

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh systému elektrických ochran a buzení malého
synchronního generátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin HAVLÍK**
Osobní číslo: **E18N0048P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Návrh systému elektrických ochran a buzení malého synchronního generátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Navrhněte jednofázové schéma systému elektrických ochran a buzení synchronního generátoru s výkonem přibližně 2 MW.
2. Stanovte a vysvětlete potřebné ochranné funkce synchronního alternátoru dle aktuálních norem.
3. Navrhněte nastavení jednotlivých ochranných funkcí s ohledem na generátorové ochrany implementované v jednotce Arcteq AQ-G257.
4. Navrhněte nastavení omezovačů buzení implementovaných v jednotce Arcteq AQ-G257. Při návrhu zohledněte pravidla pro selektivitu nastavení ochran a omezovačů
5. Proveďte ověření navrženého nastavení jednotlivých ochranných a omezovacích funkcí pomocí sekundárních zkoušek.


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

Seznam doporučené literatury:

1. Beran, Miloš: Elektrická zařízení tepelných elektráren, 1. vyd. Plzeň, VŠSE, 1988
2. Firemní dokumentace jednotek Arcteq AQ-G257 (arcteq.fi/wp-content/uploads/2018/01/AQ-G257-Manual-1.02EN-1.pdf)

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

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


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




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

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou buzení a ochran synchronních generátorů. Jsou zde uvedeny základní principy buzení a ochrany potřebné k bezpečnému chodu synchronního generátoru. Dále je v práci uveden návrh schématu zapojení buzení malého synchronního generátoru a uspořádání jeho ochran. Za účelem následného využití v praxi byl studován a otestován budicí systém Arcteq.

Klíčová slova

Synchronní generátor, buzení, ochrana synchronního generátoru, budicí systém, Arcteq, sekundární zkoušky, testování budicího systému.

Abstract

This diploma thesis is focused on problems in the area of excitation and protection for synchronous generators. The principles of excitation and protection for safe operation of synchronous generator are stated in practical part. This thesis is also focused on diagram of excitation and protection for small synchronous generator. For the purpose of potential use in industry, the excitation system Arcteq was tested.

Key words

Synchronous generator, excitation, protection of synchronous generator, excitation system Arcteq, secondary test, testing of excitation system.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 117.6.2020

Martin Havlík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. a konzultantu Ing. Tomáši Kreisingerovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Poděkování také patří celé společnosti Invelt elektro s. r. o. za poskytnutí příležitosti řešit danou problematiku. Dále bych rád poděkoval své rodině za vytvoření vhodných podmínek pro vznik této práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 BUDICÍ SOUSTAVY PRO SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	12
1.1 ZÁKLADNÍ POPIS A ROZDĚLENÍ BUDICÍCH SOUSTAV	12
1.2 NÁROKY NA BUDICÍ SOUSTAVY GENERÁTORŮ	13
1.3 PRVKY STANOVUJÍCÍ ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI BUDICÍ SOUSTAVY	15
1.4 FUNKCE OMEZOVAČŮ BUZENÍ	17
2 OCHRANY SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	19
2.1 DRUHY OCHRAN SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	19
2.1.1 <i>Chránění proti zkratům</i>	19
2.1.2 <i>Ochrany proti zemnímu spojení</i>	22
2.1.3 <i>Ochrany proti nestandardním stavům generátoru</i>	23
2.2 ROZDĚLENÍ POUŽÍVANÝCH OCHRAN PODLE VÝKONU STROJE	25
3 PRAKTICKÁ ČÁST	27
3.1 SEZNÁMENÍ SE SE SYSTÉMEM OCHRAN A BUZENÍ ARCTEQ	27
3.1.1 <i>Hardware systému ochran a buzení Arcteq</i>	27
<i>AQ-G257 IED</i>	27
<i>AQ-GC30</i>	27
3.1.2 <i>Software systému ochran a buzení Arcteq</i>	28
3.2 NÁVRH JEDNOPÓLOVÉHO SCHÉMATU OCHRAN A BUZENÍ	30
3.3 PRVNÍ TEST SYSTÉMU BUZENÍ ARCTEQ	33
3.4 STAVBA STOJANU PRO BUDICÍ SYSTÉM ARCTEQ	35
3.5 TEST AUTOMATICKÉHO REGULÁTORU NAPĚTÍ	36
3.6 NASTAVENÍ A SEKUNDÁRNÍ ZKOUŠKY OCHRAN	38

3.7 NASTAVENÍ A SEKUNDÁRNÍ ZKOUŠKY OMEZOVAČŮ BUZENÍ	48
ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	55
PŘÍLOHY	1

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na buzení a ochrany malých synchronních generátorů. První část práce je zaměřena na teorii buzení synchronních strojů. Jsou zde stručně popsány základní budicí systémy, které se v praxi používají, základní vlastnosti budicích soustav a důležité prvky budicí soustavy. Dále jsou v teoretické části uvedeny ochrany synchronních generátorů a jejich použití na základě jmenovitého výkonu stroje, které je uvedeno v normě ČSN 33 3051.

Teoretická část se zabývá prací se systémem buzení a ochrany Arcteq. Pro uvedení čtenáře do problematiky, je v práci uvedena podstata přístroje, jeho možnosti a základní funkce tohoto zařízení. V práci je nastíněn postup při testování systému Arcteq a komplikace s ním spojené. Dále je čtenáři popsán software používaný pro nastavení jednotky AQ-G257 IED, která je součástí systému.

V práci je popsán návrh jednopólového schéma buzení a ochrany pro malý synchronní generátor. Na základě poznatků uvedených v teoretické části práce jsou ve schématu zobrazeny ochrany, které by byly použity pro daný generátor v praxi. Do jednopólového schéma byl zakomponován budicí systém Arcteq, který by bylo možno použít pro realizaci projektu v praxi.

Na základě teoretických předpokladů je v práci navrženo nastavení jednotlivých ochranných a omezovacích funkcí v budicí jednotce Arcteq, přičemž návrh vycházel z reálného projektu firmy Invelt elektro s. r. o. pro generátor o výkonu 4,663 MVA. Toto nastavení bylo testováno pomocí kalibrovaného přístroje Omicron cmc 256-6. Veškeré výsledky jsou v práci vyhodnoceny a okomentovány. V závěru jsou shrnuty poznatky o budicím systému Arcteq a je zde komentováno jeho následné využití v praxi.

Seznam symbolů a zkratek

IED	Inteligent electronic device (Inteligentní elektrické zařízení)
IGBT.....	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
AVR.....	Automatic Voltage Regulator (Automatický regulátor napětí)
FCR.....	Field Current Regulator (Regulátor budicího proudu)
AC.....	Alternating Current (střídavý proud)
DC.....	Direct Current (stejnoseměrný proud)
U_b	Budicí napětí
U_s	Strovní ustálené napětí
I_b	Budicí proud
I_{bn}	Jmenovitý budicí proud
I_{b0}	Budicí proud naprázdno
U_c	Strovní budicí napětí
I_c	Strovní budicí proud
K_s	Poměrné strovní napětí
$V_{0,5}$	Střední rychlost nárůstu budicího napětí synchronního turboalternátoru
V_i	Počáteční rychlost nárůstu budicího napětí
G	Napěťové zesílení budicího systému
PTN.....	Přístrojový transformátor napětí
PTP	Přístrojový transformátor proudu
PWM.....	Pulse Weight Modulation (Pulsně šířková modulace)
LED	Light Emitted Diode (LED dioda)

1 Budicí soustavy pro synchronní generátory

1.1 Základní popis a rozdělení budicích soustav

Budicí systém se zpravidla skládá z budiče, odbuzovače a regulátoru buzení, přičemž výkon budiče bývá 0,2 - 0,8 % výkonu generátoru. Napětí budicího systému nebývá větší, než 1 kV, aby nebyly kladeny příliš vysoké nároky na izolaci budicího vinutí. Zároveň nižší budicí napětí znamená větší budicí proud při stejném výkonu budicí soustavy.

Základní rozdělení budicích systémů je na statické a rotační. Dále můžeme soustavy dělit na kroužkové (kartáčové) a bezkroužkové (bezkartáčové) budicí soustavy. Rotační budiče jsou takové, kde dochází k přímému vytvoření stejnosměrného napětí rotačním strojem, který je zpravidla umístěn na hřídeli stroje. Jsou to například dynam nebo střídavé generátory, které jsou opatřeny usměrňovači. Pro dosažení potřebného výkonu pro buzení generátoru jsou tyto stroje zapojovány do kaskád. Příkladem je budicí soustava s rotačním budičem a pomocným budičem. Statická budicí soustava se zpravidla nachází mimo generátor a může to být například řízený tyristorový či neřízený usměrňovací diodový můstek. Bezkartáčové budicí soustavy jsou soustavy bez sběrného ústrojí, čehož je docíleno tak, že se řízený nebo neřízený usměrňovač otáčí na společné hřídeli s budicím vinutím alternátoru.

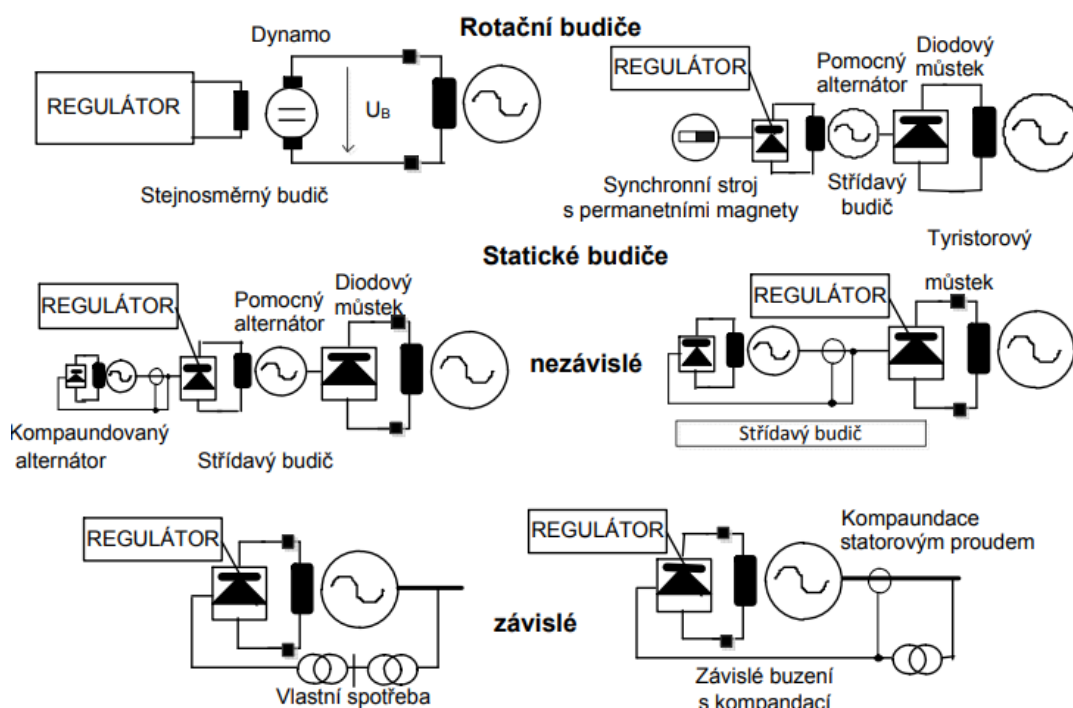
Dále můžeme budicí soustavy rozlišovat na závislé a nezávislé. Závislé budicí soustavy jsou závislé na výstupním napětí alternátoru, jsou to tedy například ty soustavy, které jsou připojeny napájeny přímo z výstupu generátoru. Mezi nezávislé budicí soustavy patří právě většina rotačních. Speciální jsou budicí soustavy kompaundní, které nejsou závislé pouze na napětí, ale ještě například na proudu.

Podle odezvy rozdělujeme budicí soustavy na rychlé a klasické. Rychlé jsou ty soustavy, které mají dobu odezvy menší, než 0,1 s, zbylé soustavy jsou klasické.

Dříve se pro malé turboalternátory do 75 MVA používali převážně statické budicí soustavy v podobě řízených usměrňovačů. U středních výkonů do 350 MVA se většinou používali nezávislé budicí systémy nebo i bezkartáčové systémy, kde je usměrňovač umístěn na hřídeli stroje. U těchto strojů nejsou výjimkou ani závislé budicí soustavy. U strojů s výkonem nad 350 MVA byly budiče nezávislé se statickými usměrňovači nebo bezkartáčové budicí systémy. Hydroalternátory byly pak buzeny převážně závislými soustavami. U rychloběžných strojů bývaly použity střídavé budiče na hřídeli a statický

řízený usměrňovač.

