

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh chránění elektrického zařízení vodní elektrárny Orlík

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej SUKOVATÝ**
Osobní číslo: **E17N0018K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh chránění elektrického zařízení vodní elektrárny Orlík**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte výpočet poměrů při zkratu v základních bodech.
2. Zpracujte návrh osazení ochranami pro elektrárnu Orlík. Návrh bude obsahovat soubor ochranných funkcí pro jednotlivá zařízení elektrárny a připojení na přístrojové transformátory.
3. Na základě výpočtu poměrů při zkratu a navržených ochranných funkcí, proveďte výpočet nastavení ochran.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN 33 3051
2. ČSN EN 60909

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**





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

L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Anotace

Předkládaná diplomová práce obsahuje analytické výpočty zkratových poměrů v základních bodech elektrárny Orlík. K práci je přiloženo schéma zapojení elektrárny s doplněným návrhem ochranných funkcí pro 2 generátorové bloky o výkonu 182 MW podle norem ČSN 33 3051 a ČSN EN 60909. Dalším cílem práce bylo zjištění doporučených nastavení a zvolení vhodného nastavení pro elektrárnu Orlík s ohledem na výpočet poměrů při zkratu.

Klíčová slova

Vodní elektrárna Orlík, výpočet zkratových poměrů, návrh ochranných funkcí Siemens, ochrany generátoru, ochrany transformátoru, ochrany linky.

Abstract

The submitted diploma thesis contains analytical calculations of short-circuit conditions in the basic points of the Orlík power plant. The work is accompanied by a wiring diagram of the power plant with a supplemented design of protective functions for 2 generator blocks with an output of 182 MW according to norm ČSN 33 3051 and ČSN EN 60909. Another aim of the work was to determine the recommended settings and select appropriate settings for the Orlík power plant with regard to the calculation of short-circuit conditions.

Keywords

Hydroelectric power plant Orlík, calculation of short-circuit conditions, design of Siemens protection functions, generator protection, transformer protection, line protection.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.5.2020

Bc. Ondřej Sukovatý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Markvartovi ze společnosti ČEZ, a.s. Vodní elektrárny za konzultace, vedení práce, poskytnutí všech podkladů včetně schématu elektrárny a odborných rad z praxe.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
ÚVOD	13
1 TEORETICKÝ POPIS VODNÍHO DÍLA ORLÍK	14
1.1 HYDROLOGICKÉ ÚDAJE	14
1.2 TECHNICKÉ ÚDAJE.....	14
1.2.1 Nádrž.....	14
1.2.2 Hráz.....	14
1.2.3 Elektrárna.....	14
1.3 POPIS VODNÍHO DÍLA.....	15
1.4 PLÁNOVANÉ REKONSTRUKCE.....	16
2 VÝPOČET POMĚRŮ PŘI ZKRATU V ZÁKLADNÍCH BODECH	17
2.1 PARAMETRY ZAŘÍZENÍ ELEKTRÁRNY ORLÍK	17
2.1.1 Generátor	17
2.1.2 Budicí souprava C6250F/12.....	18
2.1.3 Dvojblokový transformátor.....	18
2.1.4 Transformátory TS 1,2,3.....	18
2.1.5 Transformátory TS 4,5 – neregulační.....	18
2.1.6 Předané podklady od ČEZ DPS a.s.	19
2.1.7 Transformovna Milín.....	19
2.2 STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH PŘEDPOKLADŮ PRO VÝPOČET ZKRATŮ.....	20
2.2.1 Náhradní schéma pro výpočet zkratu	21
2.2.2 Princip indexování veličin	21
2.3 ZKRAT V BODĚ 1 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 1.....	22
2.3.1 Při uvažování max. zkratového proudu	22
2.3.2 Při uvažování min. zkratového proudu	22
2.4 ZKRAT V BODĚ 1 – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ	22
2.4.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě.....	22
2.4.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	22
2.5 ZKRAT V BODĚ 1 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 2.....	23
2.5.1 Při uvažování max. zkratového proudu	23
2.5.2 Při uvažování min. zkratového proudu	23
2.6 CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 1 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	23
2.7 CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 1 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	23
2.8 CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 1 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	23
2.9 CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 1 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	23
2.10 ZKRAT V BODĚ 2 – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ	24
2.10.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě.....	24
2.10.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	24
2.11 ZKRAT V BODĚ 2 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 1.....	25
2.11.1 Při uvažování max. zkratového proudu	25
2.11.2 Při uvažování min. zkratového proudu	25
2.12 ZKRAT V BODĚ 2 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 2.....	25
2.12.1 Při uvažování max. zkratového proudu	25
2.12.2 Při uvažování min. zkratového proudu	25
2.13 CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 2 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON	25
2.14 CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 2 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	25
2.15 CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 2 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	26
2.16 CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 2 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	26

2.17	ZKRAT V BODĚ 3 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 1.....	27
2.17.1	Při uvažování max. zkratového proudu	28
2.17.2	Při uvažování min. zkratového proudu	28
2.18	ZKRAT V BODĚ 3 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 2.....	28
2.18.1	Při uvažování max. zkratového proudu	28
2.18.2	Při uvažování min. zkratového proudu	28
2.19	ZKRAT V BODĚ 3 – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ	29
2.19.1	Při uvažování max. zkratového výkonu sítě	29
2.19.2	Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	29
2.20	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 3 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON	29
2.21	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 3 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	30
2.22	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 3 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	30
2.23	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 3 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	30
2.24	ZKRAT V BODĚ 4 – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ	31
2.24.1	Při uvažování max. zkratového výkonu sítě	31
2.24.2	Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	31
2.25	ZKRAT V BODĚ 4 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 1.....	32
2.25.1	Při uvažování max. zkratového proudu	32
2.25.2	Při uvažování min. zkratového proudu	32
2.26	ZKRAT V BODĚ 4 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 2.....	32
2.26.1	Při uvažování max. zkratového proudu	32
2.26.2	Při uvažování min. zkratového proudu	32
2.27	VÝPOČET 1F ZKRATOVÉHO PROUDU – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ.....	33
2.27.1	Při uvažování max. zkratového výkonu sítě	33
2.27.2	Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	33
2.28	VÝPOČET 1F ZKRATOVÉHO PROUDU – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORŮ	33
2.29	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 4 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON	34
2.30	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 4 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	34
2.31	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 4 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	34
2.32	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 4 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	34
2.33	CELKOVÝ 2F ZEMNÍ ZKRATOVÝ PROUD V BODĚ 4.....	35
2.33.1	Při uvažování max. zkratového výkonu sítě	35
2.33.2	Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	36
2.34	ZKRAT V BODĚ 5 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 1.....	36
2.34.1	Při uvažování max. zkratového proudu	37
2.34.2	Při uvažování min. zkratového proudu	37
2.35	ZKRAT V BODĚ 5 – PŘÍSPĚVEK GENERÁTORU 2.....	37
2.35.1	Při uvažování max. zkratového proudu	37
2.35.2	Při uvažování min. zkratového proudu	37
2.36	ZKRAT V BODĚ 5 – PŘÍSPĚVEK SÍTĚ	38
2.36.1	Při uvažování max. zkratového výkonu sítě	38
2.36.2	Při uvažování min. zkratového výkonu sítě.....	38
2.37	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 5 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON	38
2.38	CELKOVÝ 3F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 5 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	38
2.39	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 5 – SÍŤ MAX. ZKRATOVÝ VÝKON.....	38
2.40	CELKOVÝ 2F ZKRATOVÝ PROUD A VÝKON V BODĚ 5 – SÍŤ MIN. ZKRATOVÝ VÝKON	39
2.41	PŘEHLED VÝSLEDKŮ	39
2.41.1	Výsledky pro 3f zkrat	39
2.41.2	Výsledky pro 2f zkrat	39
2.41.3	Výsledky pro 2f zemní zkrat.....	39
2.41.4	Výsledky pro 1f zkrat v bodě 4.....	39
3	NÁVRH OSAZENÍ OCHRANAMI.....	40
3.1	OCHRANY GENERÁTORU	40
3.1.1	Diferenciální ochrana generátoru	40
3.1.2	Zemní ochrana statoru 90%	43
3.1.3	Zemní ochrana statoru 100%	44
3.1.4	Zemní ochrana rotoru.....	45
3.1.5	Impedanční (distanční) ochrana.....	46
3.1.6	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	47
3.1.7	Podpěťová ochrana	48

3.1.8	Přepětová ochrana.....	49
3.1.9	Zpětná wattová ochrana.....	50
3.1.10	Ochrana přebuzení.....	51
3.1.11	Ochrana podbuzení.....	52
3.1.12	Ochrana nadfrekvence.....	55
3.1.13	Ochrana podfrekvence.....	56
3.1.14	Ochrana nesymetrického zatížení.....	57
3.1.15	Tepelná ochrana.....	58
3.1.16	Směrová nadproudová (zkratová) ochrana.....	59
3.1.17	Ochrana selhání vypínače.....	60
3.2	OCHRANY BLOKOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	62
3.2.1	Diferenciální ochrana.....	62
3.2.2	Impedanční ochrana.....	63
3.2.3	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	63
3.2.4	Nadproudová (zkratová) I_f ochrana.....	63
3.2.5	Nádobová ochrana transformátoru.....	63
3.2.6	Rozdílová zemní ochrana.....	64
3.3	OCHRANY LINKY.....	66
3.3.1	Impedanční ochrana.....	66
3.3.2	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	66
3.3.3	Nadproudová (zkratová) ochrana I_f	66
3.3.4	Srovnávací ochrana linky.....	66
3.3.5	Rozdílová zemní ochrana.....	67
3.4	OCHRANY TRANSFORMÁTORU VLASTNÍ SPOTŘEBY.....	68
3.4.1	Diferenciální ochrana.....	68
3.4.2	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	68
3.4.3	Nadproudová (zkratová) ochrana I_f	68
4	ZVOLENÉ PARAMETRY OCHRAN.....	69
4.1	OCHRANY GENERÁTORU.....	69
4.1.1	Nastavení diferenciální ochrany.....	69
4.1.2	Nastavení zemní ochrany statoru 90%.....	70
4.1.3	Nastavení zemní ochrany statoru 100%.....	70
4.1.4	Zemní ochrana rotoru.....	70
4.1.5	Impedanční (distanční) ochrana.....	71
4.1.6	Nadproudová ochrana generátoru s podpětovou přídrží.....	72
4.1.7	Směrová nadproudová (zkratová) ochrana generátoru.....	72
4.1.8	Přepětová ochrana generátoru.....	73
4.1.9	Ochrana přebuzení generátoru.....	73
4.1.10	Ochrana podbuzení generátoru.....	73
4.1.11	Ochrana nadfrekvence generátoru.....	75
4.1.12	Ochrana podfrekvence generátoru.....	75
4.1.13	Ochrana nesymetrického zatížení.....	76
4.1.14	Tepelná ochrana.....	76
4.1.15	Ochrana selhání vypínače generátoru.....	77
4.2	OCHRANY BLOKOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	78
4.2.1	Diferenciální ochrana.....	78
4.2.2	Impedanční (distanční) ochrana.....	78
4.2.3	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	79
4.2.4	Nadproudová (zkratová) ochrana I_f	79
4.2.5	Nádobová ochrana transformátoru.....	79
4.2.6	Rozdílová zemní ochrana.....	80
4.3	OCHRANY LINKY.....	81
4.3.1	Impedanční (distanční) ochrana linky.....	81
4.3.2	Nadproudová ochrana linky.....	83
4.3.3	Nadproudová 1 fázová ochrana linky.....	83
4.3.4	Srovnávací ochrana linky.....	84
4.5	OCHRANY TRANSFORMÁTORU VLASTNÍ SPOTŘEBY.....	85
4.5.1	Diferenciální ochrana.....	85
4.5.2	Nadproudová (zkratová) ochrana.....	85
4.5.3	Nadproudová (zkratová) ochrana I_f	86

5	ZÁVĚR.....	87
6	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	88
7	SEZNAM PŘÍLOH	90
8	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	90
9	SEZNAM TABULEK	91

Seznam symbolů a zkratk

Q	Průtok [m^3/s]
l	Délka [m]
S	Plocha [m^2]
V	Objem [m^3]
P_n	Jmenovitý činný výkon [W]
ΔP	Ztrátový výkon [W]
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon [VA]
S_k''	Zkratový zdánlivý výkon [VA]
Q_n	Jmenovitý jalový výkon [VAr]
U_n	Jmenovité napětí [V]
U_1	Primární napětí [V]
U_2	Sekundární napětí [V]
U_b	Budící napětí [V]
u_k, e_k	Napětí nakrátko [V]
u_0, e_0	Napětí naprázdno [V]
I_n	Jmenovitý proud [A]
I_1	Proud primárního vinutí [A]
I_2	Proud sekundárního vinutí [A]
I_b	Budící proud [A]
$\cos\varphi$	Účinník [-]
f	Frekvence [Hz]
p	Jmenovitý převod [-]
n_n	Jmenovité otáčky [ot./min.]
η	Účinnost [-]
Z	Impedance [Ω]
Z_1	Impedance sousledná složka [Ω]
Z_0	Impedance netočivá složka [Ω]
Z_{L1}	Impedance linky sousledná složka [Ω]
Z_{L0}	Impedance linky netočivá složka [Ω]
X_d	Podélná reaktance [Ω]
X'_d	Přechodná podélná reaktance [Ω]
X''_d	Rázová podélná reaktance [Ω]
X_q	Příčná reaktance [Ω]
R	El. odpor [Ω]
r	Měrný el. odpor [Ω/m]
x	Měrná reaktance [Ω/m]
t	Čas [s]
T	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
C	Kapacita [F]
C_v	Kapacita vedení [F]
c	Napěťový součinitel [-]
L	Indukčnost [H]

Úvod

V současnosti se v energetické politice stále více řeší zdroje energie, které jsou schopné zajistit stabilitu sítí, jsou ekologické a využívají obnovitelné zdroje. Téma týkající se vodní elektrárny jsem si vybral z toho důvodu, že jsem tím chtěl alespoň částečně navázat na moji bakalářskou práci, která se týkala malé vodní elektrárny. Tato diplomová práce je rozdělena do 4 částí. V první kapitole práce se nachází teoretický popis vodního díla Orlík.

Ve druhé kapitole se nachází analytický výpočet poměrů při zkratech zařízení elektrárny, která je vyvedena do transformovny Milín. Výpočet zkratových proudů je proveden v základních 5 bodech elektrárny a respektuje normu ČSN EN 60909. Druhá kapitola také obsahuje přehled parametrů všech zařízení a stanovení základních předpokladů pro výpočet zkratů. Tyto výpočty slouží jako podklad pro nastavení ochranných zařízení. Detailní výpočty včetně výpočtů napětí při zkratech jsou nad rámec této diplomové práce. Detailními zkratovými výpočty pomocí numerické simulace by se na tuto diplomovou práci dalo navázat. Analytické výpočty by mohly sloužit k verifikaci výsledků se simulačním modelem.

Ve třetí kapitole práce jsou uvedeny všechny navržené ochrany, přehled jejich funkcí a doporučená nastavení od výrobce ochranných zařízení Siemens.

Ve čtvrté kapitole je sestaven přehled jednotlivých ochran, doporučené hodnoty a navržené nastavení pro elektrárnu Orlík. Navržené ochrany splňují požadavky podle ČSN 33 3051 a dále je návrh o několik ochran ještě doplněn. Diplomová práce řeší zkratové příspěvky v základních bodech sítě, vybavení zařízení elektrárny ochrannými funkcemi a návrh nastavení parametrů ochran. Návrh chránění je proveden pro generátory, blokové transformátory, linku 220 kV a transformátory vlastní spotřeby v odbočce generátorů. Návrh ochran je doplněný přiloženým schématem zapojení elektrárny, který obsahuje osazení ochranami.

Zařízení rozvodny 12 kV a na napěťové hladině nn nejsou předmětem práce. Dimenzování přístrojových transformátorů proudu není v rámci této práce řešeno. V rámci plánu výměny systému chránění budou použity stávající přístrojové transformátory a nepočítá se s jejich výměnou. Diplomová práce rovněž neřeší komunikaci mezi srovnávacími ochranami linky 220 kV mezi elektrárnou Orlík a rozvodnou Milín. Dále neřeší připojení ochran na zařízení výroby tj. binární vstupy a výstupy. Pro chránění generátorů a blokových transformátorů linky 220 kV bude použito redundantní chránění s hlavní a záložní ochranou.

1 Teoretický popis vodního díla Orlík

1.1 Hydrologické údaje

Plocha povodí: 12 106 km²

Průměrný dlouhodobý roční průtok 83,5 m³/s

N-letý průtok Q_{100} : 2180 m³/s [1]

1.2 Technické údaje

1.2.1 Nádrž

Objem: 716,5 mil. m³

Zatopená plocha: 2732,7 ha [1]

1.2.2 Hráz

Výška hráze nade dnem: 81,5 m

Délka koruny hráze: 450 m [1]

1.2.3 Elektrárna

Typ turbíny: Kaplan

Počet soustrojí: 4

Instalovaný výkon 4 x 91 MW = 364 MW

Vyvedení pomocí dvou dvojblokových transformátorů do rozvodny Milín

Max. hltnost: 4x 150 m³/s

Rozsah spádu: 45-71,5 m

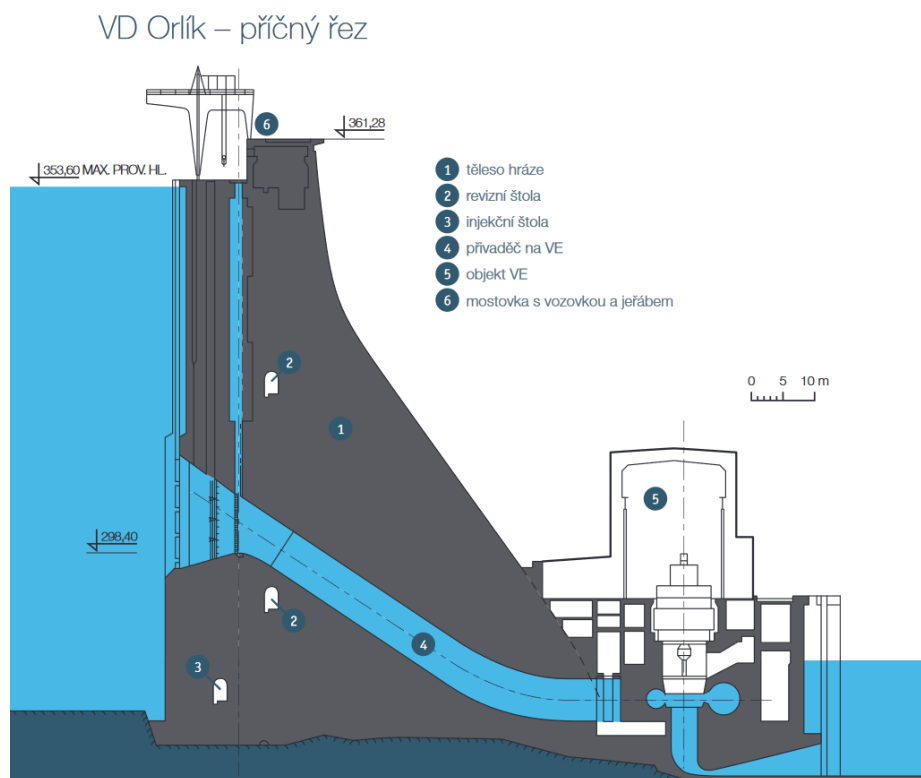
Najetí na plný výkon: 128s [1]



Obr. 1 Hráz vodního díla Orlík [4]

1.3 Popis vodního díla

Přehradu Orlík nalezneme na 145 kilometru Vltavy, 91 km od Prahy. Jde o největší vodní dílo v České republice, které je zároveň hlavní částí Vltavské kaskády. Střední Vltava prošla v historii spoustou úprav. Z počátku šlo především o úpravy pro možnosti lodní dopravy. V Roce 1911 bylo navrženo Dr. Ing. Radoušem vybudování vodní hráze a využití toku k výrobě energie. Místo pro vodní dílo bylo určeno na základě Hydroenergetického plánu Vltavy a dolního Labe v roce 1953. [1][2][3]



Obr. 2 Vodní dílo Orlík - příčný řez [1]

Stavba, na kterou trvalo zhotovit plány 3 roky, začala v dubnu v roce 1957. Napuštění nádrže proběhlo v roce 1960 a poslední turbogenerátor byl do provozu uveden v březnu 1962. Rekultivační práce probíhaly až do roku 1966. V okolí vodní nádrže byl proveden průzkum historických památek Československou akademií věd a byly zabezpečeny především hrady Orlík, Zvíkov, zámek v Kolodějích a zachráněn románský kostel u Červené nad Vltavou. [1][2][3]

Tížná betonová hráz je dlouhá 450m a výška její koruny ode dna je 81,5m. Přes hráz vede silnice druhé třídy. Pro vybudování bylo potřeba 1 milion kubických metrů betonu. Přepad hráze je tvořený třemi poli o rozměrech 15x8 metrů na pravé straně toku a ve spodní části se nachází dvě výpusti o rozměru 4 metry a kapacitou 2300m³/s. Vodní hráz Orlík vytvořila jezero délky 68km, které ovlivnilo i Otavu a Lužnici, a tím dosahuje objemu 716,5 mil. m³ vody. Mimo akumulaci vody slouží hráz jako ochrana při povodních, pro rekreaci, rybí hospodářství a pro plavbu lodí. Nižle na řece je vybudována přehrada Kamýk, která slouží pro vyrovnávání hladin a další energetickou výrobu. [1][2][3]



Obr. 3 Náhled lokality [1]

Na pravé straně přehrady Orlík je vybudováno plavební zařízení s plošinovým vozíkem pro sportovní plavidla do délky 8 metrů, šířky 3 metry a váhy 3 tuny. Velké plavební zařízení není dosud dokončeno. [1][2][3]

Na druhé straně je zbudována elektrárna se čtyřmi turbínami typu Kaplan o rozloze 17x127,5 m a výškou strojovny 20 m. Turbíny jsou určeny pro spád 70,5 m. Voda je přiváděna ocelovým potrubím o průměru 6250 mm. Vtok je vybaven rychlouzávěry a nouzovými hradidly. Původní desetilopátkové kolo bylo oceněno na výstavě EXPO58 v Bruselu zlatou medailí, ale v současnosti už jsou soustrojí vybavena účinnějšími osmilopátkovými koly. [1][2][3]

Vodní elektrárna je jedním z hlavních článků pro výrobu špičkové, ekologické elektrické energie. Výkonem 364 MW a schopností najetí do plného výkonu za 128 sekund, výrazně přispívá ke stabilitě energetické sítě. Z generátorů je získáno napětí 15 kV, které se transformuje pomocí dvojblokových transformátorů na napětí 220 kV. [1][2][3]

Řízení elektrárny probíhá dálkově z centrálního dispečinku ve Štěchovicích, odkud se řídí i další velká vodní díla jako jsou Lipno, Slapy, Kamýk, Dlouhé stráně a Dalešice. Elektrárny Lipno, Orlík, Slapy a Kamýk slouží jako záložní zdroje energie v případě výpadku Temelína. [1][2][3]

1.4 Plánované rekonstrukce

2021-2027 – uvažuje se o výměně dvou kaplanových turbín za Francisovy a tím získání možnosti přečerpávání. [5]

2 Výpočet poměrů při zkratu v základních bodech

2.1 Parametry zařízení elektrárny Orlík

2.1.1 Generátor

Tab. 1 Parametry Generátoru [6]

Výrobce		Škoda Plzeň
Druh		32-pólový vertikální, synchronní
Typ		HV 173080/32-T 11
Zdánlivý výkon	Sn	100 MVA
Činný výkon	Pn	91 MW
Účinnost	cos φ	0,91
Jmenovité napětí	Un	15±5% kV
Jmenovitý proud	In	3850 A
Jmenovité otáčky	nn	187,5 1/min
Jmenovitý kmitočet	fn	50 Hz
Zapojení statoru		Y
Jmenovitý proud rotoru		830 A
Jmenovité napětí rotoru		240 V
Budící napětí při nárazovém buzení po dobu 20 s		1050 V
Budící proud při nárazovém buzení po dobu 20 s		2 In
Přirůstek napětí při úplném odlehčení z plného zatížení do chodu naprázdno beze změny buzení při: Cos φ = 1,0 Cos φ = 0,9		20% 29%
Trvalý proud nakrátko při buzení naprázdno		4160 A
Reaktance (nesycená)	x _d	100 %
Reaktance	x' _d	23 %
Reaktance	x ^o _d	19 %
Reaktance	x ₂	21%
Reaktance	x ₀	8,5%
Reaktance (nasycená)	X _d	92 %
Reaktance (nasycená)	X _q	55 %
Časová konstanta	T' _{do}	7s
Časová konstanta	T' _d	2,4s
Časová konstanta	T _d	0,04s
Časová konstanta	T _a	0,19s
Teplota alternátoru při In	T	108 ^o C
Kapacita statorového vinutí proti zemi	C	0,37μF
Ztráty alternátoru	ΔP	1658kW

Doporučená časová konstanta termokopie statorového vinutí = 120 s

Dovolené přetížení statoru:

$$\left[\left(\frac{i}{1,05} \right)^2 - 1 \right] \cdot t \leq 120 \text{ s}$$

Dovolené nesymetrické zatížení:

$$i_2^2 \cdot t \leq 20 \text{ s}$$

Trvalé nesymetrické zatížení: 8 % [6]

2.1.2 Budicí souprava C6250F/12

Tab. 2 Parametry budicí soupravy [6]

Jmenovité hodnoty		
Jmenovitý výkon	Sn	450 kVA
Jmenovité napětí	Un	350 V
Jmenovitý proud	In	1285 A
Časová konstanta	T'do	2,4 sec
Budicí napětí naprázdno	Ubo	110V
Budicí proud naprázdno	Ibo	480A

2.1.3 Dvojblokový transformátor

Tab. 3 Parametry dvojblokového transformátoru [6]

Jmenovité hodnoty		
typ		EJI 40P – 1
Výkon	Sn	220/3//110/3/110/3 MVA
Jmenovitý převod	p	242000/√3//15000/15000 V
Jmenovitý primární proud	In	524 A
Jmenovitý sekundární proud		2444/2444 A
Ztráty naprázdno	Po	32 kW + 15% tolerance
Ztráty nakrátko	Pk	225 kW + 15% tolerance
Napětí nakrátko	ek	14 % ± 10 %
Napětí nakrátko (pro převod 15/15 kV)	ek	28 % ± 10 %
Spojení třífázové skupiny		YN/d1/d1

2.1.4 Transformátory TS 1,2,3

Tab. 4 Parametry transformátoru vlastní spotřeby [6]

Jmenovité hodnoty		
Výrobce		CKD Praha
Výkon	Sn	1250 kVA
Převod		10±4x2,5%/0,4/0,231 kV
Spojení		Yyn0

2.1.5 Transformátory TS 4,5 – neregulační

Tab. 5 Parametry transformátoru vlastní spotřeby neregulační [6]

Jmenovité hodnoty		
Výrobce		BEZ Bratislava
Výkon	Sn	1000 kVA
Převod		15±5%/0,4/0,231 kV
Spojení		Dy1
Napětí nakrátko	ek	6 %

[6]

2.1.6 Předané podklady od ČEZ DPS a.s.

3 fázový maximální zkratový výkon v síti 220kV $Sk''_{(max)}=2893,2$ MVA

3 fázový minimální zkratový výkon v síti 220kV $Sk''_{(min)}=2214,5$ MVA

1 fázový zkratový výkon v síti 220kV $Sk''_{(1f)}=2537$ MVA [6]

2.1.6.1 Údaje vedení V001, V002 Orlík-Milín

Opt.vláknem v zemním lanu

Impedance vedení: $r = 0,0786 \Omega/\text{km}$; $x = 0,466 \Omega/\text{km}$

Kapacita vedení: $Cv = 9,5 \text{ nF}/\text{km}$

Pro délku vedení 1 km:

$$Z_1 = 0,0786 + j0,466 \Omega; Z_0 = 0,4182 + j1,174 \Omega$$

Parametry vedení o délce $l=8,92$ km:

$$Z_1 = 0,70 + j4,16 \Omega; Z_0 = 3,73 + j10,47 \Omega [6]$$

2.1.7 Transformovna Milín

2.1.7.1 Přípojnice 220kV v Trmil

$Sk''_{(max)}=2893$ MVA

$Sk''_{(min)}=2215$ MVA

$Sk''_{(1f)}=2537$ MVA [6]

2.1.7.2 Transformátor t201 220/110/10,5 kV

Tab. 6 Parametry transformátoru T201 Milín [6]

Transformátor T201	
Výkon transformátoru S_n	200/200/100 MVA
Napětí nakrátko u_k	8,8/30,3/18,1 %
Jmenovité napětí U_n	220/110/10,5 kV
Jmenovitý proud I_n	500/955/3180 A

2.1.7.3 Reaktor v Trmil na 10,5kV

Tab. 7 Parametry Reaktoru 10,5 kV Milín [6]

Reaktor RS011	
Impedance Z	0,45 Ω
Indukčnost L	1,44 mH/f
Jmenovitý proud I_n	250 A
Jmenovité napětí U_n	10,5 kV

2.2 Stanovení základních předpokladů pro výpočet zkratů

Zkratové výpočty respektují platnou normu ČSN EN 60909 a dále:

- Předpokládá se, že během zkratu se nemění parametry prvků elektrizační soustavy.

- Předpokládá se symetrická soustava před zkratem.

- Předpokládá se stabilní síť.

- Neuvažuje se změna zapojení soustavy během zkratu.

- Při více fázových zkratech se uvažuje stejné místo zkratu a ve stejný čas.

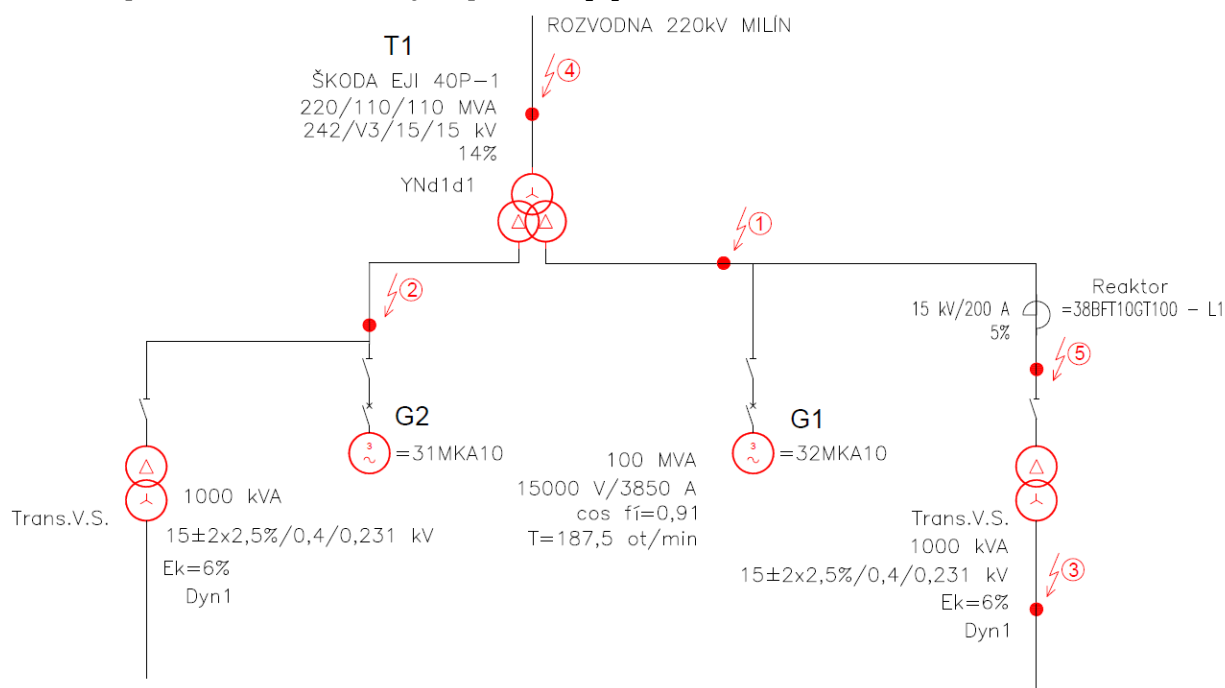
- Zanedbává se vliv elektrického oblouku na velikost zkratového proudu.

