

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra zadávající téma diplomové práce

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a nastavení elektrických ochran synchronního generátoru

Autor práce: **Bc. Lubomír Kugel**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lubomír KUGEL**
Osobní číslo: **E22N0061P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Návrh a nastavení elektrických ochran synchronního generátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Navrhněte koncepci a proveďte nastavení parametrů elektrických ochran synchronního generátoru pro MVE do 1 MVA.

1. Zpracujte teorii elektrických ochran synchronních strojů.
2. Dle příslušných norem navrhněte soubor ochranných funkcí synchronního stroje.
3. Vypočítejte a navrhněte případovou studii nastavení elektrických ochran synchronního stroje.


Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **2**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. Jaroslav Doležal; Jiří Šťastný; Jan Špetlík; Stanislav Bouček; Zbyněk Brettschneider. Jaderné a klasické elektrárny. Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
2. Das, J.C. Power Systems Protective Relaying, Taylor & Francis Group, 2018, ISBN 9781498745505.
3. Horowitz, S. H., Phadke, A. G. Power System Relaying, Wiley, 2014, ISBN 978-1-118-66200-7.
4. Beran, Miloš. Elektrická zařízení tepelných elektráren. 1. vyd. Plzeň : VŠSE, 1988.
5. Chladný, Vl.: Ochrany v elektrizačních sítích, skriptum VŠT Košice, 1983.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**


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



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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výběrem a nastavením ochranných funkcí generátorové ochrany SIPROTEC 5 7UM85. V práci jsou uvedeny obecné principy fungování ochran a důvody jejich využívání. Následně je uveden konkrétní generátor s jeho parametry a zapojení elektrárenského bloku, pro který je provedeno nastavení vybraných ochranných funkcí.

Klíčová slova

Elektrické ochrany, ochrany synchronního generátoru, diferenciální ochrana, rozdílová ochrana, ochrana proti přetížení statoru, ochrana proti nesymetrickému zatížení, nadproudová ochrana, zemní ochrana statoru, podfrekvenční ochrana, nadfrekvenční ochrana, zpětná wattová ochrana, nadpět'ová ochrana, podpět'ová ochrana, ochrana proti podbuzení a ztrátě buzení

Abstract

The thesis focuses on the selection and setting of the protection functions of the generator protection SIPROTEC 5. The thesis presents the general principles of protection and the reasons for its use. Subsequently, a specific generator with its parameters and the connection of the power unit for which the selected protection functions are set is demonstrated.

Key Words

Electrical protection, synchronous generator protection, differential protection, stator overload protection, unbalanced load protection, overcurrent protection, stator ground-fault protection, underfrequency protection, overfrequency protection, reverse power protection, overvoltage protection, undervoltage protection, excitation and loss of excitation protection

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Veškerý software použitý při řešení této práce je legální.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za vedení práce a Ing. Martinu Němečkovi z firmy ‚Invelt elektro s.r.o.‘ za možnost řešit tuto problematiku v rámci diplomové práce a za poskytnuté rady a letný vhled do problematiky elektrických ochran generátorů. Také bych rád poděkoval své rodině a to především rodičům za jejich trpělivost a podporu v době vytváření této diplomové práce.

Obsah

Úvod	1
1 Obecná teorie elektrických ochran	2
1.1 Požadavky kladené na ochrany	4
1.2 Třídění ochran.....	6
2 Poruchy vyskytující se na synchronních generátorech.....	10
2.1 Zkratky uvnitř výrobního bloku	11
2.2 Zemní spojení statorového vinutí	16
2.3 Zemní spojení rotorového vinutí	23
2.4 Přetížení	27
2.5 Nadpětí	29
2.6 Podpětí.....	30
2.7 Nadsynchronní/podsynchronní otáčky	30
2.8 Podbuzení a ztráta buzení	32
2.9 Samobuzení	33
2.10 Nesymetrické zatížení.....	34
2.11 Zpětný tok činného výkonu	35
2.12 Vnější zkratky.....	35
2.13 Ložiskové proudy	35
3 Soubor ochranných funkcí konkrétního generátoru	37
4 Nastavení elektrických ochran synchronního generátoru.....	39
4.1 Jednopolové schéma výrobního bloku	39
4.2 Technická data.....	40
4.3 Zkratové výpočty	42
4.3.1 3f zkrat na svorkách generátoru – generátor naprázdno.....	46
4.3.2 3f zkrat na straně 22 kV BT – generátor naprázdno.....	47
4.3.3 3f zkrat na svorkách generátoru – generátor jmenovitě zatížen	48

4.3.4	3f zkrat na straně 22 kV BT – generátor jmenovitě zatížen	49
4.3.5	Minimální přechodná složka zkratového proudu	49
4.4	Ochrana 7UM85	50
4.4.1	Digitalizace měřených veličin	51
4.4.2	Symbole používané pro popis ochranných funkcí	53
4.5	Nastavení ochrany	55
4.5.1	Rozdílová ochrana (ANSI 87G)	55
4.5.2	Přetížení statoru (ANSI 49)	63
4.5.3	Nesymetrické zatížení (ANSI 46)	71
4.5.4	Nadproud/podpětí (ANSI 51V)	75
4.5.5	Nadproudová zkratová ochrana (ANSI 50/51)	78
4.5.6	Zemní ochrana statoru (ANSI 59N)	80
4.5.7	Podfrekvenční ochrana (ANSI 81U)	84
4.5.8	Nadfrekvenční ochrana (ANSI 81O)	86
4.5.9	Zpětná wattová ochrana (ANSI 32R)	88
4.5.10	Nadpět'ová ochrana (ANSI 59)	90
4.5.11	Podpět'ová ochrana (ANSI 27)	93
4.5.12	Podbuzení, ztráta buzení (ANSI 40)	96
	Zhodnocení a závěr	101
	Literatura	104

Seznam symbolů a zkratk

Obecně

I		skalární veličina
\bar{I}		fázor skalární veličiny
\mathbf{I}		vektorová veličina (v kapitole 4 jsou tučně zvýrazněny zadané parametry do ochrany)
$\bar{\mathbf{I}}$		fázor vektorové veličiny

Fyzikální a výpočetní veličiny

\mathbf{a}	-	vektor o délce 1 a natočením 120°
B	S	susceptance
c	-	napěťový součinitel
$\cos\varphi$	-	účinník
δ	rad	zátěžný úhel
E	V	vnitřní napětí
f	Hz	frekvence
φ	rad	fázový posuv
G	S	konduktance
I	A	proud
K	-	obecná konstanta – v případě použití je upřesněna
n	1/min	počet otáček za minutu
n_p	-	počet pólpárů
P	W	činný výkon
p	-	převod
Q	VAr (VA)	jalový výkon, teplo
R	Ω	elektrický odpor

S	VA	zdánlivý výkon
t	s	čas
T	s	perioda, doba trvání
τ	s	časová konstanta
θ	°C, K	teplota
U	V	napětí
X	Ω	reaktance
Z	Ω	impedance

Textové zkratky

ANSI	American National Standards Institute (Americký národní institut pro normalizaci podle, udává kódová označení ochranných funkcí a prvků soustavy)
ČEPS	Česká elektroenergetická přenosová soustava a.s.
PT	přístrojový transformátor
PTN	přístrojový transformátor napětí
PTP	přístrojový transformátor proudu
vn	vysoké napětí

Dolní indexy

3	třífázová hodnota
amb	veličina popisující okolí
b, bias	stabilizační proud
C	kapacitní povaha
d	podélná hodnota, rozdílová hodnota
diff	rozdílová (diferenciální) hodnota
f	fázová hodnota

G	veličina popisující generátor
GND	popis hodnot spojených se zemním spojením
H	holmgreenovo zapojení PTP
k	zkratová hodnota
L	induktivní povaha
L1	fáze 1
L2	fáze 2
L3	fáze 3
max	největší hodnota
min	nejmenší hodnota
n	jmenovitá hodnota
off	mezní hodnota pro vybavení
op	vybavení (operate)
p.j.	poměrné jednotky
perm	trvalá hodnota
preload	hodnota před poruchou
prim	hodnota na primární straně
q	příčná hodnota
S	veličina popisující síť
prim	hodnota na primární straně
sek	hodnota na sekundární straně
stab	stabilizační proud
rest	stabilizační proud
T	veličina popisující blokový transformátor
threshold, tr	mezní hodnota
v	vztažná hodnota
Δ	zapojení do otevřeného trojúhelníka
warn	mezní hodnota výstražného stupně

Horní indexy

"	rázová hodnota
'	přechodná hodnota
	synchronní hodnota
(1)	sousledná složka
(2)	zpětná složka
(0)	netočivá složka

V praktické části diplomové práce mohou být použity další zkratky a indexy odpovídající značení podle manuálu ochrany SIPROTEC 5 a jsou proto příslušně popsány tam, kde jsou využity.

Úvod

Cílem diplomové práce je návrh a nastavení elektrických ochran synchronního generátoru malé vodní elektrárny za pomoci multifunkční generátorové digitální ochrany SIPROTEC 5 7UM85. Elektrické ochrany jsou klíčovým prvkem v oblasti synchronních strojů. Jejich účelem je chránit stroje a systémy před poruchami a abnormálními stavy, které by mohly vést k vážným poškozením nebo dokonce haváriím.

Úvod práce se zaměřuje na zpracování obecné teorie ochran, včetně požadavků kladených na ochrany a třídění ochran. Následuje část práce věnující se ochranám synchronních generátorů vzhledem k možným poruchám nebo abnormálním provozním stavům generátorů. Pro většinu poruch je uvedeno více způsobů chránění.

Na teorii navazuje část výpočetní, ve které jsou na základě technických dat zvoleného elektrárenského bloku (generátor, blokový transformátor) a sítě zjednodušeně vypočítány zkratové poměry 3f zkratu na svorkách generátoru a za blokovým transformátorem pro zatížený a nezatížený generátor. Z těchto výpočtů je určen minimální zkratový proud, který je následně využit v nastavení ochranných funkcí. Následně je proveden výběr ochranných funkcí podle normy ČSN 33 3051 a zkušeností projektantů firmy ‚Invelt elektro s.r.o.‘.

V další části jsou popsány zvolené ochranné funkce s přiloženými logickými diagramy a provedeno nastavení parametrů jednotlivých ochranných funkcí generátorové ochrany na základě technických dat nebo norem točivých elektrických strojů. Při nastavování je postupováno dle manuálu zmíněné ochrany a doporučení firmy ‚Invelt elektro s.r.o.‘.

1 Obecná teorie elektrických ochran

Dnes instalované elektrické ochrany v elektroenergetice jsou z drtivé většiny digitální. Kromě chránění obsluhy před poraněním elektrickou energií a elektrického zařízení proti jeho poškození v případě nestandardních stavů zastávají dnes také funkci monitoringu a měření. Počátek elektrických ochran lze datovat až do první poloviny 19. století, kdy Louis François Clément Brequet zpozoroval destrukci tenkého telegrafního vodiče po zásahu bleskem, a tak se zrodila myšlenka tavné pojistky, jejímž úkolem bylo přerušení poruchového proudu. Samotná součástka byla patentována roku 1890 Thomase Edisonem. Rozvojem prvních městských sítí a nárůstem komplexity elektrických rozvodů a systémů vyvstal požadavek na selektivitu – na poruchu reaguje pouze jediná ochrana a to ta, která je nejbližší místu poruchy. Díky tomu byly v roce 1910 zavedeny barevné kódy rozlišující druhy pojistek podle jmenovitého proudu a doby vypnutí.

Tavná pojistka svými parametry ale přestala pro využití v elektroenergetickém sektoru brzy vyhovovat a byly hledány jiné a lepší způsoby chránění. Nezávisle na tavné pojistce byl v roce 1892 představen olejový vypínač, který byl již v počátku 90. let 19. století pevně spojován s elektromagnetickým primárním proudovým relé. Vypnutí vypínače bylo iniciováno přitažením jha ochrany magnetickým polem cívky protékané poruchovým proudem přímo na potenciálu vysokého napětí (vn), čímž byla uvolněna západka v pružinovém mechanismu a vypínač vypnut. I přes svoji malou citlivost, vysoké požadavky na izolaci a omezenou nastavitelnost, měl tento typ ochran výhodu v jednoduché konstrukci a v dlouhé životnosti. Počátkem nového století bylo představeno první proudové diskové indukční relé založené na principu diskových elektroměrů, které bylo při provozu na vn provozováno na sekundární straně měřícího transformátoru (odtud název sekundární relé). Z těchto relé byla v polovině prvního desetiletí 20. století vyvinuta diferenciální proudová relé, která se následně začala vyrábět na elektromagnetickém principu. V průběhu dalších několika desetiletí byla vyvinuta směrová nebo distanční relé. [1]

Technologie ochranných relé se posouvala od jednoduchých elektromechanických ke statickým, nebo také někdy nazývaným elektronickým, tranzistorovým. Tato relé mohla vzniknout jen díky rozvoji výkonových součástek v 60. letech 20. století, které nahrazovaly pohyblivé části elektromechanických relé. Tato ochranná relé se ale neujala zejména kvůli za provozu se měnícím parametrům použitých součástek, a tak byla nadále využívána

elektromechanická relé. V 80. letech 20. století přišla na trh mikroprocesorová ochranná relé, které jsou dnes nejrozšířenějším způsobem chránění v elektroenergetice. [1]

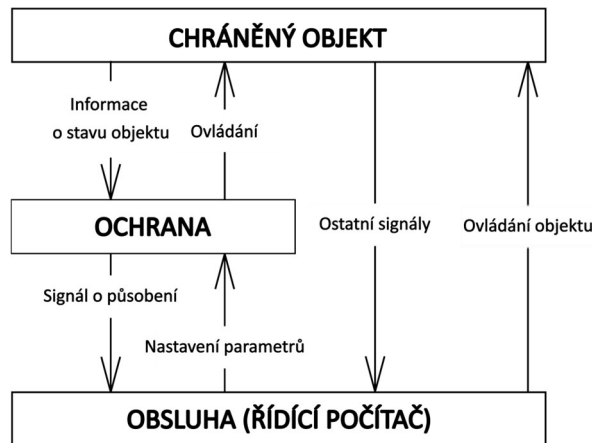
Mikroprocesorová (digitální) ochranná relé mají možnost číslicového zpracování měřené veličiny. Jedna taková digitální ochrana dokáže zastávat funkce několika elektromechanických ochran najednou a rychlost reakce je dnes podstatně vyšší než u analogových ochran, zejména díky absenci pohyblivých částí. Celkově jsou přesnější, citlivější a mnohem více flexibilní. V počátcích vývoje byly digitální ochrany mnoha provozovateli chráněných zařízení odmítány, a to především z důvodu jejich nesprávného fungování ve specifických případech, kdy analogové ochrany fungovaly bez jakýchkoliv problémů nebo měly určitou vlastnost danou svou konstrukcí a nebylo potřeba ji uměle vytvářet. Příkladem může být výpočet frekvence snímané veličiny, která musí být digitální ochraně složitě dopočítávána a nesprávné výsledky vedou k chybným reakcím nebo k nečinnosti ochrany, zatímco tento výpočet u analogových ochran nebylo nutné v podstatě řešit. Problémem byla také často netransparentnost algoritmu, kdy při hledání závady nebylo možno ověřit bezchybnost digitálního řešení. Dnes je ale technologie velmi dobře zvládnutá a tyto problémy odstraněny.

Stejně jako bylo cílem nahrazení analogových relé digitálními, směřuje dnes další vývoj k integraci chránění, řízení a monitoringu do jednoho zařízení. Není neobvyklé, že takové zařízení již dnes např. monitoruje synchronní generátor, získává data o provozu z dalších míst soustavy a podle toho řídí např. buzení generátoru a zároveň reaguje na poruchy jako klasická ochrana.

Nyní je možné si zhruba představit, co znamená pojem elektrická ochrana – zařízení, které má za úkol rychle a spolehlivě určit poruchu nebo abnormální stav chráněného zařízení a vybavit v takovém čase, ve kterém se zabrání vzniku škod důsledkem elektrických nebo tepelných účinků poruchového proudu, omezí jejich rozsah a zajistí bezpečnost osob. [2]

Chráněný objekt (oblast) je pak jedno nebo více zařízení přenášejících elektrickou energii (vedení, transformátor, rozvodna, generátor apod.). Chování (stav) objektu je popsáno velikostí stavových veličin (napětí, proud, okamžitá frekvence nebo okamžitý výkon). Informace o jejich velikostech je zprostředkována za pomoci přístrojových transformátorů proudu (PTP), napětí (PTN) nebo nejrůznějších čidel (vibrace, teplota apod.). Ochrana monitoruje stav chráněného objektu a na jeho základě vyhodnocuje, zdali jde o normální provoz, nebo poruchu. V případě poruchy působí ochrana přes ovládání objektu (vypínač,

odbuzovač atd.). [1] Je zároveň nezbytné, aby se jednotlivé oblasti chránění překrývaly, a nevznikl tím v rámci elektrizační soustavy nechráněný úsek.



Obr. 1: Systém chránění (podle [1])

1.1 Požadavky kladené na ochrany

Konkrétní požadavky na elektrické ochrany se liší v závislosti na aplikacích a normách platných v oblastech jejich instalace. Obecně je ale po ochranách vyžadováno následující:

Selektivita

Hlavním požadavkem na elektrické ochrany je, aby v případě vybavení izolovaly co nejmenší část soustavy postižené poruchou a nepůsobily mimo chráněný objekt a na poruchy, na které působit nemají. Zároveň je požadováno, aby na poruchu reagovala pouze jedna ochrana v jeden čas. [3]

Selektivitu zajišťujeme časovým odstupňováním vypínacích časů (např. nadproudové ochrany), odstupňováním hodnot nastavených mezních hodnot veličin (např. mžikové ochrany), směrovostí ochran (reakce pouze při konkrétním směru proudu), měřením více veličin současně (např. distanční ochrany) nebo na více místech (rozdílové, srovnávací, logické ochrany). [2]

Rychlost

Škody způsobené poruchou nejlépe omezíme okamžitým odpojením chráněného zařízení. Na elektrické ochrany je tedy kladen požadavek na co nejrychlejší vybavení po zjištění nestandardního stavu. Rychlé vypnutí zmenšuje rozsah poškození chráněného objektu, zvyšuje stabilitu soustavy, zvětšuje efektivitu opětovného zapínání a také snižuje nebezpečí úrazu osob. [3] Rychlost je ale úzce svázána se spolehlivostí ochrany. Rozhodnutí o zapůsobení ochrany musí proběhnout s určitým stupněm jistoty, že k poruše opravdu došlo. To je často ztíženo vzniklými přechodnými ději v okamžiku vzniku poruchy, kdy ochrana musí sledovat jen podstatné informace obsažené v měřených veličinách. Vztah mezi rychlostí a stupněm jistoty je tedy inverzní. [4]

Citlivost

Míra schopnosti rozlišit provozní stav, při kterém má ochrana působit od toho, při kterém nemá. Citlivost je určena součinitelem citlivosti, který se určuje samostatně pro konkrétní ochrany. Pro ochrany reagující na nárůst měřené veličiny je součinitel citlivosti určen poměrem hodnoty veličiny při poruše ku hodnotě nastavené, pro ochrany reagující na pokles měřené veličiny je součinitel citlivosti určen poměrem nastavené hodnoty ku hodnotě veličiny při poruše v chráněném úseku. [2]

Spolehlivost

Spolehlivost vyjadřuje míru jistoty, že zařízení bude fungovat tak, jak bylo zamýšleno. V případě ochran to znamená, že budou působit jen v případě zjištění poruchy uvnitř chráněného objektu. Spolehlivou ochranou je tedy ta ochrana, která vybaví při každé poruše, pro kterou je navržena (určuje se pravděpodobnost selhání ochrany), a zároveň nevybaví, když nemá – za normálního provozu, při poruchách mimo chráněný objekt nebo při poruchách jiného typu, než na které je navržena (určuje se pravděpodobnost nežádoucího působení ochrany). [4; 2]

Pro zajištění spolehlivosti ochran je nutno při návrhu analyzovat poruchové a bezporuchové stavy, zjistit výpočtem nebo změřením potřebné parametry jednotlivých prvků chráněného objektu, zvolit vhodné technické řešení jak ochran, tak měřících přístrojů, vybrat vhodné charakteristiky ochranných funkcí a zabezpečit selektivitu a zálohování systému. [2]

Jednoduchost

Jednoduchost ochrany je úzce svázána se spolehlivostí ochrany. Složitě realizované funkce ochran mohou působit problémy s chybným zapůsobením a s následným odhalováním příčin problému s fungováním.

Ekonomičnost

Ekonomičnost ochrany zahrnuje nejen počáteční náklady na výrobu, zprovoznění ochrany a potřebných zařízení pro její správné fungování, ale také náklady na její údržbu a provoz.

Udržitelnost

V rámci udržitelnosti je při návrhu samotné ochrany, ale i systému chránění konkrétního objektu, nutné dbát a pamatovat na životnost všech zařízení nutných pro správnou funkci ochrany, volbu materiálů a umístění zařízení tak, aby parametry vyhovovaly požadavkům na ochranu životního prostředí.

1.2 Třídění ochran

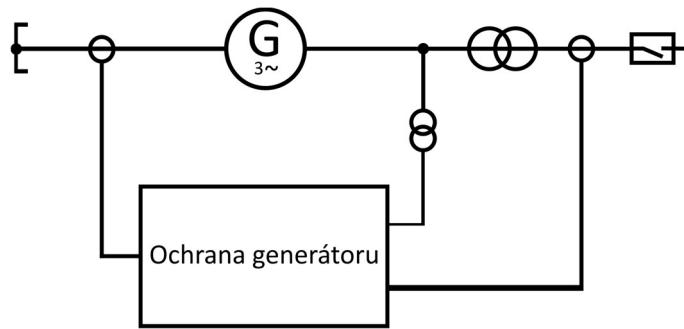
- Podle typu chráněného objektu na ochrany (dle [2]).
 - alternátorů a synchronních kompenzátorů
 - elektromotorů
 - transformátorů a jejich příslušenství
 - venkovních a kabelových vedení
 - přípojnic, zapouzdrěných rozvodů a skříňových rozvaděčů
 - ostatních elektrických strojů (např. tlumivky nebo kondenzátorové baterie)

- Dle konstrukce
 - elektromechanické
 - tranzistorové (nebo také elektronické, statické)
 - mikroprocesorové (nebo také digitální)

- Dle jejich fungování
 - základní (hlavní)
 - záložní (reaguje v případě selhání základní ochrany)

Záložní ochrany dále dělíme na místní a vzdálené. Záložní ochrana místní chrání stejný úsek jako ochrana hlavní a u důležitých objektů je stejná jako hlavní ochrana, ale s delší dobou působení (redundantní zapojení). U jiných objektů se využívají jako záložní dříve instalované ochrany nebo ochrany stejného typu jako hlavní s jinými ochrannými funkcemi, pokud je to možné. Záložní ochrana by měla být připojena na jiné vinutí přístrojových transformátorů, než ochrana hlavní a měla by působit na druhou vypínací cívku vypínače, pokud má vypínač 2 vypínací cívky. Vzdažené záložní ochrany jsou ochrany chránící sousední úsek, které díky překrytí oblastí chránění reagují na poruchy mimo svůj základní chráněný úsek v časovém zpoždění. [2]

- Dle připojení ke chráněnému objektu
 - primární (připojena svými vstupy na potenciál chráněného objektu)
 - sekundární (vstupy připojeny ke chráněnému objektu přes PTP, PTN nebo senzory)



Obr. 2: Příklad sekundární ochrany

- Dle druhu poruchy [1]
 - zkratová
 - při přetížení
 - podpět'ová
 - přepět'ová
 - podfrekvenční
 - nadfrekvenční
 - při zemním spojení
 - při ztrátě buzení
 - při zpětném toku výkonu
 - při nesouměrnosti
- Dle funkčního principu [1]
 - proudová
 - napět'ová
 - distanční
 - rozdílová
 - srovnávací
 - wattová
 - jalová
 - frekvenční
 - při nesouměrnosti
- Dle časové závislosti působení

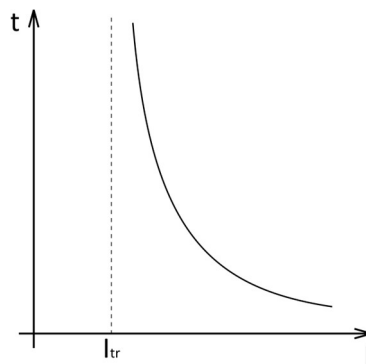
Princip časové závislosti působení je zde pro názornost popsán v závislosti na hodnotě měřeného proudu.

- časově závislé

Ochrana nereaguje (čas reakce je nekonečný), dokud není dosaženo nastavené (prahové) hodnoty proudu (I_{tr}). Po jejím dosažení má závislost času působení ochrany na velikosti proudu měřeného proudu I tvar:

$$t = \frac{K}{(I - I_{tr})^2} \quad (1)$$

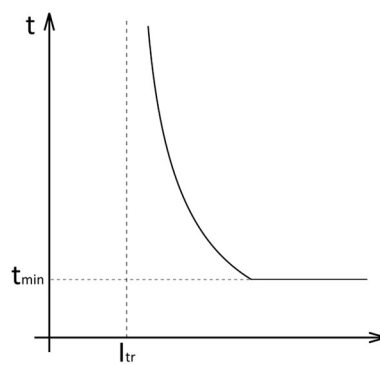
kde konstanta K ovlivňuje strmost křivky a I_{tr} je prahová hodnota (threshold).



Obr. 3: Časově závislá ochrana

- časově polozávislé

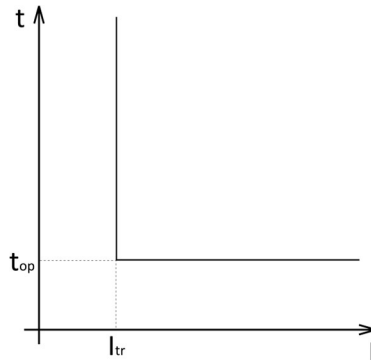
Tento typ působení je velmi podobný časově závislému, od kterého se liší zadaným minimálním reakčním časem.



Obr. 4: Časově polozávislá ochrana

- časově nezávislé

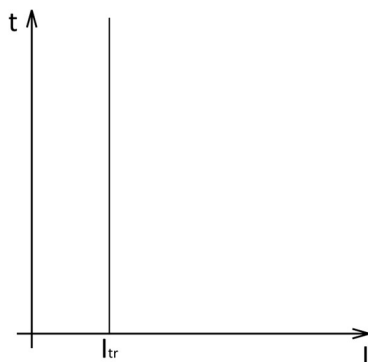
Ochrana působí v časovém zpoždění t_{op} , jakmile velikost měřeného proudu dosáhne hodnoty nastaveného proudu.



Obr. 5: Časově nezávislá ochrana

- mžikové

Jde o časově nezávislou ochranu bez nastaveného časového zpoždění.



Obr. 6: Mžiková ochrana

2 Poruchy vyskytující se na synchronních generátorech

Ochrany točivých elektrických strojů berou na zřetel více možných poruch nežli ochrany jiných objektů. Přestože je konkrétně na generátorech četnost poruch v zásadě nízká, jejich následky jak z ekonomického, tak i z materiálního hlediska mohou být často mnohem vážnější. Pokud se jedná o mechanické poruchy, pak je využíváno měření tlaku, síly, vibrací a dalších veličin. Jak bude popsáno, reakcí na některé stavy generátoru není vždy nezbytně okamžité odtavení stroje. V této kapitole budou popsány jednotlivé druhy poruch nebo nestandardních stavů, se kterými je možné se při provozu generátorů setkat, a uvedeny způsoby chránění využívané pro zamezení poničení stroje.

V rámci elektrických ochran generátorů je nutno brát v potaz následující možné jevy:

- poruchy vinutí
 - zemní spojení statoru nebo rotoru
 - mezifázové a závitové zkraty na statoru nebo rotoru
- podpětí, přepětí
- přetížení
- podsynchronní nebo nadsynchronní otáčky
- podbuzení, ztráta buzení a samobuzení
- přechod do motorického chodu (zpětný tok činného výkonu)
- ložiskové proudy
- poruchy mimo generátor (vnější zkraty)

2.1 Zkratky uvnitř výrobního bloku

Zkrat vzniká vzájemným spojením fází (v případě izolované sítě), během čehož výrazně poklesne impedance elektrického obvodu – pokles napětí a nárůst proudu. Při průchodu zkratového proudu generátorem vzrůstá riziko tepelného a mechanického poškození nejen statorového vinutí, ale i dalších částí stroje. Zároveň je vyšší riziko vzniku požáru a šíření poruchy na další prvky elektrizační soustavy. [1] U generátorů pracujících s izolovaným uzlem je pro vnitřní zkratky využívána rozdílová ochrana, která je zároveň hlavní ochranou v seznamu ochranných funkcí generátoru.

