



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

System elektrických ochran generátorového bloku

Autor práce: Bc. Jan Maršal
Vedoucí práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.

Rok 2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MARŠAL**
Osobní číslo: **E12N0119P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Systém elektrických ochran generátoru jaderného bloku**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

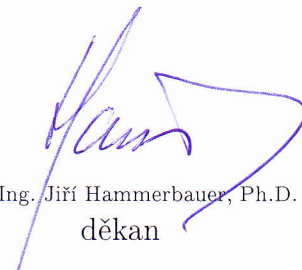
1. Vytvořte přehled principů a technických řešení chránění generátorů v elektroenergetice.
2. Popište provozní a poruchové stavy generátoru jaderného bloku JE Temelín.
3. Popište a zhodnoťte vnější poruchové stavy na provoz a systém chránění generátoru JE.
4. Navrhněte systém digitálního chránění generátoru jaderného bloku JE Temelín.

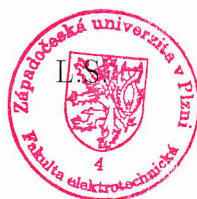
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 14. října 2013

Čestné prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr magisterského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

Datum: 12. 5. 2014

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí Ing. Janě Jiříčkové Ph.D. za cenné připomínky, pomoc při shánění potřebné literatury a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval mému konzultantovi Ing. Ondřeji Trubkovi za jeho ochotu a vstřícnost při konzultacích diplomové práce.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na problematiku chránění turbogenerátoru o velkém výkonu a je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola charakterizuje vybrané poruchové stavy generátorů, které mohou při běžném provozu nastat. Druhá kapitola se zabývá provozními a poruchovými stavy turbogenerátoru TG1000 MW, který je v současné době použit na obou blocích JE Temelín. Následující kapitola uvažuje vliv vnějších poruchových stavů na provoz turbogenerátoru, potažmo JE Temelín. Poslední dvě praktické části práce jsou věnovány výpočtu digitální ochrany pro blok JE Temelín.

Klíčová slova

digitální ochrana, porucha, zkrat, zemní spojení, JE Temelín, turbogenerátor TG1000 MW, provozní a poruchové stavy TG1000 MW

Abstract

This thesis is focusing on problems with regard to protecting turbogenerator of high wattage and it is split into five parts. The first part is describing selected failures of generators which can occur during regular operating. The second part is about operate and failure status of TG1000 MW generator which is currently beeing used on both blocks of nuclear power station Temelín. The next part is considering the influence of outside failure aspects on the turbogenerator not to say nuclear power station Temelín. The last two practical parts of this thesis are addressed to calculating a digital protection for one of the blocks of nuclear power station Temelín.

Keywords

digital protection, fault, short circuit, earth fault, nuclear power station Temelín, turbogenerator TG1000 MW, operating and fault conditions of TG1000 MW

Obsah

Úvod	4
1 Chránění synchronních generátorů	5
1.1 Poruchy synchronních generátorů	6
1.1.1 Proudové přetížení generátoru	6
1.1.2 Napěťové přetížení generátoru	7
1.1.3 Vnitřní zkraty v generátoru	8
1.1.4 Zemní spojení ve statoru generátoru	11
1.1.5 Zemní spojení v rotoru generátoru	11
1.1.6 Nesymetrické proudové zatížení generátoru	12
1.1.7 Ztráta buzení	13
1.1.8 Samobuzení	15
1.1.9 Ložiskové proudy	16
1.2 Ochrana velkých generátorů	16
1.2.1 Koncepce redundance	17
1.2.2 Vypínací matice	18
1.2.3 Rozsah ochranných funkcí	19
1.3 Současná ochrana v JE Temelín	20
2 Provozní a poruchové stavy turbogenerátoru JE Temelín	23
2.1 Provozní režimy TG	25
2.1.1 Nominální provozní režim TG	26
2.2 Poruchové stavy TG	29
3 Vliv vnějších poruchových stavů na provoz a chránění TG JE Temelín	31
3.1 Porucha v rozvodně Kočín	32
3.2 Porucha na lince z rozvodny Kočín	33
3.3 Kolísání frekvence v elektrizační soustavě	34
4 Návrh digitální ochrany pro blok JE Temelín	36
4.1 Rozdílová ochrana F301	36
4.2 Impedanční ochrana F251	38
4.3 Zkratová ochrana F111	40
4.4 Zemní ochrana na 1. harmonickou F421	41
4.5 Zemní ochrana na 3. harmonickou F422	41
4.6 Zemní ochrana rotoru F431	42

4.7	Ochrana proti proudovému přetížení F131	42
4.8	Ochrana proti nesymetrickému proudovému přetížení F46	43
4.9	Zpětná wattová ochrana F501, F502	44
4.10	Ochrana proti ztrátě stability při podbuzení F442	45
4.11	Ochrana při ztrátě buzení F441, F371, F45	46
4.12	Ochrana při změnách frekvence F39	48
4.13	Přepěťová ochrana F381, F382	48
5	Vyhodnocení výsledků a návrh nového systému	49
5.1	Návrh firmy a souboru ochran	49
5.2	Návrh ochrany a ochranných funkcí	50
	Závěr	54
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Literatura	57
	Přílohy	58

Seznam veličin a zkratk

ANSI/IEE	Standardní značení ochranných funkcí
APD	Aktuální provozní diagram
ČSN	Československé normy
DG	Diesलगenerátor
ES	Elektrizační soustava
F16	Zemní nádobová ochrana
HMI	Human Machine Interface
HVB	Hlavní výrobní blok
IED	Intelligent Electronic Device
JE	Jaderná elektrárna Temelín
OZ	Automatika opětovného zapnutí
PTN	Přístrojový transformátor napětí
PTP	Přístrojový transformátor proudu
SP-F392	Frekvenční ochrana generátoru
SP-F396	Záloha nadfrekvenční ochrany
TG	Turbogenerátor
V_G	Generátorový vypínač
V_K	Vypínač v rozvodně Kočín
VS	Vlastní spotřeba

Úvod

Předkládaná diplomová práce se věnuje problematice chránění generátorů velkých výkonů. Systémem chránění generátorů se zabývají firmy ABB s řadou REG, Siemens SIPROTEC s řadou 7U a SEL s řadou 700G. Ochrana generátorů je komplexní a perspektivní obor, který souvisí i s částečným chráněním blokového transformátoru. Ochrana samotná tedy povětšinou chrání nejen generátor, ale i blokový transformátor s linkou vyvedení výkonu.

V dnešní napjaté době je více než kdy dříve potřeba zajistit spolehlivý a bezporuchový provoz distribuční soustavy. Právě elektrárenské bloky o velkém výkonu, jako třeba JE Temelín, mají na tuto spolehlivost významný vliv. Tyto bloky tedy mají výrazný podíl na potenciálním kolapsu, či udržení distribuční soustavy ve chvílích jejího největšího zatížení. Dá se tedy říci, že mohou odvrátit případný blackout. Tento fakt klade na generátorové ochrany nemalé nároky. Zbytečné odpojení takto velkého bloku má nejen znatelný vliv na dodávaný výkon do sítě, ale také musíme zvážit ekonomické hledisko plynoucí z nedodávání elektrické energie do elektrizační soustavy.

Diplomová práce je rozdělena do pěti částí, aby bylo docíleno komplexního zpracování daného tématu. Úvodní kapitola je koncipována jako seznámení s danou problematikou chránění a s jednotlivými vnitřními poruchami, které mohou vzniknout při provozování generátoru. Jelikož je tato práce spjata s JE Temelín, týkají se další kapitoly generátoru TG1000 MW, který je v této elektrárně použit. Ve druhé kapitole bude popsán nominální provozní stav turbogenerátoru a jeho možné poruchové stavy. Poslední teoretická kapitola analyzuje vlivy vnějších stavů elektrizační soustavy na provoz bloku JE Temelín. Poslední a zároveň praktická část práce je rozdělena do dvou kapitol a je zaměřena na návrh nového systému chránění generátoru TG1000 MW. Samotný návrh ochrany je počítán s parametry před právě probíhající modernizací, během které dojde ke zvýšení výkonu z 1000 MW na 1125 MW.

1 Chránění synchronních generátorů

Základní účel elektrických ochran je zřejmý. Mají za úkol chránit daný objekt před různými druhy poruch, ale také i před nenormálními provozními stavy. Při chránění generátoru musíme brát v potaz plynulost dodávky elektrické energie. Elektrické ochrany generátoru musejí být tedy nastaveny s maximální přesností, aby nedocházelo ke zbytečnému vybavení. Tento fakt klade velký důraz na přesnost nastavení parametrů, při kterých ochrana zareaguje. Samozřejmě chceme i minimalizovat případný rozsah škody způsobené poruchou.

Ochrany synchronních generátorů musejí splňovat následující požadavky:

- Rychle a spolehlivě určit poruchu generátoru, popřípadě překročení hranice provozního stavu generátoru.
- Vypnout v takovém čase, aby následky poruchy byly co nejmenší.
- Minimalizovat riziko úrazu obsluhy elektrickým proudem.
- Zabezpečit, aby se porucha nerozšířila i na neporušené prvky elektrizační soustavy.
- Zóny ochran musejí být navrženy takovým způsobem, aby se překrývaly (žádná část elektrického zařízení nesmí být nechráněná).

Abychom zajistili bezpečné a spolehlivé chránění generátoru, musíme nejprve provést:

- Analýzu vzniku všech případných poruch.
- Výběr vhodných elektrických ochran, abychom zajistili ochranu před všemi možnými poruchovými stavy.
- Zabezpečení selektivnosti ochran.
- Zálohování ochran.

V bezporuchovém stavu je chod generátoru zabezpečen prostřednictvím řídicího systému turbíny a automatického regulátoru napětí. Bezporuchový stav synchronního generátoru je dán specifickými hodnotami charakteristických veličin. Při poruše tedy dojde k tomu, že se tyto charakteristické veličiny dostanou mimo nastavené meze. V takovém případě musí dojít k co nejrychlejšímu vybavení ochrany.

Ochrany bloku (mimo jiné i generátoru) sestávají z dvojího typu ochran. Strojní ochrany chrání technologickou část bloku a ochrany elektrické mají za úkol chránit elektrickou část. Tyto ochrany společně nazýváme komplexní ochranou bloku. Komplexní ochrana je tedy dimenzována tak, aby mohla automaticky zasáhnout v případě stavu, při kterém již nemůže zasáhnout automatická regulace.[1]

1.1 Poruchy synchronních generátorů

Mezi jedny z nejzávažnějších poruch patří izolační poruchy statoru či rotoru, tedy zkraty a zemní spojení. Tyto poruchy vyvolávají obrovské tepelné a dynamické síly, a proto na ně musejí ochrany zareagovat okamžitě, aby tak zabránily vážnějším škodám. Zvýšené pozornosti musíme dbát i při nenormálních stavech, jako jsou například přepětí, proudová nesymetrie, podbuzení apod. V dalších kapitolách si popíšeme výše zmíněné poruchy a uvedeme systém chránění s ohledem na turbogenerátor, kterým je vybavena JE Temelín. V JE Temelín je použit dvoupólový synchronní generátor, který má elektrický výkon 1000 MW a uzel stroje je uzemněn přes vysokou impedanci prostřednictvím PTN.[1]

1.1.1 Proudové přetížení generátoru

K proudovému přetížení synchronního generátoru dochází, jestliže proud procházející vinutím je větší než dimenzovaný proud I_N . Tento fakt způsobí přehřívání stroje, což zapříčiní degradaci izolace stroje a zvýšení přídatných tepelných ztrát. Ty jsou úměrné vztahu:

$$W = 3R \int_0^T i^2(t) dt \quad (1)$$

Kde W – energie akumulovaná ve statorových vodičích stroje

R – odpor jedné fáze statorového vodiče

$i(t)$ – proud procházející statorovým vinutím

T – doba trvání proudového přetížení

Proudové přetížení bychom mohli chránit za pomoci zabudovaných tepelných snímačů (termočlánků), které jsou však schopny měřit pouze teplotu železa nikoli teplotu vinutí. Z tohoto faktu plyne, že termočlánky mají pomalejší odezvu, a to zejména při náhlých změnách zatížení. Z tohoto důvodu je nemůžeme plně využít pro tento typ chránění. Proto se využívá závislá proudová ochrana. To znamená, že se vzrůstem statorového proudu se zkracuje i doba působení ochrany.

U velkých generátorů nicméně musíme respektovat, že se jejich proudové zatížení nemění libovolně, ale je především závislé na regulaci výkonu. Tento způsob ochrany tedy nemůžeme použít pro chránění velkých generátorů chlazených vodíkem, protože mají malou časovou konstantu. V dnešních generátorech o vysokém výkonu dochází k velké akumulaci energie, což při přetížení zapříčiní rychlejší oteplení stroje. Proto se pro jejich jistění proti přetížení používá nadproudová ochrana s nezávislou časovou charakteristikou. Nadproudové ochrany se nastavují takovým způsobem, aby umožnily

chod při jmenovitém výkonu S_N i při $0,95U_N$. Vztah pro výpočet proudového nastavení ochrany je uveden ve vztahu 2.

$$I_{2R} = \frac{k_b}{k_n k_I} I_n \quad (2)$$

Kde I_{2R} – sekundární hodnota rozběhového proudu

k_b – koeficient bezpečnosti (1,05)

k_n – přídržný poměr (0,94 až 0,98)

k_I – proudový převod PTP (I_{1N}/I_{2N})

I_N – jmenovitý statorový proud

Dojde-li při chodu k tomuto druhu poruchy, není potřeba generátor odpínat od sítě. K proudovému přetížení dochází při změně zátěže, nebo při poruše chlazení generátoru. Proto se tato porucha pouze signalizuje a je dán potřebný čas obsluhy, aby stihla zareagovat a provést protiopatření. Aby ochrana zbytečně nezapůsobila, je na ochraně nastaven interval vybavení 6 až 12 sekund.[1]

1.1.2 Napěťové přetížení generátoru

Napěťové přetížení může vzniknout tehdy, dojde-li k odlehčení činné i jalové zátěže. K odlehčení tedy dochází při zkratech. Dále k napěťovému přetížení může dojít při zvýšení otáček či při selhání buzení generátoru. Při tomto druhu poruchy může dojít s největší pravděpodobností i k následnému zemnímu spojení nebo zkratu. Aby se tak nestalo, chrání generátor napěťová ochrana. Tato ochrana nechrání proti napěťovým rázům pouze generátor, ale i blokový transformátor. Turbogenerátory se chrání za pomoci jednostupňové ochrany s časově nezávislou charakteristikou. Pro nastavení této ochrany bychom měli vypočítat rozběhové napětí U_{2R} podle níže uvedeného vztahu.

$$U_{2R} = \frac{k}{k_U} U_n \quad (3)$$

Kde k – konstanta dovoleného přepětí

k_U – napěťový převod PTN (U_{1N}/U_{2N})

U_n – jmenovité sdružené napětí generátoru

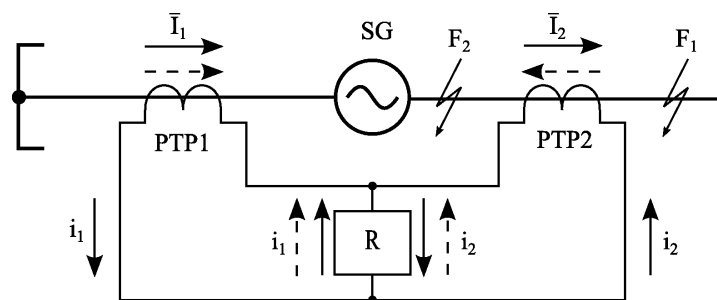
Konstanta k , která udává dovolené přetížení, by měla být uvedena výrobcem spolu s časovým nastavením. Generátor je dimenzován pouze na krátkodobé přetížení. To znamená, že by ochrana měla zapůsobit co nejdříve, aby nedošlo k poškození izolace generátoru. Napěťové přetížení by mělo regulovat buzení generátoru, nestane-li

se tak, musí zapůsobit napěťová ochrana. Pro turbogenerátory platí, že hodnota napětí činí 110% jmenovitého napětí.