- Pro výpočet maximálního zkratového výkonu se uvažují připojené oba generátory a daný max. zkratový výkon sítě.

- Pro výpočet minimálního zkratového výkonu se uvažuje odpojená síť a připojený pouze jeden generátor, jelikož je dle parametrů i výpočtů nejmenším zdrojem zkratového proudu.

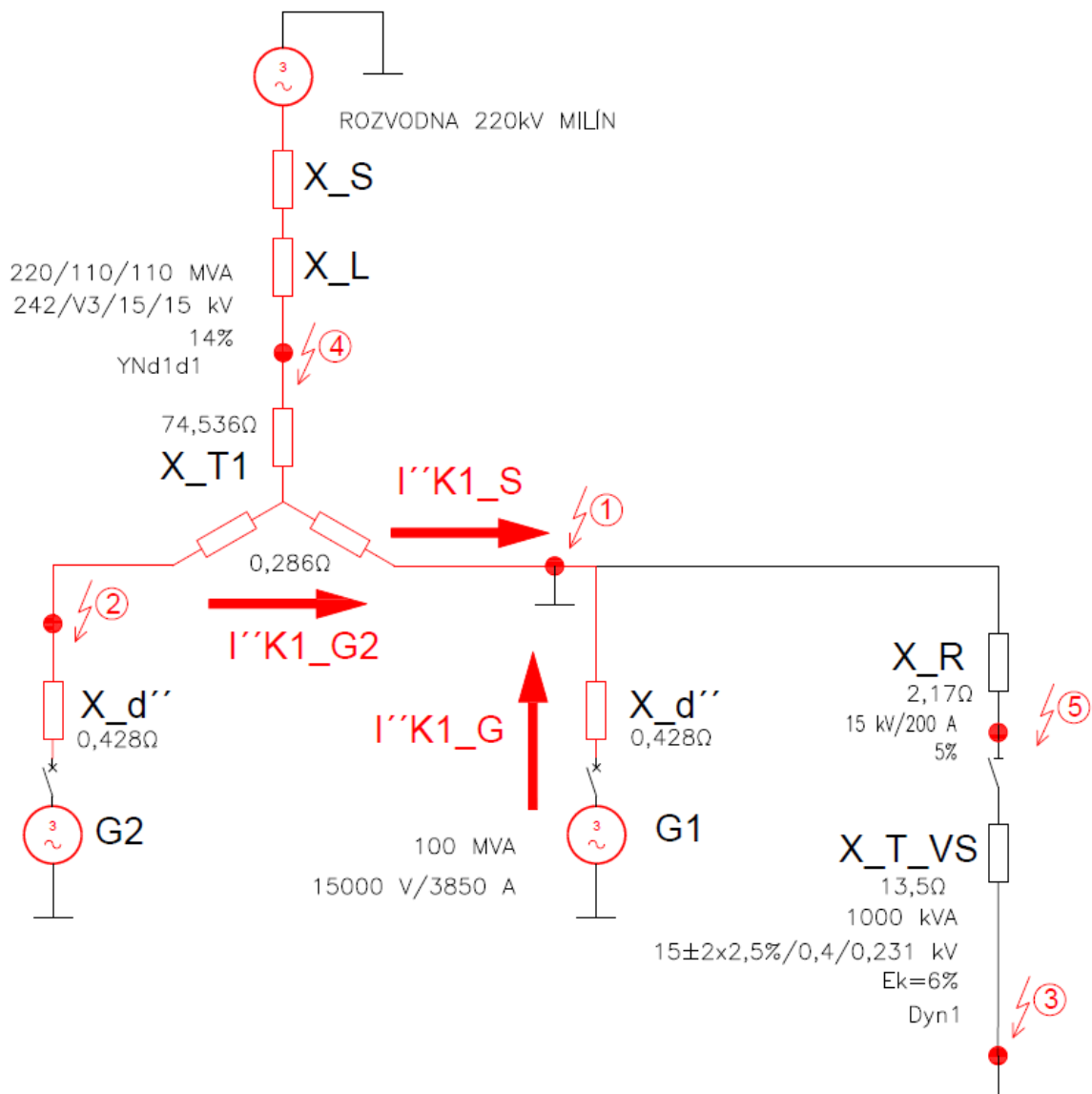
- Při výpočtu zkratových poměrů nás zajímá počáteční zkratový proud I_k'' . Nárazový zkratový proud I_p a Ekvivaletní oteplovací proud $I_{ke}=I_{th}$ pro nastavení ochrany zásadní.

-Pro nastavení ochrany je nejdůležitější minimální zkratový proud z důvodu odlišení provozních a zkratových proudů. [7]



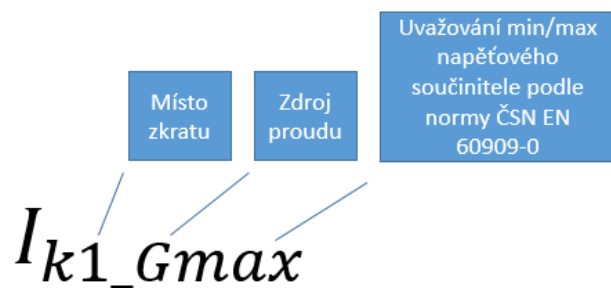
Obr. 1 – schéma zkratu v bodě 1

2.2.1 Náhradní schéma pro výpočet zkratu



Obr. 2 – náhradní schéma zkratu v bodě 1

2.2.2 Princip indexování veličin



Obr. 3 – princip indexování veličin

2.3 Zkrat v bodě 1 – příspěvek generátoru 1

$$X_G = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega \quad (2.1)$$

2.3.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I_{K1-Gmax}'' = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_G} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,428} = 22,26 \text{ kA} \approx 5,8 I_{nG} \quad (2.2)$$

2.3.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I_{K1-Gmin}'' = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_G} = \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,428} = 20,234 \text{ kA} \approx 5,3 I_{nG} \quad (2.3)$$

2.4 Zkrat v bodě 1 – příspěvek sítě

2.4.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$X_{T1} = u_K \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,286 \Omega \quad (2.4)$$

$$X_{S_{max(220)}} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k_{max}}} = \frac{1,1 \cdot 220^2}{2893} = 18,40 \Omega \quad (2.5)$$

$$X_{L_{(220)}} \cong Z_L = 0,70 + j4,16 \Omega = 4,2 \Omega \text{ při zanedbání činného odporu} \quad (2.6)$$

$$X_{S_{max(15)}} = X_{S_{max(220)}} \cdot \left(\frac{U_{n(15)}}{U_{n(220)}}\right)^2 = 18,40 \cdot \left(\frac{15}{220}\right)^2 = 0,086 \Omega \quad (2.7)$$

$$X_{L_{(15)}} = X_{L_{(220)}} \cdot \left(\frac{U_{n(15)}}{U_{n(220)}}\right)^2 = 4,2 \cdot \left(\frac{15}{220}\right)^2 = 0,020 \Omega \quad (2.8)$$

$$X_{SC1_{max}} = X_{S_{max(15)}} + X_{L_{(15)}} + X_{T1} = 0,086 + 0,020 + 0,286 = 0,392 \Omega \quad (2.9)$$

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I_{K1-Smax}'' = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC1_{max}}} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,392} = 24,30 \text{ kA} \approx 9,94 I_{nT1} \quad (2.10)$$

2.4.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

$$X_{T1} = u_K \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,286 \Omega \quad (2.11)$$

$$X_{S_{min(220)}} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k_{min}}} = \frac{1 \cdot 220^2}{2215} = 21,85 \Omega \quad (2.12)$$

$$X_{L_{(220)}} \cong Z_L = 0,70 + j4,16 \Omega = 4,2 \Omega \text{ při zanedbání činného odporu} \quad (2.13)$$

$$X_{S_{min(15)}} = X_{S_{min(220)}} \cdot \left(\frac{U_{n(15)}}{U_{n(220)}}\right)^2 = 21,85 \cdot \left(\frac{15}{220}\right)^2 = 0,102 \Omega \quad (2.14)$$

$$X_{L_{(15)}} = X_{L_{(220)}} \cdot \left(\frac{U_{n(15)}}{U_{n(220)}}\right)^2 = 4,2 \cdot \left(\frac{15}{220}\right)^2 = 0,020 \Omega \quad (2.15)$$

$$X_{SC1_{min}} = X_{S_{min(15)}} + X_{L_{(15)}} + X_{T1} = 0,102 + 0,020 + 0,286 = 0,408 \Omega \quad (2.16)$$

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I_{K1-Smin}'' = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC1_{min}}} = \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,408} = 21,226 \text{ kA} \approx 8,69 I_{nT1} \quad (2.17)$$

2.5 Zkrat v bodě 1 – příspěvek generátoru 2

$U_k = 28\%$ - Pro výpočet impedance pro převod transformátoru 15/15 kV

$$X_{T1} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,28 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,573 \Omega \quad (2.18)$$

2.5.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K1_G2max} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1} + X_G)} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428)} = 9,517 \text{ kA} \approx 2,5 I_{nG} \quad (2.19)$$

2.5.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K1_G2min} = \frac{c_2 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1} + X_G)} = \frac{1,0 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428)} = 8,652 \text{ kA} \approx 2,3 I_{nG} \quad (2.20)$$

2.6 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 1 – Sít' max. zkratový výkon

$$I''_{KC1_max} = I''_{K1_Gmax} + I''_{K1_Smax} + I''_{K2_Gmax} = 22,26 \cdot 10^3 + 24,30 \cdot 10^3 + 9,517 \cdot 10^3 = 56,077 \text{ kA} \quad (2.21)$$

$$S''_{K1_max} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC1_max} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 56,077 \cdot 10^3 = 1456,923 \text{ MVA} \quad (2.22)$$

2.7 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 1 – Sít' min. zkratový výkon

$$I''_{KC1_min} = I''_{K1_Gmin} + I''_{K1_Smin} + I''_{K2_Gmin} = 20,234 \cdot 10^3 + 21,226 \cdot 10^3 + 8,652 \cdot 10^3 = 50,112 \text{ kA} \quad (2.23)$$

$$S''_{K1_min} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC1_min} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 50,112 \cdot 10^3 = 1301,95 \text{ MVA} \quad (2.24)$$

2.8 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 1 – Sít' max. zkratový výkon

$$I''_{KC1_2fmax} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC1_max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 56,077 \cdot 10^3 = 48,564 \text{ kA} \quad (2.25)$$

$$S''_{K1_2fmax} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC1_2fmax} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 48,564 \cdot 10^3 = 1261,730 \text{ MVA} \quad (2.26)$$

2.9 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 1 – Sít' min. zkratový výkon

$$I''_{KC1_2fmin} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC1_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 50,112 \cdot 10^3 = 43,398 \text{ kA} \quad (2.27)$$

$$S''_{K1_2fmin} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC1_2fmin} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 43,398 \cdot 10^3 = 1127,513 \text{ MVA} \quad (2.28)$$

2.11 Zkrat v bodě 2 – příspěvek generátoru 1

$$X_G = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega - \text{podle výpočtu v bodě 1} \quad (2.31)$$

$U_k = 28\%$ - Pro výpočet impedance pro převod transformátoru 15/15 kV

$$X_{T1} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,28 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,573 \Omega \quad (2.32)$$

2.11.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K2_Gmax} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1} + X_G)} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428)} = 9,517 \text{ kA} \approx 2,5 I_{nG} \quad (2.33)$$

2.11.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K2_Gmin} = \frac{c_2 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1} + X_G)} = \frac{1,0 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428)} = 8,652 \text{ kA} \approx 2,3 I_{nG} \quad (2.34)$$

2.12 Zkrat v bodě 2 – příspěvek generátoru 2

$$X_G = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega \quad (2.35)$$

2.12.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K2_G2max} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_G} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,428} = 22,26 \text{ kA} \approx 5,8 I_{nG} \quad (2.36)$$

2.12.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K2_G2min} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_G} = \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{0,428} = 20,234 \text{ kA} \approx 5,3 I_{nG} \quad (2.37)$$

2.13 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 2 – síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC2_max} = I''_{K2_Smax} + I''_{K2_Gmax} + I''_{K2_G2max} = 24,30 \cdot 10^3 + 9,517 \cdot 10^3 + 22,26 \cdot 10^3 = 56,077 \text{ kA} \quad (2.38)$$

$$S''_{K2_max} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC2_max} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 56,08 \cdot 10^3 = 1456,923 \text{ MVA} \quad (2.39)$$

2.14 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 2 – síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC2_min} = I''_{K2_SCmin} + I''_{K2_Gmin} + I''_{K2_G2min} = 21,226 \cdot 10^3 + 8,652 \cdot 10^3 + 20,234 \cdot 10^3 = 50,112 \text{ kA} \quad (2.40)$$

$$S''_{K2_min} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC2_min} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 50,112 \cdot 10^3 = 1301,95 \text{ MVA} \quad (2.41)$$

2.15 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 2 – Sít' max. zkratový výkon

$$I''_{KC2_2fmax} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC2_max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 56,077 \cdot 10^3 = 48,564 \text{ kA} \quad (2.42)$$

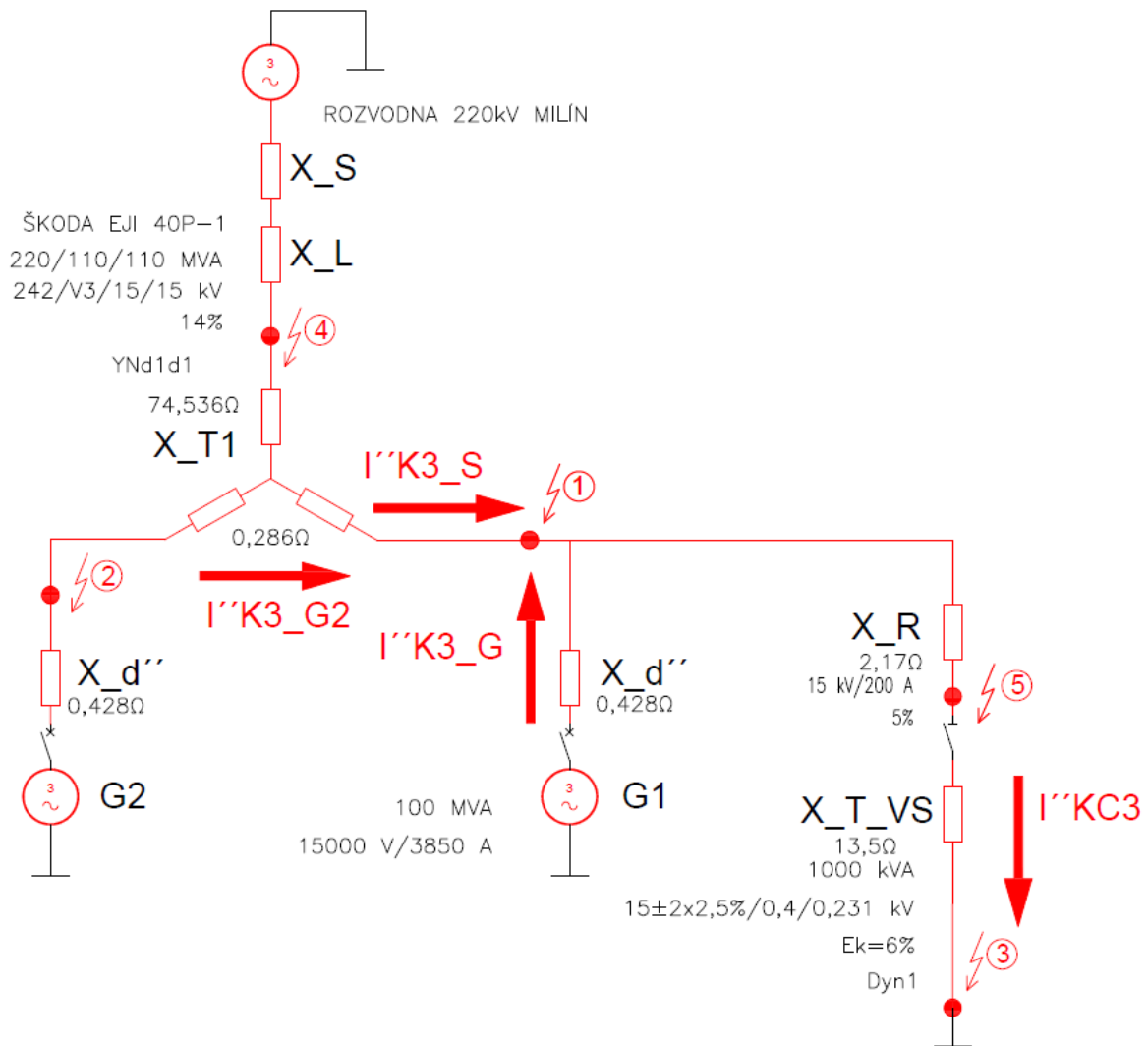
$$S''_{K2_2fmax} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC2_2fmax} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 48,564 \cdot 10^3 = \\ = 1261,730 \text{ MVA} \quad (2.43)$$

2.16 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 2 – Sít' min. zkratový výkon

$$I''_{KC2_2fmin} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC2_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 50,112 \cdot 10^3 = 43,398 \text{ kA} \quad (2.44)$$

$$S''_{K2_2fmin} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC2_2fmin} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 43,398 \cdot 10^3 = \\ = 1127,513 \text{ MVA} \quad (2.45)$$

2.17 Zkrat v bodě 3 – příspěvek generátoru 1



Obr. 3 – náhradní schéma zkratu v bodě 3

$$X_{G(15)} = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega - \text{podle výpočtu v bodě 1} \quad (2.46)$$

$$X_{G_{(0,4)}} = X_{G_{(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,428 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,304 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2.47)$$

$$X_{R(15)} = u_K \cdot Z_N = u_K \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = 0,05 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 200} = 2,17 \Omega \quad (2.48)$$

$$X_{R_{(0,4)}} = X_{R(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 2,17 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,002 \Omega \quad (2.49)$$

$$X_{T_{VS(15)}} = u_K \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,06 \cdot \frac{15^2}{1} = 13,5 \Omega \quad (2.50)$$

$$X_{T_{VS(0,4)}} = X_{T_{VS(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 13,5 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,01 \Omega \quad (2.51)$$

2.17.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K3_Gmax} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(0,4)}}{\sqrt{3}}}{(X_{G(0,4)} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS}(0,4)})} = \frac{1,1 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{(0,304 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01)} = 20,647 \text{ kA} \approx 5,4 I_{nG} \quad (2.52)$$

2.17.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=0,9$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K3_Gmin} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(0,4)}}{\sqrt{3}}}{(X_{G(0,4)} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS}(0,4)})} = \frac{0,9 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{(0,304 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01)} = 16,893 \text{ kA} \approx 4,4 I_{nG} \quad (2.53)$$

2.18 Zkrat v bodě 3 – příspěvek generátoru 2

$$X_{G(15)} = x''_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega - \text{podle výpočtu v bodě 1} \quad (2.54)$$

$$X_{G(0,4)} = X_{G(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,428 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,31 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2.55)$$

$U_k = 28\%$ - Pro výpočet impedance pro převod transformátoru 15/15 kV

$$X_{T1(15)} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,28 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,573 \Omega \quad (2.56)$$

$$X_{T1(0,4)} = X_{T1(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,573 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,41 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2.57)$$

$$X_{R(0,4)} = X_{R(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 2,17 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,002 \Omega \quad (2.58)$$

$$X_{T_{VS}(0,4)} = X_{T_{VS}(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 13,5 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,01 \Omega \quad (2.59)$$

2.18.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K3_G2max} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T10,4} + X_{G0,4} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS}(0,4)})} = \frac{1,1 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{(0,41 \cdot 10^{-3} + 0,31 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01)} = 19,971 \text{ kA} \approx 5,2 I_{nG} \quad (2.60)$$

2.18.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=0,9$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K3_G2min} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T10,4} + X_{G0,4} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS}(0,4)})} = \frac{0,9 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{(0,41 \cdot 10^{-3} + 0,31 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01)} = 16,340 \text{ kA} \approx 4,2 I_{nG} \quad (2.61)$$

2.19 Zkrat v bodě 3 – příspěvek sítě

2.19.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$X_{T1_{(15)}} = u_K \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,286 \Omega \quad (2.62)$$

$$X_{T1_{(0,4)}} = X_{T1_{(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,286 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 0,2 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (2.63)$$

Uvažujeme zkrat na hladině $U_n = 0,4$ kV

$$X_{S_{\max(15)}} = 0,086 \Omega - \text{z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.64)$$

$$X_{L_{(15)}} = 0,020 \Omega - \text{výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.65)$$

$$X_{S_{\max(0,4)}} = X_{S_{\max(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,086 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 61,2 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.66)$$

$$X_{L_{(0,4)}} = X_{L_{\max(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 14,2 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} X_{SC3_{\max}} &= X_{S_{\max(0,4)}} + X_{L_{(0,4)}} + X_{T1_{(0,4)}} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS(0,4)}} = \\ &= 61,2 \cdot 10^{-6} + 14,2 \cdot 10^{-6} + 0,2 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01 = \\ &= 0,0123 \Omega \end{aligned} \quad (2.68)$$

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K3_{S\max}} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC3_{\max}}} = \frac{1,1 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{0,0123} = 20,653 \text{ kA} \approx 8,5 I_{nT1} \quad (2.69)$$

2.19.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

Uvažujeme zkrat na hladině $U_n = 0,4$ kV

$$X_{S_{\min(15)}} = 0,102 \Omega - \text{z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.70)$$

$$X_{L_{(15)}} = 0,020 \Omega - \text{z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.71)$$

$$X_{S_{\min(0,4)}} = X_{S_{\min(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,102 \cdot \left(\frac{0,4}{15}\right)^2 = 72,2 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.72)$$

$$X_{L_{(0,4)}} = X_{L_{(15)}} \cdot \left(\frac{U_{n(0,4)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 14,2 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} X_{SC3_{\min}} &= X_{S_{\min(0,4)}} + X_{L_{(0,4)}} + X_{T1_{(0,4)}} + X_{R(0,4)} + X_{T_{VS(0,4)}} = \\ &= 72,2 \cdot 10^{-6} + 14,2 \cdot 10^{-6} + 0,2 \cdot 10^{-3} + 0,002 + 0,01 = \\ &= 0,0123 \Omega \end{aligned} \quad (2.74)$$

$c=0,9$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K3_{S\min}} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC3_{\min}}} = \frac{0,9 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{0,0123} = 16,898 \text{ kA} \approx 6,9 I_{nT1} \quad (2.75)$$

2.20 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 3 – síť max. zkratový výkon

$$\begin{aligned} I''_{KC3_{\max}} &= I''_{K3_{S\max}} + I''_{K3_{G\max}} + I''_{K3_{G2\max}} = \\ &= 20,653 \cdot 10^3 + 20,645 \cdot 10^3 + 19,971 \cdot 10^3 = 61,27 \text{ kA} \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$S''_{K3_{\max}} = \sqrt{3} \cdot U_{n(0,4)} \cdot I''_{KC3_{\max}} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 61,27 \cdot 10^3 = 42,449 \text{ MVA} \quad (2.77)$$

2.21 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 3 – síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC3_min} = I''_{K3_Smin} + I''_{K3_Gmin} + I''_{K3_G2min} = 16,898 \cdot 10^3 + 16,893 \cdot 10^3 + 16,340 \cdot 10^3 = 50,13 \text{ kA} \quad (2.78)$$

$$S''_{K3_min} = \sqrt{3} \cdot U_{n(0,4)} \cdot I''_{KC3_min} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 50,13 \cdot 10^3 = 34,731 \text{ MVA} \quad (2.79)$$

2.22 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 3 – Síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC3_2fmax} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC3_max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 61,27 \cdot 10^3 = 53,06 \text{ kA} \quad (2.80)$$

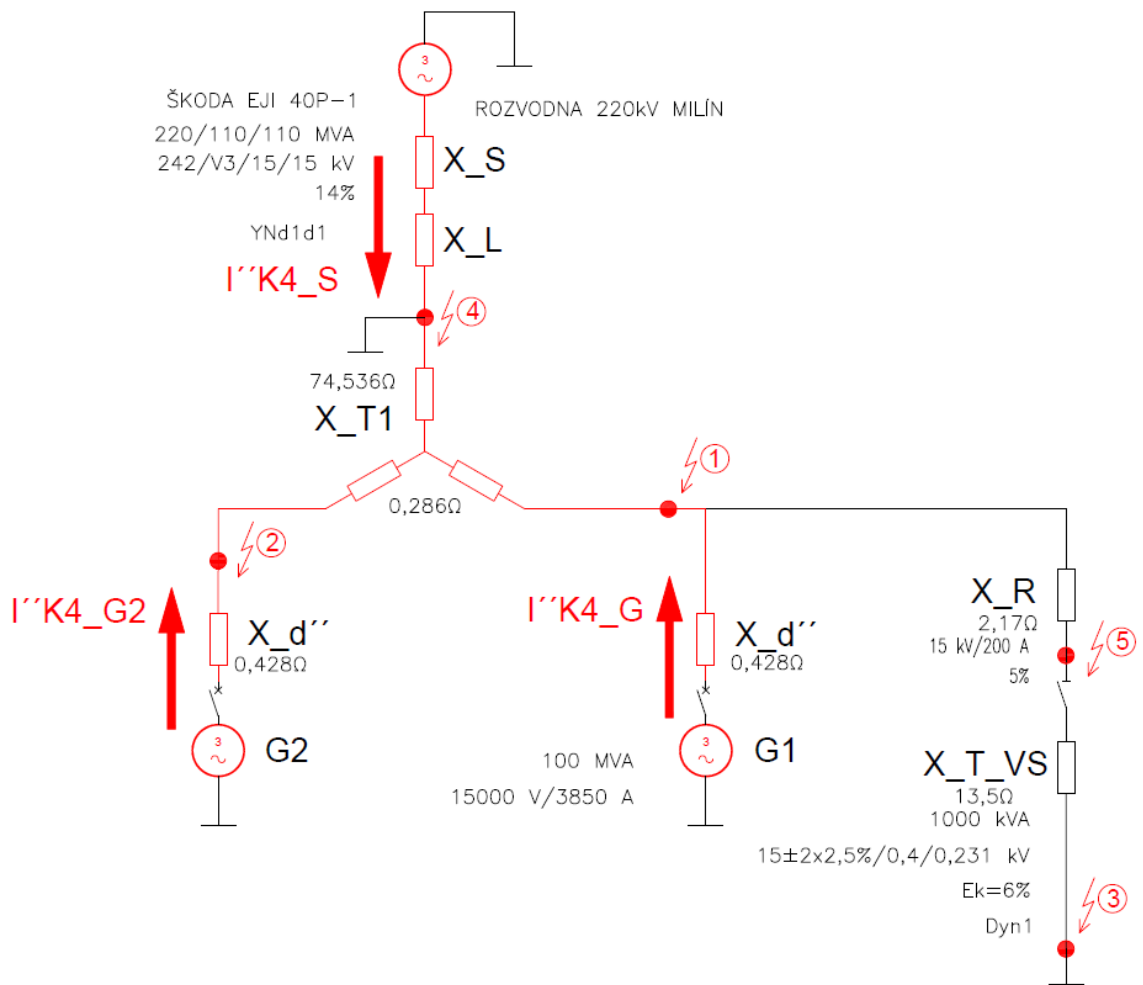
$$S''_{K3_2fmax} = \sqrt{3} \cdot U_{n(0,4)} \cdot I''_{KC3_2fmax} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 53,06 \cdot 10^3 = 36,761 \text{ MVA} \quad (2.81)$$

2.23 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 3 – Síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC3_2fmin} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC3_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 50,13 \cdot 10^3 = 43,414 \text{ kA} \quad (2.82)$$

$$S''_{K3_2fmin} = \sqrt{3} \cdot U_{n(0,4)} \cdot I''_{KC3_2fmin} = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 43,414 \cdot 10^3 = 30,000 \text{ MVA} \quad (2.83)$$

2.24 Zkrat v bodě 4 – příspěvek sítě



Obr. náhradní schéma zkratu v bodě 4

2.24.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$X_{S_max(220)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k''_max}} = \frac{1,1 \cdot 220^2}{2893} = 18,403 \Omega \quad (2.84)$$

$$X_{L(220)} \cong Z_L = 0,70 + j4,16 \Omega = 4,2 \Omega \text{ při zanedbání činného odporu} \quad (2.85)$$

$$I''_{K4_SCmax(220)} = \frac{c \cdot \frac{U_{n(220)}}{\sqrt{3}}}{X_{S_max(220)} + X_{L(220)}} = \frac{1,1 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{18,403 + 4,2} = 6,181 \text{ kA} \quad (2.86)$$

2.24.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

$$X_{S_min(220)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{k''_min}} = \frac{1 \cdot 220^2}{2215} = 21,851 \Omega \quad (2.87)$$

$$X_{L(220)} \cong Z_L = 0,70 + j4,16 \Omega = 4,2 \Omega \text{ při zanedbání činného odporu} \quad (2.88)$$

$$I''_{K4_SCmin(220)} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC_min} + X_{L(220)}} = \frac{1 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{21,851 + 4,2} = 4,876 \text{ kA} \quad (2.89)$$

2.25 Zkrat v bodě 4 – příspěvek generátoru 1

$$X_{G(15)} = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \, \Omega \quad (2.90)$$

$$X_{G(220)} = X_{G(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(220)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,428 \cdot \left(\frac{220}{15}\right)^2 = 92,068 \, \Omega \quad (2.91)$$

Pro převod trafů 15/242 kV uvažujeme $U_k = 14 \%$ a výkon 110 MVA.

$$X_{T1(220)} = u_k \cdot \frac{U_{n(220)}^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{220^2}{110} = 61,6 \, \Omega \quad (2.92)$$

2.25.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K4_Gmax} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(220)}}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(220)} + X_{G(220)})} = \frac{1,1 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{(61,6 + 92,068)} = 0,909 \, \text{kA} \approx 1,7 I_{nT1} \quad (2.93)$$

2.25.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K4_Gmin} = \frac{c_2 \cdot \frac{U_{n(220)}}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(220)} + X_{G(220)})} = \frac{1,0 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{(61,6 + 92,068)} = 0,827 \, \text{kA} \approx 1,6 I_{nT1} \quad (2.94)$$

2.26 Zkrat v bodě 4 – příspěvek generátoru 2

$$X_{G(15)} = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \, \Omega \quad (2.95)$$

$$X_{G(220)} = X_{G(15)} \cdot \left(\frac{U_{n(220)}}{U_{n(15)}}\right)^2 = 0,428 \cdot \left(\frac{220}{15}\right)^2 = 92,07 \, \Omega \quad (2.96)$$

Pro převod trafů 15/242 kV uvažujeme $U_k = 14 \%$ a výkon 110 MVA.

$$X_{T1(220)} = u_k \cdot \frac{U_{n(220)}^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{220^2}{110} = 61,6 \, \Omega \quad (2.97)$$

2.26.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K4_G2max} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(220)}}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(220)} + X_{G(220)})} = \frac{1,1 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{(61,6 + 92,07)} = 0,909 \, \text{kA} \approx 1,7 I_{nT1} \quad (2.98)$$

2.26.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1,0$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K4_G2min} = \frac{c_2 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(220)} + X_{G(220)})} = \frac{1,0 \cdot \frac{220000}{\sqrt{3}}}{(61,6 + 92,068)} = 0,827 \, \text{kA} \approx 1,6 I_{nT1} \quad (2.99)$$

2.27 Výpočet 1f zkratového proudu – příspěvek sítě

1 fázový zkratový výkon v síti 220 kV $S_{k''(1)} = 2537$ MVA

Parametry vedení o délce $l=8,92$ km:

$$Z_{L1} = 0,70 + j4,16 \Omega \rightarrow |Z_{L1}| = \sqrt{0,7^2 + 4,16^2} = 4,22 \Omega \quad (2.100)$$

$$Z_{L0} = 3,73 + j10,47 \Omega \rightarrow |Z_{L0}| = \sqrt{3,73^2 + 10,47^2} = 11,12 \Omega \quad (2.101)$$

Zpětná impedanční složka se pro počáteční rázový zkratový proud uvažuje stejně velká jako sousledná.