V dnešní době se statické budicí soupravy většinou používají u větších strojů (nad 50 MW), protože jejich výkon je již významný z hlediska provozu sítě a měly by tedy být dostatečně rychlé a vybavené funkčním stabilizátorem činného výkonu (Power System Stabilizer – PSS). U menších strojů s omezeným vlivem na chod elektrizační soustavy mohou být bezkroužkové (rotační) budicí systémy, které mají delší odezvu kvůli časové konstantě budiče. Schémata jednotlivých typů budicích soustav jsou zobrazeny dále na obrázku. [1] [2]



Obr. 1 - Principiální schémata jednotlivých typů budičů [1]

1.2 Nároky na budicí soustavy generátorů

Na budicí soustavy synchronních generátorů jsou kladeny vysoké nároky. Spolehlivost celého systému je důležitá nejen proto, že může dojít k poškození stroje. Proto byly vytvořeny normy, které určují základní pravidla pro tvorbu těchto systémů. V normě ČSN 35 0255 jsou uvedeny základní podmínky pro návrh a stavbu budicích systémů synchronních generátorů. Některé z těchto podmínek jsou uvedeny dále.

Hlavní budicí systémy musí obsahovat automatický regulátor buzení (AVR – z anglického Automatic Voltage Regulator). Mimo to musí obsahovat ruční regulaci budicího proudu (režim MAN), obvody odbuzení a automatický odbuzovač, pro případ

poruchy budicího systému. Budicí systémy musí zajistit to, že budicí proud a napětí budou za jakýchkoli okolností o 10 % větší, než je jmenovitý proud a jmenovité budicí napětí synchronního stroje. Dále pak stropní budicí napětí musí být nejméně $1,6 \times U_b$ a u závislých budicích systémů alespoň $2 \times U_b$, stejně tak je to s budicím proudem I_b budicího systému. Zároveň platí, že jestliže je poměrný stropní proud menší než poměrné stropní napětí, musí mít budicí systém automatické omezování proudu na předepsanou hodnotu. Zpoždění budicího systému při stropním napětí nesmí být větší než 0,02 s u rychlých budicích systémů a u pomalých budicích systémů nesmí být větší než 0,05 s.

Dříve byly speciální požadavky kladeny na budicí systémy, používající výkonové polovodičové součástky, ty měli mít vnitřní rezervu napětí minimálně 30 %, aby byla zajištěna dodávka budicího napětí i přes případný výpadek diod, tyristorů a podobně. Spolehlivost dnešních polovodičových součástek dovoluje menší rezervu napětí.

Také transformátory, které jsou součástí budicích systémů musí být dimenzovány natolik, aby vydržely napájecí napětí zvýšené na 140 % jmenovitého napětí minimálně po dobu 1 s. Tuto podmínku musí plnit i měniče a komponenty připojené k tomuto transformátoru. Zvýšené požadavky jsou pak stanoveny na chlazení výkonových měničů, které jsou součástí budicího systému. Pokud je výkonový měnič nuceně chlazen, mělo by být chlazení stoprocentně zálohováno.

Vysoké nároky jsou kladeny také na odbuzovače budicích systémů (pokud jej budicí systém obsahuje).

- Vypínací čas odbuzovače nesmí být nižší než 0,1 s.
- Zapnutí nebo vypnutí odbuzovače musí být zajištěno i přes změnu napájecího napětí od 0,65 do 1,1 násobku jmenovitého napětí.
- Při vzniku zkratu na svorkách budicího vinutí musí hlavní nebo rezervní odbuzovač zajistit svou správnou funkci. Dále musí zajistit odbuzení i při vnitřních i vnějších zkratech v obvodu statorového vinutí stroje.

Všechny tyto podmínky musí být splněny, aby byl budicí systém spolehlivý a bezpečný. [3]

1.3 Prvky stanovující základní vlastnosti budicí soustavy

Proto, abychom mohli definovat chování budicí soustavy a její odezvy, byly stanoveny základní prvky a veličiny. Tyto prvky definuje také norma ČSN 35 0255. Základní z těchto pojmů jsou uvedeny níže.

- **Strovní napětí U_c** – Je to maximální hodnota napětí, která vznikne při nárazovém přibuzení. Hodnota budicího proudu je pak jmenovitá a počáteční teplota vinutí rotoru odpovídá teplotě při jmenovitém zatížení.
- **Strovní ustálené budicí napětí U_s** – Ustálená hodnota strovního napětí. Hodnota, která vznikne při dosažení předepsaného strovního proudu.
- **Poměrné strovní napětí K_s** – Je dáno podílem strovního napětí ku jmenovitému budicímu napětí (násobek strovního napětí)
- **Strovní budicí proud I_c** – Hodnota budicího proudu na konci předepsané doby nárazového buzení.
- **Půlsekundová rychlost nárůstu budicího napětí $V_{0,5}$** – Střední rychlost nárůstu budicího napětí synchronního turboalternátoru vypočtená při nárazovém buzení za 0,5s dle vztahu:

$$V_{0,5} = \frac{\Delta U_e}{U_{eN} \cdot 0,5} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

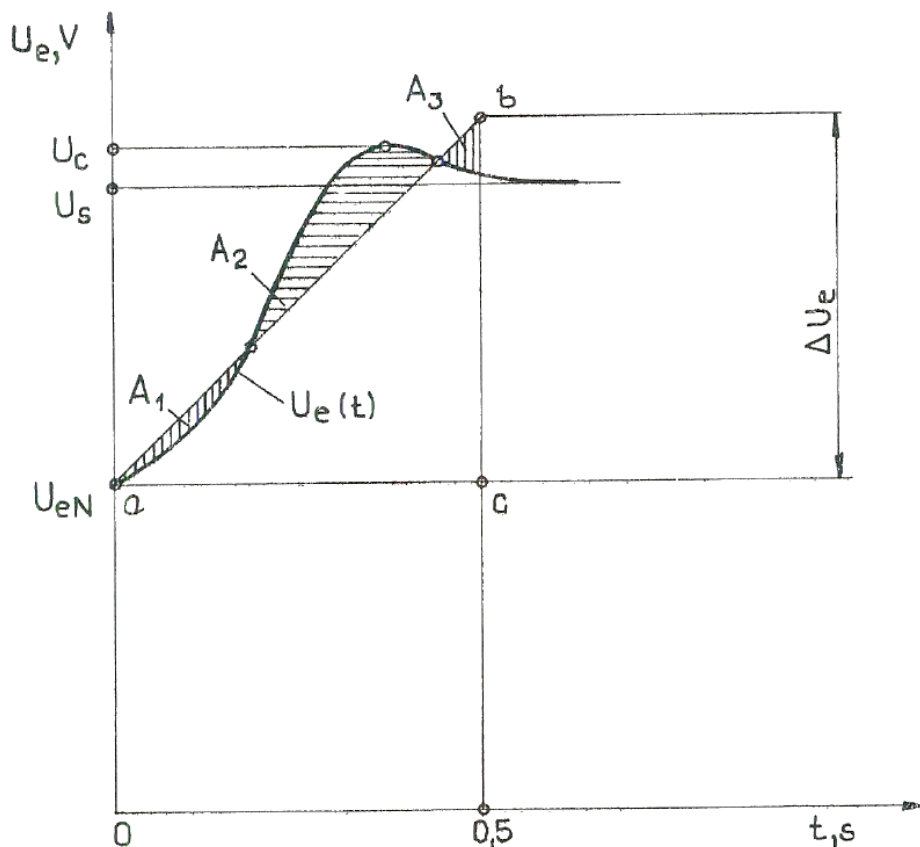
Kde:

$$\Delta U_e = 4 \int_0^{0,5} [U_e(t) - U_{eN}] dt \text{ (V)} \quad (2)$$

U_{eN} – Jmenovité budicí napětí synchronního stroje.

$U_e(t)$ – Křivka nárůstu napětí při nárazovém buzení.

Pro přehlednost jsou jednotlivé veličiny zobrazeny na obrázku dále.



Obr. 2 - Stanovení pulsekundové rychlosti nárůstu budicího napětí $V_{0,5}$ [3]

- **Počáteční rychlost nárůstu budicího napětí V_i** – Je to rychlost nárůstu budicího napětí synchronního generátoru, která je stanovena z experimentální křivky nárůstu budicího napětí při nárazovém buzení a vypočte se dle následujícího vztahu:

$$V_i = \frac{0,632 \cdot (U_c - U_{eN})}{U_{eN} \cdot t_1} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Kde:

t_1 – doba, kdy budicí napětí dosáhne hodnoty podle vztahu:

$$U_{en} + 0,632 \cdot (U_c - U_{eN}) \text{ (V)} \quad (4)$$

- **Napět'ové zesílení budicího systému G** – Součinitel, který určuje, jak se změní napětí na vstupu ARB při změně budicího napětí turboalternátoru a vypočte se podle vztahu:

$$G = \frac{\Delta U_e \cdot U}{\Delta U \cdot U_{eN}} \text{ (-)} \quad (5)$$

Kde:

ΔU_e – změna budicího napětí.

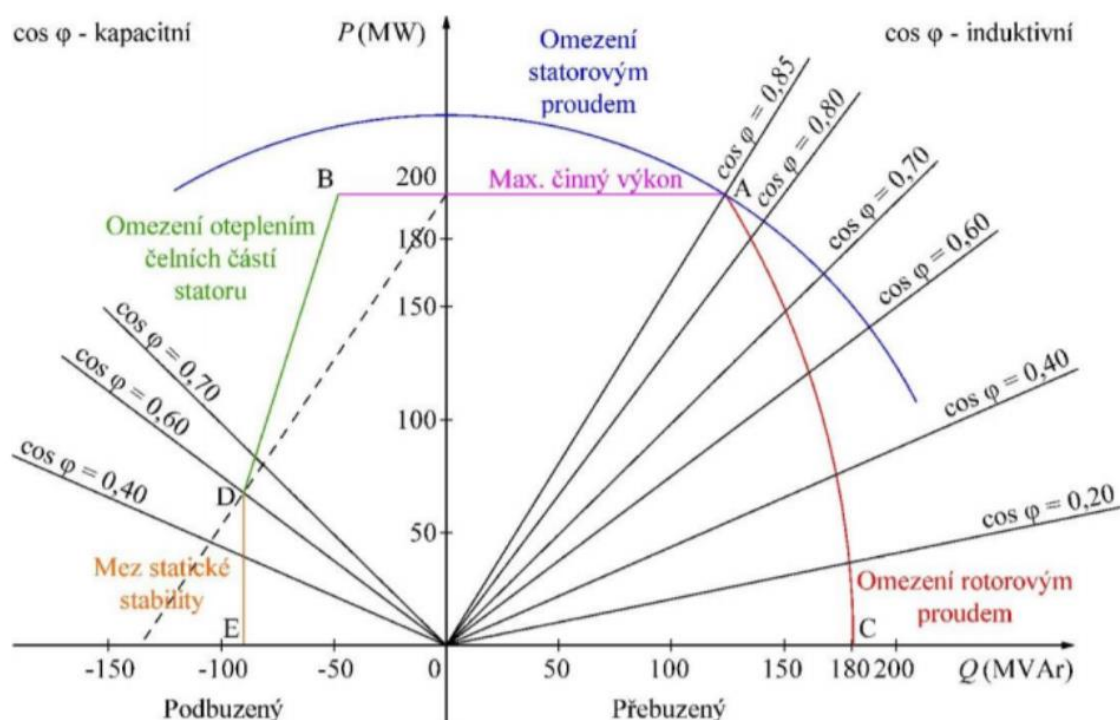
ΔU – Změna napětí na vstupu do ARB

U_{eN} – Jmenovité budicí napětí synchronního stroje

U – Napětí na vstupu do ARB [3]

1.4 Funkce omezovačů buzení

Nedílnou součástí budicích systémů jsou omezovače buzení, které zabraňují tomu, aby se generátor dostal do nebezpečných stavů. Meze, které nesmí generátor překročit jsou stanoveny takzvaným P-Q diagramem. Jsou na něm vidět aktuální provozní stavy stroje a vymezuje pracovní oblast stroje. Při překročení těchto mezí zasahují ochrany synchronního generátoru. Omezovače zajišťují to, aby se k těmto hranicím generátor ani nepřiblížil. [4]



Obr. 3 - Příklad provozního diagramu synchronního stroje [4]

Hlídač meze podbuzení

Hlídač meze podbuzení chrání stroj při práci v podbuzeném stavu. Hlídá, aby nebyly překročeny meze, kdy by došlo k ohrožení statické stability a oteplení čelních částí statoru. Tento omezovač řídí odebíraný jalový výkon ze sítě tím, že upravuje budicí proud. Při překročení mezí charakteristiky zvyšuje budicí napětí a proud tak, aby dostal pracovní bod

zpět na mezní charakteristiku, ještě před tím, než vybaví ochrana proti podbuzení generátoru. [5]