Napěťové ochrany měří sdružené napětí za pomoci PTN. Tyto PTN by však měly být jiné než PTN pro regulátor buzení. Tímto zaručíme vzájemné zálohování obou zařízení. Napěťová ochrana tedy tvoří i zálohu pro regulátor otáček turbíny. Takto zajistíme i ochranu samotné turbíny prostřednictvím výstupu ochrany, která působí na rychlé odbuzení generátoru, rychlouzávěr turbíny a výkonový vypínač.[1]

1.1.3 Vnitřní zkraty v generátoru

Mezi vnitřní zkraty řadíme různé druhy mezifázových zkratů a dvoufázové zemní spojení statoru. Vnitřní zkrat generátoru je vůbec nejhorší možná porucha, a proto musí ochrana správně rozpoznat tento druh poruchy a během okamžiku zapůsobit. Pro chránění proti vnitřním zkratům se používá rozdílová (diferenciální) ochrana. Na obrázku 1. je znázorněno její jednofázové schéma zapojení.



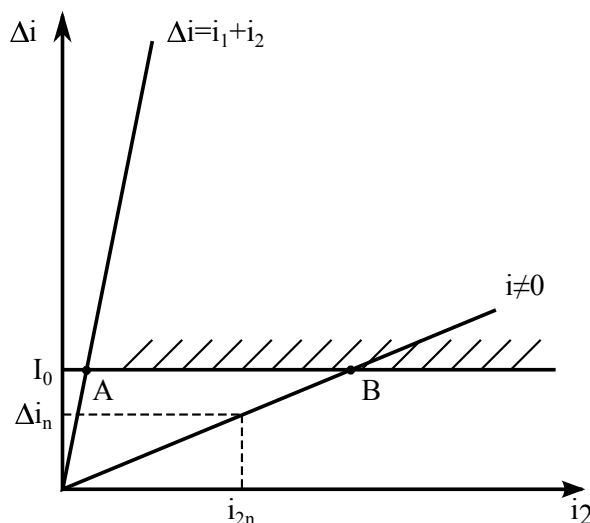
Obrázek 1: Jednofázové schéma principu činnosti rozdílové ochrany [1]

Už z názvu ochrany vyplývá, že tato ochrana porovnává dva druhy hodnot, v našem případě proudy. Proto je vybavená dvěma PTP, mezi kterými se nachází chráněný objekt. V příčné větvi se nachází nízko impedanční proudové relé, které je nastaveno na rozběhový proud I_0 . V bezporuchovém stavu přes toto relé neprotéká žádný proud, protože platí rovnost proudů i_1 a i_2 , platí tedy následující vztah.

$$\Delta i = i_1 - i_2 = 0 \quad (4)$$

Dojde-li ke vnitřní poruše (v obrázku značená F_2), začne přes relé protékat vyrovnávací proud, který bude roven:

$$\Delta i = i_1 + i_2 \quad (5)$$



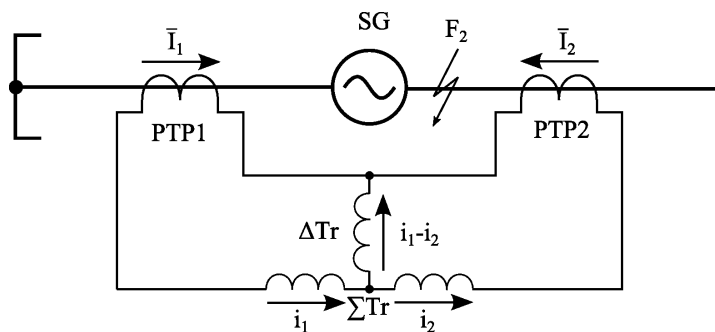
Obrázek 2: Průběhy proudu v základním uspořádání rozdílové ochrany [1]

V praxi se takto jednoduchá ochrana nedá použít. Rozdílová ochrana nesmí zapůsobit při blízkých vnějších zkratech. Nejneprůzračnější místo odpovídající předešlé podmínce je těsně za druhým PTP (v obrázku 1. je toto místo značeno F_1). Na obrázku 2. je tato situace názorně vidět. Nastane-li vnitřní porucha F_2 , dojde k prudkému zvýšení rozdílu proudu a ochrana v bodě A zareaguje. Tato situace se ovšem taktéž stane i v případě, bude-li se jednat o dříve zmíněný blízký zkrat F_1 , kdy ochrana zareaguje v bodě B.

Tento jev je nežádoucí a chceme-li eliminovat chybné zareagování ochrany, musíme zabezpečit následující tři podmínky:

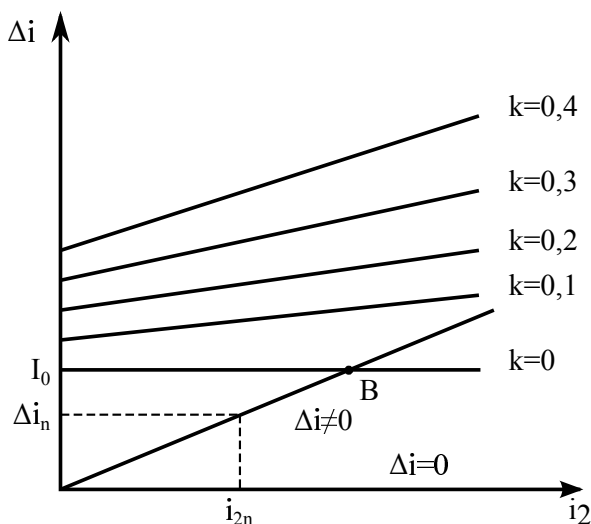
1. Proudů procházející sekundární stranou PTP musejí mít stejnou velikost a fázi.
2. Použité PTP musejí mít stejný nadproudový činitel.
3. Použité PTP se nesmí přesycovat jednosměrnou složkou při přechodových dějích.

První podmínce můžeme vyhovět bez úpravy ochrany z toho důvodu, že primární proudy jsou stejné. Bohužel u podmínek 2. a 3. se již bez úprav neobejdeme. Stejného nadproudového činitele dosáhneme tím, že PTP zatížíme stejnou zátěží a dále musíme použít speciální PTP pro rychlé ochrany. Schéma po těchto úpravách bude vypadat následovně:



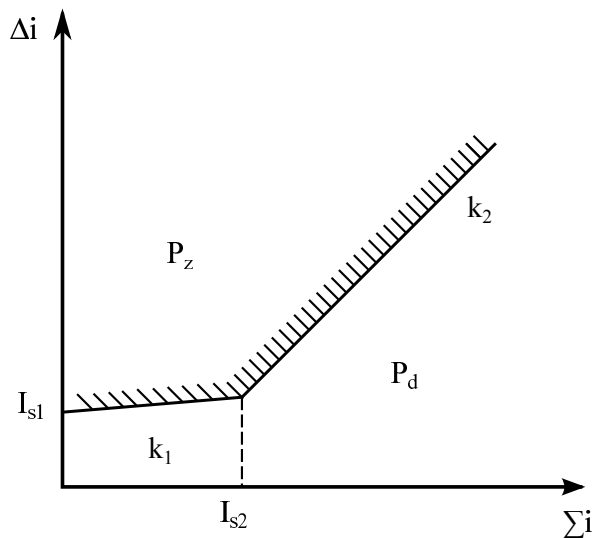
Obrázek 3: Jednofázové schéma principu činnosti rozdílové ochrany s kompenzací [1]

Výsledná charakteristika ochrany bude vypadat jako na obrázku 4., kdy za pomoci snižovacího faktoru k dosáhneme změny sklonu (směrnice) přímky a tím zabráníme zareagování ochrany v bodě B.



Obrázek 4: Průběhy proudu v základním uspořádání rozdílové ochrany [1]

V dnešní době digitálních ochran se výsledná vypínací charakteristika rozdílové ochrany ustálila na podobě, kterou můžeme vidět na obrázku 5. Je patrné, že jde o spojení dvou předchozích charakteristik. Charakteristika se modeluje za pomoci nastavení následujících parametrů: I_{s1} , I_{s2} , k_1 a k_2 . Při výpočtu nastavení ochrany je potřeba brát v potaz stavy při maximálním zatížení generátoru.[1]



Obrázek 5: Vypínací charakteristika digitální rozdílové ochrany [1]

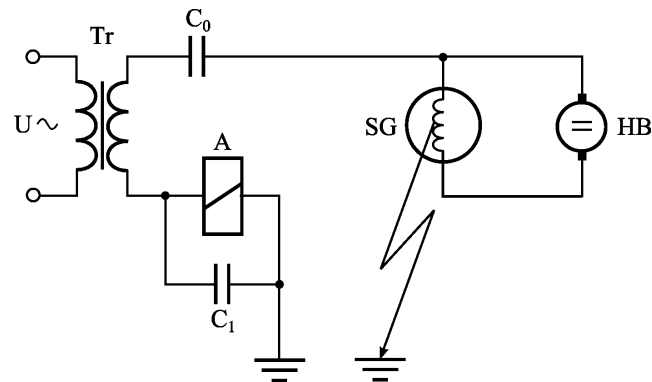
1.1.4 Zemní spojení ve statoru generátoru

K jednofázovému zemnímu spojení dochází ve statoru generátoru v případě, že dojde k porušení izolace mezi vodiči statorového vinutí a kostry stroje. Dojde-li k jednofázovému zemnímu spojení, objeví se na uzlu, který má obvykle vůči zemi nulové napětí, napětí, které bude závislé na místě vzniku tohoto zemního spojení. Samotné zemní spojení není až tak nebezpečné jako zkrat, nicméně i tak musí dojít k jeho včasnému identifikování a následnému zapůsobení ochrany.[1]

1.1.5 Zemní spojení v rotoru generátoru

Zemní spojení je častější u rotoru, a to z jednoho prostého důvodu. Rotor turbogenerátoru je totiž rychle otáčející se část stroje, což vede k faktu, že na rotor synchronního generátoru působí velké odstředivé síly. Tyto odstředivé síly mohou mít za následek poškození izolace jednotlivých vodičů v drážkách rotoru, a tím způsobit zemní spojení. Při chránění turbogenerátorů musíme brát v potaz, zdali se jedná o jedno či dvojitě zemní spojení. Jedno zemní spojení totiž není pro stroj nebezpečné, a proto se pouze signalizuje. Dvojitě zemní spojení představuje zkrat v budícím vinutí rotoru. Při tomto druhu poruchy dojde k porušení magnetické symetrie stroje, což by vedlo k působení rozdílných sil na rotor a potenciální havárii generátoru. Zjednodušené schéma způsobu chránění proti tomuto typu poruchy je uvedeno na obrázku 6.

Z obrázku je patrné, že transformátor Tr se stará o zdroj střídavého napětí, které je klíčové pro správnou funkci ochrany. Dále jsou ve schématu zařazeny dva kondenzátory C_1 , C_0 a střídavé proudové relé A . K oddělení pomocného střídavého

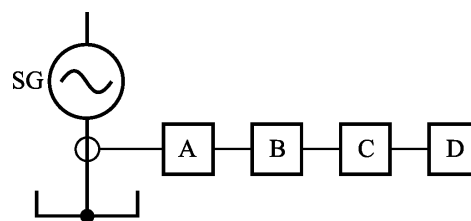


Obrázek 6: Zemní spojení v rotoru generátoru [1]

obvodu od stejnosměrného obvodu buzení je zde použit kondenzátor C_0 . Paralelně k proudovému relé je připojen kondenzátor C_1 , který zajišťuje necitlivost ochrany na vyšší harmonické vznikající v rotorovém obvodu. Jakmile vznikne zemní spojení, uzavře se přes zem obvod pomocného střídavého proudu a dojde k signalizaci zemního spojení.[1]

1.1.6 Nesymetrické proudové zatížení generátoru

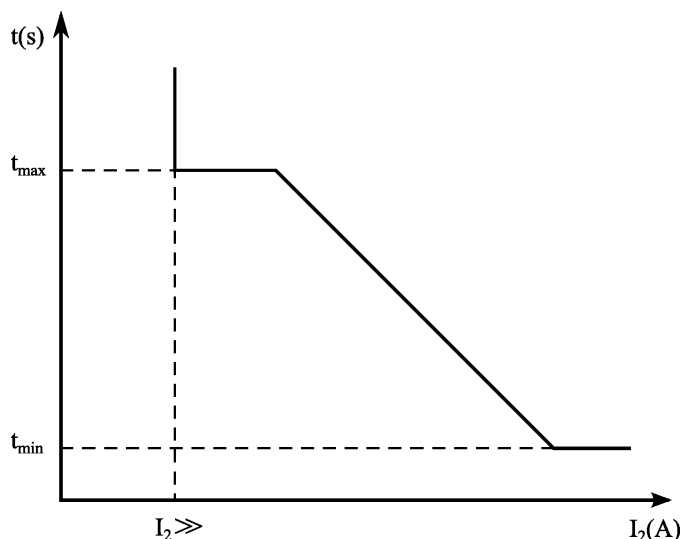
Za normálního stavu jsou fázory proudu a napětí symetrické. Jakmile zatížíme generátor takovým způsobem, že jednotlivými fázemi statoru budou protékat různé proudy, bude vlivem rozdílných proudů vznikat zpětná složka statorového proudu a tím i magnetického pole. Tato složka způsobí v tlumiči a masivních částech rotoru vznik vířivých proudů a ty způsobí neúnosné zvýšení ztrát vířivými proudy a tím i teploty. Jedna z ochran proti nesymetrickému zatížení využívá měření velikosti a doby trvání výše zmíněné zpětné složky statorového proudu. Blokové schéma ochrany je znázorněno na obrázku 7.