K zamezení následků zkratu se u generátorů využívá

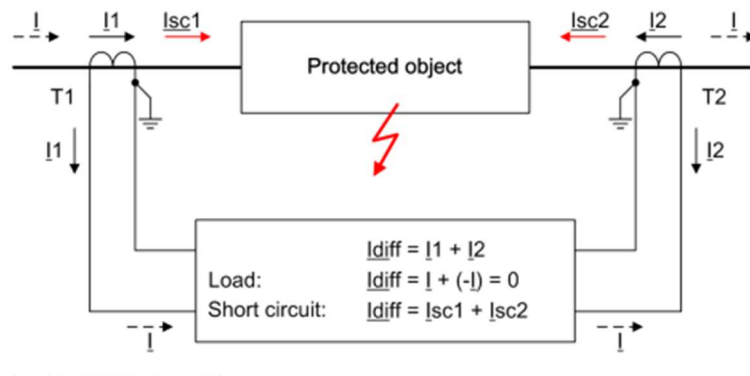
- a) rozdílová (diferenciální) ochrana
- b) nadproudová zkratová ochrana
- c) impedanční ochrana

V případě provozu generátoru s účinně uzemněným uzlem lze také využít měření proudu v zemnicím vodiči a následně nadproudovou ochranu bez časového zpoždění. Při uzemnění s vyšší impedancí je vzhledem ke sníženému riziku poškození stroje využíváno nadproudových zemních ochran s časovým zpožděním pro zamezení vypnutí při přechodových jevech v soustavě a nižším nastaveným vybavovacím proudem. Při provozu generátoru v takovýchto zapojeních je nutno počítat s výskytem netočivé složky proudu vzniklé vlivem nesymetrie zátěže, který může za běžných podmínek dosahovat 10 ÷ 15 % jmenovitého proudu generátoru. [4]

Rozdílová ochrana

Rozdílová ochrana (ANSI 87) využívá princip 1. Kirchhoffova zákona o kontinuitě elektrického proudu – porovnává vstupní a výstupní proudy chráněného objektu a funguje jako hlavní ochrana elektrárenských bloků. Rozdíl velikosti vektorů těchto proudů značí poruchu v chráněné oblasti vymezené body měření proudu, zatímco zkratky vzniklé mimo tuto oblast teoreticky rozdíl průchozích proudů nezpůsobí. V praxi je nutné uvažovat různý převod PTP, hodinové číslo blokového transformátoru (pokud se v chráněné oblasti vyskytuje), zapínací rázy transformátoru, nebo rozdílné převody při přesycení PTP vlivem

vysokého průchozího proudu. Nejčastěji využívaným typem rozdílových ochran jsou dvoubodové rozdílové ochrany, možné jsou ale i třibodová nebo vícebodová zapojení (podle počtu měřicích bodů na jedné fázi). Pro omezení vlivu sycení PTP je nutno správně určit doporučené nadproudové číslo a určit oblast necitlivosti stabilizováním rozdílové ochrany (necitlivost v závislosti na velikosti průchozího proudu). Stabilizace rozdílové ochrany zachovává citlivost v oblasti nízkých průchozích proudů a snižuje citlivost v případě zkratů mimo chráněnou oblast. [5]



Obr. 7: Princip rozdílové ochrany (převzato z [6])

Výpočet diferenciálního proudu (I_d , I_{diff}) je založen na vektorovém součtu proudů:

$$I_d = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2| \quad (2)$$

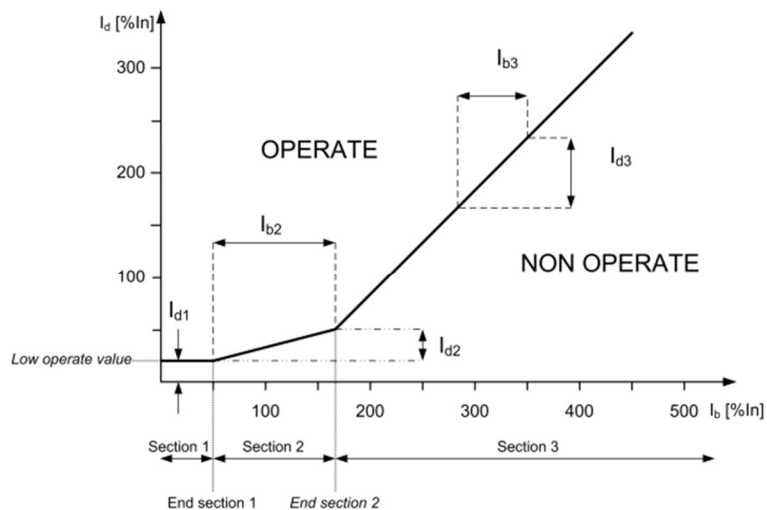
Určení stabilizačního proudu (značení dle výrobce ochrany I_b , I_{bias} , I_{stab} , I_{rest}) a následné zpracování pro stabilizaci se liší dle výrobce ochrany. Níže jsou uvedeny způsoby výpočtu stanovení stabilizačního proudu různých ochran (I_b - ABB Relion 630 series, I_{stab} - Siemens SIPROTEC 4 7UM62 a I_{rest} - SIPROTEC 5 7UM85).

$$I_b = \frac{|\bar{I}_1 - \bar{I}_2|}{2} \quad (3)$$

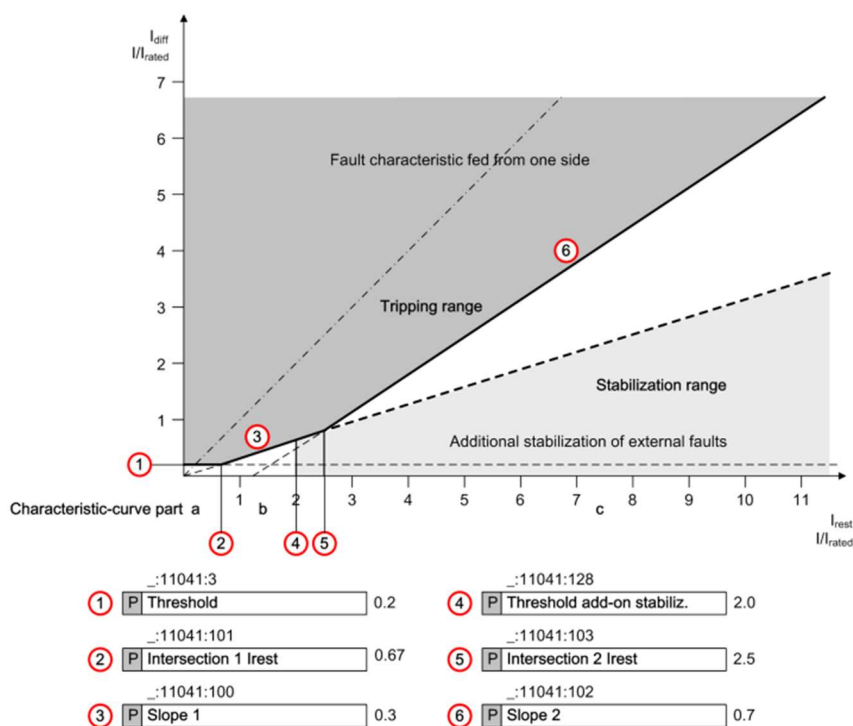
$$I_{stab} = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2| \quad (4)$$

$$I_{rest} = \max(|\bar{I}_1|; |\bar{I}_2|) \quad (5)$$

Způsob výpočtu stabilizačního proudu ovlivňuje chování ochrany a její nastavení, avšak grafické znázornění vypínací charakteristiky zůstává mezi různými výrobci podobné:



Obr. 8: Rozdílová ochrana ABB Relion 630 series (převzato z [7])



Obr. 9: Rozdílová ochrana SIPROTEC 5 7UM85 (převzato z [6])

Nadproudová ochrana

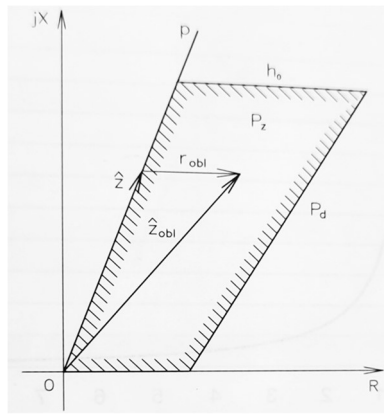
Nadproudová ochrana se běžně dělí podle velikosti proudu, při kterém ochrana reaguje, na nadproudovou (ANSI 51) a nadproudovou zkratovou (ANSI 50). Nadproudová ochrana je v rámci generátorových ochran vybavována podpět'ovou přídrží buďto již implementovanou do nadproudové ochrany (ANSI 51/27, ANSI 51V), nebo dodatečně pomocí podpět'ové ochrany (ANSI 27). Velikost ustálené hodnoty proudu blízkého zkratu může klesat pod jmenovitou hodnotu proudu generátoru a zapříčinit odpadnutí nadproudové ochrany před dosažením časového zpoždění vybavení. Pokud tedy velikost rázové složky zkratového proudu způsobila aktivaci nadproudové zkratové ochrany, vlivem podpětí je nadproudová ochrana přidržena i při poklesu proudu pod mezní hodnotu a pokud po nastaveném časovém zpoždění ochrana detekuje alespoň podpětí, vypíná. Nadproudová zkratová ochrana je nastavována pod minimální vypočtenou hodnotu zkratového proudu. Pro vyšší míru jistoty vybavení ochrany, je obvykle nastavována pod hodnotu přechodné složky minimálního zkratového proudu.

Impedanční ochrana

Impedanční (nebo také distanční nebo podimpedanční) ochrana (ANSI 21) se používá jako záložní ochrana bloků vyšších výkonů a umožňuje dosažení nejkratších dob vypnutí při zkratu uvnitř chráněné oblasti. Pro její funkci je nutné měření napětí společně s proudy. Ochrana funguje na principu výpočtu impedance zkratové smyčky, ze které lze určit vzdálenost místa zkratu od ochrany:

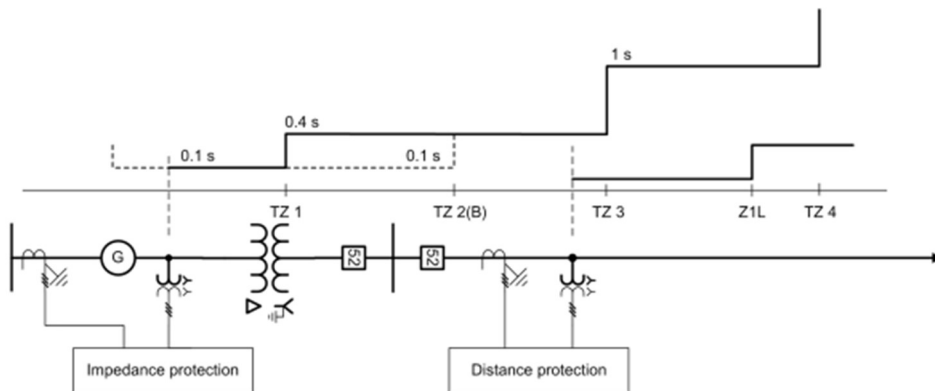
$$\overline{Z}_k = \frac{\overline{U}_k}{\overline{I}_k} \quad (6)$$

Vypínací charakteristika se zobrazuje v impedanční (Gaussově, $R-jX$) rovině. Při vstupu vektoru měřené impedance do oblasti (stupně) vyhodnocované jako porucha, vypíná distanční ochrana podle nastaveného časového zpoždění konkrétního stupně. Časová zpoždění jednotlivých stupňů se graficky zobrazují v závislosti na impedanci nebo vzdálenosti zkratu od ochrany. [5]



Obr. 10: Ideální charakteristika distanční ochrany (převzato z [5])

Na Obr. 10 je zobrazena ideální charakteristika impedanční ochrany. Přímka p značí oblast pohybu vektoru měřené impedance při kovovém spojení v místě zkratu. Vypínací oblast je plocha vyznačující součet této impedance s elektrickým odporem případného oblouku v místě zkratu. Měřená impedance kovového zkratu se snižuje se zmenšující se vzdáleností poruchy od místa měření. Odpor oblouku má závislost podobnou. Vzhledem k vyššímu napětí v případě bližšího zkratu je odpor oblouku menší nežli v případě zkratu vzdálenějšího. Výsledná oblast ideální charakteristiky impedanční ochrany je polygonální.



Obr. 11: Příklad nastavení časových zpoždění jednotlivých stupňů impedanční ochrany (převzato z [6])

Impedanční ochrana se rozbíhá po detekci nadproudu, nesmí se ale aktivovat přetížením nebo při zapínacím rázu blokového transformátoru (detekce zapínacího proudu – charakteristický vysokým obsahem druhé harmonické). V případě snížení napětí na svorkách generátoru vlivem blízkého zkratu může poklesnout budící proud, pokud je budič připojen na svorky generátoru, a dojit ke snížení poruchového proudu, který by nedokázal

udržet impedanční ochranu aktivovanou. Z toho důvodu je impedanční ochrana vybavována podpět'ovou přídrží, která se nastavuje na nejnižší možné mezifázové napětí s dobou přídrže delší, než je nastavená doba vypnutí pro stupeň ochrany s největší impedancí. [6]

Impedanční ochrany generátorů se provozují se dvěma stupni. První stupeň vybavuje se zpožděním t_1 do impedance $0,5 \div 0,8 Z_T$. Druhý stupeň dosahuje k následující elektrické stanici s časem t_2 . [8]

2.2 Zemní spojení statorového vinutí

Zemní spojení statorového vinutí vzniká v případě provozu generátoru s izolovaným nebo nepřímou uzemněným uzlem. Napětí v uzlu generátoru v případě zemního spojení na svorkách generátoru vzroste na velikost fázového napětí a díky tomu je na nepostižených fázích napětí vůči zemi sdružené. To následně namáhá izolaci a zvyšuje riziko průrazu a vzniku dalšího zemního spojení, ať už na stejné fázi (vznik mezizávitového zkratu), nebo k zemnímu spojení na jiné než dosud postižené fázi (vznik mezifázového zkratu). Napětí v uzlu se snižuje se vzdáleností zemního spojení od svorek generátoru (Obr. 12). Poruchový proud má kapacitní charakter a jeho velikost závisí na velikostech kapacit připojené sítě (malý v případě blokového uspořádání, až desítky ampér v případě přímého připojení generátoru do sítě), přesto je dostatečně malý na to, aby nebyl bezpečně detekován diferenciální ochranou. Zemní proud poškozuje zařízení (izolaci) a zvyšuje nebezpečí vzniku požáru. [1]

Vzhledem k poměrně nízkým proudům vzniklých touto poruchou, je nutné aplikovat správný způsob chránění. Od chránění proti zemním spojení statorového vinutí je vyžadováno, aby působily jen při této poruše v oblasti mezi uzlem generátoru a jeho vývody. Rozsah chránění se u jednotlivých způsobů udává v poměrné délce statorového vinutí od vývodů směrem k uzlu generátoru. [3]

Výsledkem měření netočivé složky napětí na svorkách generátoru pomocí PTN se sekundárními vinutími zapojenými do otevřeného trojúhelníka je trojnásobek skutečné hodnoty. Obdobně, jako je naznačeno dále, je netočivá složka dopočítávána ochranou při měření pouze fázových napětí.

$$\bar{U}_{\Delta} = \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{L3} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_\Delta &= \left(\bar{U}_{L1}^{(1)} + \bar{U}_{L1}^{(2)} + \bar{U}_{L1}^{(0)} \right) + \left(\bar{U}_{L2}^{(1)} + \bar{U}_{L2}^{(2)} + \bar{U}_{L2}^{(0)} \right) \\
 &\quad + \left(\bar{U}_{L3}^{(1)} + \bar{U}_{L3}^{(2)} + \bar{U}_{L3}^{(0)} \right) \\
 &= \left(\bar{U}_{L1}^{(1)} + \bar{U}_{L1}^{(2)} + \bar{U}_{L1}^{(0)} \right) + \left(\bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{L1}^{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{L1}^{(2)} + \bar{U}_{L1}^{(0)} \right) \\
 &\quad + \left(\bar{a} \cdot \bar{U}_{L1}^{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{L1}^{(2)} + \bar{U}_{L1}^{(0)} \right) = 3\bar{U}^{(0)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Výsledek měření netočivé složky proudu je podobný. Při využití průvlekového měřícího transformátoru nebo Holmgreenova zapojení PTP je výsledkem trojnásobek netočivé složky proudu.

$$\bar{I}_H = \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} \tag{9}$$

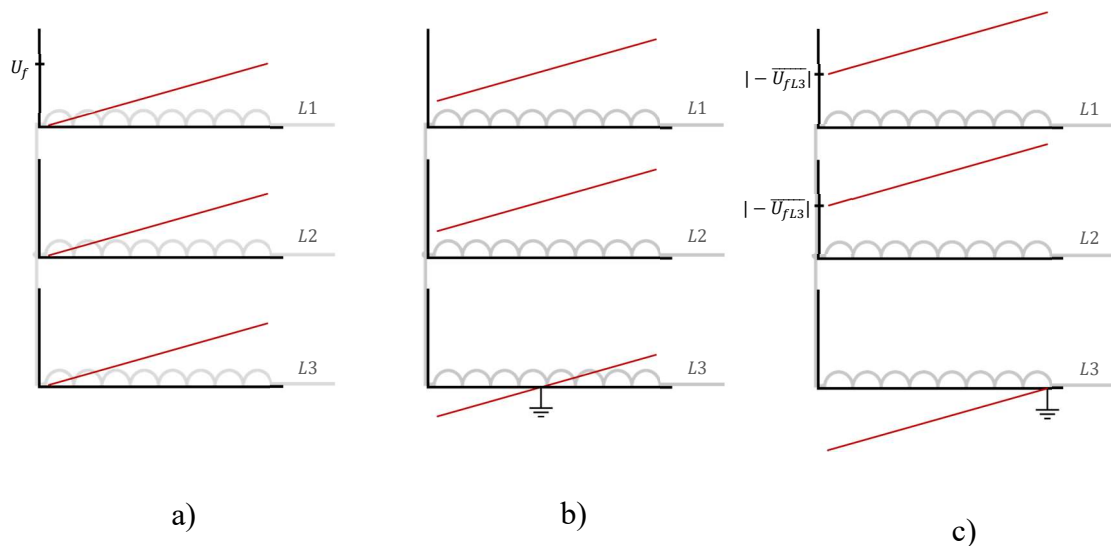
$$\begin{aligned}
 \bar{I}_H &= \left(\bar{I}_{L1}^{(1)} + \bar{I}_{L1}^{(2)} + \bar{I}_{L1}^{(0)} \right) + \left(\bar{I}_{L2}^{(1)} + \bar{I}_{L2}^{(2)} + \bar{I}_{L2}^{(0)} \right) + \left(\bar{I}_{L3}^{(1)} + \bar{I}_{L3}^{(2)} + \bar{I}_{L3}^{(0)} \right) \\
 &= \left(\bar{I}_{L1}^{(1)} + \bar{I}_{L1}^{(2)} + \bar{I}_{L1}^{(0)} \right) + \left(\bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L1}^{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L1}^{(2)} + \bar{I}_{L1}^{(0)} \right) \\
 &\quad + \left(\bar{a} \cdot \bar{I}_{L1}^{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L1}^{(2)} + \bar{I}_{L1}^{(0)} \right) = 3\bar{I}^{(0)}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Pro zjištění zemního spojení statorového vinutí generátoru s izolovaným uzlem se využívají ochrany měřící netočivou složku napětí v uzlu generátoru nebo na svorkách generátoru ať už o systémové, nebo jiné (často subharmonické) frekvenci:

- a) nadpět'ová ochrana monitorující velikost netočivé složky napětí $U^{(0)}$ (při připojení generátoru k síti přes blokový transformátor)
- b) nadproudová ochranná funkce monitorující velikost nulové složky proudu $I^{(0)}$
- c) ochrana monitorující velikost $U^{(0)}$ a $I^{(0)}$ s případným měřením úhlu mezi jejich fázory (nutné pro generátory připojené do sítě bez blokového transformátoru)
- d) injektáž subharmonického napětí (20 Hz)
- e) měření 3. harmonické napětí

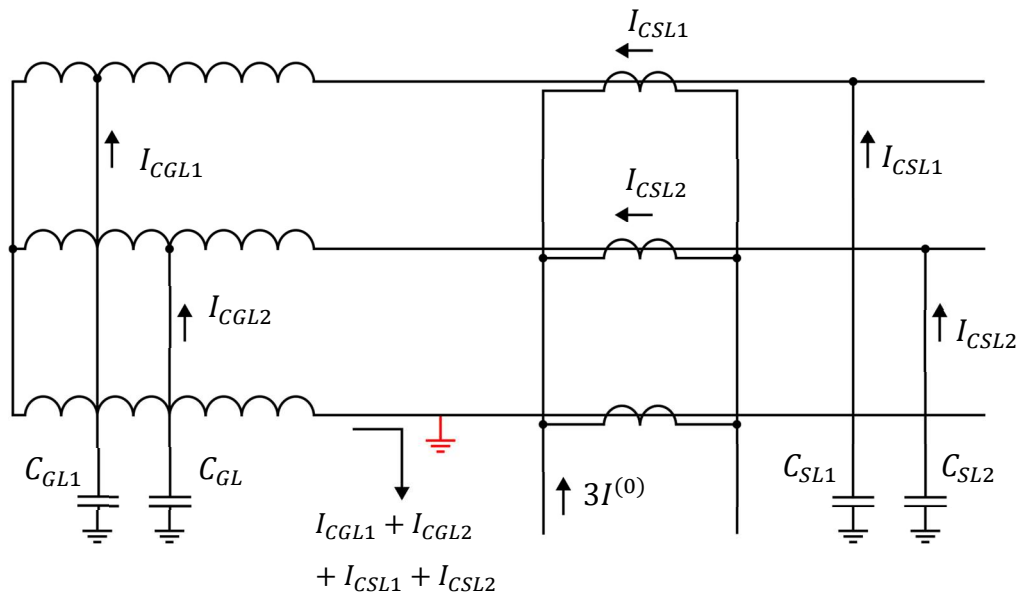
90% zemní ochrana statoru

Ochrana (ANSI 59N) je založena na měření napětí v uzlu generátoru. Vlivem zemního spojení se v uzlu generátoru vyskytuje netočivá složka napětí, kterou lze přímo měřit pomocí přístrojových transformátorů napětí (PTN) v uzlu nebo na svorkách stroje se sekundárními vinutími zapojenými do otevřeného trojúhelníka nebo dopočítávat z měřených fázových napětí. Vzhledem k tomu, že se v sítích přirozeně vyskytují nesymetrie (především vlivem zátěže), není napětí v uzlu generátoru vždy nulové, nastavuje se tedy rozběhová hodnota ochrany na 10 % jmenovitého fázového napětí generátoru. Ochrana se tím omezuje na 90 % délky vinutí od svorek generátoru. [1]

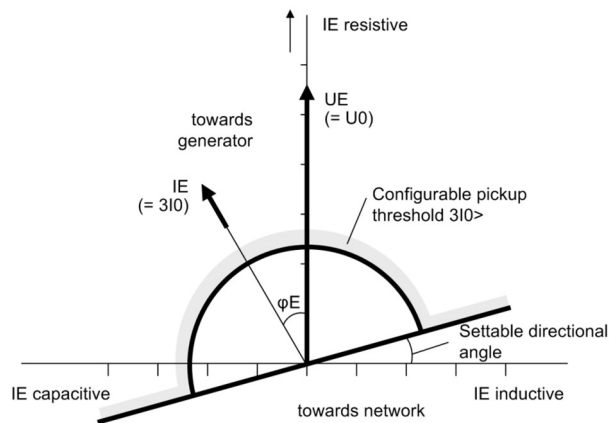


Obr. 12: Vliv místa výskytu zemního spojení na velikosti fázového napětí (a - bez ZS, b - ZS uvnitř stroje, c - ZS na svorkách generátoru)

Tato metoda postačuje v případě provozu generátoru v izolované soustavě a s blokovým transformátorem. V případě přímého připojení generátoru do sítě není možné touto metodou odlišit zemní spojení statoru generátoru od zemních spojení vzniklých v síti vn. Netočivá složka napětí je pak pouze nutnou podmínkou pro rozběh ochrany, ale dále je potřeba měřit velikost a popřípadě směr netočivé složky proudu na výstupu generátoru (buďto průvlekovým PTP nebo Holmgreenovým zapojením tří PTP). Ochrana vypíná s nastaveným časovým zpožděním, pokud je netočivá složka napětí vyšší než nastavené napětí a v závislosti na nastavených stupních, pokud je netočivá složka proudu větší než nastavená hodnota a teče směrem ke generátoru. [6]



Obr. 13: Měření velikosti netočivé složky proudu Holmgrenovým zapojením PTP



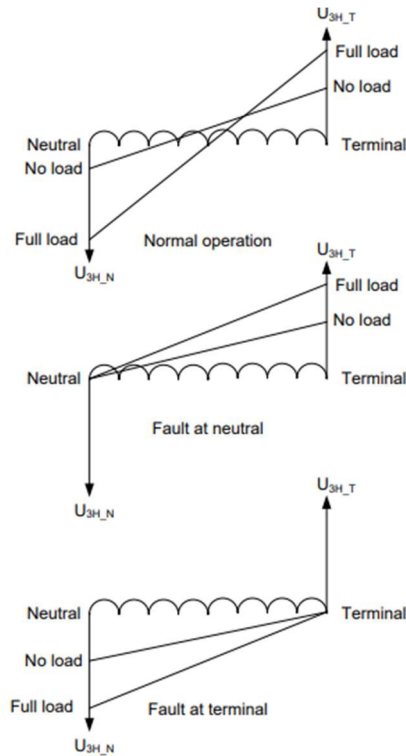
Obr. 14: Příklad vypínací charakteristiky na základě měření netočivé složky proudu a jejího směru (převzato z [9])

Měření proudu musí být umístěno mezi chráněným objektem a připojenou sítí. V případě zemního spojení se kapacity sítě a generátoru chovají jako zdroje induktivního výkonu a je naměřena netočivá složka proudu. Generátor připojený do soustavy přes blokový transformátor je možné vybavit pouze monitoringem velikosti netočivé složky napětí. Generátor bez blokového transformátoru je vzhledem k vyšším hodnotám netočivé složky napětí v bezporuchovém stavu nutno vybavit měřením nulové složky proudu. Pokud jsou kapacity generátoru a připojené sítě podobné, což u generátorů připojených bez blokového transformátoru možné je, je nutné ochranu navíc vybavit podmínkou zohledňující směr nulové složky proudu. [6] Ochrana pak vybavuje jen při netočivé složce proudu tekoucí

směrem ke generátoru. Nastavení směru a mezní hodnoty proudu je prováděno až na místě při instalaci ochran po simulaci zemního spojení na připojeném generátoru do sítě.