Poměr netočivé a sousledné impedance sítě lze odhadnout z udaných zkratových výkonů následovně:

$$\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}} \cong \frac{S''_{k1f}}{S''_{k3f}} \rightarrow \frac{Z_{S0}}{Z_{S1_max(220)}} \cong \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_max(220)}} \text{ nebo } \frac{Z_{S0}}{Z_{S1_min(220)}} \cong \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_min(220)}} \quad (2.102)$$

2.27.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$Z_{S_max(220)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S''_{k_max(220)}} = \frac{1,1 \cdot 220^2}{2893} = 18,40 \Omega \quad (2.103)$$

$$I''_{K4_1fmax(220)} = \frac{c \cdot U_n \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot \left[Z_{S_max(220)} \cdot \left(2 + \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_max(220)}} \right) + Z_L \cdot \left(2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} \right) \right]} = \frac{1,1 \cdot 220 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot \left[18,40 \cdot \left(2 + \frac{2537}{2893} \right) + 4,22 \cdot \left(2 + \frac{11,12}{4,22} \right) \right]} = 5,782 \text{ kA} \quad (2.104)$$

2.27.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

$$Z_{S_min(220)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S''_{k_min(220)}} = \frac{1 \cdot 220^2}{2215} = 21,85 \Omega \quad (2.105)$$

$$I''_{K4_1fmin(220)} = \frac{c \cdot U_n \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot \left[Z_{S_min(220)} \cdot \left(2 + \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_min(220)}} \right) + Z_L \cdot \left(2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} \right) \right]} = \frac{1 \cdot 220 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot \left[21,85 \cdot \left(2 + \frac{2537}{2215} \right) + 4,22 \cdot \left(2 + \frac{11,12}{4,22} \right) \right]} = 4,316 \text{ kA} \quad (2.106)$$

2.28 Výpočet 1f zkratového proudu – příspěvek generátorů

Při zkratu přímo na vývodu generátoru, nemůže distanční ochrana vzhledem k jejímu umístění detekovat příspěvek generátorů. V případě zkratu na vývodu transformátoru příspěvek generátoru měří generátorové ochrany a proud je tedy relevantní pro distanční ochranu generátoru. Pro tu se jednofázový zkrat na VVN straně projeví jako dvoufázový a podle manuálu od výrobce Siemens vyhodnotí ochrana jeho vzdálenost chybně. Z tohoto důvodu nepovažuji výpočet příspěvku za nutný.

2.29 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 4 – síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC4_max} = I''_{K4_SCmax(220)} + I''_{K4_Gmax} + I''_{K4_G2max} =$$

$$= 6,181 \cdot 10^3 + 0,909 \cdot 10^3 + 0,909 \cdot 10^3 = 7,999 \text{ kA} \quad (2.107)$$

$$S''_{K4_max} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC4_max} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 7,999 \cdot 10^3 =$$

$$= 3048,028 \text{ MVA} \quad (2.108)$$

2.30 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 4 – síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC4_min} = I''_{K4_Smin} + I''_{K4_Gmin} + I''_{K4_G2min} =$$

$$= 4,876 \cdot 10^3 + 0,827 \cdot 10^3 + 0,827 \cdot 10^3 = 6,530 \text{ kA} \quad (2.109)$$

$$S''_{K4_min} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC_min} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 6,530 \cdot 10^3 = 2488,264 \text{ MVA} \quad (2.110)$$

2.31 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 4 – Síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC4_2fmax} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC4_max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,999 \cdot 10^3 = 6,927 \text{ kA} \quad (2.111)$$

$$S''_{K4_2fmax} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC4_2fmax} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 6,927 \cdot 10^3 =$$

$$= 2639,542 \text{ MVA} \quad (2.112)$$

2.32 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 4 – Síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC4_2fmin} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC4_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6,530 \cdot 10^3 = 5,655 \text{ kA} \quad (2.113)$$

$$S''_{K4_2fmin} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC4_2fmin} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 5,655 \cdot 10^3 =$$

$$= 2154,900 \text{ MVA} \quad (2.114)$$

2.33 Celkový 2f zemní zkratový proud v bodě 4

Vzhledem k tomu, že hodnota netočivé složky blokového transformátoru se neudává a není možné ji získat ani u výrobce, bude pro výpočet 2f zemního zkratu poměr sousledné a zpětné složky odhadnut ze zkratových výkonů sítě. [11]

$$I''_{KC4_2fzem} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{\left(1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}}} \cdot I''_{KC4} \quad (2.115)$$

Poměr Z_{S0}/X_{S1} se může pohybovat v širokých mezích téměř od 0 do nekonečna. Při hodnotách blízcích se nule získáme rovnici: [11]

$$I''_{K_2fzem} = \sqrt{3} \cdot I''_{KC4} \quad (2.116)$$

V případě, že by se poměr Z_{S0}/X_{S1} blížil nekonečnu, tak dostaneme rovnici: (11)

$$I''_{K_2fzem} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC4} \quad (2.117)$$

Poměr netočivé a sousledné impedance sítě lze odhadnout z udaných zkratových výkonů následovně: [11]

$$\begin{aligned} \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}} \cong \frac{S''_{k1f}}{S''_{k3f}} \rightarrow \frac{Z_{S0}}{Z_{S1_max(220)}} \cong \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_max(220)}} \text{ nebo } \frac{Z_{S0}}{Z_{S1_min(220)}} \cong \\ \cong \frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_min(220)}} \end{aligned} \quad (2.118)$$

2.33.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$\frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_max(220)}} = \frac{2537}{2893} = 0,877 \quad (2.119)$$

$$I''_{KC4_2fzem_max} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{\left(1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}}} \cdot I''_{KC4} = \quad (2.120)$$

$$= \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,877}{(1 + 0,877)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{0,877}{1 + 0,877}}} \cdot 7,999 \cdot 10^3 = 8,183 \text{ kA}$$

$$S''_{KC4_2fzem_max} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC4_2fzem_max} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 8,183 \cdot 10^3 = 3118,1418 \text{ MVA} \quad (2.121)$$

2.33.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

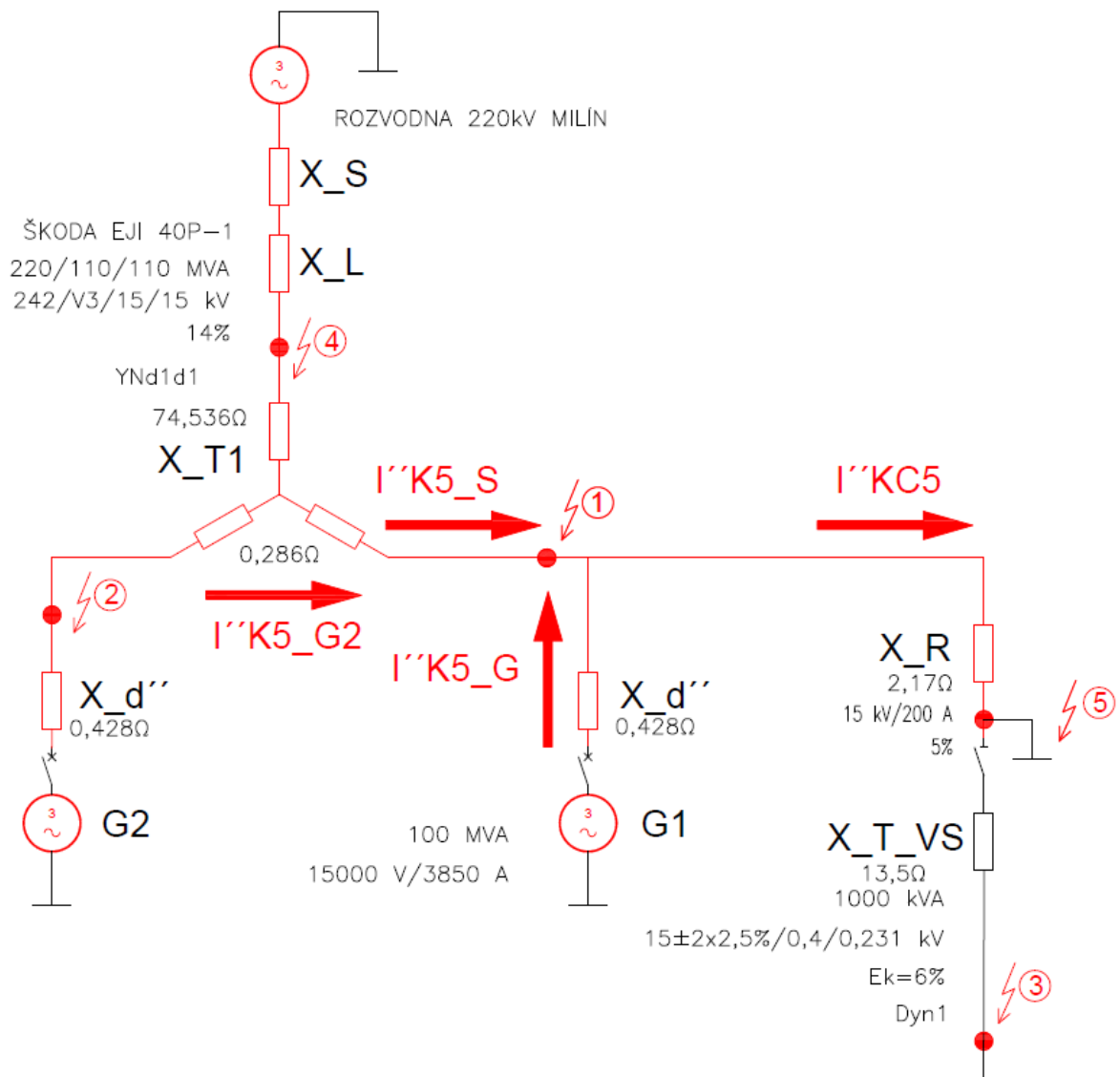
$$\frac{S''_{k1f(220)}}{S''_{k3f_min(220)}} = \frac{2537}{2215} = 1,145 \quad (2.122)$$

$$I''_{KC4_2fzem_min} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{\left(1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}{1 + \frac{Z_{S0}}{Z_{S1}}}}} \cdot I''_{KC4} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{1,145}{(1 + 1,145)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,145}{1 + 1,145}}} \cdot 7,999 \cdot 10^3 = 5,598 \text{ kA} \quad (2.123)$$

$$S''_{KC4_2fzem_min} = \sqrt{3} \cdot U_{n(220)} \cdot I''_{KC4_2fzem_min} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 5,598 \cdot 10^3 = 2133,1245 \text{ MVA} \quad (2.124)$$

2.34 Zkrat v bodě 5 – příspěvek generátoru 1



Obr. Náhradní schéma zkratu v bodě 5

$$X_{G(15)} = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega - \text{podle výpočtu v bodě 1} \quad (2.125)$$

$$X_{R(15)} = u_k \cdot Z_N = u_k \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = 0,05 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 200} = 2,17 \Omega \quad (2.126)$$

2.34.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K5_Gmax} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(15)}}{\sqrt{3}}}{(X_{G(15)} + X_{R(15)})} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,428 + 2,17)} = 3,667 \text{ kA} \approx 0,95 I_{nG} \quad (2.127)$$

2.34.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K5_Gmin} = \frac{c_1 \cdot \frac{U_{n(15)}}{\sqrt{3}}}{(X_{G(15)} + X_{R(15)})} = \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,428 + 2,17)} = 3,333 \text{ kA} \approx 0,87 I_{nG} \quad (2.128)$$

2.35 Zkrat v bodě 5 – příspěvek generátoru 2

$$X_{G(15)} = x_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,19 \cdot \frac{15^2}{100} = 0,428 \Omega - \text{podle výpočtu v bodě 1} \quad (2.129)$$

$U_k=28\%$ - Pro výpočet impedance pro převod transformátoru 15/15 kV

$$X_{T1(15)} = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,28 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,573 \Omega \quad (2.130)$$

$$X_{R(15)} = u_k \cdot Z_N = u_k \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = 0,05 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 200} = 2,17 \Omega \quad (2.131)$$

2.35.1 Při uvažování max. zkratového proudu

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$\begin{aligned} I''_{K5_G2max} &= \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(15)} + X_{G(15)} + X_{R(15)})} = \\ &= \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428 + 2,17)} = 3,004 \text{ kA} \approx 0,78 I_{nG} \end{aligned} \quad (2.132)$$

2.35.2 Při uvažování min. zkratového proudu

$c=1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$\begin{aligned} I''_{K5_G2min} &= \frac{c_1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{(X_{T1(15)} + X_{G(15)} + X_{R(15)})} = \\ &= \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{(0,573 + 0,428 + 2,17)} = 2,731 \text{ kA} \approx 0,71 I_{nG} \end{aligned} \quad (2.133)$$

2.36 Zkrat v bodě 5 – příspěvek sítě

2.36.1 Při uvažování max. zkratového výkonu sítě

$$X_{T1(15)} = u_K \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{15^2}{110} = 0,286 \Omega \quad (2.134)$$

Uvažujeme zkrat na hladině $U_n = 15 \text{ kV}$

$$X_{S_{\max}(15)} = 0,086 \Omega \text{ - z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.135)$$

$$X_{L(15)} = 0,020 \Omega \text{ - z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.136)$$

$$X_{R(15)} = u_K \cdot Z_N = u_K \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = 0,05 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 200} = 2,17 \Omega \quad (2.137)$$

$$X_{SC_{\max}} = X_{S_{\max}(15)} + X_{L(15)} + X_{T1(15)} + X_{R(15)} = \\ = 0,086 \cdot 10^{-3} + 0,020 \Omega + 0,286 + 2,17 = 2,476 \Omega \quad (2.138)$$

$c=1,1$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro max. zkratový proud

$$I''_{K5_{SC_{\max}}} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC_{\max}}} = \frac{1,1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{2,476} = 3,848 \text{ kA} \approx 1,6 I_{nT1} \quad (2.139)$$

2.36.2 Při uvažování min. zkratového výkonu sítě

Uvažujeme zkrat na hladině $U_n = 15 \text{ kV}$

$$X_{S_{\min}(15)} = 0,102 \Omega \text{ - z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.140)$$

$$X_{L(15)} = 0,020 \Omega \text{ - z výpočtu pro zkrat v bodě 1} \quad (2.141)$$

$$X_{SC_{\min}} = X_{S_{\min}(15)} + X_{L(15)} + X_{T1(15)} + X_{R(15)} = \\ = 0,102 + 0,02 + 0,286 + 2,17 = 2,578 \Omega \quad (2.142)$$

$c=0,9$ podle normy ČSN EN 60909-0 pro min. zkratový proud

$$I''_{K5_{SC_{\min}}} = \frac{c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{SC_{\min}}} = \frac{1 \cdot \frac{15000}{\sqrt{3}}}{2,578} = 3,359 \text{ kA} \approx 1,4 I_{nT1} \quad (2.143)$$

2.37 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 5 – síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC5_{\max}} = I''_{K5_{SC_{\max}}} + I''_{K5_{G_{\max}}} + I''_{K5_{G2_{\max}}} = \\ = 3,359 \cdot 10^3 + 3,667 \cdot 10^3 + 3,004 \cdot 10^3 = 10,030 \text{ kA} \quad (2.144)$$

$$S''_{K5_{\max}} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC5_{\max}} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 10,030 \cdot 10^3 = 260,595 \text{ MVA} \quad (2.145)$$

2.38 Celkový 3f zkratový proud a výkon v bodě 5 – síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC5_{\min}} = I''_{K5_{SC_{\min}}} + I''_{K5_{G_{\min}}} + I''_{K5_{G2_{\min}}} = \\ = 3,359 \cdot 10^3 + 3,333 \cdot 10^3 + 2,731 \cdot 10^3 = 9,423 \text{ kA} \quad (2.146)$$

$$S''_{K5_{\min}} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC5_{\min}} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 9,423 \cdot 10^3 = 244,817 \text{ MVA} \quad (2.147)$$

2.39 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 5 – Síť max. zkratový výkon

$$I''_{KC5_{2f_{\max}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC5_{\max}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 10,030 \cdot 10^3 = 8,687 \text{ kA} \quad (2.148)$$

$$S''_{K5_{2f_{\max}}} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC5_{2f_{\max}}} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 8,687 \cdot 10^3 = \\ = 225,675 \text{ MVA} \quad (2.149)$$

2.40 Celkový 2f zkratový proud a výkon v bodě 5 – Síť min. zkratový výkon

$$I''_{KC5_2fmin} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{KC5_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 9,423 \cdot 10^3 = 8,161 \text{ kA} \quad (2.150)$$

$$S''_{KC5_2fmin} = \sqrt{3} \cdot U_{n(15)} \cdot I''_{KC5_2fmin} = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 8,161 \cdot 10^3 = 212,018 \text{ MVA} \quad (2.151)$$

2.41 Přehled výsledků

2.41.1 Výsledky pro 3f zkrat

Tab. 8 - Přehled vypočítaných hodnot pro 3f zkraty

	Příspěvek generátoru 1 I''k(kA)		Příspěvek generátoru 2 I''k(kA)		Příspěvek sítě I''k(kA)		Příspěvek sítě + generátorů I''k(kA)		Zkratový výkon (MVA)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Zkrat1	20,234	22,26	8,652	9,517	21,226	24,30	50,112	56,077	1301,95	1456,923
Zkrat2	8,652	9,517	20,234	22,26	21,226	24,30	50,112	56,077	1301,95	1456,923
Zkrat3	16,893	20,647	16,340	19,971	16,898	20,653	50,13	61,27	34,731	42,449
Zkrat4	0,827	0,909	0,827	0,909	4,876	6,181	6,530	7,999	2488,264	3048,028
Zkrat5	3,333	3,667	2,731	3,004	3,359	3,848	9,423	10,03	244,817	260,595

2.41.2 Výsledky pro 2f zkrat

Tab. 9 - Přehled vypočítaných hodnot pro 2f zkraty

	Příspěvek sítě + generátorů I''k (kA)		Zkratový výkon (MVA)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Zkrat1	43,398	48,564	1127,513	1261,730
Zkrat2	43,398	48,564	1127,513	1261,730
Zkrat3	43,414	53,06	34,731	36,761
Zkrat4	5,655	6,927	2154,900	2639,542
Zkrat5	8,161	8,687	212,018	225,675

2.41.3 Výsledky pro 2f zemní zkrat

Tab. 10 - Přehled vypočítaných hodnot pro 2f zemní zkraty

	Příspěvek sítě + generátorů I''k (kA)		Zkratový výkon (MVA)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Zkrat4	5,598	8,183	2133,1245	3118,1418

2.41.4 Výsledky pro 1f zkrat v bodě 4

Tab. 11 - Přehled vypočítaných hodnot pro 1f zkraty

	Příspěvek sítě I''k (kA)		Zkratový výkon (MVA)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Zkrat4	4,316	5,782	2537	2537

3 Návrh osazení ochranami

Návrh je podle normy ČSN 33 3051.

Zapojení ochran viz. výkres v příloze.

3.1 Ochrany generátoru

3.1.1 Diferenciální ochrana generátoru

3.1.1.1 Přehled funkcí

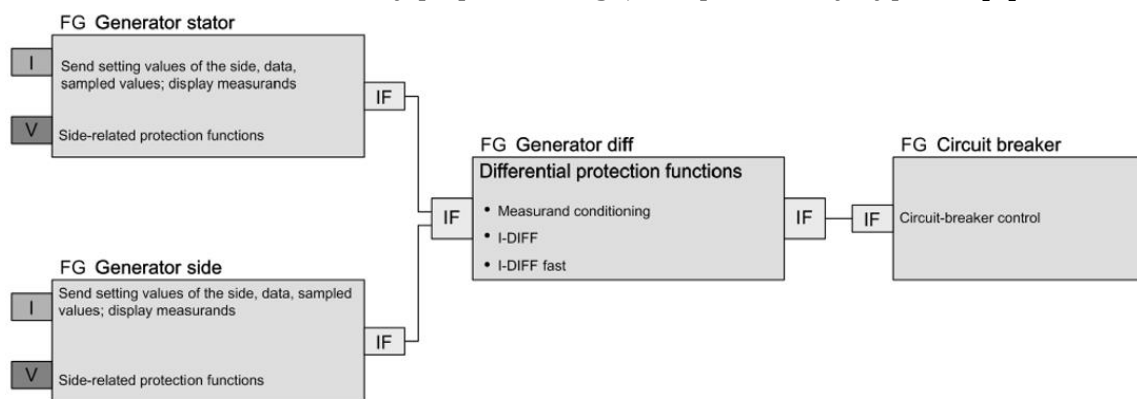
Detekuje zkrat v generátorech a zemní poruchy v generátorech s uzemněným uzlem.

Reaguje bezchybně i v případě vnějšího zkratu a nasycení proudového transformátoru.

Zareaguje v případě vnitřních poruchových proudů, nadproudů a vysokých zkratových proudů. [8]

3.1.1.2 Struktura funkce

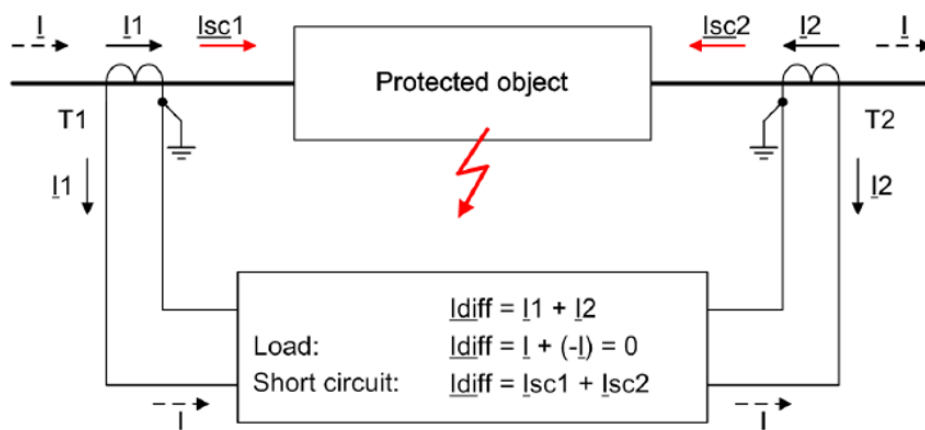
Funkce diferenciální ochrany generátoru je použita ve funkční skupině „Generátor diff“. Funkce závisí na zvolené šabloně konfigurované výrobcem. Funkce se skládá podle Obr. 4 z vypínacích stupňů „Idiff“ a „Idiff fast“. Ve funkčních skupinách „Generator side“ a „Generator stator“ proběhnou výpočty a ty se následně vyhodnocují v bloku „Generator Diff“, který případně reaguje na přidružený vypínač. [8]



Obr. 4 - Struktura rozdílové ochrany [8]

3.1.1.3 Základní princip diferenciální ochrany

Diferenciální ochrana je založena na porovnání proudů (podle Kirchhoffova zákona). Při porovnání proudů je využito faktu, že chráněným objektem protéká stejný proud v provozním stavu na obou stranách objektu podle Obr 5. Proud teče přes první měřící bod do chráněného objektu a na druhé straně objektu je proud opět detekován v druhém měřícím bodu. Rozdíl proudu je jistou známkou poruchy v chráněném objektu. [8]



Obr. 5 - Princip rozdílové ochrany [8]

Směr proudu pro chráněný objekt je definovaný kladně. Výsledný rozdíl proudu je dán součtem vektorů proudů. [8]

3.1.1.3.1 Funkce rozdílové ochrany I_{diff}

Rozdílový fázový proud je založený na okamžitých hodnotách proměnných, vypočítaných ze zpracovaných hodnot proudů. Základní složka, která přispívá k rozdílovému proudu (I_{diff}), se vypočte pomocí Fourierova filtru (délka filtru=1perioda (20 vzorků)). [8]

3.1.1.3.2 Doporučené nastavení

Obr. 6 zobrazuje charakteristiku diferenciální ochrany. Charakteristická křivka „a“ představuje prahovou hodnotu citlivosti diferenciální ochrany (parametr „Threshold“) a uvažuje konstantní poruchové proudy, jako jsou magnetizační proudy. Doporučená hodnota pro „Threshold“ je 0,2.

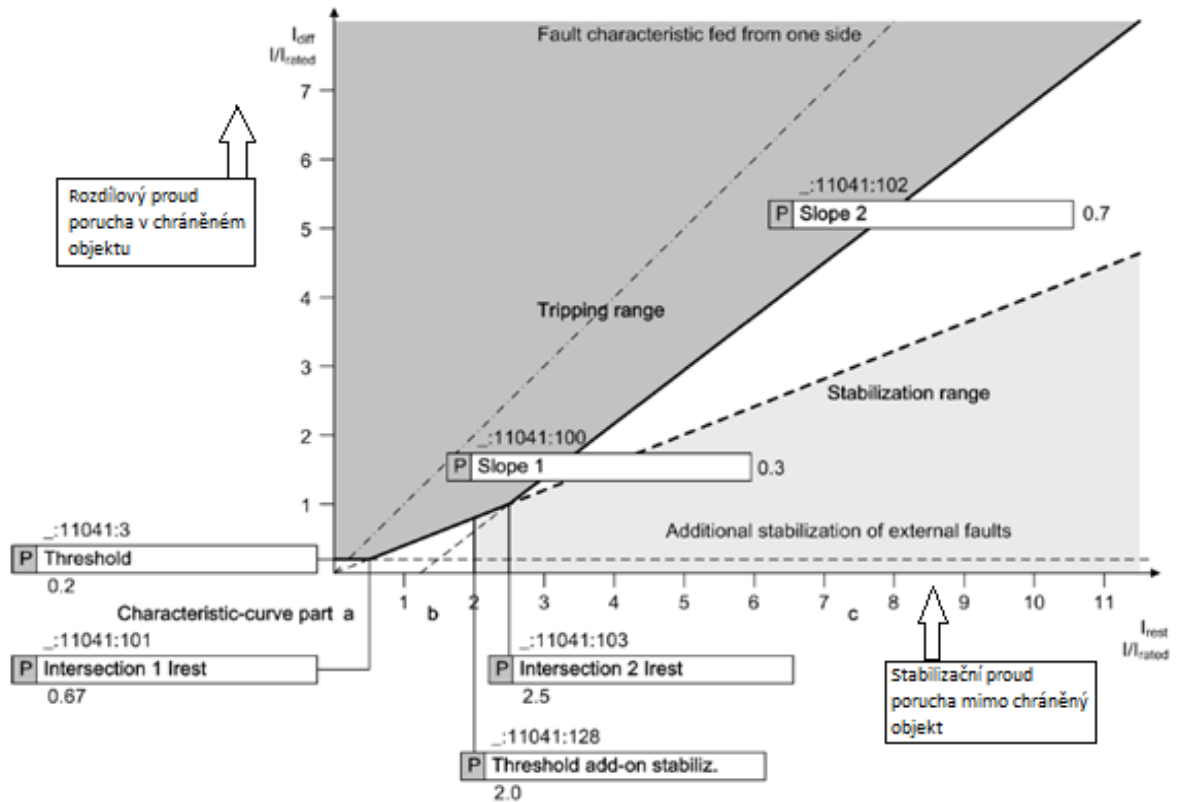
Charakteristická křivka „b“ (parametr „Intersection 1 I_{rest} “ a sklon „Slope1“) respektuje odchylky při normálních provozních podmínkách. Doporučená hodnota pro „Slope1“ je 0,3. Tyto odchylky mohou nastat chybou převodu transformátoru proudu a vstupního transformátoru zařízení.

V oblasti charakteristické křivky „c“ (parametr „Intersection 2 I_{rest} “ a sklon „Slope2“) dochází k eliminaci falešného působení vlivem chyby přesycení přístrojového transformátoru proudu. Doporučená hodnota pro „Slope2“ je 0,7. V této oblasti může vzniknout saturace transformátorů v důsledku vysokých zkratových proudů, a proto je vyšší výsledný rozdíl proudu.

Aby se zabránilo zbytečnému působení v případě nasycení transformátoru vlivem vnějších poruch, je implementována logika, která používá charakteristickou křivku pro dodatečnou stabilizaci externích poruch. Pokud se provozní bod nachází v dodatečné stabilizační oblasti a překročí provozní křivku, pak se logika aktivuje a blokuje diferenciální ochranu. Dodatečný stabilizační rozsah je odvozen od parametrů „Threshold add-on stabiliz.“ a sklon „Slope 1“. [8]

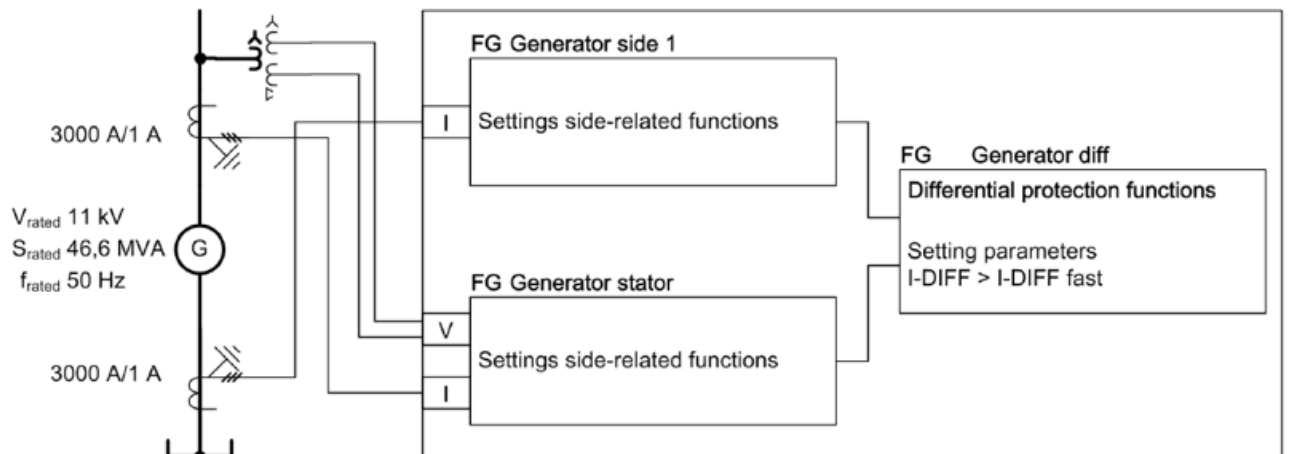
$$\text{Stabilizační proud: } I_{stab} = |I_1| + |I_2| \quad (3.1)$$

$$\text{Rozdílový (poruchový) proud: } I_{diff} = |I_1 + I_2| \quad (3.2)$$



Obr. 6 - Charakteristika rozdílové ochrany [8]

Pokud diferenciální proud vynásobený vypínacím poměrem 0,7 nedosáhne dané charakteristiky „Slope 2“, ochrana nezareaguje. [8]



Obr. 7 - Schéma zapojení rozdílové ochrany [8]

3.1.2 Zemní ochrana statoru 90%

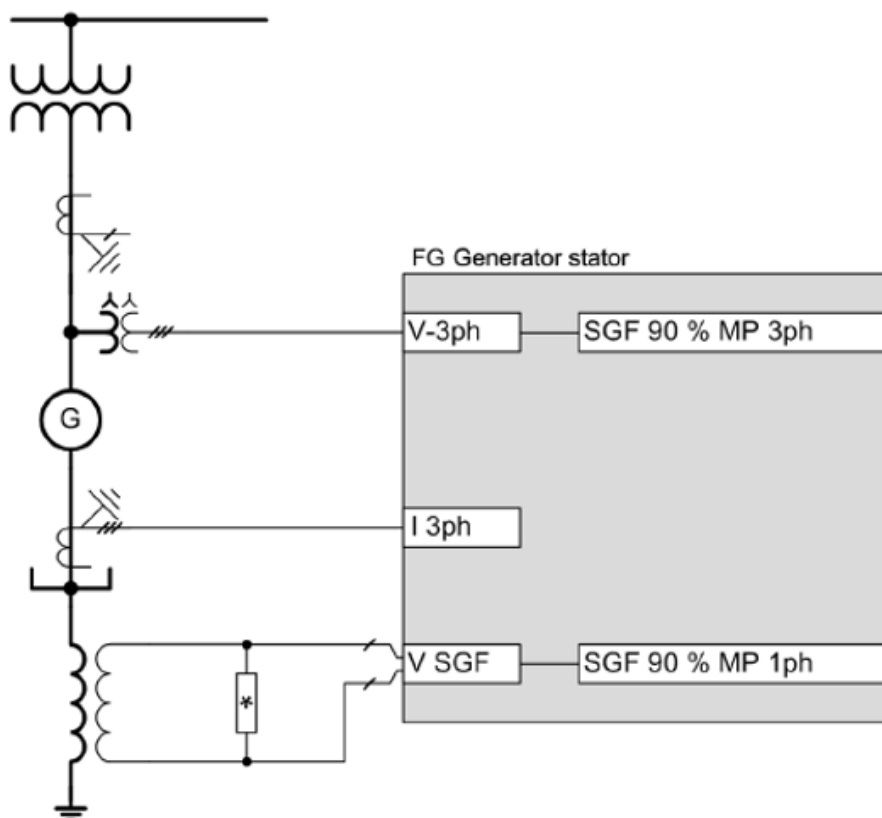
3.1.2.1 Přehled funkcí

Detekuje zemní poruchy ve statoru generátorů a motorů. Lze ji použít i pro připojená zařízení a přípojnice. Vyhodnotí netočivou složku, která je vypočítána z fázového napětí a zemní proud připojených zařízení. Případně pro zjištěné netočivé složky je možné použít transformátor s nulovým bodem nebo otevřeným trojúhelníkem. [8]

Vyhodnocuje:

- Zbytkové napětí - netočivá napěťová složka V_0
- Zemní proud - netočivá proudová složka $3I_0$. Zemní ochrana statoru dosahuje 80 % až 95 % v závislosti na konstrukci zařízení.

c) S přesným měřením fázového proudu je možné také vyhodnocovat 1 fázový proud v neutrálním bodu generátoru V SGF. [8]



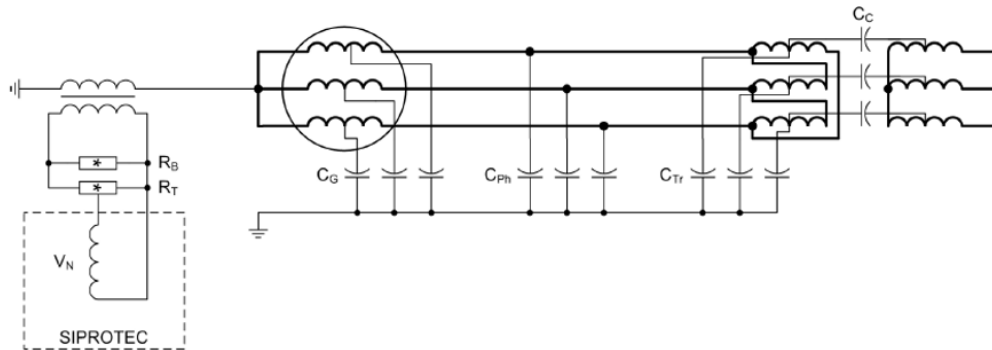
Obr. 8 - Schéma zapojení zemní ochrany statoru 90% [8]

3.1.2.1.1 Detekce zániku poruchy

Zánik poruchy se vyznačuje tím, že napětí netočivé složky klesá. Záleží na podmínkách v systému a charakteristice poruchy. Tento proces může trvat několik set ms. Pokud napětí nepřetržitě klesá, je porucha považována za odstraněnou. Existuje tedy například možnost blokování měřením fázového posunu φ , aby se předešlo nadměrnému působení při velmi citlivém nastavení. [8]

3.1.2.1.2 Nesměrová zemní ochrana pomocí netočivé složky napětí

Netočivá složka se vypočítá z fázových napětí U_a, U_b, U_c . Vyhodnotí se napětí netočivé složky na přístrojovém transformátoru napětí, postačuje transformátor s nulovým bodem, případně s otevřeným trojúhelníkem nebo se vyhodnotí napětí v neutrálním bodu generátoru pomocí citlivého transformátoru. [8]



Obr. 9 - Schéma měření netočivé složky napětí [8]

3.1.2.2 Doporučené nastavení

Porovná se nastavené prahové napětí s naměřenou netočivou napěťovou složkou U_0 , která se vypočítá z měřených napětí. Parametr zpoždění reakce umožňuje odložit spuštění ochrany v závislosti na netočivé napěťové složce.