Omezovač satorového proudu

Jak už je jasné z názvu omezovač satorového proudu omezuje proud tekoucí statorem. Omezovač působí, když stator dosáhne maximální hodnoty proudu, což může nastat když, generátor dodává velký výkon a je silně podbuzen nebo přebuzen. Po překročení meze satorového proudu je proud statoru omezen na maximální hodnotu. Pokud je generátor přebuzen a pracuje v induktivní oblasti pracovního diagramu, tak je generátor odbuzován. Pokud je generátor podbuzen a pracuje v kapacitní oblasti pracovního diagramu, tak je naopak přibuzován. Přesahuje-li činná složka satorového proudu danou mez, omezovač udržuje nulový jalový výkon (minimální hodnota satorového proudu dosažitelná regulací budicího proudu). [5]

Omezovač budicího proudu

Omezovač budicího proudu je nutný kvůli tomu, aby se tepelně nepřetížil rotor generátoru. Omezovač bývá většinou časově zpožděn, aby dovolil krátkodobé přetížení generátoru například při dodávání energie do zkratu. Díky tomu, že může být krátkodobě budicí proud větší, než dovolený, je zajištěno, že se generátor chová správně i ve stavech, jako je udržení správného svorkového napětí při velkém poklesu napětí v síti způsobeného zvýšením požadavku na jalový výkon. Omezovač po překročení maximálního budicího proudu a uplynutí času závislém na míře překročení, omezí budicí proud na maximální povolenou hodnotu. [5]

V/Hz omezovač

Tento omezovač chrání generátor proti přesycení magnetického obvodu stroje tím, že omezuje poměr napětí ku frekvenci. Při překročení hodnoty tohoto poměru omezovač upravuje buzení, aby platilo $(U/f) = (U/f)_{\max}$. [5]

2 Ochrany synchronních generátorů

2.1 Druhy ochran synchronního generátoru

Poruchy na synchronním generátoru mohou narušit stabilitu elektrizační soustavy nebo ohrozit samotné zařízení. Z tohoto důvodu musí být synchronní generátor vybaven souborem ochran, které stroj buď odstaví nebo signalizují nějaký nestandardní stav zařízení.

Ochrany rozdělujeme následovně:

1) Zkratové ochrany a ochrany reagující na zemní spojení:

- Zemní spojení na rotoru
- Zemní spojení na statoru
- Závitový zkrat na statoru
- Závitový zkrat na rotoru
- Zkrat na vnější straně generátoru
- Zkrat na vnitřní straně generátoru

2) Generátorové ochrany reagující na abnormální provozní stavy:

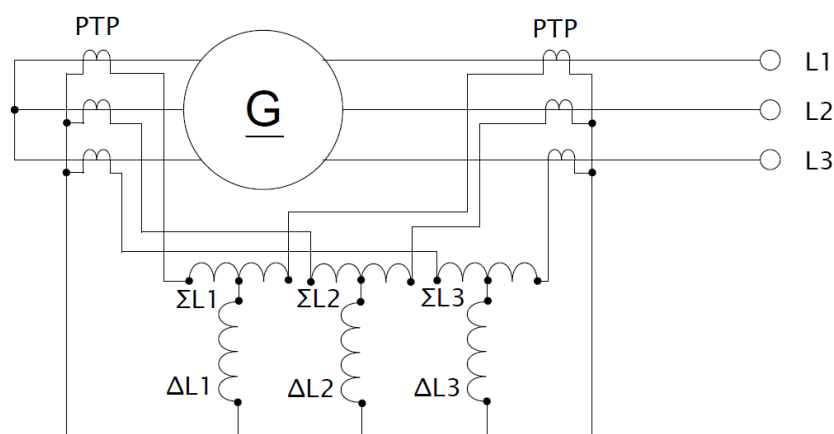
- Podpětí, přepětí a přetížení
- Ochrana proti motorickému chodu (zpětný tok výkonu)
- Nesymetrické zatížení fází
- Samobuzení
- Ochrana proti ztrátě buzení
- Ochrana proti nestandardním otáčkám (podsynchronní a nadsynchronní)
- Ložiskové proudy [6]

2.1.1 Chránění proti zkratům

Zkrat je jednou z nejzávažnějších poruch, která může na synchronním generátoru vzniknout. Při jeho vzniku by měla ochrana zapůsobit a pomocí akčních členů odstavit synchronní generátor. Proti zkratům můžeme stroj chránit více způsoby. Jedním z nich je chránění rozdílovou ochranou.

Rozdílová ochrana je velmi spolehlivou ochranou pro zachycení vnitřních zkratů na synchronním generátoru. Nedílnou součástí rozdílové ochrany jsou měřicí transformátory, které mají za úkol měřit proudy před zařízením a za zařízením. Ochrana pak pracuje na principu prvního Kirchhoffova zákona. Proudové vtoky do zařízení se musí rovnat

proudům, které ze zařízení vytékají. Za normálního bezporuchového stavu se tedy proudy rovnají a při poruše dojde k jejich rozdílným hodnotám a ochrana na základě toho zapůsobí. Tato ochrana může být použita i jako ochrana pro transformátor nebo chrání generátor a vývodový transformátor současně. Většinou se však používá kombinace, aby byla zajištěna záloha ochrany. U alternátoru se nastavuje rozdíl proudu na 10–30 % jmenovitého proudu na sekundární straně měřicích transformátorů proudu. Pokud chráníme celý blok (transformátor + generátor) nastavuje se hodnota na 20–50 % jmenovitého proudu. Ochrana působí mžikově a odstavuje celé soustrojí (vypíná generátorový vypínač, uzavře přívody páry atd.). Ochrana je většinou vybavena kompenzačním článkem, který zajišťuje to, aby ochrana nereagovala v případě vnějšího zkratu, což se může stát díky nesouměrnosti měřicích transformátorů.

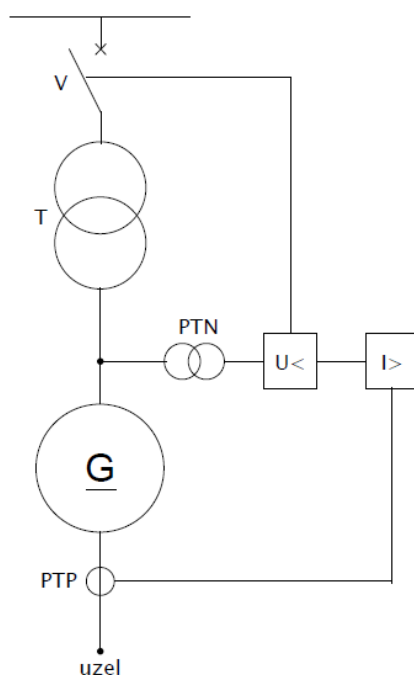


Obr. 4 - Zapojení rozdílové ochrany generátoru (PTP-přístrojový transformátor proudu)

[7]

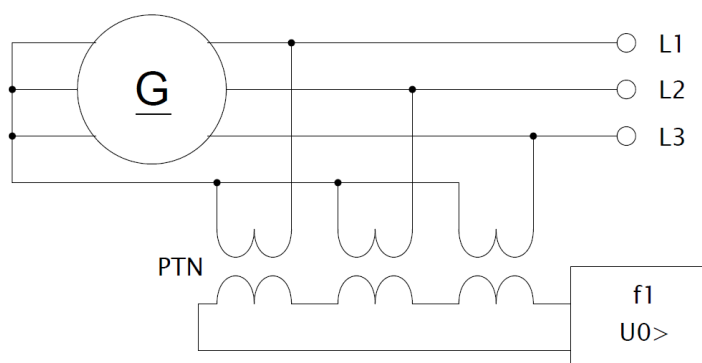
Generátor může být také chráněn příčnou rozdílovou ochranou. Ta hlídá dva stejné paralelně pracující přístroje, jejichž proud musí být také shodný. Tímto způsobem mohou být chráněny paralelní větve statorového vinutí synchronního generátoru.

Další nezbytnou součástí ochran generátoru je nadproudová a zkratová ochrana. Tento prvek chrání stroj proti vnějším zkratům mimo stroj a zároveň slouží jako záloha pro rozdílovou ochranu. Tato ochrana bývá většinou blokována podpětovým článkem, který je zobrazen na obrázku dále. Ten je tam z toho důvodu, aby ochrana poznala, zda jde o vzdálený zkrat nebo o zkrat blízký. Pokud je zkrat blízký dojde k poklesu napětí a ochrana zareaguje. Další výhodou je, že ochrana nereaguje při přetížení, které se také většinou neprojevuje poklesem napětí.



Obr. 5 - Schéma zapojení nadproudové zkratové ochrany (PTN – přístrojový transformátor napětí) [7]

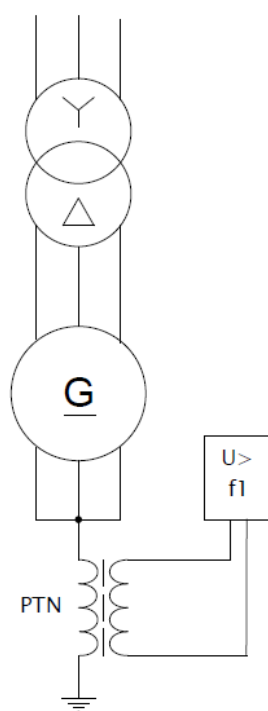
Dále se proti zkratu chrání závity satorového vinutí. Zde se dá použít příčná rozdílová ochrana. Nevýhodou je však to, že musí mít generátor vyvedeny uzly paralelních větví satoru. Pokud tak není, využívá se skutečnosti, že pokud dojde k závitovému zkratu, tak dojde k nevyvážení svorkového napětí stroje. A to zároveň znamená vznik nulové složky trojfázového napětí na svorkách. Zapojení takové ochrany můžeme vidět na obrázku dále. Uzel hvězdy vstupního vinutí měřicích transformátorů napětí je připojen na uzel generátoru. Při poruše se pak na měřicích transformátorech napětí objeví třikrát nulová složka napětí. [7] [6]



Obr. 6 - Schéma zapojení závitové ochrany synchronního stroje [7]

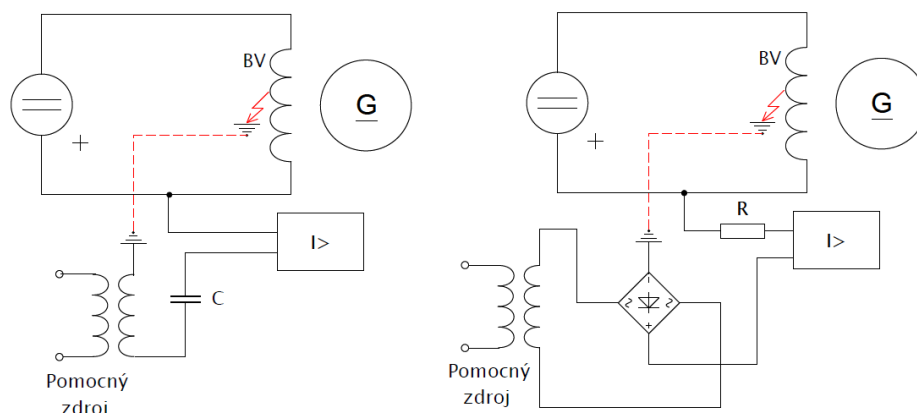
2.1.2 Ochrany proti zemnímu spojení

Zemní spojení může vzniknout jak na statoru, tak na rotoru stroje. Je to nepříjemná porucha a stroj se proti ní musí náležitě chránit. Na statoru se tato porucha projevuje nesymetrií napětí. Této nesymetrie využívá následující z ochran, která se v praxi používá. Díky napěťové nesymetrii vznikne na nulovém bodu generátoru napětí, které se měří a jeho velikost je ovlivněna místem zemního spojení. Důležité je zmínit, že se využívá frekvenčně závislé ochrany, která je citlivá pouze na první harmonickou. Pokud by tuto závislost ochrana neměla, mohlo by dojít k falešnému zapůsobení ochrany.