100% zemní ochrana statoru využitím 3. harmonické

Pro chránění celé délky statorového vinutí je nutno využít v kombinaci s 90% statorovou zemní ochranou měření netočivé složky napětí o jiné než síťové frekvenci. Generované napětí není dokonale sinusové, ale obsahuje v každé fázi napětí o trojnásobné frekvenci se stejnou amplitudou i úhlem a jedná se tedy o netočivou složku napětí 3. harmonické. Tato netočivá složka dosahuje amplitudy od 1 % do 10 % svorkového napětí podle konstrukce generátoru a velikosti činného výkonu. Za pomoci digitální filtrace ji lze měřit v uzlu generátoru, nebo na svorkách generátoru pomocí PTN se sekundárními vinutími zapojenými do otevřeného trojúhelníka, nebo dopočítávat z měření fázových napětí. Rozložení amplitudy 3. harmonické na vinutí stroje je závislé na místě výskytu zemního spojení a dodávaném činném a jalovém výkonu do soustavy. Při zemním spojení se změní poměr parazitních kapacit jejich částečným místním zkratováním a tím i poměr napětí 3. harmonické v uzlu generátoru ku napětí na svorkách. V případě zemního spojení blízko uzlu generátoru napětí 3. harmonické měřené v uzlu klesá, zatímco napětí měřené na svorkách generátoru roste. [7]



Obr. 15: Rozložení amplitudy 3. harmonické v závislosti na místě zemního spojení a odebíraného činného výkonu (převzato z [7])

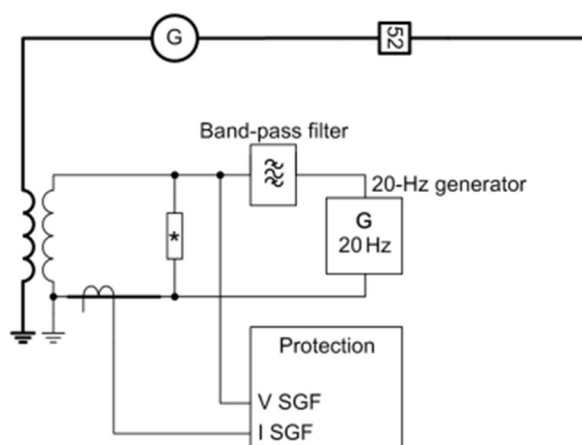
Rozsah chránění ochrany využívající měření 3. harmonické je minimálně 15 ÷ 20 % od uzlu generátoru, což účinně doplňuje ochranu měřící netočivou složku napětí o systémové frekvenci. Pro zajištění 100% ochrany statorového vinutí je tedy možné v kombinaci s 90% zemní ochranou statoru využít podpět'ovou ochranu působící na 3. harmonickou (ANSI 27TN nebo 27TH) v uzlu generátoru nebo nadpět'ovou ochranu působící na 3. harmonickou na vývodech generátoru (ANSI 59TN nebo 59TH). Pro omezení vlivu činného výkonu na amplitudě 3. harmonické lze ochranu provést jako rozdílovou buďto pracující s vektory měřených napětí (v případě ABB), nebo jen s velikostmi naměřených napětí (Siemens) (ANSI 59THD). [6; 7]

100% zemní ochrana statoru – injektáž napětí 20 Hz

Ochrana využívající injektáž 20 Hz napětí do uzlu generátoru (ANSI 64G) je využívána v případě generátorů pracujících do soustavy přes blokový generátor. Toto napětí je nezávislé na netočivé složce napětí o základní harmonické, vznikající při zemním spojení, a je možné za jeho pomoci detekovat zemní spojení v celé délce statorového vinutí včetně uzlu generátoru. Zároveň je tato ochrana nezávislá na provozním stavu generátoru

(zatížený/nezatížený, podbuzený/přebuzený, rotující/zastavený). Ochrana se využívá jako záložní ochrana 90% ochrany statoru generátorů středních a vyšších výkonů. [6]

Externí nízkofrekvenční zdroj střídavého napětí generuje napětí o obdélníkovém průběhu, které je následně přes filtr (pásmovou propust) přivedeno na zatěžovací rezistor transformátoru v uzlu generátoru nebo na Y/d sériový transformátor na výstupu generátoru. Pásmová propust vyhlazuje hrany injektovaného napětí a zároveň jako ochrana při výskytu plného fázového napětí v nulovém bodě generátoru při zemním spojení. Ochrana následně sleduje napětí a protékající proud pomocným obvodem a dopočítává odpor poruchové smyčky. Díky tomu lze detekovat zemní spojení nejen na generátoru, ale také na vývodech a přístrojových transformátorech. Ochrana vybavuje, pokud je vypočítaný odpor menší než zadaná hodnota. [6]



Obr. 16: Příklad zapojení 100% ochrany statoru (20Hz) (převzato z [6])

2.3 Zemní spojení rotorového vinutí

Budící vinutí rotoru je obvykle provozováno bez uzemnění, rotorové plechy jsou uzemněny přes ložiska generátoru. Výskyt jednoho zemního spojení nepředstavuje ohrožení stroje, avšak způsobuje namáhání izolace, druhé zemní spojení způsobuje zahřívání železa rotoru a vibrace způsobené nesymetrickým rotujícím magnetickým polem, které mohou stroj vzhledem k velkým mechanickým silám zničit. První zemní spojení se zpravidla jen signalizuje a stroj je možno nadále udržovat v provozu, je odstavován obsluhou. Při druhém zemním spojení je stroj odstaven automaticky ochranou. [1]

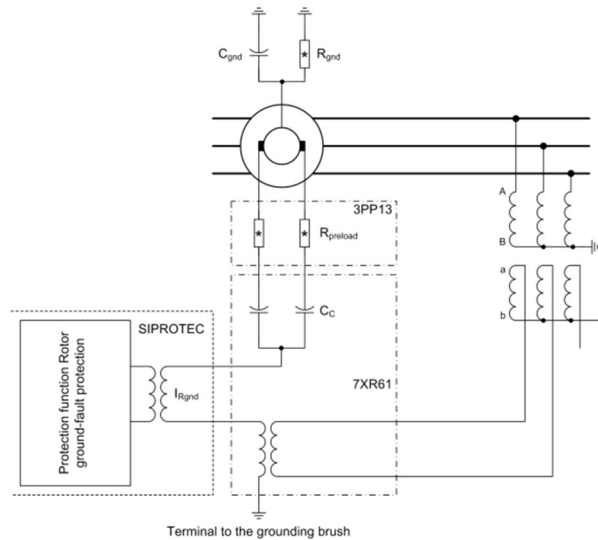
Protože je pro buzení využíváno stejnosměrného proudu, detekce zemního spojení na rotoru je nejčastěji realizována pomocí injektaže střídavého napětí o velikosti jen několika desítek voltů a následného měření střídavého proudu, který se vlivem zemního spojení vyvine.

Používané způsoby zemních ochran rotoru jsou

- a) injektaž střídavého napětí ($3 \text{ Hz}, f_n$)
- b) měření stejnosměrného napětí na napěťovém děliči

Zemní ochrana rotoru (f_n , měření I_{gnd})

Ochrana (ANSI 64R) pracuje s externím pomocným střídavým napětím o systémové frekvenci s napětím od 39 V do 47 V. Napětí je získáno z PTN na vývodech generátoru a pomocí vazebního členu přivedeno symetricky na obvod budícího vinutí. Ochrana měří protékající proud, který se v bezporuchovém stavu vlivem parazitní kapacity rotorového vinutí pohybuje okolo několika mA. Při výskytu jednoho zemního spojení ochrana detekuje zvýšený proud odpovídající vysokoimpedanční poruše a tento stav hlásí obsluze. Druhým zemním spojením vzniká nízkoimpedanční porucha ($1 \text{ k}\Omega \div 3 \text{ k}\Omega$), jejíž vybavovací hodnota je převedena na proud pomocí přiváděného napětí vazebního členu, impedance vazebního členu a odporu poruchy ($3 \text{ k}\Omega$ výstražný stupeň, $1 \text{ k}\Omega$ vypínací stupeň). Mezní hodnoty proudu je nutno dopočítat na základě uvedených impedancí. Ochrana nerespektuje možné snížení napětí na svorkách generátoru, které ovlivní velikost měřeného proudu. [6]



Obr. 17: Injektáž střídavého napětí do budícího vinutí o frekvenci f_n – měření proudu (převzato z [6])

Podle značení z Obr. 17 (převzatý z manuálu elektrické ochrany SIPROTEC 5) lze dosazením mezních hodnot elektrického odporu zemního spojení do následující rovnice dopočítat mezní hodnoty pro zemní proud.

$$I_{R_{gnd}} = \frac{U_{R_{gnd}}}{R_F + Z_{coupling}} \quad (11)$$

kde

$I_{R_{gnd}}$ je zemní proud rotoru protékající vazebním členem

$U_{R_{gnd}}$ je napětí na vazebním členu

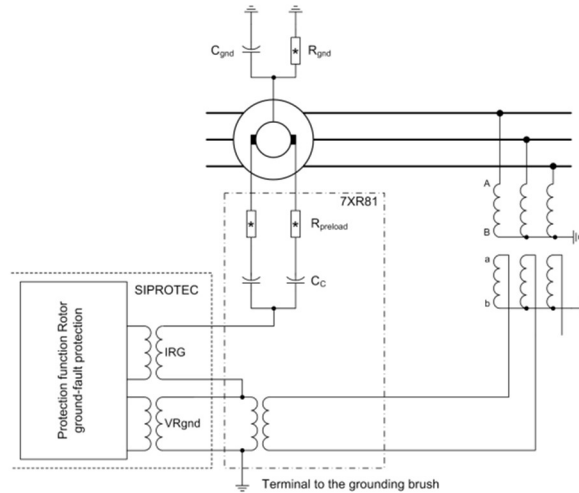
R_F je odpor v místě zemního spojení rotorového vinutí

$Z_{coupling}$ je impedance vazebního členu

Zemní ochrana rotoru (f_n , měření R_{gnd})

Způsob přivedení napětí je stejný jako u předchozí metody (stejný kód ANSI), rozdíl nastává ve způsobu vyhodnocení. Ochrana nyní neměří jen proud, ale také napětí injektované do rotorového vinutí. Následně porovnává vypočtenou hodnotu poruchového odporu s nastavenou hodnotou – mezní hodnoty zmíněné výše. Opět je využito dvoustupňového chránění – výstraha pro vysokoohmické poruchy (jedno zemní spojení), vypnutí v případě

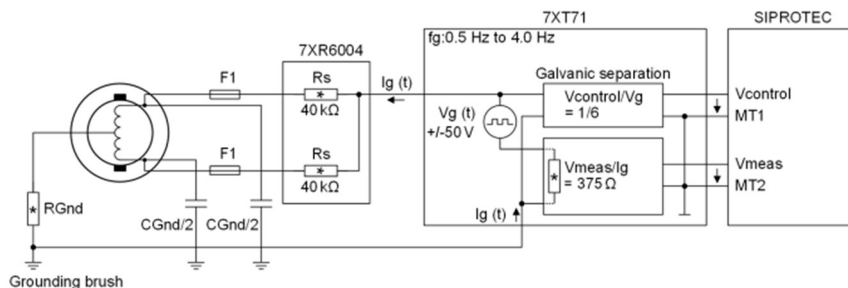
nízkoohmické poruchy (dvojitě zemní spojení). Výhodou je nezávislost ochrany na odchylkách svorkového napětí. [6]



Obr. 18: Injektáž střídavého napětí do budicího vinutí o frekvenci f_n – měření odporu (převzato z [6])

Zemní ochrana rotoru (1-3 Hz)

Na rotorové vinutí lze přivést i zcela nezávislé střídavé napětí. Často využívaným způsobem chránění je přivádění střídavého napětí s obdélníkovým průběhem o frekvenci 1 Hz ÷ 3 Hz a velikosti 50 V (ANSI 64F). Díky využití nízké frekvence je z velké míry omezen vliv parazitní kapacity železa rotoru a vinutí. V principu je opět měřen odpor pomocí napětí a proudu a reakce ochrany rozdělena na 2 stupně – signalizační a vypínací – podle velikosti naměřeného odporu poruchové smyčky.

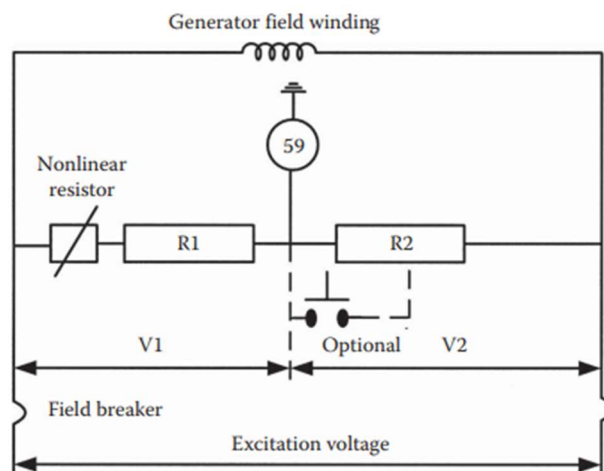


Obr. 19: Zapojení zemní ochrany rotoru (1-3 Hz) (převzato z [6])

Měření stejnosměrného napětí na napěťovém děliči

V americké literatuře je možné se dočíst o způsobu chránění proti zemním spojení rotoru pomocí detekce nadpěťovou ochranou (viz Obr. 20). V rotorovém obvodu je paralelně k budicímu vinutí připojen odporový napěťový dělič (dva stejné rezistory) s nadpěťovou ochranou monitorující napětí v jeho středu vůči zemnímu potenciálu. Pokud se na rotoru nevyskytuje zemní spojení, nemá nadpěťová ochrana důvod vybavit, protože rotorové vinutí není uzemněno. V případě zemního spojení na jednom z konců budicího vinutí bude ve středu měřícího můstku maximální možné napětí. V případě zemního spojení uprostřed budicího vinutí se uprostřed napěťového děliče napětí nezvýší a ochrana nezareaguje. Tento problém je řešen nelineárním rezistorem měnícím svůj odpor v závislosti na přiloženém napětí. Napěťový dělič je pak nastaven tak, aby bod s nulovým měřeným napětím byl uprostřed budicího vinutí při určeném napětí budiče. Tento způsob je určen především pro stroje s kroužky na rotoru. Pro bezkroužkové stroje je signalizace této ochrany přenášena bezdrátově (nejčastěji světelně – LED laser) mimo rotující oblast. [3]

Nevýhodou této metody chránění je nemožnost detekce druhého zemního spojení.



Obr. 20: Nadpěťová ochrana rotoru na napěťovém děliči (převzato z [3])

2.4 Přetížení

U generátorů je ochrana proti proudovému přetížení jednou ze základních ochran, která chrání generátor před nadměrným oteplením, které způsobuje degradaci izolace a může následně způsobit zkrat nebo zemní spojení. Vývin tepla je zapříčiněn činným odporem vodičů a popsán Jouleovým zákonem:

$$Q = 3R \int_0^T i^2(t) dt \quad (\text{J}) \quad (12)$$

kde

Q je tepelná energie akumulovaná v statorovém vinutí

R odpor jedné fáze statorového vinutí

$i(t)$ časový průběh fázového proudu

T doba trvání proudového přetížení.

Generátory jsou od výrobce navrženy na jmenovitou hodnotu oteplení (teploty), na kterém se ustálí při jmenovitém zatížení při normální funkci chlazení. Přetěžování generátoru způsobuje jeho nadměrné oteplení (vlivem nedostatečného chlazení), při kterém jej není možno provozovat trvale z důvodu urychleného stárnutí izolace a zvýšeného rizika jejího poškození a vzniku zkratu nebo zemního spojení. [1; 8]

Teplotu stroje je možno měřit přímo pomocí termočlánků, jejich odezva je ale opožděná, protože měří teplotu železa statoru, ne přímo vinutí. Doba zpoždění oteplení je závislá na tepelné časové konstantě stroje. Podle uvedeného Jouleova zákona lze pro ochrany proti přetížení použít časově závislé nadproudové ochrany (oteplení je tím rychlejší, čím je větší statorový proud). S pomocí této ochrany můžeme generátor krátkodobě přetížit a dosáhnout lepšího tepelného využití stroje. Pro generátory větších výkonů není tento způsob chránění vhodný z důvodu vysokých proudů a výkonnějšího chlazení. Tato kombinace snižuje tepelnou časovou konstantu a zároveň se podstatně mění při znečištění chladicího média a je různá pro pomalé a rychlé změny zatížení. Pro generátory velkých výkonů je vhodnější využít nadproudovou ochranu časově nezávislou. Při proudovém přetížení není generátor odpojován ze sítě, ale pomocí automatik je rekonfigurována distribuční síť, aby bylo umožněno odlehčení stroje. [8]

Nejvyužívanější způsoby detekce přetížení jsou:

- a) přímé měření teploty statorového vinutí
- b) měření proudu v kombinaci s termokopií
- c) distanční (impedanční) ochrana [1]

Přímé měření teploty statorového vinutí

Spolehlivým způsobem detekce přetížení je přímé měření teploty statorového vinutí za pomoci termočlánků, které jsou umístěny ve statoru stroje. Termočlánky jsou umístěny co nejbližší statorového vinutí, aby bylo omezeno zpoždění jejich oteplení. Ochrana reaguje v rámci nastavených hodnot teploty podle povolených mezí oteplení stroje udaných výrobcem.

Měření proudu v kombinaci s matematickým tepelným modelem

Další možností detekce přetížení je použití měření proudu, které ochrany využívají v kombinaci s termokopií (u digitálních ochran matematicky popsáný tepelný model) stroje na jejímž základě dopočítávají teplotu vinutí.

$$I_{p.j.}^2 = \tau \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta - \theta_{amb} \quad (13)$$

kde

$I_{p.j.}$ je proud vztažený na maximální přípustný proud generátoru $k I_{nG}$

τ je tepelná časová konstanta chráněného objektu

θ je aktuální teplota chráněného objektu vztažená na jeho maximální teplotu při maximálním přípustném proudu

θ_{amb} je standardizovaná teplota okolí (chladícího média) určená jako poměr rozdílu teploty chladícího média od referenční hodnoty 40 °C a maximální teploty při maximálním přípustném proudu generátoru.

Ochrana je provozována jednofázově a reaguje ve dvou stupních – výstražný stupeň při dosažení nastavené teploty nebo proudu a vypínací stupeň po dosažení maximální přípustné teploty, který funguje jako nadproudová ochrana s časovou závislostí vypočítanou na základě tepelné časové konstanty a protékajícího proudu. [6]

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{I_{p.j.}^2}{I_{p.j.}^2 - 1} \right) (s) \quad (14)$$

2.5 Nadpětí

Provozní nadpětí vzniká rychlým poklesem odběru činného i jalového výkonu (následky zkratů, porucha regulátoru buzení, zvýšení otáček). Při přepětí se zvyšuje magnetický tok uvnitř stroje a dochází k přesycení magnetického obvodu a k nadměrným ztrátám vlivem vířivých proudů, které způsobují oteplení stroje. Zároveň nadpětí urychluje stárnutí izolace a zvyšuje se tak možnost jejího poškození. Je tedy často prvotní příčinou vzniku zemních spojení nebo zkratů. Výrobce generátoru udává délku a čas nadpětí, které stroj vydrží, ochrany musejí být nastaveny pod tyto hodnoty. Proti nadpětí nejprve působí regulátor buzení. Pokud nadpětí regulátor nedokáže odstranit, reagují ochrany. [8]

Dalším typem jsou nadpětí atmosférická (úder blesku do fázových vodičů nebo zemních lan – pak se hovoří o indukovaných nadpětích), která se narozdíl od provozních nadpětí vyznačují vysokou hodnotou napětí. A jsou nebezpečná z hlediska elektrické pevnosti použité izolace vinutí generátoru. [10]

Pro chránění proti nadpětí se využívají ochrany:

- a) nadpět'ová ochrana
- b) ochrana před zvýšeným magnetickým tokem

Nadpět'ová ochrana

Nadpět'ová ochrana (ANSI 59) se pro turbogenerátory využívá jako jednostupňová časově nezávislá, pro hydrogenerátory časově nezávislá se dvěma stupni, signalizačním (kontrola

funkce buzení) a vypínacím pro vysoká napětí (tzn. např. nad 110 % U_{nG} – vypnutí s časovým zpožděním, 130 % ÷ 150 % U_{nG} – okamžité vypnutí). Hodnotu délky a velikosti dovoleného napětí stroje udává výrobce generátoru, popřípadě norma ČSN EN IEC 60034-1 a nastavení ochrany musí být pod touto hranicí.

Ochrana před zvýšeným magnetickým tokem

Jak bylo uvedeno, poměr napětí a frekvence je přímo úměrný magnetickému toku v generátoru, proto je pro generátory velkých výkonů využívá ochrana před zvýšeným magnetickým tokem (ANSI 24), která chrání generátor společně s blokovým transformátorem. Pokud poměr měřeného napětí ku měřené frekvenci vzroste nad nastavenou hodnotu poměru, ochrana vybavuje.

2.6 Podpětí

Podpětí vzniká při nadproudech a zkratových proudech nebo při poruše buzení. Snížené napětí na svorkách generátoru stroj samotný přímo neohrožuje, je ale ohrožena správná funkce systémů a přístrojů napájených z generovaného napětí jako například pohony klapky, rychlouzávěrů nebo olejových čerpadel. Nastavení je prováděno především podle zkušeností projektanta.

2.7 Nadsynchronní/podsynchronní otáčky

Při práci stroje připojeného k elektrizační soustavě za běžného provozu je zvýšení rychlosti a tím frekvence velmi nepravděpodobné, poněvadž frekvence je systémová veličina řízená z dispečinku ČEPS. Změna frekvence, a tím otáček stroje může nastat při odpojení generátoru od sítě nebo při přechodu výrobního bloku do ostrovního provozu, kdy je frekvence řízena regulátorem ostrovního provozu v místě výroby. Zvýšení otáček je nebezpečné jak pro generátor samotný ale především, z hlediska odstředivých sil, pro turbíny, ať už parní nebo vodní. Snížená frekvence, může způsobovat oteplení stroje zvýšeným magnetickým tokem v magnetickém obvodu generátoru a zároveň sníženou

schopností ventilace stroje. Zároveň je potřeba se vyvarovat poklesu otáček na tzv. kritické otáčky, při kterých vzniká mechanická rezonance, která může poškodit turbínu. [10]

Dodávaný činný výkon do sítě je v případě náhlého odlehčení (např. odpínání zátěží, rychlý nárůst výroby fotovoltaických nebo větrných elektráren) nebo zvýšení zatížení (výpadek zdroje, poruchy v síti) řízeny řídicím systémem turbíny. V případě podsynchronních otáček při rozběhu stroje je regulátor buzení blokován, aby nedocházelo k přesycování magnetických obvodů vlivem proudů nízkých frekvencí.

Při překročení frekvenčního limitu podle kodexu přenosové soustavy (viz Tab. 1) zasahuje rozpadová automatika, rozkládající elektrizační síť na ostrovní oblasti s vlastním řízením frekvence tak, aby byl izolován úsek elektrizační soustavy způsobující zvýšení/snížení frekvence. Pokud tato operace nepřinese vyrovnaní frekvence, zasahuje podfrekvenční ochrana stroje (ANSI 81U), nebo nadfrekvenční ochrana (ANSI 81O). Mezní frekvence jsou pro hydrogenerátory nastavovány podle kodexu přenosové soustavy, kde jsou určeny frekvenční limity podle typu výrobního zdroje. Často jsou pro hydrogenerátory nastavovány pouze signalizační stupně a odpojení od soustavy ovládají ochrany v nejbližších rozvodnách. Kritické otáčky se u hydrogenerátorů pohybují pod 50 % jmenovitých otáček, v normálním provozu tedy nepředstavují pro generátor riziko. [1; 11]

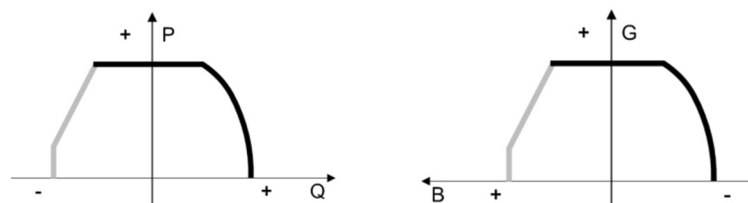
Tab. 1: Vymezení frekvence pro pásma provozu (převzato z: [11])

Typ elektrárny	Uhelné	JE		VE	PVE		PPE	Nové VM, OZE a BSAE
		EDUK	ETEM		turbína	čerpání		
Provoz								
Normální bez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5	49-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5		48.5-51.5	49-51
S omezením časovým a na P a $\cos\varphi$	46-48.5 50.5-53	47.5-48.5 50.5-52.5	47.9-49 50.5-51.5	46-48.5 50.5-53	46-48.5 50.5-53	49-49.5 50.5-53	48-48.5 51.5-52	47.5-49 51.-51.5
Nepřipustný	$f > 53$ $f < 46$	$f > 52.5$ $f < 47.5$	$f > 51.5$ $f < 47.9$	$f > 53$ $f < 46$	$f > 53$ $f < 46$	$f > 53$ $f < 49$	$f > 52$ $f < 48$	$f > 51.5$ $f < 47.5$
Automatické odpojení od ES	$f > 53$ $f < 47.5$	$f > 52.5$ $f < 47.9$	$f > 51.5$ $f < 47.9$	$f > 50.2(51.5)$ $f < 47.5$	$f > 50.2(51.5)$ $f < 47.5$	$f > 52(53)$ $f < 49.8-49.2$	$f > 52$ $f < 48$	$f > 51.5$ $f < 47.5$

2.8 Podbuzení a ztráta buzení

Buzení synchronních generátorů je prováděno stejnosměrným proudem. Jeho velikost má vliv na generované elektromotorické napětí stroje, což ovlivňuje velikost napětí na svorkách stroje, velikost a směr toku jalového výkonu. Podbuzení způsobuje oslabení vazby mezi rotorem a statorovým polem a zahřívání čel vinutí, což může poškodit jak izolaci vinutí, tak izolaci plechů magnetického obvodu. V přebuzeném stavu spotřebovává generátor jalový výkon induktivního charakteru, v podbuzeném stavu se generátor stává spotřebičem kapacitního výkonu. Velikost budícího proudu určuje regulátor napětí. V případě jeho poruchy je ochranou hlídána především mez podbuzení. Provozní bod generátoru v PQ diagramu (provozním diagramu) musí být udržen uvnitř oblasti stability, jinak stroj vypadáva ze synchronismu a je nutné jej odstavit. Úplná ztráta buzení turbogenerátoru s amortizérem nebo hydrogenerátoru má za následek přechod synchronního generátoru do asynchronního chodu, kdy generátor pracuje v nadsynchronních otáčkách, zatímco ze sítě odebírá jalový výkon pro svou magnetizaci. To má za následek pokles napětí v síti, ohrožení stability sítě, nebo kývání výkonu, které může poškodit turbínu. Pokud stroj nemá tlumící vinutí, jsou v železe rotoru indukovány nadměrné vířivé proudy, čímž se stroj urychleně zahřívá. [1; 8]

Jako ochrana je využívána ochrana proti podbuzení (ANSI 40), pro jejíž fungování je třeba měřit fázové proudy i svorková napětí z jejichž sousledných složek ochrana dopočítává admitanci stroje. Admitance je určena jako součet konduktance G a susceptance B . V poměrných jednotkách jsou diagramy PQ a GB osově souměrné podle vodorovné osy. Díky tomuto převodu je možné nastavovat charakteristiky ochrany pomocí podélné impedance stroje v poměrných jednotkách. Tento zmíněný styl nastavování ochrany je využíván firmou Siemens. Výrobci ABB nebo GE využívají nastavení ochrany v impedanční rovině pomocí off-set mho kružnic. [6; 7]



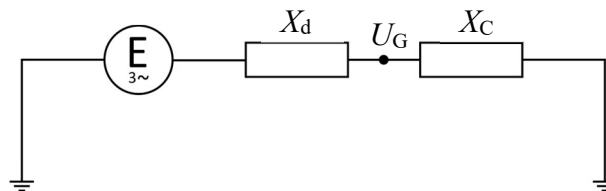
Obr. 21: PQ diagram (vlevo) a admitanční diagram (vpravo) synchronního generátoru (převzato z [6])

$$G_{p.j.} = g = \frac{\frac{P}{S_{nG}}}{\left(\frac{U}{U_{nG}}\right)^2} \quad (\text{p.j.}) \quad (15)$$

$$B_{p.j.} = b = -\frac{\frac{Q}{S_{nG}}}{\left(\frac{U}{U_{nG}}\right)^2} \quad (\text{p.j.}) \quad (16)$$

2.9 Samobuzení

Generátor může jalový výkon indukčního charakteru získávat nejen jeho generováním budičem, ale také z vnější kapacitní zátěže, což mohou být nezátížená vedení nebo kompenzátory. Výsledkem je zvýšené napětí (teoreticky se zvyšující do nekonečna, sycení stroje přispívá k jeho ustálení) na svorkách stroje, které se těžko snižuje odbuzením. Samobuzení může vzniknout za podmínky $X_L = X_C$. [8] Zjednodušeně můžeme uvažovat elektrický obvod tvořený podélnou impedancí stroje a zátěží kapacitního charakteru napájený vnitřním napětím generátoru. Velikost napětí na svorkách generátoru lze odvodit z rovnosti proudu tekoucího uvažovanými reaktancemi.



Obr. 22: Náhradní schéma pro případ samobuzení

$$\frac{E}{X_d - X_c} = \frac{U_G}{-X_c} \quad (17)$$

$$U_G = E \cdot \frac{X_c}{X_c - X_d} \quad (18)$$

Chránění je provedeno pomocí měření napětí na svorkách společně s měřením budícího proudu. Vybavení nadpětové ochrany je blokováno, dokud není dosaženo minimální nastavitelné hodnoty budícího proudu.

2.10 Nesymetrické zatížení

Nesymetrické zatížení generátoru je charakterizováno proudy s různou amplitudou a fázovým posuvem v jednotlivých fázích. Tento trojfázový nesymetrický systém lze převést na tři souměrné trojfázové soustavy – sousledná (1), zpětná (2), netočivá (0). Úkolem ochrany proti nesymetrickému zatížení je měření zpětné složky proudu, která ve statoru vytváří točivé magnetické pole o synchronních otáčkách, avšak s opačným smyslem otáčení. Vzájemná rychlost rotoru a tohoto statorového pole je dvojnásobná a v důsledku toho se na povrchu rotoru indukují vířivé proudy o dvojnásobné frekvenci, které rotor zahřívají. Podobně se může přehřívat také tlumič stroje. Každý generátor má od výrobce stanovenou hodnotu maximální nesymetrie provozních proudů, jejichž hodnota se může překročit jen na stanovenou maximální dobu.

Jako ochrana se používá nadproudová ochrana časově závislá (ANSI 46) s charakteristikou kopírující oteplovací charakteristiku stroje v závislosti na obsahu zpětné složky proudu. První stupeň je signalizační po dosažení maximální trvalé hodnoty zpětné složky proudu, druhý stupeň vypíná dle inverzní časové charakteristiky dané rovnicí:

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I^{(2)}}{I_{nG}}\right)^2} \quad (19)$$

kde

t je maximální povolený čas provozu při daném nesymetrickém zatížení

$I^{(2)}$ je měřená zpětná složka proudu, I_{nG} jmenovitý proud generátoru

K je činitel asymetrie (faktor nesymetrického zatížení).