Doporučené nastavení:

Zpožděná reakce vypínacího stupně $t = 0,3$ s

Při návrhu 90 % ochrany statoru je doporučena 10% hodnota prahového napětí.

V případě, že detekujeme napětí z třífázového přístrojového transformátoru zapojeného do hvězdy, je doporučené prahové napětí U_p :

$$U_{p10\%} = 0,1 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 0,1 \cdot \frac{100}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ V}$$

V případě, že detekujeme napětí z třífázového přístrojového transformátoru s otevřeným trojúhelníkem, je doporučené prahové napětí U_p :

$$U_{p10\%} = 0,1 \cdot U_N = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ V [8]}$$

3.1.3 Zemní ochrana statoru 100%

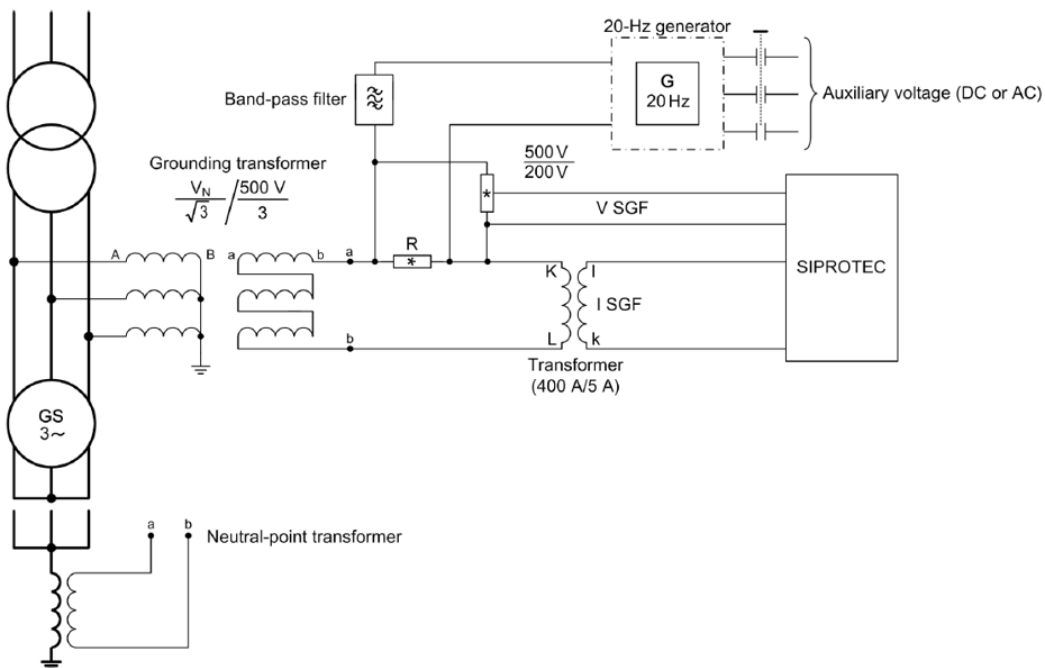
3.1.3.1 Přehled funkcí

Vyhodnocuje odpor pomocí injektovaného obdélníkového napětí 20 Hz přes zemnicí bod generátoru. Potřebná externí zařízení pro vyhodnocení zemní ochrany:

- generátor 20 Hz
- pásmový filtr 20 Hz
- Zemní transformátor 500 V a převodní proudový transformátor 400 A/5 A

Dále detekuje zemní poruchy ve vinutí statoru generátorů pomocí generátoru referenčního napětí a pásmové propusti, které jsou připojeny k vinutí statoru a zemnímu transformátoru v uzlu generátoru nebo v otevřeném trojúhelníku generátoru. Vyhodnocuje zemní poruchy v celém rozsahu vinutí (100 %) včetně nulového bodu stroje. Princip měření není ovlivněn provozním režimem generátoru (velké nebo malé zatížení). Funkce také umožňuje měření při odstaveném generátoru.

Je základní ochrannou funkcí pro středně velké a velké generátory, protože může detekovat chyby v generátorech s neúčinně uzemněným uzlem. Funguje v rozsahu frekvencí 40-70 Hz a v klidovém režimu stroje. [8]



Obr. 10 - Schéma zapojení zemní ochrany statoru 100 % [8]

3.1.3.2 Struktura funkce

Ochrana je řešena pomocí dvěma odporovými stupni, které určují odolnost proti poruchám. Mohou být rozděleny jako výstražný a vypínací stupeň. [8]

3.1.3.3 Doporučené nastavení

Měřicí napětí max. 200 V

Měřicí frekvence max. 20 Hz

Nastavená hodnota odporu pro vypínací stupeň od 1 k Ω do 2 k Ω a $t = 1$ s.

Nastavená hodnota odporu pro upozorňující stupeň od 3 k Ω do 8 k Ω a $t = 10$ s. [8]

3.1.4 Zemní ochrana rotoru

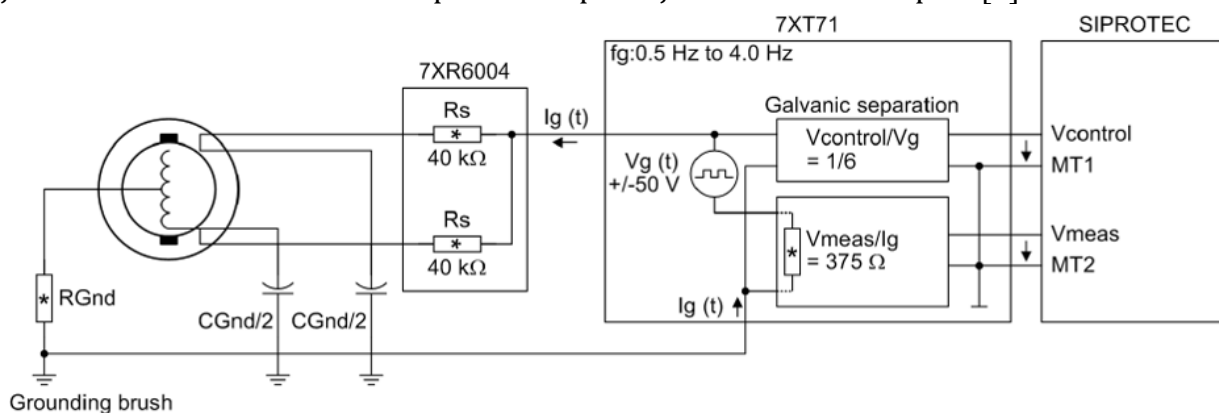
3.1.4.1 Přehled funkcí

Monitoruje zemní spojení rotoru synchronních strojů (generátor, motor) a asynchronních strojů, pokud je rotor přístupný pomocí kluzného kroužku. Reaguje na poruchu pomocí výstražného a vypínacího stupně. Detekuje poruchy pomocí injektovaného nízkofrekvenčního napětí o obdélníkovém tvaru. Vyznačuje se vysokým rozsahem až 80 k Ω . Není citlivá na rušení buzením. Pro měření je potřeba zdroj injektovaného napětí a sériový rezistor. [8]

Zemní porucha v budícím vinutí neznamená okamžité poškození. Dojde-li však ještě k druhé zemní poruše, dojde ke zkratu můstku buzení, magnetické nesymetrii se značnými mechanickými silami a rázy, které mohou vést k poškození stroje. [8]

3.1.4.2 Struktura funkce

Funkce zemní ochrana rotoru (1-3Hz) se používá v 1 fázových funkčních skupinách. Funkce je ve výchozím nastavení se dvěma odporovými stupni. V rámci jedné funkce lze ovládat až 4 odporové stupně a jeden testovací stupeň. [8]



Obr. 11 - Schéma zapojení zemní ochrany rotoru [8]

3.1.4.3 Doporučené nastavení

Výrobce Siemens doporučuje nastavení vypínacího stupně na hodnotu 2-5 kΩ a výstražného stupně od 10-80 kΩ. Typické nastavení pro výstražný stupeň je 10 kΩ. Doba zpoždění pro výstražný stupeň je doporučena od 5-10 s. Pro vypínací stupeň je doporučeno 0,5-2 s. Při použití nižší frekvence musí být doba zpoždění větší. Například pro 1 Hz je doporučeno zpoždění 1,5 s. [8]

3.1.5 Impedanční (distanční) ochrana

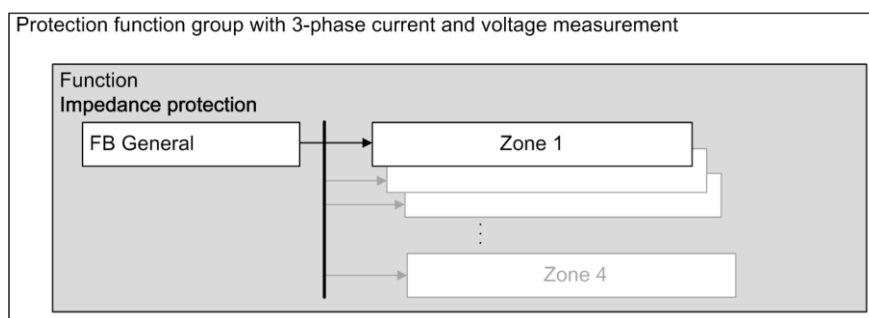
3.1.5.1 Přehled funkcí

Zajišťuje ochranu pro transformátory a generátory. Slouží jako záložní ochrana v případě zpětného toku energie při poruchách elektrického systému za transformátorem. [8]

3.1.5.2 Struktura funkce

Funkce „Impedanční ochrana“ se používá v ochranných funkčních skupinách, které vychází z měření proudu a napětí.

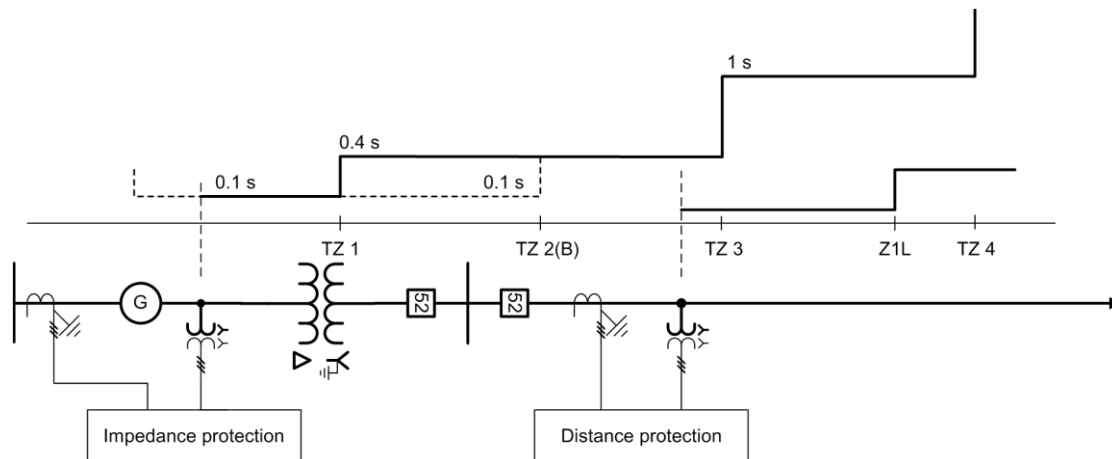
Funkce „Impedanční ochrana“ je přednastavena funkčním blokem „General“ a jednou zónou. Ve funkci lze ovládat současně maximálně 4 zóny. Zóny jsou strukturovány identicky. [8]



Obr. 12 - Struktura impedanční funkce [8]

3.1.5.3 Doporučené nastavení

Následující Obr. 13 ukazuje příklad použití impedanční ochrany pro ochranu generátoru. Pokud se požaduje implementovat spolehlivou záložní ochranu pro generátor nebo jinou část elektrárny, je pro měření proudu použit citlivý proudový transformátor v neutrálním bodě generátoru. Zvolená metoda ochrany chrání 100 % statoru generátoru a část vinutí (70-80 %) blokového transformátoru. [8]



Obr. 13 - Schéma zapojení impedanční ochrany [8]

Zóna TZ1 pokrývá zemní uzel generátoru až k blokovému transformátoru. Zde je nastavena přibližně 70% až 90% reaktance (z napětí nakrátko) transformátoru. V případě transformátoru s přepínači odbočky se impedance poruchy mění s polohou odbočky. S nastaveným rozsahem 70-90 % u_k a časem zpoždění $t=0$ s je zajištěna selektivita s diferencíální ochranou a impedanční ochrana diferencíální ochranu nejen zálohuje, ale i doplňuje. V příkladu aplikace je zóna TZ2(B) zónou, která musí být účinná pouze v případě, že je vypínač vysokého napětí na generátoru vypnutý. Když je vypínač vysokého napětí na generátoru zapnutý, musí se nastavit zóna TZ2 se zpožděním 0,4-1 s při 100% reaktanci, aby nereagovala i na poruchy na lince. Zóna TZ2(B) se používá jako rychlá fáze zálohování pro spuštění bloku elektrárny, jelikož je vypínač generátoru vypnutý, lze jej nastavit na dvojnásobnou impedanci transformátoru 200 % u_k , protože má být transformátor odpojen už při polovičním zatížení. Zóna TZ3 musí být koordinována s 1. zónou impedanční (distanční) ochrany (Z1L), která je koordinována v elektrickém systému. Zóna TZ4 je další rezerva na ochranu elektrického systému. Ovládá pouze vypínač vysokého napětí. [8]

3.1.6 Nadproudová (zkratová) ochrana

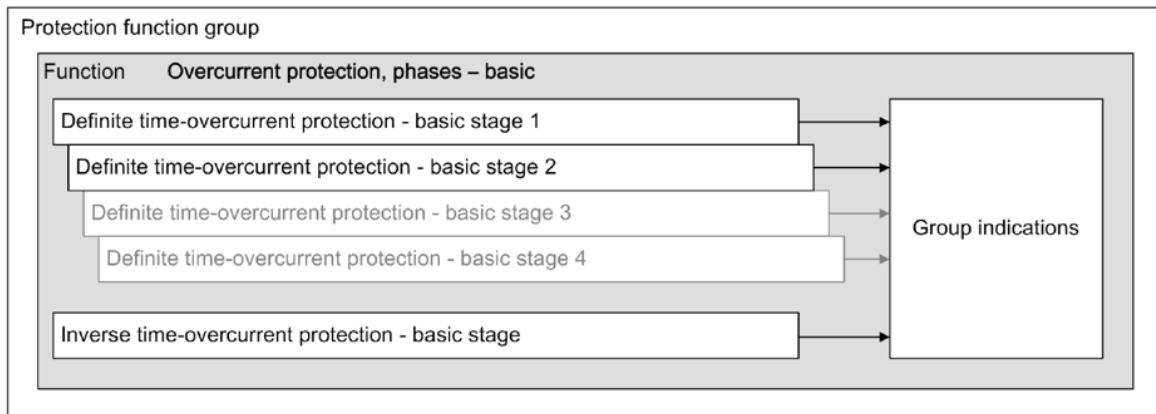
3.1.6.1 Přehled funkcí

Funkce nadproudové ochrany detekuje zkraty v elektrických zařízeních. Lze ji použít jako zálohu rozdílové a impedanční ochrany. [8]

3.1.6.2 Struktura funkce

Nadproudová ochrana se rozděluje na funkční skupiny. Tato ochrana má funkci 3 fázové časově závislé nadproudové ochrany a inverzní funkci. Oba typy funkce jsou výrobcem definovány se 2 časovými stupni.

Nadproudová ochrana lze současně provozovat s maximálně 4 stupni časově závislé nadproudové ochrany a jedním stupněm inverzní časově závislé nadproudové ochrany. [8]



Obr. 14 - Struktura nadproudové (zkratové) ochrany [8]

Nastavení prahové hodnoty a hodnoty zpoždění závisí na konkrétní aplikaci. První stupeň je pro časovou nadproudovou ochranu a druhý stupeň pro zkratovou nadproudovou ochranu.

Doporučená hodnota pro prahový proud je $1,35 I_N$ (1. stupeň). Doporučená hodnota pro zpoždění je 1500 s (1. stupeň). U aplikací na ochranu generátoru bude prahová hodnota pro první stupeň nastavena na maximální přípustný provozní proud. Obvykle je v rozsahu $1,2 - 1,5 I_N$ generátoru. První stupeň je možné doplnit jedním rychlým stupněm několikanásobného proudu se zpožděním 0,1 s. [8]

3.1.7 Podpět'ová ochrana

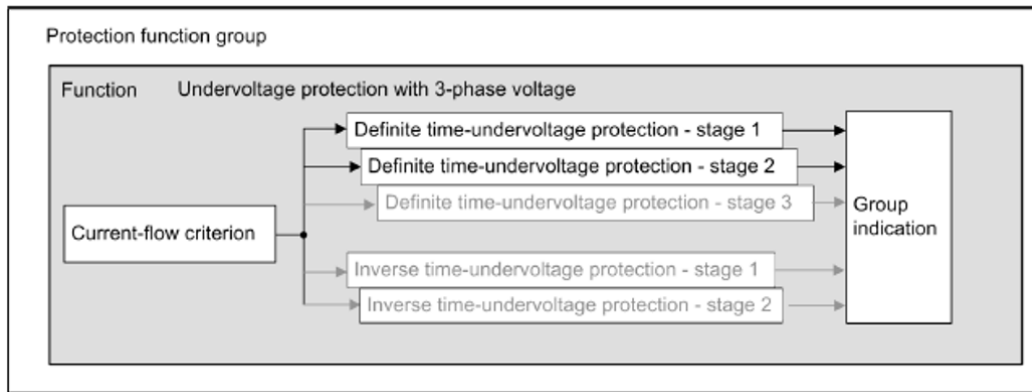
3.1.7.1 Přehled funkcí

Funkce podpět'ové ochrany pro 3-fázovou soustavu se používá ke sledování dovoleného rozsahu napětí a k ochraně zařízení před poškozením způsobeným podpětím. [8]

3.1.7.2 Struktura funkce

Podpět'ová ochrana s funkcí 3-fázového měření napětí je rozdělena do ochranných funkčních skupin a je předkonfigurována výrobcem s dvěma rozhodovacími stupni.

Mohou být použity stupně 3 stupně časové podpět'ové ochrany a 2 stupně inverzní časové podpět'ové ochrany. [8]



Obr. 15 - Struktura podpětové ochrany [8]

Ochranná funkce je strukturována tak, že podle jednoho měřeného proudu může působit na všechny stupně podpětové ochrany. [8]

3.1.7.3 Doporučené nastavení

Prahové napětí je ve výchozím nastavení již nastaveno na doporučenou hodnotu 80 % jmenovitého napětí stroje nebo zařízení. [8]

3.1.8 Přepětová ochrana

3.1.8.1 Přehled funkcí

Přepětová ochrana pro 3 fázovou soustavu monitoruje dovolený rozsah napětí a chrání zařízení před přepětím.

V elektrárnách může ke zvýšené úrovni napětí dojít při nesprávném řízení buzení generátoru nebo při náhlém výpadku sítě, ke které je generátor připojen. [8]

3.1.8.2 Struktura funkce

Přepětová ochrana se dělí na funkční ochranné skupiny. Ochrana je výrobcem předkonfigurována pomocí dvou rozhodovacích, časově závislých stupňů přepětové ochrany. Současně spolu mohou fungovat tři stupně přepětové ochrany a dva inverzní stupně. [8]

Je možné zvolit standardní měřící metodu nebo metodu RMS, která měří i vyšší harmonické a přechodové napětíové špičky. [8]

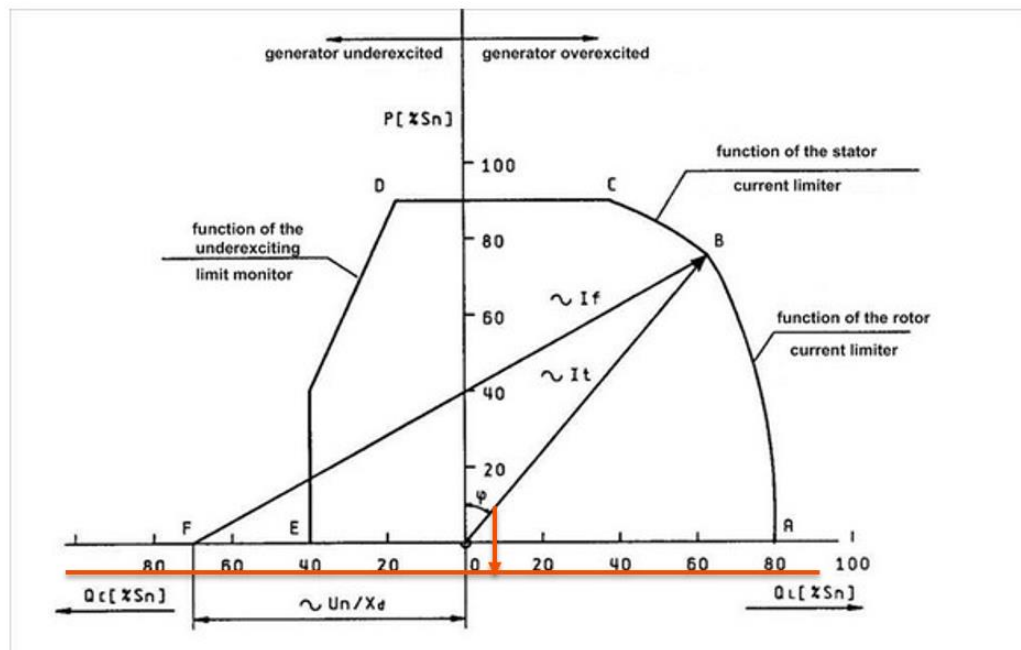
3.1.8.3 Doporučené nastavení

Od výrobce Siemens je doporučena a nastavená ve výchozím stavu standardní metoda měření, která nepočítá s vyššími harmonickými. Dále je doporučeno měření sdruženého napětí „phase to phase“ a prahové napětí s hodnotou 110-115 %. Zpoždění ochrany musí být nastaveno podle aktuální aplikace. Nejvíce závisí na rychlosti reakce regulátoru buzení. Doba zpoždění se obvykle pohybuje od 1,5-5 s. Ve výchozím nastavení je doba zpoždění 3 s. [8]

3.1.9 Zpětná wattová ochrana

3.1.9.1 Přehled funkcí

Funkce ochrany při zpětném toku výkonu sleduje provoz motorů nebo generátorů a detekuje tak výpadek hnacího výkonu. Zabraňuje ohrožení turbíny (poškození lopatek turbíny v důsledku přetížení) případným odpojením od sítě (odbuzení a reakce vypínače generátoru, případně chod jen pro vlastní spotřebu). [8]



Obr. 16 – PQ diagram generátoru s mezí pro zpětný tok výkonu [6]

3.1.9.2 Struktura funkce

Funkce ochrany při zpětném toku výkonu je v továrním nastavení řešena 1 funkční ochranou. V rámci této jedné funkce lze současně provozovat maximálně 2 stupně. Funkce pracuje s 3-fázovým napětovým a proudovým rozhraním. Ochrana zpětného výkonu vypočítává činný výkon ze symetrických složek napětí a proudů. Generuje průměrnou hodnotu činného výkonu za pevný počet cyklů. [8]

3.1.9.3 Doporučené nastavení

Pro vodní turbínu je doporučeno rozmezí 1-3 % poměru zpětného činného výkonu a jmenovitého zdánlivého výkonu generátoru z důvodu krátkého zpětného toku v případě například 3-fázového zkratu. Doporučuje se zpoždění reakce ochrany 3-10 s. [8]

Tab. 12 - Doporučené nastavení zpětné wattové ochrany [8]

Parní/vodní turbíny	$\frac{P}{S_n} = 1 - 3 \%$
Diesel-generátory	$\frac{P}{S_n} > 5 \%$
Plynové turbíny	$\frac{P}{S_n} \geq 30 \%$

3.1.10 Ochrana přebuzení

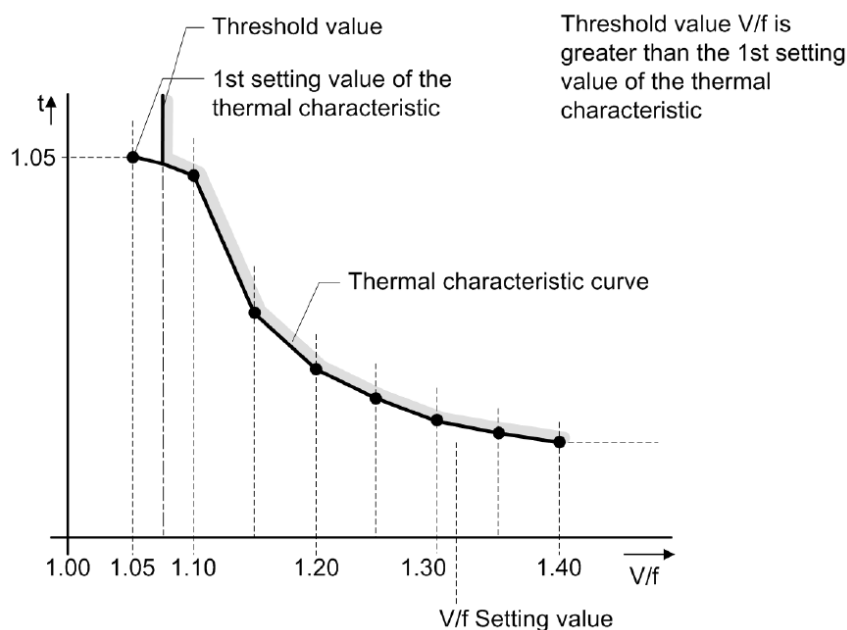
3.1.10.1 Přehled funkcí

Ochrana při přebuzení se používá pro detekci vysokých indukčních hodnot v generátorech a transformátorech. Chrání zařízení před nadměrným tepelným zatížením. Indukce se zaznamenává nepřímou analýzou poměru U/f . Přepětí vede k nadměrným magnetizačním proudům, zatímco nedostatečná frekvence vede k vyšším ztrátám při obnově magnetizace. Pokud je napájecí systém odpojen a regulace napětí a frekvence v systému nereaguje rychle, vzniká nebezpečí přebuzení. [8]

3.1.10.2 Struktura funkce

Ochranná funkce při nadměrném buzení se používá ve skupinách ochranných funkcí, které vyhodnocují 3fázové napětí. Funkce je předkonfigurována pomocí nastavitelného teplotního stupně s uživatelsky definovanou charakteristickou křivkou nebo mezní hodnotou poměru, kterou lze zpozdít.