Obr. 7 - Schéma zapojení ochrany proti zemnímu spojení na statoru [7]

Proti zemnímu spojení se chrání také rotor synchronního generátoru. Tato ochrana stroj neodstavuje, ale pouze signalizuje zemní spojení. Odstavení pak provádí obsluha stroje. Ochrana využívá propojení proudového obvodu ochrany, které při poruše vznikne. Tato ochrana může být zapojena více způsoby. Zapojení takové ochrany je zobrazeno na obrázku dále. Vpravo je zobrazeno uspořádání s usměřňovačem, vlevo je uspořádání s kondenzátorem. [7]



Obr. 8 - Schéma zapojení ochrany proti zemnímu spojení na budicím vinutí stroje (na rotoru) [7]

2.1.3 Ochrany proti nestandardním stavům generátoru

Proudové přetížení

Jednou ze základních ochran je ochrana proti proudovému přetížení statoru. Je důležitá zejména proto, že při proudovém přetížení stroje dochází k jeho nedovolenému oteplení, a to způsobuje rychlejší stárnutí izolace. Při vyšších hodnotách může způsobit i zkrat. Generátory jsou přetěžovány poměrně často například pokud dojde k výpadku nějakého blízkého zdroje a podobně. Z tohoto důvodu se při krátkodobém přetížení stroj neodstavuje, ale ochrana signalizuje stav obsluze generátoru. U strojů, které jsou často přetěžovány, nebo pracují s proměnlivým zatížením, se sleduje teplota přímo na vinutí pomocí termistorů a ochrana funguje na základě změřených hodnot teplot na vinutí. [7]

Ztráta buzení

Ztrátou buzení dojde ke skokové změně budicího napětí. Skokový pokles budicího napětí způsobí i snížené napětí na výstupu stroje. U synchronního stroje dojde k prokluzu pólů a k asynchronnímu chodu. Budicí vinutí dále nedodává dostatek jalového výkonu na magnetizaci stroje a ten si jalový výkon začne brát ze sítě. Odběr magnetizačního proudu ze sítě způsobuje nárůst proudu generátoru na statorovém vinutí, a tím i k jeho přetěžování. Jako ochrana se používá impedanční ochrana s offset-mho charakteristikou. Tato ochrana stroj nevypíná, ale umožňuje chod stroje v asynchronním stavu při sníženém dodávaném výkonu. [8] [7]

Nadpětí/Podpětí

Chrání synchronní generátor proti důsledkům, která vzniknou při náhlém odlehčení nebo zatížení jalovým výkonem. Dalším důvodem změny napětí může být chyba na

regulátoru napětí. Pro ochranu se využívá měřicích transformátorů napětí na výstupu generátoru.

Nesymetrické zatížení

Při nesymetrickém zatížení stroje vzniká zpětná složka proudu. Tato zpětná složka proudu vytváří v generátoru magnetické pole. Do rotoru se vlivem tohoto proudu indukují vířivé proudy, které způsobují větší oteplení stroje a jsou úměrné velikosti nesymetrie. Právě hodnota zpětné složky proudu se měří a na základě její velikosti působí ochrana. Dovolenu velikost nesymetrie stanovuje výrobce a nastavují se dle něj i jednotlivé stupně ochrany. [7]

Zpětný výkon

Jedním ze závažných nestandardních stavů je také zpětný tok činného výkonu. Tento stav nastává, pokud dojde k rychlé ztrátě výkonu na hřídeli generátoru (nečekané zpomalení turbíny atd.). Generátor je pak nucen přejít do motorického režimu a začne spotřebovávat energii ze sítě, která je potřebná pro točení stroje. Aby k tomuto stavu nedocházelo používá se takzvaná směrová (nebo také zpětná) wattová ochrana. Pomocí měřicích transformátorů proudu a napětí kontroluje směr toku činného výkonu. Ochrana vybavuje dle nastavení poměrné hodnoty zpětného výkonu, která je vztažena ke zdánlivému jmenovitému výkonu stroje. [7]

Samobuzení

Samobuzení stroje vzniká v případě, že synchronní generátor napájí velkou kapacitní zátěž (nezatížené vedení, velmi málo zatížené vedení). Na svorkách generátoru se zvyšuje napětí, které nemůže být sníženo odbuzením. Ochrana tak hlídá přepětí na svorkách generátoru a je blokována minimálním budicím proudem budicího vinutí.

Ložiskové proudy

U synchronního generátoru může dojít ke stavu, kdy se vlivem magnetické nesouměrnosti se může objevit rozdíl napětí mezi rotorem a statorem stroje. Vlivem rozdílu potenciálů přes ložiska začne téct proud, který poškozuje ložiska. Dnes jsou ložiskové pánve vyráběny z izolačních materiálů, takže tento stav nastává pouze při poruše izolace. Jednou z možností, jak indikovat proud ložisky, je průvlekovým transformátorem umístěným na hřídeli stroje.

2.2 Rozdělení používaných ochran podle výkonu stroje

Norma ČSN 33 3051 (Ochrana elektrických strojů a rozvodných zařízení) udává povinné a doporučené druhy ochran pro synchronní generátory podle jejich zdánlivého výkonu.

Tabulka 1 - Rozdělení používaných ochran podle zdánlivého výkonu synchronního generátoru

Druh ochrany	Výkon synchronního generátoru (MVA)					
	$S < 1$	$1 < S < 5$	$5 < S < 10$	$10 < S < 50$	$50 < S < 200$	$200 < S$
Nadproudová zkratová	X (11)	X (11)	X (11)	X (11)(1)	X (11)(1)	X (11)(1)
Zkratová podimpedanční				X (1)	X	X
Přetížení statoru	(X)	X	X	X	X	X
Rozdílová		X	X	X	X	X
Nadpět'ová (2)	(X)	X	X	X	X	X
Zemní statoru		X	X	X	X (3)	X (3)
Zemní rotoru		X	X	X	X	X
Závitová (4)				(X)	(X)	(X)
Zpětná wattová (5)		X	X	X	X	X
Nesouměrné zatížení				X	X	X
Při ztrátě buzení					X	X
Při podbuzení					X	X
Přetížení rotoru					(X)	X
Ložisková (8)						X
Prokluz rotoru						X (1)
Proti ztrátě stability						X (1)
Podkmitočtová			(X) (9)	(X) (9)	(X)	X
Nadkmitočtová						X
Při přesycení (8)					(X)	(X)
Proti asynchron.chodu						(X)
Při poklesu napětí a kmitočtu v ES					(X)	(X)

X - ochrana se použije (X) - ochrana se doporučuje

Předcházející tabulka tedy říká, jaká ochrana je u stroje s určitým výkonem potřeba. Tam, kde je symbol X se ochrana musí použít, a tam, kde je symbol (X) je ochrana doporučena. V tabulce jsou také u jednotlivých symbolů X čísla, které specifikují možnosti chránění. Co čísla znamenají je vysvětlené v tabulce dále.

Tabulka 2 - Význam čísel v tabulce 1

(1)	Použije se buď jedna nebo druhá ochrana podle provozních podmínek.
(2)	Ochrana dvoustupňová nebo časově závislá.
(3)	Ochrana musí chránit 100 % délky vinutí.
(4)	Ochrana se použije pouze pokud, má-li vinutí statoru paralelní větve.
(5)	Ochrana se použije u protitlakých soustrojí, pracujících s protitlakem 0,8 Mpa a vyšším.
(6)	Použijí se dvě ochrany
(7)	Pokud to výrobce alternátoru dovoluje, může být nastaveno snížené zatížení v asynchronním chodu.
(8)	Po dohodě s výrobcem stroje.
(9)	U dieselgenerátorů.
(10)	Ochrana je s odblokováním při podpětí.
(11)	Ochrana může být s odblokováním při podpětí.

3 Praktická část

3.1 Seznámení se se systémem ochran a buzení Arcteq

Přístroj od společnosti Arcteq je nový inovativní přístroj, který by měl být schopen zajistit ochranu a buzení generátoru do výkonu 200 MVA. Na rozdíl od tradičních budících systémů by měl ušetřit mnoho prostoru potřebného k instalaci budícího systému a ochran. Dále jeho výrobci předpokládají menší provozní náklady a čas potřebný na instalaci systému.

Celý budící systém se skládá ze dvou zařízení, jimiž jsou AQ-G257 IED a AQ-GC30, což je výkonový můstek s IGBT tranzistorem. [5]

3.1.1 Hardware systému ochran a buzení Arcteq

AQ-G257 IED



Obr. 9 - AQ-G257 IED

AQ-G257 IED je přístroj, jehož předchozí verze byly navrženy pro ochranu transformátorů, motorů nebo generátorů. Této verzi byla přidána možnost buzení generátoru. Přístroj realizuje nastavení ochran pro generátor a zároveň komunikuje s budičem AQ-GC30 pomocí vysokorychlostního optického kabelu. Zařízení je osazeno binárními vstupy a výstupy, které mohou být volně programovatelné pomocí IED logického editoru, který je součástí softwaru pro toto zařízení. Díky tomu je zařízení adaptabilní pro různé aplikace buzení i ochran. Toto IED může být použito jak pro aplikaci statických budičů, tak i rotačních. [5]

AQ-GC30



Obr. 10 - AQ-GC30

AQ-GC30 je zdroj budícího napětí. O usměrnění jeho napájení se stará třífázový usměrňující můstek. Hodnota usměrněného napětí je regulována pomocí IGBT tranzistoru, který je řízen pulzně šířkovou modulací (PWM). Je schopen budit až 30 A stejnosměrného proudu a jeho funkce jsou nastavovány pomocí IED pro snadné volení základních parametrů a řízení buzení.

3.1.2 Software systému ochran a buzení Arcteq

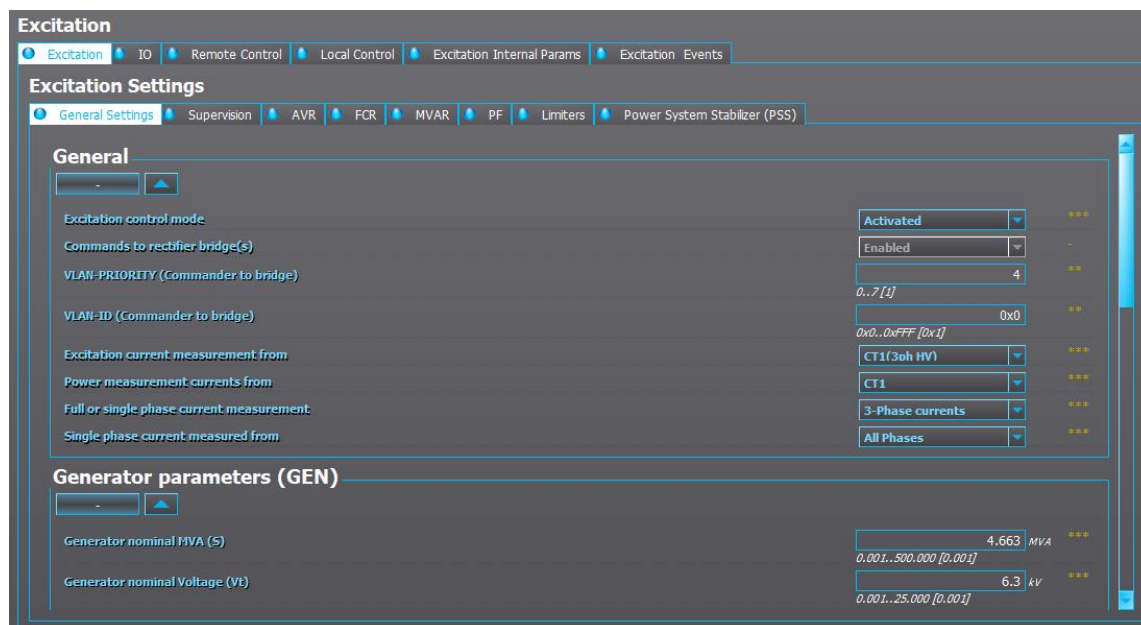
Pro nastavení jednotlivých funkcí v jednotce AQ–G257 IED slouží program AQtivate 200. Pomocí tohoto programu se nastavují ochrany, buzení a základní parametry generátoru. Program je moderně graficky zpracován a nabízí uživatelsky přívětivé prostředí. Dále program nabízí čtení jednotlivých měřených hodnot načtených ze zařízení. Tyto hodnoty mohou být dále vyhodnoceny pomocí AQviewer, který AQtivate také obsahuje.

Jednotlivá nastavení jsou ukládána do “aqs“ souborů, které mohou být do AQ–G257 IED nahrány, nebo naopak stáhnuty z tohoto zařízení do PC. Zároveň může být prováděna konfigurace v online nebo offline módu. Pro konfiguraci v online módu musí být jednotka připojena k PC pomocí Ethernet portu a kabelu RJ-45.



