiahnutá k menovitej impedancií, ktorá sa vypočíta ako:

$$x_d^{''} = \frac{X_d^{''}}{Z_{nG}} = \frac{X_d^{''}}{\left(\frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}\right)} \tag{5.26}$$

kde: $X_d^{''}$ - pozdĺžna rázová reaktancia generátora [Ω]

S_{nG} - zdanlivý výkon generátora [VA]

Spätná zložka skratovej impedancie generátora sa vypočíta ako:

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G \cdot \underline{Z}_{(2)G} = K_G \cdot \left(R_{(2)G} + jX_{(2)G}\right) \quad [\Omega] \tag{5.27}$$

Hodnota korekčného súčiniteľa sa vypočíta podľa rovnice 5.16, pri turboalternátoroch je súsledná zložka impedancie približne rovnaká ako spätná. To ale neplatí pri hydroalternátoroch, kde sú hodnoty pozdĺžnej rázovej reaktancie a priečnej rázovej reaktancie odlišné $X_d^{''} \neq X_q^{''}$ a preto je zložka spätnej skratovej reaktancie zadaná alebo si ju treba vypočítať podľa vzťahu:

$$X_{(2)G} = x_{(2)G} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} = \frac{\left(X_d^{''} + X_q^{''}\right)}{2} \quad [\Omega] \tag{5.28}$$

Podľa [11] má netočivá skratová impedancia generátora konečnú hodnotu iba vtedy ak je alternátor uzemnený buď priamo alebo cez impedanciu. Vtedy sa môže uzatvárať netočivá zložková sústava prúdov a netočivá skratová impedancia sa vypočíta ako:

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G \cdot \underline{Z}_{(0)G} = K_G \cdot \left(R_{(0)G} + jX_{(0)G}\right) \quad [\Omega] \tag{5.29}$$

kde: K_G - je korekčný súčiniteľ, ktorý sa vypočíta podľa rovnice 5.16

$X_{(0)G}$ - netočivá zložka reaktancie, ktorá sa vypočíta ako:

$$X_{(0)G} = x_{(0)G} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad [\Omega] \tag{5.30}$$

Pri výpočte minimálnych skratových prúdov sa za hodnotu korekčného súčiniteľa dosadí hodnota $K_G = 1$. Ak je generátor pripojený do sústavy cez blokový transformátor korekčný súčiniteľ sa neuvažuje.

5.5.4 Vonkajšie vedenia a káble

Súsledná zložka skratovej impedancie vedenia sa vypočíta z menovitých parametrov vodiča, a je rovná spätnej zložke.

$$\underline{Z}_{(1)V} = \underline{Z}_{(2)V} = (R_V + jX_V) \cdot l_V \quad [\Omega] \tag{5.31}$$

kde: l_V - dĺžka vedenia [m]

R_V - rezistancia vedenia na jednotku dĺžky [Ω] pri teplote 20 °C sa spočíta ako:

$$R_V = \frac{\rho}{q_n} \quad [\Omega/\mathrm{m}] \tag{5.32}$$

kde: ρ - rezistivita vodiča [Ω.mm^2/m] , norma [10] uvádza, že pre jednotlivé materiály je možné použiť nasledujúce hodnoty:

Meď $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega.\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Hliník $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega.\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

Zliatina hliníka $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega.\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$

q_n - menovitý prierez [mm^2]

Ak je teplota vyššia ako 20 °C je potrebné rezistanciu vodiča prepočítať podľa rovnice 5.2

X_V - reaktancia vodiča na jednotku dĺžky [Ω], a spočíta sa ako:

$$X_V = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4n} + \ln\frac{d}{r}\right) \tag{5.33}$$

kde: d - geometrická stredná vzdialenosť medzi vodičmi či stredom zväzku

$$d = \sqrt{d_{L1L2} \cdot d_{L1L3} \cdot d_{L2L3}} \quad [\mathrm{m}] \tag{5.34}$$

r - polomer jednoduchého vodiča [m]

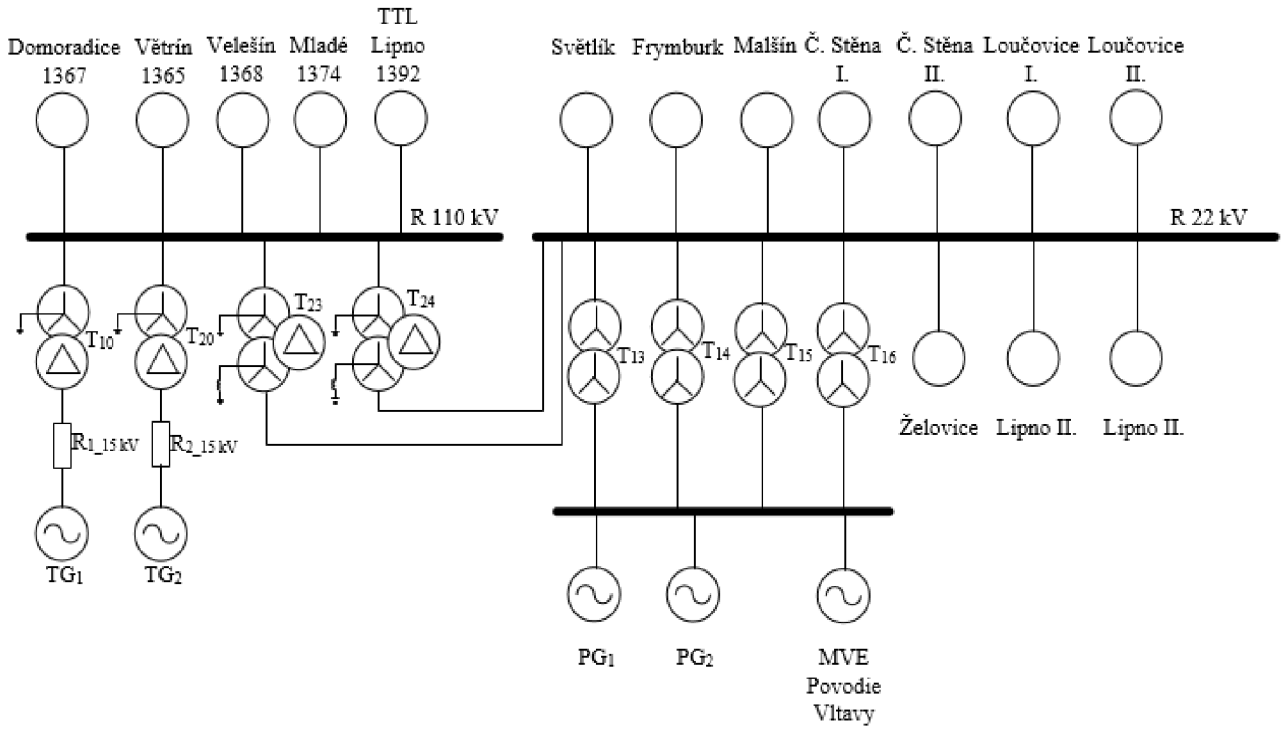
n - počet vodičov vo zväzku [−]

μ_0 - 4π.10^{-4} H/km

6 SKRATOVÝ VÝPOČET

6.1 Schéma vodnej elektrárne Lipno I.

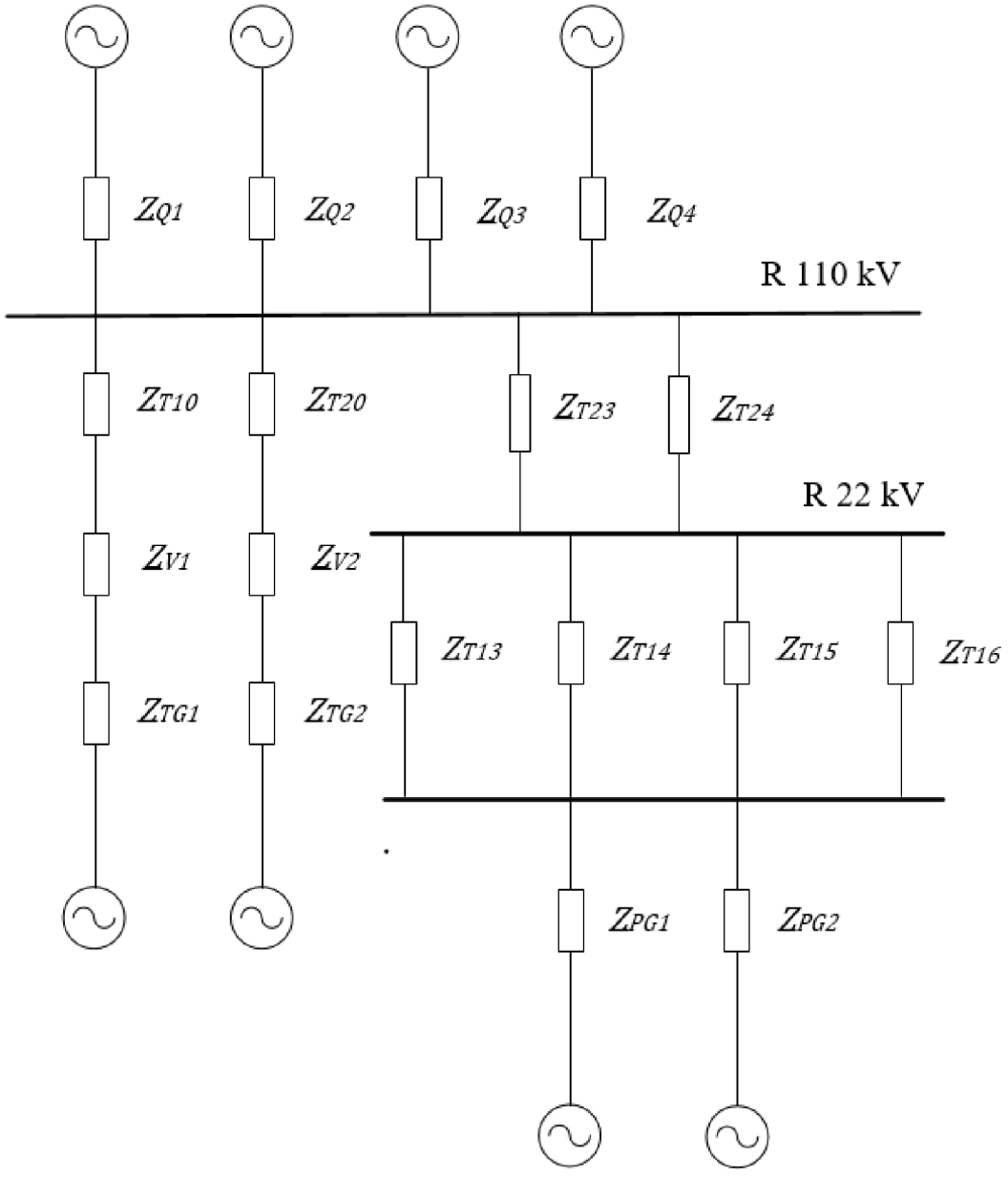
Na Obr. 23 je nakreslená schéma vodnej elektrárne Lipno I. s jednotlivými elektrickými zariadenia, ktoré sa v nej nachádzajú. Schéma obsahuje dva hlavné generátory TG1 a TG2 s menovitými výkonmi 77,2 MVA. Na ich spoločnej hriadeli sú umiestnené 2 pomocné generátory, ktoré slúžia na zásobovanie vlastnej spotreby elektrickou energiou. Vyrobená energia z TG1,2 s menovitým napätím 15 kV je vyvedená vedenia R_1,2 15 kV k transformátorom T10 a T20, ktoré ju transformujú na hodnotu napätia 110 kV. Z rozvodne 110 kV ide päť liniek, ktoré majú zadané hodnoty skratových príspevkov, okrem linky TTL Lipno, ktorá sa nepoužíva a teda hodnoty jej skratových príspevkov sú nulové . V rozvodne 110 kV sú umiestnené aj dva transformátory s menovitým prevodom 121/23 kV, ktoré vedú do rozvodne 22 kV. Z tejto rozvodne sú napájané okolité obce. Hodnoty skratových príspevkov jednotlivých liniek sú nulové. Okrem toho sa v rozvodni nachádzajú aj štyri transformátory pre vlastnú spotrebu, ktoré transformujú napätia na hodnotu 0,4 kV.



Obr. 23 - Schéma VE Lipno I.

6.2 Náhradná schéma VE Lipno I.

Na Obr. 24 je náhradná elektrická schéma VE Lipno I. s elektrickými zariadeniami, ktoré prispievajú do skratov na rôznych miestach. Písmenom „Q“ sú označené sieťové napájače, „T“ označuje transformátory, „V“ elektrické vedenia. Hlavné generátory sú označené písmenami „TG“ a pomocné generátory „PG“ Kapitola 6.3 sa zaoberá výpočtom zložiek impedancii pre jednotlivé elektrické zariadenia. Ukážkový výpočet maximálnych a minimálnych počiatočných rázových skratových prúdov pre skrat v rozvodni 110 kV je prevedený v kapitole 6.4.1 a následne v kapitolách 6.4.2 a 6.4.3 je spravený výpočet pre skraty v rozvodniach 22 resp. 15 kV. V kapitole 6.5 sú v tabuľkách uvedené maximálne a minimálne hodnoty počiatočných rázových skratových prúdov pre skraty na zberniach rozvodni 110 kV, 22 kV a 15 kV.



Obr. 24 - Náhradná schéma VE Lipno I.

6.3 Výpočet skratových impedancii elektrických zariadení

6.3.1 Sieťové napájače

Rozvodňa 22 kV

Skratové príspevky sieťových napájačov z rozvodne 22 kV sú nulové. Pri výpočte sa teda zanedbávajú.

Rozvodňa 110 kV

Z rozvodne 110 kV vedie 5 liniek, hodnoty počiatočného súmerného rázového skratového prúdu pre trojfázový skrat a pre jednofázový skrat v mieste pripojenia napájača linky TTL Lipno Q5 sú nulové, lebo linka nie je využívaná a teda aj jej zložky impedancií sú nulové. Pre ostatné linky sú hodnoty známe a je teda možné spočítať ich impedancie. Podľa [10] platí, ak je napäťová hladina sieťových napájačov vyššia ako 35 kV je možné uvažovať, že impedancia $\underline{Z}_Q$ je tvorená iba reaktanciou X_Q a teda rezistancia R_Q je nulová.

Tab. 2 - Parametre a vypočítané reaktancie sieťových napájačov

Sieťové napájače 110 kV				
Názov	Mladé 1365	Větřní 1367	Domoradice 1368	Velešín 1374
Označenie	Q1	Q2	Q3	Q4
U_{nQ} [V]	110000	110000	110000	110000
I''_{K3Q} [A]	2070	2280	2210	1510
I''_{K1Q} [A]	1830	2200	2040	1360
c_{min} [-]	1	1	1	1
c_{max} [-]	1,1	1,1	1,1	1,1
$X_{(1)QMIN}$ [Ω]	30,680	27,855	28,737	42,059
$X_{(2)QMIN}$ [Ω]	30,680	27,855	28,737	42,059
$X_{(0)QMIN}$ [Ω]	42,751	30,893	35,921	55,975
$X_{(1)QMAX}$ [Ω]	33,749	30,64	31,611	46,265
$X_{(2)QMAX}$ [Ω]	33,749	30,64	31,611	46,265
$X_{(0)QMIN}$ [Ω]	47,027	33,983	39,513	61,573

Ukážkový výpočet minimálnych hodnôt zložiek impedancií a reaktancií pre linku Q1 1365 Mladé z rozvodne 110 kV.

Veľkosť súslednej zložky impedancie je vypočítaná podľa rovnice 5.3.

$$Z_{(1)Q1MIN} = \frac{c_{min} \cdot U_{nQ1}}{\sqrt{3} \cdot I''_{K3Q1}} = \frac{1 \cdot 110000}{\sqrt{3} \cdot 2070} = 30{,}680\ \Omega$$

Podľa rovnice 5.5 je spätná zložka impedancie rovnaká ako súsledná zložka.

$$Z_{(1)Q1MIN} = Z_{(2)Q2MIN} = 30{,}680\ \Omega$$

Veľkosť nulovej zložky impedancie sa vypočíta podľa rovnice 5.6.

$$Z_{(0)Q1MIN} = \frac{c_{min} \cdot U_{nQ1}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{3}{I''_{K1Q1}} - \frac{2}{I''_{K3Q1}} \right) = \frac{1 \cdot 110000}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{3}{1830} - \frac{2}{2070} \right) = 42{,}751\ \Omega$$

Jednotlivé zložky reaktancií linky Q1 sú vypočítané podľa rovnice 5.4.

$$X_{(1)Q1MIN} = \frac{Z_{(1)Q1MIN}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{(1)Q1}}{X_{(1)Q1}} \right)^2}} = \frac{30{,}680}{\sqrt{1+0}} = 30{,}680\ \Omega$$

$$X_{(1)Q1MIN} = X_{(2)Q1MIN} = 30{,}680\ \Omega$$

$$X_{(0)Q1MIN} = \frac{Z_{(0)Q1MIN}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{(0)Q1}}{X_{(0)Q1}} \right)^2}} = \frac{42{,}751}{\sqrt{1+0}} = 42{,}751\ \Omega$$

Maximálne hodnoty impedancií sú vypočítané rovnako, ale namiesto súčiniteľa c_{min} je použitý súčiniteľ c_{max} podľa Tab. 1. Impedancie a reaktancie pre ostatné sieťové napájače sú vypočítané rovnako ako pre linku Q1 len sú použité ich príslušné hodnoty počiatočných rázových skratových prúdov. Výsledné hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

6.3.2 Synchrónne generátory

Hlavné generátory TG1 a TG2

Pri výpočte impedancie hlavných generátorov sa neuvažuje korekčný súčiniteľ, z dôvodu, že generátory sú do siete pripojené cez blokový transformátor. Pri výpočte sa uvažujú iba jednotlivé zložky reaktancií lebo rezistancie sú zanedbané.