V rámci této funkce lze současně provozovat maximálně jeden stupeň s uživatelsky definovanou charakteristickou křivkou a 2 časově určité stupně. Příklad uživatelsky definované charakteristické křivky je na Obr. 17. [8]



Obr. 17 – Příklad uživatelsky definované charakteristické křivky [8]

3.1.10.3 Doporučené nastavení

V případě použití určitého stupně s možností časového zpoždění je doporučený první stupeň s hodnotou poměru $U/f > 1,1$ a zpožděním 10 s. Druhý rychlý stupeň je doporučený pro poměr $U/f > 1,4$ a dobu zpoždění 1 s. [8]

3.1.11 Ochrana podbuzení

3.1.11.1 Přehled funkcí

Funkce ochrany podbuzení zjistí poruchu v buzení (částečné nebo úplné selhání) synchronního stroje. Reaguje na vadnou regulaci napětí (automatickou nebo ruční regulací napětí) při nízkém zatížení stroje. Zabraňuje asynchronnímu provozu synchronních strojů a tím i zakázanému namáhání, přehřátí rotoru včasným odpojením a při poruše stability systému napájení, která může být způsobena potenciálním asynchronním provozem. [8]

3.1.11.2 Struktura funkce

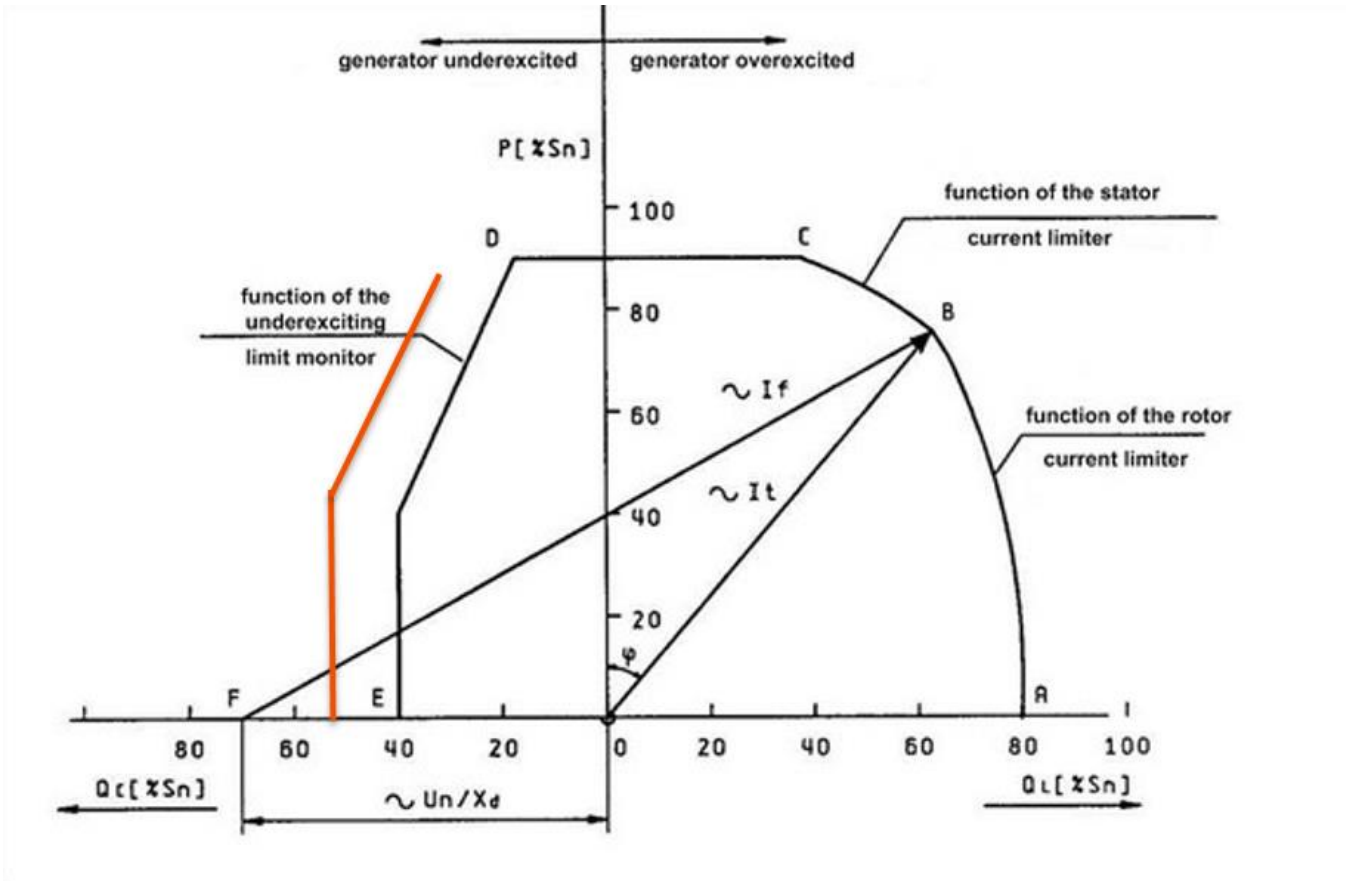
Funkce ochrany podbuzení se používá ve skupině ochranných funkcí statoru generátoru. Nabízí stupeň se 3 charakteristikami, stupeň napěťového poklesu a stupeň s charakteristickou křivkou je předkonfigurována výrobcem. Křivka je složená z 3 charakteristických křivek. Pomocí 3 charakteristických křivek lze nastavit meze stability stroje. Kromě budícího napětí vyhodnotí tento stupeň i překročení charakteristických křivek 1 a 2 (statická stabilita).

Zpracovává 3 fázová napětí statoru v neutrálním bodě generátoru a sleduje limity stability synchronního stroje.

Graf na Obr. 18 popisuje mez stability stroje a je sestaven pro jmenovité napětí. Limity jsou odvozeny z parametrů stroje. Graf shrnuje limity pro synchronní stroj. V případě kdy synchronní stroj překročí teoretický limit stability, nastává pak riziko asynchronního provozu. Výrobce stroje zahrnuje do výpočtu rezervu a používá diagram ke stanovení meze stability. Pokud je překročena hranice praktické stability a buzení stále existuje, může regulátor napětí regulovat stroj v přípustném rozsahu. Jakmile je překročen stanovený kritický limit podbuzení, aktivuje se ochrana. Pokud stroj pracuje s podpětím, je mez stability posunuta doprava a povolená mez podbuzení se zmenší.

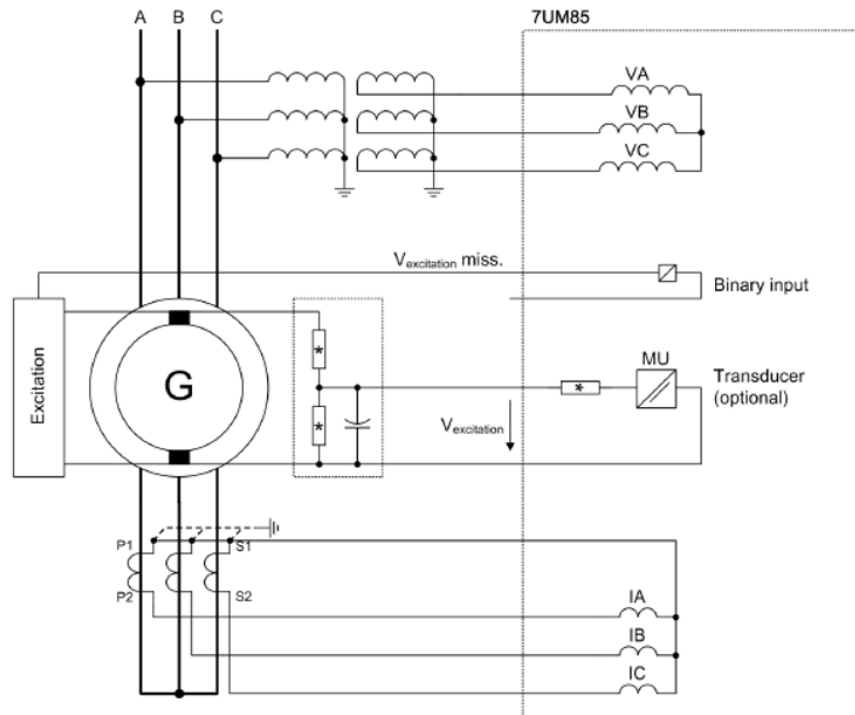
Přechodná reaktance udává mezní hodnotu dynamické stability. Charakteristická křivka dynamické stability se asymptoticky přibližuje k limitní hodnotě. Výrobce generátoru tento limit neuvádí.

Pokud je překročena charakteristická křivka dynamické stability, je stroj v asynchronním provozu a musí být odstaven. [8]



Obr. 18 - PQ diagram s vyznačenou mezí podbuzení [6]

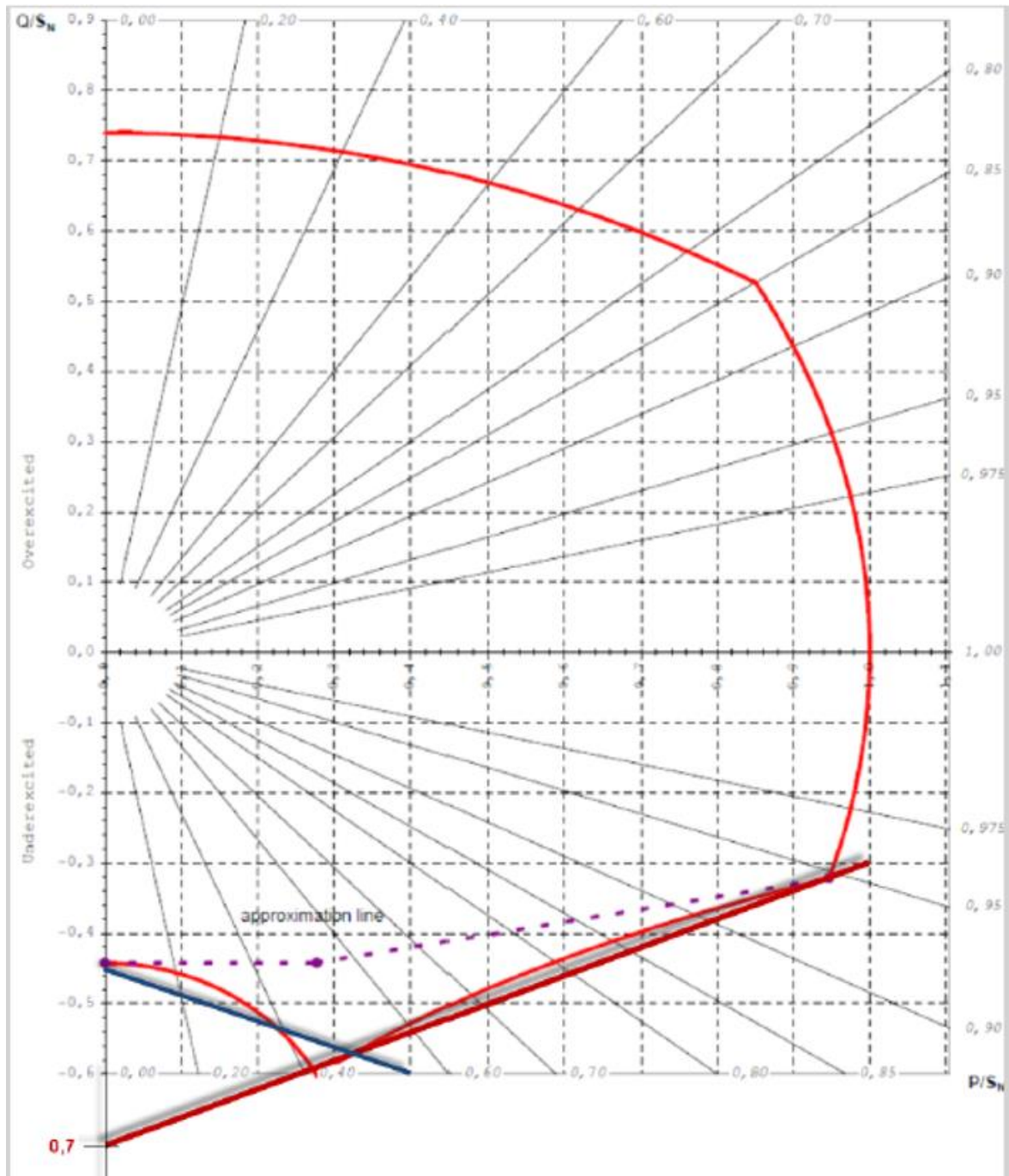
Na následujícím Obr. 19 je příklad možného zapojení ochrany generátoru.



Obr. 19 - Schéma zapojení pro ochranu podbuzení [8]

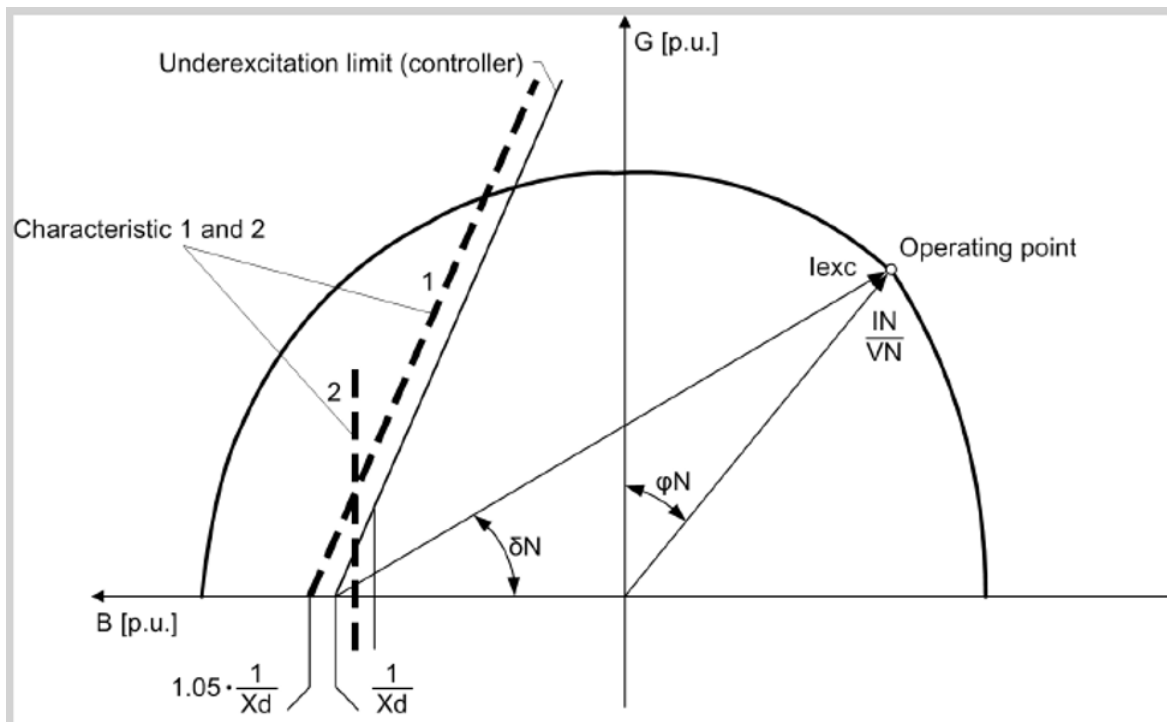
3.1.11.3 Doporučené nastavení

Pro vytvoření pracovního diagramu se vychází z diagramu, který je daný od výrobce generátoru. Ve spodní části Obr. 20 je oblast podbuzení. Diagram platí pro generátor s vyniklými póly. Uvedený půlkruh je označován jako kruh odezvy a je vytvořen při budicím napětí=0 V. Červená křivka je s parametry $1/x_{d1}=0,7$ s úhlem 70° a modrá křivka s $1/x_{d1}=0,45$ a úhlem 110° . [8]



Obr. 20 - Diagram odvození aproximační křivky [8]

Následující příklad diagramu Obr. 21 z manuálu od Siemensu platí pro turbogenerátory, ale pro hydrogenerátory je oblast křivek 1 a 2 velmi podobná. [8]



Obr. 21 - Příklad výsledných limitních křivek při podbuzení turbogenerátoru [8]

3.1.12 Ochrana nadfrekvence

3.1.12.1 Přehled funkce

Funkce ochrany při nadměrné frekvenci detekuje nadměrné frekvence v elektrických energetických systémech nebo strojích a sleduje indikace poruchového kmitočtového pásma a výstupu. Pokud selže regulátor otáček (omezovač rychlosti), zajišťuje dodatečnou ochranu turbíny.

Frekvenční odchylky jsou způsobeny nerovnováhou mezi generovaným a spotřebovaným činným výkonem. Nadměrná frekvence je způsobena odlehčením zátěže, odpojením energetického systému nebo poruchami sítě. Nadměrná frekvence znamená riziko samočinného buzení strojů, které jsou dlouhodobě připojeny na linky bez zatížení.

Ochrana proti nadměrné frekvenci je k dispozici ve dvou funkčních konfiguracích. Funkční konfigurace se liší v metodě měření frekvence, kterou používají. [8]

3.1.12.2 Struktura funkce

Funkce ochrany při nadměrné frekvenci se používá v ochranných funkčních skupinách, které jsou založeny na měření napětí. Funkce ochrany nadměrné frekvence je ve výchozím nastavení provozována se 2 stupni. Ve funkci lze současně ovládat maximálně 3 vypínací stupně. Vypínací fáze mají stejnou strukturu.

Ochranná funkce lze implementovat kombinací 2 různých metod měření frekvence

metodou rozdílu úhlu (Tuto metodu lze použít pro ochranu generátoru/motoru) nebo metodou filtrování (Tuto metodu lze použít pro ochranu linky).

Metoda rozdílu úhlu vyhodnocuje fázový úhel napětí. Změna fázového úhlu napětí v daném časovém intervalu je úměrná změně frekvence, lze z ní tedy odvodit aktuální frekvenci.

Metoda filtrování vyhodnocuje okamžité hodnoty napětí a pomocí vhodné kombinace filtrů určuje aktuální frekvenci. Obě metody se vyznačují vysokou přesností a rychlou odezvou. Vyšší harmonické a spínací pulzy jsou účinně potlačeny. [8]

3.1.12.3 Doporučené nastavení

Pokud omezovač překročení rychlosti nepracuje správně, ochrana proti nadměrné frekvenci vyše výstražný signál. Překročení rychlosti může být způsobeno odlehčením zátěže nebo narušením omezovače rychlosti (například v ostrovní síti). První nadfrekvenční stupeň pro generátor je doporučený při hodnotě 103 % (51,5 Hz) se zpožděním 20 s. Druhý rychlý stupeň je doporučený pro hodnotu 108 % (54 Hz) se zpožděním 5 s. [8]

3.1.13 Ochrana podfrekvence

3.1.13.1 Přehled funkcí

Funkce ochrany při podfrekvenci se používá ke zjištění podfrekvence v elektrických energetických systémech nebo strojích, sledování kmitočtového pásma, indikace poruchy, odpojení elektrického systému, odlehčení zátěže pro zajištění stability systému napájení a ochrany motorů, odpojení generátoru, když je kritická frekvence systému napájení $f < 95$ %.

Frekvenční odchylka je způsobena nerovnováhou mezi generovaným a spotřebovaným činným výkonem. Nízká frekvence je způsobena zvýšením spotřeby energie spotřebitelů nebo snížením vyrobené energie. K těmto podmínkám dochází v případě odpojení napájecího systému, selhání generátoru nebo poruchy regulátoru výkonu a frekvence.

Ochrana při podfrekvenci je k dispozici ve 2 funkčních konfiguracích. Funkční konfigurace se liší v metodě měření frekvence, kterou používají. [8]

3.1.13.2 Struktura funkce

Funkce ochrany při podfrekvenci se používá ve funkčních ochranných skupinách, které jsou založeny na měření napětí.

Funkce ochrany při podfrekvenci je zprostředkována z výchozího nastavení ve 3 vypínacích stupních. Ve funkci může být současně spuštěno maximálně 5 vypínacích stupňů. Vypínací stupně mají stejnou strukturu.

Ochranná funkce lze implementovat kombinací 2 různých metod měření frekvence metodou rozdílu úhlu (Tuto metodu lze použít pro ochranu generátoru/motoru) nebo metodou filtrování (Tuto metodu lze použít pro ochranu linky).

Metoda rozdílu úhlu vyhodnocuje fázový úhel napětí. Změna fázového úhlu napětí v daném časovém intervalu je úměrná změně frekvence, lze z ní tedy odvodit aktuální frekvenci.

Metoda filtrování vyhodnocuje okamžité hodnoty napětí a pomocí vhodné kombinace filtrů určuje aktuální frekvenci. Obě metody se vyznačují vysokou přesností a rychlou odezvou. Vyšší harmonické a spínací pulzy jsou účinně potlačeny. [8]

3.1.13.3 Doporučené nastavení

Ochrana proti nedostatečné frekvenci poskytuje další ochranu turbíny. Jejím úkolem je zajistit požadavek systému elektrárny včasným odpojením od sítě, do které generátor dodává energii. Po odpojení by měl nastavit regulátor generátorovou jednotku na jmenovité otáčky. Turbogenerátory mohou pracovat trvale při pouhých 95 % jmenovité frekvence. To vyžaduje, aby se zdánlivý výkon snížil o stejný poměr. Snížení frekvence vede nejen k vyšší spotřebě induktivního proudu, ale také k ohrožení stabilního provozu.

Odpojení od elektrické sítě je doporučeno se zpožděním 10 s při 95 % jmenovité frekvence. Po odpojení musí být generátorová jednotka stabilizována. Pokud tomu tak není, turbína se zastaví v zájmu vlastní ochrany. V turbíně může nedostatečná frekvence vést k rezonancím a nepřijatelnému namáhání lopatek turbíny. Pro tuto aplikaci se používají 3 stupně ochrany. Hodnota frekvence, při které musí dojít k vypnutí generátoru, závisí na specifikacích provozovatele elektrárny nebo výrobce turbíny, ale přibližně je to hodnota 94 % jmenovité frekvence. Upozorňující stupeň je doporučený při 49,80 Hz se zpožděním 10 s a odpojení od sítě při 95 % se zpožděním také 10 s. [8]

3.1.14 Ochrana nesymetrického zatížení

3.1.14.1 Přehled funkcí

Detekuje nesymetrické zatížení nebo přerušení vedení elektrických strojů (generátorů a motorů). Nesymetrická zátěž vytváří protisměrné magnetické pole s dvounásobnou frekvencí v rotoru. Skin efekt vede k lokálnímu přehřátí na povrchu tyčí rotoru v místech přechodu mezi drážkami a čely vinutí. Dalším účinkem nesymetrických zátěží je přehřátí vinutí tlumiče. Funkce se dělí na stupeň s časově závislou charakteristickou křivkou a s pevným definovaným časem. [8]

3.1.14.2 Struktura funkce

Funkce ochrany nesymetrického zatížení se používá v ochranných skupinách. Funkce ochrany nevyváženého zatížení je předkonfigurována s 1 stupněm. Ve funkci mohou současně pracovat maximálně 2 stupně. Ochranný stupeň vyhodnocuje zpětnou složku proudu i_2 . Zpětná složka proudu se počítá z měření 3-fázových proudů podle definiční rovnice symetrických složek. [8]

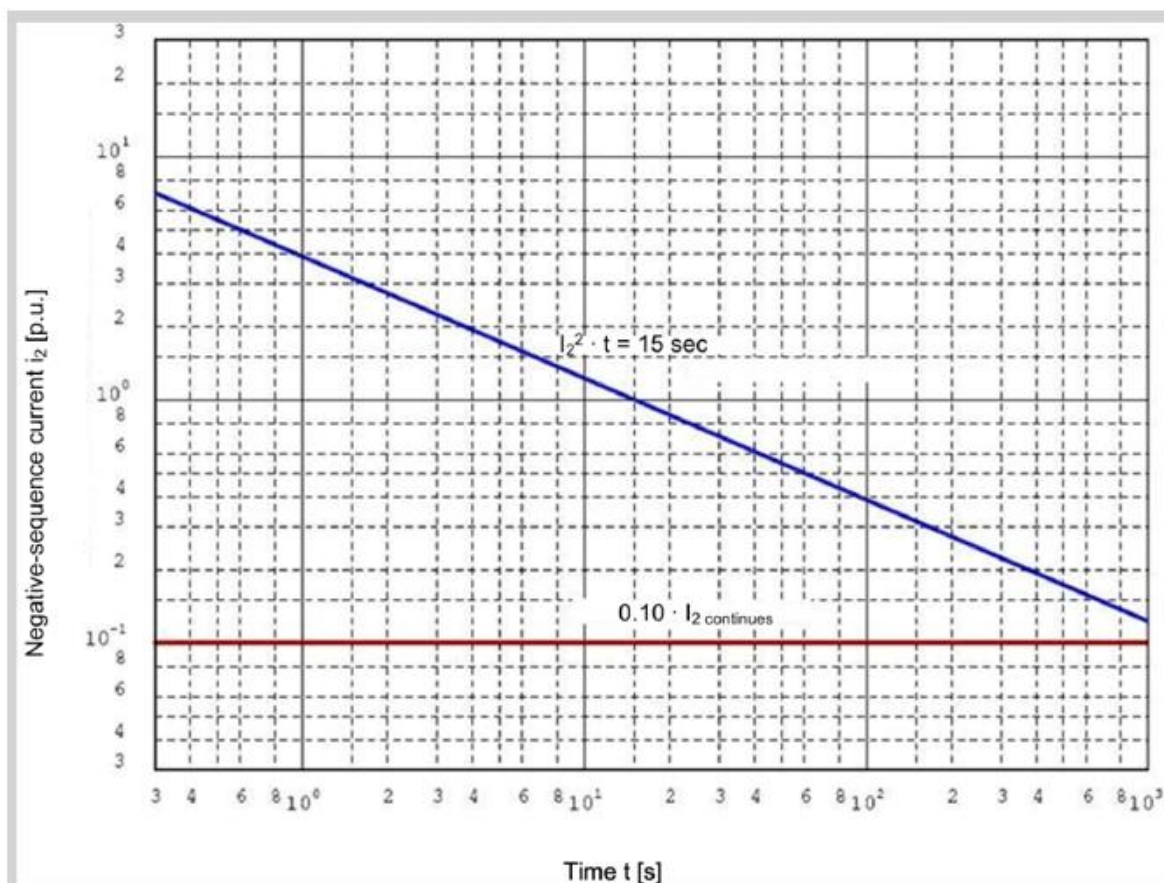
$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot I - \text{jednofázové zatížení}$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I - \text{dvoufázové zatížení}$$

3.1.14.3 Doporučené nastavení

Následující graf ukazuje nastavení parametru max. nepřetržitého I_2 . V příkladu je vybrána hodnota 10 %. Aby se předešlo příliš rychlému upozornění, společnost Siemens doporučuje delší dobu zpoždění. Je možné nastavení parametru výstražného stupně v rozsahu 10 s až 20 s. V příkladu je vybráno 15 s, což určuje směrnicí K pro definiční křivku. [8]

$$K = i_2^2 \cdot t$$



Obr. 22 - Příklad doporučeného nastavení pro zpětnou složku proudu [8]

3.1.15 Tepelná ochrana

3.1.15.1 Přehled funkcí

Ochrana při tepelném přetížení s využitím uživatelem definované charakteristické křivky se používá k ochraně zařízení (motory, generátory a transformátory) před tepelnými účinky. Vyhodnocuje tepelné přetížení z charakteristické křivky udané pro konkrétní zařízení. Monitoruje tepelný stav motorů, generátorů a transformátorů. [8]

3.1.15.2 Struktura funkce

Ochrana při tepelném přetížení s využitím uživatelem definované charakteristické křivky se používá v ochranných funkčních skupinách, které vychází z 3 fázových měření proudu. [8]

3.1.15.3 Doporučené nastavení

Motory, generátory a transformátory jsou ohroženy dlouhodobějším přetížením. Ochrana proti přetížení vychází z konkrétního tepelného modelu pro dané zařízení. [8]

V případě, že máme k dispozici ke chráněnému objektu tepelný model, je ve výchozím nastavení nastavena prahová hodnota $1,1 I_n$ s časovým zpožděním 600 s.

Charakteristiku je možné zadat například pomocí 12 bodů podle Tab. 13. [8]

Tab. 13 - Příklad nastavených hodnot pro tepelnou ochranu [8]

I / I_{obj}	t (s)
1.16	120.00
1.21	96.00
1.25	76.00
1.28	62.00
1.35	48.00
1.42	37.50
1.48	33.50
1.58	27.50
1.84	20.50
2.09	14.00
2.25	9.85
8.00	9.85

3.1.16 Směrová nadproudová (zkratová) ochrana

3.1.16.1 Přehled funkcí

Detekuje zkrat na elektrických zařízeních. Lze ji použít jako záložní ochranu pro rozdílovou ochranu. Zajišťuje selektivní detekci poruch pro paralelní vedení, transformátory s jedním vývodem, v kabelových vedeních se změnou směru toku výkonu nebo v linkách s kruhovou topologií. [8]

3.1.16.2 Struktura funkce

Funkce směrové nadproudové ochrany se používá v ochranných funkčních skupinách. K dispozici jsou 2 typy funkcí. Směrová časově závislá nadproudová ochrana rozšířená nebo základní.

Pouze rozšířený typ funkce je schopný chránit i transformátory.

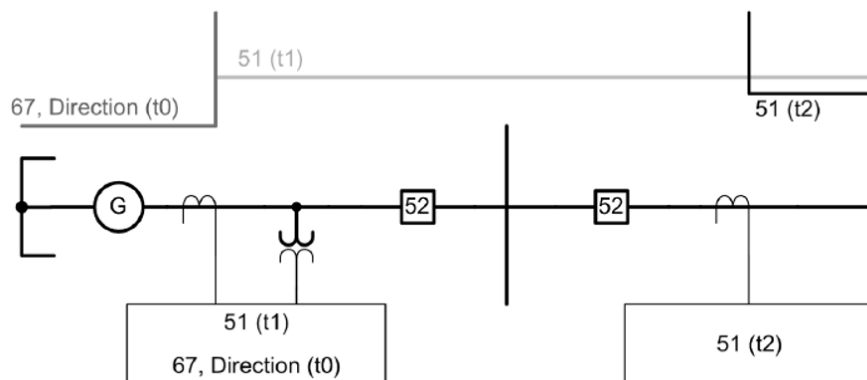
U typu rozšířené funkce mohou být současně provozovány maximálně 4 stupně časové nadproudové ochrany rozšířené, jeden stupeň Inverzní časové nadproudové ochrany rozšířené, jeden stupeň uživatelem definované charakteristické křivky nadproudové ochrany.

U typu základní funkce směrové časově závislé nadproudové ochrany mohou být současně provozovány maximálně 4 stupně časové nadproudové ochrany a jeden stupeň inverzní časové nadproudové ochrany. [8]

3.1.16.3 Doporučené nastavení

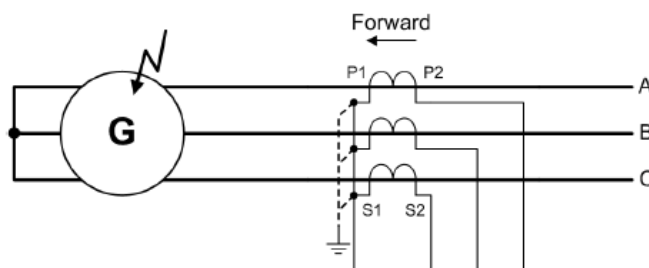
Směrová časově závislá nadproudová ochrana se používá pro generátory, které nemají proudové transformátory v neutrálním bodě generátoru. Vnitřní poruchy v

generátoru tak mohou být vypnuty v nejkratší možné době. Zpoždění vypnutí musí být selektivní s nadřazenými ochranami. Následující Obr. 23 ukazuje základní koncept. [8]



Obr. 23 - Schéma zapojení směrové nadproudové ochrany [8]

Mimo jiné je směrový režim definován podle zapojení transformátoru. Obr. 24 ukazuje směr vpřed „Forward“ do generátoru. [8]



Obr. 24 - Schéma zapojení pro určení směru ochrany [8]

Výrobce je doporučena základní metoda měření bez uvažování vyšších harmonických a nadproudových špiček. Prahový proud pro první stupeň je doporučený 1,5 In. [8]

Aby se zabránilo nežádoucímu vypnutí, musí být prahová hodnota vyšší než provozní proud generátoru. Prahová hodnota je doporučena 1,2 až 1,5 In generátoru. [8]

3.1.17 Ochrana selhání vypínače

3.1.17.1 Přehled funkcí

Funkce ochrany při selhání vypínače sleduje vypínání přidružených vypínačů a generuje záložní vypínací signál, pokud dojde k selhání vypínače. [8]

3.1.17.2 Struktura funkce

Spuštění je zahájeno funkcí vnitřní ochrany zařízení nebo externí ochranou. Mimo řízení vypínače se ochrana používá ke kontrole, zda je vypínač rozpojen. Vyhodnocení je možné buď detekcí hlavního proudového toku, nebo pomocným koncovým kontaktem vypínače. Spolehlivější metoda je sledování zániku proudového toku.

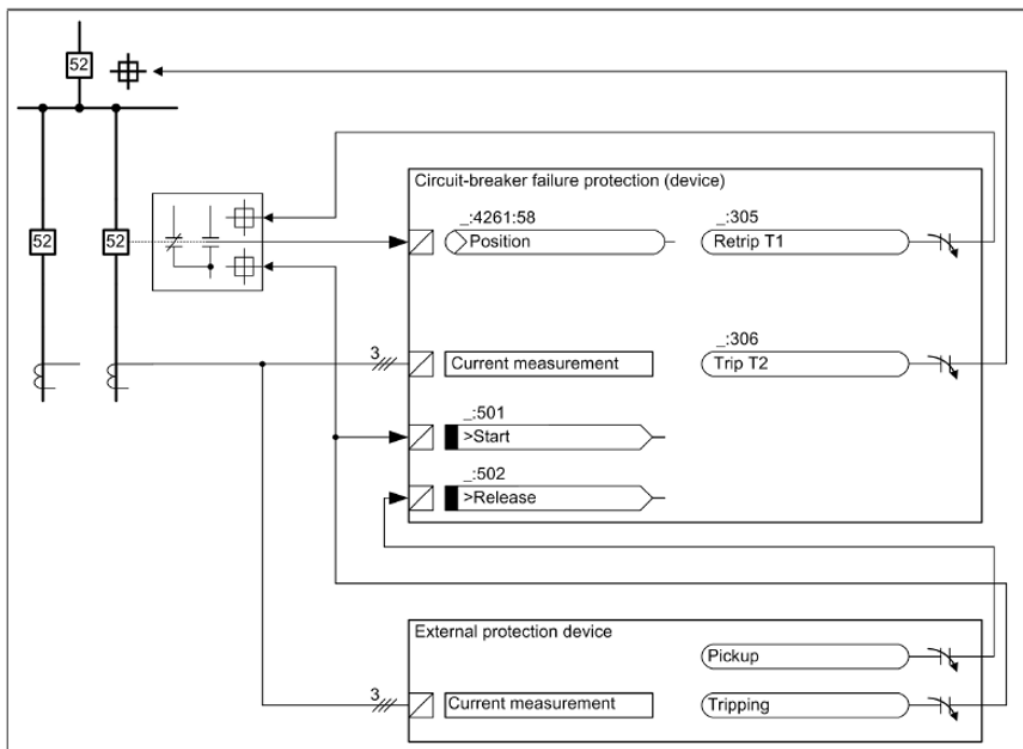
Pokud je vypínač sepnut a ochrana vyšle pokyn k vypnutí vypínače, spustí se časové zpoždění. Během časového zpoždění systém neustále kontroluje, zda se vypínač

vypnul. V takovém případě funkce nezareaguje. Pokud se vypínač nevypne, funkce vypnutí se přeruší po uplynutí časového zpoždění a spustí se záložní vypínací logika. [8]

V prvním okamžiku může být vypnutí vypínače opakováno. Vypnutí se opakuje po uplynutí nastavitelného zpoždění t_1 .