Obr. 11 - Základní nabídka

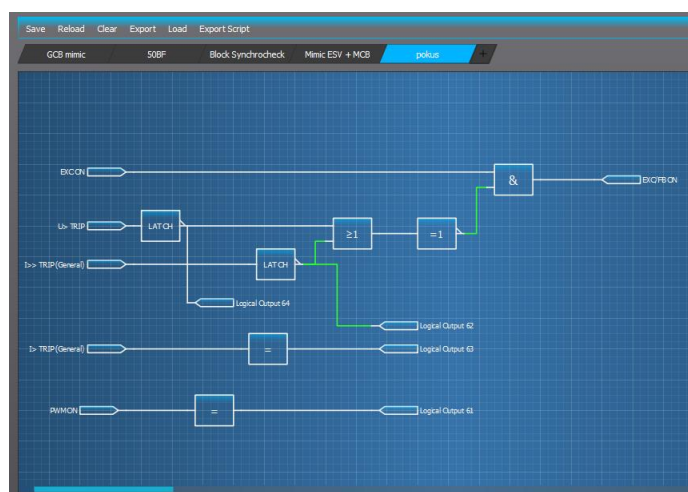
Při otevření programu AQtivate se na pravé straně zobrazí hlavní nabídka, kde se nachází 7 ikon. V první ikoně General se nastavují základní věci, jako jsou jazyk, jméno zařízení a podobně. Za další ikonou Protection jsou zobrazeny všechny ochrany a možnost jejich aktivace. Ochrany jsou pak rozděleny na proudové, napěťové, frekvenční a podobně. Tam se jednotlivé typy ochran nastavují. Dále se zde nachází ikona Control. Zde jsou umístěna nastavení všech binárních vstupů a výstupů. Také tu nalezneme nastavení LED diod, které jsou umístěné vpravo od obrazovky AQ G-257 IED. Tato ikona skrývá také nastavení fázovače a synchrochecku. Buzení se nastavuje za volbou Excitation. Je zde umístěno i nastavení základních parametrů generátoru. IP adresu a podobně lze nastavit ve složce Communication, což je důležité zejména pro připojení zařízení k PC. K tomuto nutno dodat, že veškerá tato nastavení lze provádět i přímo na zařízení pomocí funkčních tlačítek a LED displeje. Veškeré veličiny, které přístroj měří, lze zobrazit ve složce Measurement, ve které se nachází i nastavení použitých transformátorů proudu a napětí. V poslední složce Monitoring lze aktivovat funkci, která hlídá napěťové a proudové transformátory, aby při jejich poruše nedošlo k bezdůvodnému odstavení generátoru. Dále je zde například teplota přístroje nebo aktuální napájecí napětí. Prostředí zobrazené po rozkliknutí některé ze složek, můžete vidět na následující obrázku na příkladu Excitation, tedy buzení.



Obr. 12 - Nastavení buzení v programu AQtivate

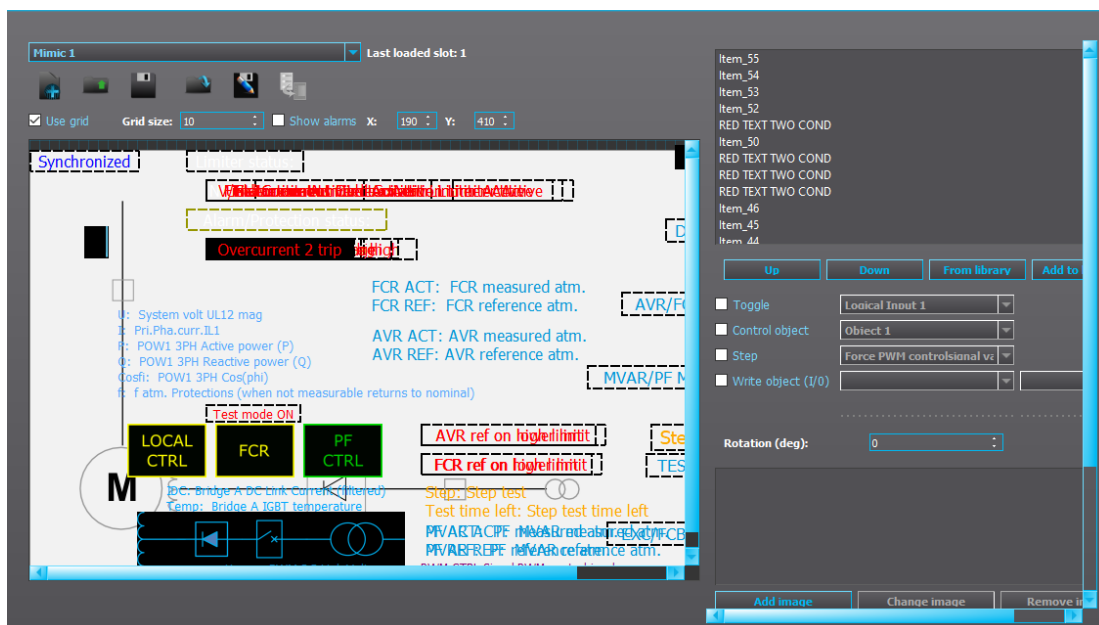
Program AQtivate obsahuje i logický editor, ve kterém lze pomocí funkčních bloků programovat binární vstupy a výstupy. Lze také použít 64 logických proměnných, které mohou být použity například k zobrazování textu v mimickém editoru. V mimickém editoru se programuje obrazovka AQ G-257 IED, kam lze vložit schéma zapojení generátoru a nastavovat chybové hlášení, či hlášení ochran.

Na obrázku dále můžete vidět příklad logického editoru, kde byly použity výstupy z přepěťové a dvou nadproudových ochran. Logické výstupy pak byly nastaveny pro hlášení v mimickém editoru. Ve schématu je také k vidění propojení bloků zelenou barvou. Tou se rozlišuje aktivní a neaktivní část propojení v logickém schématu.



Obr. 13 - Příklad v logickém editoru

Na následujícím obrázku se nachází snímek obrazovky mimického editoru. Vytvořit zde lze i 5 obrazovek, mezi kterými je možno na zařízení listovat. Na této obrazovce vidíme důležité hodnoty a parametry. Pro testovací účely jsou varovná hlášení naskládána přes sebe, jelikož se zkouší vždy jedna ochrana nebo omezovač. Dále je graficky rozlišeno, zda je zapnuté buzení a PWM modulace.



Obr. 14 - Mimický editor v programu AQtivate

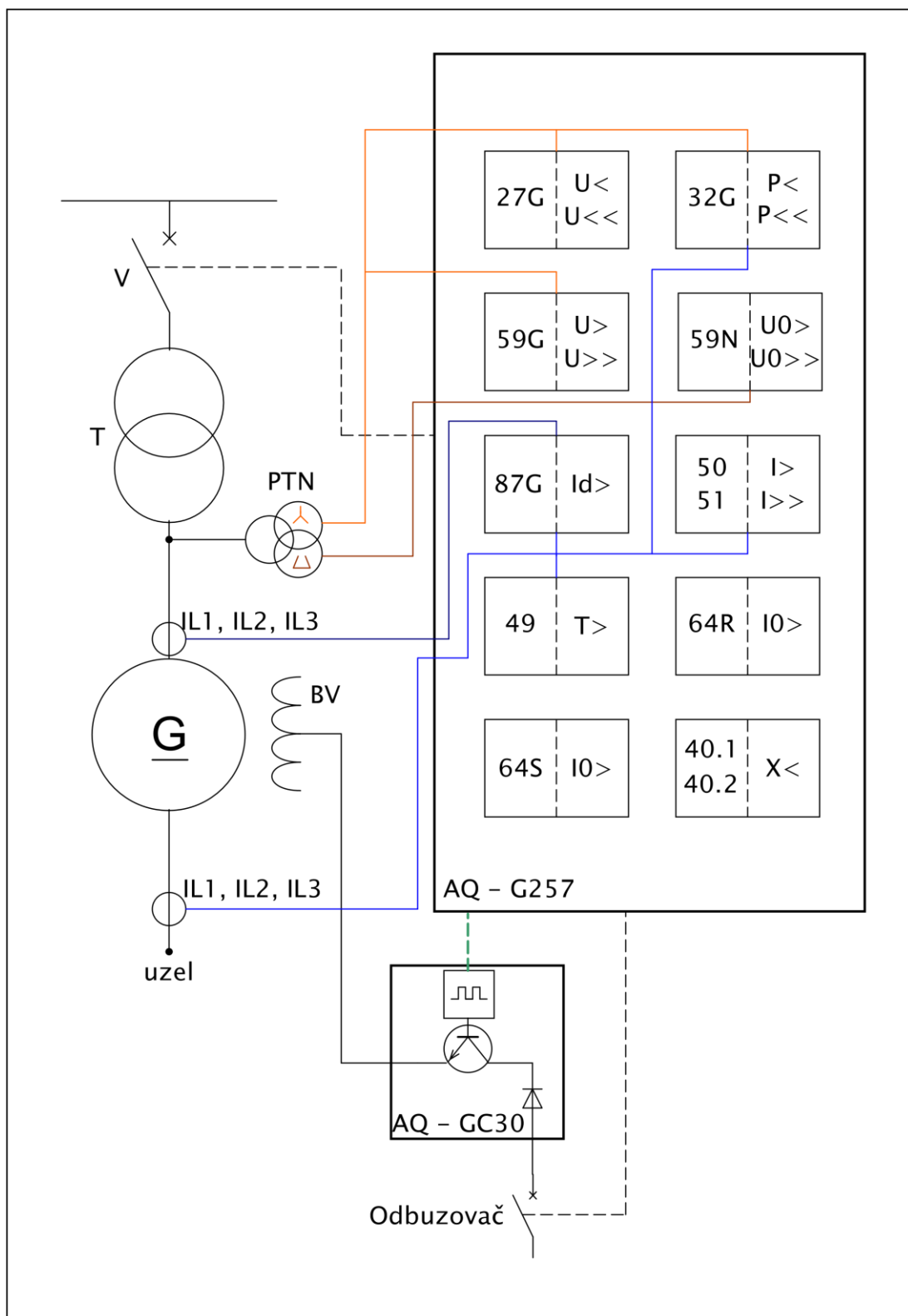
3.2 Návrh jednopólového schématu ochran a buzení

Obsahem této práce je i návrh schématu pro malý synchronní generátor, přičemž výkon generátoru by měl být okolo 2 MVA. Při návrhu ochran jsem se řídil dle české normy ČSN 33 3051. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, ochrany, které se pro generátor použijí, závisí na velikosti výkonu stroje. Pro tento stroj jsou to tedy podle tabulky v teorii tyto ochrany.

- Nadproudová/zkratová
- Ochrana proti přetížení statoru
- Rozdílová ochrana (diferenciální ochrana)
- Napěťová ochrana
- Zemní ochrana statoru
- Zemní ochrana rotoru
- Zpětná wattová ochrana

Pro schéma byl použit systém Arcteq AQ-G257 IED s výkonovým můstkem AQ-

GC30. Jednotlivé ochrany jsou naznačeny ANSI kódy, které jsou dále vysvětleny. K ochranám jsou přivedeny jednotlivé veličiny od napěťových nebo proudových transformátorů, podle toho, jaké veličiny ochrana potřebuje.



Obr. 15 - Jednopolové schéma buzení a ochran pro malý synchronní generátor

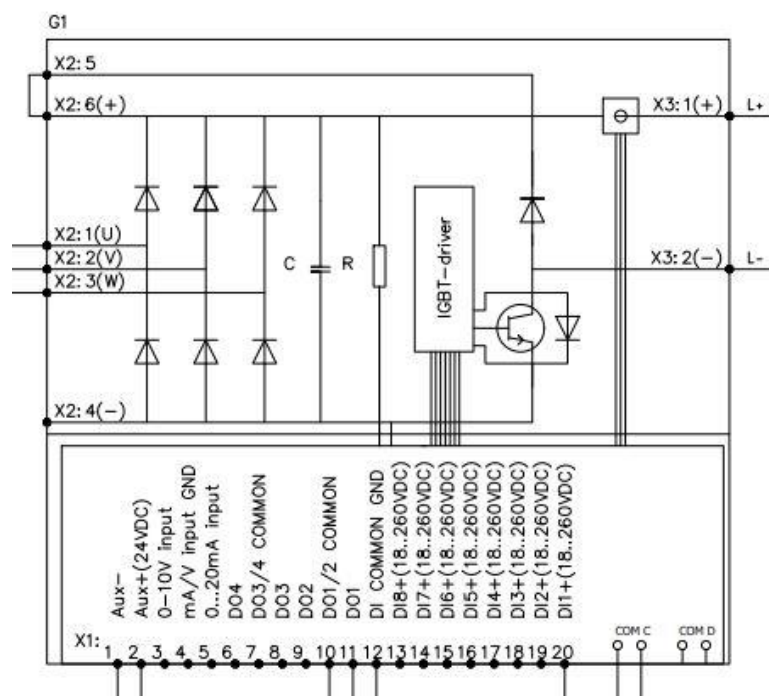
Při pohledu na schéma můžeme na levé straně vidět základní jednopólové uspořádání vývodu synchronního generátoru. Je zde zobrazen generátorový vypínač (V), vývodový transformátor a měřicí transformátory proudu a napětí. Signály z těchto transformátorů jsou všechny vyústěny do AQ – G257 IED. Pod tímto zařízením je naznačen výkonový můstek AQ – GC30, který je propojen optickým kabelem, jenž je naznačen zelenou čárkovanou čarou. Je zde zobrazen i odbuzovač a budicí vinutí (BV). Ochrany aktivní v AQ – G257 IED jsou popsány dále.