Činitel asymetrie je konstanta stroje a vyjadřuje čas v sekundách, po který může být stroj zatížen 100% nesymetrickou zátěží a pohybuje se obvykle mezi 5 a 30 sekundami. [6]

2.11 Zpětný tok činného výkonu

V případě ztráty hnacího momentu turbíny přechází generátor do motorického režimu, při kterém odebírá činný výkon ze sítě. Jeho velikost je úměrná velikosti mechanických ztrát uvnitř soustrojí. Motorický chod ohrožuje turbínu vlivem tepelných a mechanických účinků. Velikost vyráběného činného výkonu reguluje řídicí systém turbíny. Pro zamezení poničení soustrojí se využívá zpětná wattová ochrana (ANSI 32R), která generátor po působení mechanických ochran turbíny odpojí od sítě. Zpětná wattová ochrana je využívána u všech turboalternátorů a hydroalternátorů s výkonem do 12 MW. [1; 8]

2.12 Vnější zkratky

Zkratky vzniklé mimo generátor s sebou nesou nebezpečí přetížení, velkého mechanického namáhání a riziko vypadnutí generátoru ze synchronismu. Je využíváno nadproudových ochran (zkratová, s podpěťovou přídrží) nebo impedanční ochrana. Elektricky blízký zkrat způsobí nárůst proudu a pokles napětí. Pokud nedojde ke snížení napětí, jde o zkrat elektricky vzdálený, na který by měly působit ochrany v místě poruchy, nebo o přetížení. Proud se měří ve větvích uzlu generátoru, napětí na svorkách generátoru. Zkratovou ochranu zde zálohují impedanční (distanční) ochrana. Distanční ochrana má nastavenou první zónu do poloviny blokového transformátoru (někdy až 80 %), oblast za transformátorem k následující elektrické stanici se nachází v druhé zóně. [8]

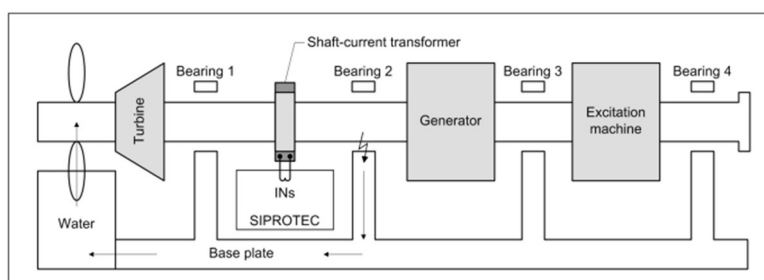
2.13 Ložiskové proudy

Vlivem nesymetrického statorového magnetického pole se na hřídeli rotoru (v podélném směru) indukuje napětí o velikosti několika voltů u strojů s hladkým rotorem, až 30 V u hydrogenerátorů (vzhledem k délce samotného generátoru mají dlouhé hřídele). Hřídel

2 Poruchy vyskytující se na synchronních generátorech

je zde uzemněn na několika místech pomocí turbíny a vody a skrz uzemněná pouzdra ložisek. Díky tomu se uzavírá proud, který poškozuje ložiska stroje (kritický proud je od 1 A). [8] Moderní stroje mají ložiska izolována a ochrana proti ložiskovým proudům plní funkci kontrolní.

Jako ochranu lze použít ochranu proti hřídelovým proudům (ANSI 51GN). Ochrana využívá speciální hřídelový proudový transformátor montovaný kolem hřídele stroje. Po překročení zadané hodnoty hřídelového (ložiskového) proudu, ochrana odstavuje generátor. [6]



Obr. 23: Ochrana proti hřídelovým proudům (převzato z [6])

3 Soubor ochranných funkcí konkrétního generátoru

Pro praktickou část diplomové práce byl firmou Invelt Elektro s.r.o. vybrán výrobní blok malé vodní elektrárny (MVE) o výkonu 790 kVA osazený ochranou Siemens SIPROTEC 4 7UM62 v rámci dřívější zakázky. Úkolem práce je návrh a nastavení ochranných funkcí za pomoci nové generace ochrany Siemens SIPROTEC 5 7UM85. Obě zařízení jsou digitální ochrany umožňující nastavení kompletního souboru vybraných ochranných funkcí.

Návrh souboru ochranných funkcí se v České republice řídí dle československé normy ČSN 33 3051. Tato norma byla vydána v roce 1992 a dnes je již vzhledem k technologickému posunu v oblasti elektrických ochranných zastaralá. Její platnost je omezena jen na území ČR a v zahraničí pro tuto normu není ekvivalent. Volba ochranných funkcí pro konkrétní objekt tedy závisí na zkušenosti projektanta. [10]

Podle normy je pro generátor o výkonu 790 kVA doporučena tato sada ochranných:

Tab. 2: Volba ochranných funkcí dle ČSN 33 3051 (podle [2])

S < 1 MVA
Nadproudová zkratová časově nezávislá (*)
Přetížení statoru
Nadpět'ová
Zpětná wattová

(*) pouze u zařízení bez trvalé obsluhy

3 Soubor ochranných funkcí konkrétního generátoru

Volba ochranných funkcí podle normy je doplněna ochrannými funkcemi dle doporučení pro zmíněný generátor. Seznam je uveden ve vypínací tabulce znázorňující oblast působení ochranných funkcí.

Tab. 3: Vypínací tabulka

Název	Značení	ANSI kód	QM	ODB	RZ	SIG
Rozdílová	Id>	87	•	•	•	•
Nadproudová zkratová	I>>	50	•	•	•	•
Nadproud/podpětí	I>/U<	51/27	•	•	•	•
Zemní ochrana statoru	U0>	59N	•	•	•	•
Podbuzení generátoru	R<,>	40				•
Ztráta buzení generátoru	R<<	40	•	•	•	•
Zpětná wattová	P<	32	•	•	•	•
Nesymetrie generátoru I.	I2>	46				•
Nesymetrie generátoru II.	I2>>	46	•	•	•	•
Přetížení statoru I.	θ >	49				•
Přetížení statoru II.	θ >>	49	•	•	•	•
Nadpěťová I.	U>	59	•	•	•	•
Nadpěťová II.	U>>	59	•	•	•	•
Podpěťová	U<	27				•
Podpěťová	U<<	27	•	•	•	•
Podfrekvenční I.	f<	81U				•
Nadfrekvenční	f>	81O				•

kde

QM je vypínač

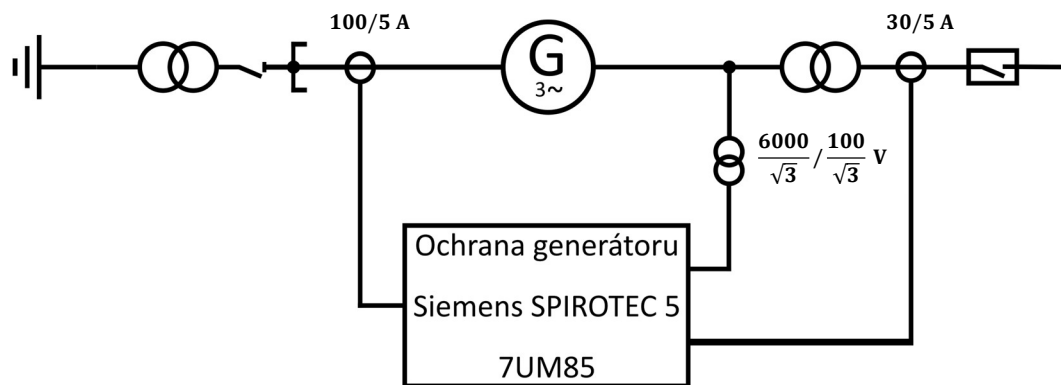
ODB je odbuzovač

RZ je rychlouzávěr vody

SIG je signalizace LED na panelu ochrany

4 Nastavení elektrických ochran synchronního generátoru

4.1 Jednopolové schéma výrobního bloku



Obr. 24: Jednopolové schéma výrobního bloku

Přístrojové transformátory proudu v uzlu generátoru jsou s převodem 100/5 A, na hladině 22 kV s převodem 300/5 A. Napěťové přístrojové transformátory měří fázová napětí v zapojení Yy0 s převodem $\frac{6000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}}$ V. Nastavení je provedeno pro blok bez připojené kompenzační tlumivky.

4.2 Technická data

Pro výpočet nastavení ochran je nutné znát co nejpřesněji vstupní údaje. V případě této práce jde o parametry generátoru, blokového transformátoru a připojené sítě společně s výpočtem zkratových poměrů.

- Generátor

Zdánlivý výkon $S_{nG} = 790 \text{ kVA}$

Jmenovité napětí $U_{nG} = 6300 \text{ V}$

Jmenovitý proud $I_{nG} = 72 \text{ A}$

Jmenovitá frekvence $f_{nG} = 50 \text{ Hz}$

Jmenovité otáčky $n = 429 \text{ ot/min}$

Jmenovitý účinník $\cos\varphi_{nG} = 0,9$

Počet pólů $n_p = 14$

Podélná synchronní reaktance $x_d = 1,43$

Podélná přechodná reaktance $x'_d = 0,15$

Podélná rázová reaktance $x''_d = 0,091$

Příčná synchronní reaktance $x_q = 1,29$

Příčná přechodná reaktance $x'_q = 1,29$

Příčná rázová reaktance $x''_q = 0,242$

Odpor armatury $r_a = 0,014$

Rozptylová reaktance $x_l = 0,002$

Netočivá složka reaktance $x_0 = 0,001$

Zpětná složka reaktance $x_2 = 0,149$

- Blokový transformátor

Zdánlivý výkon $S_{nT} = 1250 \text{ kVA}$

Jmenovité napětí $U_{nT} = 22/6,3 \text{ kV}$

Jmenovitá frekvence $f_{nT} = 50 \text{ Hz}$

Napětí nakrátko $u_k = 12 \% \text{ (odhad)}$

Zapojení $Yd1$

- Síť

Zdánlivý zkratový výkon $S''_{k3S} = 100 \text{ MVA} \text{ (odhad)}$

Jmenovité napětí $U_{nS} = 22 \text{ kV}$

4.3 Zkratové výpočty

Pro nastavení nadproudových ochran je nutno určit zkratové proudy. Maximální proudy jsou důležité pro stanovení jmenovitých hodnot zařízení v rámci mechanického a tepelného zatížení, minimální zkratové proudy jsou využity pro návrh a nastavení systému ochran. [12]

Výpočet zkratových proudů je určen normou ČSN EN 60909-0. Tato norma uvádí následující předpoklady pro jejich výpočet:

- a) po dobu trvání zkratu se nemění typ zkratu
- b) po dobu zkratu nedochází k žádným změnám v síti
- c) uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze
- d) odpory oblouků se neuvažují
- e) paralelní admitance netočivých zátěží jsou zanedbány ve všech složkových soustavách
- f) kapacity vedení jsou zanedbány v sousledné a zpětné složkové soustavě
- g) magnetizační admitance transformátorů jsou zanedbány ve všech složkových soustavách

Pro výpočet minimálních zkratových proudů jsou v normě ČSN EN 60909-0 uvedeny tyto podmínky:

- a) při výpočtu je nutno použít napěťový součinitel $c_{\min}=1$ (pro vysoké napětí od 1 kV do 230 kV)
- b) zvolí se konfigurace soustavy a minimální příspěvky elektráren a síťových napaječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- c) korekční součinitele impedancí jsou rovny 1
- d) příspěvek větrných a fotovoltaických elektrárenských bloků jsou zanedbány
- e) příspěvky motorů jsou zanedbány
- f) rezistence vedení se uvažují při vyšší teplotě

Navíc jsou pro výpočet určeny zjednodušující předpoklady:

- a) řešený trojfázový systém byl před poruchou symetrický a lze jej nahradit jednopólovým náhradním obvodem
- b) impedance všech prvků jsou lineární
- c) všechny podmínky pro aplikaci metody souměrných složek jsou splněny
- d) je přípustná pouze jedna porucha v jeden časových okamžik v jednom místě
- e) jmenovitě zatížený generátor dodává do sítě jmenovitý proud o jmenovitém účinníku, nezatížený generátor (naprázdno) nedodává do systému žádný proud a napětí na svorkách je jmenovité
- f) impedance poruchy je nulová
- g) převody transformátorů jsou uvažovány fiktivní
- h) činná složka impedance je nulová

Pro nastavení ochran by měl postačovat dle zkušeností projektantů výpočet 3f rázového zkratového proudu na svorkách generátoru a v síti 22kV při nezatíženém stavu. Pro porovnání je uveden i výpočet 3f zkratového rázového proudu v případě zatíženého generátoru. Výpočet je proveden za pomoci vztažných hodnot odpovídajících jmenovitému výkonu generátoru a jmenovitému napětí v místě zkratu. Převod p transformátoru je uvažován fiktivní.

$$S_v = S_{nG} = 790 \text{ kVA} \quad (20)$$

$$U_v = U_n \quad (21)$$

kde U_n značí jmenovitou hodnotu napětí v místě zkratu

Poměrné hodnoty reaktancí prvků

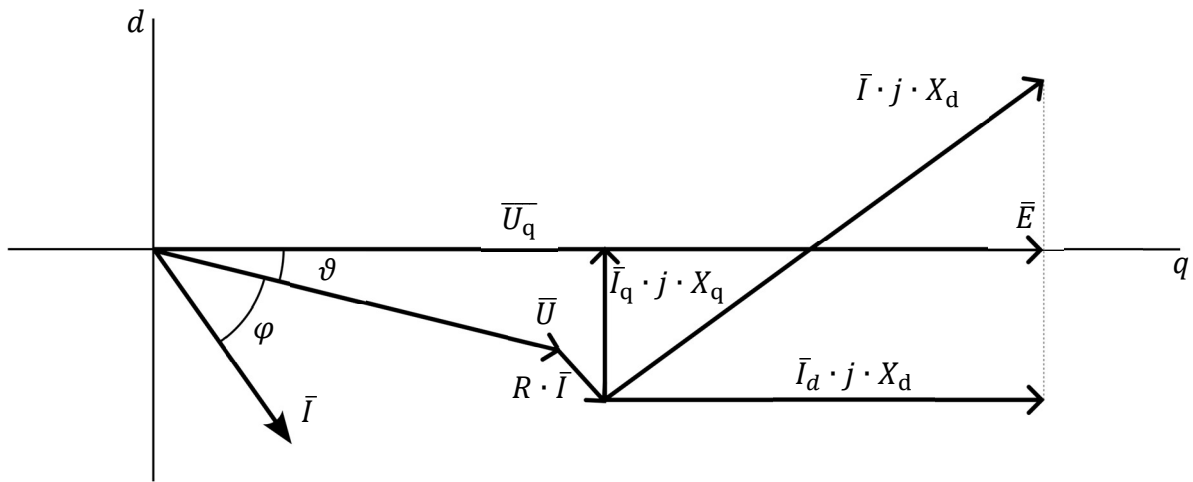
$$x_G'' = x_d'' \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = x_d'' = 0,091 \quad (22)$$

$$x_T = u_k \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = u_k \cdot \frac{S_v}{S_{nT}} = 0,12 \cdot \frac{790}{1250} = 0,0784 \quad (23)$$

$$x_s = \frac{c \cdot U_{nS}^2}{S_{k3}''} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{1 \cdot 22^2}{100 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{6,3}{22}\right)^2 \cdot \frac{790}{6,3^2} = \frac{790}{100 \cdot 10^3} = 0,0079 \quad (24)$$

Poměrná výpočtová napětí

Pro výpočet zkratových proudů je nutno uvažovat vnitřní napětí generátoru, jehož velikost je možné odvodit z fázorového diagramu hydroalterátoru. Při provozu naprázdno i při jmenovitém zatížení uvažujeme na svorkách stroje jmenovité napětí.



Obr. 25:Fázorový diagram generátoru s vyniklými póly

Činný odpor je zanedbán a pak vnitřní napětí v rázovém stavu:

$$e_f'' = u_{nGf} + i_d \cdot x_d'' = u_{nGf} \cdot \cos \delta'' + i_G \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi - \delta''\right) \cdot x_d'' \quad (25)$$

kde δ je zátěžný úhel generátoru:

$$\delta'' = \arctg \left(\frac{x_q'' \cdot i_G \cdot \cos \varphi_{nG}}{x_q'' \cdot i_G \cdot \sin \varphi_{nG} + u_{nG}} \right) \quad (26)$$

$$i_G = I_G \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_v}{S_v} \cdot p \quad (27)$$

$$u_{nGf} = \frac{U_{nGf}}{U_{vf}} = \frac{U_{nG}}{\frac{\sqrt{3}}{U_v} \cdot \frac{1}{p}} = 1 \quad (28)$$

Jmenovitě zatížený generátor:

$$i_G = I_{nG} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_v}{S_v} \cdot p = 72 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 6,3}{790} \cdot 1 = 1 \quad (29)$$

$$\begin{aligned} u_{Gf} &= c \cdot e_f'' = 1 \cdot 1 \\ &\cdot \cos \left(\arctg \left(\frac{0,242 \cdot 72 \cdot 0,9}{0,242 \cdot 72 \cdot \sin(\arccos(0,9)) + 1} \right) \right) + 72 \\ &\cdot 0,091 \\ &\cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \arccos(0,9) \right) \\ &- \arctg \left(\frac{0,242 \cdot 72 \cdot 0,9}{0,242 \cdot 72 \cdot \sin(\arccos(0,9)) + 1} \right) \\ &= 1,0356 \end{aligned} \quad (30)$$

Generátor naprázdno:

$$i_G = 0 \quad (31)$$

pak

$$u_{Gf} = c \cdot e_f'' = c \cdot u_{nGf} = 1 \quad (32)$$

Sít':

$$u_{Sf} = c \cdot \frac{U_{Sf}}{U_{vf}} = \frac{U_S}{\frac{U_v}{\sqrt{3}}} \cdot \frac{1}{p} = 1 \quad (33)$$

4.3.1 3f zkrat na svorkách generátoru – generátor naprázdno

Příspěvek od generátoru

$$i''_{k3G} = \frac{u_{Gf}}{x''_G} = \frac{1}{0,091} = 10,989 \quad (34)$$

$$I''_{k3G} = i''_{k3fG} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 10,989 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 795,581 \text{ A} \quad (35)$$

Příspěvek od sítě

$$i''_{k3S} = \frac{u_{Sf}}{x_S + x_T} = \frac{1}{0,0079 + 0,0784} = 11,587 \quad (36)$$

Na straně 22 kV

$$I''_{k3S_{22}} = i''_{k3fS} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 11,587 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 240 \text{ A} \quad (37)$$

Na straně 6,3 kV

$$I''_{k3S_{6,3}} = I''_{k3fS_{22}} \cdot p = 240 \cdot \frac{22}{6,3} = 838,874 \text{ A} \quad (38)$$

4.3.2 3f zkrat na straně 22 kV BT – generátor naprázdno

Příspěvek od generátoru

$$i''_{k3fG} = \frac{u_{Gf}}{x''_G + x_T} = \frac{1}{0,091 + 0,0784} = 5,903 \quad (39)$$

Na straně 22 kV

$$I''_{k3G22} = i''_{k3G} \cdot I_v = i''_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 5,903 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 122,38 \text{ A} \quad (40)$$

Na straně 6,3 kV

$$I''_{k3G6,3} = i''_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = I''_{k3G22} \cdot p = 122,38 \cdot \frac{22}{6,3} = 427,36 \text{ A} \quad (41)$$

Příspěvek od sítě

$$i''_{k3S} = \frac{u_{Sf}}{x_S} = \frac{1}{0,0079} = 126,582 \quad (42)$$

$$I''_{k3S} = i''_{k3S} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 126,582 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 2624,31 \text{ A} \quad (43)$$

4.3.3 3f zkrat na svorkách generátoru – generátor jmenovitě zatížen

Příspěvek od generátoru

$$i''_{k3G} = \frac{u_{Gf}}{x''_G} = \frac{1,0356}{0,091} = 11,38 \quad (44)$$

$$I''_{k3G} = i''_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 11,38 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 823,9 \text{ A} \quad (45)$$

Příspěvek od sítě

$$i''_{k3S} = \frac{u_{Sf}}{x_S + x_T} = \frac{1}{0,0079 + 0,0784} = 11,587 \quad (46)$$

Na straně 22 kV

$$I''_{k3S_{22}} = i''_{k3fS} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 11,587 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 240 \text{ A} \quad (47)$$

Na straně 6,3 kV

$$I''_{k3S_{6,3}} = I''_{k3S_{22}} \cdot p = 240 \cdot \frac{22}{6,3} = 838,874 \text{ A} \quad (48)$$

4.3.4 3f zkrat na straně 22 kV BT – generátor jmenovitě zatížen

Příspěvek od generátoru

$$i''_{k3G} = \frac{u_{Gf}}{x''_G + x_T} = \frac{1,0356}{0,091 + 0,0784} = 6,113 \quad (49)$$

Na straně 22 kV

$$I''_{k3G22} = i''_{k3G} \cdot I_v = i''_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 6,113 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 126,74 \text{ A} \quad (50)$$

Na straně 6,3 kV

$$I''_{k3G6,3} = i''_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = I''_{k3G22} \cdot p = 126,74 \cdot \frac{22}{6,3} = 442,58 \text{ A} \quad (51)$$

Příspěvek od sítě

$$i''_{k3S} = \frac{u_{Sf}}{x_S} = \frac{1}{0,0079} = 126,582 \quad (52)$$

$$I''_{k3S} = i''_{k3S} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 126,582 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 22} = 2624,31 \text{ A} \quad (53)$$

4.3.5 Minimální přechodná složka zkratového proudu

Minimální rázový zkratový příspěvek generátoru je při vzniku zkratu v případě nezatíženého generátoru za blokovým transformátorem. Jeho velikost je 5,9 I_{nG} . Pro tuto konfiguraci je vypočítána také přechodná složka zkratového proudu, která bude využita v navazujícím nastavení ochranných funkcí.

$$x'_G = x'_d \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = x'_d = 0,15 \quad (54)$$

$$i'_{k3G} = \frac{u_{Gf}}{x'_G + x_T} = \frac{1}{0,15 + 0,0784} = 4,38 \quad (55)$$

$$I'_{k3G} = i'_{k3G} \cdot \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 4,38 \cdot \frac{790}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 316,98 \text{ A} \quad (56)$$

4.4 Ochrana 7UM85

Ochrana 7UM85 je digitální modulární generátorová multifunkční ochrana řady SIPROTEC 5, za pomoci které lze chránit jak samotný generátor, tak výrobní blok (generátor + blokový transformátor) včetně generátorů přečerpávacích elektráren. Zařízení disponuje výkonným mikroprocesorem a plně digitálním zpracováním naměřených hodnot.



Obr. 26: SIPROTEC 5 s rozšiřujícími moduly (převzato z [13])

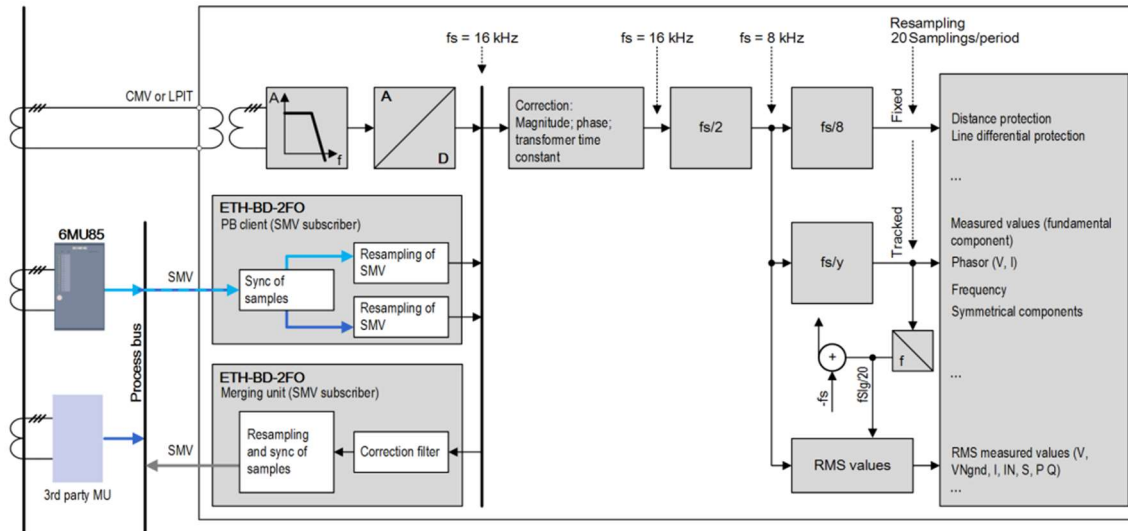
Analogové měřicí vstupy jsou rozděleny na proudové a napěťové a transformují měřené veličiny na vnitřní úroveň zpracování. Analogové hodnoty jsou následně digitalizovány v mikroprocesoru pro zpracování dat. Mikroprocesorový systém filtruje a upravuje měřené veličiny, nepřetržitě je monitoruje a sleduje podmínky aktivace jednotlivých ochranných funkcí. Zároveň systém ukládá indikace, údaje o poruchách a hodnoty naměřených veličin pro následnou analýzu. Ochrana dokáže tato data jak ukládat, tak komunikovat v reálném čase. Binární vstupy jsou využívány pro příjem informací z nadřazeného systému nebo z jiných zařízení (např. blokovací signály – signály blokující aktivaci konkrétních ochranných funkcí). Binární výstupy jsou určeny pro ovládací signály pro vypínače, rychlouzávěry vody, odbuzovače nebo pro dálkovou signalizaci důležitých událostí a stavů. [6]

Na přední straně zařízení se nachází LED panel a displej poskytující informace o funkci zařízení a hlášení událostí, stavů a naměřených hodnot. Vestavěná klávesnice navíc umožňuje přímé ovládání za provozu, jako je zobrazení všech informací o zařízení společně

s možností nastavení ochrany. Zařízení lze nastavit také pomocí osobního počítače skrze program DIGSI 5 připojením přes USB nebo pomocí Ethernetového rozhraní. [6]

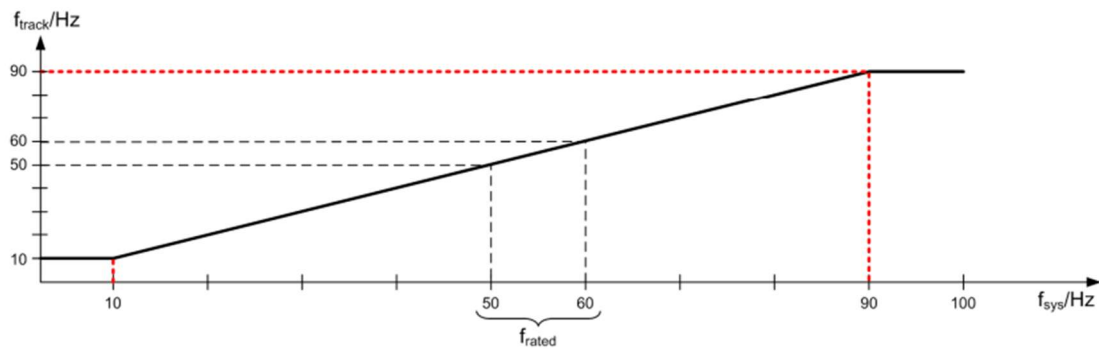
4.4.1 Digitalizace měřených veličin

Zřízení SIPROTEC 5 disponuje vysokou vzorkovací frekvencí (16 kHz) díky které je zajištěna vysoká přesnost měřených veličin v širokém rozsahu kmitočtu. Pro snížení výpočetní náročnosti je vzorkovací frekvence pro následné zpracování měřených veličin snižována. Měřená veličina je přivedena do měřicího vstupu, kde je přes oddělovací transformátor přivedena na filtr typu dolní propust a navzorkováním převedena do digitální podoby. V této fázi je vzorkovací frekvence 16 kHz (320 vzorků na periodu 20 ms) a automaticky jsou upraveny parametry vstupu (velikost proudu, fáze a časová konstanta proudového transformátoru) tak, aby nedocházelo k chybám měření. Po této úpravě je vzorkovací frekvence snížena na 8 kHz (160 vzorků na periodu 20 ms), se kterou následně funguje proces ukládání poruch nebo záznam efektivních hodnot. Pro ochranné funkce je vzorkovací frekvence snížena na 20 snímků za periodu buďto fixně osminásobným snížením (z 8 kHz na 1 kHz) např. pro impedanční ochranu, nebo poměrným snížením na základě frekvence měřené veličiny např. pro měření fázorů napětí a proudů tak, aby bylo zachováno 20 vzorků na periodu snímané veličiny. Tento způsob vzorkování je nazýván tracking (sledování) a je schopen zajistit zmíněný počet vzorků na periodu v rozsahu frekvencí měřené veličiny od 10 do 90 Hz. Díky snížení vzorkovací frekvence na 20 snímků na periodu je výrazně snížena výpočetní náročnost bez citelného snížení přesnosti měření a zároveň zajištěna spolehlivost paralelního fungování ochranných funkcí. [6]



Obr. 27: Digitalizace analogových vstupů (popsán první způsob) (převzato z [6])

Měřicím vstupům lze, jak bylo zmíněno, přiřadit různé nastavení vzorkování (fixed/tracking). To je výhodné především u ochran generátorů a jiných točivých strojů, kde mohou být měřicí body umístěny na různých stranách vypínače. Díky tomu lze 20 vzorků na periodu zajistit v rozsahu měřených frekvencí 10 až 90 Hz za použití sledování frekvence na straně rozbíhajícího se generátoru společně se zafixovaným vzorkováním za vypnutým vypínačem. Pokud je měřená frekvence při vzorkování pomocí sledování frekvence mimo rozsah 10 Hz a 90 Hz, zůstává vzorkovací frekvence rovna mezní hodnotě vzorkovací frekvence. Dělitel y snižující vzorkovací frekvenci f_s z 8 kHz (Obr. 27) tak, aby bylo dodrženo 20 vzorků na periodu, je závislý na sledovací frekvenci, ta je na skutečné frekvenci závislá lineárně, ale jen v omezeném rozsahu (Obr. 28). Mimo něj je nadále udržovaná mezní hodnota sledovací frekvence. [6]

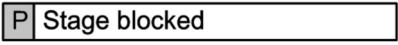
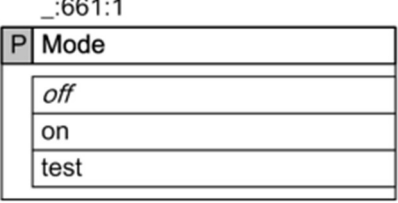



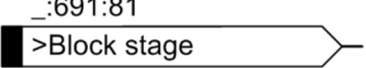
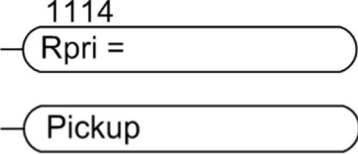

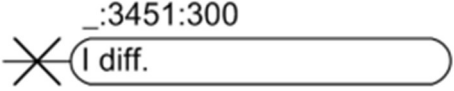
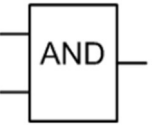


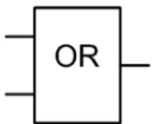
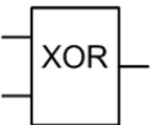
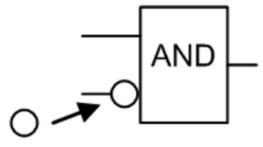
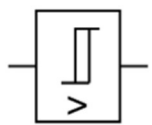
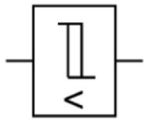
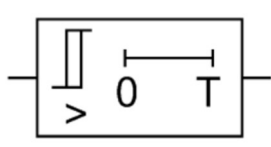
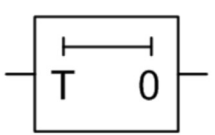
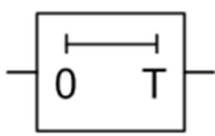

Obr. 28: Frekvenční rozsah pro sledování frekvence (převzato z [6])

4.4.2 Symboly používané pro popis ochranných funkcí

Pro popis ochranné funkce je možno využívat logické diagramy. Používané symboly jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4: Značení využívané v logických diagramech (podle [6])

	<p>Parametr</p>
	<p>Parametr s možností výběru jeho hodnoty. Přednastavena je první volba (zvýrazněna kurzívou)</p>
	<p>Vnitřní logický vstupní signál</p>
	<p>Vnitřní logický výstupní signál</p>
	<p>Analogový vstupní signál</p>
	<p>Vnější binární vstupní signál s číslem indikace</p>
	<p>Vnější výstupní signál s nebo bez čísla indikace</p>
	<p>Vstupní binární signál získaný z vnějšího výstupního signálu</p>
	<p>Měřená výstupní veličina</p>
	<p>Logický součin</p>

	<p>Logický součet</p>
	<p>Exkluzivní logický součet</p>
	<p>Negace</p>
	<p>Vyslání signálu po dosažení nastavené hodnoty veličiny</p>
	<p>Vyslání signálu po poklesu veličiny pod nastavenou hodnotu</p>
	<p>Vyslání signálu po dosažení nastavené hodnoty veličiny a po uplynutí nastaveného času</p>
	<p>Zpoždění vybavení</p>
	<p>Zpoždění odpadnutí</p>
	<p>Charakteristická křivka</p>

4.5 Nastavení ochrany

Popis a nastavení ochranných funkcí vychází z manuálu ochrany SIPROTEC 5 7UM85. Jsou využívány jejich názvy parametrů a značení veličin (včetně indexů). Význam je vždy vysvětlen.