Časové zpoždění t_2 může začít buď se začátkem času t_1 nebo po uplynutí času t_1 .

Pokud časové zpoždění t_2 vyprší bez vypnutí daného vypínače, předpokládá se selhání vypínače a je vydán záložní vypínací signál pro následující vypínač/vypínače. [8]



Obr. 25 - Příklad zapojení ochrany při selhání vypínače [8]

3.1.17.3 Doporučené nastavení

Společnost Siemens jako dodatečné nastavení doporučuje nastavení interního automatického prahového proudu vypínače na polovinu minimálního zkratového proudu $0,5I''_{K_{min}}$. Doba zpoždění pro binární signál t_1 je od výrobce doporučena 50 ms. Po přičtení doby reakce vypínače bude celkový čas vypnutí 115 ms. V případě požadavku na zachování funkce pokusu opětovného vypnutí, bude celková možná doba vypnutí 200 ms. Pro časové zpoždění t_2 je tedy doporučena hodnota 130 ms, po kterém dojde k vyslání signálu k nadřazeným vypínačům. Při zapůsobení externí ochrany je sledován pokles hlavního toku proudu. Vypnutí je vyhodnoceno jako úspěšné při poklesu proudu pod prahovou hodnotu $0,25 I_n$. [8]

3.2 Ochrany blokového transformátoru

3.2.1 Diferenciální ochrana

3.2.1.1 Přehled funkcí

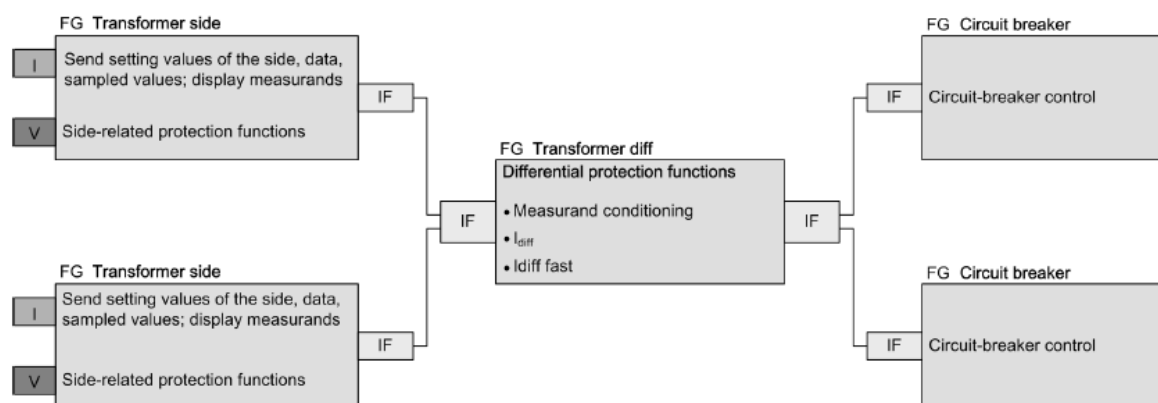
Funkce diferenciální ochrany transformátoru detekuje zemní poruchy a vícefázové zkraty v transformátorech, reaktorech, krátkých vedeních, generátorech a motorech. Je vhodný pro ochranu bloků generátor a transformátor nebo kombinace transformátor a reaktor. Má k dispozici nezbytné metody stabilizace v případě procesů připojení a nadměrného buzení.

Je stabilní v případě externích zkratů se saturací proudového transformátoru pomocí inteligentních metod rozpoznávání saturace.

Spolehlivě reaguje v případě interních vysokonapětových poruch prostřednictvím dodatečné vysokonapětové fáze. V závislosti na vybraném typu zařízení může chránit různé konfigurace systému. 7UT85 chrání dvouvinutový transformátor nebo autotransformátor. 7UT86 zpracovává 3 strany nebo 3 měřicí body. V maximální implementaci 7UT87 lze zpracovat až 5 stran nebo maximálně 7 měřicích bodů. Kromě toho může 7UT87 zpracovávat 2 funkční skupiny diferenciální ochrany transformátoru. [10]

3.2.1.2 Struktura funkce

Funkce diferenciální ochrany generátoru je použita ve funkční skupině „Generátor diff“. Funkce závisí na zvolené šabloně konfigurované výrobcem. Funkce se skládá podle Obr. 26 z vypínacích stupňů „Idiff“ a „Idiff fast“. Ve funkčních skupinách „Transformer side“ proběhnou výpočty a ty se následně vyhodnocují v bloku „Transformer Diff“, který případně reaguje na přidružený vypínač. [10]



Obr. 26 - Struktura rozdílové ochrany transformátoru [10]

3.2.1.3 Doporučené nastavení

Doporučené mezní hodnoty jsou shodné s diferenciální ochranou generátoru podle kapitoly: [3.1.1.3.2 Doporučené nastavení](#). Nastavení citlivosti ale záleží na konkrétní aplikaci.

3.2.2 Impedanční ochrana

Ochranná funkce je zahrnuta s ochranou generátoru podle kapitoly: [3.1.5 Impedanční ochrana generátoru](#) a ochraně linky podle kapitoly: [3.3.1 Impedanční ochrana linky](#)

3.2.3 Nadproudová (zkratová) ochrana

3.2.3.1 Doporučené nastavení

Nadproudová ochrana blokového transformátoru je doporučena ve dvou stupních. První stupeň s prahovou hodnotou $1,5 I_n$ a s časovým zpožděním 0,3 s. Druhý rychlý stupeň je doporučený pro $10 I_n$ bez zpoždění. [10]

3.2.4 Nadproudová (zkratová) 1f ochrana

3.2.4.1 Doporučené nastavení

Nadproudová 1f ochrana blokového transformátoru je doporučena ve dvou stupních. První stupeň je doporučený s hodnotou $1,2 I_n$ transformátoru se zpožděním 0,3 s. Druhý rychlý stupeň je dle výrobce Siemens doporučený pro $10 I_n$ bez zpoždění. [10]

3.2.5 Nádobová ochrana transformátoru

3.2.5.1 Přehled funkcí

Nádobová ochrana má za úkol detekovat přeskoky přes VVN/VN průchodky na nádobu nebo mezi vinutím a rámem transformátoru. [9]

3.2.5.2 Struktura funkce

Nádoba musí být izolována od země. Vodič spojuje nádobu se zemí a proud skrz tento vodič je provléknutý proudovým přístrojovým transformátorem. Dojde-li k průchodu proudu přes nádobu, protéká poruchový proud zemnicím vodičem k zemi. Jakmile je tento poruchový proud detekován nádobovou ochranou, je vydán okamžitý nebo zpožděný povel k vypnutí, aby se odpojily všechny strany transformátoru.

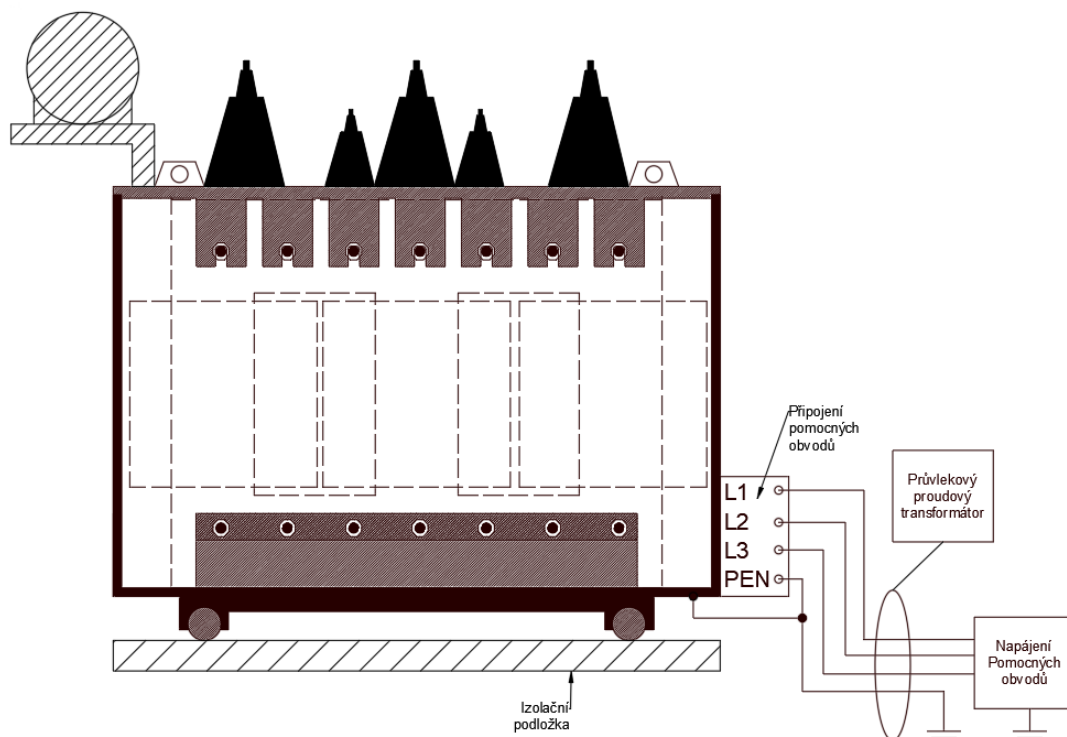
Lze zvolit, zda ochrana vyhodnotí základní harmonickou proudu nebo počítá i s vyššími harmonickými.

Ochrana výrobce Siemens poskytuje proudový vstup s vysokou citlivostí, který umožňuje rozsah nastavení od 10 mA do 1000 mA. Druhá možnost je připojit svodový proud nádoby ke standardnímu proudovému vstupu relé. V tomto případě je rozsah nastavení 0,1 až 10násobek jmenovitého proudu relé. [9]

3.2.5.2.1 Zpracování externích vypínacích signálů a uživatelem definovatelných hlášení

Do vyhodnocovací ochrany mohou být začleněny dva požadované vypínací signály z externích ochranných nebo kontrolních jednotek. Signály jsou připojeny na relé jako "Externí signály" přes dva binární vstupy. Stejně jako signály vnitřní ochrany a monitorování mohou být vysílány zpožděně. [9]

Externí signály, jako je například ochrana Buchholzova relé (sledování plynů v nádobě), kontrola teploty atd., mohou být připojeny pomocí binárních vstupů a prostřednictvím vypínací matice mohou být spojeny s vypínacími relé. [9]



Obr. 27 - Schéma zapojení nádobové ochrany [9]

3.2.5.3 Doporučené nastavení

Doporučené nastavení je závislé na konkrétní aplikaci a na přesnosti zvoleného průvlekového přístrojového transformátoru. [9]

3.2.6 Rozdílová zemní ochrana

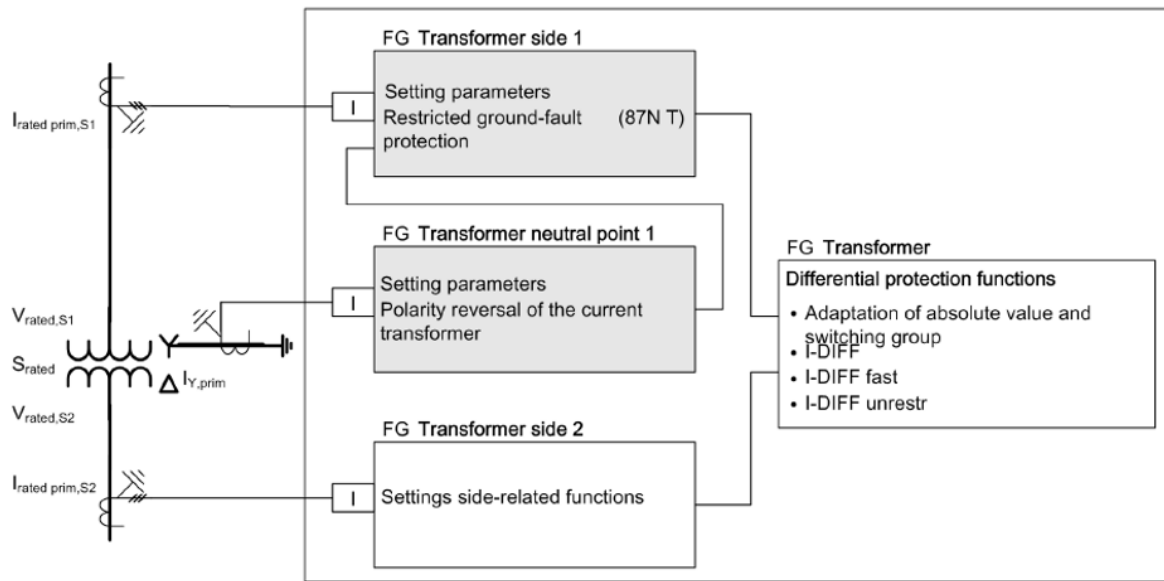
3.2.6.1 Přehled funkcí

Detekuje zemní poruchy v transformátorech, zkratových reaktorech nebo rotačních strojích, ve kterých je nulový bod uzemněn. Má vysokou citlivost na zemní poruchy v blízkosti neutrálního bodu. Slouží jako dodatečná ochrana k diferenciální ochraně. Chrání uzemněné transformátory v daném rozsahu. Je požadováno použití proudového transformátoru mezi nulovým bodem a uzemňovacím vodičem. Transformátor s nulovým bodem a měřicí transformátor proudu definují rozsah ochrany. [12]

3.2.6.2 Struktura funkce

Následující Obr. 28 ukazuje strukturální rozdělení funkce. Rozdílová zemní ochrana získává své měřené veličiny od proudových transformátorů, které jsou připojeny k funkční skupině „Transformer side 1“ a „Transformer side 2“. Proud neutrálního bodu je veden přes funkční skupinu „Transformer neutral point“ do

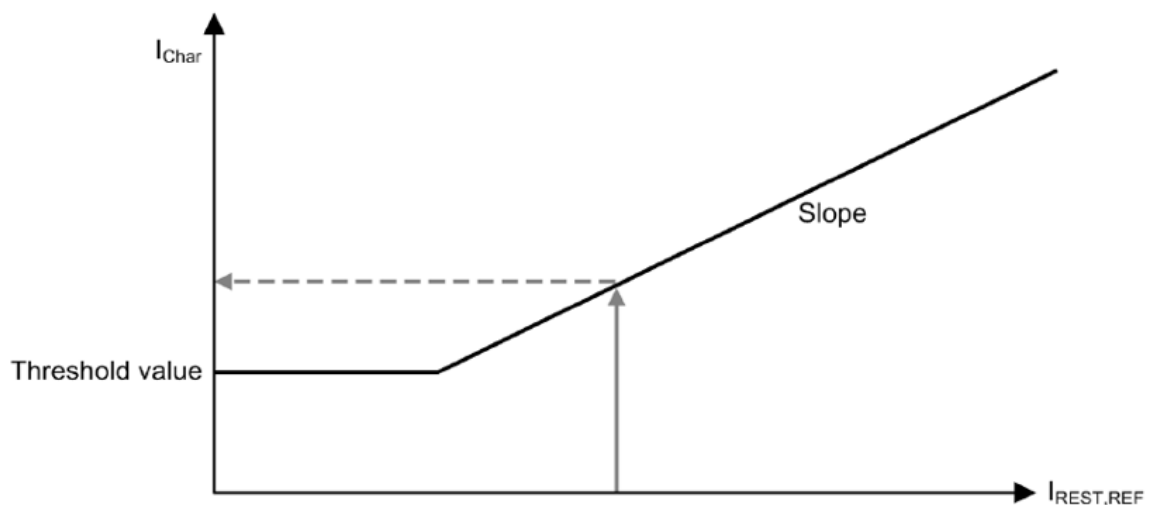
funkční skupiny „Transformer“. Proud I_y měřený v neutrálním bodě je v záznamu poruchy převrácen o 180° . [12]



Obr. 28 - Schéma zapojení rozdílové zemní ochrany [12]

3.2.6.3 Doporučené nastavení

Doporučený prahový proud se pohybuje v rozmezí od $0,05$ až $2 I_n$ se sklonem $0,7$ podle charakteristiky na Obr. 29. [12]



Obr. 29 - Charakteristika rozdílové zemní ochrany [12]

3.3 Ochrany linky

3.3.1 Impedanční ochrana

Ochranná funkce je shodná s impedanční ochranou generátoru podle kapitoly: [3.1.5 Impedanční \(distanční\) ochrana](#)

3.3.2 Nadproudová (zkratová) ochrana

Ochranná funkce je shodná s nadproudovou ochranou blokového transformátoru podle kapitoly: [3.2.3 Nadproudová \(zkratová\) ochrana](#)

3.3.3 Nadproudová (zkratová) ochrana 1f

Ochranná funkce je shodná s nadproudovou 1f ochranou blokového transformátoru podle kapitoly: [3.2.4 Nadproudová \(zkratová\) ochrana 1f](#)

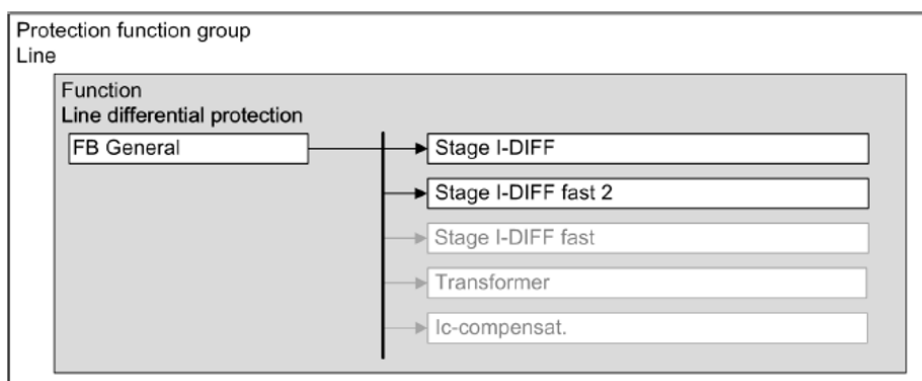
3.3.4 Srovnávací ochrana linky

3.3.4.1 Přehled funkcí

Srovnávací ochrana linky je selektivní ochrana při zkratu pro nadzemní vedení, kabely a přípojnice s jednostranným a vícenásobným přívodem v radiálních, okružních nebo mřížových systémech. Umožňuje okamžité vypnutí na 2 až 6 koncích vedení a ochranu transformátoru. Vyhodnocuje pouze fázový posun proudů na obou koncích linky. Stává se citlivější při použití kompenzace nabíjecího proudu. [12]

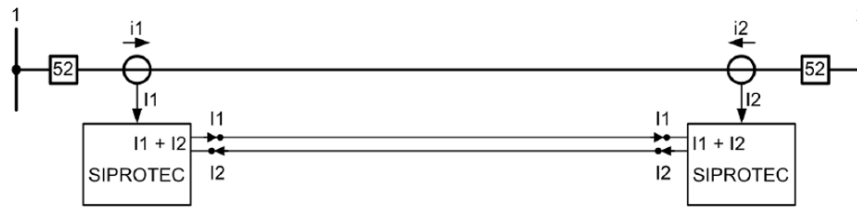
3.3.4.2 Struktura funkce

Srovnávací ochrana linky se používá ve skupině funkcí. Funkce je přednastavena pomocí funkčního bloku, ve kterém je rozdělena pomocí stupně „I-DIFF“ a stupně „I-DIFF fast 2“. Jako alternativa pro „I-DIFF fast 2“ je dostupná funkce „I-DIFF fast“. Funkce „Ic-compensat.“ a „Transformer“ slouží pro speciální aplikace. [12]



Obr. 30 - Struktura srovnávací ochrany linky [12]

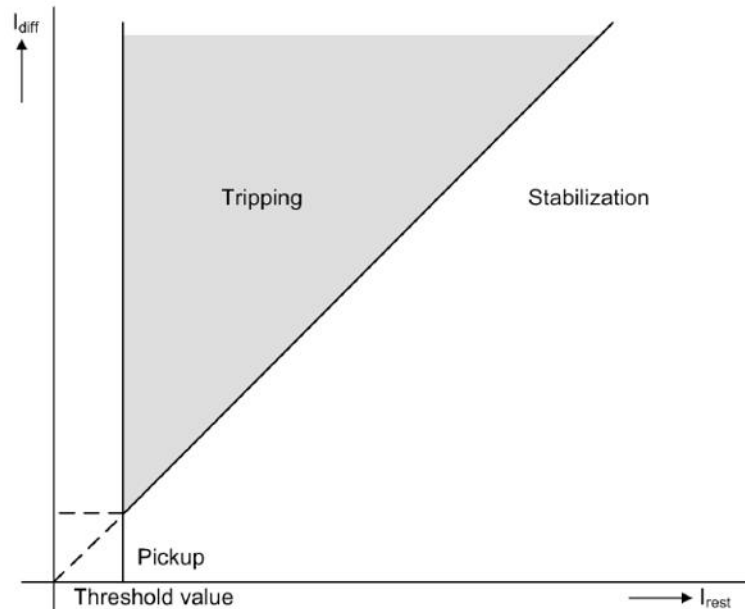
Lineární ochrana je určena pro chráněné objekty až s 6 konci. Funguje na základě nepřetržitého srovnávání. Za tímto účelem musí být zařízení nainstalováno na každém konci chráněné oblasti. Zařízení si vyměňují své měřené veličiny prostřednictvím komunikačních spojení. Každé zařízení provádí porovnání proudu s těmito měřenými veličinami a vypíná přiřazený vypínač, pokud je v obvodu zkrat v rozsahu ochrany. [12]



Obr. 31 - Schéma zapojení srovnávací ochrany linky [12]

3.3.4.3 Doporučené nastavení

Srovnávací ochranu je doporučeno nastavit ve dvou stupních - Jeden pomalý a jeden rychlý stupeň. Srovnávací ochrana není tak citlivá jako ochrana rozdílová, ale je velice rychlá. Je vhodná pro ochranu linek a přidružených transformátorů. Charakteristika ochrany je pro oba stupně definována rovnicí $I_{diff} = I_{rest}(45^\circ)$, která protíná nastavenou prahovou hodnotu. Prahová hodnota je doporučena $0,3 \cdot I_{diff}$ bez časového zpoždění. Pro rychlý stupeň je doporučena prahová hodnota $1,0 - 2 \cdot I_{diff}$ bez časového zpoždění. [12]



Obr. 32 - Diagram doporučeného nastavení srovnávací ochrany linky [12]

3.3.5 Rozdílová zemní ochrana

Ochranná funkce je zahrnuta v zemní ochranné funkci transformátoru podle kapitoly: [3.2.7 Rozdílová zemní ochrana](#)

3.4 Ochrany transformátoru vlastní spotřeby

3.4.1 Diferenciální ochrana

Ochranná funkce je shodná s diferenciální ochranou generátoru podle kapitoly:

[3.1.1 Diferenciální ochrana](#)

3.4.2 Nadproudová (zkratová) ochrana

Ochranná funkce je shodná s nadproudovou ochranou generátoru podle kapitoly:

[3.1.6 Nadproudová \(zkratová\) ochrana](#)

3.4.3 Nadproudová (zkratová) ochrana 1f

Ochranná funkce je shodná s nadproudovou 1f ochranou blokového transformátoru podle kapitoly: [3.2.4 Nadproudová \(zkratová\) ochrana 1f](#)

4 Zvolené parametry ochran

4.1 Ochrany generátoru

4.1.1 Nastavení diferenciální ochrany

Použitý přístrojový transformátor proudu udává převod 4000/5 A a jmenovitý proud generátoru I_n je 3850 A.

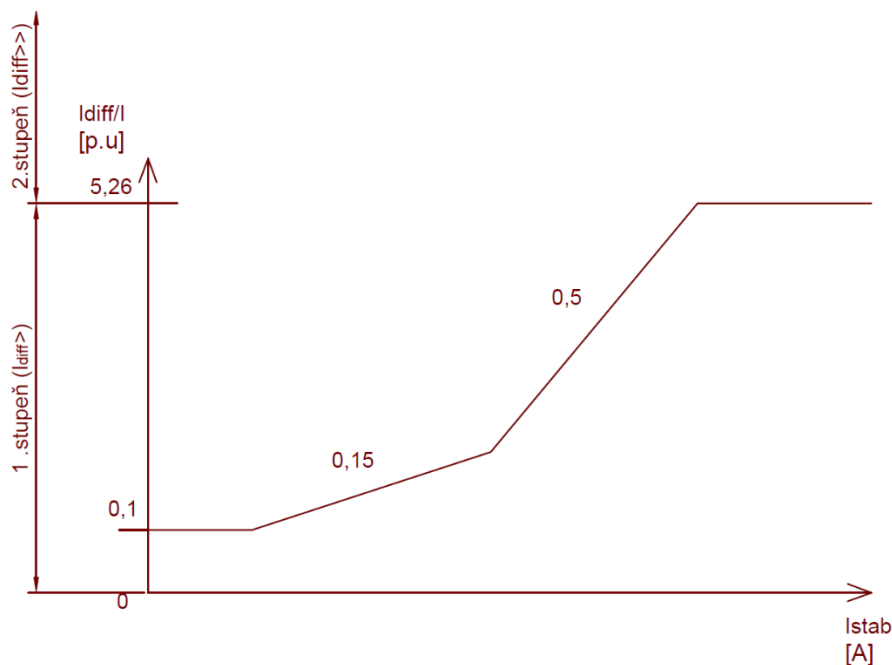
Pro první stupeň je dáno doporučené nastavení podle dokumentace 0,2 In. Pro vyšší citlivost ochrany je zvolen primární proud $0,1=385$ A, to znamená sekundární proud 0,481 A.

Při zatížení jmenovitým proudem bude odečtena hodnota rozdílového proudu a zkontroluje se odstup provozního rozdílového proudu od nastavené hodnoty.

Sklon 2. části je dle doporučení výrobce systému 0,3. Pro shodné přístrojové transformátory lze pro větší citlivost ochrany zvolit 0,15. Pro sklon 3. části je doporučena hodnota 0,7, ale zvolený sklon je opět s nižší prahovou hodnotou 0,5. [8]

Tab. 14 - Zvolené nastavení diferenciální ochrany generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení	Nastavené doby zpoždění
$I_{diff} >$	0,1-0,2 [p.u]	0,1 [p.u]	t = 0 s
Stab. charakteristika	2.část sklon 0,3 [p.u]	0,15 [p.u]	-
	3.část sklon 0,7 [p.u]	0,5 [p.u]	-
$I_{diff} >>$	$1/x_d''$ [p.u]	$1/0,19=5,26$ [p.u]	t = 0 s



Obr. 33 - Zvolený diagram diferenciální ochrany generátoru [8]

$$\text{Stabilizační proud: } I_{stab} = |I_1| + |I_2| \tag{4.1}$$

$$\text{Rozdílový (poruchový) proud: } I_{diff} = |I_1 - I_2| \tag{4.2}$$

Doporučené blokování při $4 I_n$ po 20 period. Časové zpoždění pro rozdílovou ochranu $t=0$ s, protože není důvod zpožd'ovat.[8]

4.1.2 Nastavení zemní ochrany statoru 90%

Podle manuálu výrobce Siemens je doporučena zpožděná reakce vypínacího stupně $t=0,3$ s. Zemní spojení ještě nepředstavuje bezprostřední nebezpečí pro generátor. Poruchový proud je velmi malý, pouze izolace je v případě „kovového“ spojení namáhána $\sqrt{3}U_n$ a $U=U_n$ před poruchou. Všechna zařízení se však navrhují na napětí $1,9 U_n$ právě s ohledem na zemní spojení. Časové zpoždění by mohlo být až 1,5 s. Bylo zvoleno časové zpoždění 0,3 s, které je doporučeno od výrobce ochrany Siemens.

Kontrolou netočivé složky napětí za provozu stroje by se zjistil odstup nastavené hodnoty od provozní nevyváženosti. Stálá nevyváženost generátoru se určuje měřením při uvedení generátoru do provozu a odečítá se od popudové hodnoty.

Zemní poruchy v oblasti svorek generátoru jsou detekovány především funkcí 90% statorové zemní ochrany. Na druhé straně poruchy v blízkosti zemního uzlu je možné detekovat pouze 100% zemní ochranou statoru.

Při návrhu 90% ochrany statoru je doporučena 10% hodnota prahového napětí.