Obrázek 7: Blokové schéma ochrany pro nesymetrické proudové zatížení [1]

- Kde A – filtr zpětné složky proudu statoru
 B – filtr proudu s frekvencí 50Hz
 C – měřící část proudu
 D – časové a pomocné relé

Blok B má za úkol zajištění přesnosti měření tím, že odfiltrává vyšší harmonické. Samotné měření je realizováno díky rozběhovým nadproudovým relé, které svým výstupem působí na časové články. Vhodným nastavením proudů a časů se přiblížíme oteplovací charakteristice stroje. Pro digitální ochrany vypadá charakteristika ochrany následovně.[1]



Obrázek 8: Vypínací charakteristika digitální ochrany pro nesymetrické zatížení [1]

1.1.7 Ztráta buzení

Ze vzorce je možné vypočítat, že ztráta buzení, pokles napětí sítě či nárůst reaktance způsobí pokles amplitudy přenášeného výkonu. Stroj tedy není schopen převést elektrický výkon odpovídající mechanickému výkonu dodávanému turbínou. Tato událost může mít za následek ztrátu stability a tím pádem přechod do asynchronního chodu. Na obrázku je znázorněna stabilita synchronního generátoru, přičemž je vidět, že jakmile zátěžný úhel překročí hodnotu $\pi/2$ rad, stroj přechází do asynchronního režimu.

$$P_E = \frac{EU_S}{X} \sin \delta \quad (6)$$

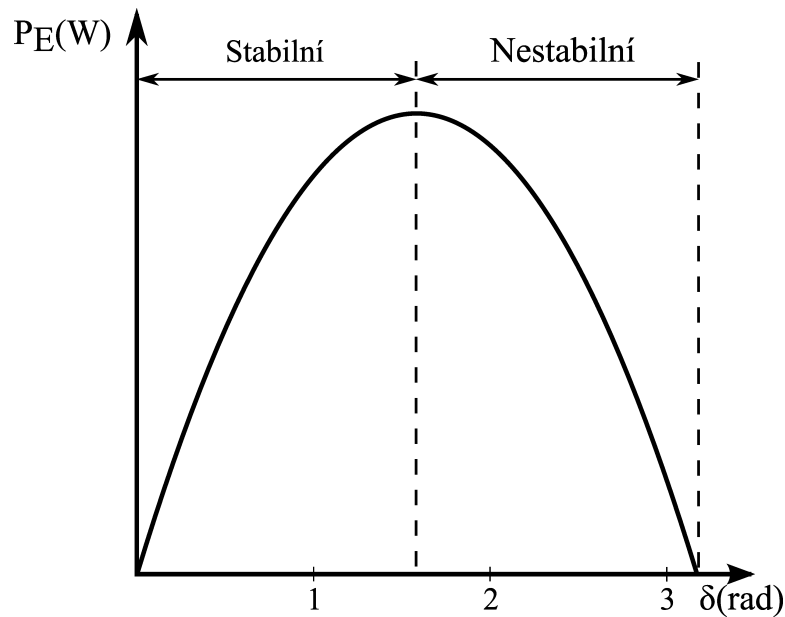
Kde P_E – přenášený výkon

E – elektromotorické napětí

U_S – napětí soustavy

X – celková reaktance

δ – zátěžný úhel



Obrázek 9: Statická stabilita synchronního generátoru [2]

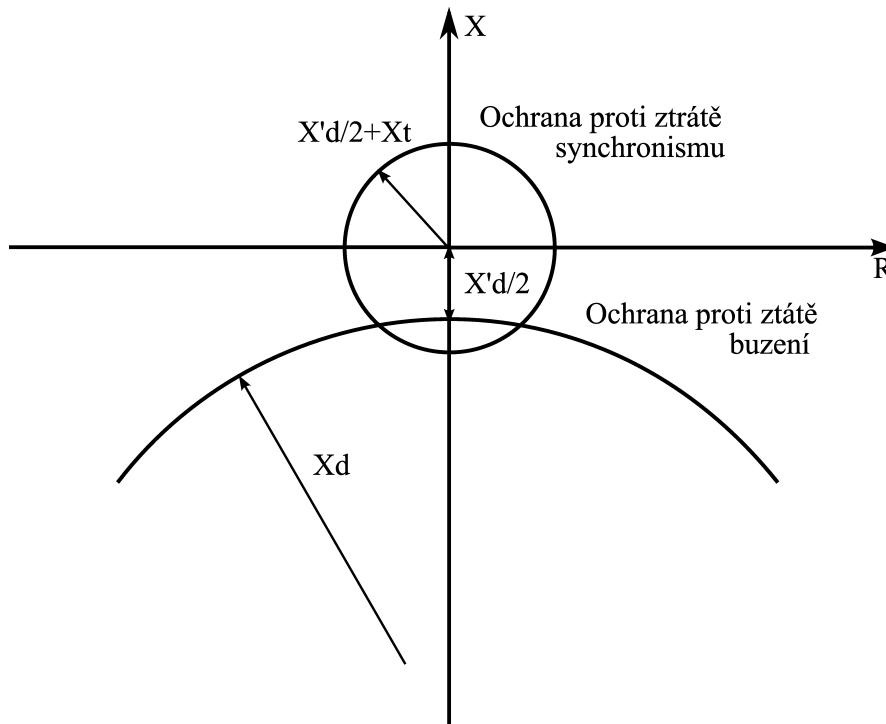
Synchronní generátor může tedy přejít do asynchronního chodu ze tří následujících důvodů:

- Ztráta buzení (skokový pokles vnitřního elektromotorického napětí stroje E)
- Vlivem poruchy přenosové sítě (např. výpadek vedení způsobí nárůst reaktance X)
- Zvyšování přenášených výkonů při nezměněných parametrech sítě (překročení zátěžného úhlu δ nad hodnotu $\pi/2$)

Při ztrátě buzení nezvládá budící vinutí synchronního generátoru dodávat dostatek jalového výkonu potřebného k magnetizaci stroje a ten si proto potřebný jalový výkon odebírá ze sítě. Důsledkem toho je poklesnutí dodávky jalové energie do sítě. Odběr magnetizačního proudu ze sítě taktéž způsobí zvýšení proudu procházejícího statorovým vinutím až nad hodnotu proudu jmenovitého. Dle vzorce 6. dochází k poklesu činného výkonu, což způsobuje rázy, které namáhají základy soustrojí a snižují tak jeho životnost. Dochází taktéž ke zvýšení otáček stroje vlivem turbíny, která dodává stále stejný výkon.

Jeden ze způsobů ochrany proti přechodu generátoru do asynchronního chodu je tzv. otáčková regulace. Ochrana zapůsobí, jestliže otáčky vybočí ze stanovených mezí, avšak tento způsob ochrany je nedostačující k razantnímu snížení výkonu turbíny. Z tohoto důvodu jsou v dnešní době turbíny vybaveny akceleračním relé, které při nárůstu zrychlení nad nastavenou mez vydá signál k rychlému zavírání ventilů turbíny. Tímto se docílí razantního snížení výkonu turbíny a umožní se tak resynchronizace generátoru.

Ochrany proti ztrátě synchronizace a ztrátě buzení mají v impedanční rovině podobu kružnic viz Obrázek 10. Kružnice ochrany proti ztrátě synchronismu má poloměr o velikosti reaktance blokového transformátoru a poloviny přechodové reaktance. Ochrana proti ztrátě buzení je modelována kružnicí, jejíž střed je posunut v záporném smyslu osy X o hodnotu synchronní a poloviny přechodové reaktance. Samotná kružnice má poloměr odpovídající synchronní reaktanci.[2]



Obrázek 10: Znáornění ochrany proti ztrátě buzení v impedanční rovině [2]

1.1.8 Samobuzení

Problematika samobuzení vystává v případě, jestliže generátor pracuje do sítě s velkým kapacitním charakterem, jako je například dlouhé vedení provozované naprázdno. V tomto případě dochází ke vzrůstu svorkového napětí na generátoru až na hodnotu, která je určena následujícím vztahem:

$$U_G = E \frac{X_C}{X_C - X_L} \quad (7)$$

Kde E – elektromotorické napětí

X_C – výsledná příčná složka reaktance

X_L – výsledná podélná složka reaktance

K samobuzení generátoru dochází za podmínky rovnosti příčné a podélné složky reaktance vedení. Teoreticky by napětí na generátoru mohlo růst až do nekonečna, ale prakticky je jeho maximální hodnota omezena sycením magnetických obvodů. Jelikož se v současné době zkracují délky jednotlivých vedení a na regulaci napětí při zapínání vedení naprázdno se používají kompenzační tlumivky, odpadá potřeba používat speciální ochrany a stačí ochrana proti přepětí.[1]

1.1.9 Ložiskové proudy

Ložiskové proudy negativně ovlivňují zejména samotná ložiska. Prochází-li ložisky elektrický proud, může jim způsobit velké škody (mikrokrátery na oběžné dráze, roztavení kovového povrchu a poškození maziva). Tyto následky se začínají projevat větší hlučností ložisek, vibracemi, znehodnocením maziva, zahříváním ložisek a následným zkrácením celkové životnosti jednotlivých ložisek. Vlivem nesymetrie magnetického toku v okolí hřídele se indukuje do samotné hřídele napětí, které může dosáhnout až několika voltů. Toto napětí způsobí průchod elektrického proudu právě přes ložiska generátoru. V dnešní době se používají ložiska s izolovanou pávní. Ložisková ochrana je zapojena mezi hřídel a zem a má za úkol kontrolovat neporušení izolace ložisek.[1]

1.2 Ochrana velkých generátorů

Velké výrobní bloky, jakým je například JE Temelín, mají pro elektrizační soustavu důležitý význam. Jsou provozovány v takzvaném základním pásu výroby elektrické energie, nesou základní zátěž a jsou tedy garantem stability energetické soustavy.

Velké a střední elektrárny jsou provozovány v takzvaném blokovém uspořádání. To znamená, že u tohoto typu uspořádání je generátor připojen do vyšší napěťové hladiny (elektrizační soustavy) prostřednictvím blokového transformátoru, který taktéž zajišťuje galvanické oddělení systémů. [3]

Celkovou koncepci chránění elektrárenských bloků můžeme rozdělit do tří bodů:

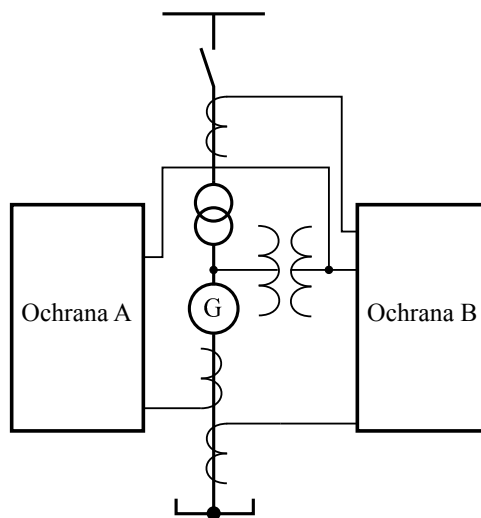
- Koncepce redundance
- Vypínací matice
- Rozsah ochranných funkcí

1.2.1 Koncepte redundance

Pojem redundance, tedy nadbytečnost, souvisí se systémem zálohování ochran a ochranných funkcí. Většinou se v tomto oboru snažíme přizpůsobit pravidlu $n-1$, což znamená, že výpadek jednoho komponentu nebude mít za následek výpadek celku. Například výpadek jedné ochrany nebude mít za následek výpadek celého elektrárenského bloku ze soustavy. Je však zřejmé, že tohoto pravidla není možné využít vždy. Zvláště u menších a méně významných zdrojů bychom měli najít rovnováhu mezi redundancí a náklady. Rozlišujeme tedy dva způsoby redundance:

- **Částečná redundance**

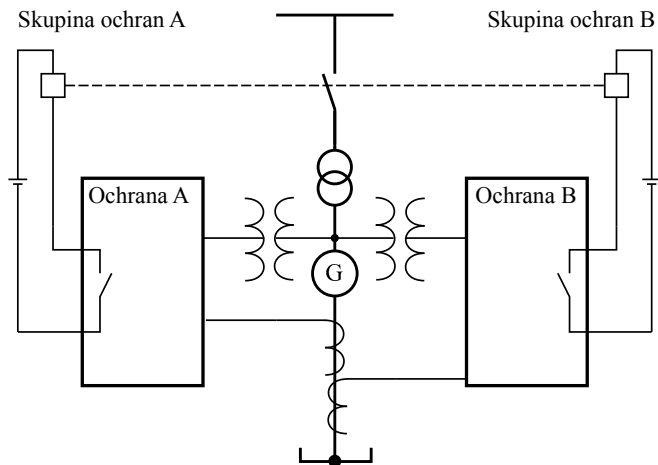
Tento způsob zaručuje nasazení alespoň dvou ochran, přičemž jsou ochrany a jejich funkce zvoleny tak, aby výpadek jednoho přístroje nezpůsobil výpadek celého stroje. Chod stroje bude tedy i na dále možný, ale bude omezen některými parametry. Na následujícím obrázku 11. je znázorněn základní příklad zapojení ochran v částečné redundanci. Z obrázku je patrné, že se ochrany například připojují na tytéž měřící transformátory.



Obrázek 11: Příklad částečné redundance [3]

- **Úplná redundance**

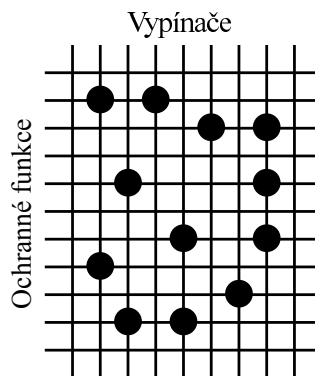
Při tomto pojetí redundance vycházíme ze zdvojení systému nebo alespoň jeho klíčových komponentů. Prvního rozdílu si můžeme všimnout mezi obrázky 11. a 12. Je zde vidět zdvojení měřících transformátorů (popřípadě jader transformátorů). Dalším rozdílem je využití oddělené stejnosměrné cesty k vypínači se dvěma vypínacími cívkami. Na obrázku není vidět to, že v ochranách mohou být použity zdvojené ochranné funkce s různými principy měření. Typickými příklady jsou ochranné funkce pro zemní spojení a zkratové ochrany.[3]



Obrázek 12: Příklad úplné redundance [3]

1.2.2 Vypínací matice

Vypínací matice znázorňuje vypínací funkce ochrany a uplatňuje se pro lepší představu o vypínacím rozsahu dané funkce. Rozdílné ochranné funkce mohou ovládat různé akční členy (vypínací prvky). Například jedna ochranná funkce může působit na několik akčních členů. Pro lepší představu je na obrázku 13. znázorněn ukázkový příklad vypínací matice.[3]



Obrázek 13: Vypínací matice [3]

Horizontální linky označují jednotlivé ochranné funkce jako jsou například: nadproudová ochrana, nesymetrie, rozdílová ochrana a jiné. Vertikální linky představují vypínače. Pro příklad si můžeme namátkou vybrat: generátorový vypínač, odbzovač generátoru, odbzovač budícího alternátoru nebo vypínač 400 kV linky, která se používá k vyvedení výkonu z elektrárny.

1.2.3 Rozsah ochranných funkcí

K tomu, abychom bezpečně chránili daný stroj, je potřeba velké množství ochranných funkcí. Jejich rozsah a kombinace je ovlivněn několika následujícími faktory:

- Velikost stroje
- Způsob provozu
- Uspořádání rozvodny
- Požadavky na zálohování

V následující tabulce 1. jsou přehledně uvedeny potřebné doporučené ochranné funkce v závislosti na velikosti jmenovitého výkonu turbogenerátoru.

Ochranná funkce	Jmenovitý výkon generátoru		
	5-20 MW	50-200 MW	>200 MW
Zemní ochrana statoru 90%	•	•	•
Zemní ochrana statoru 100%		•	•
Rozdílová ochrana	•	•	•
Nadproudová ochrana	•		
Impedanční ochrana		•	•
Zemní ochrana rotoru	•	•	•
Ochrana proti nesymetrii	•	•	•
Ochrana proti podbuzení	•	•	•
Ochrana proti vnější poruše			•
Ochrana proti přetížení statoru	•	•	•
Ochrana proti přetížení rotoru			•
Přepětová ochrana	•	•	•
Frekvenční ochrana $f >$	•	•	•
Frekvenční ochrana $f <$	•	•	•
Zpětně wattová ochrana	•	•	•
Ochrana proti přebuzení		•	•

Tabulka 1: Doporučené ochranné funkce dle jmenovitého výkonu generátoru [3]

Vzmemme-li v potaz redundanci, můžeme vytvořit dvě skupiny ochran, v nichž budou zastoupeny výše zmíněné ochranné funkce. Výsledné uspořádání ochranných funkcí do skupin může být následovné.