Tab. 3 - Parametre hlavných generátorov TG1 a TG2

Generátory TG1, TG2			
U_{nTG} [kV]	15	x_{dTG} [%]	139
S_{nTG} [MVA]	77,22	x'_{dTG} [%]	29,3
P_{nTG} [MW]	69,5	x''_{dTG} [%]	16,8
n [min^{-1}]	375	x_{qTG} [%]	80,6
cos φ [-]	0,9	x'_{qTG} [%]	80,6
f [Hz]	50	x''_{qTG} [%]	19,5
I_{bnTG} [A]	743	x_{2TG} [%]	18,1
I_{nTG} [A]	2972	x_{0TG} [%]	9,8

Hodnota súslednej zložky reaktancie hlavných generátorov je vypočítaná z pomernej nasýtenej rázovej rekatancie podľa rovnice 5.26.

$$X_{(1)TG} = \frac{x''_{dTG}}{100} \cdot \frac{U_{nTG}^2}{S_{NTG}} = \frac{16{,}8}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{77{,}22 \cdot 10^6} = 0{,}4895\ \Omega$$

Podľa rovnice 5.28 sa vypočíta hodnota spätnej zložky skratovej reaktancie.

$$X_{(2)TG} = \frac{x_{2TG}}{100} \cdot \frac{U_{nTG}^2}{S_{nTG}} = \frac{18{,}1}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{77{,}22 \cdot 10^6} = 0{,}527\ \Omega$$

Hodnota netočivej zložky reaktancie hlavných generátorov je vypočítaná podľa rovnice 5.30.

$$X_{(0)TG} = \frac{x_{0TG}}{100} \cdot \frac{U_{nTG}^2}{S_{nTG}} = \frac{9{,}8}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{77{,}22 \cdot 10^6} = 0{,}262\ \Omega$$

Tab. 4 - Vypočítané hodnoty reaktancií hlavných generátorov TG1 a TG2

Vypočítané hodnoty	
$X_{(1)TG}$ [Ω]	0,4895
$X_{(2)TG}$ [Ω]	0,527
$X_{(0)TG}$ [Ω]	0,262

Pri výpočte minimálnych aj maximálnych skratových prúdov sa uvažujú rovnaké hodnoty reaktancií hlavných generátorov z dôvodu, že sa neuvažuje korekčný súčiniteľ, lebo sa jedná o generátory pripojené do sústavy cez blokové transformátory.

Pomocné generátory PG1 a PG2

Pri výpočtoch skratových prúdov robených v tejto práci sa pomocné generátory neuvažujú. Ich menovité parametre sú uvedené len informatívne.

Tab. 5 - Parametre pomocných generátorov PG1 a PG2

Pomocné generátory PG1 a PG2			
Menovité parametre			
U_n [V]	400	I_{bnPG} [A]	57-130,5
U_{nPG} [V]	380	I_{nPG} [A]	912
S_{nPG} [MVA]	600	x_{dPG} [%]	108
P_{nPG} [MW]	420	x'_{dPG} [%]	34
n [min^{-1}]	375	x''_{dPG} [%]	15,2
cos φ [-]	0,7	x_{0PG} [%]	9
f [Hz]	50		

6.3.3 Transformátory

Norma [10] udáva, že pomer R_T/X_T sa znižuje s veľkosťou transformátora. Ak sa jedná o veľké transformátory, tak je rezistancia taká malá že ju môžeme zanedbať a uvažovať impedanciu pri výpočte veľkosti skratového prúdu tvorenú iba reaktanciou. Norma taktiež udáva, že spätná skratová impedancia a súsledná sú rovnaké $\underline{Z}_{(1)T} = \underline{Z}_{(2)T}$. Reaktancie jednotlivých transformátorov sú vztiahnuté na menovité napätia transformátora. Prepočet na menovité napätie v mieste skratu bol robený až pri samotnom výpočte impedancie v mieste skratu.

Dvojvinuťové transformátory

Pri výpočtoch skratových prúdov robených v tejto práci (rozvodne 110,22 a 15 kV) sú uvažované len transformátory T10 a T20. Jedná sa o blokové transformátory preto nie je potrebné počítať ich korekčné súčinitele. Menovité parametre transformátorov T13, T14, T15 a T16 sú uvedené len informatívne.

Tab. 6 - Parametre a vypočítané hodnoty dvojvinuťových transformátorov

Dvojvinuťové transformátory			
	T10,T20	T13,14	T15,16
p_T [-]	121/15	22/0,4	22/0,4
U_{nT} [V]	15	22	22
S_{nT} [MVA]	75	0,63	0,63
u_k [%]	12,56	5,41	6
Zapojenie	Ynd1	Yyn0	Yyn0
$Z_{(1)T}$ [Ω]	0,377		
$Z_{(2)T}$ [Ω]	0,377		
$Z_{(0)T}$ [Ω]	0,32		
$X_{(1)T}$ [Ω]	0,377		
$X_{(2)T}$ [Ω]	0,377		
$X_{(0)T}$ [Ω]	0,32		

Hodnota súslednej zložky impedancie transformátora sa vypočíta podľa rovnice 5.7

$$Z_{(1)T10} = \frac{u_{kT10}}{100} \cdot \frac{U_{nT10}^2}{S_{nT10}} = \frac{12{,}56}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{75 \cdot 10^6} = 0{,}377\ \Omega$$

Hodnota spätnej zložky impedancie transformátora je rovnaká ako hodnota súslednej zložky.

$$Z_{(1)T10} = Z_{(2)T10} = 0{,}377\ \Omega$$

Nulová hodnota je závislá na type transformátora a je vypočítaná podľa rovnice 5.12

$$Z_{(0)T10} = 0{,}85 \cdot Z_{(1)T10} = 0{,}85 \cdot 0{,}377 = 0{,}32\ \Omega$$

Jednotlivé zložky reaktancií transformátora sa vypočítajú podľa rovnice 5.9

$$X_{(1)T10} = \sqrt{Z_{(1)T10}^2 - R_{(1)T10}^2} = \sqrt{0{,}377^2 - 0} = 0{,}377\ \Omega$$

$$X_{(1)T10} = X_{(2)T10} = 0{,}377\ \Omega$$

$$X_{(0)T10} = \sqrt{Z_{(0)T10}^2 - R_{(0)T10}^2} = \sqrt{0{,}32^2 - 0} = 0{,}32\ \Omega$$

Trojvinuťové transformátory

Tab. 7 - Parametre a vypočítané hodnoty trojvinuťových transformátorov

Trojvinuťové transformátory		
	T23	T24
p_T [-]	121/23	121/23
U_{nT} [V]	121	121
Zapojenie	Ynyn0/d	Ynyn0/d
S_{nABT} [MVA]	16	25
S_{nACT} [MVA]	5,5	8
S_{nBCT} [MVA]	5,5	8
u_{kAB} [%]	11,78	11,00
u_{kAC} [%]	11,78	11,00
u_{kBC} [%]	11,78	11,00
$X_{(1)ABT}$ [Ω]	107,794	64,420
$X_{(1)ACT}$ [Ω]	313,584	201,314
$X_{(1)BCT}$ [Ω]	313,584	201,314
x_{ABT} [-]	0,118	0,110
x_{ACT} [-]	0,118	0,110
x_{BCT} [-]	0,118	0,110
K_{ABTMAX} [-]	0,976	0,980
K_{ACTMAX} [-]	0,976	0,980
K_{BCTMAX} [-]	0,976	0,980
$X_{(1)ABTMAX}$ [Ω]	105,209	63,132
$X_{(1)ACTMAX}$ [Ω]	306,058	197,288
$X_{(1)BCTMAX}$ [Ω]	306,058	197,288
$X_{(1)ABTMIN}$ [Ω]	107,794	64,420
$X_{(1)ACTMIN}$ [Ω]	313,584	201,314
$X_{(1)BCTMIN}$ [Ω]	313,584	201,314
$X_{(1)ATMAX}$ [Ω]	52,605	31,566
$X_{(1)BTMAX}$ [Ω]	52,605	31,566
$X_{(1)CTMAX}$ [Ω]	253,454	165,722
$X_{(1)ATMIN}$ [Ω]	53,897	32,21
$X_{(1)BTMIN}$ [Ω]	53,897	32,21
$X_{(1)CTMIN}$ [Ω]	259,687	169,104

Veľkosti súsledných skratových impedancií vztiahnuté na stranu A transformátora. Podľa Obr. 22. Vypočítajú sa podľa rovníc 5.15,5.16 a 5.17

$$Z_{(1)ABT23} = \frac{u_{kABT23}}{100} \cdot \frac{U_{nT23}^2}{S_{nABT23}} = \frac{11{,}78}{100} \cdot \frac{(121 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6} = 107{,}794\ \Omega$$

$$Z_{(1)ACT23} = \frac{u_{kACT23}}{100} \cdot \frac{U_{nT23}^2}{S_{nACT23}} = \frac{11{,}78}{100} \cdot \frac{(121 \cdot 10^3)^2}{5{,}5 \cdot 10^6} = 313{,}584\ \Omega$$

$$Z_{(1)BCT23} = \frac{u_{kBCT23}}{100} \cdot \frac{U_{nT23}^2}{S_{nBCT23}} = \frac{11{,}78}{100} \cdot \frac{(121 \cdot 10^3)^2}{5{,}5 \cdot 10^6} = 313{,}584\ \Omega$$

Jednotlivé reaktancie vztiahnuté na stranu A transformátora je treba prepočítať podľa rovnice 5.9. Podľa [10] sú rezistancie pri veľkých transformátoroch malé a preto sa môžu zanedbať.

$$X_{(1)ABT23} = \sqrt{Z_{(1)ABT23}^2 - R_{(1)ABT23}^2} = \sqrt{107{,}794^2 - 0} = 107{,}794\ \Omega$$

$$X_{(1)ACT23} = \sqrt{Z_{(1)ACT23}^2 - R_{(1)ACT23}^2} = \sqrt{313{,}584^2 - 0} = 313{,}584\ \Omega$$

$$X_{(1)BCT23} = \sqrt{Z_{(1)BCT23}^2 - R_{(1)BCT23}^2} = \sqrt{313{,}584^2 - 0} = 313{,}584\ \Omega$$

Pri výpočte skratových pomerov sieťových transformátorov je potrebné zaviesť do výpočtu aj korekčný súčiniteľ, ktorý sa pri maximálnych skratových prúdoch vypočíta podľa rovníc 5.21,5.22 a 5.23.

$$K_{ABT23MAX} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{ABT23}} = 0{,}95 \cdot \frac{1{,}1}{1 + 0{,}6 \cdot 0{,}118} = 0{,}976$$

$$K_{ACT23MAX} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{ACT23}} = 0{,}95 \cdot \frac{1{,}1}{1 + 0{,}6 \cdot 0{,}118} = 0{,}976$$

$$K_{BCT23MAX} = 0{,}95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \cdot x_{BCT23}} = 0{,}95 \cdot \frac{1{,}1}{1 + 0{,}6 \cdot 0{,}118} = 0{,}976$$

Pomerné hodnoty reaktancií sú potrebné k výpočtu korekčného súčiniteľa pre maximálne skratové prúdy a vypočítajú sa podľa rovnice 5.14.

$$x_{ABT23} = \frac{X_{ABT23}}{\frac{U_{nT23}^2}{S_{nABT23}}} = \frac{107{,}794}{\frac{(121 \cdot 10^3)^2}{16 \cdot 10^6}} = 0{,}118$$

$$x_{ACT23} = \frac{X_{ACT23}}{\frac{U_{nT23}^2}{S_{nACT23}}} = \frac{313{,}584}{\frac{(121 \cdot 10^3)^2}{5{,}5 \cdot 10^6}} = 0{,}118$$

$$x_{BCT23} = \frac{X_{BCT23}}{\frac{U_{nT23}^2}{S_{nBCT23}}} = \frac{313{,}584}{\frac{(121 \cdot 10^3)^2}{5{,}5 \cdot 10^6}} = 0{,}118$$

Korigované hodnoty zložiek súsledných skratových reaktancií pre výpočet maximálnych skratových prúdov dostaneme vynásobením zložiek súsledných skratových reaktancií korekčným súčiniteľom. Pri minimálnych hodnotách je korekčný súčiniteľ rovný 1.

$$X_{(1)ABT23MAX} = X_{(1)ABT23} \cdot K_{ABT23MAX} = 107{,}794 \cdot 0{,}976 = 105{,}209\ \Omega$$

$$X_{(1)ACT23MAX} = X_{(1)ACT23} \cdot K_{ACT23MAX} = 313{,}584 \cdot 0{,}976 = 306{,}058\ \Omega$$

$$X_{(1)BCT23MAX} = X_{(1)BCT23} \cdot K_{BCT23MAX} = 313{,}584 \cdot 0{,}976 = 306{,}058\ \Omega$$

$$X_{(1)ABT23MIN} = X_{(1)ABT23} \cdot K_{ABT23MIN} = 107{,}794 \cdot 1 = 107{,}794\ \Omega$$

$$X_{(1)ACT23MIN} = X_{(1)ACT23} \cdot K_{ACT23MIN} = 313{,}584 \cdot 1 = 313{,}584\ \Omega$$

$$X_{(1)BCT23MIN} = X_{(1)BCT23} \cdot K_{BCT23MIN} = 313{,}584 \cdot 1 = 313{,}584\ \Omega$$

Skratové reaktancie náhradnej schémy trojvinuťového transformátora (Obr. 22) sa vypočítajú podľa rovníc 5.18,5.19 a 5.20, len namiesto impedancií sa počíta s reaktanciami, lebo rezistancie sa zanedbávajú.

$$X_{(1)AT23MAX} = \frac{X_{(1)ABT23MAX} + X_{(1)ACT23MAX} - X_{(1)BCT23MAX}}{2} = \frac{105{,}209 + 306{,}058 - 306{,}058}{2} = 52{,}605\ \Omega$$

$$X_{(1)BT23MAX} = \frac{X_{(1)ABT23MAX} + X_{(1)BCT23MAX} - X_{(1)ACT23MAX}}{2} = \frac{105{,}209 + 306{,}058 - 306{,}058}{2} = 52{,}605\ \Omega$$

$$X_{(1)CT23MAX} = \frac{X_{(1)BCT23MAX} + X_{(1)ACT23MAX} - X_{(1)ABT23MAX}}{2} = \frac{306{,}058 + 306{,}058 - 105{,}209}{2} = 253{,}454\ \Omega$$

$$X_{(1)AT23MIN} = \frac{X_{(1)ABT23MIN} + X_{(1)ACT23MIN} - X_{(1)BCT23MIN}}{2} = \frac{107{,}794 + 313{,}584 - 313{,}584}{2} = 53{,}897\ \Omega$$

$$X_{(1)BT23MIN} = \frac{X_{(1)ABT23MIN} + X_{(1)BCT23MIN} - X_{(1)ACT23MIN}}{2} = \frac{107{,}794 + 313{,}584 - 313{,}584}{2} = 53{,}897\ \Omega$$

$$X_{(1)CT23MIN} = \frac{X_{(1)BCT23MIN} + X_{(1)ACT23MIN} - X_{(1)ABT23MIN}}{2} = \frac{313{,}584 + 313{,}584 - 107{,}794}{2} = 259{,}687\ \Omega$$

Spätné skratové reaktancie sú rovnaké ako súsledné.

Nulová zložka je závislá na strane transformátora na ktorej sa skrat nachádza. Výpočet jej hodnoty je uvedený pri danom výpočte kde je s ňou nutné počítať.

6.3.4 Vedenia

Výkon je z podzemných generátorov TG1 a TG2 vyvedený k nadzemným transformátorom T10 a T20 pomocou káblov, ktoré sú dlhé 400 m. Jedná sa o kábel 22-AXEKCY 1x240 a na jednu fázu je použitých deväť žíl tohto káblu. Vo výpočte robeným firmou SAG Elektrovod neboli impedancie kábla uvažované, preto boli zanedbané aj v tejto diplomovej práci pri manuálnom výpočte, ale aj pri výpočte pomocou programu NetCalc.

6.4 Výpočet počiatočných razových skratových prúdov

Táto časť obsahuje výpočet maximálnych a minimálnych skratových prúdov pre skraty, ktoré nastali na rôznych miestach v elektrárni. Výpočet bol robený ručne metódou postupného zjednodušenia. Od zadávateľa diplomovej práce boli obdržané informácie o elektrických zariadenia, ktoré prispievajú do skratov v jednotlivých prípadoch a je ich nutné v tomto výpočte uvažovať. Ku každému miestu výpočtu skratových prúdov sú tieto zariadenia uvedené v tabuľkách a na obrázku k nim je nakreslená schéma zapojenia s vyznačeným miestom skratu.