Výpočet prahového napětí $U_{p10\%}$, vychází ze skutečnosti, že ochrana je připojena na přístrojový transformátor napětí zapojeného do hvězdy: [6][8]

$$U_{p10\%} = 0,1 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 0,1 \cdot \frac{100}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ V} \quad (4.3)$$

Tab. 15 - Nastavení zemní ochrany statoru 90%

	Doporučení	Skutečné nastavení
Zpožděná reakce	$t = 0,3$ s	0,3 s
Prahové napětí	$U_p = 10 \% \rightarrow 5,77$ V	$U_p = 10 \% \rightarrow 5,77$ V

4.1.3 Nastavení zemní ochrany statoru 100%

Referenční napětí je zvoleno na maximální hodnotě 200 V, aby se co nejvíce omezilo rušení. Referenční frekvence je nastavena na nejvyšší možnou hodnotu 20 Hz, aby byl získán dostatek vzorků pro bezchybné vyhodnocení. [6][8]

Tab. 16 - Nastavení zemní ochrany statoru 100%

	Doporučení	Skutečné nastavení
Referenční napětí	Max 200 V	50 V
Referenční frekvence	20 Hz	20 Hz
Odpor vypínacího stupně	1-2 k Ω , $t=1$ s	2 k Ω , $t=1$ s
Odpor výstražného stupně	3-8 k Ω , $t=10$ s	6 k Ω , $t=10$ s

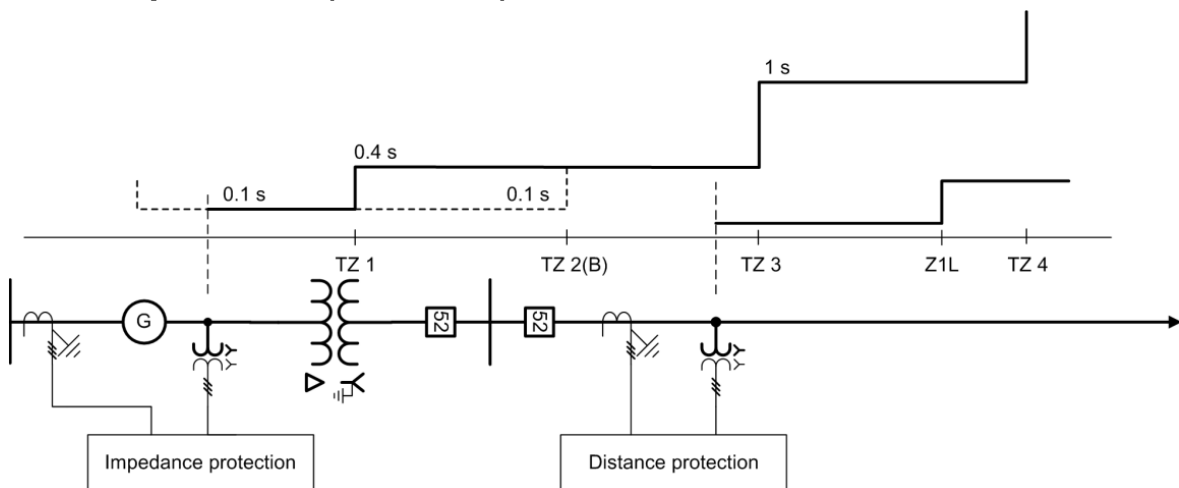
4.1.4 Zemní ochrana rotoru

Používá se pomocné napětí 40 V/50 Hz sinus nebo obdélníkové 0,5-4 Hz a jejich kombinace. Typické nastavení pro výstražný stupeň $R < 10$ k Ω s časem zpoždění $t=10$ s a pro vypínací stupeň $R < 2$ k Ω s dobou zpoždění $t=1$ s. [6][8]

Tab. 17 - Nastavení zemní ochrany rotoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Referenční napětí	Max 40 V	40 V
Referenční frekvence	0,5-4 Hz	3 Hz
Odpor vypínacího stupně	2-5 k Ω , $t=0,5-2$ s	2 k Ω , $t=1$ s
Odpor výstražného stupně	5-10 k Ω , $t=5-10$ s	10 k Ω $t=10$ s

4.1.5 Impedanční (distanční) ochrana



Obr. 34 - Schéma nastavení impedanční ochrany[8]

4.1.5.1 Parametry transformátoru

$u_k = 14 \%$
 $S_N = 110 \text{ MVA}$
 $U_N = 15 \text{ kV}$

4.1.5.2 Zóna Z1

Pro zónu 1 impedanční ochrany bylo zvoleno dle doporučení výrobce Siemens 70% napětí nakrátko blokového transformátoru a časové zpoždění 0 s. [6][8]

$$Z1_{prim} = 0,7 \cdot Z_{Tr} = \frac{70}{100} \cdot \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{70}{100} \cdot \frac{14}{100} \cdot \frac{15^2}{110} = 0,201 \Omega \quad (4.4)$$

$$Z1_{secondary} = \frac{4000/5}{15000/100} \cdot 0,201 = 1,072 \Omega \quad (4.5)$$

$$t_1 = 0 \text{ s} \quad (4.6)$$

4.1.5.3 Zóna Z2B

Pokud není připojený generátor na síti, doba zpoždění $t_{2B} = 0 \text{ s}$ a 200 % napětí nakrátko blokového transformátoru. [6][8]

4.1.5.4 Zóna Z2

Pro druhou zónu (v případě připojeného generátoru) bylo zvoleno 100% napětí nakrátko blokového transformátoru a časové zpoždění 500 ms, aby nedocházelo k působení na zkrat na lince. [6][8]

$$Z2_{prim} = 1 \cdot Z_{Tr} = 1 \cdot \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 1 \cdot \frac{14}{100} \cdot \frac{15^2}{110} = 0,286 \Omega \quad (4.7)$$

$$Z2_{secondary} = \frac{4000/5}{15000/100} \cdot 0,286 = 1,525 \Omega \quad (4.8)$$

$$t_2 = 0,5 \text{ s} \quad (4.9)$$

4.1.5.5 Zóna Z3

Pro třetí zónu bylo zvoleno 120% napětí nakrátko blokového transformátoru a časové zpoždění 1,5 s. [6][8]

$$Z3_{prim} = 1,2 \cdot Z_{Tr} = 1,2 \cdot \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 1,2 \cdot \frac{14}{100} \cdot \frac{15^2}{110} = 0,344 \Omega \quad (4.10)$$

$$Z3_{secondary} = \frac{4000/5}{15000/100} \cdot 0,344 = 1,835 \Omega \quad (4.11)$$

$$t_2 = 1,5 \text{ s} \quad (4.12)$$

Tab. 18 - Nastavení impedanční ochrany generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Zóna Z1	$U_k=70 \%$, $t=0 \text{ s}$	$U_k=70 \%$, $t=0 \text{ s}$
Zóna Z1B	$U_k=100 \%$, $t=0 \text{ s}$	$U_k=100 \%$, $t=0 \text{ s}$
Zóna Z2	$U_k=120 \%$	$U_k=120 \%$, $t=0,5 \text{ s}$
Zóna Z3	$U_k=120 \%$	$U_k=120 \%$, $t=1,5 \text{ s}$
Rozběhový proud	1,2 In	1,2In

4.1.6 Nadproudová ochrana generátoru s podpětovou přídrží

Proud je sledován v uzlu generátoru a napětí na svorkách generátoru, aby při zkratu na vývodu bylo možné detekovat poruchu, i když generátor není připojený k síti.

Hodnota nadproudu se pohybuje v rozmezí 1,2-1,5 In stroje a podpětová přídrží přibližně 0,8 U_n stroje. Hodnotu nadproudu byla zvolena 1,2 In pro zajištění včasného vypnutí. Při náhlém nadproudu poklesne napětí a to ukazuje na poruchu. Když poté proud klesne pod rozběhovou hodnotu, ale napětí nevzroste, znamená to, že porucha s největší pravděpodobností stále trvá, ale z důvodu poklesu napětí není dostatečný výkon pro buzení a generátor tedy neudrží poruchový proud. Na Orlíku je použito nepřímé buzení se stejnosměrným budičem na hřídeli. Generátor s tímto způsobem buzení tedy není na popsany děj tak náchylný, přesto se podpětová přídrží používá. [6][8]

Tab. 19 - Nastavení nadproudové ochrany generátoru s podpětovou přídrží

	Doporučení	Skutečné nastavení
Prahový proud	(1,2-1,5 In) 1,35 In	1,2 In
Prahové napětí	80 %	80 %
Časové zpoždění	závislé na selektivitě	2 s

4.1.7 Směrová nadproudová (zkratová) ochrana generátoru

Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové a impedanční ochrany generátoru. Ochrana je směrovaná do generátoru. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě nadřazených ochran. [6][8]

Tab. 20 - Směrová nadproudová ochrana generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Prahový proud	(1,2-1,5 In) 1,35 In	1,4 In
Časové zpoždění	0,3 s	0,2 s

4.1.8 Přepět'ová ochrana generátoru

Od výrobce Siemens je doporučena a nastavená ve výchozím stavu standardní metoda měření, která nepočítá s vyššími harmonickými a s náhlým přepětím. Dále je doporučeno měření sdruženého napětí „phase to phase“ a prahové napětí 110-115 %. Provozní zpoždění musí být nastaveno podle aktuální aplikace. Nejvíce závisí na rychlosti reakce regulátoru. Doba zpoždění se obvykle pohybuje od 1,5-5 s. Ve výchozím nastavení je doba zpoždění 3 s. [6][8]

Tab. 21 - Nastavení přepět'ové ochrany generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	1,1Un, t=1,5-5 s	1,1Un, t=3 s
2. stupeň	1,3Un, t=0-0,2 s	1,3Un, t=0,1 s

4.1.9 Ochrana přebuzení generátoru

Ochrana při přebuzení se používá pro detekci vysokých indukčních hodnot v generátorech a transformátorech. Chrání zařízení před nadměrným tepelným zatížením. Indukce se zaznamenává nepřímou analýzou poměru U/f. Přepětí vede k nadměrným magnetizačním proudům, zatímco nedostatečná frekvence vede k vyšším ztrátám při obnově magnetizace.

Ochrana přebuzení slouží v případě, kdy dojde k náhlému odlehčení s nárůstem otáček. Tento případ nastává v případě poruchy a následného odpojení sítě VVN (ZVN), kdy je potřeba rychlé reakce regulátoru. Další případ, kdy může dojít k přebuzení, je při rozběhu generátoru v případě, že by došlo k nafázování ve chvíli, kdy ještě není generátor roztočený na jmenovité otáčky. [6][8]

Tab. 22 - Nastavení přebuzení generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$\frac{U}{f} > 1,1$; t=10 s	$\frac{U}{f} > 1,1$; t=10 s
2. stupeň	$\frac{U}{f} > 1,4$; t=1 s	$\frac{U}{f} > 1,4$; t=1 s

4.1.10 Ochrana podbuzení generátoru

V případě, kdy dojde ke ztrátě buzení a zároveň ztrátě napětí, dojde k vypnutí okamžitě. Dovolný rozsah napětí je od 0,9 do 1,05 Un. Pokud ale dojde ke ztrátě buzení při udržení napětí, sleduje se mezní hodnota podbuzení. Při uzavření rychlouzávěru v době odpojené sítě dojde ke klesání otáček soustrojí, ale napětí generátoru je udržováno regulátorem, čímž vniká nežádoucí stav pro vlastní spotřebu. Generátor je odpojen od sítě a nemůže tedy nastat zpětný tok výkonu, na který reaguje zpětná wattová ochrana. Ochrana podbuzení zajišťuje po uzavření rychlouzávěru odbuzení a vypnutí generátoru. [6][8]

Tab. 23 - Nastavení ochrany podbuzení generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. křivka	$\frac{1}{X_d} \cdot 1,05$, úhel 60-80°, t=1 s	$\frac{1}{X_d} \cdot 1,427$, úhel 40°, t=1 s
2. křivka	$\frac{1}{X_d} \cdot 0,9$, úhel 90°, t=1 s	$\frac{1}{X_d} \cdot 0,646$, úhel 90°, t=1 s

Nastavení podle obecného doporučení:

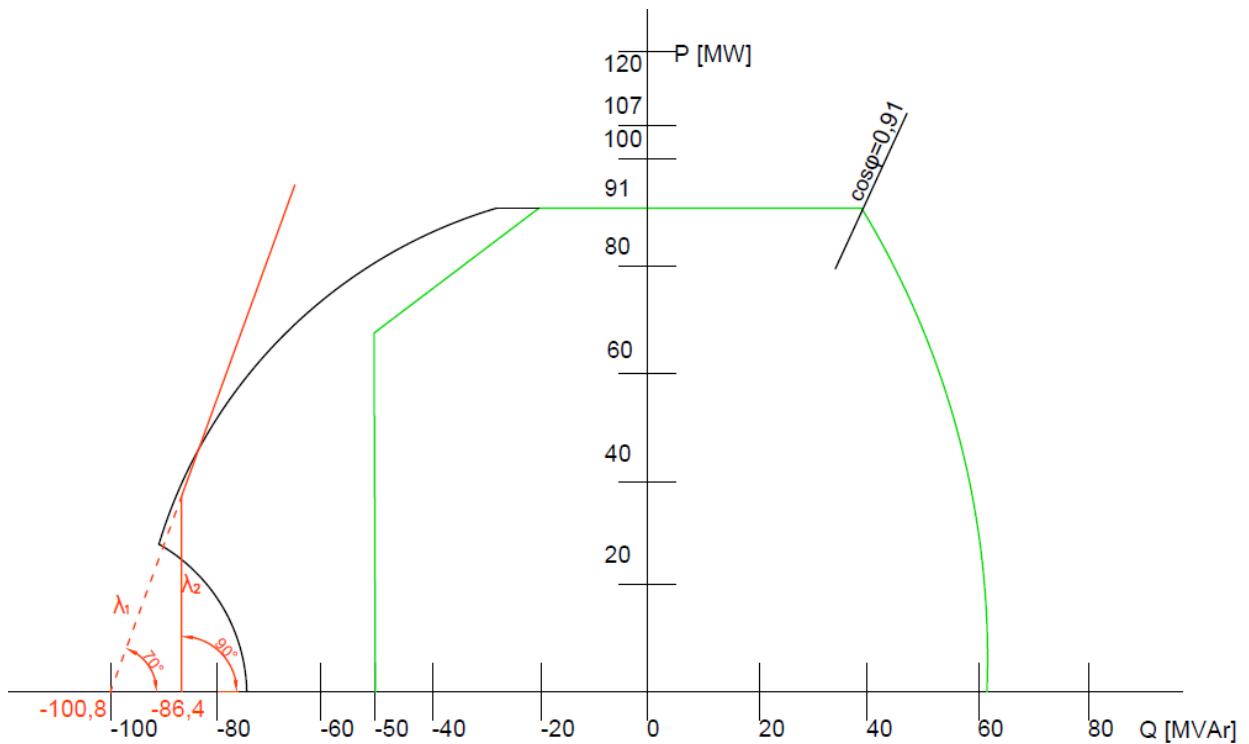
$$\frac{1}{x_{dsec}} = \frac{1}{x_d} \cdot \frac{I_{Nprim}}{U_{Nprim}} \cdot \frac{U_{Nprim}}{I_{Nprim}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3850}{15000} \cdot \frac{15000}{4000} = 0,96 \quad (4.13)$$

$$\text{Doporučená charakteristika 1: } \lambda_1 = \frac{1}{x_{dsec}} \cdot 1,05 = 0,96 \cdot 1,05 = 1,008 \quad (4.14)$$

$$\text{Doporučená charakteristika 2: } \lambda_2 = \frac{1}{x_{dsec}} \cdot 0,9 = 0,96 \cdot 0,9 = 0,864 \quad (4.15)$$

Tab. 24 - Výsledný odstup mezní charakteristiky podbuzení podle doporučení

Odstup meze ochrany od prac. charakteristiky	Při výkonu P
39,8 %	25 %
39,8 %	50 %
40 %	75 %
63,1 %	100 %



Obr. 35 - Nastavení meze podbuzení podle doporučení [6]

Po ověření doporučeného nastavení v PQ diagramu použitého generátoru je zřejmé, že limitní mez má příliš velký odstup od provozního stabilního stavu a zasahuje už přes minimální oblast buzení použitého stroje. Z toho důvodu bylo skutečné nastavení pomocí grafické metody zvoleno následovně:

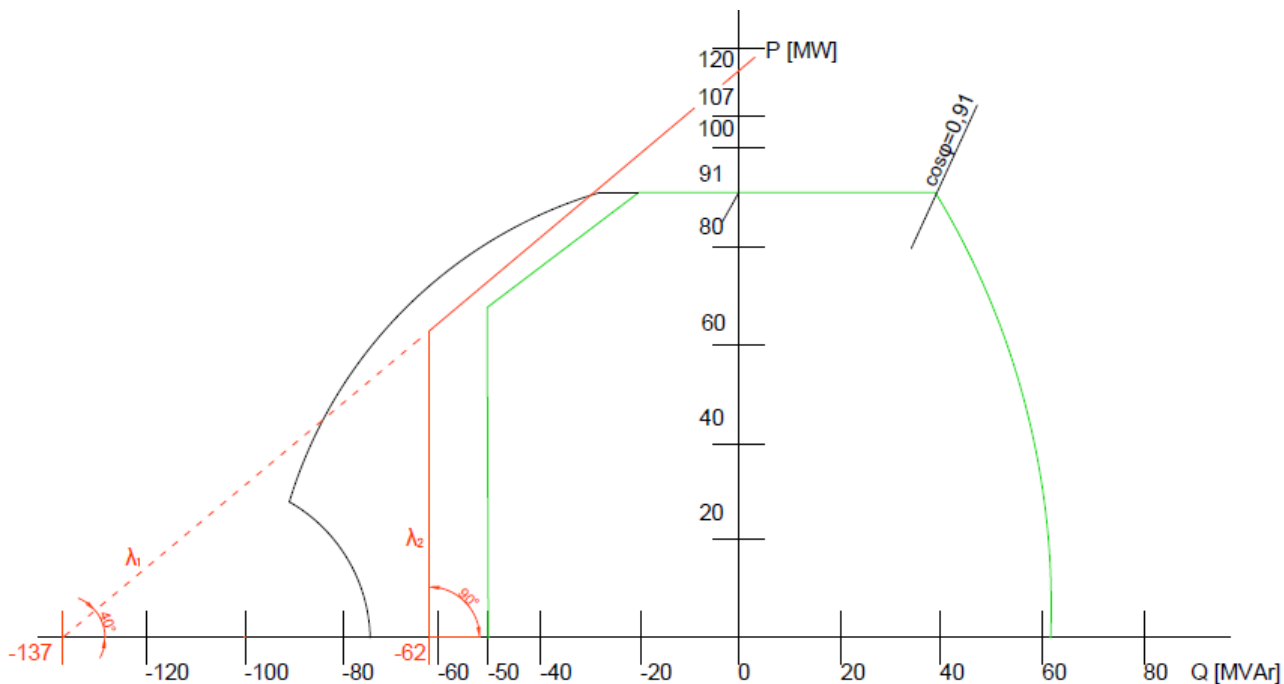
$$\frac{1}{x_{dsec}} = \frac{1}{x_d} \cdot \frac{I_{Nprim}}{U_{Nprim}} \cdot \frac{U_{Nprim}}{I_{Nprim}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3850}{15000} \cdot \frac{15000}{4000} = 0,96 \quad (4.16)$$

$$\text{Zvolená charakteristika 1: } \lambda_1 = \frac{1}{x_{dsec}} \cdot 1,406 = 0,96 \cdot 1,427 = 1,37 \quad (4.17)$$

$$\text{Zvolená charakteristika 2: } \lambda_2 = \frac{1}{x_{dsec}} \cdot 0,573 = 0,96 \cdot 0,646 = 0,62 \quad (4.18)$$

Tab. 25 - Výsledný odstup mezní charakteristiky podbuzení podle zvoleného nastavení

Odstup meze ochrany od prac. charakteristiky	Při výkonu P
14,4 %	25 %
14,4 %	50 %
13,1 %	75 %
14,7 %	100 %



Obr. 36 - Nastavení meze podbuzení podle zvoleného nastavení [6]

4.1.11 Ochrana nadfrekvence generátoru

Překročení rychlosti může být způsobeno odlehčením zátěže nebo narušením regulace otáček. Ochrana vyhodnocuje ze vzorků napětí změnu fázového posunu a tím i změnu frekvence. [13]

Tab. 26 - Nastavení ochrany nadfrekvence generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$f > 1,03$ (51,5Hz); $t=20$ s	$f > 1,03$ (51,5Hz); $t=10$ s
2. stupeň	$f > 1,08$ (54Hz); $t=5$ s	$f > 1,08$ (54Hz); $t=1$ s

4.1.12 Ochrana podfrekvence generátoru

Ochrana při nedostatečné frekvenci poskytuje další ochranu turbíny. Jejím úkolem je zajistit požadavek systému elektrárny včasným odpojením od sítě, do které generátor dodává energii. Po odpojení by měl nastavit regulátor generátorovou jednotku na jmenovité otáčky. [13]

Tab. 27 - Nastavení ochrany podfrekvence generátoru

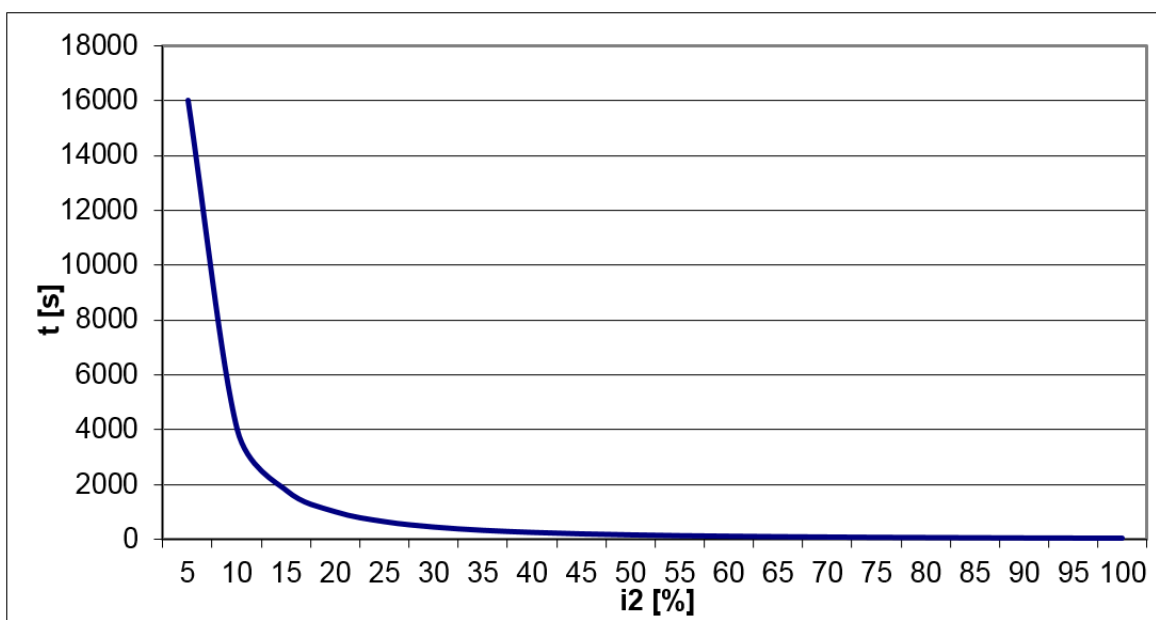
	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň upozorňující	$f < 0,996$ (49,80Hz); $t=10$ s	$f < 0,996$ (49,80Hz); $t=10$ s
2. stupeň odpojení od sítě	$f < 0,95$ (47,50Hz); $t=10$ s	$f < 0,95$ (47,50Hz); $t=1$ s
3. stupeň vypnutí	$f < 0,94$ (47Hz); $t=20$ s	$f < 0,94$ (47Hz); $t=10$ s

4.1.13 Ochrana nesymetrického zatížení

Nesymetrie vzniká vlivem zkratů, přerušení fází, nesymetrických zátěží a vlastní nesymetrií stroje. Při zkouškách uvedení generátoru do provozu se změří trvalá nesymetrie a odečte se od popudové hodnoty. Nesymetrie způsobuje nadměrné namáhání rotoru a amortizéru. Pro vyhodnocení nesymetrie se vyhodnocuje zpětná složka proudu i_2 . Obecně trvale přípustná hodnota pro generátor $i_2=6-12\% I_n$. Pro použitý generátor vodního díla Orlik trvale přípustná hodnota maximálně 8 %.

Byly zvoleny tři ochranné stupně. Jeden výstražný stupeň s dobou zpoždění 20 s a hodnotou $i_2=8\%$. Druhý stupeň s časově závislou charakteristikou podle vztahu (4.19) s definovanou konstantou $K=40$ s. Třetí rychlý stupeň s dobou zpoždění 2 s a prahovou hodnotou $i_2=50\% I_n$. [6][8]

$$K > i_2^2 \cdot t \quad (4.19)$$



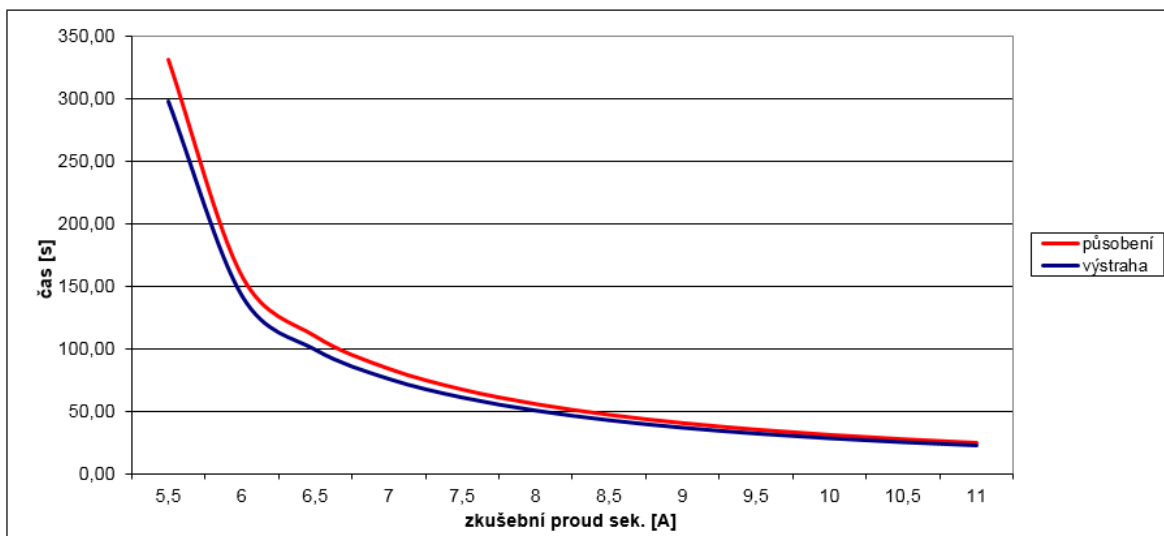
Obr. 37 - Časově závislá charakteristika ochrany nesymetrie [6]

Tab. 28 - Nastavení ochrany nesymetrického zatížení generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň výstražný	$i_2=6-8\%$; $t=15-20$ s	$i_2=8\%$; $t=20$ s
2. stupeň čas. záv. char.	$K > i_2^2 \cdot t$; $K=40$ s	$K > i_2^2 \cdot t$; $K=40$ s
3. stupeň odpojení od sítě	$i_2/I_n=50-70\%$; $t=2$ s	$i_2/I_n=50\%$; $t=2$ s

4.1.14 Tepelná ochrana

Ochrana při přetížení vychází z uloženého modelu pro daný generátor a z měřeného třífázového proudu se vypočítává oteplení. Ochrana je definována charakteristickou křivkou. Nejpomalejší reakce je při hodnotě $1,1 I_n$ s časem 330 s a při více než $3 I_n$ je doba reakce 25 s. [6][8]



Obr. 38 - Charakteristika tepelného modelu generátoru [6]

Tab. 29 - Nastavení ochrany tepelného přetížení generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Výstražný stupeň	90 % z definované křivky	90 % z definované křivky
Nejpmalejší reakce	Při $I=1,1I_n \rightarrow t=300-600$ s	Při $I=1,1I_n \rightarrow t=330$ s
Nejrychlejší reakce	Při $I=3I_n \rightarrow t=10-25$ s	Při $I=3I_n \rightarrow t=25$ s

4.1.15 Ochrana selhání vypínače generátoru

Funkce ochrany při selhání vypínače sleduje vypínání přidružených vypínačů a generuje záložní vypínací signál, pokud dojde k selhání vypínače.

V případě, že dojde k selhání vypínače některého z generátorů, je zapotřebí odpojení druhého generátoru a odpojení blokového transformátoru k lince do transformovny Milín. Jakmile dojde k pokynu vypnutí vypínače, sleduje se, zda proud vypínačem zanikl.

Od výrobce Siemens je doporučeno sledování aktuálního proudu 25 % jmenovitého proudu. Dále je možná funkce pokusu opětovného vypnutí vypínače s dobou zpoždění t_1 . [8]

Tab. 30 - Nastavení ochrany selhání vypínače generátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Interní ochrana pro aktuální proud	$0,5I''_{K,min}$	Nepoužívá se
Doba zpoždění pro opětovné vypnutí t_1	$t_1=65$ ms	Nepoužívá se
Doba zpoždění pro reakci nadřazených vypínačů t_2	$t_2=130$ ms	$t_2=130$ ms
Prahová hodnota úspěšného vypnutí	$I_p=0,25 I_n$	$I_p=0,25 I_n$

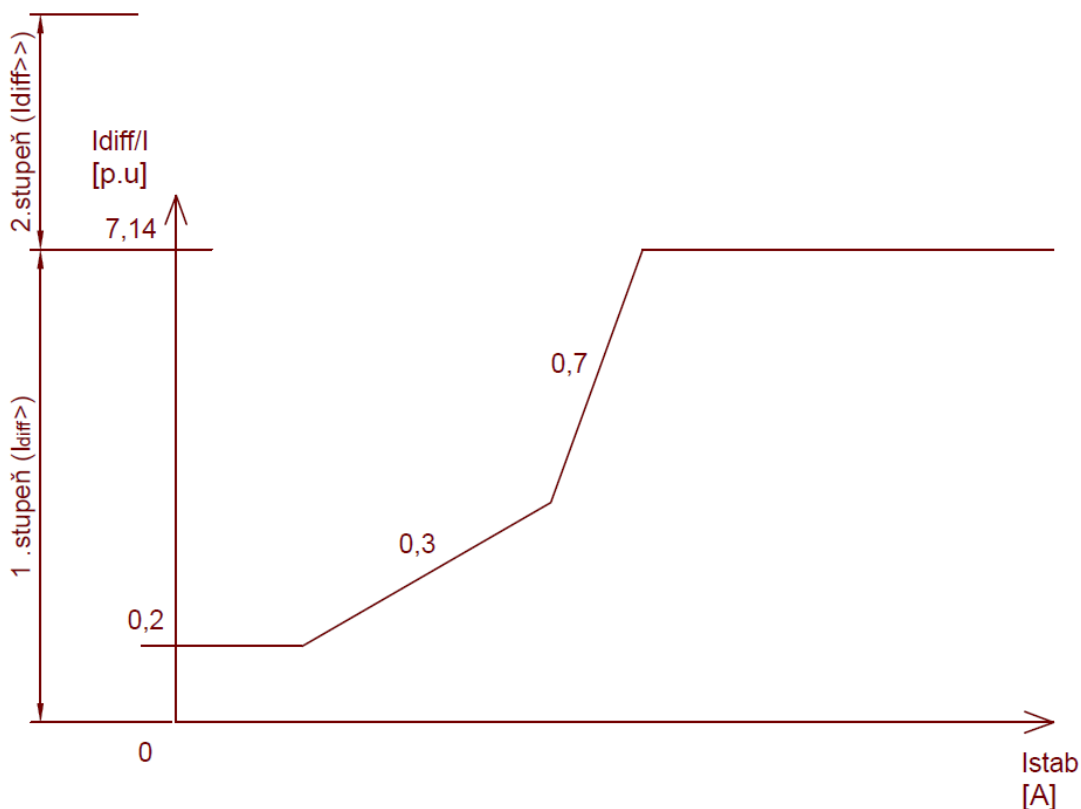
4.2 Ochrany blokového transformátoru

4.2.1 Diferenciální ochrana

Pro první stupeň je dáno doporučené nastavení podle dokumentace 0,2 In. Při zatížení jmenovitým proudem bude odečtena hodnota rozdílového proudu a zkontroluje se odstup provozního rozdílového proudu od nastavené hodnoty. Sklon 2. části je dle doporučení výrobce systému 0,3. Pro sklon 3. části je doporučená hodnota 0,7. Časové zpoždění pro rozdílovou ochranu $t=0$ s, protože není důvod zpoždovat. [6][9]

Tab. 31 - Nastavení diferenciální ochrany blokového transformátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení	Nastavené doby zpoždění
$I_{diff} >$	0,2 [p.u]	0,2 [p.u]	$t = 0$ s
Stab. charakteristika	2.část sklon 0,3 [p.u]	0,3 [p.u]	-
	3.část sklon 0,7 [p.u]	0,7 [p.u]	-
$I_{diff} >>$	$1/u_k$ [p.u]	$1/0,14=7,14$ [p.u]	$t = 0$ s



Obr. 39 - Charakteristika diferenciální ochrany transformátoru [9]

$$\text{Stabilizační proud: } I_{stab} = |I_1| + |I_2| \quad (4.20)$$

$$\text{Rozdílový (poruchový) proud: } I_{diff} = |I_1 - I_2| \quad (4.21)$$

4.2.2 Impedanční (distanční) ochrana

Je zahrnuta v impedanční ochraně generátoru podle kapitoly [4.1.5 Impedanční ochrana](#) a ochraně linky podle kapitoly [4.3.1 Impedanční \(distanční\) ochrana linky](#).

4.2.3 Nadproudová (zkratová) ochrana

Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové a impedanční ochrany transformátoru. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě nadřazených ochran.

Tab. 32 - Nastavení nadproudové ochrany blokového transformátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$1,5I_n, t=0,3 \text{ s}$	$1,4I_n, t=2 \text{ s}$
2. stupeň	$10I_n, t=0 \text{ s}$	$7I_n, t=0,2 \text{ s}$

4.2.4 Nadproudová (zkratová) ochrana 1f

Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové a impedanční ochrany transformátoru. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě nadřazených ochran.

Tab. 33 - Nastavení 1f nadproudové ochrany blokového transformátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$1,2I_n, t=0,3 \text{ s}$	$1,2I_n, t=2 \text{ s}$
2. stupeň	$10I_n, t=0 \text{ s}$	$7I_n, t=0,1 \text{ s}$

4.2.5 Nádobová ochrana transformátoru

Nádobová ochrana má za úkol detekovat přeskoky přes VVN/VN průchodky na nádobu nebo mezi vinutím a rámem transformátoru.