Skupina ochran A	Skupina ochran B
Zemní spojení statoru 100%	Zemní spojení statoru 90%
Rozdílová ochrana	Rozdílová ochrana (jako bloková ochrana)
Impedanční	Impedanční
Zemní spojení rotoru	Nesymetrická zátěž
Nesymetrická zátěž	Podbuzení
Podbuzení	Vnější porucha
Přepětí	Přetížení statoru
Frekvence $><$	Přepětí
Zpětný výkon	Frekvence $><$
Přebuzení	Zpětný výkon
	Přebuzení

Tabulka 2: Volba ochranných funkcí pro redundantní koncepci [3]

1.3 Současná ochrana v JE Temelín

V současné době je na obou blocích JE Temelín použita ochrana výrobce ABB s katalogovým označením REG 216. Jedná se o generátorovou ochranu chránící taktéž blokový transformátor a vedení. Parametry generátoru jsou uvedeny v tabulce 4. Tento soubor ochran byl použit namísto zastarávajícího a již nedostačujícího souboru GTX. Tato ochrana byla vybrána, protože byla již dříve úspěšně použita na ochranu generátorových bloků v různých typech elektráren s rozličným výkonem. Díky takto široké mase koncových zákazníků byla na základě jejich požadavků zlepšována až na dnešní úroveň.

Samotná ochrana je navržena na chránění rozličných výkonů. Její modulární hardware a design softwaru umožňuje, jak je to v dnešní době na poli ochran běžné, vysokou flexibilitu instalace a samotných možností ochrany. Této flexibility je dosaženo za pomoci kombinace softwarových knihoven a hardwarových modulů. To zákazníkovi umožňuje sestavit si ochranu přímo na míru danému generátoru, dosáhnout cenově přijatelné hranice a v neposlední řadě taktéž jistotu, že v případě provádění optimalizace provozu či retorfitu nebude potřeba přílišného zasahování do ochrany samotné.

Hlavní výhody REG216:

1. Spolehlivost

Porucha jedné ochrany by neměla mít za následek odstavení generátoru od sítě.

2. **Rozsáhlá knihovna softwarových funkcí**

Systém REG 216 zahrnuje rozsáhlou knihovnu funkcí, s jejichž pomocí můžeme chránit generátor před jakýmkoliv druhu poruch. Vybranou funkci můžeme použít jednou nebo opakovaně a zároveň každou funkci můžeme propojit s externími vstupy.

3. **Nashromážděné zkušenosti**

Prostřednictvím nashromážděných záznamů poruch z jednotlivých ochran.

4. **Redundance**

Zálohování ochrany druhou ochranou, aby v případě poruchy jedné nebyl odstaven generátor. Tzn. dvě na sobě nezávislé ochranné funkce ve dvou hardwarových skupinách.

5. **Modulární HW a SW**

Možnosti přikoupení bloků HW a SW, které rozšíří ochranu o příslušné funkce.

6. **Vlastní sledování funkcí**

Funkce zodpovědná za monitorování a zaznamenávání parametrů nejen během poruchy. Informace ze systémové diagnostiky je k dispozici prostřednictvím sériového rozhraní.

7. **Uživatelsky přívětivé HMI**

Human Machine Interface zabezpečuje pohodlné a přehledné nastavování ochranných funkcí prostřednictvím přenosného PC.

8. **Komunikace s ochranou**

Komunikace s ochranou může být provedena lokálně nebo vzdáleně. Vzdálené připojení PC k ochraně za účelem diagnostiky či testování je realizováno prostřednictvím modemu.

Celkově se ochrana REG 216 může považovat za standard i v dnešní době, a to zejména díky její vysoké flexibilitě a funkčnosti. Softwarový balíček obsahuje dříve zmíněnou knihovnu ochranných funkcí, ale také měřících a monitorovacích funkcí. Ochranné funkce jsou vypsané v tabulce 3 s příslušnými kódy dle ANSI/IEE standardu C37.2. Mezi monitorovací funkce můžeme namátkou zařadit:

- Záznam událostí
- Záznam poruch
- Měřící funkce proudu, napětí a frekvence
- Synchroncheck
- Flip-Flop, časovač, integrátor

Human Machine Interface zabezpečuje pohodlnou obsluhu, testování a měření veličin. Programování funkcí může být uskutečněno jak v on-line, tak v off-line režimu. Aktivace jednotlivých ochranných funkcí, ať už generátorových či transformátorových, je prováděna z knihovny pomocí technologie „drag and drop“. V rozhraní je také možné zobrazit charakteristiky ochrany s adekvátními nastavenými parametry. V těchto charakteristikách lze zobrazit aktuálně měřené hodnoty veličin.[4]

označení	Ochranná funkce
51	Nadproudová ochrana s časovým zpožděním
49	Tepelná ochrana
59	Nadpěťová ochrana
27	Podpěťová ochrana
87G	Rozdílová ochrana (generátor)
87T	Rozdílová ochrana (transformátor)
81	Frekvenční ochrana
32	Zpětně wattová ochrana
87N	Rozdílová ochrana (nulového bodu)
59N	Nadpěťová ochrana (nulového bodu)
64S	Zemní ochrana
64R	Zemní ochrana
49S	Tepelná ochrana (synchronizace)
49R	Tepelná ochrana (tlumivky)
46	Ochrana při proudové nesymetrii
24	Napětí/frekvence
21	Distanční ochrana
40	Ochrana při ztrátě buzení, podbuzení
78/21	
60	Balanční napěťová nebo proudová ochrana

Tabulka 3: Kódové značení ochranných funkcí dle ANSI/IEE [4]

2 Provozní a poruchové stavy turbogenerátoru JE Temelín

Turbogenerátor JE Temelín TG 1000 MW je v elektrárně situován ve strojovně HVB na podlaží +15m. TG 1000 MW je proveden jako trojfázový synchronní stroj o nominálním zdánlivém výkonu 1111 MVA, který je chlazený kombinací chladičů demivoda - vodík. Jmenovité provozní napětí je rovno 24 kV, jmenovité otáčky pro dvojpólový stroj činní 3000 ot/min a účinník dosahuje hodnoty 0,9. Další parametry TG 1000 MW jsou uvedeny v tabulce 4.

Činný výkon	1000 MW
Zdánlivý výkon	1111 MVA
Účinník	0,9
Jmenovité napětí	24 kV
Jmenovité otáčky	3000 ot/min
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitý proud statoru	26,73 kA
Jmenovité budící napětí	505 Vss
Jmenovitý budící proud	7120 A

Tabulka 4: Okamžité měřené parametry TG 1000 MW [6]

Stator

Stator turbogenerátoru je složen ze dvou vzájemně odpružených koster (vnitřní a vnější). Vnitřní kostra je tvořena z magneticky orientovaných statorových plechů, ze kterých je tvořen magnetický obvod stroje. Statorové vinutí je uloženo v drážkách na vnitřní straně magnetického obvodu, na vnější straně je magnetický obvod stažen ocelovými deskami. Čela statorového vinutí jsou spolu s magnetickým obvodem chlazený vodíkem. Třífázové statorové vinutí je tvořeno třemi cívkami (každá cívka je tvořena dvěma paralelními větvemi) vzájemně pootočenými v prostoru o 120°. Duté měděné statorové vinutí má šest konců, z nichž jsou tři vyvedeny a spojeny do uzlu takzvanou nulovou spojkou a zbylé tři konce (fázové vývody) jsou vyvedeny skrze plynotěsné průchodky, které jsou stejně jako nulová spojka a statorové vinutí chlazený demivodou.[5]

Rotor

Rotor je tvořen jednodílným výkovkem z chrom-nikl-molybden-vanadiové oceli, v níž jsou klasicky vyfrézovány drážky pro rotorové vinutí. Rotorové vinutí je tvořeno měděnými vodiči obdélníkového průřezu s eliptickou dutinou, která zabezpečuje jeho chlazení díky přetlakovanému vodíku. Vodiče jsou do drážek vlisovány a proti pohybu zabezpečeny bronzovými klíny. Budící proud je do rotoru přiveden prostřednictvím sběracího ústrojí, které je tvořeno čtyřmi kroužky a kartáči.[5]

Budící souprava

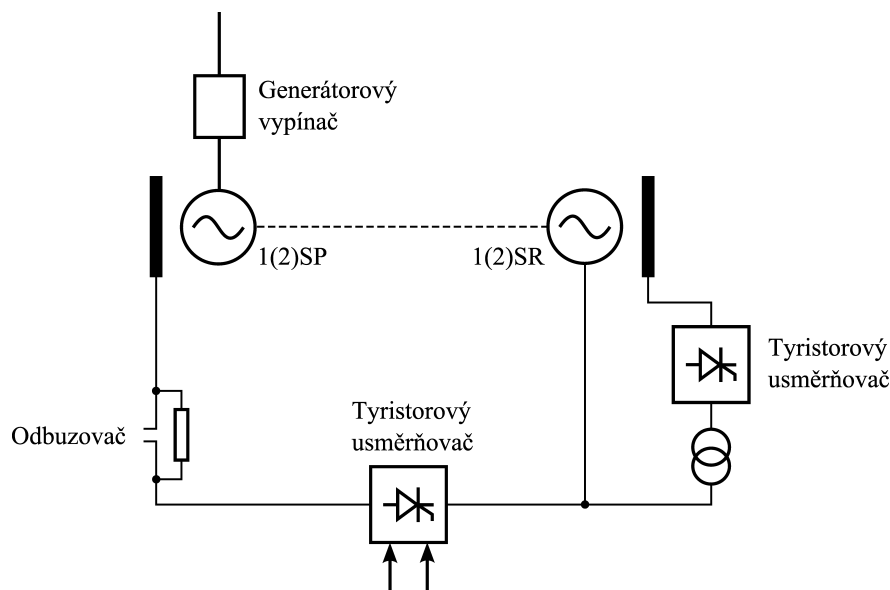
Budící soustava zajišťuje nezávislé buzení rotoru TG 1000 MW stejnosměrným proudem a jeho prostřednictvím dokáže ovlivňovat svorkové napětí na TG, resp. dodávaný jalový výkon. Budič nSR je realizován třífázovým synchronním generátorem chlazeným vzduchem, který je na stejné hřídeli jako turbosoustrojí. Buzení budiče je samonapájeno ze statoru. Vývody budiče jsou připojeny na tyristorové usměrňovače, na jejichž výstupu dostáváme stejnosměrné napětí, které je připojeno na sběrací ústrojí TG. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry použitého budiče a na obrázku 14. je znázorněno zjednodušené zapojení buzení turbogenerátoru nSP a budiče nSR.[6]

Jmenovitý výkon	7700 kVA
Jmenovité sdružené napětí	690 V
Jmenovitý proud statoru	6440 A

Tabulka 5: Parametry budiče nSR [6]

Dále je k provozu generátoru zapotřebí několika pomocných hospodářství.

- Plynové hospodářství
Stlačený vodík pro chlazení TG, oxid uhličitý a stlačený vzduch potřebný pro napouštění a vypouštění vodíku.
- Hospodářství těsnícího oleje
Za pomoci oleje se zaručuje těsnost TG.
- Vodní hospodářství
Demivoda je používána pro chlazení statorového vinutí.



Obrázek 14: Schéma buzení TG 1000 MW [6]

2.1 Provozní režimy TG

Provozním režimem rozumíme takové stavy TG, do kterých se může stroj během svého normálního provozu dostat a být v nich částečně provozován. Jsou to tyto následující stavy:

- **Chod naprázdno**

Při tomto režimu, kdy generátor pracuje tzv. naprázdno, můžeme snadno regulovat velikost a frekvenci satorového napětí. Prostřednictvím budícího proudu rotoru je totiž možné ovlivňovat velikost svorkového napětí satoru a řízením množství páry přicházející na lopatky turbíny i otáčky turbosoustrojí, potažmo frekvenci satorového napětí. Z toho vyplývá, že tento stav je využíván před přifázováním TG do sítě a k provádění různých napěťových zkoušek. Chod naprázdno je vzhledem k provozu parní turbíny omezen na pouhé minuty před samotným přifázováním do sítě. Napěťové zkoušky byly prováděny pouze jednou, a to před prvním spuštěním elektrárny.

- **Chod nakrátko**

Vzhledem k výkonu TG se tento stav během provozu generátoru nevyskytuje. Před dvěma lety se sice prováděly zkoušky se zkratem v Kočíně, ale pouze pro několik málo úrovní nabuzení stroje.

- **Fázování**

Stav stroje, při kterém se kontrolují následující fázovací podmínky: shodný sled fází, shodné satorové napětí TG s napětím v síti, shodná frekvence napětí TG se sítí a nulový fázový posuv mezi fázory napětí TG a sítě. Splněním

těchto podmínek zaručíme, že nedojde k proudovému rázu, který by mohl způsobit poškození TG a jeho následnou opravu. Pro fázování se prioritně používá automatický fázovač SYNCHROTECT 4, manuální fázování se nepoužívá, manuálně se kontroluje pouze sled fází.

- **Chod do sítě se zatížením**

Je to chod stroje, který nastává po přifázování do sítě, spíše je označován jako nominální provozní režim. Jelikož je TG připojen do rozsáhlé elektrizační soustavy (dále jen ES), jsou mu vnuceny hodnoty velikosti svorkového napětí a frekvence. Přívodem množství páry se tedy reguluje velikost činného výkonu a změnou buzení zase velikost jalového výkonu. Dále se budeme věnovat nominálnímu provoznímu režimu v kapitole 2.1.1 Nominální provozní režim TG.

- **Chod v samostatné síti**

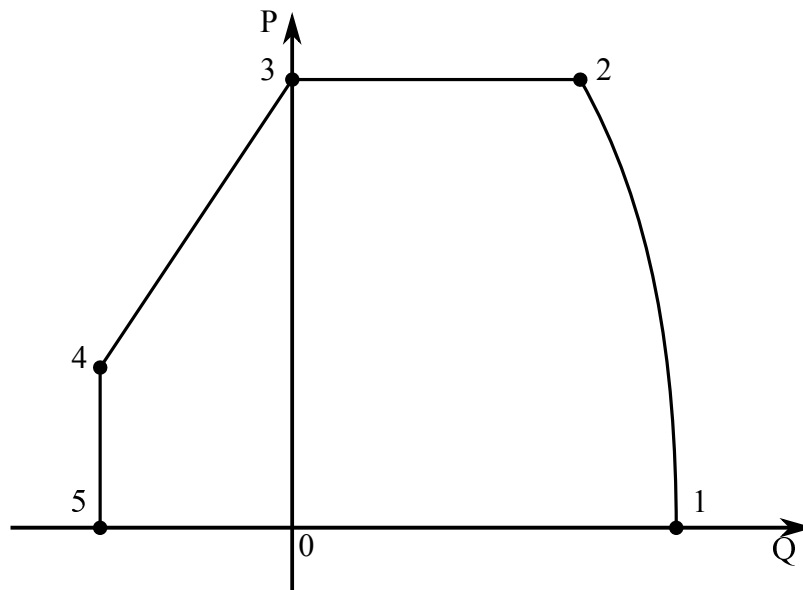
Jinak označovaný jako chod na vlastní spotřebu by nastal v případě, že by byl od sítě 400kV a nebyla by tedy možnost vyvádět vyrobený výkon do ES. V takovém případě by TG zreguloval výkon na velikost odpovídající zátěži VS. Schopnost zregulovat výkon na VS se zkoušela jen při najíždění a od té doby v tomto stavu elektrárna neběžela.[7]

2.1.1 Nominální provozní režim TG

Pracovní oblast stroje je označena právě provozním P-Q diagramem. Tyto hranice jsou závislé na několika následujících parametrech.