4.5.1 Rozdílová ochrana (ANSI 87G)

Rozdílová ochrana generátoru funguje na principu Kirchhofova proudového zákona a byla obecně popsána v kapitole 2.1. Jako kladný směr měřeného proudu je považován směr ke chráněnému objektu. Rozdílový (diferenciální) proud je pak vypočítáván jako

$$I_{\text{diff}} = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2| \quad (57)$$

Ochrana SIPROTEC 5 využívá pro stabilizační proud maximální hodnotu z naměřených proudů. Výběr aktuálně využívané fáze probíhá automaticky.

$$I_{\text{rest}} = \max(|\bar{I}_1|; |\bar{I}_2|) \quad (58)$$

Efekt stabilizace můžeme popsat pomocí 3 idealizovaných vzorových stavů:

- a) Vnější porucha (mimo chráněný objekt)

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2 \quad (59)$$

$$|\bar{I}_1| = |\bar{I}_2| \quad (60)$$

$$I_{\text{diff}} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_1 - \bar{I}_1 = 0 \quad (61)$$

$$I_{\text{rest}} = \max(|\bar{I}_1|; |\bar{I}_2|) = |\bar{I}_1| = |\bar{I}_2| \quad (62)$$

Rozdílový proud je nulový, stabilizační proud odpovídá procházejícímu proudu – ochrana je blokována.

b) Vnitřní porucha se stejnými proudy z obou stran

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 \quad (62)$$

$$|\bar{I}_1| = |\bar{I}_2| \quad (63)$$

$$I_{\text{diff}} = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2| = |\bar{I}_1 + \bar{I}_1| = 2 \cdot |\bar{I}_1| \quad (64)$$

$$I_{\text{rest}} = \max(|\bar{I}_1|; |\bar{I}_2|) = |\bar{I}_1| = |\bar{I}_2| \quad (65)$$

Velikost rozdílového proudu je dvojnásobná oproti poruchovému a stabilizačnímu proudu, dojde k vypnutí.

c) Vnitřní porucha s poruchovým proudem z jedné strany

$$\bar{I}_2 = 0 \quad (66)$$

$$I_{\text{diff}} = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2| = |\bar{I}_1 + 0| = |\bar{I}_1| \quad (67)$$

$$I_{\text{rest}} = \max(|\bar{I}_1|; |\bar{I}_2|) = |\bar{I}_1| \quad (68)$$

Rozdílový a stabilizační proud jsou stejně velké a rovnají se poruchovému proudu. Ochrana vypíná.

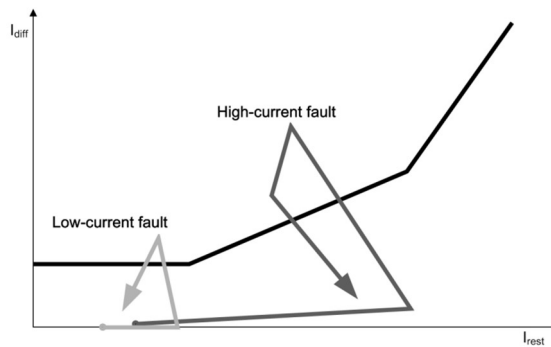
V případě vnějších zkratů může dojít k rozdílnému přesycení PTP, což vyvolá na sekundární straně rozdílné proudy. Ochrana díky tomu registruje rozdílový proud, který může ležet ve vypínací oblasti ochrany a způsobit nechtěné vypnutí. Stav popisují 2 typické případy:

a) Velký průchozí proud

Vnější porucha způsobí rychlý nárůst proudu, díky čemuž ochrana registruje vysoký stabilizační proud. Následkem vzrůstu průchozího proudu jsou PTP přesyceny, což vede ke vzniku rozdílového proudu v kombinaci s poklesem proudu stabilizačního. Po tuto dobu je nutné zabezpečit nevybavení ochrany a jakmile již PTP nejsou přesyceny, rozdílový proud klesne pod křivku vypínací charakteristiky.

b) Malý průchozí proud se stejnosměrnou složkou

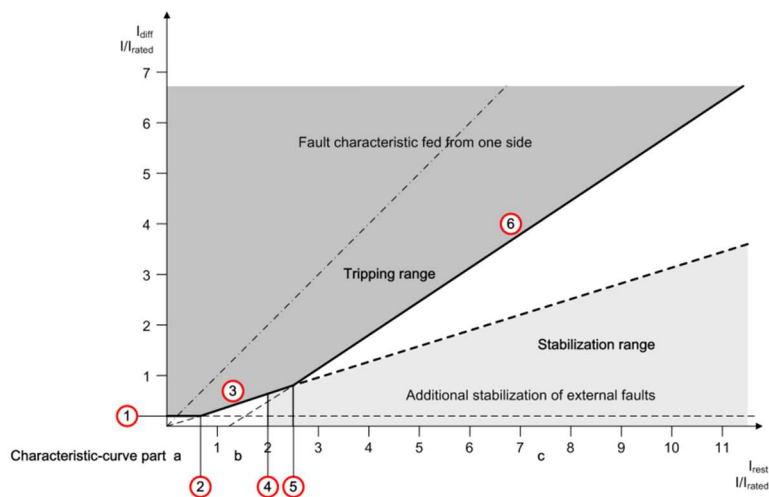
Přestože chráněným objektem protéká malý střídavý proud, může dojít k přesycení PTP vlivem stejnosměrné složky vyvinuté vnější poruchou. Tento stav je charakterizovaný fázovým posuvem měřeného sekundárního proudu PTP.



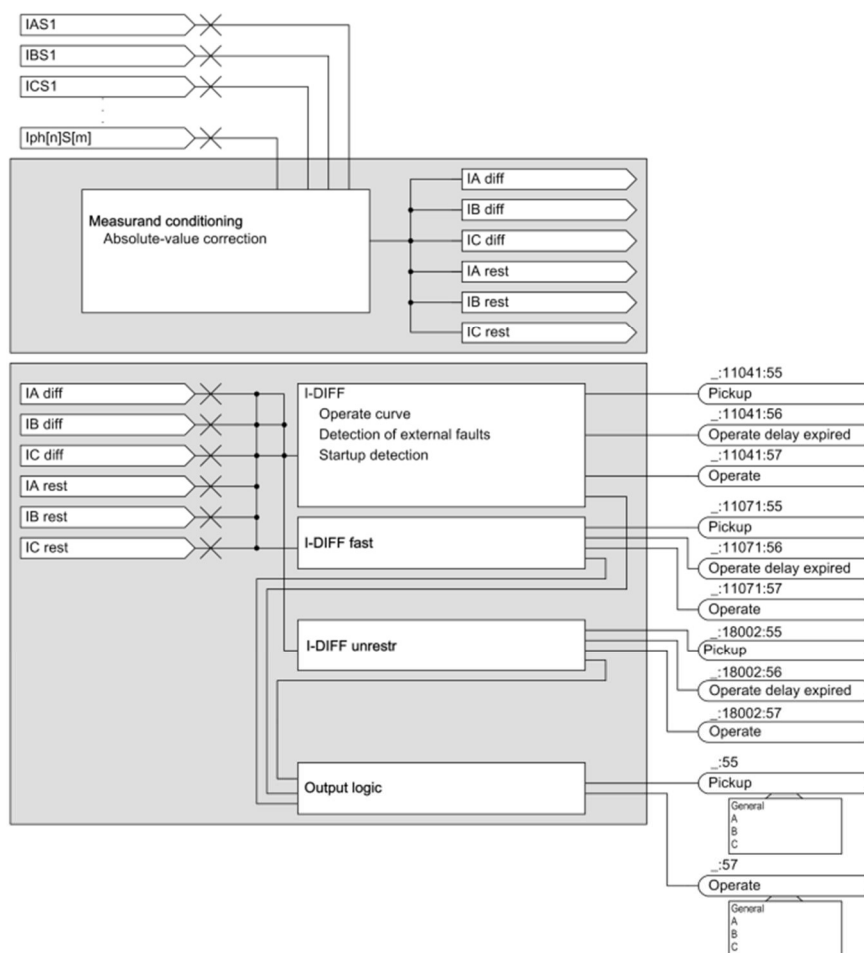
Obr. 29: Vliv přesycení PTP na rozdílový a stabilizační proud (převzato z [6])

V rámci rozdílové ochrany je tedy do systému přidána přídavná stabilizace, detekující přesycení PTP na jehož základě po omezený čas blokuje funkci rozdílové ochrany.

Vypínací charakteristika rozdílové ochrany je znázorněna na Obr. 30. Křivka je rozdělena na 3 části – *a*, *b*, *c*. Část křivky *a* reprezentuje práh citlivosti, který zohledňuje konstantní rozdílový proud za bezporuchového provozu způsobený např. různými magnetizačními proudy PTP. Úsek *b* svým sklonem zohledňuje chyby měření v bezporuchovém stavu závislé na procházejícím proudu (chyby transformace PTP nebo odchylky vlivem přizpůsobení ochrany). Pomocí části *c* vypínací charakteristiky je zajišťováno, aby rozdílová ochrana chybně nevypínala v případě vysokoproudových vnějších poruch. Pro omezení chybných vypnutí v případě vnějších poruch je navíc využita zmíněná přídavná stabilizace. Pokud pracovní bod ve vypínací charakteristice vstoupí do oblasti vypnutí z oblasti přídavné stabilizace, je rozdílová ochrana dočasně blokována.



Obr. 30: Vypínací charakteristika rozdílové ochrany (převzato z [6])



Obr. 31: Logický diagram rozdílové ochrany (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce

Pro nastavení rozdílové ochrany nastavujeme v programu DIGSI 5 následující parametry

Odblokování ochranné funkce:

$$(1121.2411.11041.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (69)$$

Pro automatické ukládání poruch je definován parametr Operate & flt.rec. blocked.

$$(1121.2411.11041.2) \text{ Operate \& flt.rec. blocked} = \text{no} \quad (70)$$

Stupeň I-DIFF

Časové zpoždění vypnutí ochranou je nastaveno na hodnotu:

$$(1121.2411.11041.6) \text{ Operate delay} = 0,00 \text{ s} \quad (71)$$

Nastavení vypínací charakteristiky se provádí pomocí parametrů *Threshold*, *Slope 1*, *Intersection1 Irest*, *Slope 2* a *Intersection 2 Irest*.

Parametrem *Threshold* je nastavována přímka *a* způsobující necitlivost za bezporuchového provozu. Přestože se v chráněném objektu nenalézá porucha způsobující rozdílový proud, jeho hodnota roste také vlivem různých sycení PTP. Doporučenou hodnotou je firmou Siemens hodnota $0,2 I_{rNG}$ (I_{rObj} – jmenovitá hodnota proudu chráněného objektu).

$$(121.2411.11041.3) \text{ Threshold} = 0,2 \frac{I}{I_{rObj}} \quad (72)$$

Druhá část vypínací charakteristiky je přímka *b* se směrnici zadanou parametrem *Slope 1*. Tato část vypínací charakteristiky respektuje chyby měření při vyšších průchozích proudech vlivem rozdílného převodu PTP. Z důvodu použití PTP o dvou různých hodnotách převodu, je doporučena hodnota $0,25$. V případech měření na stejných napěťových hladinách, je možné parametr volit menší. Doporučená hodnota firmy Siemens je pak $0,3$.

$$(1121.2411.11041.100) \text{ Slope 1} = 0,25 \quad (73)$$

SIPROTEC 5 používá k umístění přímky parametr *Intersection 1 Irest*, kterým je zadána poměrná hodnota stabilizačního proudu v místě průsečíku přímky *a* a *b*. Je doporučeno umisťovat přímku *b* tak, aby její prodloužení protínalo počátek souřadnic.

$$\text{Threshold} = \text{Slope1} \cdot \text{Intersection 1 Irest} \quad (74)$$

$$0,2 = 0,25 \cdot \text{Intersection 1 Irest} \quad (75)$$

$$\text{Intersection 1 Irest} = \frac{0,2}{0,25} = 0,8 \quad (76)$$

$$(1121.2411.11041.101) \text{ Intersection 1 Irest} = 0,8 \frac{I}{I_{rObj}} \quad (77)$$

Přímka *c* přidává do vypínací charakteristiky necitlivost z důvodu chyb měření vzniklých přesycením PTP. Pro parametr *Slope 2* je doporučeno zadávat dvojnásobek hodnoty *Slope 1*

$$(1121.2411.11041.103) \text{ Slope 2} = 0,5 \frac{I}{I_{rObj}} \quad (78)$$

Umístění přímky *c* je opět nastaveno průsečíkem, nyní s přímkou *b*. Firma Siemens doporučuje hodnotu $2,5 I/I_{nG}$.

$$(1121.2411.11041.103) \text{ Intersection 2 Irest} = 2,5 \frac{I}{I_{rObj}} \quad (79)$$

V případě připojení generátoru do místa s pracujícími elektromotory, je vhodné v ochranné funkci aktivovat *Starting detection*. Jeho aktivaci je možné zvedat vypínací charakteristiku a tím zvyšovat necitlivost funkce v případě detekování záběrného proudu motoru.

$$(1121.2411.11041.106) \text{ Starting detection} = \text{no} \quad (80)$$

Funkce nepřetržitě měří velikost stejnosměrné složky, která v případě i malých průchozích proudů dokáže přesycovat PTP a zapříčiňovat nadměrné chyby měření. V závislosti na obsahu stejnosměrné složky jsou parametry *Slope 1* a *Threshold* zvyšovány o nastavenou hodnotu parametru *Factor increasing char DC*, který je firmou Siemens doporučen volit rovný dvěma.

$$(1121.2411.11041.110) \textit{Factor increasing char. DC} = 2.0 \quad (81)$$

Dalším opatřením proti chybným vypnutím je zmíněná přídavná (add-on) stabilizace. Vytáá plocha ve vypínací charakteristice je určena parametry *Threshold add-on stabiliz.* nastavující počátek oblasti přídavné stabilizace a *Slope 1*. Je ponechána doporučená hodnota z manuálu ochrany.

$$(1121.24.11.11041.128) \textit{Threshold add – on stabiliz.} \\ = 2.0 \quad (82)$$

Čas, po který je přídavná stabilizace aktivní, je nastavován parametrem *Time of add-on stabiliz.* a je zvolena doporučená hodnota 0,3. Přídavná stabilizace funguje pro jednotlivé fáze odděleně. Parametrem *Crossblk. time add-on st.* lze přídavnou stabilizaci aktivovat po nastavený čas pro všechny fáze najednou v případě detekování vnější poruchy na jedné fázi. Tento čas by měl být stejný jako čas *Time of add-on stabiliz.*

$$(1121.2411.11041.129) \textit{Time of add – on stabiliz.} = 0,3 \text{ s} \quad (83)$$

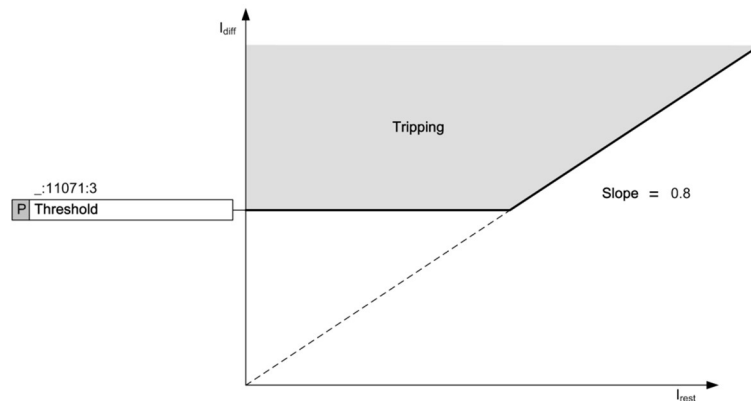
$$(1121.2411.11041.130) \textit{Crssblk. time add – on st.} = 0,3 \text{ s} \quad (84)$$

I-DIFF fast

K tomuto nastavení stupně *I-DIFF* je navíc automaticky odblokován rychlý stupeň *I-DIFF fast*. Jeho úkolem je rychlé vypnutí vysokoproudých vnitřních poruch v co nejkratším čase. Stupeň pracuje s okamžitými hodnotami proudů, stabilizační proud je opět maximální proud z měřených proudů. Stupeň *I-DIFF fast* se kontroluje dosažení tří následujících podmínek:

- a) Časová derivace stabilizačního proudu je porovnána s vnitřní přednastavenou hodnotou.
- b) Je porovnávána velikost okamžité hodnoty rozdílového a stabilizačního proudu na základě charakteristiky stupně *I-DIFF fast* (Obr. 32). Vypínací charakteristika má pevně daný sklon 0,8.
- c) Je porovnávána velikost rozdílového proudu s nastavenou mezní hodnotou *Threshold*.

Pokud jsou splněny všechny zmíněné podmínky, je provedeno okamžité vypnutí. V případě, že není splněna druhá podmínka, ale první ano, je stupeň *I-DIFF fast* blokován po dobu 300 ms. V případě výskytu vnitřní poruchy je rychlost nárůstu rozdílového proudu rychlejší než stabilizačního proudu. Díky tomu tento stupeň dokáže vybavit během několika zpracovaných vzorků průběhu proudu. Při vnější poruše narůstá rozdílový proud až po nasycení PTP.



Obr. 32: Vypínací charakteristika stupně I-DIFF fast rozdílové ochrany (převzato z [6])

Pro jeho aktivaci je zvolen nastaven parametr Mode jako:

$$(1121.2411.11071.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (85)$$

Hodnota rozdílového proudu pro vybavení tohoto stupně je udána jako:

$$I_{\text{diff fast}} > \frac{1.1}{x'_d} \cdot I_{nG} \quad (86)$$

$$I_{\text{diff fast}} > \frac{1.1}{0,15} \cdot 72 \quad (87)$$

$$I_{\text{diff fast}} > 7,3 I_{nG} \quad (88)$$

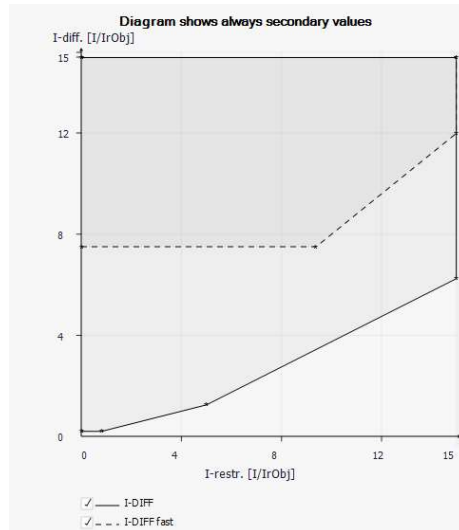
Volím tedy doporučenou hodnotu 7,5.

$$(1121.2411.11071.3) \text{ Treshold} = 7,5 \frac{I}{I_{rObj}} \quad (89)$$

Zpoždění vybavení ochrany je nastaveno na 0 s a je ponecháno automatické ukládání poruch.

$$(1121.2411.11071.6) \textit{Operate delay} = 0 \textit{s} \quad (90)$$

$$(1121.2411.11071.100) \textit{Operate \& flt.rec.blocked} = \textit{no} \quad (91)$$



Obr. 33: Nastavení rozdílové ochrany

4.5.2 Přetížení statoru (ANSI 49)

Ochranná funkce vypočítává oteplení způsobené Jouleovými ztrátami ve vinutí z měřených fázových proudů za pomoci tepelného modelu stroje. Výpočet probíhá pro každý fázový proud zvlášť a je definovaný následující diferenciální rovnicí.

$$I_{p.u.}^2 = \tau \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta - \theta_{amb} \quad (92)$$

kde

$I_{p.u.}$ je měřený proud I v poměrných jednotkách vztažený na maximální přípustný proud generátoru I_{max}

τ je tepelná časová konstanta chráněného objektu

θ je aktuální teplota chráněného objektu ϑ vztažená na jeho maximální teplotu ϑ_{max} při maximálním přípustném proudu

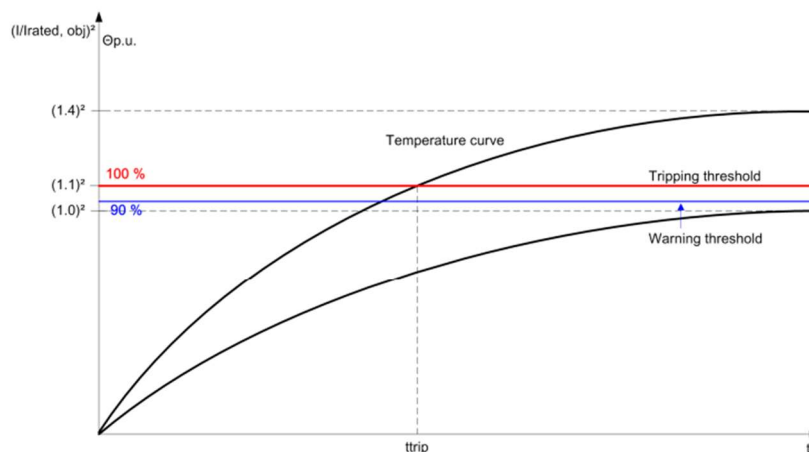
θ_{amb} je standardizovaná teplota okolí (chladicího média) určená jako poměr rozdílu teploty chladicího média ϑ_{amb} od referenční hodnoty $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální teploty při maximálním přípustném proudu generátoru ϑ_{max} .

$$I_{p.u.} = \frac{I}{I_{max}} = \frac{I}{K \cdot I_{nG}} \quad (93)$$

$$\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_{max}} = \frac{\vartheta}{K^2 \cdot \Delta\vartheta_{nG}} \quad (94)$$

$$\theta_{amb} = \frac{\vartheta_{amb} - 40^{\circ}\text{C}}{\vartheta_{max}} = \frac{\vartheta_{amb} - 40^{\circ}\text{C}}{K^2 \cdot \Delta\vartheta_{nG}} \quad (95)$$

Jmenovitý proud generátoru je ochranou dopočítáván ze zadaného jmenovitého zdánlivého výkonu a jmenovitého napětí. V ustáleném stavu je řešením diferenciální rovnice exponenciální funkce s asymptotou představující maximální teplotu θ_{end} a rychlostí růstů danou tepelnou konstantou. Ochrana funguje ve dvou stupních – výstražný a vypínací. Při dosažení předem nastavené teploty přehřátí θ_{warn} je vydána výstražná signalizace. Po překročení mezní hodnoty přehřátí θ_{off} je vydána signalizace reakce ochrany a stroj je odpojen od sítě. Tato teplota odpovídá ustálené teplotě při protékajícím maximálním přípustném trvalém proudu. Výstražný stupeň je možno nastavit také na mezní hodnotu proudu.



Obr. 34: Oteplovací křivky jmenovitého proudu a nadproudu $1,4 I_{nG}$ ($K=1,1$) (převzato z [6])

Přímka 100 % v Obr. 34 značí mezní hodnotu oteplení K (K -factor). K vypnutí je nutné překročení mezní hodnoty alespoň v jedné fázi. Pro výpočet oteplení je využíváno

efektivních hodnot proudů se zahrnutými harmonickými složkami, které přispívají k nárůstu teploty zařízení. Po poklesu protékajícího proudu pod nastavený minimální proud, ochrana vyčká v závislosti na ochlazovací tepelné časové konstantě na vychladnutí stroje.

Vypínací charakteristika je určena rovnicí:

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2 - \frac{1}{K^2} I_{\text{preload p.u.}}^2}{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2 - 1} \right) (s) \quad (96)$$

$$I_{\text{preload p.u.}} = \frac{I_{\text{preload}}}{I_{rObj}} \quad (97)$$

kde

I_{preload} je proud před změnou proudu

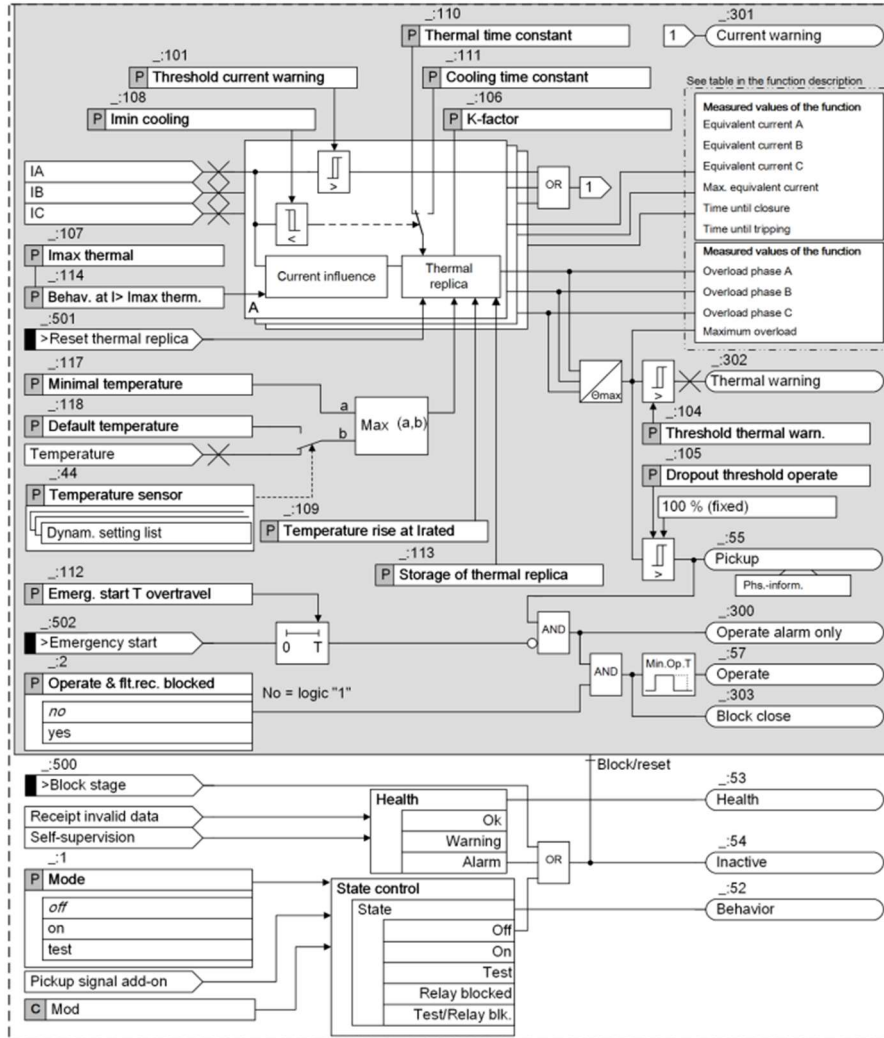
Podle normy ČSN EN IEC 60034-1 (upřesněno v ČSN EN IEC 60034-33) musí být stroj schopen trvalého provozu za jmenovitých podmínek v nadmořské výšce do 1000 m.n.m. s teplotou chladícího vzduchu nepřesahující 40 °C. [14; 15]

Tato teplota je, jak bylo zmíněno v popisu tepelného modelu, brána jako referenční. Pokud je okolní teplota menší než referenční hodnota, vzrůstá teplotní limit stroje, dojde tedy ke zvýšení součinitele K . Pokud je teplota okolí vyšší než referenční hodnota, teplotní limit klesá, dochází ke snížení součinitele K . Okolní teplota může být měřena odporovým termočlánkem a ovlivňovat tak velikost K dynamicky, nebo ji lze zadat jako statický parametr ochrany při jejím nastavení a tím ponechat součinitel K konstantní.