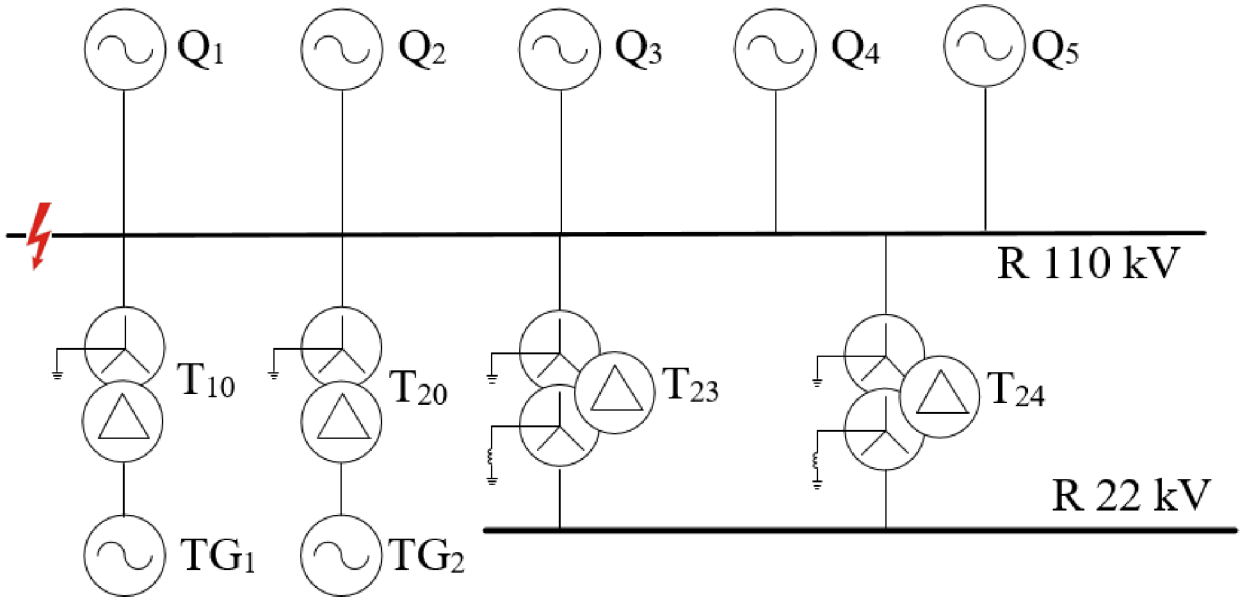
6.4.1 Skrat v rozvodni 110 kV

V tejto časti je uvedený postup výpočtu maximálnych a minimálnych skratových prúdov pre skrat, ktorý je uvažovaný na zberni rozvodne 110 kV.

Maximálne hodnoty

Tab. 8 - Zdroje prispievajúce do skratu v rozvodni 110 kV

Generátor	TG1	TG2			
Transformátor	T10	T20	T23	T24	
Sieťové napájače	V1365-Q1	V1367-Q2	V1368-Q3	V1374-Q4	V1392-Q5



Obr. 25 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 110 kV

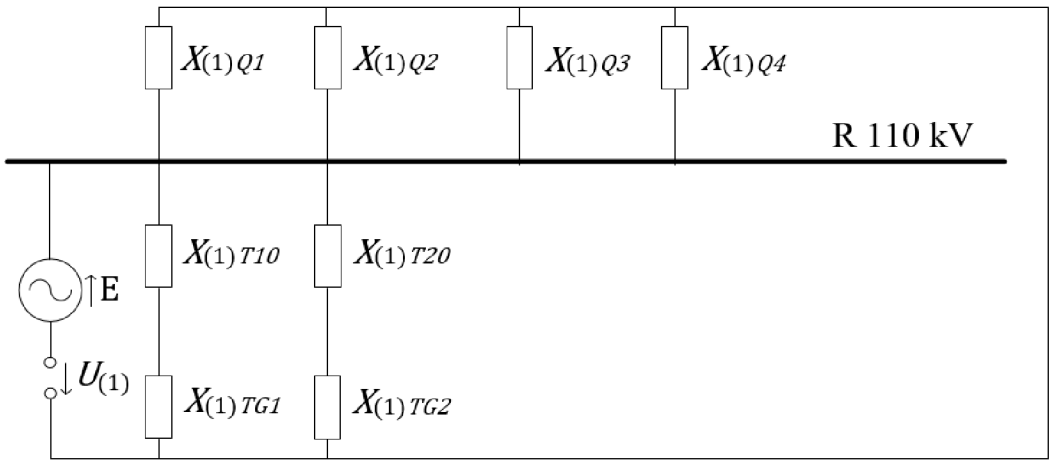
Prvým krokom výpočtu bolo prepočítanie si jednotlivých reaktancií prvkov na napäťovú hladinu v mieste skratu $U_v = 110$ kV, vynásobením hodnôt pomerom druhým mocnín vzťažného napätia a menovitého napätia daného elektrického prvku podľa rovnice 5.1. Výsledné hodnoty sú uvedené v Tab. 9.

Tab. 9 - Prepočítané hodnoty reaktancií

Názov	Označenie	$X_{(1)MAXP}[\Omega]$	$X_{(2)MAXP}[\Omega]$	$X_{(0)MAXP}[\Omega]$
Generátor	TG1	26,325	28,362	15,356
Generátor	TG2	26,325	28,362	15,356
Transformátor	T10	20,264	20,264	17,224
Transformátor	T20	20,264	20,264	17,224
Transformátor	T23 primár A	43,475	43,475	43,475
Transformátor	T23 sekundár B	43,475	43,475	43,475
Transformátor	T23 terciár C	209,466	209,466	209,466
Transformátor	T24 primár A	26,088	26,088	26,088
Transformátor	T24 sekundár B	26,088	26,088	26,088
Transformátor	T24 terciár C	136,96	136,96	136,96
Sieťový napájač	V1365-Q1	33,749	33,749	47,027
Sieťový napájač	V1367-Q2	30,640	30,640	33,983
Sieťový napájač	V1368-Q3	31,611	31,611	39,513
Sieťový napájač	V1374-Q4	46,265	46,265	61,573
Sieťový napájač	V1392-Q5	0,000	0,000	0,000

Výpočet maximálnych počiatočných rázových skratových prúdov

a) Trojfázový skrat



Obr. 26 - Náhradná schéma pre prípad trojfázového skratu v rozvodni 110 kV

Zjednodušenie náhradnej schémy súslednej sústavy

Krok č.1

1. Paralelná kombinácia sieťových napájačov Q1,Q2,Q3 a Q4

$$X_{(1)A110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(1)Q1MAXP}} + \frac{1}{X_{(1)Q2MAXP}} + \frac{1}{X_{(1)Q3MAXP}} + \frac{1}{X_{(1)Q4MAXP}}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{33,749} + \frac{1}{30,64} + \frac{1}{31,611} + \frac{1}{46,265}} = 8,657\ \Omega$$

2. Sériová kombinácia hlavného generátora TG1 a transformátoru T10 a následná paralelná kombinácia so sériovou kombináciou hlavného generátora TG2 a transformátoru T20.

$$X_{(1)B110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{(X_{(1)T10MAXP} + X_{(1)TG1MAXP})} + \frac{1}{(X_{(1)T20MAXP} + X_{(1)TG2MAXP})}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{(20,264 + 26,325)} + \frac{1}{(20,264 + 26,325)}} = 23,295\ \Omega$$

Krok č.2

Výsledná reaktancia v mieste skratu je paralelnou kombináciou hodnôt vypočítaných v predchádzajúcom kroku.

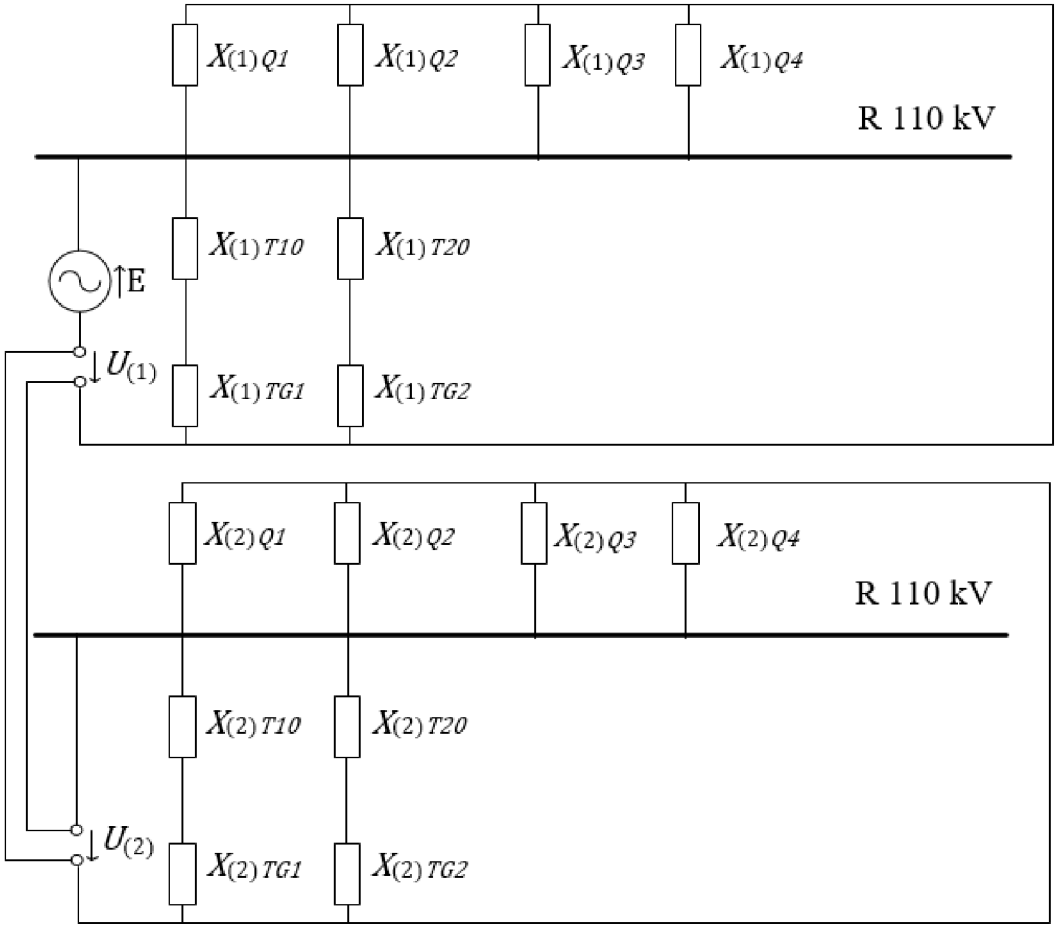
$$X_{(1)V110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(1)A110MAX}} + \frac{1}{X_{(1)B110MAX}}} = \frac{1}{\frac{1}{8,657} + \frac{1}{23,295}} = 6,311\ \Omega$$

Maximálny počiatočný rázový skratový prúd pre trojfázový skrat v rozvodni 110 kV

Pri výpočte sa uplatní iba súsledná zložka reaktancie. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1.

$$I''_{k3110MAX} = \frac{c_{max} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V110MAX}} = \frac{1,1 \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{6,311} = 11,069\ \text{kA}$$

b) Dvojfázový skrat



Obr. 27 - Náhradná schéma pre prípad dvojfázového skratu v rozvodni 110 kV

Zjednodušenie náhradnej schémy spätnej sústavy

Krok č.1

1. Paralelná kombinácia sieťových napájačov Q1,Q2,Q3 a Q4

Vzhľadom na to že hodnoty jednotlivých napájačov sú rovnaké pre súslednú aj spätnú sústavu je aj ich paralelná kombinácia rovnaká.

$$X_{(2)A110MAX} = X_{(1)A110MAX} = 8{,}657\ \Omega$$

2. Sériová kombinácia hlavného generátora TG1 a transformátoru T10 a následná paralelná kombinácia so sériovou kombináciou hlavného generátora TG2 a transformátoru T20.

$$X_{(2)B110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{(X_{(2)T10MAXP} + X_{(2)TG1MAXP})} + \frac{1}{(X_{(2)T20MAXP} + X_{(2)TG2MAXP})}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{(20{,}264 + 28{,}362)} + \frac{1}{(20{,}264 + 28{,}362)}} = 24{,}313\ \Omega$$

Krok č.2

Výsledná reaktancia v mieste skratu je paralelnou kombináciou hodnôt vypočítaných v predchádzajúcom kroku.

$$X_{(2)V110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(2)A110MAX}} + \frac{1}{X_{(2)B110MAX}}} = \frac{1}{\frac{1}{8{,}657} + \frac{1}{24{,}313}} = 6{,}384\ \Omega$$

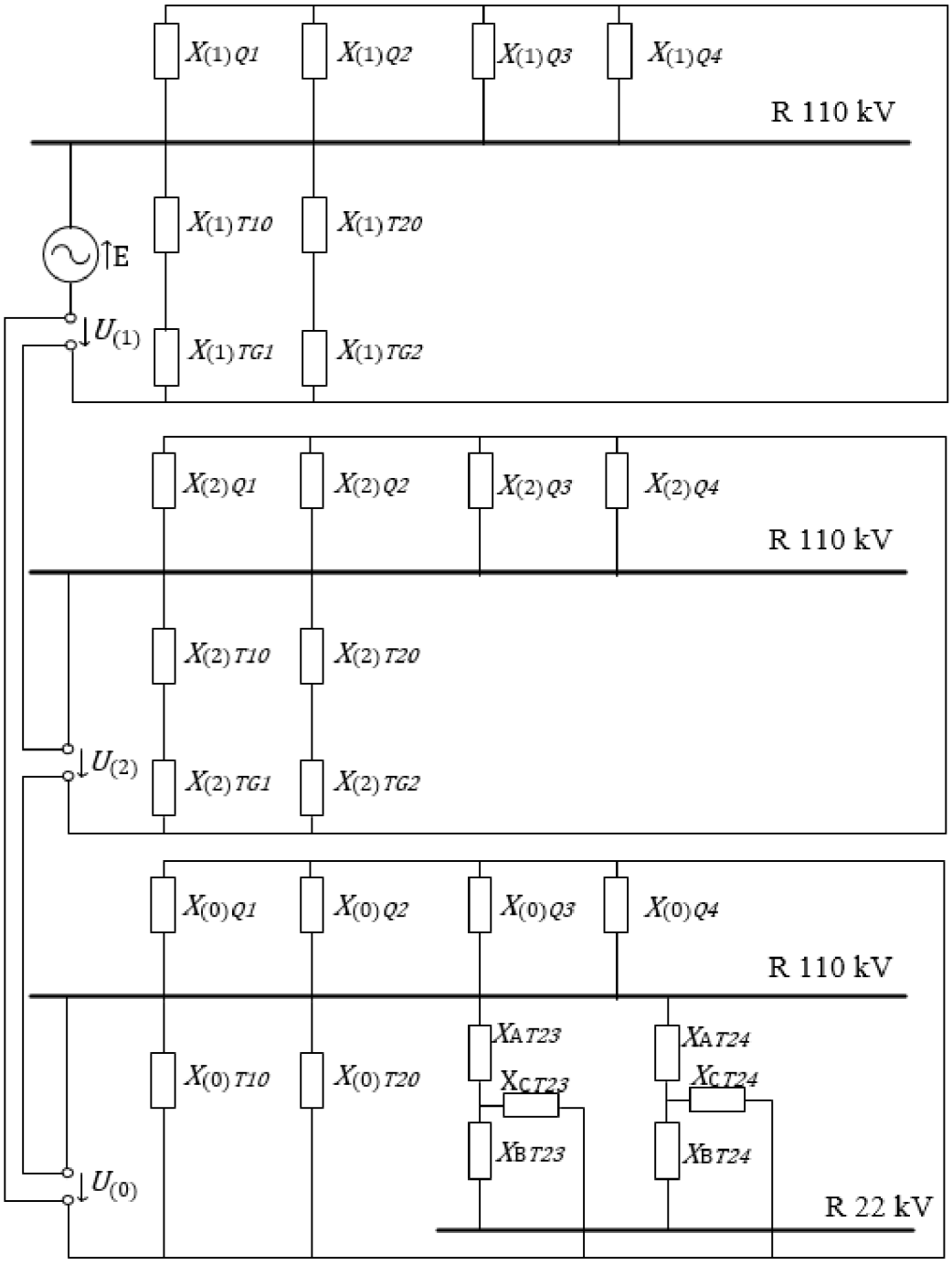
Maximálny počiatočný rázový skratový prúd pre dvojfázový skrat v rozvodni 110 kV

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota pre dvojfázový skrat sa vypočíta sa podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1.

$$I''_{k2110MAX} = \frac{c_{max} \cdot U_v}{X_{(1)V110MAX} + X_{(2)V110MAX}} = \frac{1{,}1 \cdot 110 \cdot 10^3}{6{,}311 + 6{,}384} = 9{,}531 \text{ kA}$$

c) Jednofázový skrat

Pri výpočte sa uplatnia všetky tri symetrické zložky reaktancií prvkov.