- Statická stabilita alternátoru
- Maximální výkon turbíny
- Oteplení statorového vinutí
- Oteplení magnetického jha statoru
- Oteplení rotorového budícího vinutí
- Oteplení samotného rotoru

Maximální výkon turbíny ovlivňuje maximální hodnotu činného výkonu generátoru a tedy i horní část P-Q diagramu. S jalovým výkonem je o něco složitější, protože je jeho velikost ovlivňována aktuálními požadavky soustavy. Na obrázku 15. je uveden obecný příklad P-Q diagramu s vyznačenými hranicemi provozního stavu, které taktéž udávají zóny pro nastavení ochran.[8]



Obrázek 15: Obecný PQ diagram turbogenerátoru [8]

Kde body 1-2 určují maximální oteplení rotorového budícího vinutí

2-3 určují maximální výkon turbíny

3-4 určují maximální oteplení čelních konstrukcí stroje

4-5 určují statickou stabilitou stroje

Alternátor můžeme provozovat ve dvou režimech:

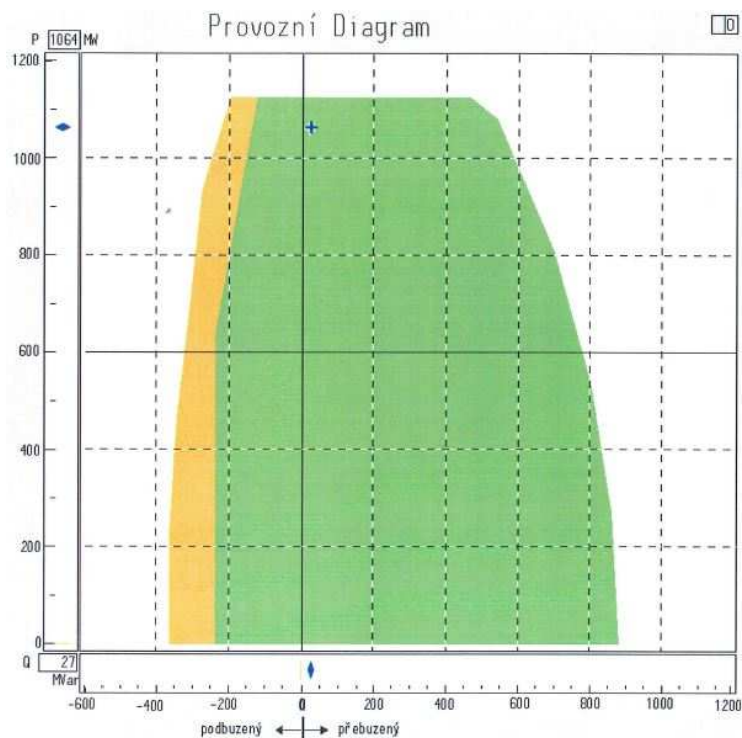
- **Přebuzeném**

Alternátor tedy pracuje v prvním kvadrantu diagramu, tzn. vpravo od svislé osy činného výkonu. V tomto stavu generátor dodává do sítě jak činný, tak i jalový výkon. Maximální činný výkon je omezen jmenovitým zdánlivým výkonem generátoru, kdežto velikost jalového výkonu je řízená velikostí budícího proudu. Z obrázku 15. je vidět, že omezujícím faktorem v horizontální rovině je oteplení rotorového vinutí, respektive velikost budícího proudu, a ve vertikální rovině se uplatní omezení velikosti satorového proudu, potažmo výkonu.

- **Podbuzeném**

Tento stav je používán, převážně dojde-li k odlehčení soustavy, tzn. v nočních hodinách či o víkendech. Stroj se pohybuje ve druhém kvadrantu charakteristiky, tedy vlevo od svislé osy činného výkonu, kde dodává do sítě pouze činnou složku výkonu. Vlivem změny rozptylového toku, která je zapříčiněna jiným prostorovým rozložením polí satoru, dochází k většímu zahřívání alternátoru. Dalším faktorem ovlivňujícím tvar charakteristiky v její levé části je statická stabilita stroje. [8]

Tyto teoretické předpoklady lze samozřejmě převést i na alternátor použitý v JE Temelín. Na následujícím obrázku je tedy uveden provozní P-Q diagram turbogenerátoru TG 1000 MW. Jedná se o screen z tzv. Aktualizovaného provozního diagramu (dále APD). APD je používán personálem blokové dozorny pro zjištění údajů o stavu generátoru i sítě. Meze provozního P-Q diagramu jsou každých 10 sekund aktualizovány a vypsaný na obrazovku.



Obrázek 16: Screen z pracovní obrazovky v programu APD

V screenu APD je znázorněn konkrétní provozní stav generátoru, můžeme si tedy pro představu zmínit aktuálně měřené hodnoty, které vidí obsluha blokové dozorny:

Činný výkon	1064 MW
Jalový výkon	27 MVA
Napětí statoru	23,3 kV
Proud statoru	26,4 kA
Účinník	1
Napětí v rozvodně Kočín	412 kV
Budící napětí	341 V
Budící proud	5475 A
Tlak vodíku	494 kPa
Teplota vody	25 °C

Tabulka 6: Hodnoty v APD

Všimněme si, že hodnota činného výkonu odpovídá hodnotě 1064 MW, což je způsobeno právě probíhajícím retrofitem, při kterém dochází k postupnému zvyšování výkonu z hodnoty 1000 MW na hodnotu 1125 MW. Nyní se elektrárna nachází v období kdy výkon jednoho bloku činní 1065 MW.

Z výše zmíněných faktorů ovlivňujících meze provozního diagramu je patrné, že hranice P-Q diagramu jsou závislé na chlazení stroje (v našem případě na tlaku vodíku) a velikosti svorkového napětí. Dojde-li k poklesu tlaku vodíku či poklesu svorkového napětí, zmenší se i hranice P-Q diagramu.

2.2 Poruchové stavy TG

V první řadě bychom měli uvést, jaké jednotlivé stupně poruch rozeznáváme, a to v závislosti na jejich závažnosti a nutnosti odstavit generátor a provést jeho opravu.

- **Závady**

Za závadu označujeme událost, která má za následek znehodnocení parametrů, jaké jsou obvyklé v bezporuchovém stavu. Vznik závady nezpůsobí nutnost odstavit generátor okamžitě. Můžeme ho tedy i nadále provozovat, ale musíme brát v potaz určité omezení dané konkrétní závadou.

- **Poruchy**

Nastane-li na TG porucha, zapříčiní jeho okamžité odstavení. Poškození TG je opět dané poruchou.

- **Havárie**

Havárie je nejzávažnější, jelikož je po ní TG na delší dobu vyřazen z provozu. Vzniknou tedy poškození, která si vyžádají delší dobu opravy.

Výše zmíněné poruchové a mimořádné stavy stroje můžeme rozdělit do dvou následujících bodů s ohledem na to, v jaké části stroje porucha vznikne. Může tedy vzniknout v:

1. Elektrické části stroje

Pod tímto bodem si můžeme představit různé typy poruch elektrického charakteru, mezi které můžeme zařadit následující poruchy:

- Zemní spojení statoru

Při vzniku zemního spojení ve statoru je reálná šance, že dojde k poškození statorových plechů, jejichž následná oprava by byla finančně nákladná. Z toho důvodu ochrana proti zemnímu spojení ihned vypíná alternátor od sítě.

- Zemní spojení rotoru, resp. budícího vinutí
Jedná-li se o první zemní spojení, musí obsluha lokalizovat, v jaké části budícího vinutí se nachází. Jestliže nepůjde odstranit, musí být TG odstaven, aby se zabránilo druhému zemnímu spojení.
- Mezizávitové zkraty ve vinutí statoru
Při mezizávitovém zkratu ve statoru ihned působí v závislosti na místě, buď rozdílové, nebo impedanční ochrany. Při blízkém mezifázovém zkratu působí ochrana blokového transformátoru, nebo nadproudová ochrana.
- Mezizávitové zkraty ve vinutí rotoru
Obecně nám mezifázové spojení na rotoru nevadí, dokud počet vykrácených závitů nepřesáhne 20%. K tomuto jevu dochází většinou u strojů s končící životností, která odpovídá opotřebením izolace.

2. Plynové hospodářství

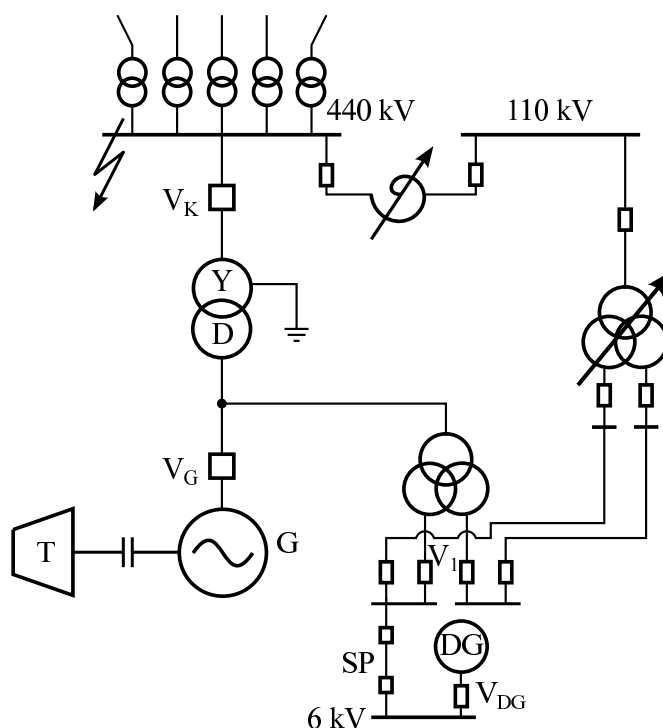
Tímto bodem jsou myšleny poruchy související s plynovým hospodářstvím, speciálně s chlazením stroje. Konkrétně sem patří tyto stavy:

- Provoz TG se vzduchovou náplní
Takovýto provoz je nepřipustný, jediná výjimka je otáčení nenabuzeného rotoru pro ověření mechanických vlastností stroje.
- Pokles čistoty vodíku
Hraniční podmínkou je čistota 97%, jestliže dojde k poklesu čistoty pod tuto hodnotu, musí následovat propláchnutí TG čistým vodíkem. Propláchnutí může být uskutečněno během provozu.
- Únik vodíku
V tomto případě je hraniční hodnota úniku rovna $85m^3$ za 24 hodin, dojde-li k jejímu překročení, musí následovat odstavení TG a lokalizování úniku za pomoci stlačeného vzduchu.
- Porucha a následné odstavení chladiče vodíku
Dojde-li k poruše jednoho z osmi těchto chladičů vodíku, je chod TG omezen pouze na 66% zdánlivého elektrického výkonu stroje.[7]

na vlastní spotřebu realizovanou prostřednictvím odbočky z generátoru. Tímto se dostáváme k první možné vnější poruše, která způsobí zregulování bloku na vlastní spotřebu.[9]

3.1 Porucha v rozvodně Kočín

V tomto případě se uvažuje blíže nespecifikovaná porucha přímo v rozvodně Kočín, která bude mít za následek výpadek bloku z elektrizační soustavy. Při takovémto scénáři dojde k odepnutí bloku JE Temelín prostřednictvím vypínače v rozvodně Kočín (v následujícím obrázku 18. značen jako V_K).



Obrázek 18: Zjednodušené schéma VS s poruchou v rozvodně Kočín [9]

Přímým následkem odepnutí bloku z elektrizační soustavy je zregulování bloku na vlastní spotřebu, což obnáší:

- Reaktor roluje pod 50% svého výkonu.
- Turbína přechází na řízení prostřednictvím integrační složky a reguluje na vlastní spotřebu

Při takovéto události, která bude mít za následek uvedení bloku do vlastní spotřeby, je omezujícím faktorem právě turbína. Turbína má od výrobce pevně stanovenou dobu, po kterou může pracovat na vlastní spotřebu. Tento čas se může pohybovat například v rozmezích 2 až 12 hodin. Tento časový limit je způsoben

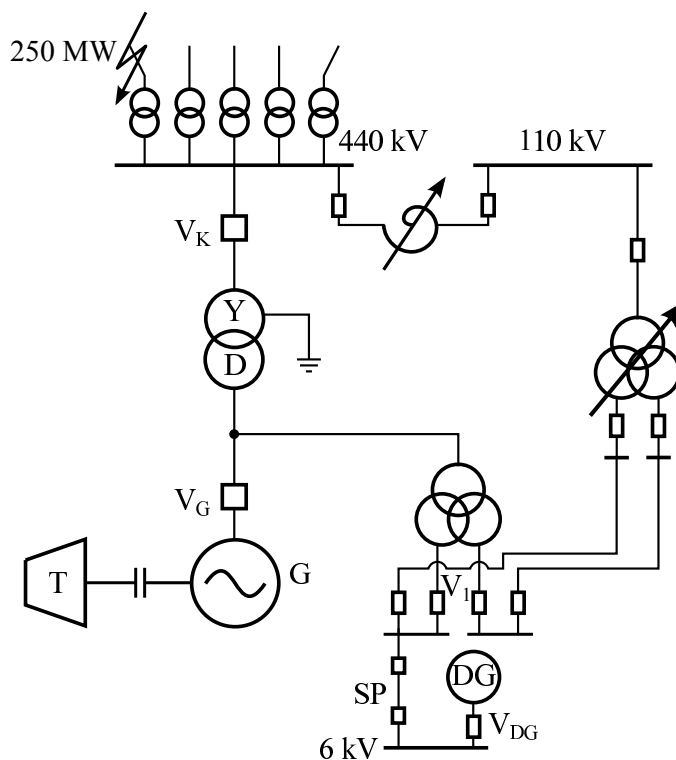
faktem, že jakmile turbína pracuje na vlastní spotřebu, dochází v NT dílu k víření parovodní směsi, která má za následek abrazi dlouhých lopatek právě NT dílu.

Je tedy zřejmé, že omezujícím faktorem pro odstranění poruchy je časový úsek, po který je schopna turbína pracovat v režimu na vlastní spotřebu. Dojde-li k rychlému odstranění poruchy, je možno k znovunafázování bloku do sítě použít výše zmíněný vypínač v rozvodně Kočín. V takovémto případě komunikuje obsluha rozvodny s obsluhou velína. Oba vypínače V_K i V_G jsou uzpůsobeny jak k automatickému, tak k ručnímu přifázování.[9]

3.2 Porucha na lince z rozvodny Kočín

Zkrat na odchozí tranzitní lince z rozvodny Kočín zapříčiní kývání turbogenerátoru. Rozsah závažnosti poruchy na vedení záleží na tom, jestli je zkrat na vedení jedno, dvou či trojpolový, zdali je použita technika OZ a v neposlední řadě, jakým způsobem jsou koncipované ochrany v závislosti na rychlosti zapůsobení.

Pro vysvětlení problematiky kývání turbogenerátoru budeme tedy uvažovat třípolový zkrat na jednom z pěti vedení, po kterém se přenáší výkon o velikosti 250 MW. Tato situace je znázorněna na obrázku 19.



Obrázek 19: Zjednodušené schéma VS s poruchou na vedení z rozvodny Kočín [9]

V okamžiku poruchy přijdeme o jednu čtvrtinu odběru. Tento fakt způsobí nerovnováhu v množství páry přiváděné na turbínu a velikosti odebírané energie. Množství páry přiváděné na lopatky turbíny ovládají regulační ventily, které však nemají zpětnou vazbu na možné poruchy vedení. Na turbínu tedy přivádíme množství páry, které odpovídá 1000 MW, avšak z generátoru odebíráme pouze 750 MW. Tento fakt zapříčiní odlehčení stroje a jeho následné urychlení, což má za následek zvětšení zátěžného úhlu. Trend urychlování odpovídá velikosti vyřazené linky.[9]

Při této události je rozhodujícím faktorem doba vypnutí odpovídajícího zkratu. Mohou tedy nastat dva stavy:

1. Dojde k ustálení na novém zátěžném úhlu

V tomto případě vypneme zkrat včas, aby rotor nestačil ztratit svoji magnetickou vazbu na statorové napětí. Velikost výchylky je závislá na vzdálenosti a době trvání zkratu. Čím blíže se zkrat nachází a čím déle trvá, tím větší je případná výchylka.