Jako základní ochrana proti zkratům na statoru je zde implementována rozdílová ochrana (87G), která vyhodnocuje vstupní proudy do generátoru a proudy ze strany hvězdy generátoru. Při nastaveném rozdílu těchto proudů vybavuje, jak je popsáno v teorii. Jako doplňková ochrana je zde zahrnuta nadproudová ochrana (50) a zkratová ochrana (51). Pro případ, že je generátor tepelně přetěžován statorovým proudem, je ve schématu ochrana proti přetížení statoru generátoru (49). Touto ochranou musí být generátor vybaven. Ochrana počítá teplotní model, který zahrnuje i chladnutí vinutí stroje a jeho předešlé stavy. Ochrana počítá s proudy buď ze strany hvězdy generátoru, nebo z výstupu generátoru. Dále je zde dle normy přepět'ová ochrana (59G). Ta snímá napět'ové signály z napět'ového transformátoru a je rozdělena do dvou stupňů. Mimo jiné jsem do schématu zařadil podpět'ovou ochranu (27G), která vyhodnocuje stejnou vstupní veličinu jako přepět'ová ochrana a je také rozdělena do dvou stupňů. Další důležitou ochranou zahrnutou ve schématu dle normy, je zpětná wattová ochrana (32G). Ta potřebuje signály jak z proudových, tak napět'ových transformátorů, přičemž proudový signál může být jak z výstupní strany generátoru, tak ze strany hvězdy generátoru. Další použitou ochranou je ochrana proti zemnímu spojení na statoru synchronního generátoru. Ta může být realizována dvěma způsoby. Jedním z nich je sledování nulové složky napětí z otevřeného trojúhelníka napět'ového transformátoru (59N). To však není stoprocentní ochrana, protože ochrana nevybaví, pokud je zemní spojení blízko uzlu generátoru. Dalším ze způsobů je to, že se sleduje proud z uzlu generátoru do země (64S), pokud je generátor nepřímou uzemněn přes zemnicí transformátor. Dále se pak dle normy generátor chrání proti zemnímu spojení na rotoru generátoru (64R). Zapojení této ochrany zde není zobrazeno kvůli přehlednosti schématu. Její princip je popsán v teorii a dále v kapitole sekundární zkoušky. Ve schématu je zobrazena také ochrana proti podbuzení a ztrátě buzení (40.1, 40.2). Dle normy není vyžadována, avšak pro ochranu stroje je důležitá a pro následné testování ochran implementovaných v zařízení Arcteq AQ – G257 IED je zásadní funkčnost této ochrany. Neméně důležitá je selektivita s hlídačem meze podbuzení.

3.3 První test systému buzení Arcteq

První test měl za úkol odzkoušet mód, který má systém Arcteq implementován a je nazýván jako open-loop (otevřená smyčka). Při tomto módu by neměl systém hledět na nastavené regulační konstanty a měřené hodnoty, kterými se jinak budicí systém řídí. Budič byl napájen sníženým napájecím napětím 90 V střídavých a na výstupu z budicího systému byl nejprve připojen odpor o hodnotě 15 Ω . Pomocí funkčních tlačítek na IED byla nastavována požadovaná odchylka budicího napětí. Při tomto testu se však ani přes mód over-loop IGBT tranzistor téměř neotevřel, což bylo způsobeno tím, že budicí systém neočekával skokovou změnu proudu, kterou by normálně budicí vinutí omezilo svou indukčností.

Byla tedy upravena zátěž na výstupu tak, aby více odpovídala budicímu vinutí synchronního stroje. Do celkové zátěže byly přidány sériově tři tlumivky o indukčnosti 135 mH. Zvětšen byl také odpor zátěže na 35 Ω . Při této zátěži se IGBT tranzistor otevřel, nicméně průběh napětí na zátěži zobrazený osciloskopem nevypadal dle očekávání. Průběh napětí nebyl vyhlazen a pulzoval po kladných vlnách sinusovky 50 Hz, což by odpovídalo tomu, že budič neobsahuje vyhlazovací kondenzátor. Proto byl kontaktován výrobce budicího systému, aby zaslal vnitřní schéma zapojení, které je zobrazeno dále.

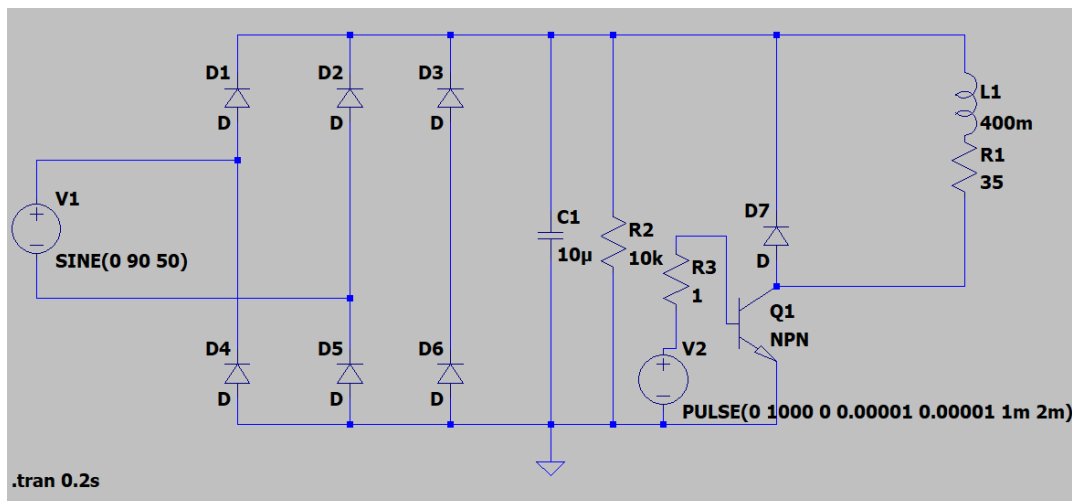


Obr. 16 - Vnitřní silové schéma budiče Arcteq AQ-GC30

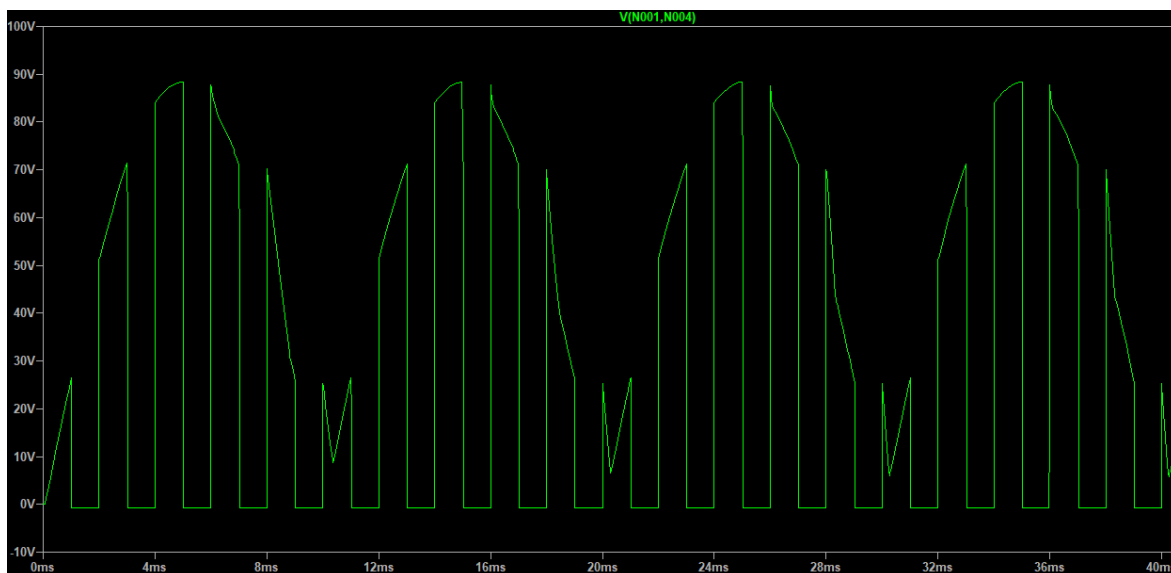
Ze schématu je vidět, že výkonový můstek vyhlazovací kondenzátor obsahuje.

Dalším z důvodů onoho průběhu napětí mohlo být snížené jednofázové napájecí napětí 90 V AC. Proto byla vytvořena simulace obvodu při různých druzích napájení v simulačním programu.

V simulačním programu nebyl nalezen IGBT tranzistor, proto byl nahrazen klasickým bipolárním NPN tranzistorem, což na výsledky simulace nemá vliv. Dále je zde uvedeno pouze zapojení s jednofázovým napájením. Při zapojení s třífázovým napájením se schéma změnilo pouze v napájení třífázového diodového můstku.



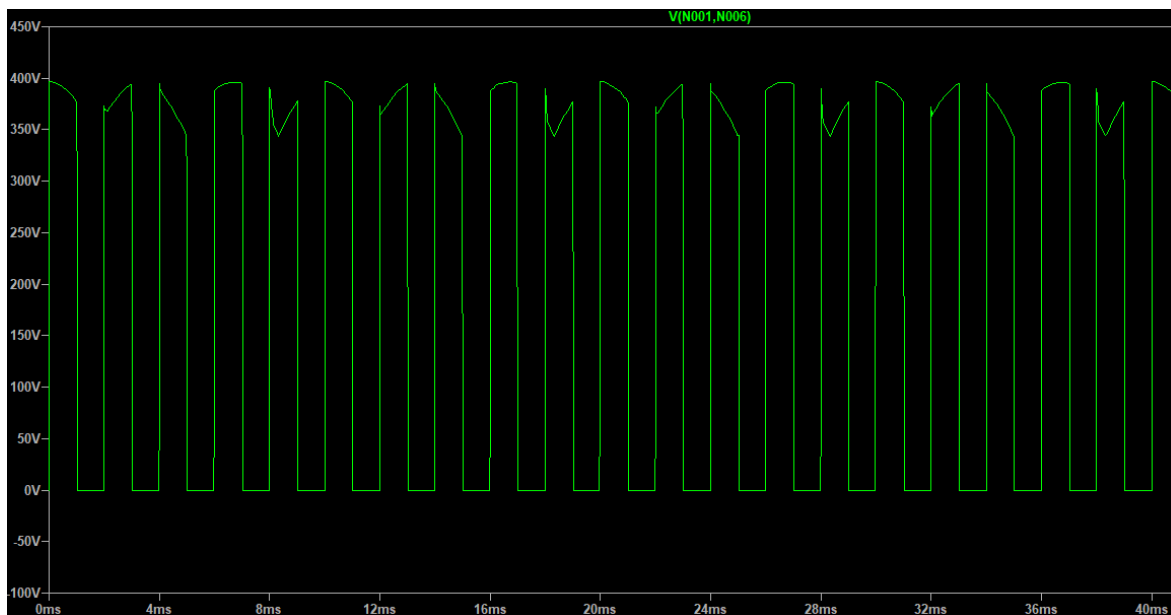
Obr. 17 - Schéma zapojení v simulaci v simulačním programu



Obr. 18 - Průběh napětí na zátěži při jednofázovém napájení 90 V AC

Na předchozím obrázku je vidět průběh napětí na zátěži při provedené simulaci v simulačním programu. Průběh v simulaci se shodoval s průběhem naměřeným při prvním testu. Je jasně vidět, že napětí pulsuje podle sinusoidy 50 Hz, jejíž záporná vlna se “převrací”

nahoru, což je způsobeno jednofázovým napájením třífázového diodového můstku, který se v této konfiguraci chová jako jednofázový diodový můstek.



Obr. 19 - Průběh napětí na zátěž při třífázovém napájení AC

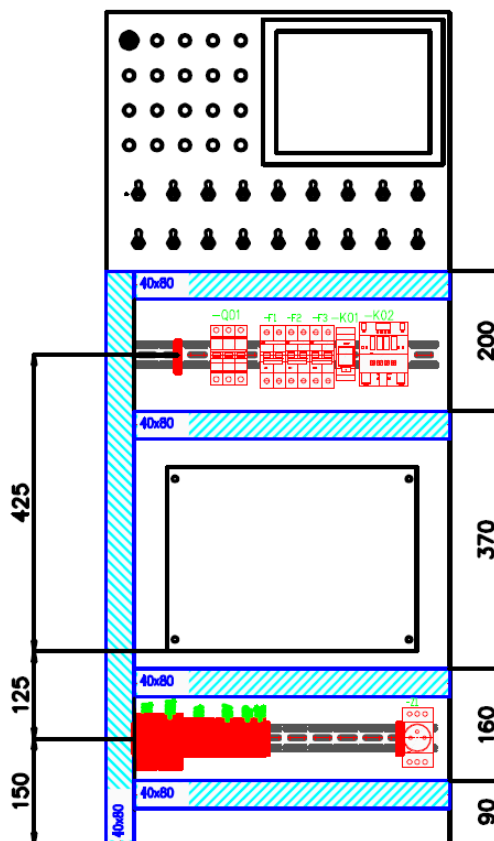
Z průběhu ze simulace vychází, že vyhlazovací kondenzátor je navržen na vyšší napětí, tudíž se při jednofázovém sníženém napájení nestihl nabít a nefungoval správně.