Při vysokých zkratových proudech je možná chybná reakce ochrany s časem vypnutí menším než reakce zkratových ochran. Z toho důvodu je možno buďto zmrazit teplotní paměť, aby do tepelného modelu nebyl započítáván rázový proud probíhajícího zkratu, nebo limitovat vstupní proud do tepelného modelu na nastavený maximální proud.

V případě potřeby lze uložit tepelnou paměť (procentuální hodnotu oteplení) pro případ výpadku napájení. Při ztrátě napájení bez uložení hodnoty je tepelná paměť resetována na hodnotu 0. Tepelnou paměť lze také manuálně vymazat. Ochrannou funkci je možné zablokovat v případě nouzového spuštění bez vlivu na tepelnou paměť. Blokování přetrvává

po nastavený čas po nouzovém spuštění. Funkci lze také zablokovat externě blokovacím signálem, což má za následek vymazání tepelné paměti.



Obr. 35: Logický diagram ochrany proti přetížení statoru (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce

Pro aktivaci funkce je parametr *Mode* nastaven na *on*, pro ponechání automatického ukládání poruch je parametr *Operate & flt.rec. blocked* nastaven jako *no*.

$$(1111.191.601.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (98)$$

$$(1111.191.601.2) \text{ Operate \& flt.rec. blocked} = \text{no} \quad (99)$$

Parametr *K-factor* je využíván k popisu maximálního trvalého proudu při trvalém maximálním povoleném zatížení. Maximální trvale dovolená hodnota přetížení statoru je dle manuálu ochrany doporučeno zadávat jako $1,1 I_{nG}$.

$$I_{\max,perm.} = 1,1 I_{nG} \quad (100)$$

$$K - factor_{prim} = \frac{I_{\max,perm.}}{I_{rObj}} = 1,1 \quad (101)$$

Hodnotu K-faktoru je nutno přepočítat na poměrnou hodnotu vůči jmenovité hodnotě sekundární strany PTP.

$$\begin{aligned} (1111.191.601.106) \quad K - factor &= K - factor_{prim} \cdot \frac{I_{rObj}}{I_{rPTPprim}} \\ &= 1,1 \cdot \frac{72}{100} = 0,79 \end{aligned} \quad (102)$$

Výstraha proudového přetížení je nastavena parametrem *Threshold current warning* jako 5% překročení jmenovité hodnoty proudu generátoru. Díky výstražnému stupni je možné na přetížení reagovat a případně provádět kroky k odlehčení stroje. Zadávaná hodnota musí být přepočítána na sekundární proud PTP.

$$Threshold\ current\ warning = 1,05 \cdot \frac{I_{rObj}}{p_{PTP}} = 1,05 \cdot \frac{72}{\frac{100}{5}} = 3,78\ A \quad (103)$$

$$(1111.191.601.101) \quad Threshold\ current\ warning = 3,8\ A \quad (104)$$

Výstraha při tepelném přetížení je orientačně určena jako procentuální hodnota vypínací teploty θ_{off} podle následujícího vztahu. Volíme vyšší hodnotu.

$$\frac{\theta}{\theta_{off}} = \frac{1}{K - faktor_{prim}^2} = \frac{1}{1,1^2} = 82,6\ \% \quad (105)$$

$$(1111.191.601.104) \quad Threshold\ thermal\ warn. = 90\ \% \quad (106)$$

Tepelná konstanta stroje je určena pomocí rovnice pro vyjádření časové závislosti vybavení ochrany na proudu chráněným objektem. Pro její určení uvažujeme zatížení bez předchozí

zátěže. Zároveň vycházíme z normy ČSN EN IEC 60034-33, která udává povolený násobek proudu při přetížení oproti době trvání dle následující tabulky.

Tab. 5: Povolený násobek proudu při přetížení oproti době trvání (podle [15])

Proud při přetížení (I/I_{nG})	Povolená doba trvání (s)
1,20	85
1,30	54
1,40	39
1,50	30

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2 - \frac{1}{K^2} I_{preload\ p.u.}^2}{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2 - 1} \right) \text{ (s)} \quad (107)$$

$$I_{preload} = 0 \text{ A} \quad (108)$$

$$\tau = \frac{t}{\ln \left(\frac{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2}{\frac{1}{K^2} I_{p.u.}^2 - 1} \right)} = \frac{30}{\ln \left(\frac{\frac{1}{1,1^2} \cdot 1,5^2}{\frac{1}{1,1^2} \cdot 1,5^2 - 1} \right)} = 38,9 \text{ s} \quad (109)$$

$$(110)$$

$$(1111. 191. 601. 110) \textit{ Thermal time constant} = 38 \text{ s} \quad (111)$$

Ochlazovací tepelná časová konstanta je volena podle doporučení firmy Siemens jako sedminásobek teplené časové konstanty.

$$(1111. 191. 601. 110) \textit{ Cooling time constant} \\ = 7 \cdot \textit{ Thermal time constant} = 266 \text{ s} \quad (112)$$

Odpadnutí ochrany je nastaveno jako procentuální hodnota vypínací teploty θ_{off} . Je doporučeno volit stejnou hodnotu jako pro výstrahu při tepelném přetížení.

$$(1111.191.601.105) \textit{ Dropout treshhold operate} = \textit{ Thermal threshold warn.} = 90 \% \quad (113)$$

Pokud byl ochranou přijat signál $> \textit{Emergency start}$, je po jeho skončení blokováno vybavení ochrany po nastavený čas parametrem $\textit{Emerg. Start T overtravel}$. Po přijetí signálu $> \textit{Emergency start}$ je stroj rozběhnut bez zátěže a je potřeba blokovat vybavení ochrany po dostatečný čas k poklesu tepelné paměti pod vybavovací hodnotu. Hodnota je zvolena na základě ochlazovací tepelné konstanty.

$$(1111.191.601.105) \textit{ Emerg.start T overtravel} = 400 \textit{ s} \quad (114)$$

Ochrana omezuje tepelný model na maximální hodnotu nadproudu. Vypínací čas musí být delší než vypínací čas rozdílové ochrany a časově nezávislých nadproudových ochran. Mezní hodnota nadproudu je zvolena $5 I_{nG}$.

$$I_{\max \textit{ thermal}} = \frac{5 I_{rObj}}{p_{PTP}} = \frac{5 \cdot 72}{\frac{100}{5}} = 18 \textit{ A} \quad (115)$$

$$(1111.191.601.107) \textit{ I max thermal} = 18 \textit{ A} \quad (116)$$

Pokud proud klesne pod nastavenou hodnotu $I_{\min \textit{ cooling}}$, je jeho teplota počítána za pomoci ochlazovací časové konstanty. Firmou Siemens je doporučená hodnota $0,05 I_{nG}$.

$$I_{\min \textit{ cooling}} = 0,05 \frac{I_{rObj}}{p_{PTP}} = \frac{0,05 \cdot 72}{\frac{100}{5}} = 0,18 \textit{ A} \quad (117)$$

$$(1111.191.601.108) \textit{ I min cooling} = 0,18 \textit{ A} \quad (118)$$

Do ochrany je zahrnut parametr $\textit{Temperature rise at Irated}$, který udává oteplení oproti teplotě okolí. Stroj je vzduchem chlazený (chlazení IC01), teplotu chladícího média uvažují $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro tuto teplotu je firmou Siemens doporučena hodnota oteplení v Kelvinech při jmenovitém proudu 70 K .

$$(1111.191.601.109) \textit{ Temperature rise at Irated} = 70 \textit{ K} \quad (119)$$

$$(1111.191.601.118) \textit{ Default temperature} = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (120)$$

Ochrana je napájena pomocným napětím, není třeba tudíž ukládat tepelný model stroje.

$$(1111.191.601.113) \textit{Storage of thermal replica} = no \quad (121)$$

V případě vysokých průchozích proudů je limitována vstupní hodnota proudu do ochrany proti přetížení statoru.

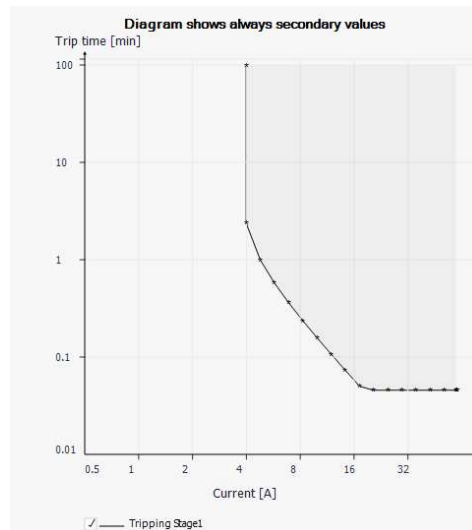
$$(1111.191.601.114) \textit{Behav. at } I > I_{max} \textit{ therm.} \\ = \textit{current limniting} \quad (122)$$

Teplota okolí *Default temperature* je pevně zadaná, pro měření teploty není připojen senzor.

$$(1111.191.601.44) \textit{Temperature sensor} \\ = \textit{No function block available} \quad (123)$$

Minimální teplota je zadána parametrem *Minimal temperature*. Pokud teplota okolí klesne pod zadanou hodnotu *Minimal temperature*, je pro výpočet využívána právě tato teplota.

$$(1111.191.601.117) \textit{Minimal temperature} = -20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (124)$$

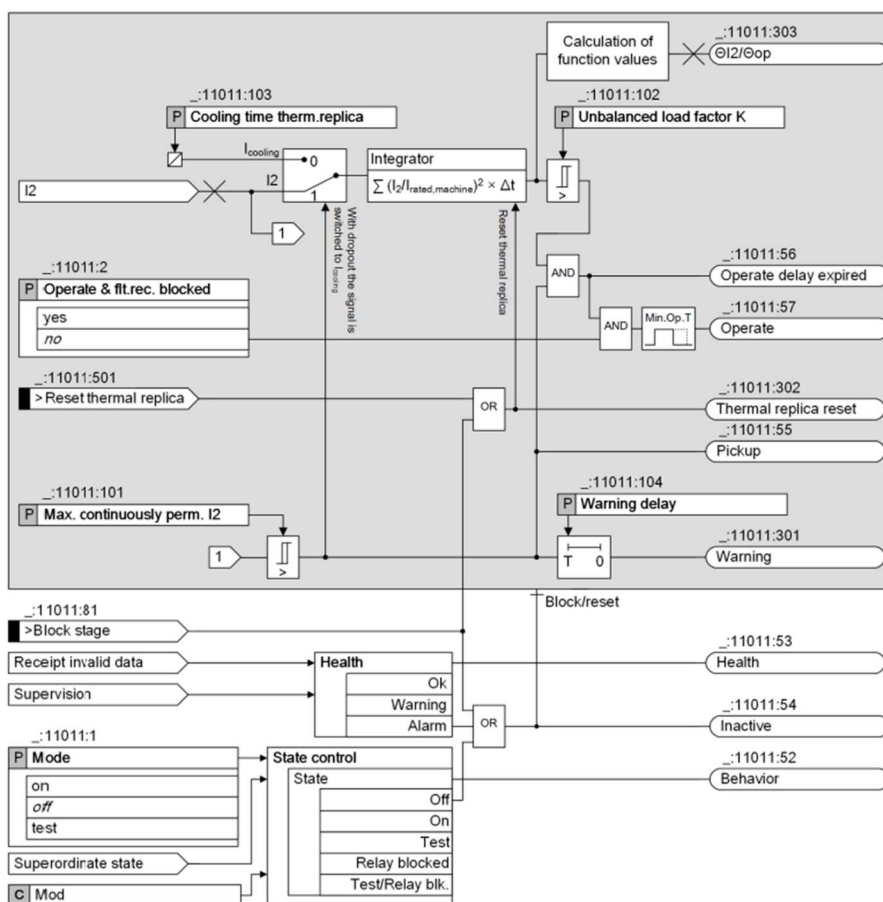


Obr. 36: Nastavení ochrany proti přetížení statoru

4.5.3 Nesymetrické zatížení (ANSI 46)

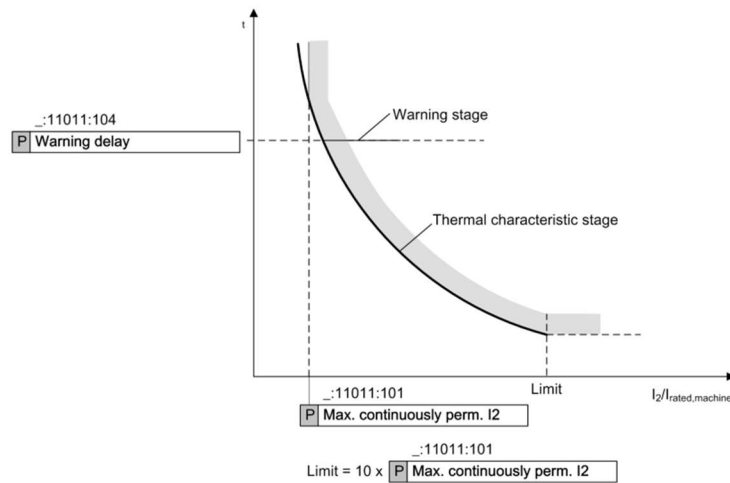
Ochrana proti nesymetrickému zatížení stroje vypočítává zpětnou složku proudu z měřených fázových proudů jako:

$$\bar{I}^{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_{L1} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{L2} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{L2}) \quad (125)$$



Obr. 37: Logický diagram ochrany proti nesymetrickému zatížení (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce



Obr. 38: Vypínací charakteristika ochranné funkce při nesymetrickém zatížení (převzato z [6])

Ochranná funkce je aktivována a je ponecháno automatické ukládání poruch.

$$(1101.321.11011.1) \text{ Mode} = \text{on} \tag{126}$$

$$(1101.321.11011.2) \text{ Operate} \ \& \ \text{flt.rec.blocked} = \text{no} \tag{127}$$

Zpětná složka proudu je vztažena na jmenovitou hodnotu proudu generátoru. Pokud není výrobcem udána maximální trvalá hodnota zpětné složky proudu, je nutno uvažovat hodnotu dle normy ČSN EN IEC 60034-33, podle které musí být nepřímo chlazený hydrogenerátor schopný trvalého provozu s při zpětné složce proudu 8 % I_{NG} . Hodnotu je nutno přepočítat na sekundární stranu PTP.

$$I_{p.u.,perm \ prim}^{(2)} = 8 \% \tag{128}$$

$$I_{perm \ sek}^{(2)} = \frac{I_{p.u.,perm \ prim}^{(2)} \cdot I_{rObj}}{p_{PTP}} = \frac{0,08 \cdot 72}{\frac{100}{5}} = 0,288 \text{ A} \tag{129}$$

$$I_{p.u.,perm \ sek}^{(2)} = \frac{I_{perm \ sek}^{(2)}}{I_{nPTP \ sek}} = \frac{0,288}{5} = 5,76 \% \tag{130}$$

Je povoleno zadávání pouze s jedním desetinným místem:

$$(1101.321.11011.101) \text{ Max. continuously perm. I2} = 5,8 \% \tag{131}$$

Ochrana vypíná podle inverzní charakteristiky (Obr. 38) nastavované pomocí faktoru K nesymetrického zatížení, který vyjadřuje povolenou dobu provozu při nesymetrické zátěži 100 % I_{nG} .

$$t_{I^{(2)}} \text{ perm} = \frac{K_{\text{sek}}}{I_{\text{p.u.}}^{(2)2}} \quad (132)$$

kde $t_{I^{(2)}} \text{ perm}$ je povolená doba trvání zpětné složky proudu o velikosti $I_{\text{p.u.}}^{(2)}$.

K_{sek} je faktor K nesymetrického zatížení přepočtený na sekundární stranu PTP.

Tento faktor je udáván integrálem kvadrátu zpětné složky proudu v poměrných jednotkách a pokud není dodán výrobcem generátoru, je podle normy ČSN EN IEC 60034-33 pro hydrogenerátory nepřímou chlazené vzduchem roven 20 s. Opět je potřeba hodnotu přepočítat na sekundární stranu PTP.

$$K_{\text{prim}} = \int_0^T I_{\text{p.u.}}^{(2)2} dt = 20 \text{ s} \quad (133)$$

kde T je doba trvání přechodného nesymetrického stavu.

Výsledná hodnota je opět vztažena na sekundární hodnotu jmenovitého proudu PTP podobně, jako povolená trvalá hodnota zpětné složky proudu. Zde již tedy zkrácený převod.

$$\begin{aligned} K_{\text{sek}} &= \frac{\int_0^T I_{\text{p.u.}}^{(2)2} \cdot I_{\text{rObj}}^2 dt}{p_{\text{PTP}}^2} = K_{\text{prim}} \cdot \frac{\left(\frac{I_{\text{rObj}}}{p_{\text{PTP}}}\right)^2}{I_{\text{rPTP2}}^2} = 20 \cdot \left(\frac{72}{100}\right)^2 \\ &= 10,368 \text{ s} \end{aligned} \quad (134)$$

$$(1101.321.11011.102) \text{ Unbalanced load factor } K = 10,4 \text{ s} \quad (135)$$

Je nutno nastavit parametr vyjadřující dobu potřebnou pro ochlazení stroje. Pokud není informace dodána výrobcem generátoru, je ji možno dopočítat z dvou výše zmíněných parametrů (a) jako podíl *Unbalanced load factor* K ku kvadrátu parametru *Max. continuously perm. I2*.

$$\begin{aligned} \text{Cooling time therm. replica} &= \frac{\text{Unbalanced load factor } K}{(\text{Max. continuously perm. } I_2)^2} \\ &= \frac{10,4}{0,058^2} = 3091,56 \text{ s} \end{aligned} \quad (136)$$

$$\begin{aligned} \text{(1101. 321. 11011. 103) Cooling time therm. replica} \\ &= \mathbf{3100 \text{ s}} \end{aligned} \quad (137)$$

Signalizace nesymetrického zatížení je nastavena na 2 s po dosažení trvalé hodnoty zpětné složky proudu.

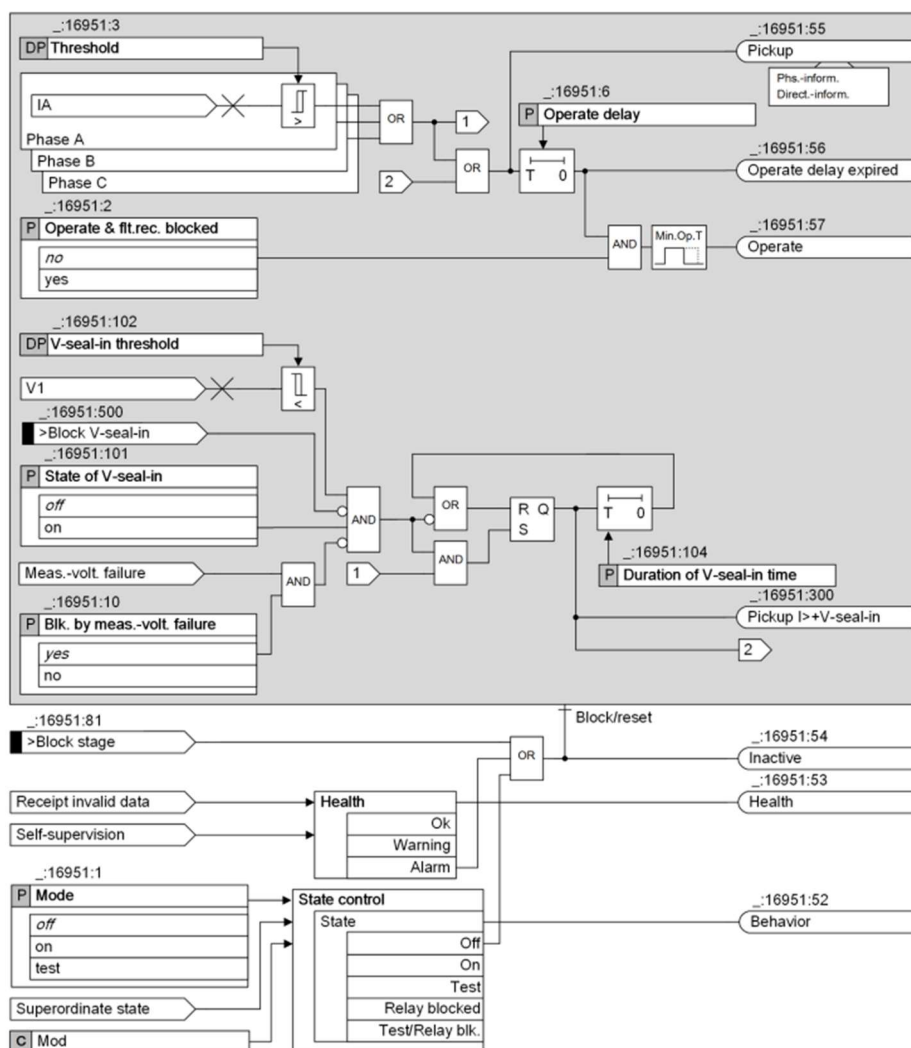
$$\text{(1101. 321. 11011. 104) Warning delay} = \mathbf{2 \text{ s}} \quad (138)$$

Velikost zpětné složky proudu je pro ochranu limitován na desetinásobek maximální trvalé hodnoty zpětné složky proudu. Minimální vypínací čas tedy je:

$$t_{\min} = \frac{K_{\text{sek}}}{10 \cdot I_{\text{p.u.,perm sek}}^{(2)}} = \frac{10,4}{5,8^2} = 0,31 \text{ s} \quad (139)$$

4.5.4 Nadproud/podpětí (ANSI 51V)

Nadproudová ochrana s podpětíovou přídrží je nastavena jako časově nezávislá. Měření proudu je umístěno v uzlu generátoru. Pokud po zachycení nadproudu klesne napětí pod nastavenou hodnotu, ochrana vybaví po nastaveném vybavovacím zpoždění, i když proud za tuto dobu poklesl pod mezní hodnotu. Pokud dojde k obnově napětí před uplynutím zpoždění, je vybavení přerušeno.



Obr. 39: Logický diagram nadproudové ochrany časově nezávislé s podpětíovou přídrží (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce

Ochranná funkce je odblokována a je zachováno automatické ukládání poruch.

$$(1101.2051.16951.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (140)$$

$$(1101.2051.16951.2) \text{ Operate \& f}lt \text{ rec. b}losked = \text{no} \quad (141)$$

Je nutné zamezit vybavení ochrany při přetížení stroje, proto je minimální vybavovací proud doporučeno nastavovat alespoň o 20 až 30 % větší, než je očekávaná hodnota nadproudu v bezporuchovém stavu (viz *K-factor* nastavovaný v ochranné funkci proti přetížení statoru) a zároveň menší než minimální vypočítaný zkratový proud. Opět je nutno hodnotu přepočítat na sekundární stranu PTP. Doporučovaná hodnota je $1,6 I_{nG}$.

$$I_{\text{threshold}} = 1,6 I_{rObj} \quad (142)$$

$$I_{\text{threshold sek}} = \frac{1,6 \cdot I_{rObj}}{p_{PTP}} = 1,6 \cdot \frac{72}{\frac{100}{5}} = 5,76 \text{ A} \quad (143)$$

$$(1101.2051.16951.3) \text{ Threshold} = 5,76 \text{ A} \quad (144)$$

Zpoždění vybavení ochrany je nutné zvolit tak, aby byla zachována selektivita v rámci ochran umístěných v připojené síti. Pokud nemáme informace o vybavovacích časech ochran v síti, je doporučeno podle manuálu ochrany volit zpoždění v rozmezí 1 až 2 s.

$$(1101.2051.16951.6) \text{ Operate delay} = 2 \text{ s} \quad (145)$$

Funkce ochrany je blokována v případě poruchy měření napětí.

$$(1101.2051.16951.10) \text{ Blk. by meas. - volt. failure} = \text{yes} \quad (146)$$

Podpěťovou přídrž je nutno odblokovat.

$$(1101.2051.16951.101) \text{ State of V - seal - in} = \text{on} \quad (147)$$

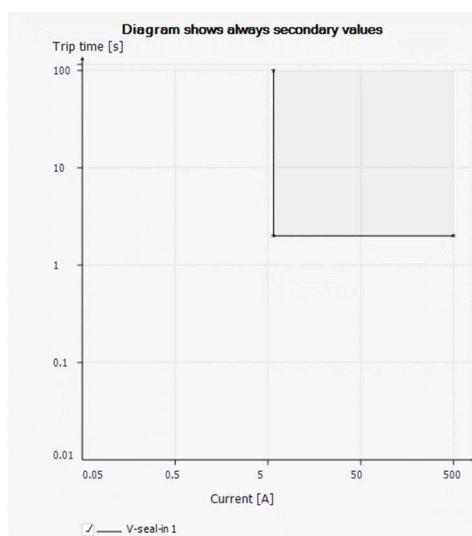
Přidrž je v činnosti, pokud napětí klesne pod 80 % jmenovité hodnoty napětí generátoru. Tato hodnota je vyšší než nastavovaná hodnota podpětí podpět'ové ochrany. Hodnota je přepočítána na napětí sekundární strany PTN.

$$U_{\text{threshold}} = \frac{0,8 U_{\text{rObj}}}{\sqrt{3} p_{\text{PTN}}} = 0,8 \cdot \frac{\frac{6300}{100}}{\frac{6000}{100}} = 48,49 \text{ V} \quad (148)$$

$$(1101.2051.16951.102) \text{ V – seal – in threshold} = 48,49 \text{ V} \quad (149)$$

Doba, po kterou je podpět'ová přidrž v činnosti, by měla být větší než parametr *Operate delay* alespoň o 0,5 s. Zároveň je delší než vybavovací čas podpět'ové ochrany.