2. Dojde k prokluzu plně nabuzeného rotoru

Zkrat se nevypne včas a rotor ztratí svoji magnetickou vazbu a dojde k prokluzu. Tento prokluz má neblahé účinky na hřídel turbosoustrojí (dochází ke značnému torznímu namáhání hřídele).[9]

3.3 Kolísání frekvence v elektrizační soustavě

Dalším faktorem, který bude mít vliv na odepnutí bloku od sítě a jeho následné regulování na vlastní spotřebu je právě kolísání frekvence. Filosofie odepínání bloků od sítě je taková, že se do poslední možné doby snaží elektrárna udržet v síti, aby svým dodávaným výkonem přispěla ke stabilizaci rozpadající se sítě.

Hlavní ochranou pro tento případ je čtyřstupňová frekvenční ochrana generátoru s označením SP-F392. Její umístění je výsledkem pozorování chování frekvence napětí na svorkách statoru během rychlých změn vnitřního zátěžného úhlu generátoru. Při rychlých změnách zátěžného úhlu stoje totiž dochází k významnému ovlivnění průběhu frekvence právě na svorkách statoru. Tato frekvence není stejná jako frekvence sítě, proto je ochrana přemístěna na vvn stranu blokového transformátoru. Tímto způsobem tedy zajistíme správné měření síťové frekvence a tak zabezpečíme korektní údaje pro ochranu. V souladu s definovanými provozními pásmy frekvence sleduje ochrana nadfrekvenci i podfrekvenci.[10]

- **Nadfrekvence**

1. nadfrekvenční stupeň

Působí téměř okamžitě (do 0,2 s) při překročení frekvence 50,2 Hz. Po aktivaci prvního stupně přechází blok na otáčkovou regulaci proporcionálního charakteru.

2. nadfrekvenční stupeň

Působí se zpožděním 15 s při překročení frekvence 51,5 Hz. Po překročení této frekvence působí ochrana na vypnutí vypínače blokové linky a blok přechází do ostrovního režimu s otáčkovou regulací integrálního charakteru.

Zálohu nadfrekvenční ochrany tvoří ochrana s názvem SP-F396, která působí s minimálním zpožděním (1 s), jestliže frekvence překročí 52 Hz.

- **Podfrekvence**

1. podfrekvenční stupeň

Působí téměř okamžitě (do 0,2 s) při poklesu frekvence pod 49,8 Hz. Po aktivaci prvního stupně přechází blok na otáčkovou regulaci proporcionálního charakteru.

2. podfrekvenční stupeň

Působí se zpožděním 1 s při poklesu frekvence pod 47,9 Hz. Po poklesu frekvence pod tuto mez působí ochrana na vypnutí vypínače blokové linky a blok přechází do ostrovního režimu s otáčkovou regulací integrálního charakteru.[10]

4 Návrh digitální ochrany pro blok JE Temelín

Tato poslední část diplomové práce se bude zabývat návrhem digitální ochrany pro blok JE Temelín. Nedílnou součástí návrhu ochran je znalost technických parametrů nejen samotného turbogenerátoru Tabulka 7., ale taktéž blokového transformátoru Tabulka 8. a přístrojových transformátorů Tabulka 9. Návrh je rozdělen do několika kapitol, z nichž každá se zabývá jedním konkrétním typem ochrany.

Činný výkon	1000 MW
Zdánlivý výkon	1111 MVA
Účinník	0,9
Jmenovité napětí	24 kV
Jmenovité otáčky	3000 ot/min
Kmitočet	50 Hz
Jmenovitý proud statoru	26,73 kA
Jmenovitý budící napětí	505 V_{SS}
Jmenovitý budící proud	7120 A

Tabulka 7: Parametry generátoru TG 1000MW [6]

Jmenovitý výkon	3x400 MVA
Převod napětí	24/420 kV
Napětí na krátko	14%
Spojení vinutí	Ynd1

Tabulka 8: Parametry blokového transformátoru [6]

PTP	$k_I=27000/5$ A
PTN	$k_U=24000/100$ V

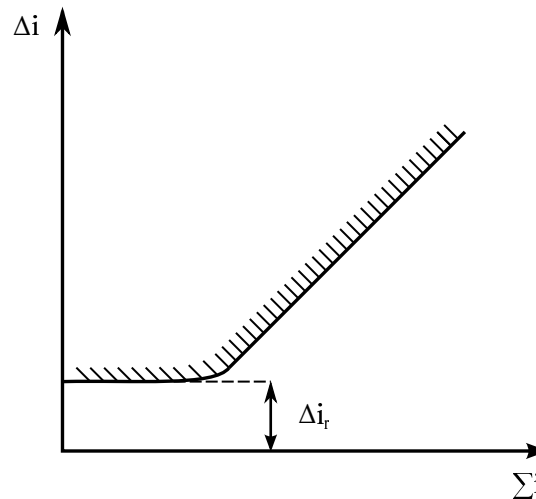
Tabulka 9: Parametry přístrojových transformátorů [6]

4.1 Rozdílová ochrana F301

Rozdílová ochrana je nezpožděně reagující zkratová ochrana generátorů, která pracuje na elementárním principu 1. Kirchhofova zákona, tedy porovnávání měřených proudů. Z měřených fázových proudů se provádí výpočet rozdílových a stabilizačních proudů. Aperiodické stejnosměrné a harmonické složky proudu jsou tlumeny prostřednictvím optimalizovaného digitálního filtru. Díky vysoké citlivosti, která je dána vysokým rozlišením měřených veličin, je možné detekovat i malé rozdílové proudy až 10% I_N .

Jmenovitý proud	5 A
Citlivost ochrany	0,2-0,7 A

Tabulka 10: Parametry rozdílové ochrany



Obrázek 20: Obecná charakteristika rozdílové ochrany [1]

Technické parametry ochrany:

Nastavení ochrany:

Rozdílový proud tekoucí ochranou při I_N :

$$\Delta I_N = I_1 - I_2 = 0 \tag{8}$$

Jmenovitý proud ochrany:

$$I_N = 5 \text{ A}$$

Bezpečný odstup volíme 0,2.

$$\Delta i_r = \frac{3}{2} \frac{\Delta I_N}{I_N} + 0,2 = 0,2 \tag{9}$$

Nastavení ochrany tedy bude:

$$\Delta I_R = 0,2 I_N$$

Dalším důležitým parametrem pro správné nastavení ochrany je poloha uzlu proudových transformátorů na obou stranách chráněného objektu. Taktéž je také nutno zadat jmenovité údaje S_{NG} a U_{NG} .

V našem případě budou tyto hodnoty odpovídat těmto hodnotám:

$$S_{NG} = 1111 \text{ MVA}, U_{NG} = 24 \text{ kV}$$

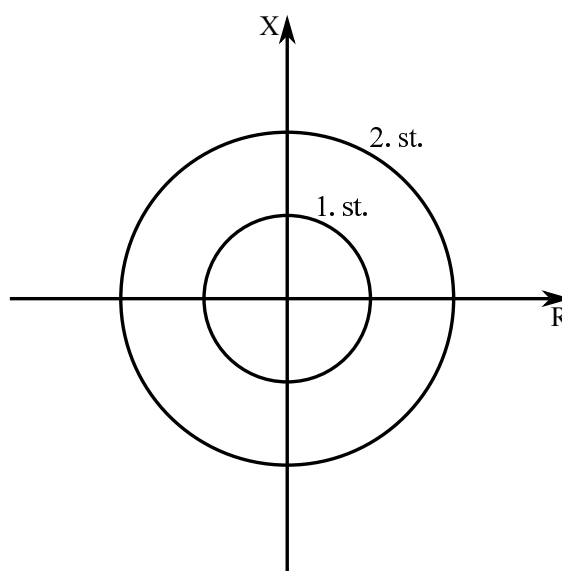
4.2 Impedanční ochrana F251

Jedná se o rychle působící dvoustupňovou ochranu s dvěma nastavitelnými impedančními stupni kruhového tvaru. Charakteristika impedanční ochrany je uvedena na obrázku 21. První impedanční stupeň působí okamžitě, kdežto druhý impedanční stupeň reaguje s předem daným zpožděním.

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	5 A, 100 V, 50 Hz
Impedanční rozsah 1. stupně	do 70% Z_N
Impedanční rozsah 2. stupně	30-100% Z_N
Zpoždění 1. stupně	÷40ms
Zpoždění 2. stupně	0,1-10 s

Tabulka 11: Parametry impedanční ochrany



Obrázek 21: Obecná charakteristika impedanční ochrany [1]

Nastavení 1.stupně:

$$Z_{1T} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{S1}^2}{S_T} = \frac{14}{100} \frac{24000^2}{400 \cdot 10^6} = 0,2016\Omega \quad (10)$$

1. stupeň můžeme nastavit v rozmezí 70-85% Z_{1T} . Volím zkrácení impedančního dosahu na 70%.

$$Z_{1R} = 0,7 \cdot Z_{1T} = 0,7 \cdot 0,2016 = 0,1411\Omega \quad (11)$$

Přepočítání impedančního nastavení na sekundární stranu PTP a PTN:

$$Z_{1SR} = \frac{k_I}{k_U} Z_{1R} = \frac{5400}{240} 0,1411 = 3,175 \Omega \quad (12)$$

$$Z_{1SR\%} = \frac{Z_{1SR}}{Z_{1SN}} 100 = 3,175 \cdot \sqrt{3} \cdot 5 = 27,5\% \quad (13)$$

Vypočtený dosah 1. impedančního stupně je tedy 27,5% Z_N .

Nastavení 2.stupně:

2. stupeň impedanční ochrany se nastavuje s dosahem do nejbližší rozvodny, jelikož tvoří zálohu pro ochrany přípojnic blokového transformátoru na straně vyššího napětí. V našem případě je to rozvodna Kočín, která je od elektrárny vzdálena "po vedení" přibližně 3 km. Impedance vedení Temelín-Kočín je:

$$Z_{1V} = 0,063 + 0,99j \doteq 1 \Omega$$

Koeficient větvení proudu:

$$k_V = 0,5$$

$$Z_{1r} = Z_{1T} + \frac{Z_{1V}}{k_V} \left(\frac{U_{S1}}{U_{S2}} \right)^2 = 0,2016 + \frac{1}{0,5} \left(\frac{24000}{420000} \right)^2 = 0,2081 \Omega \quad (14)$$

Přepočítání impedančního nastavení na sekundární stranu PTP a PTN:

$$Z_{1SR} = \frac{k_I}{k_U} Z_{1R} = \frac{5400}{240} 0,2081 = 4,68 \Omega \quad (15)$$

$$Z_{1SR\%} = \frac{Z_{1SR}}{Z_{1SN}} 100 = 4,68 \cdot \sqrt{3} \cdot 5 = 40,54\% \quad (16)$$

Vypočtený dosah 2. impedančního stupně je tedy 40,54% Z_N a časové zpoždění ochrany volím 4 s.

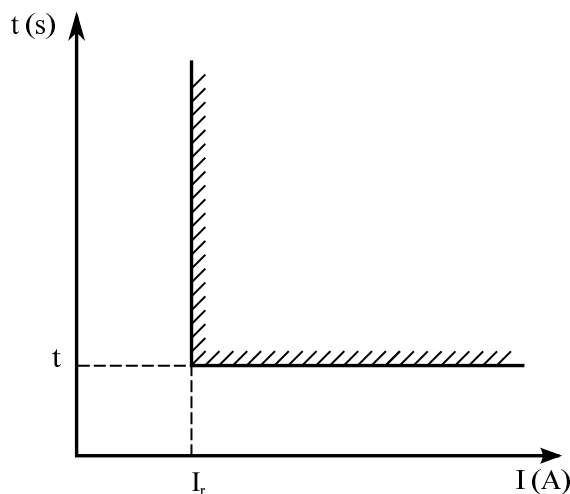
4.3 Zkratová ochrana F111

Jedná se o nadproudovou trojfázovou ochranu bez rozlišení poškozené báze s časovým zpožděním.

Technické parametry ochrany:

Jmenovitý proud	5 A
Proudové nastavení	0,8-2 I_N
Časové nastavení	0,1-10 s

Tabulka 12: Parametry zkratové ochrany



Obrázek 22: Obecná charakteristika zkratové ochrany [1]

Zkratový výpočet:

$$X_G = \frac{x_d\% U_N^2}{100 S_N} = \frac{25}{100} \frac{24^2}{1111} = 0,1296\Omega \tag{17}$$

Výpočet 3f. zkratu:

$$I''_{K3f} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}X_G} = \frac{1,1 \cdot 24000}{\sqrt{3} \cdot 0,1296} = 117608,38A \tag{18}$$

Výpočet mezifázového zkratu:

$$I''_{K2f} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{K3f} = 101851A \tag{19}$$

Minimální zkratový proud při mezifázovém zkratu tedy odpovídá hodnotě:

$$I_{k2min} = 101851 A$$

Koeficient citlivosti:

$$k_c = 2$$

$$I_r = \frac{I_{k2min}}{k_c k_I} = \frac{101851}{2 \cdot 5400} = 9,43A = 1,886 \cdot 5A \quad (20)$$

Nastavení ochrany :

$$I_r = 2I_N, t = 4 \text{ s}$$

4.4 Zemní ochrana na 1. harmonickou F421

Ochrana měří netočivou složku napětí U_0 v uzlu generátoru proti zemi.

Technické parametry ochrany:

Jmenovitý napětí	100 V, 50 Hz
Nastavení U_0	5-20%
Časové nastavení	0,1-10 s

Tabulka 13: Parametry zemní ochrany statoru na 1. harmonickou

Nastavení zemní ochrany generátoru:

Působení ochrany je blokováno ochranou F16 na netočivou složku proudu blokového transformátoru. Zpoždění působení ochrany je nastaveno takovým způsobem, aby bylo zaručeno dřívější působení záložních distančních ochran vedení 400 kV za blokovým transformátorem.

Nastavení ochrany :

$$U_{0R} = 10\% U_N, t = 5 \text{ s}$$

4.5 Zemní ochrana na 3. harmonickou F422

Tato ochrana nemá žádné nastavovací prvky, protože je nastavená přímo od výrobce. Ochrana generátoru tedy působí při:

$$U_{0S}(3\omega) > U_{0U}(3\omega)$$

Kde $U_{0S}(3\omega)$ – napětí 3. harm. netočivý složky na svorkách generátoru

$U_{0U}(3\omega)$ – napětí 3. harm. netočivý složky v uzlu generátoru

4.6 Zemní ochrana rotoru F431

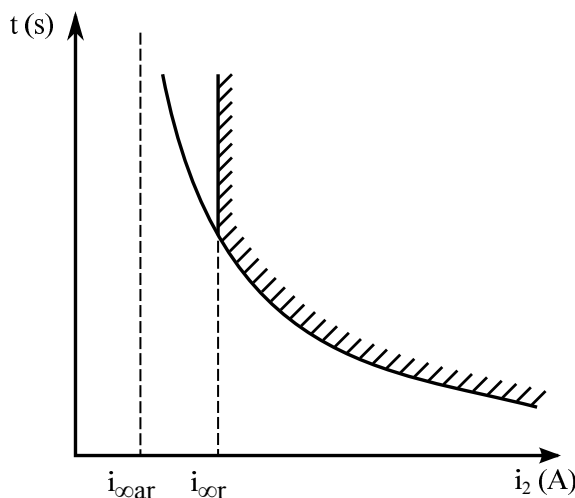
Jako předešlé zemní ochrany i tato zemní ochrana rotoru je předem nastavená od výrobce ochrany. Ochrana funguje na principu injektáže střídavého napětí do stejnosměrného budícího obvodu. Ochrana porovnává amplitudu a frekvenci napětí injektážního zdroje s napětím měřeným na referenčním zemním odporu. Odpor zení poruchy je definován výpočtem. Rozsah ochrany je 0 - 30 kΩ, přičemž hodnota 29,9 - 30 kΩ indikuje obvod v bezporuchovém stavu.