3.4 Stavba stojanu pro budicí systém Arcteq

Pro pohodlnější testování budicího systému Arcteq jsem navrhl stojan na základě schématu zapojení. Při návrhu byly nároky kladené hlavně na kompaktnost a multifunkčnost systému. Celý návrh stojanu jsem vytvořil v programu CAD, dle kterého byl celý stand sestaven. Návrh je zobrazen dále na obrázku.

V pravém horním rohu je naznačen AQ-G257 IED. Vlevo od IED se nachází 20 signálních LED diod, které jsou připojeny na programovatelné výstupy 24 V. Pod těmito signálkami jsou umístěny ve dvou řadách dvupolohové přepínače, které budou připojeny na vstupy IED. Pomocí tohoto uspořádání lze nasimulovat různé provozní stavy.

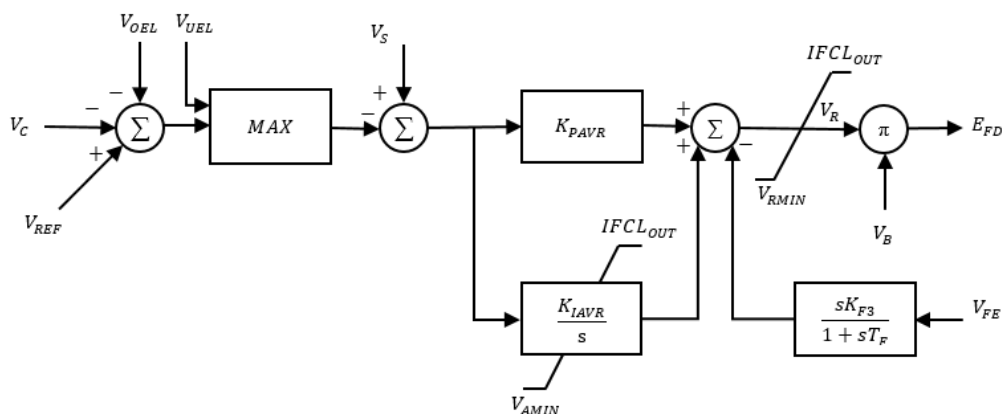
Níže pod spínači jsou na DIN liště upevněny ochranné prvky a stykače. Pod nimi se nachází vlastní výkonový můstek AQ-GC30. Na spodní DIN liště jsou pak upevněny svorkovnice se zásuvkou. Všechny prvky jsou propojeny žlaby 40 x 80 mm pro snadné uložení kabelů.



Obr. 20 - Nákres stojanu v programu CAD

3.5 Test automatického regulátoru napětí

AVR je automatický regulátor napětí implementovaný v jednotce Arcteq AQ G-257. Je to klasický a nejdůležitější mód ve kterém budič systém Arcteq pracuje. Tento mód je tak důležitý, že se podle něj občas pojmenovává celý řídicí systém buzení AVR (z anglického Automatic Voltage Regulator). Je zde využit PID (proporcionálně integračně derivační) regulátor, který pracuje v uzavřené smyčce. Jako všechny uzavřené smyčky má regulátor referenční hodnotu a aktuální hodnotu. Pokud se aktuální hodnota odlišuje od referenční hodnoty, regulátor upraví buzení synchronního generátoru, aby byly hodnoty v rovnováze. Mód je aktivován operátorem a deaktivován výběrem jiného řídicího módu například FCR (z anglického Field Voltage Regulator), což je přímá regulace budičského proudu. [5]



Obr. 21 – Ilustrativní obrázek automatického regulátoru v jednotce Arcteq [5]

Pro test jsem použil malý synchronní generátor, který byl poháněn asynchronním motorem.

Štítkové hodnoty synchronního generátoru

Zdánlivý výkon: 10 kVA

Činný výkon: 8 kW

Jmenovitý proud: 14,5 A

Jmenovité napětí: 400 V

Budicí napětí: 16-49 V

Budicí proud: 3,57-8,34 A

Budicí vinutí synchronního generátoru bylo zapojeno přímo na výkonový můstek AQ-GC 30 a výstupní napětí generátoru bylo vyhodnocováno jednotkou AQ-G 257. Dále bylo výstupní napětí zobrazeno pomocí osciloskopu, aby byly vidět případné překmity regulátoru napětí. Otáčky generátoru byly řízeny pomocí měniče kmitočtu, který napájel asynchronní motor. Jelikož měl měnič možnost měnit otáčky asynchronního motoru pouze ručně, nebo analogovým vstupem 0-10 V, nebylo možné, aby Arcteq řídil otáčky sám a sám přifázoval. Proto bylo měření prováděno pouze ve stavu, kdy generátor běžel naprázdno. Arcteq měl aktivovány pouze základní ochranu proti přepětí a byly nastaveny základní limity pro buzení.



Obr. 22 - Fotky pracoviště

Výsledkem testu bylo, že se regulátor choval dle očekávání a jevil překmity podle nastavení velikosti integrální složky regulátoru.

3.6 Nastavení a sekundární zkoušky ochran

Pro testování byl vybrán projekt ochran pro generátor o výkonu 4,663 MVA. Dále jsou uvedeny jmenovité hodnoty a převody použitých měřicích transformátorů. Ty jsou důležité zejména pro výpočet sekundárních proudů, které budou injektovány pomocí Omicron cmc 256-6 do přístroje Arcteq G 257.

Jmenovité hodnoty alternátoru:

Zdánlivý výkon (S_n): 4,663 MVA

Činný výkon (P_n): 3,730 MW

Účinník ($\cos \varphi$): 0,8

Jmenovité napětí (U_n): 6 300 V

Frekvence (f): 50 Hz

Jmenovitý proud (I_n): 427 A

Otáčky (n): 1500 ot/min.

Proudový transformátor:

Primární proud: 600 A

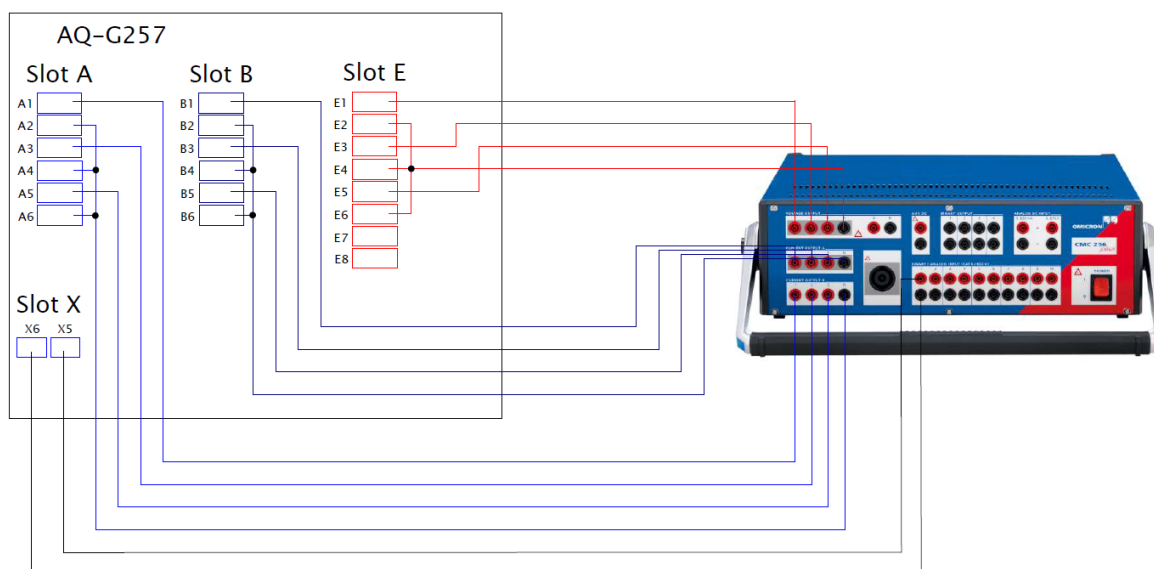
Sekundární proud: 1 A

Napět'ový transformátor:

Primární napětí: 6000 V

Sekundární napětí: 100 V

Před použitím systému Arcteq v praxi musí být otestovány všechny náležitě ochrany implementované v této jednotce, aby byla zajištěna jejich správná funkce i v provozu. Časové a limitní parametry, kdy mají ochrany vypínat, byly předem spočteny a ověřeny pomocí softwaru ve společnosti Invelt elektro pro daný projekt, přičemž jednotlivé hodnoty se mohou dále v praxi měnit v závislosti na selektivitě ochran a nutných korekcí přímo v elektrárně. Ochrany v jednotce Arcteq AQ – G257 byly testovány pomocí přístroje Omicron cmc 256-6, který byl zapojen přes stand dle schématu zapojení, které je zobrazeno dále. Omicron byl ovládán pomocí PC, v němž byl nainstalován program Test universe, který je k tomu určený.



Obr. 23 - Zjednodušené schéma zapojení při sekundárních zkouškách

Při sekundárních zkouškách se v první řadě zkouší, jestli přístroj korektně měří. Chyby v měřeních ovlivňují zejména ochrany a v praxi mohou mít fatální následky. Systém Arcteq AQ – G256 byl testován přístrojem Omicron, což je velice přesný a kalibrovaný zdroj napětí a proudů. Na předešlém schématu zapojení je přístroj vidět. Je opatřen jedním

třífázovým napětovým výstupem a dvěma proudovými. Signály z Omicronu byly propojeny vodiči do jednotky Arcteq, která má ze zadní strany několik slotů se vstupy a výstupy. Pro přehlednost jsou ve schématu zobrazeny pouze použité vstupy a výstupy. Sloty A a B jsou proudové, slot E je napětový a na slotu X je binární výstup, který signalizuje, že ochrana vybavila. V následující tabulce jsou zobrazeny nastavené hodnoty v přístroji Omicron a naměřené hodnoty zařízením Arcteq.

Tabulka 3 - Srovnání nastavených a naměřených hodnot

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
IL1-S1	1 x I_n	0,999 x I_n	OK
IL2-S1		0,999 x I_n	OK
IL3-S1		0,999 x I_n	OK
IL1-S2		0,998 x I_n	OK
IL2-S2		0,999 x I_n	OK
IL3-S2		0,998 x I_n	OK
UL1-L2	1 x U_n	1 x U_n	OK
UL2-L3		1 x U_n	OK
UL3-L1		1 x U_n	OK
f	50,00 Hz	49,998 Hz	OK
P	3730 kW	3726,8 kW	OK
Q	2802 kVAr	2796 kVAr	OK
S	4663 kVA	4658 kVA	OK
Cos φ	0,8	0,8	OK

Z tabulky je vidět, že přístroj měří velice přesně, tudíž se dají předpokládat i dobré výsledky u testu ochran. Jelikož Arcteq zobrazuje násobky nebo hodnoty pouze primárního proudu a napětí, jsou zde uvedeny tak, jak byly v Arctequ. Nominální hodnota sekundárního proudu byla 712 mA, která vychází z převodu proudového transformátoru. Dále se zkoušely všechny ochrany. Vždy byla zapnuta pouze právě zkoušená ochrana, jelikož by ostatní nastavené ochrany mohly ovlivnit výsledek, navíc byly všechny ochrany nastaveny na jeden binární výstup (X5, X6), tudíž by nebylo rozpoznáno, která ochrana právě zapůsobila.

Diferenciální ochrana 87G (ID>)

Jako první byla testována diferenciální ochrana, chránící generátor proti vnitřním zkratům. V prvním kroku se do obou proudových vstupů injektoval jmenovitý proud potenciálního generátoru a vyhodnocoval se diferenciální proud a proud stabilizační. Hodnoty těchto proudů jsou v poměrných jednotkách vztažených ke jmenovitému proudu zobrazeny níže v tabulce. Dále jsem nastavil hodnotu rozdílového proudu, při kterém má

ochrana okamžitě vybavit na 10 % jmenovitého proudu. Proudů ve všech fázích byly nulové a desetiprocentní proud se pouštěl postupně do každého proudového vstupu zvlášť. První jsem testoval vstupní stranu generátoru a pak stranu hvězdy generátoru.