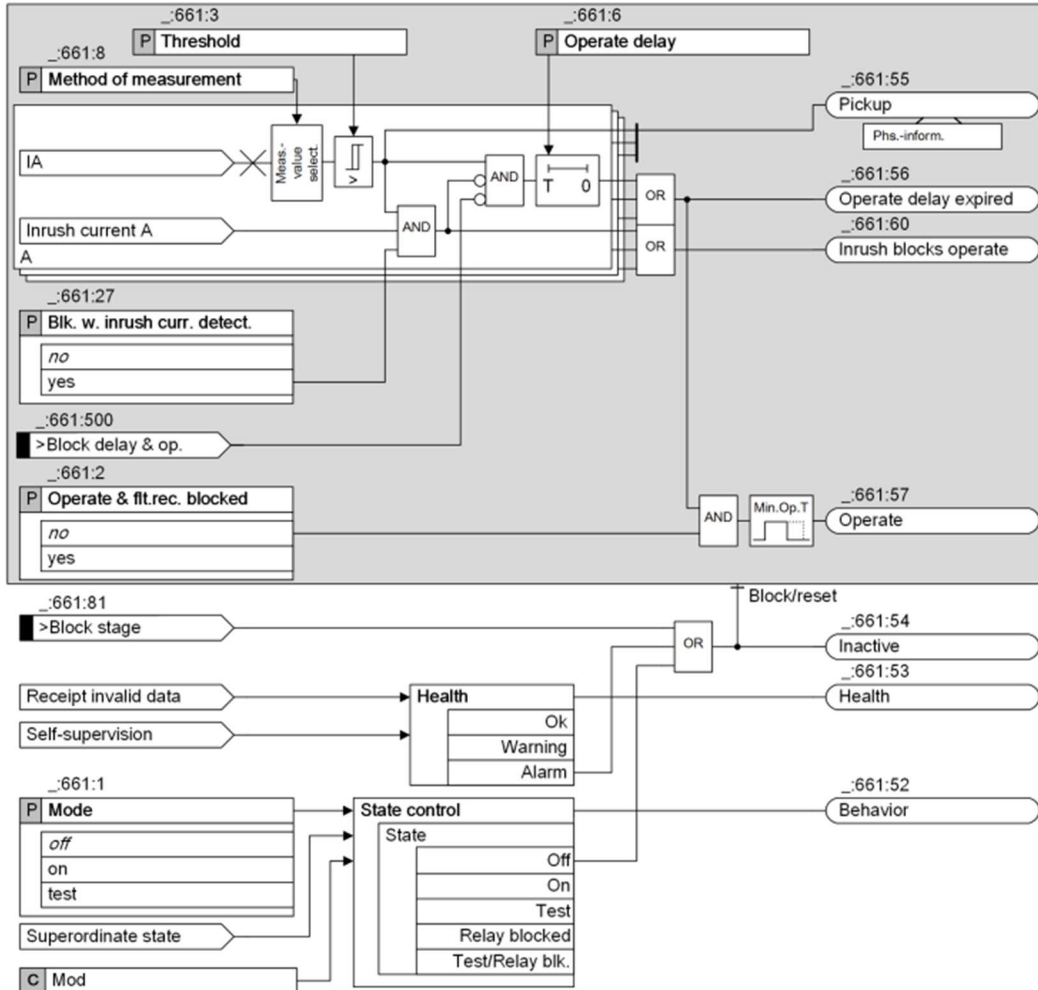
$$(1101.2051.16951.104) \text{ Duration of V – seal – in time} = 4 \text{ s} \quad (150)$$



Obr. 40: Nastavení nadproudové ochrany s podpět'ovou přidrží

4.5.5 Nadproudová zkratová ochrana (ANSI 50/51)

Pokud jeden z měřených proudů překročí nastavenou hodnotu nadproudu, po nastaveném časovém zpoždění je provedeno vypnutí chráněného objektu. Vzhledem k tomu, že měření proudu se nachází v uzlu generátoru není třeba nastavovat směrové kritérium.



Obr. 41: Logický diagram nadproudové zkratové ochrany časově nezávislé (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce

Zapnutí ochranné funkce a zachování automatického ukládání poruch:

$$(1101.1941.661.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (151)$$

$$(1101.1941.661.2) \text{ Operate \& flt.rec. blocked} = \text{no} \quad (152)$$

Ochrana měří proud s omezením harmonických a přechodných proudů.

$$\begin{aligned} & \mathbf{(1101.1941.661.8) Method of measurement} \\ & \mathbf{= fundamental comp.} \end{aligned} \quad (153)$$

Mezní hodnota pro vybavení musí být menší než minimální zkratový proud na svorkách generátoru, případně v blízkosti blokového transformátoru, větší než maximální trvalý povolený proud stroje a zároveň větší než vybavovací hodnota proudu nadproudové ochrany s podpěťovou přídrží. Velikost vybavovací hodnoty proudu také ovlivňuje velikost přechodné složky zkratového proudu, která neodeznívá stejně rychle jako rázová složka. Minimální přechodná složka proudu je při zkratu za blokovým transformátorem při provozu generátoru naprázdno a její velikost je $4,4 I_{nG}$, proto je vybavovací hodnota proudu nastavena na $4 I_{nG}$. Hodnota je přepočítána na sekundární stranu PTP.

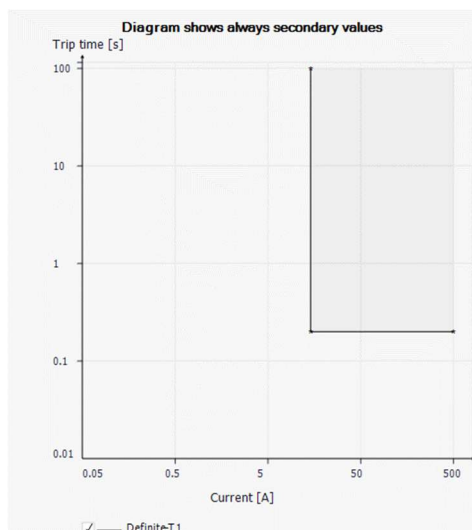
$$I_{\text{threshold}} = 4 I_{\text{rObj}} \quad (154)$$

$$I_{\text{threshold PTPsek}} = \frac{I_{\text{threshold}}}{p_{\text{PTP}}} = \frac{4 \cdot 72}{\frac{100}{5}} = 14,4 \text{ A} \quad (155)$$

$$\mathbf{(1101.1941.661.3) Threshold = 14,4 A} \quad (156)$$

Zpoždění vybavení musí být delší než vybavení rozdílové ochrany. Protože rozdílová ochrana vypíná bez zpoždění, je možné zpoždění této ochrany volit nízké.

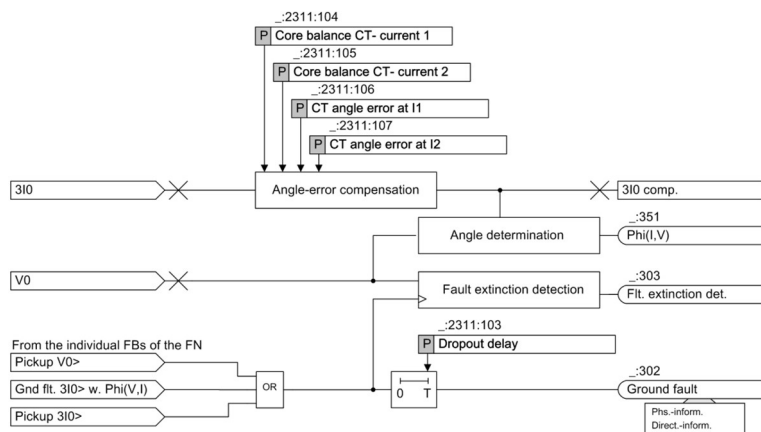
$$\mathbf{(1101.1941.661.6) Operate delay = 0,2 s} \quad (157)$$



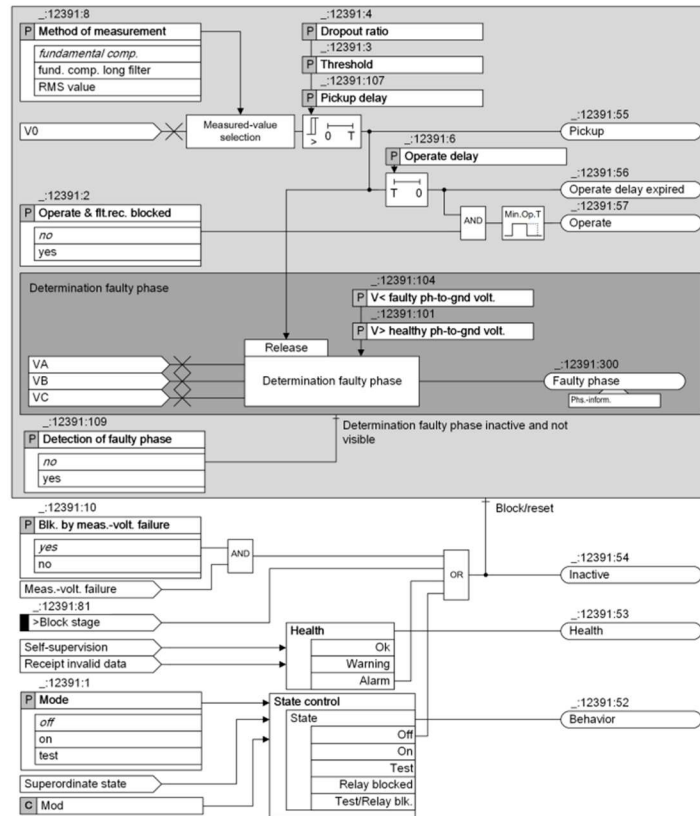
Obr. 42: Nastavení nadproudové zkratové ochrany

4.5.6 Zemní ochrana statoru (ANSI 59N)

Součástí výrobního bloku je blokový transformátor, není tudíž nutné nastavovat směrové kritérium netočivé složky proudu. Pro měření netočivé složky napětí je možno využít spojení sekundárních vinutí PTN do otevřeného trojúhelníka, PTN v uzlu generátoru nebo výpočet z měřených fázových napětí.



Obr. 43: Logický diagram zemní ochrany statoru (90%) (převzato z [6])



Obr. 44: Logický diagram stupně zemní ochrany statoru bez směrového kritéria (převzato z [6])

Nastavení ochranné funkce

Pro zamezení opakovanému rychlému aktivování a deaktivování zemní ochrany statoru, je nejprve zadáno zpoždění odpadnutí ochrany. Doporučená hodnota je 1 s.

$$(1101.2221.2311.103) \textit{Dropout delay} = 1 \textit{ s} \quad (158)$$

Vzhledem k tomu, že se ve výrobním bloku vyskytuje blokový transformátor, není třeba do ochranné funkce zahrnovat směrové kritérium. Nesměrový člen je odblokován následovně a je ponecháno aktivované automatické ukládání poruch.

$$(1101.2221.12391.1) \textit{Mode} = \textit{on} \quad (159)$$

$$(1101.2221.12391.2) \textit{Operate \& ftr.ec. blocked} = \textit{no} \quad (160)$$

Funkce ochrany je blokována v případě poruchy měření napětí.

$$(1101.2221.12391.10) \textit{Blk.by meas.-volt.failure} = \textit{yes} \quad (161)$$

V případě izolovaných systémů je doporučeno aktivovat detekci postižené fáze.

$$(1101.2221.12391.109) \textit{Detection of faulty phase} = \textit{yes} \quad (162)$$

Je zvoleno měření s omezením harmonických a přechodných proudů.

$$(1101.2221.12391.8) \textit{Method of measurement} \\ = \textit{fundamental comp.} \quad (163)$$

Rozsah chránění je zvykem limitovat na 90 % statorového vinutí. Nastavená mezní hodnota napětí je tedy 10 % U_{nG} a je přepočítána na sekundární stranu PTN.

$$U_{0 \text{ threshold}} = 10 \% U_{rObj} \quad (164)$$

$$U_{0 \text{ threshold sek}} = \frac{U_{0 \text{ threshold}}}{p_{PTN}} = \frac{0,1 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 6,06 \text{ V} \quad (165)$$

$$(1101.2221.12391.3) \textit{Threshold} = 6,06 \text{ V} \quad (166)$$

Doporučená hodnota přídržného poměru zemní ochrany statoru je 0,95.

$$(1101.2221.12391.4) \textit{Dropout ratio} = 0,95 \quad (167)$$

Ochrana umožňuje nastavit zpoždění vnitřního výpočtu v případě chráněných objektů s výraznými přechodnými jevy. Doporučená obvyklá hodnota je ale 0 s.

$$(1101.2221.12391.107) \textit{Pickup delay} = 0 \text{ s} \quad (168)$$

Aby se zamezilo vypnutí při rychlých změnách velikosti netočivé složky napětí, je nastaveno vybavovací zpoždění.

$$(1101.2221.12391.6) \textit{Operate delay} = 3 \text{ s} \quad (169)$$

Pro detekci postižené fáze je nutné zadat velikost fázového napětí, od které bude fáze označena za zdravou a velikost fázového napětí, od které bude fáze vyhodnocena jako postižená. Doporučené hodnoty jsou:

$$U_{\text{minhealthy}} = 70 \% U_{\text{rObj}} \quad (170)$$

$$U_{\text{maxfaulty}} = 30 \% U_{\text{rObj}} \quad (171)$$

$$U_{\text{minhealthy sek}} = \frac{U_{\text{minhealthy}}}{p_{\text{PTN}}} = \frac{0,7 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 42,43 \text{ V} \quad (172)$$

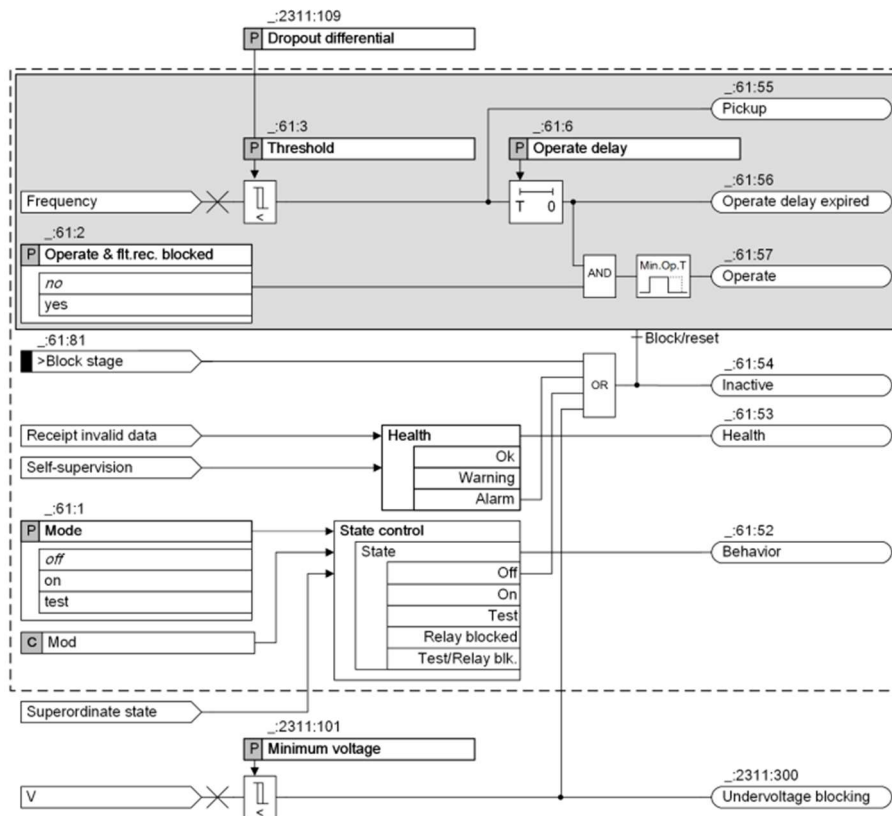
$$U_{\text{maxfaulty sek}} = \frac{U_{\text{maxfaulty}}}{p_{\text{PTN}}} = \frac{0,3 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 18,19 \text{ V} \quad (173)$$

$$\begin{aligned} (1101.2221.12391.101) \text{ V} &> \textit{healthy ph - to - gnd volt} \\ &= 42,43 \text{ V} \end{aligned} \quad (174)$$

$$\begin{aligned} (1101.2221.12391.104) \text{ V} &< \textit{faulty ph - to - gnd volt} \\ &= 18,19 \text{ V} \end{aligned} \quad (175)$$

4.5.7 Podfrekvenční ochrana (ANSI 81U)

Frekvenční ochranné funkce porovnávají naměřenou frekvenci napětí s nastavenou mezní hodnotou. Ochrana je blokována při napětí menším než nastaveném minimálním napětí. V podfrekvenční i nadfrekvenční ochranné funkci lze nastavit 2 stupně s různými limitními kmitočty a s rozdílnou dobou vypnutí. První stupeň je signalizační, 2. odstavuje generátor z provozu. Zde nastavuji jen stupeň signalizační.



Obr. 45: Logický diagram podfrekvenční ochrany

Nastavení podfrekvenční ochranné funkce

Funkce ochrany je blokována při podpětí, aby bylo zamezeno jejímu vybavení např. při najíždění bloku. Je nastavováno minimální napětí pro odblokování ochranné funkce, doporučená hodnota je 65 %. Hodnotu je nutno přepočítat na sekundární stranu PTN.

$$U_{\min} = 0,65 U_{rObj} \quad (176)$$

$$U_{\min \text{ sek}} = \frac{U_{\min}}{p_{\text{PTN}}} = \frac{0,65 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 39,4 \text{ V} \quad (177)$$

$$(1101.31.2311.101) \textit{ Minimum voltage} = 39,4 \text{ V} \quad (178)$$

Vzhledem k přesnému měření frekvence je možné nastavit odpadnutí ochrany po vcelku malém opětovném nárůstu frekvence. Volená hodnota je 20 mHz.

$$(1101.31.2311.109) \textit{ Dropout differential} = 20 \text{ mHz} \quad (179)$$

Podfrekvenční ochrana je aktivována parametrem *Mode* a je zachováno automatické ukládání poruch.

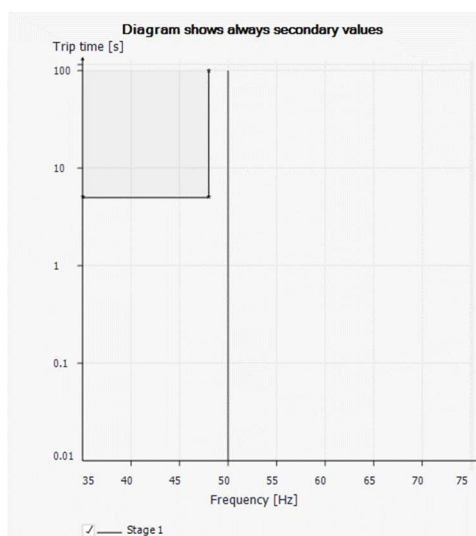
$$(1101.31.61.1) \textit{ Mode} = \textit{on} \quad (180)$$

$$(1101.31.61.2) \textit{ Operate \& f.lt.rec.blocked} = \textit{no} \quad (181)$$

Mezní hodnota frekvence je nastavena na 48 Hz a její dosažení je signalizováno s 5 s zpožděním. Odstavení je prováděno ochranami v připojené rozvodně.

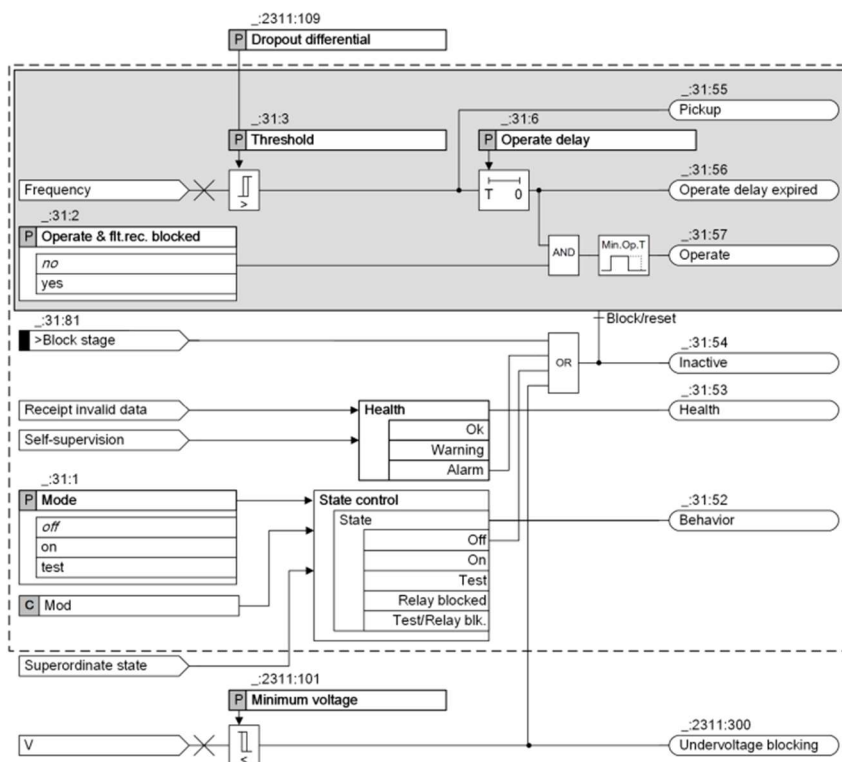
$$(1101.31.61.3) \textit{ Threshold} = 48 \text{ Hz} \quad (182)$$

$$(1101.31.61.6) \textit{ Operate delay} = 5 \text{ s} \quad (183)$$



Obr. 46: Nastavení podfrekvenční ochrany

4.5.8 Nadfrekvenční ochrana (ANSI 81O)



Obr. 47: Logický diagram nadfrekvenční ochrany

Nastavení nadfrekvenční ochranné funkce

Úvodní nastavení je stejné jako u podfrekvenční ochrany.

$$(1101.11.2311.101) \textit{Minimum voltage} = 39,4 \text{ V} \quad (184)$$

$$(1101.11.2311.109) \textit{Dropout differential} = 20 \text{ mHz} \quad (185)$$

Nadfrekvenční ochrana je aktivována parametrem *Mode* a je zachováno automatické ukládání poruch.

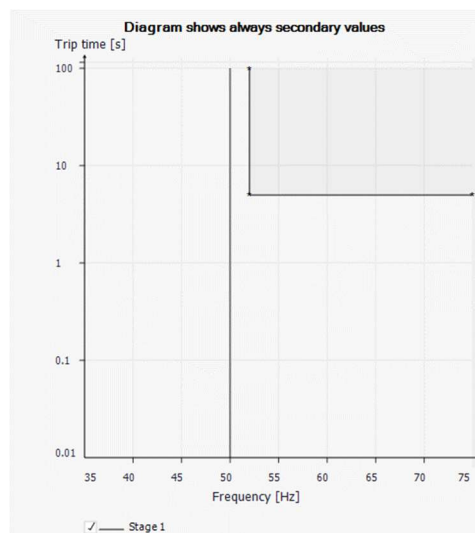
$$(1101.11.31.1) \textit{Mode} = \textit{on} \quad (186)$$

$$(1101.11.31.2) \textit{Operate \& flt.rec.blocked} = \textit{no} \quad (187)$$

Signalizační stupeň je nastaven na 52 Hz se signalizací po 5 s. Odstavení bloku na základě měřené frekvence je řízen ochranami v připojené rozvodně.

$$(1101.11.31.3) \textit{Threshold} = 52 \text{ Hz} \quad (188)$$

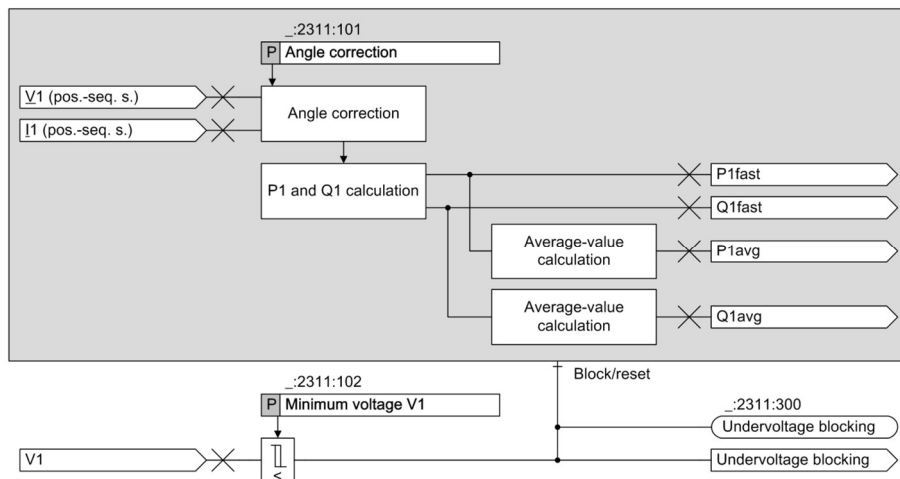
$$(1101.11.31.6) \textit{Operate delay} = 5 \text{ s} \quad (189)$$



Obr. 48: Nastavení nadfrekvenční ochrany

4.5.9 Zpětná wattová ochrana (ANSI 32R)

Ochranná funkce z měřených fázorů základní harmonické napětí a proudu vypočítává velikost a směr toku činného výkonu. Mezní zpětný výkon se určuje na základě velikosti činného výkonu nutného na pokrytí ztrát soustrojí, protože je nutné, aby nejprve zareagovaly mechanické ochrany na turbíně, až následně elektrická ochrana. Tato hodnota je získána na základě měření na konkrétním generátoru.



Obr. 49: Logický diagram ochrany proti zpětnému toku výkonu

Nastavení ochranné funkce

Ochranná funkce je blokována při poklesu sousledné složky napětí pod stanovenou hodnotu. Je využita doporučená hodnota firmou Siemens.

$$(1101.331.2311.102) \textit{ Minimum voltage V1} = 5 \textit{ V} \quad (190)$$

Pro správné měření velikosti a směru toku činného výkonu je nutné správné měření přístrojovými transformátory. Z toho důvodu je nutné zadat opravný úhel

$$(1101.331.2311.101) \textit{ Angle correction} = 0^\circ \quad (191)$$

Je provedeno odblokování funkce a zachování automatického ukládání poruch.

$$(1101.331.991.1) \textit{Mode} = \textit{on} \quad (192)$$

$$(1101.331.991.2) \textit{Operate} \ \& \ \textit{flt.rec.blocked} = \textit{no} \quad (193)$$

Očekávaná velikost činného výkonu pokrývajícího ztráty soustrojí je $-1 \% S_{nG}$.

$$(1101.331.991.3) \textit{Threshold} = -1 \% \quad (194)$$

Přídržný poměr je nastaven na 60 % parametru *Threshold*.

$$(1101.331.991.4) \textit{Dropout ratio} = 0,6 \quad (195)$$

Odpadnutí ochrany může být zpožděno, pokud jsou očekávány rychlé změny směru toku výkonu. Zde je toto zpoždění nastaveno nulové.

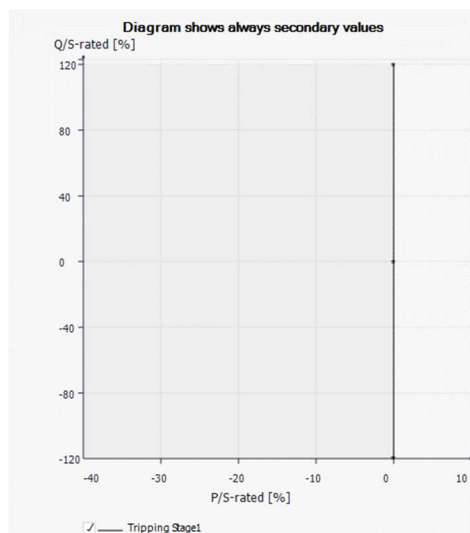
$$(1101.331.991.4) \textit{Dropout delay} = 0 \text{ s} \quad (196)$$

Pro omezení chybných vybavení ochrany je její reakce zpožděna o nastavený čas. K takové chybné reakci může dojít při přifázování stroje nebo při kývání výkonu v síti po poruše.

$$(1101.331.991.6) \textit{Operate delay} = 10 \text{ s} \quad (197)$$

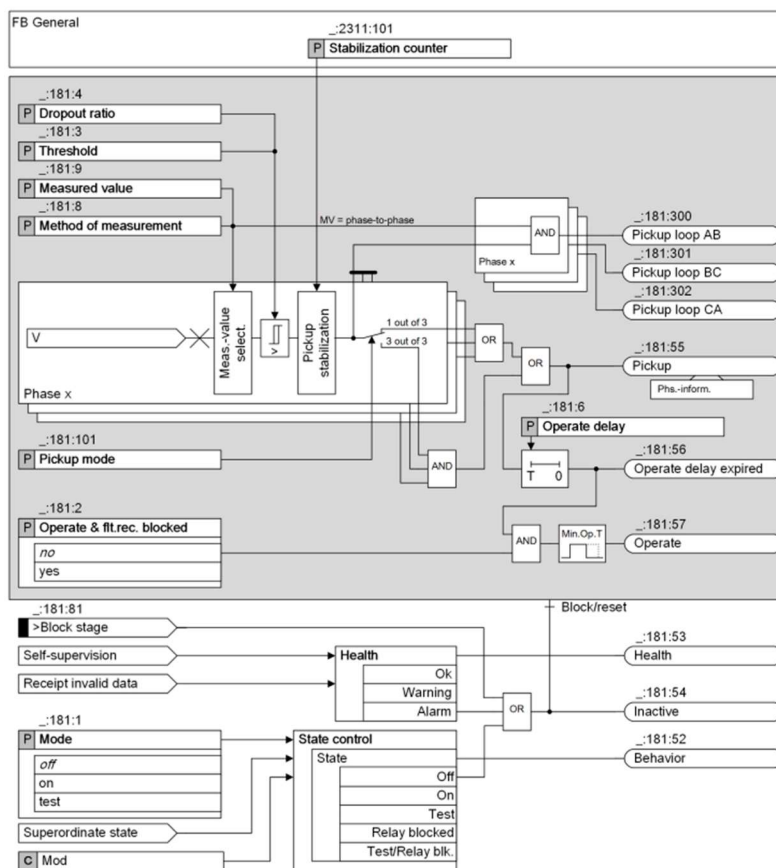
V případě odstavení stroje je nastavováno zpoždění vypnutí vypínače. Nejprve je uzavřen rychlouzávěr vody a generátor přestává dodávat činný výkon. Vypnutí vypínače je zpožděno tak, aby bylo provedeno až po zastavení vody. Tímto způsobem je zabezpečeno odstavení soustrojí bez vzniku přepětí na svorkách generátoru. Ochrana je v tomto okamžiku blokována, aby nedošlo k jejímu vybavení. Časový interval od signálu pro uzavření rychlouzávěru po konec blokování funkce je doporučeno volit v rozmezí 1 a 3 s v závislosti na rychlosti odstavení soustrojí.

$$(1101.331.991.103) \textit{Operate delay stop valve} = 1,5 \text{ s} \quad (198)$$



Obr. 50: Nastavení zpětné wattové ochrany

4.5.10 Nadpět'ová ochrana (ANSI 59)



Obr. 51: Logický diagram nadpět'ové ochrany

Nastavení ochranné funkce

Ochranu lze nastavit pro vybavení po opakovaném dosažení nadpětí pomocí parametru *Stabilization counter*. Zde je nastavena ochranná funkce pro vybavení při prvním zjištěném přepětí.