4.7 Ochrana proti proudovému přetížení F131

Technické parametry ochrany:

Jmenovitý napětí	5 A, 50 Hz
Proudové nastavení závislého členu	$i_{\infty ar}=0,8-2 I_N$
Proudové nastavení nadproudového členu uvolňující závislý člen	$i_{\infty r}=0,8-2 I_N$
Časová konstanta závislého členu	$\tau_a=100$ s

Tabulka 14: Parametry ochrany proti proudovému přetížení



Obrázek 23: Obecná charakteristika ochrany proti proudovému přetížení [1]

Závislost doby provozu generátoru při proudovém přetížení je dána vztahem:

$$t = \frac{K}{i^2 - i_{\infty}^2} \tag{21}$$

Kde t – přípustný čas přetížení v s

K – konstanta pro generátor

i – poměrná složka proudu

i_{∞} – trvale přípustná poměrná složka proudu

Nastavení ochrany:

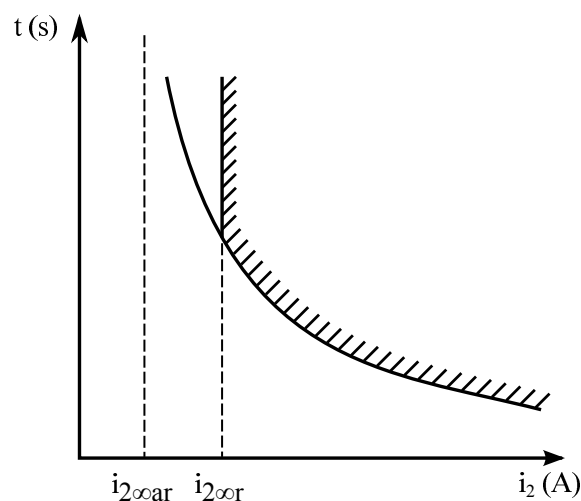
$$i_{\infty ar} = i_{\infty a} \frac{I_{NG}}{I_{1PTP}} = 1,05 \frac{26730}{27000} = 1,0395 \quad (22)$$

$$i_{\infty r} = i_{\infty} \frac{I_{NG}}{I_{1PTP}} = 1,05 \frac{26730}{27000} = 1,0395 \quad (23)$$

Toto nastavení platí pro časovou konstantu $\tau=25$.

4.8 Ochrana proti nesymetrickému proudovému přetížení F46

Jedná se o časově závislou ochranu, která je schopná detekovat zpětnou složku fázových proudů statoru. Jelikož je následkem nesymetrie oteplování rotoru, jsou v algoritmu zohledněny tepelné procesy, které vedou k závislé charakteristice. Dále je proudová nesymetrie vyhodnocována nezávislým výstražným a vypínacím stupněm. Vypínací stupeň působí na generátorový vypínač, odbuzovač a urychlovač regulace turbíny. Doba zpoždění druhého stupně je dána velikostí zpětné složky statorového proudu. Přípustná doba provozu generátoru při nesymetrii je dána vztahem 24.



Obrázek 24: Obecná charakteristika ochrany proti nesymetrickému proudovému přetížení [1]

$$t = \frac{K}{i_{\infty}^2} \quad (24)$$

pro $i_2 > i_{2\infty}$

Kde t – přípustný čas nesymetrického zatížení (5-30 s)

K – konstanta pro generátor

i – poměrná složka proudu

$i_{2\infty}$ – trvale přípustná poměrná zpětná složka proudu

Nastavení ochrany:

$$i_{2\infty ar} = i_{2\infty a} \frac{I_{NG}}{I_{1PTP}} = 0,0842 \frac{26730}{27000} = 0,08334 \quad (25)$$

$$i_{2\infty r} = i_{2infly} \frac{I_{NG}}{I_{1PTP}} = 0,08 \frac{26730}{27000} = 0,0792 \quad (26)$$

$$I_{2\infty ar} = 9\% I_N, \quad i_{2\infty r} = 8\% I_N$$

4.9 Zpětná wattová ochrana F501, F502

Tato ochrana slouží k hlídání směru toku činného výkonu a nabíhá při výpadku mechanické energie. V případě výpadku mechanické energie dochází k odebrání hnací energie ze sítě, což má neblahý vliv jak na síť, tak i na parní turbínu. Výpočet činného výkonu se provádí ze sousledných složek proudu a napětí. Z toho vyplývá, že nesymetrie v síti nesnižuje přesnost měření.

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	5 A, 100 V, 50 Hz
Výkonové nastavení	0,5-2% P_N
Časové nastavení	0,1-10 s

Tabulka 15: Parametry zpětné wattové ochrany

Nastavení zpětných wattových ochran:

Zpětný činný výkon na krytí ztrát:

$$P_{ZP} = 3\% P_N$$

Koeficient citlivosti:

$$k_c = 1,25$$

$$P_{ZPR} = P_{ZP} \frac{U_{NG} I_{NG}}{U_{1PTN} I_{1PTP} k_c} = 3 \frac{24000 \cdot 26730}{24000 \cdot 27000 \cdot 1,25} = 2,376\% \quad (27)$$

Nastavení ochrany:

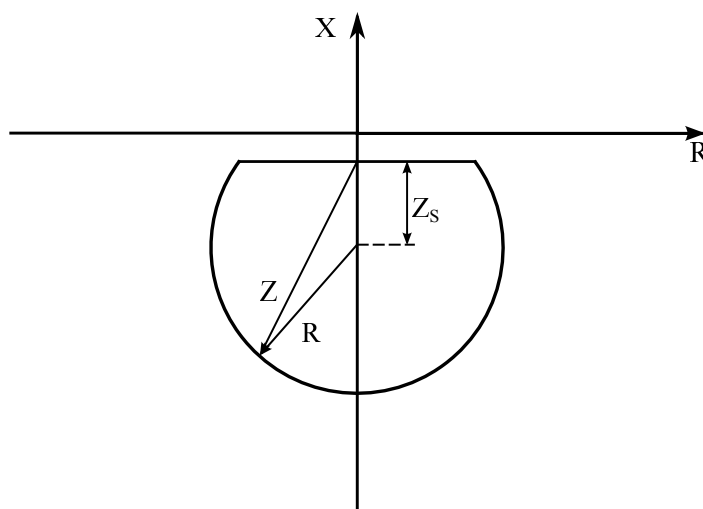
$$P_{ZPR}=2\%, t=6 \text{ s}$$

4.10 Ochrana proti ztrátě stability při podbuzení F442

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	5 A, 100 V, 50 Hz
Nastavení poloměru impedanční kružnice	(0,4-4,8) Z_N
Vysunutí impedanční kružnice	(1,6-2,8) Z_N
Nastavení časového stupně	0-990 s

Tabulka 16: Parametry ochrany proti ztrátě stability při podbuzení



Obrázek 25: Obecná charakteristika proti ztrátě stability [1]

Nastavení ochrany proti ztrátě stability při podbuzení:

Podélná reaktance generátoru:

$$x_d=1,87 \text{ p.j.}$$

Reaktance soustavy:

$$x_s=0,137 \text{ p.j.}$$

$$r = \frac{x_d + x_s}{2} \frac{I_{1PTP} U_{NG}}{I_{NG} U_{1PTN}} = \frac{1,87 + 0,137 \cdot 27000 \cdot 24000}{2 \cdot 26730 \cdot 24000} = 1,0136 p.j. \quad (28)$$

$$z_S = \frac{x_d - x_s}{2} \frac{I_{1PTP} U_{NG}}{I_{NG} U_{1PTN}} = \frac{1,87 - 0,137 \cdot 27000 \cdot 24000}{2 \cdot 26730 \cdot 24000} = 0,875 p.j. \quad (29)$$

Nastavení ochrany:

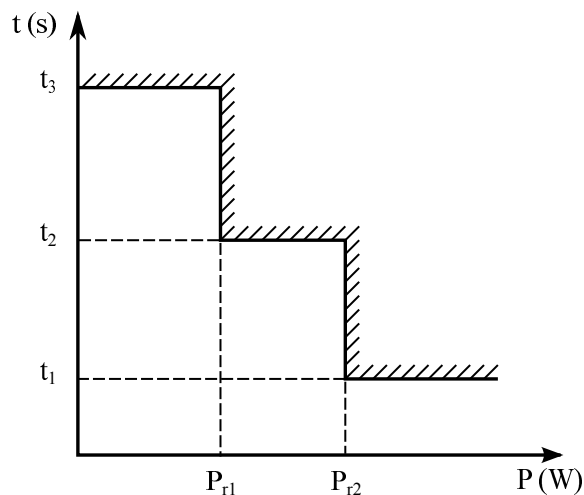
$$r=1,1Z_N, z_S=-jZ_N \text{ minimálně je však možné nastavit } z_S=-j1,6Z_N$$

4.11 Ochrana při ztrátě buzení F441, F371, F45

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	5 A, 100 V, 50 Hz
Nastavení citlivosti ochrany při ztrátě buzení	$V=(0,4-1,6), V=1/ Z_N$
Nastavení přepětového členu	$(0,4-1) U_N$
Nastavení citlivosti 1. členu činného výkonu automatiky	$(0-100\%) P_N$
Nastavení citlivosti 2. členu činného výkonu automatiky	$(10-100\%) U_N$
Časové zpoždění 1. stupně	0-990 s
Časové zpoždění 2. stupně	0-990 s
Časové zpoždění 3. stupně	0-990 s

Tabulka 17: Parametry ochrany proti ztrátě buzení



Obrázek 26: Obecná charakteristika automatiky při omezení výkonu [1]

Nastavení ochrany proti ztrátě buzení F441:

Příčná reaktance generátoru:

$$x_q = 1,52 \text{ p.j.}$$

$$x_{qr} = x_q \frac{I_{1PTP} U_{NG}}{I_{NG} U_{1PTN}} = 1,52 \frac{27000 \cdot 24000}{26730 \cdot 24000} = 1,53 \text{ p.j.} \quad (30)$$

$$V = \frac{1}{x_{qr}} = \frac{1}{1,53} = 0,65 \quad (31)$$

Impedanční nastavení tedy bude: 0,7.

Nastavení podpěťového členu:

Doporučené nastavení podpětí se pohybuje mezi (0,5-0,6) U_N .

$$U_r = 0,55 \frac{U_{NG}}{U_{1PTN}} = 0,55 \frac{24000}{24000} = 0,55 \quad (32)$$

Podpěťové nastavení:

$$U_r = 0,6 U_N$$

Nastavení automatiky při asynchronním chodě F45:

Povolené časy chodu generátoru při ztrátě buzení:

$P > 0,5 P_N$	$t_{vyp} = 1 \text{ min}$
$0,3 P_N < P < 0,5 P_N$	$t_{vyp} = 2 \text{ min}$
$P < 0,3 P_N$	$t_{vyp} = 15 \text{ min}$

Tabulka 18: Povolené časy chodu generátoru

Výpočet 1. stupně: $P > 0,5 P_N$

$$P_r = P \frac{I_{NG} U_{NG}}{I_{1PTP} U_{1PTN}} P_N = 0,5 \frac{24000 \cdot 26730}{24000 \cdot 27000} P_N = 0,495 P_N \quad (33)$$

Výpočet 2. stupně: $0,3 P_N < P < 0,5 P_N$

$$P_r = P \frac{I_{NG} U_{NG}}{I_{1PTP} U_{1PTN}} P_N = 0,3 \frac{24000 \cdot 26730}{24000 \cdot 27000} P_N = 0,297 P_N \quad (34)$$

Nastavení ochrany:

1. stupeň: $P_{r1} = 50\% P_N$, $t_1 = 60 \text{ s}$
2. stupeň: $P_{r2} = 30\% P_N$, $t_2 = 120 \text{ s}$
3. stupeň: $t_3 = 900 \text{ s}$

4.12 Ochrana při změnách frekvence F39

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	100 V, 50 Hz
Podfrekvenční nastavení	45-50 Hz
Nadfrekvenční nastavení	50-55 Hz

Tabulka 19: Parametry ochrany změnách frekvence

Pro nastavení těchto ochran použijeme nastavení aktuálně použitých ochran v JE Temelín. Nastavení bude tedy odpovídat:

$$\text{Podfrekvence} = 47,9 \text{ Hz}, \text{ Nadfrekvence} = 51,5 \text{ Hz}$$

4.13 Přepětová ochrana F381, F382

Technické parametry ochrany:

Jmenovité hodnoty	100 V, 50 Hz
Nastavení 1.stupně	$(0,8-2) U_N$
Nastavení 2.stupně	$(0,8-2) U_N$
Časové nastavení	$(0,1-10) \text{ s}$

Tabulka 20: Parametry přepětové ochrany

Nastavení 1. stupně ochrany:

$$U_r = \frac{1,25U_{NG}}{k_U} = \frac{1,25 \cdot 24000}{240} = 125V \quad (35)$$

Nastavení 2. stupně ochrany:

$$U_r = \frac{1,35U_{NG}}{k_U} = \frac{1,35 \cdot 24000}{240} = 135V \quad (36)$$

Nastavení ochrany F381:

$$\text{Napětí 1. stupně: } U_r = 1,3 U_N$$

$$\text{Časové nastavení 1. stupně: } t = 1 \text{ s}$$

$$\text{2. stupeň: } U_r = 1,4 U_N$$

Nastavení ochrany F382:

$$\text{Napětí 1. stupně: } U_r = 1,4 U_N$$

$$\text{Časové nastavení 1. stupně: } t = 1 \text{ s}$$

$$\text{2. stupeň: } U_r = 1,5 U_N$$

5 Vyhodnocení výsledků a návrh nového systému

V předchozích kapitolách jsem vypočítal jednotlivé druhy ochran a z těchto hodnot určil jejich nastavení. Pro jejich výpočet jsem použil technické parametry generátoru, blokového transformátoru a přístrojových transformátorů proudu a napětí. Nicméně v některých případech se mi bohužel nepodařilo zjistit konkrétní hodnoty určitých veličin:

- P_{ZP} - zpětný činný výkon na krytí ztrát generátoru
- x_d - podélná reaktance generátoru
- x_q - příčná reaktance generátoru
- x_s - reaktance soustavy
- Z_{1V} - impedance vedení 400 kV Temelín - Kočín

Z tohoto důvodu jsem použil hodnoty typické pro generátor daného výkonu, či hodnoty podobného generátoru.

Návrh ochrany je rozdělen do dvou částí:

1. Návrh firmy a souboru ochran
2. Užití ochrany v praxi

5.1 Návrh firmy a souboru ochran

Vzhledem k výběrovému řízení, které během první modernizace vyhrála firma ABB s produktovou řadou REG260, jsem pro další modernizaci chránících systémů vybral produktovou řadu REG670 od stejného výrobce. Systém firmy ABB REG 670 je v současné době top model na poli chránění, řízení a monitorování generátorů a bloků generátor – transformátor. Velké množství analogových vstupů spolu s rozsáhlou knihovnou umožňuje integraci několika funkcí pouze v jednom IED, zároveň v typických aplikacích dokážou dvě jednotky poskytnout úplnou funkčnost a vysoký stupeň redundance. Tento typ je také možné použít k ochraně a kontrole kompenzační tlumivky.