Obr. 28 - Náhradná schéma pre prípad jednofázového skratu v rozvodni 110 kV

Zjednodušenie náhradnej schémy nulovej sústavy

1. Paralelná kombinácia sieťových napájačov Q1,Q2,Q3 a Q4

$$X_{(0)A110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(0)Q1MAXP}} + \frac{1}{X_{(0)Q2MAXP}} + \frac{1}{X_{(0)Q3MAXP}} + \frac{1}{X_{(0)Q4MAXP}}}$$
$$= \frac{1}{\frac{1}{47,027} + \frac{1}{33,983} + \frac{1}{39,513} + \frac{1}{61,573}} = 10,841\ \Omega$$

2. Nulová zložka reaktancie trojvinuťových transformátorov a ich paralelná kombinácia transformátorov T23 a T24

Nulová zložka je závislá na strane transformátora na ktorej sa skrat nachádza. V tomto prípade sa skrat nachádza na primárnej strane transformátora a nulová zložka sa pre tento typ zapojenia transformátora vypočíta podľa [13] ako.

$$X_{(0)T23MAX} = X_{(1)AT23MAXP} + X_{(1)CT23MAXP} = 43,475 + 209,466 = 252,491\ \Omega$$
$$X_{(0)T24MAX} = X_{(1)AT24MAXP} + X_{(1)CT24MAXP} = 26,088 + 136,96 = 166,048\ \Omega$$
$$X_{(0)B110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(0)T23MAXP}} + \frac{1}{X_{(0)T24MAXP}}} = \frac{1}{\frac{1}{252,491} + \frac{1}{166,048}} = 100,171\ \Omega$$

3. Paralelná kombinácia transformátorov T10 a T20.

$$X_{(0)C110MAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(0)T10MAXP}} + \frac{1}{X_{(0)T20MAXP}}} = \frac{1}{\frac{1}{17,224} + \frac{1}{17,224}} = 8,612\ \Omega$$

Krok č.2

Výsledná nulová zložka reaktancie v mieste skratu je paralelnou kombináciou hodnôt vypočítaných v predchádzajúcom kroku.

$$X_{(0)VYSMAX} = \frac{1}{\frac{1}{X_{(0)A110MAX}} + \frac{1}{X_{(0)B110MAX}} + \frac{1}{X_{(0)CMAX}}} = \frac{1}{\frac{1}{10,841} + \frac{1}{100,171} + \frac{1}{8,612}} = 4,58\ \Omega$$

Maximálny počiatočný rázový skratový prúd pre jednofázový skrat v rozvodni 110 kV

Pri výpočte sa počíta so všetkými zložkami reaktancií. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta sa podľa rovnice 4.7, napäťový súčiniteľ c_{max} je z Tab. 1.

$$I''_{k1110MAX} = \sqrt{3} \cdot \frac{c_{max} \cdot U_v}{X_{(1)V110MAX} + X_{(2)V110MAX} + X_{(0)V110MAX}} = \sqrt{3} \cdot \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{6,311 + 6,384 + 4,58}$$
$$= 12,131\ \text{kA}$$

d) Dvojfázový zemný skrat

Hodnota skratového prúdu tečúca do zeme sa pre dvojfázový zemný skrat vypočíta podľa rovnice 4.4

$$I''_{kE2E110MAX} = \frac{3 \cdot X_{(2)V110MAX} \cdot c_{max} \cdot U_v}{(X_{(1)V110MAX} \cdot X_{(2)V110MAX} + X_{(1)V110MAX} \cdot X_{(0)V110MAX} + X_{(2)V110MAX} \cdot X_{(0)V110MAX}) \cdot \sqrt{3}} =$$

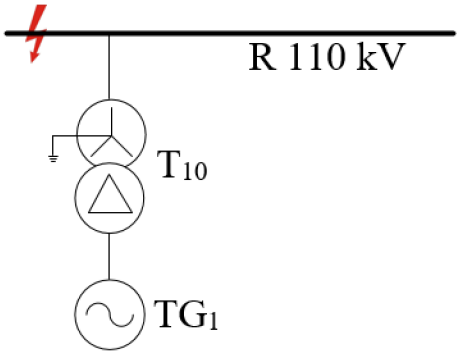
$$= \frac{3 \cdot 6{,}384 \cdot 1{,}1 \cdot 110 \cdot 10^3}{(6{,}311 \cdot 6{,}384 + 6{,}311 \cdot 4{,}58 + 6{,}384 \cdot 4{,}58) \cdot \sqrt{3}} = 13{,}593 \text{ kA}$$

Minimálne hodnoty

V tejto časti je uvedený postup výpočtu minimálnych skratových prúdov pre skrat, ktorý je uvažovaný na zberni rozvodne 110 kV.

Tab. 10 - Zdroje prispievajúce do skratu 110 kV

Generátor	TG1
Transformátor	T10



Obr. 29 - Schéma zdroje prispievajúce do skratu

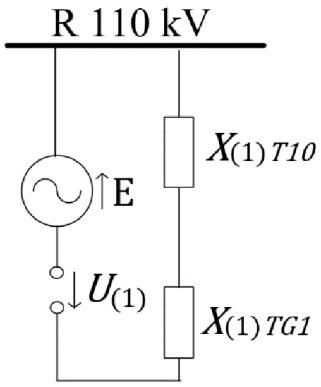
Tak ako pri maximálnych hodnotách, bolo potrebné prepočítať reaktancie jednotlivých prvkov na napäťovú hladinu v mieste skratu $U_v = 110$ kV, vynásobením hodnôt pomerom druhým mocnín vzťažného napätia a menovitého napätia daného elektrického prvku. Výsledné hodnoty sú uvedené v Tab. 11.

Tab. 11 - Prepočítané hodnoty reaktancií

Názov	Označenie	$X_{(1)MINP}[\Omega]$	$X_{(2)MINP}[\Omega]$	$X_{(0)MINP}[\Omega]$
Generátor	TG1	26,325	28,362	15,356
Transformátor	T10	20,264	20,264	17,224

Výpočet minimálnych počiatočných rázových skratových prúdov

a) Trojfázový skrat



Obr. 30 - Náhradná schéma pre prípad trojfázového skratu v rozvodni 110 kV

Výsledná súsledná reaktancia v mieste skratu je sériovou kombináciou hodnôt reaktancií transformátora a generátora.

$$X_{(1)V110MIN} = X_{(1)T10MINP} + X_{(1)TG1MINP} = 20{,}264 + 26{,}325 = 46{,}588\ \Omega$$

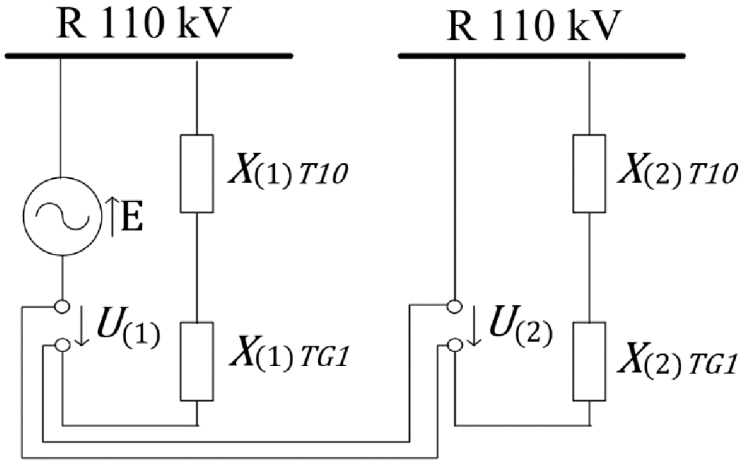
Minimálny počiatočný rázový skratový prúd pre trojfázový skrat

Uplatní sa iba súsledná zložka reaktancie. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1

$$I''_{k3110MIN} = \frac{c_{min} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V110MAX}} = \frac{1 \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{46{,}588} = 1{,}363\ \text{kA}$$

b) Dvojfázový skrat

Počíta sa so súslednou a spätnou zložkou reaktancie



Obr. 31 - Náhradná schéma pre prípad dvojfázového skratu v rozvodni 110 kV

Výsledná spätná reaktancia v mieste skratu je sériovou kombináciou hodnôt reaktancií transformátora a generátora.

$$X_{(2)V110MIN} = X_{(2)T10MINP} + X_{(2)TG1MINP} = 20{,}264 + 28{,}362 = 48{,}626\ \Omega$$

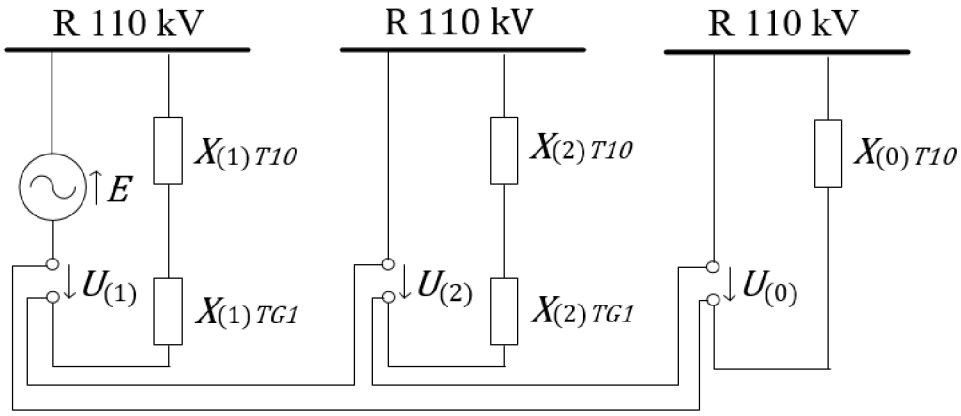
Minimálny počiatočný rázový skratový prúd pre dvojfázový skrat v rozvodni 110 kV

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre dvojfázový skrat sa vypočíta sa podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1.

$$I''_{k2110MIN} = \frac{c_{min} \cdot U_v}{X_{(1)V110MIN} + X_{(2)V110MIN}} = \frac{1 \cdot 110 \cdot 10^3}{46{,}588 + 48{,}626} = 1{,}155 \text{ kA}$$

c) Jednofázový skrat

Pri výpočte sa uplatnia všetky tri symetrické zložky reaktancií prvkov.



Obr. 32 - Náhradná schéma pre prípad jednofázového skratu v rozvodni 110 kV

Netočivá reaktancia v mieste skratu je rovná reaktancii transformátora.

$$X_{(0)V110MIN} = X_{(0)T10MINP} = 17{,}224\ \Omega$$

Minimálny počiatočný rázový skratový prúd pre jednofázový skrat v rozvodni 110 kV

Pri výpočte sa počíta so všetkými zložkami reaktancií. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.7, napäťový súčiniteľ c_{min} je z Tab. 1.

$$I''_{k1110MIN} = \sqrt{3} \cdot \frac{c_{min} \cdot U_v}{X_{(1)V110MIN} + X_{(2)V110MIN} + X_{(0)V110MIN}} = \sqrt{3} \cdot \frac{1 \cdot 110 \cdot 10^3}{46{,}588 + 48{,}626 + 17{,}224} = 1{,}694 \text{ kA}$$

d) Dvojfázový zemný skrat

Hodnota skratového prúdu tečúca do zeme sa pre dvojfázový zemný skrat vypočíta podľa rovnice 4.4

$$I''_{kE2E110MIN} = \frac{3 \cdot X_{(2)V110MIN} \cdot c_{min} \cdot U_v}{(X_{(1)V110MIN} \cdot X_{(2)V110MIN} + X_{(1)V110MIN} \cdot X_{(0)V110MIN} + X_{(2)V110MIN} \cdot X_{(0)V110MIN}) \cdot \sqrt{3}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 48{,}626 \cdot 1 \cdot 110 \cdot 10^3}{(46{,}588 \cdot 48{,}626 + 46{,}588 \cdot 17{,}224 + 46{,}588 \cdot 17{,}224) \cdot \sqrt{3}} = 2{,}454 \text{ kA}$$

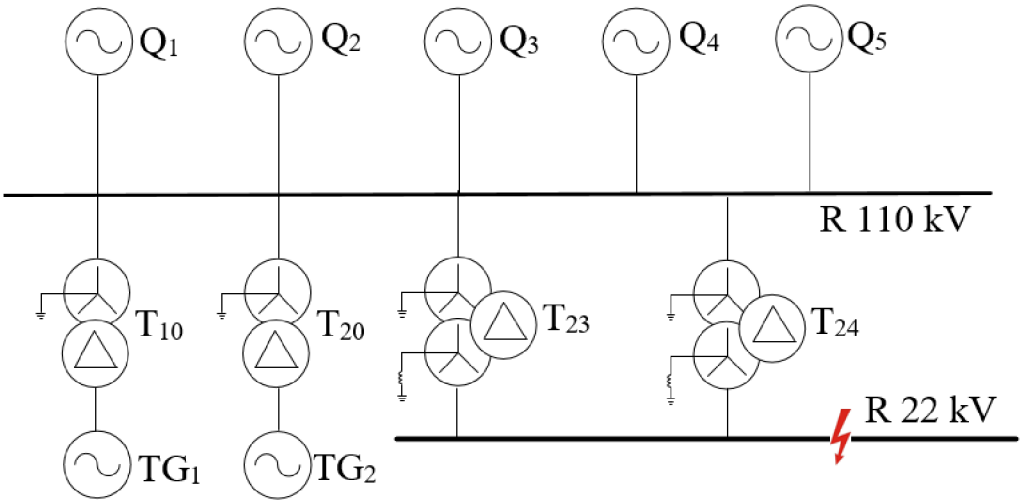
6.4.2 Skrat v rozvodni 22 kV

V tejto časti je uvedený výpočet maximálnych a minimálnych skratových prúdov pre skrat, ktorý je uvažovaný na zberni rozvodne 22 kV.

Maximálne hodnoty

Tab. 12 - Zdroje prispievajúce do skratu 22 kV

Generátor	TG1	TG2			
Transformátor	T10	T20	T23	T24	
Sieťové napájače	V1365-Q1	V1367-Q2	V1368-Q3	V1374-Q4	V1392-Q5



Obr. 33 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 22 kV

Reaktancie jednotlivých prvkov boli prepočítané na napäťovú hladinu v mieste skratu 22 kV. Pri trojvinuťových transformátoroch T23 a T24 je súsledná a spätná zložka rovnaká a je tvorená sériovou kombináciou reaktancií primáru $X_{(1)AT23MAXP}$ ($X_{(1)AT24MAXP}$) a sekundáru $X_{(1)BT23MAXP}$ ($X_{(1)BT24MAXP}$). Následným zjednodušením schémy zapojenia podobne ako pri skrate v rozvodni 110 kV boli vypočítané jednotlivé zložky reaktancií. Z týchto reaktancií boli vypočítané maximálne skratové prúdy pre skrat ktorý nastal v rozvodni 22 kV.

a) Trojfázový skrat

Uplatní sa iba súsledná zložka reaktancie. Veľkosť skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1

$$I''_{k322MAX} = \frac{c_{max} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V22MAX}} = \frac{1{,}1 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{1{,}642} = 8{,}508\ \text{kA}$$

b) Dvojfázový skrat

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre dvojfázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1.

$$I''_{k222MAX} = \frac{c_{max} \cdot U_v}{X_{(1)V22MAX} + X_{(2)V22MAX}} = \frac{1{,}1 \cdot 22 \cdot 10^3}{1{,}642 + 1{,}645} = 7{,}361\ \text{kA}$$

c) Jednofázový skrat

Nemôže nastať lebo uzol sekundárneho vinutia trojvinuťových transformátorov je uzemnený cez tlmivku.

d) Dvojfázový zemný skrat

Hodnota skratového prúdu tečúca do zeme sa pre dvojfázový zemný skrat vypočíta podľa rovnice 4.4

$$I''_{kE2E22MAX} = \frac{3 \cdot X_{(2)V22MAX} \cdot c_{max} \cdot U_v}{(X_{(1)V22MAX} \cdot X_{(2)V22MAX} + X_{(1)V22MAX} \cdot X_{(0)V22MAX} + X_{(2)V22MAX} \cdot X_{(0)V22MAX}) \cdot \sqrt{3}} =$$

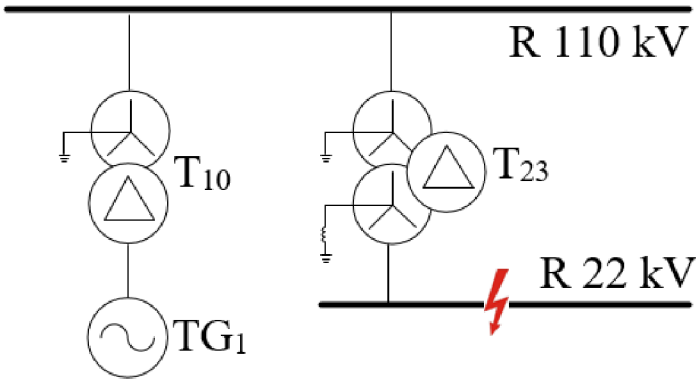
$$= \frac{3 \cdot 1{,}645 \cdot 1{,}1 \cdot 110 \cdot 10^3}{(1{,}645 \cdot 1{,}642 + 1{,}645 \cdot 1{,}374 + 1{,}642 \cdot 1{,}374) \cdot \sqrt{3}} = 9{,}553 \text{ kA}$$

Minimálne hodnoty

V Tab. 13 sú uvedené jednotlivé zdroje prispievajúce do skratu na zberni rozvodne 15 kV. Obr. 34 zobrazuje schému zapojenia uvažovaných prvkov.

Tab. 13 - Zdroje prispievajúce do skratu 22 kV

Generátor	TG1	
Transformátor	T10	T23



Obr. 34 - Schéma s uvažovanými prvkami pre minimálne skraty v rozvodni 22 kV

Použitím rovnakého postupu ako pri maximálnych hodnotách skratových prúdov boli vypočítané minimálne hodnoty skratových prúdov.

a) Trojfázový skrat

Uplatní sa iba súsledná zložka reaktancie. Veľkosť skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1

$$I''_{k322MIN} = \frac{c_{min} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V22MIN}} = \frac{1 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{5{,}427} = 2{,}341 \text{ kA}$$

b) Dvojfázový skrat

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre dvojfázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1.

$$I''_{k222MIN} = \frac{c_{min} \cdot U_v}{X_{(1)V22MIN} + X_{(2)V22MIN}} = \frac{1 \cdot 22 \cdot 10^3}{5{,}427 + 5{,}509} = 2{,}012 \text{ kA}$$

c) Jednofázový skrat

Nemôže nastať lebo uzol sekundárneho vinutia trojvinuťových transformátorov je uzemnený cez tlmivku.

d) Dvojfázový zemný skrat

Hodnota skratového prúdu tečúca do zeme sa pre dvojfázový zemný skrat vypočíta podľa rovnice 4.4

$$I''_{kE2E22MIN} = \frac{3 \cdot X_{(2)V22MIN} \cdot c_{min} \cdot U_v}{(X_{(1)V22MIN} \cdot X_{(2)V22MIN} + X_{(1)V22MIN} \cdot X_{(0)V22MIN} + X_{(2)V22MIN} \cdot X_{(0)V22MIN}) \cdot \sqrt{3}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 5{,}509 \cdot 1 \cdot 22 \cdot 10^3}{(5{,}427 \cdot 5{,}509 + 5{,}427 \cdot 3{,}718 + 5{,}509 \cdot 3{,}718) \cdot \sqrt{3}} = 2{,}975\text{kA}$$

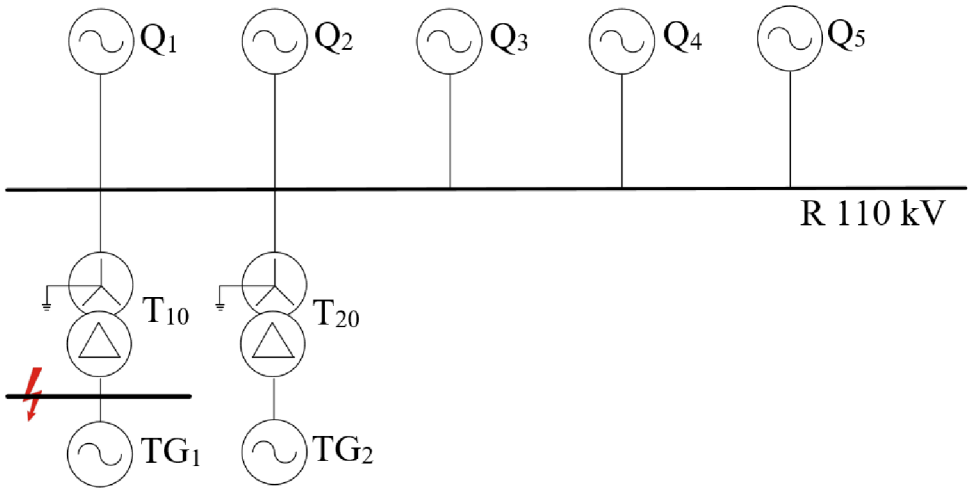
6.4.3 Skrat v rozvodni 15 kV

V tejto časti je uvedený výpočet maximálnych a minimálnych skratových prúdov pre skrat, ktorý je uvažovaný na zberni rozvodne 15 kV.