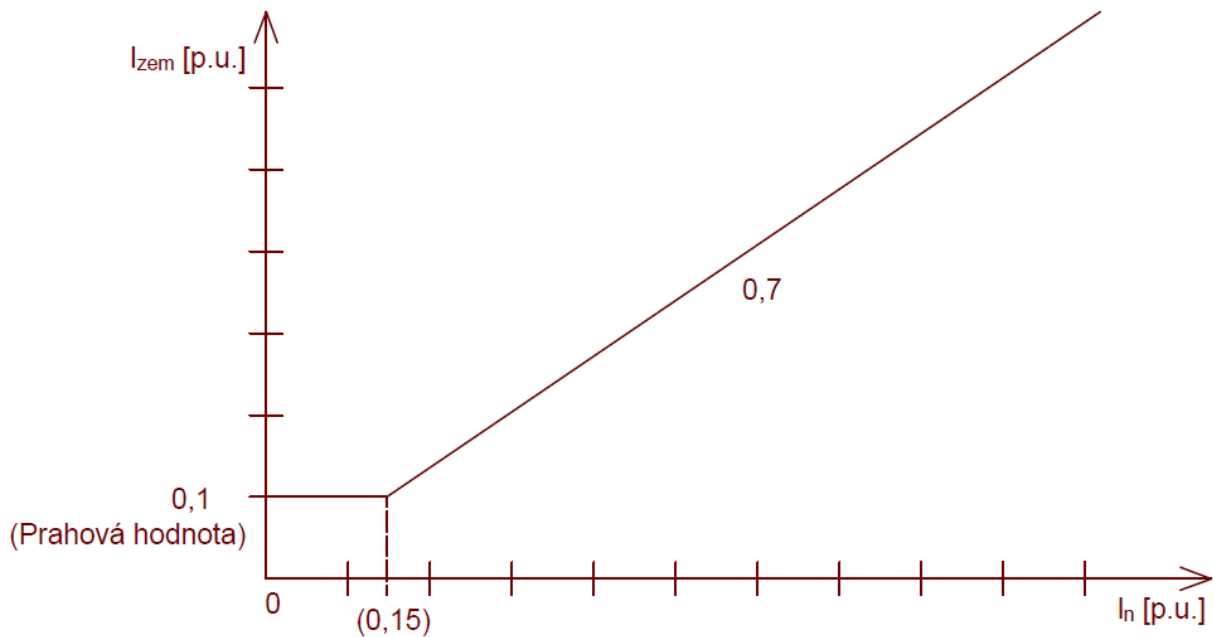
Vzhledem k malé citlivosti použitého průvlekového přístrojového transformátoru proudu se měření malých proudů do 1000 mA nevyužije a je použita jen nadproudová ochrana. Pro nádobovou ochranu je na Orlíku použit přístrojový transformátor proudu s $I_n 200 \text{ A}$ na primární straně. Vzhledem k jmenovitému proudu blokového transformátoru 524 A je doporučena hodnota $0,9I_n$ průvlekového transformátoru. Zpoždění není potřeba. [6][9]

Tab. 34 - Nastavení nádobové ochrany blokového transformátoru

	Doporučení	Skutečné nastavení
Ochrana nadproudu	$0,9I_n\text{-PTP}, t=0 \text{ s}$	$0,9I_n\text{-PTP}, t=0 \text{ s}$
Malé poruchové proudy	10-1000 mA	Nepoužívá se

4.2.6 Rozdílová zemní ochrana

Doporučený prahový proud se pohybuje v rozmezí od 0,05 až $2 I_n$ se sklonem 0,7 podle charakteristiky na Obr. 40. [10]



Obr. 40 - Charakteristika nastavení rozdílové zemní ochrany [12]

Tab. 35 - Nastavení rozdílové zemní ochrany

	Doporučení	Skutečné nastavení
Prahová hodnota	$I_p=0,05-2.I_n$	$I_p=0,1.I_n$
Sklon charakteristiky	0,7	0,7

4.3 Ochrany linky

4.3.1 Impedanční (distanční) ochrana linky

Tato impedanční ochrana je připojena za blokovým transformátorem na napěťové hladině 220 kV. Při zapůsobení ochrany dojde k vypnutí vypínače linky v rozvodně Milín, vypínačů obou generátorů a transformátoru vlastní spotřeby. [6][10]

4.3.1.1 Parametry blokového transformátoru

$$u_k = 14 \% \quad (4.22)$$

$$S_N = 220 \text{ MVA} \quad (4.23)$$

$$U_{N3f} = 220 \text{ kV} \quad (4.24)$$

$$U_{N1f} = 127 \text{ kV} \quad (4.25)$$

$$\text{převod } 242/15 \text{ kV} \quad (4.26)$$

4.3.1.2 Parametry přístrojových transformátorů na hladině 220 kV

Napěťový měnič s převodem 220/0,1 kV

Proudový měnič s převodem 600/5 A

4.3.1.3 Zóna Z1 – ochrana směřovaná do blokového transformátoru

Pro zónu 1 impedanční ochrany bylo zvoleno podle doporučení výrobce 70% napětí nakrátko blokového transformátoru a časové zpoždění 0 s. [6][10]

Činný odpor transformátoru je oproti jeho reaktanci téměř zanedbatelný. Odpor poruchy nelze vzhledem k jeho velké proměnlivosti odhadnout. Z toho důvodu budou zóna Z1 a Z2 nastaveny pomocí reaktanční složky a čtvercové charakteristiky.

$$\begin{aligned} Z_{13fprim} = 0,7 \cdot (X_{Tr}) &= \frac{70}{100} \cdot \left(j \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \right) \\ &= \frac{70}{100} \cdot \left(j \frac{14}{100} \cdot \frac{220^2}{220} \right) = j21,56 \Omega \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$Z_{13fsecondary} = \frac{600/5}{220000/100} \cdot j21,56 = j1,18 \Omega \quad (4.28)$$

Jednofázový zkrat se za blokovým transformátorem vzhledem k zapojení do trojúhelníku přemění na dvoufázový.

$$Z_{12fprim} = 0,7 \cdot (X_{Tr}) = \frac{70}{100} \cdot (2 \cdot X_{Tr}) = \frac{70}{100} \cdot (2 \cdot j21,56) = j30,18 \Omega \quad (4.29)$$

$$Z_{12fsecondary} = \frac{600/5}{220000/100} \cdot j30,18 = j1,65 \Omega \quad (4.30)$$

$$t_1 = 0 \text{ s} \quad (4.31)$$

4.3.1.4 Zóna Z2 - ochrana směrovaná do blokového transformátoru

Pro druhou zónu bylo zvoleno 120% napětí nakrátko blokového transformátoru a časové zpoždění 500 ms, aby zasahovala i přes vnitřní část elektrárny. [6][10]

$$Z_{2prim} = 1,2 \cdot X_{Tr} = 1,2 \cdot j \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 1,2 \cdot j \frac{14}{100} \cdot \frac{220^2}{220} = j36,96 \Omega \quad (4.32)$$

$$Z_{2secondary} = \frac{600/5}{220000/100} \cdot j36,96 = j2,02 \Omega \quad (4.33)$$

Jednofázový zkrat se za blokovým transformátorem vzhledem k zapojení do trojúhelníku změní na dvoufázový.

$$Z_{22fprim} = 1,2 \cdot X_{Tr} = 1,2 \cdot (2 \cdot X_{Tr}) = 1,2 \cdot 2 \cdot j36,96 = j88,70 \Omega \quad (4.34)$$

$$Z_{12fsecondary} = \frac{600/5}{220000/100} \cdot j88,70 = j4,84 \Omega \quad (4.35)$$

$$t_2 = 0,5 \text{ s} \quad (4.36)$$

4.3.1.5 Zóna Z3 – ochrana směrovaná do linky

Zónou Z3 a Z4 je zajištěna ochrana při poruše na lince do Trmil, která při zapůsobení reaguje na vypínač blokového transformátoru.

4.3.1.6 Parametry vedení V001 a V002

Pro délku vedení 1 km:

$$Z_1 = 0,0786 + j0,466 \Omega; Z_0 = 0,4182 + j1,174 \Omega \quad (4.37)$$

Parametry vedení o délce $l=8,92$ km:

$$Z_{L1} = 0,70 + j4,16 \Omega \rightarrow |Z_{L1}| = \sqrt{0,7^2 + j4,16^2} = 4,22 \Omega \quad (4.38)$$

$$Z_{L0} = 3,73 + j10,47 \Omega \rightarrow |Z_{L0}| = \sqrt{3,73^2 + j10,47^2} = 11,12 \Omega \quad (4.39)$$

$$\text{Pro ochranu linky je nutné uvažovat odpor poruchy } R_p = 20 \Omega \quad (4.40)$$

4.3.1.6.1 Výpočet

$$Z_{33fprim} = \frac{70}{100} \cdot (Z_L + R_p) = \frac{70}{100} \cdot (0,7 + j4,16 + 20) = 14,49 + j2,91 \Omega \quad (4.41)$$

$$Z_{33fsecondary} = \frac{\frac{600}{5}}{\frac{220000}{100}} \cdot (14,49 + j2,91) = 0,79 + j0,16 \Omega \quad (4.42)$$

$$Z_{31fprim} = 0,7 \cdot (Z_L + R_p) \cdot \left(2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1} + R_p} \right) = 0,7 \cdot (0,7 + j4,16 + 20) \cdot \left(2 + \frac{3,73 + j10,47}{0,7 + j4,16 + 20} \right) = 31,59 + j13,15 \Omega \quad (4.43)$$

$$Z_{31fsecondary} = \frac{\frac{600}{5}}{\frac{220000}{100}} \cdot (31,59 + j13,15) = 1,72 + j0,72 \Omega \quad (4.44)$$

$$t = 0 \text{ s} \quad (4.45)$$

4.3.1.7 Zóna Z4 – ochrana směřovaná do linky

$$Z_{4_{3fprim}} = 1 \cdot (Z_L + R_p) = 1 \cdot (0,7 + j4,16 + 20) = 20,7 + j4,16 \Omega \quad (4.46)$$

$$Z_{4_{3fsecondary}} = \frac{\frac{600}{220000}}{100} \cdot (20,7 + j4,16) = 1,13 + j0,23 \Omega \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} Z_{4_{1fprim}} &= 1 \cdot (Z_L + R_p) \cdot \left(2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1} + R_p} \right) = \\ &= 1 \cdot (0,7 + j4,16 + 20) \cdot \left(2 + \frac{3,73 + j10,47}{0,7 + j4,16 + 20} \right) = \\ &= 45,13 + j18,79 \Omega \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$Z_{4_{1fsecondary}} = \frac{600/5}{220000/100} \cdot 45,13 + j18,79 = 2,46 + j1,03 \Omega \quad (4.49)$$

$$t = 0,5 \text{ s} \quad (4.50)$$

Tab. 36 - Nastavení impedanční ochrany linky

	Doporučení	Skutečné nastavení
Zóna Z1 – směr do trans.	$U_k=70 \%$, $t=0 \text{ s}$	$U_k=70 \%$, $t=0 \text{ s}$
Zóna Z2 – směr do trans.	$U_k=120 \%$	$U_k=120 \%$, $t=0,5 \text{ s}$
Zóna Z3 – směr do linky	$U_k=70-80 \%$	$U_k=70 \%$, $t=0 \text{ s}$
Zóna Z4 – směr do linky	$U_k=100-120 \%$	$U_k=100 \%$, $t=0,5 \text{ s}$
Rozběhový proud	Neuvažuje se	Neuvažuje se

4.3.2 Nadproudová ochrana linky

Slouží jako záložní ochrana pro impedanční ochranu. Zatímco impedanční ochrana může správně fungovat pouze, pokud jsou k dispozici měřené signály napětí, nouzová nadproudová ochrana vyžaduje pouze proudy. Funkce nouzového nadproudu je automaticky aktivována při ztrátě signálu měřeného napětí, např. v důsledku zkratu nebo přerušení sekundárních obvodů transformátoru napětí (nouzový provoz). [6][12]

Tab. 37 - Nastavení nadproudové ochrany linky

	Doporučení	Skutečné nastavení
Prahový proud	1,1 In	1,1 In
Časové zpoždění	V závislosti na selektivitě	0,7 s

4.3.3 Nadproudová 1 fázová ochrana linky

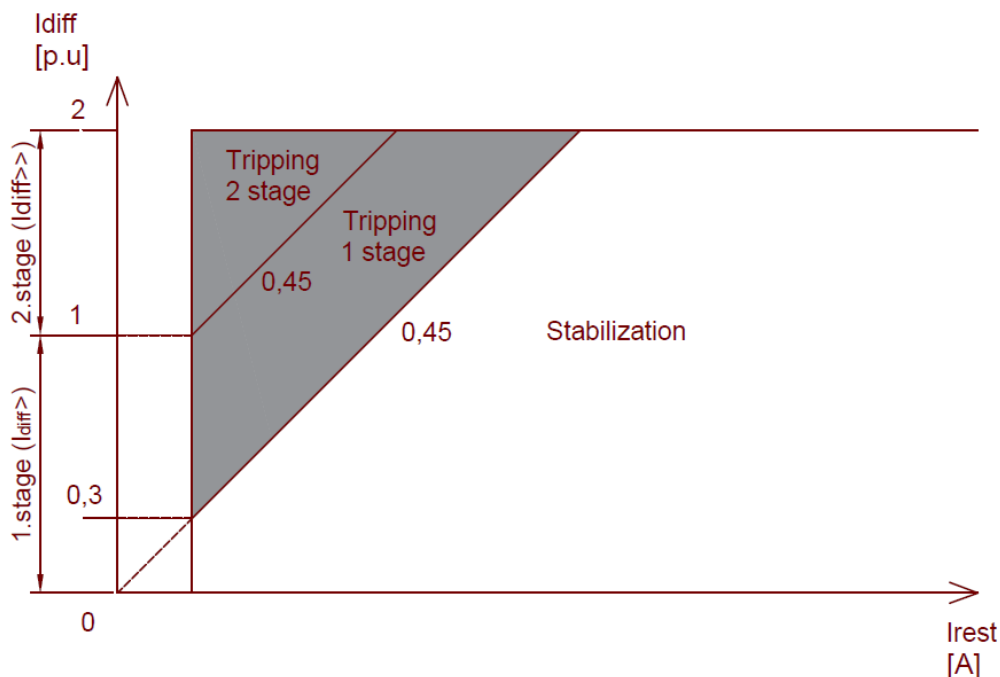
Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové a impedanční ochrany linky. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě nadřazených ochran. [6][12]

Tab. 38 - Nastavení 1f nadproudové ochrany linky

	Doporučení	Skutečné nastavení
Prahový proud	1,2 In	1,2 In
Časové zpoždění	V závislosti na selektivitě	0,7 s

4.3.4 Srovnávací ochrana linky

Srovnávací ochrana je méně citlivá než rozdílová ochrana, ale její výhodou je rychlost reakce a nedochází u ní ke ztrátám v přenosu mezi vyhodnocovacími zařízeními ani na delší vzdálenosti. Je vhodná pro ochranu linek a jejich přidružených transformátorů. Porovnává pouze fázový posuv proudů chráněného objektu na obou koncích. Charakteristická křivka je dána sklonem 45°. Prahová hodnota pro první stupeň je doporučena 0,3·I_{diff} bez zpoždění a pro druhý stupeň 1-2·I_{diff} bez zpoždění. [6][12]



Obr. 41 - Charakteristika nastavení srovnávací zemní ochrany [12]

Tab. 39 - Nastavení srovnávací ochrany linky

	Doporučení	Skutečné nastavení	Nastavené doby zpoždění
I _{diff} >	0,3 [p.u]	0,3 [p.u]	t = 0 s
I _{diff} >>	1-2 [p.u]	1 [p.u]	t = 0 s

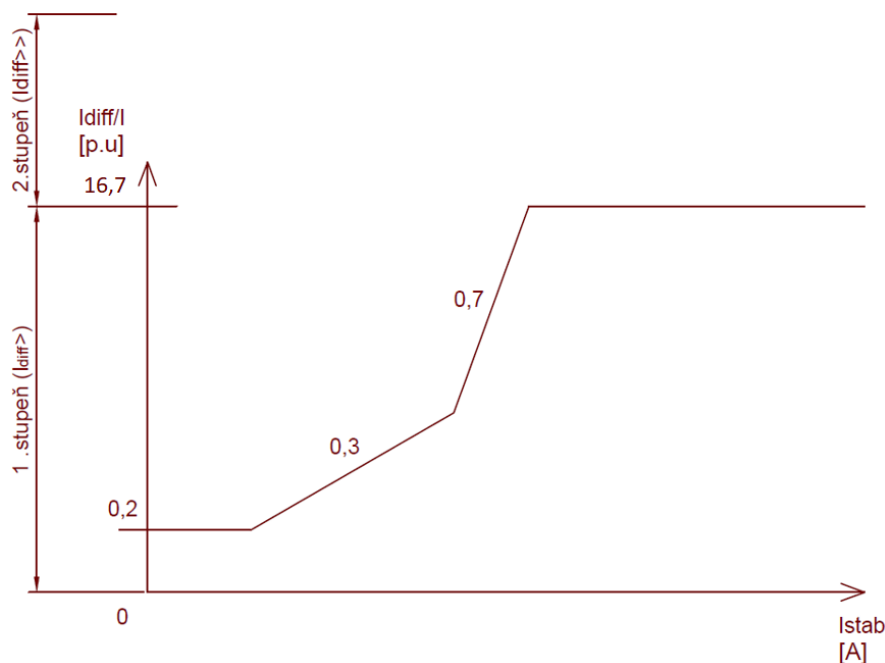
4.5 Ochrany transformátoru vlastní spotřeby

4.5.1 Diferenciální ochrana

Pro první stupeň je dáno doporučené nastavení podle dokumentace 0,2 In. Při zatížení jmenovitým proudem bude odečtena hodnota rozdílového proudu a zkontroluje se odstup provozního rozdílového proudu od nastavené hodnoty. Sklon 2. části je dle doporučení výrobce systému 0,3. Pro sklon 3. části je doporučená hodnota 0,7. Časové zpoždění pro rozdílovou ochranu $t=0$ s, protože není důvod zpoždovat. [6][9]

Tab. 40 - Nastavení diferenciální ochrany transformátoru vlastní spotřeby

	Doporučení	Skutečné nastavení	Nastavené doby zpoždění
$I_{diff} >$	0,2 [p.u]	0,2 [p.u]	$t = 0$ s
Stab. charakteristika	2.část sklon 0,3 [p.u]	0,3 [p.u]	-
	3.část sklon 0,7 [p.u]	0,7 [p.u]	-
$I_{diff} >>$	$1/u_k$ [p.u]	$1/0,06=16,7$ [p.u]	$t = 0$ s



Obr. 42 - Charakteristika diferenciální ochrany transformátoru vlastní spotřeby [10]

$$\text{Stabilizační proud: } I_{stab} = |I_1| + |I_2| \quad (4.51)$$

$$\text{Rozdílový (poruchový proud): } I_{diff} = |I_1 + I_2| \quad (4.52)$$

4.5.2 Nadproudová (zkratová) ochrana

Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové ochrany. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě.

Tab. 41 - Nastavení nadproudové ochrany transformátoru vlastní spotřeby

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$1,5I_n, t=0,3$ s	$1,4I_n, t=2$ s
2. stupeň	$10I_n, t=0$ s	$7I_n, t=0,2$ s

4.5.3 Nadproudová (zkratová) ochrana 1f

Tato ochrana slouží jako záložní ochrana rozdílové ochrany. Je nutné se dostat na krátký čas v závislosti na selektivitě.

Tab. 42 - Nastavení 1f nadproudové ochrany transformátoru vlastní spotřeby

	Doporučení	Skutečné nastavení
1. stupeň	$1,2I_n$, $t=0,3$ s	$1,2I_n$, $t=2$ s
2. stupeň	$10I_n$, $t=0$ s	$7I_n$, $t=0,1$ s

5 Závěr

Předložená diplomová práce řeší osazení vodní elektrárny Orlík ochranami, orientační výpočet zkratových proudů a výpočet nastavovacích parametrů ochran. Návrh systému chránění respektuje ČSN 33 3051 a zvyklosti provozovatele elektrárny Orlík. Spolehlivost systému je zajištěna zejména redundancí ochran a vzájemným zálohováním ochranných funkcí.

Pro přehlednost a rychlou orientaci je osazení ochran zakresleno do přehledového (jednopólového) schématu elektrárny. Jednopólové schéma je nakresleno pro jeden dvojblok a osazení generátorových ochran je uvedeno pro jeden stroj. Dvojbloky a generátory budou chráněny identicky a detailnější rozkreslení tedy není nutné.

Rozvodna elektrárny a blokový transformátor jsou chráněny především 4 bodovou rozdílovou ochranou, která porovnává proud na vývodu do linky s proudy u generátorů a vlastní spotřeby. Ochrana je doplněna zemní ochranou připojenou do zemního uzlu blokového transformátoru. Blokový transformátor je dále chráněn opět na primární i sekundární straně nadproudovými a zkratovými ochranami a nádobovou ochranou. Impedanční ochrana je řešena pomocí dvou zón v ochraně linky.

Z dříve popsaných ochranných funkcí linky vyplývá, že pro její ochranu jsou nejdůležitější především ochrana impedanční a srovnávací, které zajišťují přesné a rychlé vyhodnocení poruchových stavů linky. Impedanční ochrana je řešena pomocí dvou zón směřovaných do linky a dvou zón směřovaných do transformátoru.

Transformátor vlastní spotřeby je chráněn vlastní rozdílovou ochranou a nadproudovými a zkratovými ochranami.

Jako podklad pro analytické výpočty bylo pro každý základní bod sestaveno vždy případové náhradní schéma, ve kterém jsou znázorněny uvažované směry a toky proudů. Pomocí analytických výpočtů z druhé kapitoly bylo možné ověřit správnost nastavených mezí pro ochranné funkce. Pro chránění zařízení jsou podstatné zejména minimální zkratové příspěvky, aby bylo možné odlišit poruchové a provozní stavy. Maximální zkratové příspěvky, které jsou v diplomové práci rovněž stanoveny, lze použít pro kontrolu selektivity ochranných funkcí, popř. pro problematiku přesycení přístrojových transformátorů proudu, kterou se však předložená diplomová práce nezabývá.

Ve čtvrté kapitole jsou na základě doporučení výrobce ochran a provozních zkušeností určeny nastavovací parametry ochran s ohledem na minimalizaci důsledků poruch a selektivitu chránění.

Na diplomovou práci by bylo možné navázat detailním výpočtem poměrů při zkratu včetně výpočtu napětí. Detailní zkratový výpočet však vyžaduje použití vhodného numerického modelu a překračuje možnosti analytického výpočtu, který byl v této diplomové práci použit.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- (1) [1] Vodní díla a nádrže | pvl.cz. *Úvodní strana / Povodí Vltavy s. p.* [online]. Copyright © 2013 Povodí Vltavy, státní podnik [cit. 03.03.2020]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>
- (2) [2] Vodní elektrárna Orlík - Vodní elektrárny ČEZ - Elektrárny - Svět energie.cz. *Svět Energie - Svět energie.cz* [online]. Copyright © 2016, Všechna práva vyhrazena [cit. 03.03.2020]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/vodni-elektrarny/vodni-elektrarny-cez/vodni-elektrarna-orlik>
- (3) [3] Virtuální prohlídka ČEZ - Vodní elektrárna Orlík. *Virtuální prohlídka ČEZ* [online]. Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-orlik/>
- (4) [4] ČEZ zvažuje částečnou přestavbu Orlíku na přečerpávací elektrárnu | Atominfo.cz. *Atomová energie, zpravodajství - Portál Atominfo.cz* [online]. Copyright © 2016, Atominfo.cz [cit. 03.03.2020]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/04/cez-zvazuje-castecnou-prestavbu-orliku-na-precerpavaci-elektrarnu/>
- (5) [5] Orlickou elektrárnu čeká v příštích letech generální oprava - Příbramský deník. *Příbramský deník - informace, které jsou vám nejbližší* [online]. Copyright © [cit. 03.03.2020]. Dostupné z: https://pribramsky.denik.cz/zpravy_region/orlickou-elektrarnu-ceka-v-pristich-letech-generalni-oprava-20161230.html
- (6) [6] Štěchovice | Skupina ČEZ - O Společnosti. Skupina ČEZ – Předané podklady pro Diplomovou práci
- (7) [7] GRYM, Rudolf; HOCHMAN, Petr; BERMAN, Jiří. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9.
- (8) [8] SIP5_7UM85_V07.30_Manual_C027-2_en.pdf | Electromagnetic Compatibility | Trademark. *Discover the Best eBooks, Audiobooks, Magazines, Sheet Music, and More / Scribd* [online]. Copyright © 2020 Scribd Inc. [cit. 26.04.2020]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/351960104/SIP5-7UM85-V07-30-Manual-C027-2-en-pdf>
- (9) [9] Relay Setting for 7UT51 Differential Protection Relay | Transformer | Relay. *Discover the Best eBooks, Audiobooks, Magazines, Sheet Music, and More / Scribd* [online]. Copyright © 2020 Scribd Inc. [cit. 26.04.2020]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/125642396/Relay-Setting-for-7ut51-Differential-Protection-Relay>
- (10) [10] SIP5_7UT82-85-86-87_V07.00_Manual_C016-6_en2 | Transformer | Electronic Engineering. *Discover the Best eBooks, Audiobooks, Magazines, Sheet Music, and More / Scribd* [online]. Copyright © 2020 Scribd Inc. [cit. 26.04.2020]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/349084486/SIP5-7UT82-85-86-87-V07-00-Manual-C016-6-en2>

- (11) [11] Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. Praha: SNTL/ALFA, 1987.
- (12) [12] SIPROTEC 7SA87 Profile.pdf | Electrical Engineering | Electromagnetism. *Discover the Best eBooks, Audiobooks, Magazines, Sheet Music, and More / Scribd* [online]. Copyright © 2020 Scribd Inc. [cit. 26.04.2020]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/447879536/SIPROTEC-7SA87-Profile-pdf>
- (13) [13] Katedra elektroenergetiky, Technická univerzita Ostrava, studijní materiály [online]. Copyright © [cit. 02.04.2020]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/soes/Ochrany_generatoru2.pdf

7 Seznam Příloh

(1) Schéma vodní elektrárny Orlík doplněné o návrh ochrany elektrického zařízení

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Hráz vodního díla Orlík [4]	14
Obr. 2 Vodní dílo Orlík - příčný řez [1]	15
Obr. 3 Náhled lokality [1]	16
Obr. 4 - Struktura rozdílové ochrany [8]	40
Obr. 5 - Princip rozdílové ochrany [8]	41
Obr. 6 - Charakteristika rozdílové ochrany [8]	42
Obr. 7 - Schéma zapojení rozdílové ochrany [8]	42
Obr. 8 - Schéma zapojení zemní ochrany statoru 90% [8]	43
Obr. 9 - Schéma měření netočivé složky napětí [8]	44
Obr. 10 - Schéma zapojení zemní ochrany statoru 100 % [8]	45
Obr. 11 - Schéma zapojení zemní ochrany rotoru [8]	46
Obr. 12 - Struktura impedanční funkce [8]	46
Obr. 13 - Schéma zapojení impedanční ochrany [8]	47
Obr. 14 - Struktura nadproudové (zkratové) ochrany [8]	48
Obr. 15 - Struktura podpět'ové ochrany [8]	49
Obr. 16 – PQ diagram generátoru s mezí pro zpětný tok výkonu [6]	50
Obr. 17 – Příklad uživatelsky definované charakteristické křivky [8]	51
Obr. 18 - PQ diagram s vyznačenou mezí podbuzení [6]	53
Obr. 19 - Schéma zapojení pro ochranu podbuzení [8]	53
Obr. 20 - Diagram odvození aproximační křivky [8]	54
Obr. 21 - Příklad výsledných limitních křivek při podbuzení turbogenerátoru [8]	55
Obr. 22 - Příklad doporučeného nastavení pro zpětnou složku proudu [8]	58
Obr. 23 - Schéma zapojení směrové nadproudové ochrany [8]	60
Obr. 24 - Schéma zapojení pro určení směru ochrany [8]	60
Obr. 25 - Příklad zapojení ochrany při selhání vypínače [8]	61
Obr. 26 - Struktura rozdílové ochrany transformátoru [10]	62
Obr. 27 - Schéma zapojení nádobové ochrany [9]	64
Obr. 28 - Schéma zapojení rozdílové zemní ochrany [12]	65
Obr. 29 - Charakteristika rozdílové zemní ochrany [12]	65
Obr. 30 - Struktura srovnávací ochrany linky [12]	66
Obr. 31 - Schéma zapojení srovnávací ochrany linky [12]	67
Obr. 32 - Diagram doporučeného nastavení srovnávací ochrany linky [12]	67
Obr. 33 - Zvolený diagram diferenciální ochrany generátoru [8]	69
Obr. 34 - Schéma nastavení impedanční ochrany [8]	71
Obr. 35 - Nastavení meze podbuzení podle doporučení [6]	74
Obr. 36 - Nastavení meze podbuzení podle zvoleného nastavení [6]	75
Obr. 37 - Časově závislá charakteristika ochrany nesymetrie [6]	76
Obr. 38 - Charakteristika tepelného modelu generátoru [6]	77
Obr. 39 - Charakteristika diferenciální ochrany transformátoru [9]	78
Obr. 40 - Charakteristika nastavení rozdílové zemní ochrany [12]	80
Obr. 41 - Charakteristika nastavení srovnávací zemní ochrany [12]	84
Obr. 42 - Charakteristika diferenciální ochrany transformátoru vlastní spotřeby [10]	85

9 Seznam Tabulek

Tab. 1 Parametry Generátoru [6]	17
Tab. 2 Parametry budící soupravy [6]	18
Tab. 3 Parametry dvojblokového transformátoru [6]	18
Tab. 4 Parametry transformátoru vlastní spotřeby [6]	18
Tab. 5 Parametry transformátoru vlastní spotřeby neregulační [6]	18
Tab. 6 Parametry transformátoru T201 Milín [6]	19
Tab. 7 Parametry Reaktoru 10,5kV Milín [6]	19
Tab. 8 - Přehled vypočítaných hodnot pro 3f zkraty	39
Tab. 9 - Přehled vypočítaných hodnot pro 2f zkraty	39
Tab. 10 - Přehled vypočítaných hodnot pro 2f zemní zkraty	39
Tab. 11 - Přehled vypočítaných hodnot pro 1f zkraty	39
Tab. 12 - Doporučené nastavení zpětné wattové ochrany [8]	50
Tab. 13 - Příklad nastavených hodnot pro tepelnou ochranu [8]	59
Tab. 14 - Zvolené nastavení diferenciální ochrany generátoru	69
Tab. 15 - Nastavení zemní ochrany statoru 90%	70
Tab. 16 - Nastavení zemní ochrany statoru 100%	70
Tab. 17 - Nastavení zemní ochrany rotoru	70
Tab. 18 - Nastavení impedanční ochrany generátoru	72
Tab. 19 - Nastavení nadproudové ochrany generátoru s podpětovou přídrží	72
Tab. 20 - Směrová nadproudová ochrana generátoru	72
Tab. 21 - Nastavení přepětové ochrany generátoru	73
Tab. 22 - Nastavení přebuzení generátoru	73
Tab. 23 - Nastavení ochrany podbuzení generátoru	73
Tab. 24 - Výsledný odstup mezní charakteristiky podbuzení podle doporučení	74
Tab. 25 - Výsledný odstup mezní charakteristiky podbuzení podle zvoleného nastavení	75
Tab. 26 - Nastavení ochrany nadfrekvence generátoru	75
Tab. 27 - Nastavení ochrany podfrekvence generátoru	75
Tab. 28 - Nastavení ochrany nesymetrického zatížení generátoru	76
Tab. 29 - Nastavení ochrany tepelného přetížení generátoru	77
Tab. 30 - Nastavení ochrany selhání vypínače generátoru	77
Tab. 31 - Nastavení diferenciální ochrany blokového transformátoru	78
Tab. 32 - Nastavení nadproudové ochrany blokového transformátoru	79
Tab. 33 - Nastavení 1f nadproudové ochrany blokového transformátoru	79
Tab. 34 - Nastavení nádobové ochrany blokového transformátoru	79
Tab. 35 - Nastavení rozdílové zemní ochrany	80
Tab. 36 - Nastavení impedanční ochrany linky	83
Tab. 37 - Nastavení nadproudové ochrany linky	83
Tab. 38 - Nastavení 1f nadproudové ochrany linky	83
Tab. 39 - Nastavení srovnávací ochrany linky	84
Tab. 40 - Nastavení diferenciální ochrany transformátoru vlastní spotřeby	85
Tab. 41 - Nastavení nadproudové ochrany transformátoru vlastní spotřeby	85
Tab. 42 - Nastavení 1f nadproudové ochrany transformátoru vlastní spotřeby	86