Velké množství funkcí může být použito několikrát, což dovoluje, aby jedno IED chránilo více než jeden objekt. Je tedy možné chránit i transformátor, a to je-li ochrana primárně určena k chránění generátoru. HMI samozřejmě dovoluje monitorovat vybrané hodnoty přímo na displeji IED. Komunikace s ochranou je zabezpečena prostřednictvím optiky, což zaručuje imunitu proti rušení. Knihovna ochranných funkcí v IED zahrnuje rozdílovou ochranu pro generátor, blok, pomocný

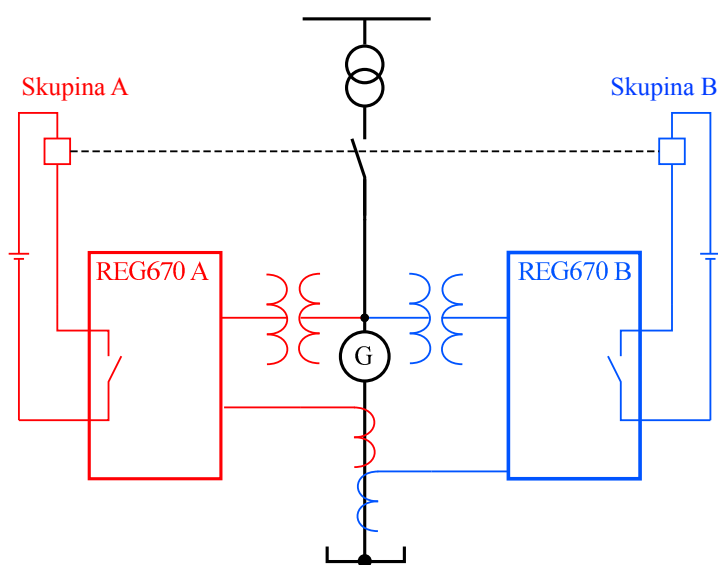
transformátor a celý generátorový blok. Taktéž je zahrnuta zemní ochrana statoru zaručující 95% ochranu, stejně jako 100% zemní ochrana statoru proti třetí harmonické. Samozřejmostí je přítomnost algoritmů pro sledování prokluzu pólů, podbuzení, rotorová zemní ochrana a další. [11]

5.2 Návrh ochrany a ochranných funkcí

Při vypracování tohoto bodu jsem se snažil postupovat dle kapitoly 1.2 Ochrana velkých generátorů. Z tohoto důvodu se tento bod bude zaměřovat na návrh koncepce redundance, vypínací matice a rozsahu ochranných funkcí.

• Návrh koncepce redundance

U takto velkých zdrojů je potřeba zajistit co nejdélší a bezodstávkový provoz, nemůžeme si tedy dovolit, aby nefunkčnost jedné ochrany způsobila odstavení či snížení výkonu generátoru. Z tohoto důvodu volím pro skupinu ochran REG670 úplnou redundanci, která bude duplikovat důležité ochranné funkce. Navrhuji tedy, aby objekt chránili dvě IED jednotky REG670. V tomto konceptu je taktéž samozřejmostí použití rozdílných PTP s PTN.



Obrázek 27: Znázornění redundance s použitím IED REG670

• Rozsah ochranných funkcí

Budeme-li uvažovat normu ČSN 33 3051 Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení, dojdeme k následujícímu seznamu doporučených a požadovaných ochranných funkcí. Tabulka 21. je zjednodušená a jsou v ní vypsány pouze funkce pro turbogenerátory o výkonu větším než 200 MVA.

Druh ochrany	S>200 MVA
Nadproudová zkratová časově nezávislá	(●)
Zkratová podimpedanční	●
Přetížení statoru	●
Rozdílová	●
Nadpětová	●
Zemní statoru	●
Zemní rotoru	●
Závitová	●
Zpětná wattová	●
Nesouměrné zatížení	●
Při ztrátě buzení	●
Při podbuzení	●
Přetížení rotoru	●
Ložisková	●
Prokluz rotoru	●
Proti ztrátě stability	●
Pod a nad kmitočtová	●
Při přesycení	(●)
Proti asynchronnímu chodu soustavy	(●)
Při poklesu napětí a kmitočtu v ES	(●)

Tabulka 21: Ochranné funkce pro generátory dle ČSN 33 3051

Legenda k tabulce 21: ● - Ochrana se použije

(●) – Ochrana se doporučuje

V tabulce 22. jsem uvedl možné uspořádání jednotlivých ochranných funkcí s ohledem na výše zmíněnou normu ČSN 33 3051 a zvolený způsob redundance. V návrhu je zohledněno zálohování ochran samotných a také jejich možná náhrada jinou vhodnou ochranou. Pro názornost jsem vybral několik poruchových stavů generátoru a následně rozepsal jaké ochrany by na něj měli reagovat.

REG670 A	REG670 B
Zemní spojení statoru 100%	Zemní spojení statoru 95%
Zpětná wattová	Zpětná wattová
Při ztrátě buzení	Při ztrátě buzení
Nadpěťová	Nadpěťová
Rozdílová	Rozdílová
Přetížení statoru	Přetížení statoru
Nadproudová ochrana	Nadproudová ochrana
Zemní spojení rotoru	Podimpedanční zkratová
Nesouměrné zatížení	Při podbuzení
Přetížení rotoru	Ložisková
Prokluz rotoru	Podkmitočtová, Nadkmitočtová
Proti ztrátě stability	Přebuzení (U/f)
Při poklesu napětí a kmitočtu v ES	

Tabulka 22: Návrh ochranných funkcí pro redundantní koncepci

- Vnitřní zkrat generátoru

Hlavní ochranou je rozdílová ochrana v souboru REG670 A, 1. záložní ochrana je rozdílová ochrana v souboru REG670 B a 2. záložní ochrana je 1. stupeň podimpedanční ochrany působící v okruhu REG670 B se zpožděním 0,5s.

- Vnější zkrat generátoru

Hlavní ochranou je 1. stupeň podimpedanční ochrany působící v souboru REG670 B se zpožděním 0,5s, 1. záložní ochranou je nadproudová ochrana generátoru působící v souboru REG670 A.

- Přepětí generátoru

Hlavní ochranou je dvoustupňová časově nezávislá nadpěťová ochrana v souboru REG670 A, 1. záložní ochrana je druhá dvoustupňová časově nezávislá nadpěťová ochrana v souboru REG670 B.

- **Vypínací matice ochranných funkcí**

Na následujícím obrázku 28. je znázorněná navržená vypínací matice ochran generátoru TG 1000 MW. Po levé straně jsou vypsány ochranné funkce a v horní části jsou vypsány příslušné akční prvky.

Ve vypínací matici si můžeme povšimnout faktu, že k některým ochranným funkcím není připraven žádný vypínací prvek. V takovém případě má povětšinou ochranná funkce pouze signalizovat překročení nastavených parametrů, tzn. že jejich primární funkcí je signalizace překročení například prvního stupně ochrany.

	QM1	ASV	QM3	QM9	PO	RZV	EU	ACA
Nadproudové přetížení 1. st.								
Nadproudové přetížení 2. st.	●	●			●		●	
Nesymetrie 1. st.								
Nesymetrie 2. st.	●	●			●		●	
Rozdílová	●	●	●			●		
Rozdílová								
Podbuzení								
Ztráta buzení	●	●	●				●	
Ztráta buzení	●	●	●				●	
Prokluz pólů nabuzeného stroje							●	●
Nadpět'ová 1. st.	●	●	●				●	
Nadpět'ová 2. st.	●	●	●				●	
Přesycení mg. tokem 1. st. (U/f)	●	●			●		●	
Přesycení mg. tokem 2. st. (U/f)	●	●			●		●	
Zemní satoru 50 Hz	●	●	●			●		
Frekvenční relé 1. st. $f > 50,2$ Hz								
Frekvenční relé 2. st. $f > 51,5$ Hz								●
Frekvenční relé 1. st. $f < 49,8$ Hz								
Frekvenční relé 2. st. $f < 47,9$ Hz								●
Zemní satoru 150 Hz	●	●	●			●		
Zemní rotoru 1. st.								
Zemní rotoru 2. st.								
Zemní rotoru 3. st.	●	●	●				●	
Zpětná wattová	●	●			●			

Obrázek 28: Návrh vypínací matice

Kde QM1 – generátorový vypínač

ASV – automatika selhání generátorového vypínače

QM3 – odbuzovač generátoru

QM9 – odbuzovače budícího alternátoru

PO – provozní odbuzení

RZV – rychlozávěrný ventil

EU – elektrický urychlovač

ACA – vypínače 400 kV linky

Závěr

Problematika generátorových ochran je komplexní záležitost, která v sobě kloubí několik oblastí ze sféry teoretických a praktických zkušeností v oboru elektroenergetiky. Zvláště u generátorů velkých výkonů je tento fakt umocněn právě jejich nezanedbatelným podílem příspěvku do elektrizační soustavy a závažnosti dopadu jejich havárie z hlediska bezpečnostního a finančního. Proto je u souboru ochran kladen takový důraz na spolehlivost a zaručení bezpečného provozu chráněného objektu.

Pro celkové shrnutí tématu jsem v první části práce analyzoval možné poruchové stavy generátoru s uvedením adekvátního systému chránění. Druhá kapitola, koncipovaná jako seznámení s chráněným objektem, se tedy věnuje turbogenerátoru TG1000 MW. Postupně jsou v ní uvedeny možné provozní a poruchové stavy. Poslední teoretická část práce vyhodnocuje vliv vnějších poruchových stavů na nominální provoz bloku turbogenerátoru. Jsou v ní uvažovány tyto tři poruchové stavy: zkrat v rozvodně Kočín, zkrat na odchozí tranzitní lince z rozvodny Kočín a kolísání frekvence v elektrizační soustavě. V praktické části byl proveden výpočet nastavení ochran a výběr konkrétního typu souboru ochran od společnosti ABB.

Společnost ABB se svojí modelovou řadou REG zaručuje spolehlivý a léty prověřený standard na poli chránění velkých generátorů. Vzhledem k dosavadním zkušenostem, které byly získány během jejího použití v JE Temelín, jsem jako možnou alternativu k souboru ochran REG216 vybral ochranu REG670. REG670 v současné době reprezentuje top model, který uživateli poskytuje vylepšení založená na dlouholetých zkušenostech. Z těchto inovací můžeme namátkou vybrat přehledné Human Machine Interface s možností kontroly aktuálně měřených hodnot, funkce záznamu poruchových stavů pro pozdější analýzu a sériovou komunikaci prostřednictvím optického kabelu, který zajistí odolnost vůči rušení.

Seznam obrázků

1	Jednofázové schéma principu činnosti rozdílové ochrany [1]	8
2	Průběhy proudu v základním uspořádání rozdílové ochrany [1]	9
3	Jednofázové schéma principu činnosti rozdílové ochrany s kompenzací [1]	10
4	Průběhy proudu v základním uspořádání rozdílové ochrany [1]	10
5	Vypínací charakteristika digitální rozdílové ochrany [1]	11
6	Zemní spojení v rotoru generátoru [1]	12
7	Blokové schéma ochrany pro nesymetrické proudové zatížení [1]	12
8	Vypínací charakteristika digitální ochrany pro nesymetrické zatížení [1]	13
9	Statická stabilita synchronního generátoru [2]	14
10	Znázornění ochrany proti ztrátě buzení v impedanční rovině [2]	15
11	Příklad částečné redundance [3]	17
12	Příklad úplné redundance [3]	18
13	Vypínací matice [3]	18
14	Schéma buzení TG 1000 MW [6]	25
15	Obecný PQ diagram turbogenerátoru [8]	27
16	Screen z pracovní obrazovky v programu APD	28
17	Zjednodušené schéma VS [9]	31
18	Zjednodušené schéma VS s poruchou v rozvodně Kočín [9]	32
19	Zjednodušené schéma VS s poruchou na vedení z rozvodny Kočín [9]	33
20	Obecná charakteristika rozdílové ochrany [1]	37
21	Obecná charakteristika impedanční ochrany [1]	38
22	Obecná charakteristika zkratové ochrany [1]	40
23	Obecná charakteristika ochrany proti proudovému přetížení [1]	42
24	Obecná charakteristika ochrany proti nesymetrickému proudovému přetížení [1]	43
25	Obecná charakteristika proti ztrátě stability [1]	45
26	Obecná charakteristika automatiky při omezení výkonu [1]	46
27	Znázornění redundance s použitím IED REG670	50
28	Návrh vypínací matice	53

Seznam tabulek

1	Doporučené ochranné funkce dle jmenovitého výkonu generátoru [3]	19
2	Volba ochranných funkcí pro redundantní koncepci [3]	20
3	Kódové značení ochranných funkcí dle ANSI/IEEE [4]	22
4	Okamžité měřené parametry TG 1000 MW [6]	23
5	Parametry budiče nSR [6]	24
6	Hodnoty v APD	28
7	Parametry generátoru TG 1000MW [6]	36
8	Parametry blokového transformátoru [6]	36
9	Parametry přístrojových transformátorů [6]	36
10	Parametry rozdílové ochrany	37
11	Parametry impedanční ochrany	38
12	Parametry zkratové ochrany	40
13	Parametry zemní ochran statoru na 1. harmonickou	41
14	Parametry ochrany proti proudovému přetížení	42
15	Parametry zpětné wattové ochrany	44
16	Parametry ochrany proti ztrátě stability při podbuzení	45
17	Parametry ochrany proti ztrátě buzení	46
18	Povolené časy chodu generátoru	47
19	Parametry ochrany změnách frekvence	48
20	Parametry přepětové ochrany	48
21	Ochranné funkce pro generátory dle ČSN 33 3051	51
22	Návrh ochranných funkcí pro redundantní koncepci	52

Reference

- [1] JANÍČEK, František. Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, 360 s. ISBN 80-227-2135-2.
- [2] MÁŠLO, Karel a Ladislav HÁŇKA. Analýza asynchronního chodu generátorů (1). 2003. Dostupné z: <http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2003-1-62.pdf>
- [3] SIEMENS. Aplikace pro ochrany SIPROTEC: Ochrana středních a velkých generátorů se SIPROTEC 7UM6. 2005.
- [4] ABB. REG 216: Generator and generator transformer protection. Dostupné z: <http://www.electricalmanuals.net/files/RELAYS/ABB/REG/1MRB-520-004-BEN.pdf>
- [5] ROTBAUER, Michal. Elektrická část JE Temelín - vlastní spotřeba JE. Plzeň, 2012. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jana Jiříčková.
- [6] TICHÁ, Gabriela. ČEZ A.S. Elektrická část JE VVER 1000: Učební texty pro doškolení personálu ÚJE. 2003.
- [7] TICHÁ, Gabriela. ČEZ A.S. Elektrická část JE VVER 1000. 2010
- [8] NOHÁČ, Karel. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Pracovní oblast a provozní diagram generátoru. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast09-v2.pdf>
- [9] HLEDÍK, Jiří. ČEZ A.S. Přednáška Elektrická část JE Temelín [online]. FEL ZČU Plzeň, 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://kryton.zcu.cz/public/GALERIE%20-%20TRANSFER/KA1_workshop=/WORKSHOP_16_HLEDIK%20II./hledik-odborny.avi
- [10] HLEDÍK, Jiří. ČEZ. Školící materiály JE Temelín. 2014.
- [11] ABB. Generator protection REG670: Protect Guide. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot349.nsf/veritydisplay/1eab97e040318b69c12577670044debd/\\$file/1mrk502019-ben_b_en_generator_protection_reg670_1.1_pre-configured_product_guide.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot349.nsf/veritydisplay/1eab97e040318b69c12577670044debd/$file/1mrk502019-ben_b_en_generator_protection_reg670_1.1_pre-configured_product_guide.pdf)

Přílohy

Součástí přílohy je jednopólové schéma ochran JE Temelín.