Maximálne hodnoty

Tab. 14 - Zdroje prispievajúce do skratu 15 kV

Generátor	TG1	TG2			
Transformátor	T10	T20			
Sieťové napájače	V1365-Q1	V1367-Q2	V1368-Q3	V1374-Q4	V1392-Q5



Obr. 35 - Schéma s uvažovanými prvkami pre maximálne skraty v rozvodni 15 kV

Prepočítaním hodnôt reaktancií jednotlivých prvkov na napäťovú hladinu v mieste skratu 15 kV a následným zjednodušením schémy zapojenia podobne ako pri skrate v rozvodni 110 kV boli vypočítané jednotlivé zložky reaktancií. Z týchto reaktancií boli vypočítané maximálne skratové prúdy pre skrat ktorý nastal v rozvodni 15 kV.

a) Trojfázový skrat

Uplatní sa iba súsledná zložka reaktancie. Veľkosť skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1

$$I''_{k315MAX} = \frac{c_{max} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V15MAX}} = \frac{1{,}1 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{0{,}25} = 38{,}047\ \text{kA}$$

b) Dvojfázový skrat

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre dvojfázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{max} je z Tab. 1.

$$I''_{k215MAX} = \frac{c_{max} \cdot U_v}{X_{(1)V15MAX} + X_{(2)V15MAX}} = \frac{1{,}1 \cdot 15 \cdot 10^3}{0{,}25 + 0{,}26} = 32{,}318\ \text{kA}$$

c) Jednofázový skrat

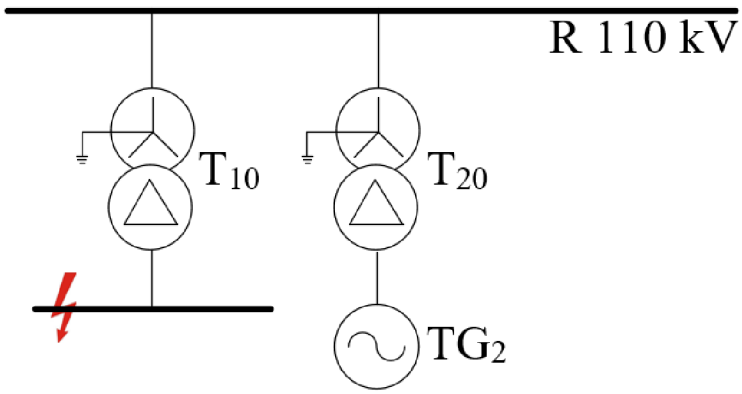
Nemôže nastať lebo uzol generátora nie je priamo uzemnený.

Minimálne hodnoty

V Tab. 15 sú uvedené jednotlivé zdroje prispievajúce do skratu na zberni rozvodne 15 kV. Obr. 36 zobrazuje schému zapojenia uvažovaných prvkov.

Tab. 15 - Zdroje prispievajúce do skratu 15 kV

Generátor	TG2	
Transformátor	T10	T20



Obr. 36 - Schéma s uvažovanými prvkami pre minimálne skraty v rozvodni 15 kV

Použitím rovnakého postupu ako pri maximálnych hodnotách skratových prúdov boli vypočítané minimálne hodnoty skratových prúdov.

a) Trojfázový skrat

Uplatní sa iba súsledná zložka reaktancie. Veľkosť skratového prúdu pre jednofázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.2, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1

$$I''_{k315MIN} = \frac{c_{min} \cdot \frac{U_v}{\sqrt{3}}}{X_{(1)V15MAX}} = \frac{1 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{1{,}243} = 6{,}966 \text{ kA}$$

b) Dvojfázový skrat

Pri výpočte sa uplatní súsledná a spätná zložka reaktancie prvkov. Hodnota veľkosti skratového prúdu pre dvojfázový skrat sa vypočíta podľa rovnice 4.3, hodnota napäťového súčiniteľa c_{min} je z Tab. 1.

$$I''_{k215MIN} = \frac{c_{min} \cdot U_v}{X_{(1)V15MIN} + X_{(2)V15MIN}} = \frac{1 \cdot 15 \cdot 10^3}{1{,}243 + 1{,}281} = 5{,}943 \text{ kA}$$

c) Jednofázový skrat.

Nemôže nastať lebo uzol generátora nie je priamo uzemnený.

6.5 Porovnanie výsledkov dosiahnutých manuálnym výpočtom a výpočtovým programom NetCalc.

V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené maximálne a minimálne vypočítané hodnoty počiatočných rázových skratových prúdov, pre prípady, kde skrat nastal na rôznych miestach vo VE Lipno. Keďže výpočet bol robený pomocou programu NetCalc a pre porovnanie aj manuálne sú v tabuľkách uvedené hodnoty pre oba spôsoby výpočtu.

Tab. 16 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat na zberni rozvodne 110kV

Skratový prúd/ Spôsob výpočtu	I''_{k3110} [kA]	I''_{k2110} [kA]	I''_{k1110} [kA]	$I''_{kE2E110}$ [kA]
	Maximálne hodnoty			
Ručný výpočet	11,069	9,531	12,131	13,593
NetCalc	11,027	9,550	12,030	13,232
	Minimálne hodnoty			
Ručný výpočet	1,363	1,155	1,694	2,454
NetCalc	1,344	1,164	1,737	2,372

Tab. 17 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat v zberni rozvodne 22 kV

Skratový prúd/ Spôsob výpočtu	I''_{k322} [kA]	I''_{k222} [kA]	I''_{k122} [kA]	I''_{kE2E22} [kA]
	Maximálne hodnoty			
Ručný výpočet	8,508	7,361	0	9,553
NetCalc	8,808	7,628	0	9,519
	Minimálne hodnoty			
Ručný výpočet	2,341	2,012	0	2,975
NetCalc	2,329	2,017	0	2,847

Tab. 18 - Počiatočné rázové skratové prúdy pre skrat na zberni rozvodne 15 kV

Skratový prúd/ Spôsob výpočtu	I''_{k315} [kA]	I''_{k215} [kA]	I''_{k115} [kA]
	Maximálne hodnoty		
Ručný výpočet	38,047	32,318	0
NetCalc	37,558	32,526	0
	Minimálne hodnoty		
Ručný výpočet	6,966	5,943	0
NetCalc	6,898	5,974	0

Ako je viditeľné z tabuliek, výsledky jednotlivých metód nie sú vždy úplne zhodné. Menšie rozdiely, ktoré vznikli medzi použitými metódami výpočtu boli spôsobené zaokruhľovaním pri medzi výpočtoch a taktiež zaokruhľovaním pri zadávaní vstupných hodnôt do programu Netcalc, ktoré bolo vo viacerých prípadoch potrebné prepočítať na hodnoty, ktoré mohli byť zadané do programu. Väčšie odchýlky boli spôsobené napríklad tým, že program NetCalc uvažuje hodnoty súslednej $X_{(1)TG}$ a spätnej $X_{(2)TG}$ skratovej impedancie hlavných generátorov ako rovnaké, čo ale v skutočnosti nie je pravda, keďže sú známe hodnoty priečnej rázovej reaktancie generátorov $X_q^{''}$ a je možné si spätnú skratovú reaktanciu dopočítať ako $X_{(2)TG} = (X_d^{''} + X_q^{''})/2$.

7 NASTAVENIE OCHRÁN HLAVNÝCH GENERÁTOROV VE LIPNO I.

Pri rekonštrukcii vodnej elektrárne Lipno I. došlo k výmene elektrických ochrán generátorov a preto je nutné spraviť výpočet ich nastavenia. Pre systém chránenia boli použité výhradne elektrické ochrany založené na digitálnej technológii. Zásadnou zmenou oproti stavu pred rekonštrukciou je dispozičné riešenie rozvádzača ochrán generátorov, keď teraz sú ochrany umiestnené v rade so skrinkami pomocného budenia generátoru. Ochrany sú po výmene napájané z rozvodu DC napätia na úrovni až 240 V DC. DC rozvod je rozdelený na sekciu „A“ a „B“. Hlavné ochrany, prvé vypínacie a zapínacie cievky sú napájané z okruhu „A“ a okruh „B“ slúži na napájanie záložných ochrán a druhých vypínacích cievok. Ak je použitá len jedna ochrana, potom je napájaná z okruhu „A“ s automatickým okamihovým záskokom na okruh „B“, tak aby nedošlo k reštartovaniu ochrany.

Na chránenie generátorov sú použité ochrany od firmy SIEMENS typu SIPROTEC 7UM622 a ochrana plní ochranné funkcie uvedené v Tab. 19.

Tab. 19 - Funkcie ochrany SIEMENS SIPOROTEC 7UM62

Položka	Druh Ochrany	Označenie
1	Nadprúdová ochrana pridržiavaná podpätím	50/27G
2	Nadprúdová ochrana zo strany siete	50G
3	Rozdielová ochrana generátora	87G
4	Ochrana pri nesymetrii	46G
5	Ochrana proti prúdovému preťaženiu statora (termická)	49G
6	Ochrana pri spätnom toku výkonu	32R
7	Minimálna wattová ochrana	32MIN
8	Maximálna wattová ochrana	32MAX
9	Ochrana podimpedančná	21G
10	Ochrana pri podbudení	40.1G
11	Ochrana pri strate budenia	40.2G
12	Ochrana proti preklzu generátora	78G
13	Prepäťová dvojstupňová ochrana	59.1,2G
14	Podpäťová ochrana	27.1,2G
15	Zemná ochrana rotoru	64.1,2R
16	Zemná ochrana statoru 95% a 100%	64.1,2S
17	Ochrana pri podfrekvencii	81.1,2G
18	Ochrana pri nadfrekvencii	81.3,4G

7.1 Nastavenie ochrany SIPOROTEC 7UM622

V tejto kapitole je popísané nastavenie jednotlivých funkcii, ktoré ochrana SIPROTEC 7UM622 plní. Rovnaké hodnoty nastavenia sú platné pre oba hlavné generátory TG1 a TG2. Hodnoty nastavení uvedené v tabuľkách pre jednotlivé funkcie ochrán boli prevzaté z nastavenia robených firmou SAG Elektrovod. Menovité hodnoty chránených generátorov ako aj ostatných zariadení ktoré sú potrebné k výpočtu nastavení ochrán sú uvedené v kapitole 6. Prístrojové transformátory prúdu (PTP), ktoré sú používané na meranie vstupných hodnôt pre ochrany majú menovitý prúd primárnej strany $I_{PTPprim} = 3000$ A a sekundárnej strany $I_{PTPsek} = 5$ A. Prístrojové transformátory napätia (PTN) majú menovité napätie primárnej strany $U_{PTNprim} = 15$ kV a sekundárnej strany $U_{PTNsek} = 100$ V. Informácie o napätiach a prúdoch z týchto zariadení sú do ochrany prenášané pomocou analógových vstupov ktoré sú pripojené k sekundárnej strane transformátorov.

7.1.1 Nadprúdová ochrana pridržiavaná podpätím

Ochrana meria prúd v uzle generátora a jeho svorkové napätie. Fázové prúdy porovnáva s nastavenou hodnotou. Pri jej prekročení sa rozbehne časový článok a po uplynutí nastavenej doby dôjde k zapôsobeniu ochrany. Ak ale dôjde súčasne aj k podpätiu, je preklopený RS preklápací obvod, ktorý svojim výstupom udržuje v prevádzke časový článok po dobu pokiaľ trvá podpätie, alebo prúd poklesne pod nastavenú hranicu. Pamäťový RS obvod je resetovaný obnovením napätia alebo časovým článkom podpäťovej prídrže.

Tab. 20 - Nastavenie nadprúdovej ochrany pridržiavanej podpätím

Nadprúdová ochrana pridržiavaná podpätím 50/27G		
Adresa	Parameter	Hodnota
1201	Overcurrent time protection	ON
1202	$I›$	7.43 A
1203	$T_{I›}$	2.50 s
1204	State of undervoltage seal-in	ON
1205	$U‹$	80.0 V
1206	$T_{U‹}$	5.00 s
1207A	$I›$ Drop out ratio	0.95

Adresa 1201 slúži na zapnutie/vypnutie nadprúdovej časovej ochrany (povely ON/OFF). Do adresy 1202 sa nastavuje veľkosť prúdu na sekundárnej strane PTP, pri jej prekročení dôjde k štartu ochrany a po uplynutí časového oneskorenia $T_{I›}$ k vybaveniu ochrany. Manuál [14] k ochrane udáva výpočet tejto hodnoty.

$$I› = 1{,}5 * \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} * I_{PTPsek} = 1{,}5 * \frac{2972}{3000} * 5 = 7{,}43 \text{ A} \tag{7.1}$$

kde: $I›$ - maximálna prípustná prevádzková hodnota prúdu [A], výrobca odporúča hodnotu $I› = 1{,}5 \div 1{,}6 * I_{nTG}$ a teda bola zvolená hodnota 1,5.

I_{nTG} - menovitý prúd hlavného generátora [A]

$I_{PTPprim}$ - menovitý prúd primárnej strany PTP [A]

I_{PTPsek} - menovitý prúd sekundárnej strany PTP [A]

Adresou 1203 sa nastavuje časové odstupňovanie ochrannej funkcie $T_{I\rangle}$. Adresou 1204 sa zapína a vypína povelmi ON/OFF podpäťová prídrž ochrany. Hodnota napätia, pri ktorom pôsobí pridržiavanie podpätím sa nastavuje do adresy 1205 a je nastavená pod hodnotu najnižšieho prípustného napätia počas prevádzky. Jeho hodnotu je prepočítaná na sekundárnu stranu PTN a podľa [14] sa vypočíta ako:

$$U\langle = 0{,}8 * \frac{U_{nTG}}{U_{PTNprim}} * U_{PTNsek} = 0{,}8 * \frac{15000}{15000} * 100 = 80\ \text{V} \qquad (7.2)$$

kde: 0,8 - pomerná hodnota najnižšieho prípustného napätie odporúčaná výrobcom ochrany [14].

U_{nTG} - menovité napätie hlavného generátora [V]

$U_{PTNprim}$ - menovité napätie primárnej strany PTN [V]

U_{PTNsek} - menovité napätie sekundárnej strany PTN [V]

Doba trvania pridržiavania nadprúdovej ochrany podpätím $T_{U\langle}$ sa zadáva do adresy 1206. Musí byť nastavená na hodnotu vyššiu ako pri časovom oneskorení vypnutia ochrany. Hodnota, ktorá sa zadáva do adresy 1207A je odporúčaná výrobcom a udáva pomer pri ktorom dôjde k obnoveniu funkcie ochrany po poklese prúdu pod nastavenú hodnotu nadprúdu *I*›.

7.1.2 Nadprúdová ochrana zo strany siete

Ochrana chráni generátor proti nadprúdu zo siete, tým že meria prúd na vývode generátora a fázové hodnoty prúdov porovnáva s nastavenou hodnotou. Pri jej prekročení dôjde k spusteniu časového článku a následne po uplynutí nastavenej doby generuje ochrana vypínací povel.

Tab. 21 - Nastavenie nadprúdovej ochrany zo strany siete

Nadprúdová ochrana zo strany siete 50G		
Adresa	Parameter	Hodnota
1301	Overcurrent time protection	ON
1302	*I*››	13.93 A
1303	$T_{I\rangle\rangle}$	0.05 s

Adresou 1301 sa zapína alebo vypína funkcia nadprúdovej ochrany zo strany siete povelmi (ON/OFF). Do adresy 1302 sa nastavuje veľkosť prúdu na sekundárnej strane PTP, pri ktorom dôjde k štartu ochrany a po uplynutí časového oneskorenia k vybaveniu ochrany. Manuál [14] k ochrane udáva výpočet tejto hodnoty.

$$I\rangle\rangle = 1{,}2 \cdot \frac{I''_{k315MIN}}{I_{PTPprim}} \cdot I_{PTPsek} = 1{,}2 \cdot \frac{6966}{3000} \cdot 5 = 13{,}93\ \text{A} \qquad (7.3)$$

kde: 1,2 - bezpečnostný faktor na vylúčenie nechcených účinkov nadpätia alebo skratových prúdov [14].

$I''_{k315MIN}$ - minimálny trojfázový počiatočný rázový skratový prúd na zberni rozvodne 15 kV [A], hodnota zo skratového výpočtu, uvedená v Tab. 18.

Doba časového oneskorenia vypnutia ochrany sa nastavuje adresou 1303. Výrobca udáva hodnotu $T_{I\rangle\rangle}$ od 0,05 do 0,1 sekundy aby boli eliminované účinky skratových prúdov.