(1101.51.2311.101) *Stabilization counter* = 0 (199)

Ochrana bude obsahovat dva stupně – pomalý a rychlý. Nastavení se liší pouze vybavovací hodnotou napětí a časovým zpožděním vypnutí.

Aktivace funkce a zachování automatického ukládání poruch pro oba stupně:

(1101.51.181.1) *Mode* = on (200)

(1101.51.181.2) *Operate &flt.rec.blocked* = no (201)

(1101.51.182.1) *Mode* = on (202)

(1101.51.182.2) *Operate &flt.rec.blocked* = no (203)

Lze nastavit měřené napětí jako fázové nebo sdružené. Volím fázové.

(1101.51.181.9) *Measured value* = phase – to – phase (204)

(1101.51.182.9) *Measured value* = phase – to – phase (205)

Ochrana je nastavena na vybavení po naměření přepětí alespoň na jedné fázi.

(1101.51.181.101) *Pickup mode* = 1 out of 3 (206)

(1101.51.182.101) *Pickup mode* = 1 out of 3 (207)

Je měřeno napětí s útlumem harmonických a přechodných napětí.

**(1101.51.181.8) *Method of measurement*
= *fundamental comp.*** (208)

$$\begin{aligned} & \mathbf{(1101.51.182.8) Method of measurement} & (209) \\ & \mathbf{= fundamental comp.} \end{aligned}$$

Generované napětí je omezeno buzením na 110 % U_{nG} . Ochrana slouží jako pojištění správné funkce buzení. První stupeň je určen pro detekci nízkých přepětí do 115 % jmenovitého napětí generátoru. Druhý stupeň chrání generátor proti přepětím vyšších hodnot.

$$U_{\text{threshold sek slow}} = \frac{1,12 U_{rObj}}{p_{PTN}} = \frac{1,12 \cdot 6300}{\frac{6000}{100}} = 67,9 \text{ V} \quad (210)$$

$$\mathbf{(1101.51.181.3) Threshold = 67,9 \text{ V}} \quad (211)$$

$$U_{\text{threshold sek fast}} = \frac{1,3 U_{rObj}}{p_{PTN}} = \frac{1,3 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 78,8 \text{ V} \quad (212)$$

$$\mathbf{(1101.51.182.3) Threshold = 78.8 \text{ V}} \quad (213)$$

Přídržný poměr je zvolen doporučený.

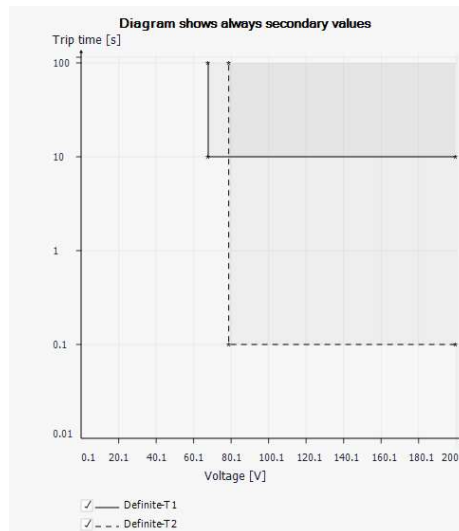
$$\mathbf{(1101.51.181.4) Dropout ratio = 0,95} \quad (214)$$

$$\mathbf{(1101.51.182.4) Dropout ratio = 0,95} \quad (215)$$

Čas vybavení prvního stupně je nutno nastavovat s ohledem na rychlost regulátoru napětí. Dobu vybavení druhého stupně volíme v závislosti na přechodném přepětí v případě přechodu stroje do stavu naprázdno, které je omezeno regulátorem napětí a nesmí způsobit odstavení stroje.

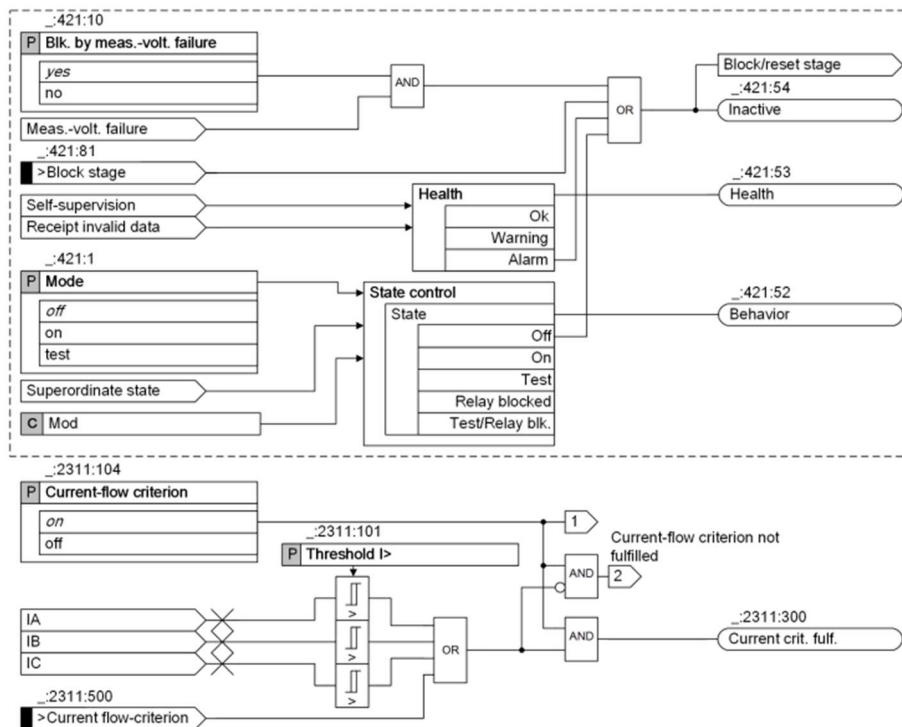
$$\mathbf{(1101.51.181.6) Operate delay = 10 \text{ s}} \quad (216)$$

$$\mathbf{(1101.51.181.6) Operate delay = 0,1 \text{ s}} \quad (217)$$



Obr. 52: Nastavení nadpět'ové ochrany

4.5.11 Podpět'ová ochrana (ANSI 27)



Obr. 53: Logický diagram podpět'ové ochrany

Nastavení ochranné funkce

Podpěťová ochrana obsahuje dva stupně – pomalý a rychlý. Rozdíl je opět ve vybavovací velikosti napětí a dobou vypnutí. Protože je měření napětí umístěno na svorkách generátoru, po odstavení poklesne napětí a ochrana by chybně vybavila. Proto se v tomto případě nastavuje minimální hodnota proudu sekundární strany PTP pro odblokování ochranné funkce. Doporučená hodnota je 5 % $I_{nPTNsek}$. Ochrana vybavuje při detekci prvního podpětí.

$$(1101.131.2311.104) \text{ Current – flow criterion} = \text{on} \quad (218)$$

$$(1101.131.2311.101) \text{ Threshold } I \geq 5 \% \cdot I_{nPTP \text{ sek}} \\ = 0,25 \text{ A} \quad (219)$$

$$(1101.131.2311.103) \text{ Stabilization counter} = 0 \quad (220)$$

Aktivace funkce a zachování automatického ukládání poruch pro oba stupně:

$$(1101.131.421.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (221)$$

$$(1101.131.421.2) \text{ Operate \& flt.rec.blocked} = \text{no} \quad (222)$$

$$(1101.131.422.1) \text{ Mode} = \text{on} \quad (223)$$

$$(1101.131.422.2) \text{ Operate \& flt.rec.blocked} = \text{no} \quad (224)$$

Ochrana je blokována při výskytu poruchy měření napětí.

$$(1101.131.421.10) \text{ Blk. by meas. –volt. failure} = \text{yes} \quad (225)$$

$$(1101.131.422.10) \text{ Blk. by meas. –volt. failure} = \text{yes} \quad (226)$$

Je nastaveno měření fázového napětí.

$$(1101.131.421.9) \text{ Measured value} = \text{phase – to – ground} \quad (227)$$

$$(1101.131.422.9) \text{ Measured value} = \text{phase – to – ground} \quad (228)$$

Při měření jsou potlačeny harmonická a přechodná napětí.

$$(1101.131.421.8) \textit{ Method of measurement} = \textit{ fundamental comp.} \quad (229)$$

$$(1101.131.422.8) \textit{ Method of measurement} = \textit{ fundamental comp.} \quad (230)$$

Funkce vybavuje při výskytu podpětí alespoň v jedné fázi.

$$(1101.131.421.101) \textit{ Pickup mode} = 1 \textit{ out of 3} \quad (231)$$

$$(1101.131.422.101) \textit{ Pickup mode} = 1 \textit{ out of 3} \quad (232)$$

Zpoždění aktivace podpět'ové ochrany je zablokováno.

$$(1101.131.421.101) \textit{ Pickup delay} = 0 \textit{ s} \quad (233)$$

$$(1101.131.422.101) \textit{ Pickup delay} = 0 \textit{ s} \quad (234)$$

Přídržný poměr je ponechán doporučený.

$$(1101.151.481.4) \textit{ Dropout ratio} = 1,05 \quad (235)$$

$$(1101.151.482.4) \textit{ Dropout ratio} = 1,05 \quad (236)$$

Mezní hodnotu pro pomalý stupeň volím 70 % U_{nG} , pro rychlý stupeň 60 % U_{nG} .

$$U_{\text{threshold sek slow}} = \frac{0,7 U_{rObj}}{p_{PTN}} = \frac{0,7 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 42,43 \text{ V} \quad (237)$$

$$(1101.131.421.3) \textit{ Threshold} = 42,43 \text{ V} \quad (238)$$

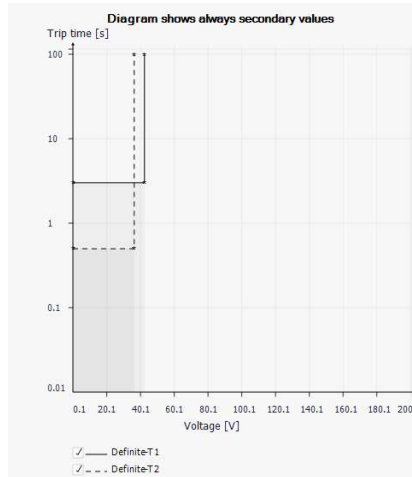
$$U_{\text{threshold sek fast}} = \frac{0,6 U_{rObj}}{p_{PTN}} = \frac{0,6 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 36,37 \text{ V} \quad (239)$$

$$(1101.131.421.3) \textit{ Threshold} = 36,37 \text{ V} \quad (240)$$

Pomalý stupeň vypíná v čase 3 s, rychlý v čase 0,5 s.

$$(1101.131.421.6) \textit{ Operate delay} = 3 \textit{ s} \quad (241)$$

$$(1101.131.422.6) \textit{ Operate delay} = 0,5 \textit{ s} \quad (242)$$



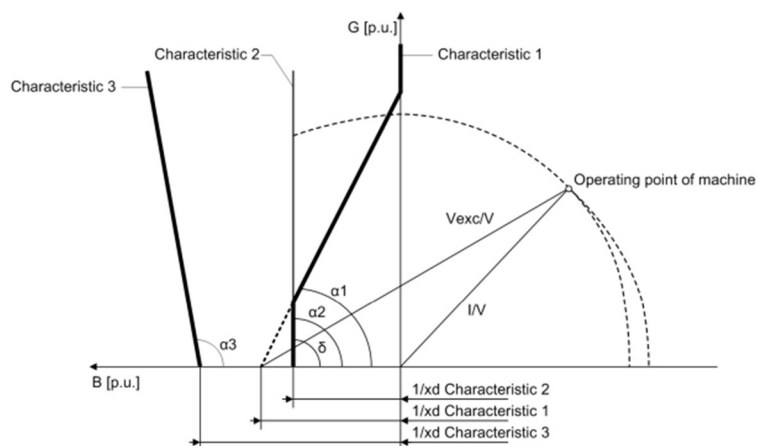
Obr. 54: Nastavení podpěťové ochrany

4.5.12 Podbuzení, ztráta buzení (ANSI 40)

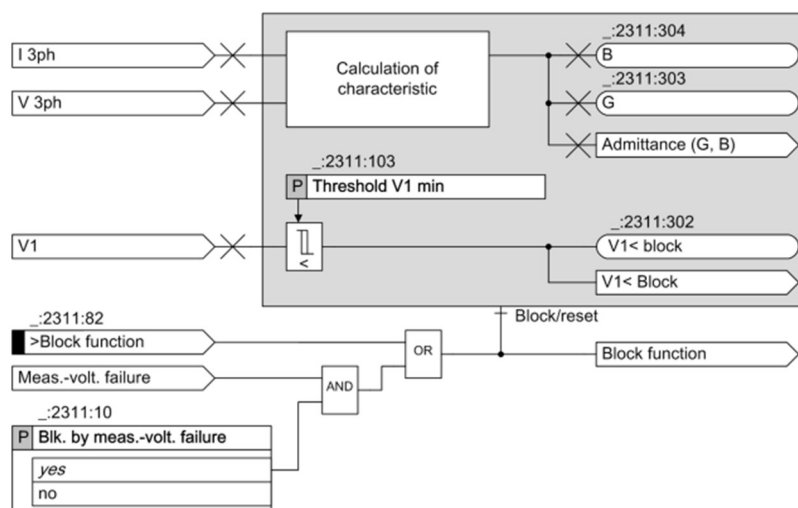
Ochrana z měřených proudů a napětí vypočítává admitanci statoru, následně s její hodnotou pracuje po rozdělení na konduktanci a susceptanci. Přímký se v ochraně nastavují pomocí susceptance v poměrných jednotkách a úhlu natočení vůči ose B . Jak bylo zmíněno v úvodní teorii diplomové práce, v poměrných jednotkách platí:

$$P_{p.u.} = G_{p.u.} \quad (243)$$

$$Q_{p.u.} = B_{p.u.} \quad (244)$$

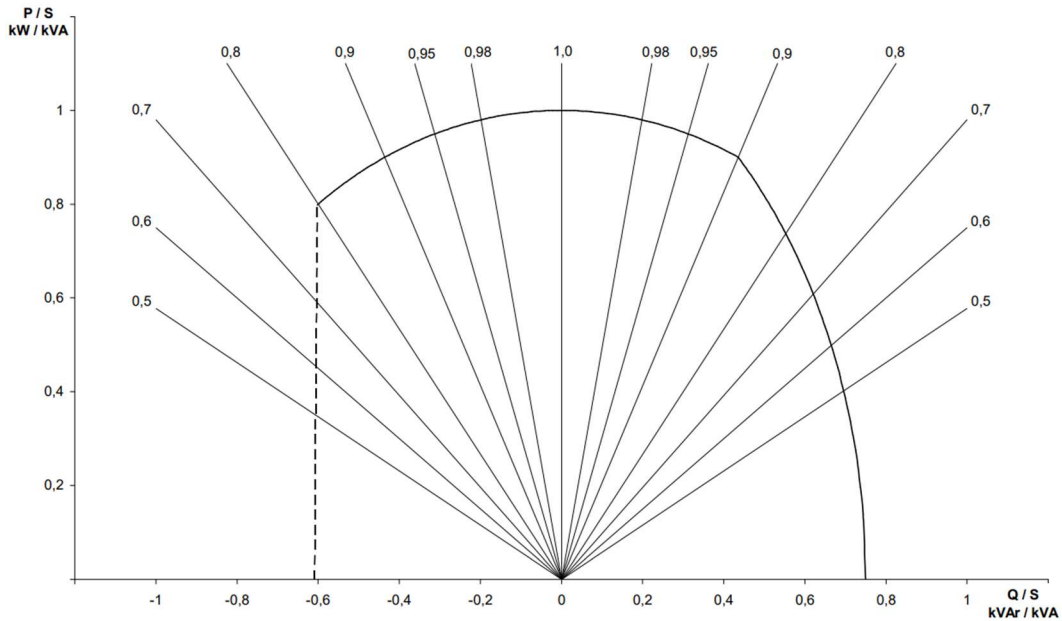


Obr. 55: Způsob nastavování ochrany proti podbuzení (převzato z [6])



Obr. 56: Logický diagram ochrany proti podbuzení (převzato z [6])

Pro generátor byl výrobcem udán následující PQ diagram. Čárkovanou čarou je vyznačena praktická mez statické stability.



Obr. 57: PQ diagram hydrogenerátoru

Nastavení ochranné funkce

Ochranná funkce je blokována při poklesu napětí pod nastavenou hodnotu, díky kterému je schopna vypočítávat admitanci stroje. Tuto mez je doporučeno nastavovat okolo 25 % fázového napětí. Opět je třeba hodnotu přepočítat na sekundární stranu PTN.

$$U_{\min} = 0,25 \frac{U_{rObj}}{\sqrt{3}} \quad (245)$$

$$U_{\min \text{ sek}} = \frac{U_{\min}}{p_{PTN}} = \frac{0,25 \frac{6300}{\sqrt{3}}}{\frac{6000}{100}} = 15,16 \text{ V} \quad (246)$$

$$(1101.2422.2311.103) \text{ Threshold V1 min} = 15,16 \text{ V} \quad (247)$$

Funkce je blokována při poruše měření napětí.

$$(1101.2422.2311.10) \text{ Blk. by meas. -volt. failure} = \text{yes} \quad (248)$$

Aktivace ochranné funkce a zachování automatického ukládání poruch:

$$(1101.2422.16531.1) \textit{Mode} = \textit{on} \quad (249)$$

$$(1101.2422.16531.2) \textit{Operate \& f.lt.rec.blocked} = \textit{no} \quad (250)$$

Protože mez statické stability není v PQ diagramu stroje zalomená čára, lze charakteristiku ochranné funkce proti podbuzení nastavit z jedné přímky s úhlem 90°. Pro ohraničení statické stability jsou připravené dvě nastavitelné přímky. Volím tedy stejné nastavení pro obě tak, aby se překrývaly. Je nutný přepočít na sekundární stranu přístrojových transformátorů. Přímka signalizačního stupně by měla být umístěna pod křivkou PQ diagramu. Velikost susceptance pro signalizační stupeň volím s rezervou 10 % pod velikostí admittance statické stability odečtené z provozního diagramu (Obr. 57).

$$\frac{1}{x_d} = 0,9 \cdot 0,61 = 0,549 \quad (251)$$

$$\frac{1}{x_{d \text{ sek}}} = 0,549 \cdot \frac{U_{rPTN \text{ prim}}}{U_{rObj}} \frac{I_{rObj}}{I_{rPTP \text{ prim}}} = \frac{1}{1,43} \cdot \frac{6000}{6300} \cdot \frac{72}{100} = 0,376 \quad (252)$$

$$(1101.2422.16531.3) \textit{1/xd characteristic 1} = \mathbf{0,38} \quad (253)$$

$$(1101.2422.16531.4) \textit{Angle characteristic 1} = \mathbf{90^\circ} \quad (254)$$

Pokud je stroj provozován bez měření budícího napětí, je doporučená hodnota času signalizace mezi 0,5 a 3 s.

$$(1101.2422.16531.5) \textit{Operate delay char. 1} = \mathbf{2 s} \quad (255)$$

Druhá přímka je nastavena stejně jako první.

$$(1101.2422.16531.6) \textit{1/xd characteristic 1} = \mathbf{0,38} \quad (256)$$

$$(1101.2422.16531.7) \textit{Angle characteristic 2} = \mathbf{90} \quad (257)$$

$$(1101.2422.16531.8) \textit{Operate delay char. 2} = \mathbf{2 s} \quad (258)$$

Třetí přímka by měla ochranu přizpůsobit charakteristice dynamické stability. Je doporučeno průsečík s osou B nastavovat na dvojnásobek průsečíku ochrany proti podbuzení (přímka 1 a 2) s osou B.

$$2 \cdot \frac{1}{x_{d \text{ sek}}} = 2 \cdot 0,38 = 0,76 \quad (259)$$

$$(1101.2422.16531.9) \text{ 1/}x_d \text{ characteristic 3} = 0,76 \quad (260)$$

$$(1101.2422.16531.10) \text{ Angle characteristic 3} = 95^\circ \quad (261)$$

Při překročení dynamické stability hrozí ztráta synchronismu. Stroj je nutno v tomto případě rychle odstavit. Obvyklá nastavovaná hodnota je 0,3 s.

$$(1101.2422.16531.11) \text{ Operate delay char. 3} = 0,3 \text{ s} \quad (262)$$

Zhodnocení a závěr

V prvních kapitolách práce byla popsána obecná teorie elektrických ochran. Dnešní moderní ochrany zažily dlouhý vývoj do dnešní podoby a stále si udržují základní logiku, podle které byly vytvořeny již první ochranné prvky, a to je chránit konkrétní objekt před jeho poškozením.

Obecná část práce byla věnována možnostem chránění vůči konkrétním provozním stavům, které se při provozu synchronních generátorů mohou vyskytovat. Jsou popsány nejběžnější ochrany, které jsou využívány především v České republice a zemích, ve kterých jsou generátory v bezporuchovém stavu provozovány s neuzemněným uzlem. Fungování ochran bylo z velké části popisováno podle ochran firmy Siemens, které jsou využívány firmou „Invelt elektro s.r.o.“, která toto téma diplomové práce poskytla ke zpracování.

Hlavní částí je nastavení ochranných funkcí generátorové ochrany SIPROTEC 5 7UM85 pro konkrétní hydrogenerátor malé vodní elektrárny. Tato část započala výběrem ochranných funkcí podle normy ČSN 33 3051 a soubor ochranných funkcí byl doplněn o další ochranné funkce podle doporučení projektantů firmy. Celkem se soubor nastavovaných ochranných funkcí skládá z dvanácti ochranných funkcí, pro které je po zjednodušených zkratových výpočtech a základním popisu multifunkční generátorové ochrany 7UM85 uveden popis jejich nastavování.

Základní ochranou generátorů je rozdílová neboli diferenciální ochrana (ANSI 87G). Ta po detekci rozdílového proudu, který značí vnitřní poruchu stroje, okamžitě generátor odstavuje.

Další nastavovanou ochrannou funkcí je ochrana proti přetížení statoru (ANSI 49). Tato ochrana vytváří matematický tepelný model stroje a na základě velikosti proudu a jeho trvání signalizuje přetížení nebo odstavuje stroj. Signalizace je nastavena na 110 % I_{nG} a odstavení je provedeno na základě zmíněného tepelného modelu, který reaguje při 150 % I_{nG} po 30 s.

Ochrana proti nesymetrickému zatížení chrání generátor před přehřátím vodivých rotorových částí, ve kterých se vlivem zpětné složky proudu generují vířivé proudy o dvounásobné frekvenci. Maximální trvalá hodnota zpětné složky proudu je podle zmíněné normy 8 % I_{nG} a její překročení je signalizováno po 2 s, aby při proměnné nesymetrické zátěži nedocházelo k opakované rychlé signalizaci. Ochrana odstavuje generátor na základě časově inverzní charakteristiky, která je nastavena podle informací z normy ČSN EN IEC 60034-33, ve které je pro hydrogenerátory uvedena velikost časového

integrálu kvadrátu zpětné složky proudu a maximální doba jejího trvání. Velikost vstupní hodnoty zpětné složky proudu do ochranné funkce je omezena na desetinásobek maximální trvalé hodnoty, což znamená minimální vypínací čas 0,31 s.

Proti blízkým zkratům je využita nadproudová ochrana s podpět'ovou přídrží (ANSI 51V). Blízké zkraty se vyznačují poklesem svorkového napětí a nízkou ustálenou hodnotou proudu. Nadproudový člen je aktivován při překročení $1,6 I_{nG}$ (např. rázovou složkou zkratového proudu). Tato hodnota je vyšší než maximální očekávané proudové přetížení a nižší než minimální očekávaný zkratový proud. Při poklesu proudu pod tuto hodnotu by ochrana odpadla a nevybavila. Podpětí během blízkého zkratu aktivuje podpět'ovou přídrž, která je nastavena na 80 % U_{nG} a je aktivována po dobu 4 s i po možném nárůstu proudu nad mezní hodnotu. Vybavení je pak provedeno po nepřerušovaném signálu pro vybavení o délce 2 s.

Pro vysokoproudové zkraty je nastavena nadproudová zkratová ochrana (ANSI 50/51), jejíž mezní hodnota je nastavena pod velikost minimální vypočítané přechodné složky zkratového proudu na čtyřnásobek I_{nG} . Ochrana odstavuje stroj po 0,2 s.

Zemní ochrana statoru chrání generátor před poškozením v případě zemního spojení na statorovém vinutí. Ochrana vypočítává velikost netočivé složky napětí z měřeného svorkového napětí. Podle zvyklostí je nastavena na 90 % délky vinutí od svorek generátoru, aby nedocházelo k chybnému vybavení v případě připojené nesymetrické zátěže nebo zemního spojení v síti. Z tohoto důvodu je také nastaveno zpoždění odpadnutí ochrany na 1 s a přídržný poměr 0,95. Ochrana následně vybavuje se zpožděním 3 s po nepřetržitém signálu pro vybavení.

Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana signalizuje vybočení frekvence o 2 Hz od jmenovité frekvence. Odstavení bloku je následně řízeno ochranami umístěnými v připojené rozvodně nebo z nadřazeného řídicího systému.

Zpětná wattová ochrana měří velikost a směr toku činného výkonu. Mezní hodnota je zadávána vzhledem k vysokému jmenovitému účinníku stroje 0,9 v poměru ke jmenovitému zdánlivému výkonu generátoru. Její hodnota je určena na základě měření provozních ztrát generátoru v místě instalace. Zde je na základě doporučení nastavena na -1 % S_{nG} .

Nadpět'ová ochrana chrání generátor před poškozením zapříčiněným vlivem provozních a atmosférických nadpětí. První stupeň je nastaven nad maximální hodnotu napětí omezenou

buzením generátoru ($110 \% U_{nG}$) na $112 \% U_{nG}$. Tento stupeň signalizuje se zpožděním 10 s. Rychlý stupeň vypíná po 0,1 s při dosažení nadpětí $130 \% U_{nG}$.

Podpěťová ochrana chrání generátor před ztrátou napájení pomocných systémů jako jsou olejová čerpadla, pohony česel, uzávěrů vody apod. Při podpětí $70 \% U_{nG}$ je signalizováno podpětí se zpožděním 3 s, při podpětí $60 \% U_{nG}$ se zpožděním 0,5 s. Pokud je generátor vystaven blízkému zkratu způsobujícím nižší podpětí než 60 %, reaguje podpěťová ochrana dříve než nadproudová ochrana s podpěťovou přídrží.

Ochrana proti podbuzení chrání generátor proti ztrátě statické dynamity a buzení. Při překročení meze statické stability je nastaveno časové zpoždění odstavení generátoru na 2 s. Stupeň proti ztrátě stability se nastavuje do přibližné polohy dynamické stability a vybavení stroje je provedeno po 0,3 s.

Literatura

- [1] GRYM, Rudolf; HOCHMAN, Petr; BERMAN, Jiří; MACHOŇ, Josef a CICHONĚ, Břetislav. *Chránění II*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9.
- [2] FEDERÁLNÍ ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ. ČSN 33 3051, *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. 1992.
- [3] DAS, J.C. *Power Systems Handbook: Power Systems Protective Relaying*. Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-4551-2.
- [4] HOROWITZ, Stanley a PHADKE, Arun. *Power System Relaying*. 4th edition. WILEY, 2014. ISBN 978-1-118-66200-7.
- [5] TOMAN, Petr; HANUŠ, Radek; GRYM, Rudolf a HOCHMAN, Petr. *Chránění III*. Havířov: IRIS, 2005. ISBN 80-903-5405-X.
- [6] SIEMENS AG. *SIPROTEC 5 Generator Protection 7UM85*. V9.70. 2023. Dostupné také z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742404/siprotec-5-7um85-generator-protection-manual?dti=0&lc=en-CZ>.
- [7] ABB. *Relion® protection and control 630 series Technical Manual*. Product version 1.3. 2022.
- [8] JANÍČEK, František; CLADNÝ, Vladimír; BELÁŇ, Anton a ELESCHOVÁ, Žaneta. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: STU, 2004. ISBN 80-227-2135-2.
- [9] SIEMENS AG. *SIPROTEC 4 Multifunctional Machine Protection 7UM62*. V4.70. 2017.
- [10] PETR, Janeček. *Návrh nastavení ochran generátoru*. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie, 2007.
- [11] *Kodex přenosové soustavy - Část V.: Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS*. PDF. ČEPS, 2022.

- [12] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 60909-0, *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: Výpočet proudů*. Ed. 2. 2016.
- [13] *Generator protection - SIPROTEC 7UM85*. Online. In: Siemens. C1996-2024. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-5/motor-and-generator-protection/generator-protection-siprotec-7um85.html>. [cit. 2024-04-17].
- [14] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN IEC 60034-1, *Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Ed. 2. 2011.
- [15] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN IEC 60034-33, *Točivé elektrické stroje - Část 33: Synchronní hydrogenerátory včetně motogenerátorů - Zvláštní požadavky*. 2022.