7.1.3 Rozdielová ochrana generátora

Ochrana je pripojená na PTP v uzle a na svorkách stroja. Meria prúd v uzle, na vývode generátora a vyhodnocuje vektorový súčet prúdu v chránenom objekte. Pôsobí okamžite pri vnútorných skratoch. Musí byť vybavená prídavnou stabilizáciou, ktorá potlačuje falošné vypínacie povely spôsobené nadprúdmi pri externých poruchách keď dochádza k saturácii prístrojových transformátorov prúdu.

Tab. 22 - Nastavenie rozdielovej ochrany generátora

Rozdielová ochrana generátora 87G		
Adresa	Parameter	Hodnota
2001	Differential protection	ON
2021	$I_{-DIFF}›$	0.20
2026A	$T_{I_DIFF›}$	0.00 s
2031	$I_{-DIFF}››$	3.41
2036A	$T_{I_DIFF››}$	0.00 s

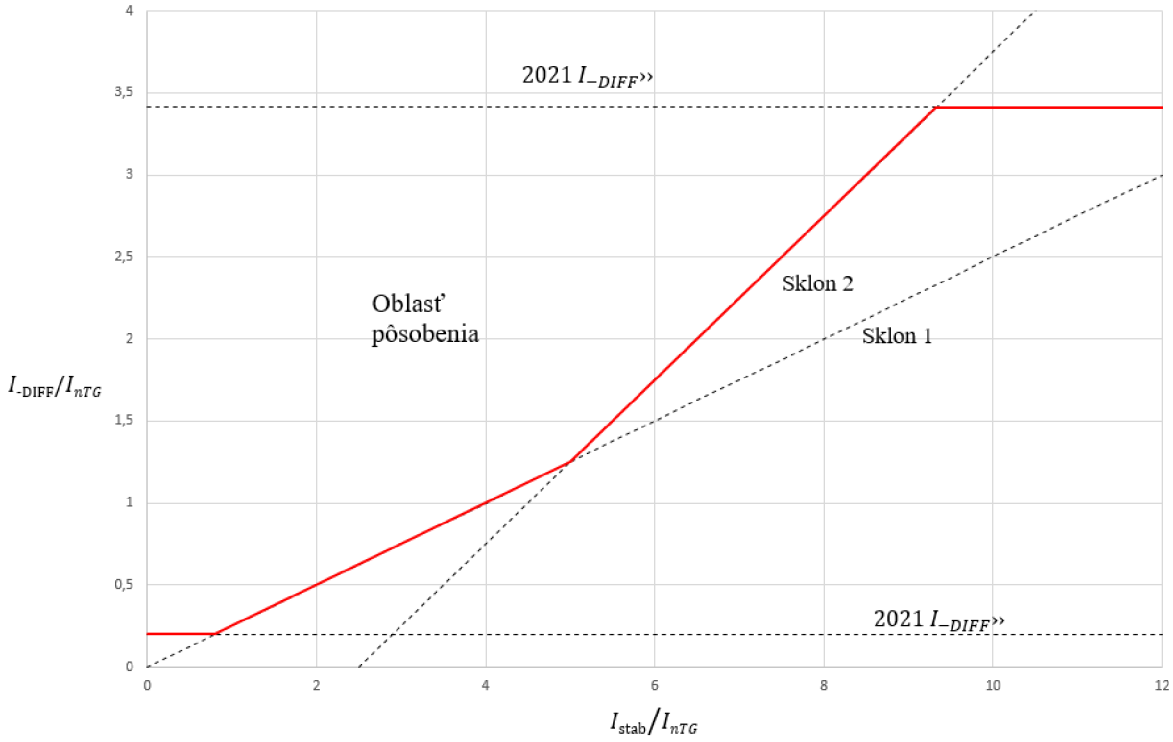
Adresa 2001 zapína alebo vypína funkciu rozdielovej ochrany generátora povelmi (ON/OFF). Základná popudová hodnota $I_{-DIFF}›$ je nastavená do adresy 2021 a je udávaná v pomere k menovitej hodnote prúdu generátora. Bolo zvolené základné nastavenie udané výrobcom. Adresami 2026A a 2036A sa nastavuje časové oneskorenia vypnutia ochrany pre jednotlivé poruchové stavy. Podľa nastavených hodnôt je vidieť, že ochrana pôsobí bez časového oneskorenia. Vrchná popudová hodnota je nastavená do adresy 2031 a jej hodnota je vypočítaná podľa [14] ako:

$$I_{-DIFF}›› = \frac{1}{x_d^{'}} = \frac{1}{0{,}293} = 3{,}413\ I/I_{nTG} \tag{7.4}$$

kde: $I_{-DIFF}››$ - vrchná popudová hodnota rozdielovej ochrany, udávaná v pomere k menovitej hodnote prúdu generátora

$x_d^{'}$ - pomerná prechodová reaktancia generátora [-]

Výsledná vypínacia charakteristika rozdielovej ochrany generátora je zobrazená na Obr. 37 červenou čiarou. Jednotlivé charakteristiky, ktorými je tvorená sú buď vypočítané ($I_{DIFF}››$) alebo sú zvolené z manuálu výrobcu ochrany [14] ako základné hodnoty ($I_{DIFF}›$, Sklon 1 a 2).



Obr. 37 - Vypínacia charakteristika rozdielovej ochrany generátora

7.1.4 Ochrana proti nesymetrii

Ochrana pôsobí pri vzniku spätnej zložky prúdu, ktorá vzniká pri nesymetrickom zaťažení stroja. Spätná zložka prúdu vytvára magnetické pole, ktoré sa otáča v opačnom smere a teda dvojnásobnou rýchlosťou proti rotoru. Pôsobením tohto magnetického poľa vznikajú v rotore vírivé straty a dochádza k nadmernému zahrievaniu rotora.

Tab. 23 - Nastavenie ochrany pri nesymetrii

Ochrana pri nesymetrii 46G		
Adresa	Parameter	Hodnota
1701	Unbalance load protection	ON
1702	$I_{(2)}$›	7.9 %
1703	T_{Warn}	10.00 s
1704	K_F	15.70 s
1705	T_{Cd}	1650 s
1706	$I_{(2)}$››	59%
1707	T_{I2}››	2.50 s

Adresa 1701 slúži na zapnutie/vypnutie funkcie ochrany pri nesymetrii povelmi (ON/OFF). Maximálna trvale dovolená hodnota spätnej zložky statorového prúdu v pomere k menovitému prúdu generátora $I_{(2)}$› sa nastavuje do adresy 1702.

Jej hodnota sa vypočíta podľa [14] ako:

$$I_{(2)\rangle} = \frac{I_{(2)dov}}{I_{nTG}} \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} = \frac{8 \cdot 2972}{2972} \cdot \frac{2972}{3000} = 7{,}92\ \% \tag{7.5}$$

kde: $I_{(2)dov}$ - maximálna trvalá hodnota spätnej zložky statorového prúdu [%], je udávaná výrobcom ochrany pre hydroalternátory s maximálnym zdanlivým výkonom do 100 MVA a jej hodnota $I_{(2)dov} = 8\%\ I_{nTG}$

Ak je prekročená hodnota $I_2\rangle$, rozbehne sa časový článok a po uplynutí doby T_{Warn}, ktorá je nastavená do adresy 1703, je vydaný varovný signál. Konštanta generátora K_F je udávaná výrobcom generátora a podľa [14] reprezentuje čas v sekundách počas ktorého môže byť stroj zaťažení nerovnomernou záťažou. Nastavuje sa do adresy 1704 a je potrebné ju prepočítať na sekundárnu stranu PTP podľa [14] ako:

$$K_F = K_F \cdot \left(\frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}}\right)^2 = 16 \cdot \left(\frac{2972}{3000}\right)^2 = 15.7\ \text{s} \tag{7.6}$$

Parameter T_{Cd} nastavený do adresy 1705 udáva čas potrebný na schladenie chráneného zariadenia z teploty ktorú dosiahne pri poruche na počiatočnú hodnotu. Jeho veľkosť je závislá na konštrukčnom type generátora a býva udávaná výrobcom zariadenia. Nesymetria môže spôsobiť vysoké spätné prúdy, časovo závislá charakteristika spätných zložiek prúdu ich ale dokáže detekovať a na základe termálnej charakteristiky odpojiť zariadenie pri poruche. Preto je potrebné nastaviť aj hodnotu *I*›› do adresy 1706, ktorá sa vypočíta ako:

$$I\rangle\rangle\ = 60 \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} = 60 \cdot \frac{2972}{3000} = 59\ \% \tag{7.7}$$

Percentuálna hodnota je zvolená z hodnôt, ktoré odporúča výrobca ochrany a mala by sa pohybovať medzi 60-65 % aby bolo zabezpečené správne vyhodnotenie a vybavenie ochrany. Jej časové oneskorenie sa nastavuje do adresy 1707 z dôvodu aby bola zaručená správna funkcia ochrany a dvojfázový skrat nebol vyhodnotený ako nesymetria. Ak nedôjde k zareagovaniu ochrany, ktorá má na starosti chrániť proti skratom, jedná sa o nesymetriu a ochrana zapôsobí.

7.1.5 Ochrana proti prúdovému preťaženiu statora (termická)

Ochrana meria prúd v uzle a teplotu chladiaceho média statora generátora. Z prúdu statora sa počíta oteplenie statora a pri prekročení nastavených medzí oteplenia dáva ochrana výstrahu a následne generuje vypínací povel.

Tab. 24 - Nastavenie ochrany proti prúdovému preťaženiu statora

Ochrana proti prúdovému preťaženiu statora 49G		
Adresa	Parameter	Hodnota
1601	Thermal overload protection	ON
1602	k_F	1.04
1603	τ	600 s
1604	Θ_{Alarm}	90%
1610A	I_{Alarm}	5.20 A
1612A	k_{TF}	1.0
1615A	I_{MaxT}	16.50 A
1616A	$T_{Emergency}$	100 s

Adresou 1601 sa zapína alebo vypína funkcia rozdielovej ochrany generátora povelmi (ON/OFF). Faktor k_F , ktorý reprezentuje maximálne dovolené preťaženie generátora v prevádzke a jeho hodnota sa zadáva do adresy 1602, vypočíta sa podľa [14] ako:

$$k_F = \frac{I_{Max}}{I_{nTG}} \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} = 1{,}05 \cdot \frac{2972}{3000} = 1{,}04 \tag{7.8}$$

kde: I_{Max} - maximálny konštantný prúd preťaženia, udávaný výrobcom generátora. Pre tento prípad je zadaný ako pomer k menovitému prúdu generátora (1,05).

Termálna časová konštanta chráneného zariadenia v prevádzke τ je nastavená do adresy 1603. Jej hodnota je udávaná výrobcom stroja. Do adresy 1604 sa nastavuje percentuálna hodnota oteplenia ktorú keď stroj dosiahne, ochrana vydá varovný signál. Taktiež je závislá na k_F a vypočíta sa podľa [14] ako:

$$\Theta_{Alarm} = \frac{100\ \%}{{k_F}^2} = \frac{100}{1{,}04^2} = 90\% \tag{7.9}$$

Hodnota prúdu ktorá keď je prekročená a dôjde pri nej k vydaniu varovného signálu prepočítaná na sekundárnu stranu PTP je nastavená do parametra 1610A a vypočíta sa ako:

$$I_{Alarm} = \frac{I_{Max}}{I_{nTG}} \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} \cdot I_{PTPsek} = 1{,}05 \cdot \frac{2972}{3000} \cdot 5 = 5{,}2\ \text{A} \tag{7.10}$$

Ak stroj spomaľuje alebo je zastavený, ochladzuje sa oveľa pomalšie. Do adresy 1612A musí byť nastavená hodnota faktora k_{TF} stojaceho zariadenia, ktorá vplýva na τ a na základe jeho hodnoty je vypočítaná termálna časová charakteristika stojaceho alebo spomaľujúceho generátora. 1615A je adresa ktorá udáva maximálnu hodnotu nadprúdu pre ktoré pracuje ochrana časovo závislou charakteristikou. Vyššie prúdy vypína okamžite, inak by mohlo dôjsť k poškodeniu stroja.

Hodnota nastavená do ochrany je z prednastavených hodnôt udaných výrobcom ochrany pre prúd sekundárnej strany PTP 5A. Hodnota nastavená do adresy 1616A je čas po ktorom je umožnené znova zapnutie zariadenia po prehriatí. Táto doba musí byť dostatočná aby došlo k ochladeniu chráneného zariadenia.

7.1.6 Ochrana pri spätnom toku výkonu

Ochrana meria prúd v uzle generátora, jeho svorkové napätie a počíta činný výkon generátora. V prípade ak dôjde k uzavretiu toku vody turbínou (strate pohonu) začne generátor odoberať činný výkon zo siete a musí byť odpojený. Táto ochrana je aktívna iba v prevádzkovom režime turbíny. Pri kompenzácii je blokovaná povelom z riadiaceho strediska.

Tab. 25 - Nastavenie ochrany pri spätnom toku výkonu

Ochrana pri spätnom toku výkonu 32R		
Adresa	Parameter	Hodnota
3101	Reverse power protection	ON
3102	$P_{›Reverse}$	-2.00 %
3103	$T_{Delay\ long}$	5.00 s
3104	$T_{Delayshort}$	1.00 s

Funkcia ochrany pri spätnom toku výkonu sa zapína/vypína povelmi (ON/OFF), ktoré sú nastavené do adresy 3101. Pomer hodnoty spätného výkonu k menovitému výkonu generátora pri ktorého prekročení dôjde k pôsobeniu ochrany je nastavený do adresy 3102. Je odvodená od maximálnych strát generátora pri menovitom zaťažení. Nastavované sú dve doby vypnutia. Ochrana vybaví s kratšou dobou $T_{Delayshort}$, ktorá je nastavená do adresy 3104 ak je uzatvárací ventil zatvorený. Dlhšia doba vybavenia ochrany $T_{Delay\ long}$ je používaná ak je ventil otvorený, z dôvodu, že spätný výkon môže byť spôsobený výkyvmi výkonu zo strany siete. Táto hodnota sa nastavuje do adresy 3103.

7.1.7 Maximálna a minimálna wattová ochrana

Ochrana meria prúd v uzle generátora, jeho svorkové napätie a počíta činný výkon generátora. Povel na odpojenie generátora od siete generuje maximálna wattová ochrana v prípade prekročenia príkonu generátora po dokončení prechodu na kompenzačnú prevádzku. Minimálna wattová ochrana dá povel na odpojenie generátora od siete v prípade straty príkonu generátora v kompenzačnom chode. Obe funkcie sú aktívne iba pri kompenzačnej prevádzke, pri turbínovej prevádzke sú blokované. Povelom z riadiaceho strediska je možné blokovať alebo aktivovať jednotlivé funkcie ochrany.

Tab. 26 - Nastavenie maximálnej a minimálnej wattovej ochrany

Maximálna a minimálna wattová ochrana 32MIN,MAX		
Adresa	Parameter	Hodnota
3201	Forward power supervision	ON
3202	$P_{forw‹}$	0.5 %
3203	$P_{forw›}$	30%
3204	$T_{Pforw‹}$	1.00 s
3205	$T_{Pforw›}$	5.00 s
3206A	Meranie	Accurate

Povelmi (ON/OFF) sa do adresy 3201 nastavuje zapnutie alebo vypnutie funkcie maximálnej a minimálnej wattovej ochrany. Adresami 3202 a 3203 sa nastavujú hodnoty prahov výkonu nad ktorými ochrana reaguje. Časové oneskorenia týchto prahov sú nastavené v adresách 3204 a 3205. Užívateľ ochrany si môže vybrať či meranie hodnôt má byť rýchle (fast) alebo presné (accurate), toto nastavenie sa ukladá do adresy 3206A. Konkrétne hodnoty nastavenia si určí prevádzkovateľ (neboli nastavené firmou SAG Elektrovod).

7.1.8 Podimpedančná ochrana

Ochrana meria prúd v uzle generátora, svorkové napätie a počíta z nich impedanciu. Ochrana ma tri impedančné stupne, dva sú nezávislé a jeden je riadený externým signálom (stavom vypínača). Jednotlivé impedančné stupne je možné blokovať samostatne alebo súčasne cez binárne vstupy.

Tab. 27 - Nastavenie podimpedančnej ochrany

Podimpedančná ochrana 21G		
Adresa	Parameter	Hodnota
3301	Impedance protection	ON
3302	$I›$	7.43 A
3303	State of undervoltage seal-in	ON
3304	$U‹$	80.0 V
3305	$T_{U‹}$	5.00 s
3306	Z_1	1.21 Ω
3307	T_{Z1}	0.20 s
3308	Z_{1B}	1.51 Ω
3309	T_{Z1B}	0.20 s
3310	Z_2	1.81 Ω
3311	T_{Z2}	1.50 s
3312	T_{END}	2.50 s

Funkcia podimpedančnej ochrany sa zapína/vypína povelmi (ON/OFF), ktoré sú nastavené do adresy 3301. Vstupné hodnoty do adries 3302,3303,3304 a 3305 sú nastavené rovnako ako v odstavci 7.1.1. Impedancia prvého stupňa je nastavená do adresy 3306 a podľa [14] je nastavená na hodnotu 70 až 80% chránenej zóny a vypočíta sa ako:

$$Z_1 = \frac{k_R}{100} \cdot \frac{u_{kT10}}{100} \cdot \frac{U_{nT10,}^2}{S_{nT10}} \cdot \frac{\frac{I_{PTPprim}}{I_{PTPsek}}}{\frac{U_{PTPprim}}{U_{PTPsek}}} = \frac{80}{100} \cdot \frac{12{,}56}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{75 \cdot 10^6} \cdot \frac{\frac{3000}{5}}{\frac{15000}{100}} \tag{7.11}$$

$$= 1{,}21\ \Omega$$

kde: k_R- dosah ochrannej zóny [%], hodnota je odporúčaná výrobcom ochrany [14].

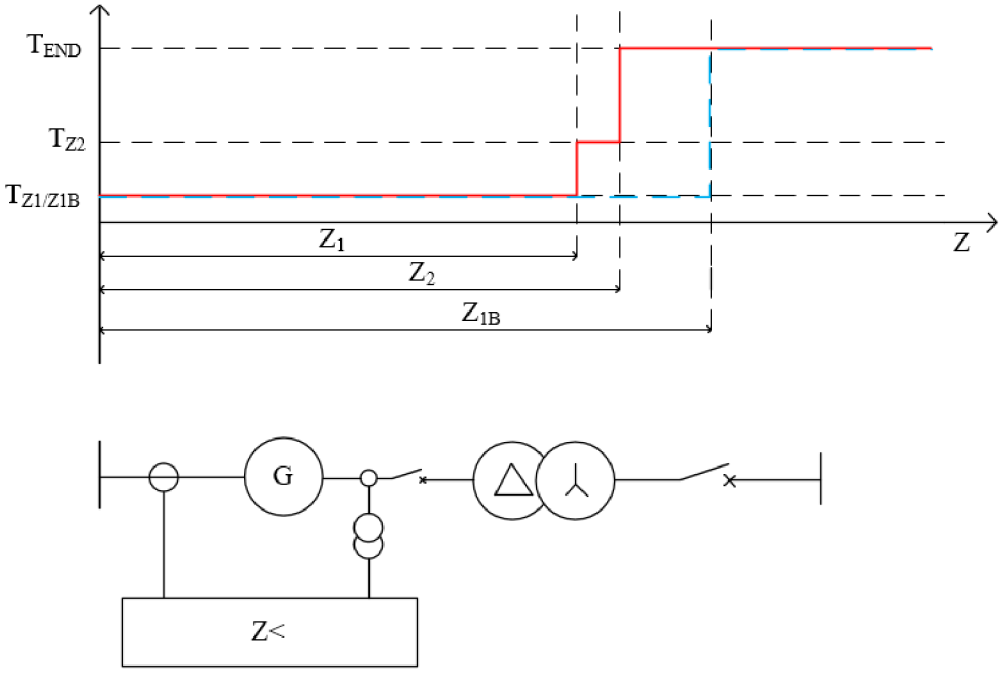
u_{kT10} - napätie nakrátko transformátora T10 [%]

U_{nT10} – menovité napätia transformátora T10 [V]

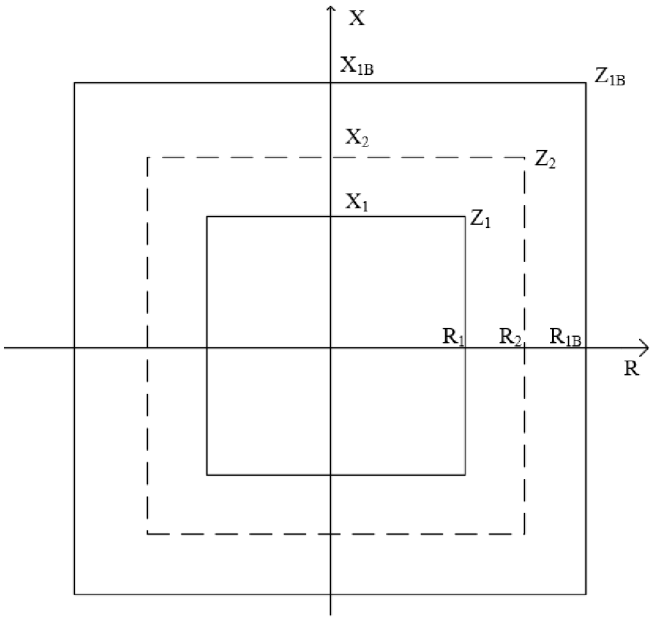
S_{nT10} – menovitý výkon transformátora T10 [VA]

Adresou 3307 je nastavené časové oneskorenie prvého stupňa ochrany. Manuál [14] k ochrane udáva že musí dôjsť k zareagovaniu s krátkym oneskorením. Impedancia druhého stupňa je nastavená do adresy 3310 a vypočíta sa rovnako ako pri impedancii Z_1, ale s hodnotu $k_R = 100$ %. Časové oneskorenie tohto stupňa je nastavené do adresy 3311. Výsledná vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany pre tieto stupne je zobrazená na Obr. 38 červenou farbou.

Adresou 3308 je nastavená impedancia impedančného stupňa, ktorý je riadený externým signálom tj. stavom vypínača. Táto zóna je aktívna v prípade, rozpojeného vypínača vysokého napätia. Jej hodnota sa vypočíta rovnako ako pri impedancii prvého stupňa len je použitá hodnota $k_R = 120$ %. Časové oneskorenie tohto stupňa sa nastavuje adresou 3309 a manuál udáva že musí dôjsť k zareagovaniu s krátkym oneskorením [14]. Výsledná vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany pre tento stupeň je zobrazená na Obr. 38 a je vyznačená modrou prerušovanou čiarou. Pre poruchy mimo zón Z1 a Z2 je nastavený čas vybavenia ochrany do adresy 3312.



Obr. 38 - Vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany



Obr. 39 - Vypínacia charakteristika podimpedančnej ochrany

7.1.9 Ochrana pri podbudení a strate budenia generátora

Ochrana meria prúd v uzle generátora a jeho svorkové napätie. Zo súslednej zložky prúdu a napätia počíta admitanciu a porovnáva ju s krivkou prevádzkového diagramu generátora v stave podbudenia. V prípade poruchy budiacej sústavy začne generátor odoberať jalový výkon zo siete, hrozí mu prechod do asynchrónneho chodu a musí od nej byť odpojený. Ochrana monitoruje hodnotu budiaceho prúdu a podľa nastavených medzí vyhodnotí či ide o pokles alebo stratu budenia. Pre jednotlivé stavy sú nastavené rôzne oneskorenia ochrany.

Tab. 28 - Nastavenie ochrany pri podbudení a strate budenia generátora

Ochrana pri podbudení a strate budenia generátora 40.1,2G		
Adresa	Parameter	Hodnota
3001	Underexcitation protection	ON
3002	$1/x_{dCH1}$	0.71
3003	α_1	60 ^{0}
3004	T_{CH1}	5.00 s
3005	$1/x_{dCH2}$	0.64
3006	α_2	90 ^{0}
3007	T_{CH2}	5.00 s
3008	$1/x_{dCH3}$	0.91
3009	α_3	90 ^{0}
3010	T_{CH3}	0.20 s

Adresou 3001 je zapnutá alebo vypnutá funkcia ochrany pri podbudení alebo strate budenia. Pomerné hodnoty admitancií sú nastavené do adries 3002 a 3005 z ktorých sú vytvorené charakteristiky ochrany. Pre prvú charakteristiku sa hodnota $\frac{1}{x_{dCH1}}$ vypočíta podľa [14] ako:

$$\frac{1}{x_{dCH1}} = \frac{1}{\frac{x_{dTG}}{100}} \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} = \frac{1}{1{,}39} \cdot \frac{2972}{3000} = 0{,}71 \tag{7.12}$$

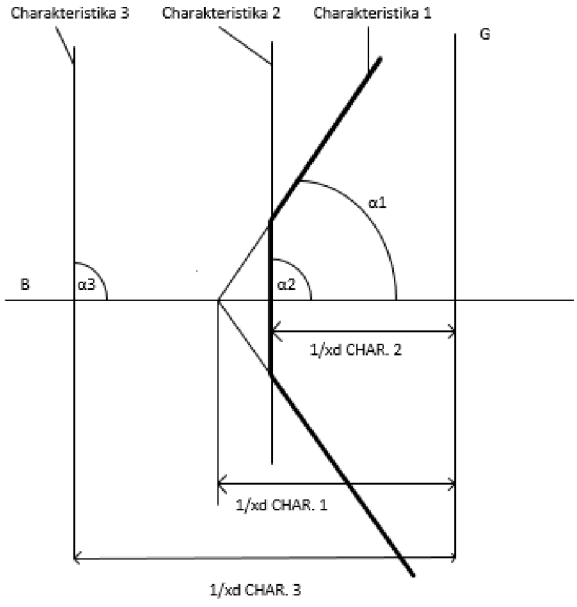
kde: x_{dTG} - pomerná hodnota pozdĺžnej synchrónnej reaktancie generátora [%]

Pre druhú charakteristiku sa hodnota zadávaná do adresy 3005 vypočíta podľa [14] ako 0,9 násobok hodnoty prvej charakteristiky. Adresami 3003 a 3006 sú nastavené uhly, ktoré zvierajú jednotlivé charakteristiky s osou x. Výsledná charakteristika ochrany pre podbudený generátor je na Obr. 40 vyznačená hrubou čiernou čiarou tvorenou charakteristikami 1 a 2. Časové oneskorenia vypnutia prvej a druhej charakteristiky sú nastavené na rovnakú hodnotu do adries 3004 a 3007. Doba oneskorenia pôsobenia ochrany pre prvú a druhú charakteristiku musí byť dostatočná aby pri podbudení mal regulátor dostatok času zareagovať, zvýšiť budiaci prúd a zamedziť ochrane odpojiť generátor od siete. Pri strate budenia musí byť generátor odpojený prakticky okamihovo a hodnota časového oneskorenia sa nastavuje do adresy 3010. Hodnota pri ktorej ochrana považuje poruchu ako stratu budenia je zadávaná do adresy 3008 a vypočíta sa ako:

$$\frac{1}{x_{dCH3}} = \frac{1}{\frac{(x_{dTG} + x_{qTG})}{2 \cdot 100}} \cdot \frac{I_{nTG}}{I_{PTPprim}} = \frac{1}{\frac{(1{,}39 + 0{,}806)}{2}} \cdot \frac{2972}{3000} = 0{,}91 \tag{7.13}$$

kde: x_{qTG} - pomerná hodnota priečnej synchrónnej reaktancie generátora [%]

Adresou 3009 je nastavený uhol charakteristiky 3, ktorý zviera s osou x. Výsledná charakteristika ochrany pre stratu budenia je tvorená charakteristikou 3.



Obr. 40 - Charakteristika ochrany pri podbudení a strate budenia

7.1.10 Ochrana proti preklzu generátora

Táto ochrana meria prúd v uzle generátora, jeho svorkové napätie a počíta vektorový priebeh impedancie. Registruje počet prechodov vektoru impedancie prvou a druhou charakteristikou impedančnej roviny za časovú jednotku a pri prekročení nastavenej hodnoty generuje vypínací povel.

Tab. 29 - Nastavenie ochrany proti preklzu generátora

Ochrana proti preklzu generátora 78G		
Adresa	Parameter	Hodnota
3501	Out of step protection	ON
3502	$I_{(1)\rangle Release}$	120.0 %
3503	$I_{(2)\langle Release}$	20.0 %
3504	Z_a	1.33 Ω
3505	Z_b	3.42 Ω
3506	Z_c	1.20 Ω
3507	$Z_d - Z_c$	0.79 Ω
3508	PHI Polygon	90 ^{0}
3509	Rep. Char. 1	1
3510	Rep. Char. 2	1
3511	$T_{Holding}$	20.00 s
3512	T_{Signal}	0.05 sec

Adresou 3501 sa funkcia ochrany pri preklze generátora zapína/vypína povelmi (ON/OFF). Ochrana je aktívna len vtedy ak je súsledná zložka prúdu prekročí hodnotu nastavenú do adresy 3502 $I_{(1)\rangle Release} = 120\%\ I_{nG}$ a spätná zložka meraného prúdu je nižšia ako hodnota nastavená do adresy 3503, $I_{(2)\rangle Release} = 20\%\ I_{nG}$. Tieto hodnoty sú odporúčané výrobcom ochrany tak aby nedošlo k poškodeniu zariadenia. Impedancia Z_b nastavovaná do adresy 3505 je približne rovná prechodnej reaktancii v pozdĺžnej osi generátora, ktorá sa vypočíta ako:

$$Z_b \approx \mathrm{X}_{dTG}^{'} = \frac{\mathrm{x}_{dTG}^{'}}{100} \cdot \frac{(U_{nTG})^2}{S_{nTG}} \cdot \frac{\frac{I_{PTPprim}}{I_{PTPsek}}}{\frac{U_{PTPprim}}{U_{PTPsek}}} = \frac{29{,}3}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{77{,}22 \cdot 10^6} \cdot \frac{\frac{3000}{5}}{\frac{15000}{100}} = 3{,}416\ \Omega \qquad (7.14)$$

kde: $\mathrm{x}_{dTG}^{'}$ - pomerná hodnota prechodovej synchrónnej reaktancie generátora [%]

S_{nTG} - menovitý zdanlivý výkon generátora [VA]

Adresou 3506 je nastavená impedancia Z_c ktorej hodnota je v rozmedzí 70-90% impedancie transformátora X_{T10} a vypočíta sa ako:

$$Z_c \approx 0{,}8 \cdot X_{T10} = 0{,}8 \cdot \frac{u_{kT10}}{100} \cdot \frac{(U_{nT10})^2}{S_{nT10}} \cdot \frac{\frac{I_{PTPprim}}{I_{PTPsek}}}{\frac{U_{PTPprim}}{U_{PTPsek}}} = 0{,}8 \cdot \frac{12{,}56}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{75 \cdot 10^6} \cdot \frac{\frac{3000}{5}}{\frac{15000}{100}} = 1{,}20\ \Omega \tag{7.15}$$

Do adresy 3504 je nastavená hodnota impedancie Z_a, ktorá ovplyvňuje šírku charakteristiky. Manuál k ochrane [14] udáva, že pre frekvenciu 50 Hz je to hodnota 0,289 násoboku celkovej impedancie, ktorá je tvorená súčtom impedancií Z_b a Z_c . Vypočíta sa ako:

$$Z_a = 0{,}289 \cdot (Z_b + Z_c) = 0{,}289 \cdot (3{,}416 + 1{,}20) = 1{,}33\ \Omega \tag{7.16}$$

Hodnota impedancie nastavená do adresy 3507 je súčtom zvyšnej časti impedancie transformátora X_{T10} a impedancie sieťových napájačov X_Q. Bola vypočítaná ako:

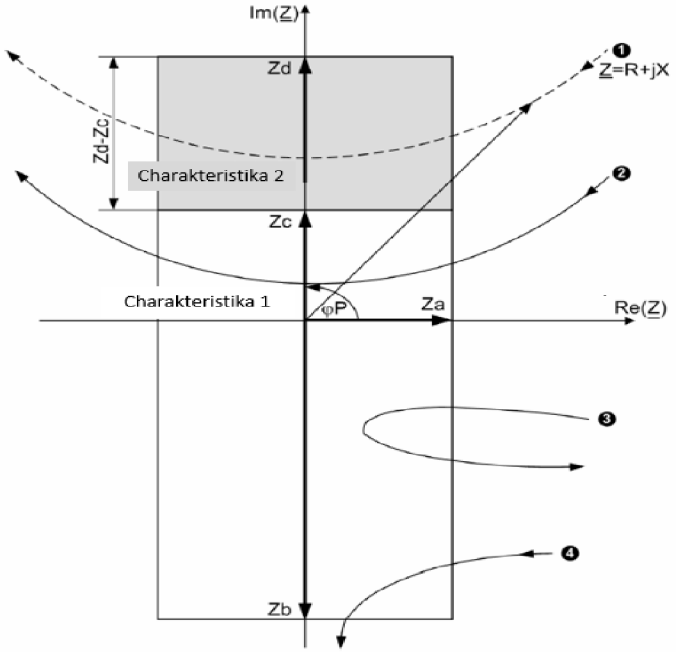
$$Z_d - Z_c \approx \left(0{,}2 \cdot X_{T10} + X_Q\right) \cdot \frac{\frac{I_{PTPprim}}{I_{PTPsek}}}{\frac{U_{PTPprim}}{U_{PTPsek}}} = \left(0{,}2 \cdot \frac{u_{kT10}}{100} \cdot \frac{(U_{nT10})^2}{S_{nT10}} + \frac{\frac{U_{nQ}}{\sqrt{3}}}{I''_{k3Q}} \cdot \left(\frac{1}{p_{T10}}\right)^2\right) \cdot \frac{\frac{I_{PTPprim}}{I_{PTPsek}}}{\frac{U_{PTPprim}}{U_{PTPsek}}} = \left(0{,}2 \cdot \frac{12{,}56}{100} \cdot \frac{(15 \cdot 10^3)^2}{75 \cdot 10^6} + \frac{\frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{8070} \cdot \left(\frac{15 \cdot 10^3}{121 \cdot 10^3}\right)^2\right) \cdot \frac{\frac{3000}{5}}{\frac{15000}{100}} = 0{,}785\ \Omega \tag{7.17}$$

kde: I''_{k3Q} - súčet počiatočných rázových skratových prúdov sieťových napájačov. Ich hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

U_{nQ} – menovité napätie siete

p_{T10} – prevod transformátora T10

Adresami 3509 a 3510 sú nastavené počty výkyvov výkonu, ktoré môžu nastať za dobu nastavenú v adrese 3511 a po ich prekročení dôjde k zapôsobeniu ochrany. Po uplynutí doby $T_{Holding}$ sú počty výkyvov výkonu reštartované a počítajú sa znova od 0. Ak dôjde k nárastu výkyvov výkonu ochrana vydá varovný signál, ktorého doba trvania je nastavená do adresy 3512 a ochrana zaznamená že došlo k preklzu generátora. Na Obr. 41 je nakreslená charakteristika tejto ochrany a sú v nej vyznačené rôzne priebehy impedancii.



Obr. 41 - Charakteristiky ochrany pri preklze rotora [14]

7.1.11 Prepäťová ochrana generátora

Ochrana meria svorkové napätie generátora. Má dva stupne, kde prvý je nastavený na nižšiu hodnotu a dlhší čas, druhý je opačne na krátky čas a vyššiu hodnotu. Táto ochrana musí byť frekvenčne nezávislá.

Tab. 30 - Nastavenie prepäťovej ochrany generátora

Prepäťová ochrana generátora 59.1,2G		
Adresa	Parameter	Hodnota
4101	Overvoltage protection	ON
4102	$U›$	112.0 V
4103	$T_{U›}$	10.00 sec
4104	$U››$	130.0 V
4105	$T_{U››}$	0.10 sec
4106A	$U›$,$U››$ Drop out ratio	0.95
4107A	Measurement values	Voltage protection with U phase-phase

Funkcia prepäťovej ochrany sa zapína alebo vypína povelmi (ON/OFF), ktoré sú nastavené do adresy 4101. Napätie prvého stupňa ochrany, pri ktorom pôsobí je nastavené do adresy 4102 a vypočíta sa podľa [14] ako:

$$U› = 1{,}12 \cdot \frac{U_{PTPsek}}{U_{PTPprim}} \cdot U_{nTG} = 1.12 \cdot \frac{100}{15 \cdot 10^3} \cdot 15.10^3 = 112\ \text{V} \qquad (7.18)$$

Nastavená hodnota prvého stupňa prepätia sa má podľa výrobcu pohybovať v medziach 1,1÷1,15 násobku menovitej hodnoty a je potrebné ju prepočítať na sekundárnu stranu PTN. Doba prvého stupňa ochrany počas ktorej môže prepätie pôsobiť $T_{U\rangle}$ je nastavená do adresy 4103. Pre druhý stupeň sa napätie nastavené do adresy 4104 vypočíta rovnako len je použitý iný koeficient. Výrobca odporúča 1,3 násobok menovitej hodnoty napätia. Doba pôsobenia $T_{U\rangle\rangle}$ je nastavená do adresy 4105 a je výrazne nižšia ako pri prvom stupni. Hodnota pod ktorú musí napätie klesnúť aby po pôsobení ochrany mohlo dôjsť k znovu zapnutiu stroja je nastavená do adresy 4106A. Adresou 4107A je nastavené či ochrana meria fázové alebo združené hodnoty napätia.

7.1.12 Podpäťová ochrana generátora

Tak ako ochrana prepäťová aj podpäťová meria svorkové napätie generátora. Má dva stupne, kde prvý je nastavený na vyššiu hodnotu napätia a dlhší čas, druhý je opačne na krátky čas a nižšiu hodnotu. Táto ochrana musí byť frekvenčne nezávislá. Ak je generátorový vypínač vypnutý je podpäťová ochrana blokovaná.

Tab. 31 - Nastavenie podpäťovej ochrany generátora

Podpäťová ochrana generátora 27.1,2G		
Adresa	Parameter	Hodnota
4001	Undervoltage protection	ON
4002	$U\langle$	80.0 V
4003	$T_{U\langle}$	6.00 sec
4004	$U\langle\langle$	30.0 V
4005	$T_{U\langle\langle}$	1.0 sec
4006A	$U\langle$ $U\langle\langle$ Drop out ratio	1.05

Povelmi (ON/OFF), ktoré sú nastavené do adresy 4001 sa zapína funkcia podpäťovej ochrany. Napätie prvého stupňa ochrany, pri ktorom dôjde k zapôsobeniu ochrany po uplynutí časového článku sa nastavuje do adresy 4002 a vypočíta sa podľa [14] ako:

$$U\langle = 0{,}8 \cdot \frac{U_{PTPsek}}{U_{PTPprim}} \cdot U_{NG} = 0{,}8 \cdot \frac{100}{15 \cdot 10^3} \cdot 15.10^3 = 80\ \text{V} \qquad (7.19)$$

Nastavená hodnota prvého stupňa podpätia sa má podľa výrobcu pohybovať v medziach 0,75 až 0,8 násobku menovitej hodnoty a je potrebné ju prepočítať na sekundárnu stranu PTN. Doba prvého stupňa ochrany $T_{U\langle}$ počas ktorej môže byť prítomné podpätie generátora je nastavená do adresy 4003. Pre druhý stupeň sa napätie nastavené do adresy 4004 vypočíta rovnako len je použitý iný koeficient. Doba druhého stupňa $T_{U\langle\langle}$ je nastavená do adresy 4005 a je nižšia ako pri prvom stupni. Hodnota nad ktorú musí napätie narásť aby po zapôsobení ochrany mohlo dôjsť k znovu zapnutiu stroja je nastavená do adresy 4006A.

7.1.13 Zemná ochrana rotora

Ochrana sleduje izolačný stav rotora proti kostre. Meria striedavý prúd, ktorý preháňa zemou zdroj striedavého napätia. Má dva stupne, kde jeden slúži na výstrahu a druhý pri pôsobení ochrany.

Tab. 32 - Nastavenie zemnej ochrany rotora

Zemná ochrana rotora 64.1,2R		
Adresa	Parameter	Hodnota
5101	Sensitive earth current protection	ON
5102	$I_{EE›}$	8 mA
5103	$T_{IEE›}$	5.00 s
5104	$I_{EE››}$	17 mA
5105	$T_{IEE››}$	1.00 s
5106	$I_{EE‹}$	3.0 mA

Funkcia ochrany sa zapína povelmi (ON/OFF), ktoré sa nastavia do adresy 5101. Adresou 5102 sa nastavuje hodnota prúdu výstražného stupňa ochrany a jej hodnota sa vypočíta podľa [14] ako:

$$I_{EE›} = \frac{U_V}{R_E + Z_{Coup}} = \frac{42}{5000 + 400} = 7{,}77 \text{ mA} \tag{7.20}$$

kde: U_V - pracovné napätie

R_E - izolačný odpor, výrobca udáva hodnotu medzi 3÷5 kΩ

Z_{Coup} - impedancia sériového zariadenia pri menovitej frekvencii

Hodnota prúdu vypínacieho stupňa ochrany $T_{IEE››}$ je nastavená do adresy 5104 a vypočíta sa rovnako ako pre výstražný stupeň, ale je použitá hodnota izolačného odporu 2 kΩ. Časové oneskorenia vypnutia jednotlivých stupňov sú nastavené do adries 5102, 5104 a nezahŕňajú vypínacie časy ochrany. Do adresy 5106 je nastavená hodnota prúdu, ktorý podľa [14] tečie cez uzemňovaciu impedanciu v bezporuchovom stave z dôvodu pracovného napätia a je možné ho tolerovať.

7.1.14 Zemná ochrana statora 95% a 100%

Ochrana sleduje izolačný stav - zemné spojenie v obvode statora cez káble vysokého napätia až po stranu vysokého napätia transformátoru. Na 100 % chránenie generátora sa používa princíp injektáže signálu s frekvenciou 20 Hz do obvodu statoru. Ochrana je dvojstupňová, prvý stupeň slúži na výstrahu druhý pôsobí.

Tab. 33 - Nastavenie zemnej ochrany statora

Zemná ochrana statora 95% a 100% 64.1,2S		
Adresa	Parameter	Hodnota
5001	Stator earth fault protection	ON
5002	$U_{O\rangle}$	10.0 V
5005	$T_{sefdelay}$	0.30 s
5301	100 % stator earth fault protection	ON
5302	$R_{sef\langle}$	115 Ω
5303	$R_{sef\langle\langle}$	23 Ω
5304	$T_{Rsef\langle}$	10.00 s
5305	$T_{Rsef\langle\langle}$	1.00 s
5306	$I_{sef\rangle}$	0.40 A
5307	U_{thre}	1.0 V
5308	I_{thre}	10 mA

Adresou 5001 sa povelmi ON/OFF zapína funkcia zemnej ochrany statora. Ochrana detekuje poruchu uzemnenia statora ak je odchýlka napätia $U_{O\rangle}$ väčšia ako je nastavená hodnota do adresy 5002. Táto hodnota musí byť nastavená tak aby ochrana nepôsobila pri nesymetrii. Manuál [14] udáva hodnotu medzi 5-10%, ktorá je nastavená tak aby bola aspoň dvojnásobná oproti hodnote pri nesymetrii. Časové oneskorenie, s ktorým ochrana pôsobí je nastavené do adresy 5005.

Adresou 5301 sa povelmi ON/OFF zapína funkcia 100% zemnej ochrany statora. Do adresy 5302 je nastavená hodnota odporu uzemnenia pre výstražný stupeň , pod ktorú keď odpor klesne dôjde k vydaniu varovného signálu. Podľa [14] sa vypočíta ako:

$$R_{sef\langle} = R_{sef\langle prim} \cdot \frac{1}{{p_{PTN}}^2} \cdot \frac{p_{PTP}}{p_{DN}} = 10000 \cdot \left(\frac{166}{8760}\right)^2 \cdot \frac{\frac{400}{5}}{\frac{500}{200}} = 115\ \Omega \qquad (7.21)$$

kde: $R_{sef\langle prim}$ – hodnota odporu uzemnenia udávaná výrobcom

p_{PTN} – prevod PTN (je použitý transformátor s pomerom 8760V /166 V)

p_{PTP} – prevod PTP (je použitý transformátor s pomerom 400 A /5 A)

p_{DN} – prevod delica napätia (použitý delič s pomerom 500 V/200 V)

Hodnota odporu uzemnenia stupňa pôsobenia $R_{sef<<}$ je zadávaná do adresy 5303 a je vypočítaná rovnako ako pri varovnom stupni len je použitá iná hodnota uzemnenia a to 2 kΩ, čo je hodnota odporúčaná výrobcom. Časové odstupňovania výstražného a pôsobiaceho stupňa sú nastavené do adries 5304 a 5305 a ich hodnoty sú podľa [14]. Adresami 5307 a 5308 sa nastavujú hodnoty napätia a prúdu, ktoré slúžia na kontrolu injektážneho zariadenia, ktoré generuje signál s frekvenciou 20 Hz. Ak dôjde k poklesu napätia pod hodnotu nastavenú v adrese 5307 bez toho aby došlo k nárastu prúdu o frekvencii 20 Hz nachádza sa v generátore injektážneho zariadenia chyba a tým pádom nie je zabezpečená 100 % ochrana statoru generátora.

7.1.15 Podfrekvenčná a nadfrekvenčná ochrana generátora

Ochrana meria frekvenciu napätia na generátore a pôsobí pri jej vybočení z nastavených medzí. Má po dva nezávislé stupne pre podfrekvenčnú aj nadfrekvenčnú ochranu a ak je generátorový vypínač vypnutý je ochrana blokovaná.

Tab. 34 - Nastavenie podfrekvenčnej a nadfrekvenčnej ochrany generátora

Podfrekvenčná a nadfrekvenčná ochrana generátora 81.1,2,3,4G		
Adresa	Parameter	Hodnota
4201	Over/Under frequency protection	ON
4202	f_1	48.00 Hz
4204	T_{f1}	1.00 s
4205	f_2	40.00 Hz
4207	T_{f2}	0.00 s
4208	f_3	52.00 Hz
4210	T_{f3}	1.00 s
4211	f_4	60.00 Hz
4213	T_{f4}	0.00 s
4215	U_{min}	65.0 V

Funkcia ochrany sa zapína a vypína povelmi (ON/OFF), ktoré sú nastavené do adresy 4201. Hodnoty prvého a druhého stupňa pod ktoré nemôže frekvencia napätia klesnúť sú nastavené do adries 4202 a 4205. Ak frekvencia generátora klesne pod nastavenú hodnotu musí ochrana zapôsobiť za doby nastavené do adries 4204 pre prvý stupeň a 4207 pre druhý stupeň. Adresami 4208 a 4211 sú nastavené hodnoty frekvencie generátora nad ktoré nemôže frekvencia narásť. Pre prvý stupeň nadfrekvenčnej ochrany je časové oneskorenie zapôsobenia nastavené adresou 4208 a pre druhý stupeň adresou 4211. Minimálne napätie od ktorého je ochrana aktívna je nastavené do adresy 4215 a je to hodnota 0,65 násobku menovitého napätia generátora prepočítaná na sekundárnu stranu PTN. Hodnoty jednotlivých nastavení budú upresnené prevádzkovateľom.

8 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bol skratový výpočet vodnej elektrárne Lipno I. a výpočet nastavenia elektrických ochrán z dôvodu rekonštrukcie pohonných zariadení a elektrických ochrán.

Teoretická časť je rozdelená do troch kapitol, ktoré poskytujú poznatky dôležité k spracovaniu práce. Kapitola 3 - Generátory sumarizuje teoretické poznatky o generátoroch, ich možných poruchách a ochranách, ktoré slúžia na minimalizáciu škôd pri poruchách generátorov alebo v elektrickej sieti. Ďalšia kapitola popisuje skraty ako také, ich možností rozdelenia, časové priebehy a ich charakteristické veličiny. Piata kapitola sa zaoberá výpočtom skratových prúdov. Sú v nej zhrnuté metódy, predpoklady a postup výpočtu skratových prúdov podľa platnej normy ČSN EN 60909-0 ed.2. Okrem toho je v tejto kapitole popísaný aj výpočet impedancii jednotlivých elektrických zariadení, ktorých znalosť je nevyhnutnou podmienkou k výpočtu skratových prúdov.

Praktická časť obsahuje samotný skratový výpočet a popis nastavenia elektrických ochrán hlavých generátorov. V úvode kapitoly 6 je uvedená náhradná schéma elektrárne s elektrickými zariadeniami, ktoré sa v elektrárni nachádzajú. Nasleduje výpočet impedancií jednotlivých elektrických prvkov, ktoré sú pri výpočtoch uvažované podľa normy. Pri výpočte impedancii hlavných generátorov nebolo potrebné počítať s korekčným činiteľom lebo sú do sústavy pripojené cez blokové transformátory T10 a T20, pri ktorých sa korekčné činitele taktiež nemôžu uvažovať. Impedancie ostatných transformátorov museli byť prepočítané na korigované impedancie pomocou korekčných činiteľov. Kapitola 6.4 sa zaoberá manuálnym výpočtom maximálnych a minimálnych počiatočných rázových skratových prúdov pre skrat, ktorý nastal v zberniach rozvodní 110,22 a 15kV. Na výpočte pre skrat v rozvodni 110 kV (6.4.1) je demonštrovaný princíp manuálneho výpočtu skratových prúdov metódou postupného zjednodušovania na výslednú impedanciu v mieste skratu (v tomto prípade reaktanciu keďže pri všetkých zariadeniach boli zanedbávané hodnoty rezistancie).

V nasledujúcej kapitole sú v tabuľkách uvedené výsledky maximálnych aj minimálnych skratových prúdov pre skraty na zberniach rozvodní 110 kV, 22 kV a 15 kV. Výpočet je robený pomocou výpočtového programu NetCalc a na overenie správnosti výsledkov aj manuálne. Ako je možné vidieť z Tab. 16, 17 a 18 výsledky jednotlivých výpočtov sú veľmi podobné. Menšie rozdiely medzi výsledkami manuálneho výpočtu a výpočtu pomocou programu NetCalc boli spôsobené zaokruhľovaním medzi výsledkov pri manuálnom výpočte a taktiež zaokruhľovaním vstupných hodnôt pri zadávaní do NetCalcu. Väčšie rozdiely vo výsledných hodnotách boli spôsobené napríklad tým, že program nerozoznáva súslednú a spätnú impedanciu pri generátoroch a berie ich ako rovnaké hodnoty. Čo sa týka využiteľnosti výpočtového programu NetCalc, ide o veľmi dobre použiteľný program na výpočet skratových prúdov menších elektrických sústav (počtom zariadení). Z funkčného hľadiska je program spoľahlivý. Negatívom z užívateľského hľadiska je absencia grafického prostredia a teda horšia prehľadnosť celkovej schémy výpočtu a následná kontrola správnosti zapojenia elektrických zariadení a prepojenia jednotlivých uzlov. Z toho istého dôvodu je náročnejšia aj realizácia výpočtu pri väčších elektrických schémach.

Posledná kapitola sa zaoberá popisom a výpočtom nastavenia funkcii elektrickej ochrany SIEMENS SIPROTEC 7UM622. Ochranné funkcie, ktoré má ochrana spĺňať, boli požiadavkou od zadávateľa projektu rekonštrukcie vodnej elektrárne Lipno I. a sú uvedené v Tab. 19. Funkcie boli nastavené v súlade s manuálom k ochrane [14]. K jednotlivým funkciám ochrany je uvedený stručný popis funkcie, následne tabuľka s nastavenými parametrami, ich hodnotami a uvedenie popisu alebo výpočtu ako bola daná hodnota nastavenia získaná.

POUŽITÁ LITERATÚRA

[1] Vodní elektrárna Lipno I. [online]. [cit. 2017-08-10] Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html

[2] Vodní elektrárna Lipno I. [online]. [cit. 2017-08-10] Dostupné z: http://www.ckrumlov.cz/cz1250/region/soucas/i_eleli.htm

[3] Doležal J. a kol. *Jaderné a klasické elektrárny.* České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011. ISBN 978-80-01-04936-5

[4] Tlustý J. a kol. *Monitorování, řízení a chránení elektrizačních soustav*. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011. ISBN 978-80-01-04940-2

[5] Ondrášek, M.: *Elektrárny II.* Skripta VUT. 1988

[6] Dohnálek, P.: *Ochrany pro prumysl a energetiku*. Praha, SNTL 1978

[7] Orságová, J.: *Rozvodná zařízení*, Vysoké učení technické v Brně, 2011.

[8] Blažek, V. Skala, P.: *Distribuce elektrické energie.* Elektronický učební text. VUT v Brně

[9] Blažek, V. Paar, M.. *Přenosové síťe.* Vysoké učení technické v Brně, 2007.

[10] ČSN EN 60909-0:2016 ed.2 *Zkratové proudy v trojfázových střidavých soustavách-Část 0:Výpočet proudů*, Český normalizační institut, 2016

[11] Mešter, M.: *Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách.* ABB Elektro, s.r.o, Bratislava, 2005. ISBN 80-89057-10-1

[12] Toman P. a kol. *Provoz distribučních soustav*. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011. ISBN 978-80-01-04935-8

[13] Trojánek, Z.,Hájek, J.,Kvasnica, P.: *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách.* SNTL Praha, 1987.

[14] SIEMENS *Siprotec 7UM622 - manual* . [online]. [cit. 2017-08-15] Dostupné z: http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/motor-and-generator-protection/pages/7um62.aspx