Tabulka 4 - Diferenciální ochrana

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
$I_{DIFF}/I_{STAB} - L1$	712 mA _{SEC}	0.00 / 2.00	OK
$I_{DIFF}/I_{STAB} - L2$		0.00 / 2.01	OK
$I_{DIFF}/I_{STAB} - L3$		0.00 / 1.99	OK
Trip $I_D - L1S1$	71,2 mA _{SEC} / 0 ms	71,3 mA _{SEC} / 50 ms	OK
Trip $I_D - L2S1$		71,1 mA _{SEC} / 51 ms	OK
Trip $I_D - L3S1$		71,1 mA _{SEC} / 52 ms	OK
Trip $I_D - L1S2$	71,2 mA _{SEC} / 0 ms	71,3 mA _{SEC} / 52 ms	OK
Trip $I_D - L2S2$		71,2 mA _{SEC} / 49 ms	OK
Trip $I_D - L3S2$		71,3 mA _{SEC} / 53 ms	OK

Z tabulky vyplývá, že rozdílová ochrana u systému Arcteq funguje správně a ve velice rychlém čase. Výsledný čas vypnutí by byl však delší, díky době reakce vypínacích členů.

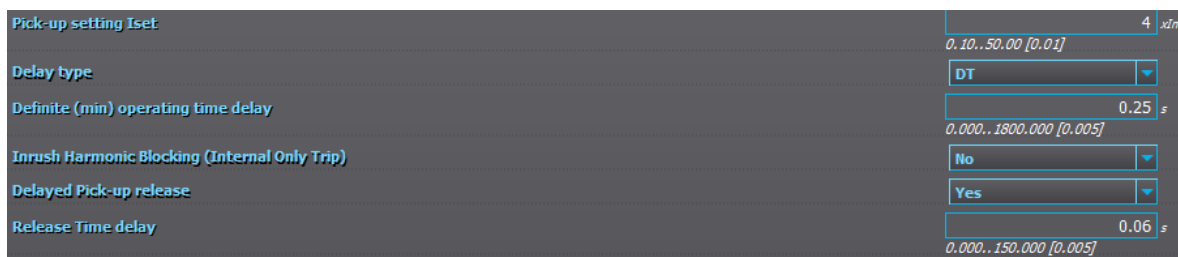
Zkratová a nadproudová ochrana 50G ($I_{>>}$), 51G ($I_{>}$)

Následně jsem zkoušel zkratovou ochranu, která slouží jako záložní ochrana. Proudů pro tuto ochranu jsou brány většinou ze strany hvězdy generátoru. Tak tomu bylo i zde. Opět jsem testoval každou fázi zvlášť. Zkoušená hodnota, při které by měla ochrana vybavit, byla stanovena na 4 x I_n tedy 1,71 kA_{PRIM}, což odpovídá 2,85 A_{SEC}. Navíc jsem nastavil zpoždění ochrany na 250 ms, jelikož funguje pouze jako záložní.

Tabulka 5 - Zkratová ochrana

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
Trip $I_{>>} - L1$	2,85 A _{SEC} / 0,25 s	2,85 A _{SEC} / 252 ms	OK
Trip $I_{>>} - L2$		2,85 A _{SEC} / 254 ms	OK
Trip $I_{>>} - L3$		2,85 A _{SEC} / 252 ms	OK

Ochrana fungovala opět bez problému a vypínala v nastaveném čase. Na obrázku dále je zobrazeno nastavení ochrany v programu AQtivate, kterým se ochrana nastavuje.



Obr. 24 - Nastavení zkratové ochrany v programu AQtivete

V rámci testů této ochrany byla zkoušena také nadproudová ochrana jako poslední stupeň proudových ochran. Hodnota proudu, při které ochrana vybaví, byla stanovena na $1,54 \times I_n$, což odpovídá cca 660 A primárního proudu a 1,1 A sekundárního proudu. Jelikož je tato ochrana posledním stupněm, bylo nastaveno zpoždění 5 s. I tato ochrana fungovala správně. Hodnoty naměřených vypínacích hodnot a časů jsou dále. Nastavení v programu AQtivete bylo obdobné jako u zkratového stupně.

Tabulka 6 - Nadproudová ochrana

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
Trip I Δ - L1	1,1 A _{SEC} / 5,00 s	1,1 A _{SEC} / 5.00 s	OK
Trip I Δ - L2		1,1 A _{SEC} / 5.02 s	OK
Trip I Δ - L3		1,1 A _{SEC} / 5.00 s	OK

Zemní ochrana statoru 59N (U₀>)

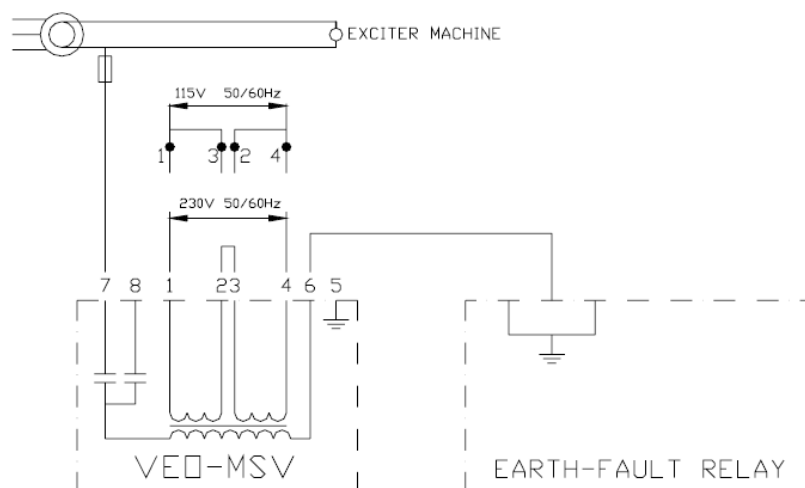
Další nezbytnou ochranou je zemní ochrana statoru. Zde je více možností, jak poruchu detekovat. Byla vybrána možnost sledování napětí z transformátoru, který má sekundární vinutí do otevřeného trojúhelníka. Ke snímání tohoto napětí byly využity dva vstupy na slotu E s označením E5 a E6. Je to volný vstup, který může být využit pro snímání napětí sítě pro synchronizaci nebo právě na tyto účely. Mezní hodnota tohoto napětí byla 10 V a u ochrany bylo nastaveno zpoždění 5 s. Jak je vidět z tabulky, tak ochrana fungovala bez problému a vypínala v daném čase.

Tabulka 7 - Zemní ochrana statoru

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
Hodnota U ₀	10 V _{SEC} / 5 s	10,1 V _{SEC} / 5,005 s	OK

Zemní ochrana rotoru 64R ($I_0 >$)

Pro tuto ochranu musí být použita speciální jednotka VEO-MSV, kterou firma Arcteq také nabízí. Zapojila by se do jednoho ze čtyř citlivých proudových vstupů a má zvláštní napájení.



Obr. 25 - Schéma zapojení jednotky VEO-MSV [9]

Na schématu výše je vidět volba napájení a propojení s relé zemní poruchy, což by představoval Arcteq AQ – G256. Při zemní poruše by se pak uzavřel obvod, kterým by protékal proud o velikosti, která by závisela na velikosti zvoleného kondenzátoru, který je zde také zobrazen. Ve společnosti Invelt nebyla tato injektážní jednotka k dispozici. Byl tedy otestován pouze citlivý proudový vstup, který funguje správně. Nicméně nemůže být potvrzena správná funkce ochrany bez tohoto zařízení. [9]

Ochrana proti zpětnému toku výkonu 32G ($P \leftarrow$)

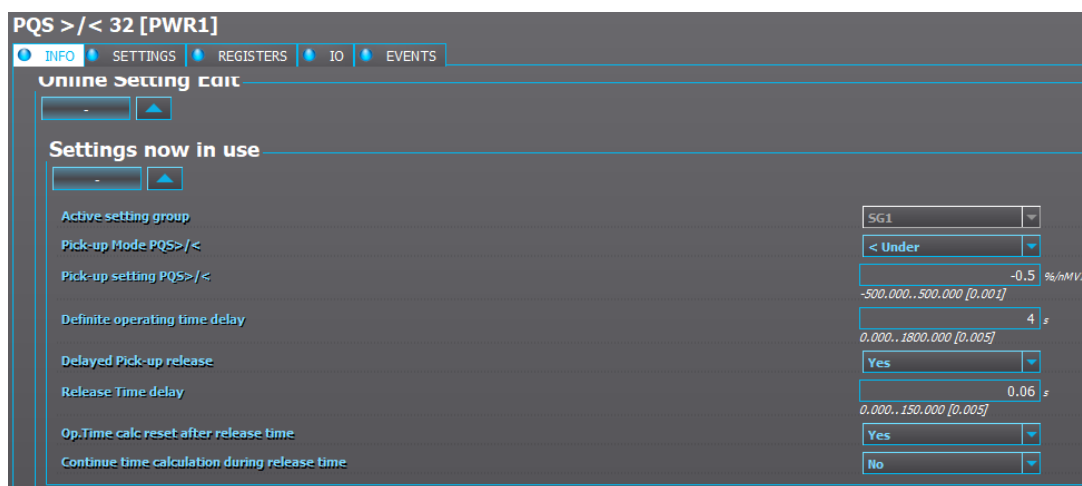
Při selhání pohonu (turbíny) dochází k tomu, že generátor může přejít do motorického chodu a začne odebírat výkon ze sítě. Zpětný tok energie vyhodnocuje zpětná wattová ochrana. Tato ochrana využívá napěťové vstupy ve všech fázích a proudové ze strany hvězdy generátoru. Výpočet velikosti výkonu vychází ze ztrát na turbosoustrojí. První stupeň ochrany byl stanoven na -0,5 % nominálního výkonu. První stupeň je obvykle časově zpožděn o 4 sekundy a je blokován stavem rychlozávěru turbíny. Je-li tedy zavřena pára do turbíny, vypíná ochrana v krátkém čase. Druhý stupeň je neblokovan stavem rychlozávěru a vypíná po uplynutí 20 sekund. Delší čas je nutný, protože po přifázování turbosoustrojí obvykle dochází k zákmitu činného výkonu a je nutné dát regulátoru turbíny čas na jeho stabilizaci. Ochrana byla testována se jmenovitým napětím a otočil se pouze

směr proudu.

Tabulka 8 - Zpětná wattová ochrana

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
1 st stage Trip	100 V _{SEC} / 3,5 mA _{SEC} /4.00 s	4 mA _{SEC} / 4.02 s	OK
2 nd stage Trip	100 V _{SEC} / 3,5 mA _{SEC} /20.0 s	3,8 mA _{SEC} / 20.26 s	OK

Ochrana fungovala správně a vypínala v nastavených časech. Dále je uveden obrázek s nastavením prvního stupně ochrany v programu AQtivate.



Obr. 26 - Příklad nastavení zpětné wattové ochrany generátoru

Ochrana proti přepětí 59 (U>/U>>)

Jednou z nejdůležitějších ochrán je přepětí ochrana vyhodnocující velikost sdružených napětí. V tomto případě má dva stupně, přičemž první stupeň byl nastaven na 112 % Un a měl přepětí pouze signalizovat se zpožděním 10 sekund, což bylo zajištěno LED diodou a zobrazením nápisu na displeji Arctequ. Druhý stupeň byl nastaven na 130 % Un a vybavoval téměř okamžitě. Z následující tabulky je vidět, že ochrana fungovala bez problému.

Tabulka 9 - Ochrana proti přepětí

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
Alarm U> - L1-L2	117,6 V _{SEC} /10 s	117,6 V _{SEC} / 10.02 s	OK
Alarm U> - L2-L3		117,6 V _{SEC} / 10.01 s	OK
Alarm U> - L3-L1		117,6 V _{SEC} / 10.01 s	OK
Trip U>> - L1-L2	136,5 V _{SEC} /0,06 s	136,5 V _{SEC} / 57 ms	OK
Trip U>> - L2-L3		136,5 V _{SEC} / 56 ms	OK
Trip U>> - L3-L1		136,5 V _{SEC} / 58 ms	OK

Frekvenční ochrana 81 (F>, F>>, F<, F<<)

Frekvenční ochrana byla testována ve čtyřech stupních. Dva nad nominální frekvenci a dva pod nominální frekvenci, z nichž vždy první stupeň měl signalizovat nadfrekvenci/podfrekvenci a další měl mít popud k odstavení generátoru (trip). Podfrekvenční stav je nebezpečný zejména kvůli tomu, že může způsobit přesycení alternátoru magnetickým tokem a s ním se může alternátor nadměrně zahřívat. Nadfrekvenční funkce chrání proti zvýšení otáček při odpojení od soustavy. Naměřené hodnoty se shodovaly s nastavenými, takže můžeme říci, že ochrana funguje správně.

Tabulka 10 - Frekvenční ochrana

POPIS	TESTOVANÁ HODNOTA	NAMĚŘENÁ HODNOTA	VÝSLEDEK
Alarm f<	49 Hz / 5,00 s	49 Hz/ 5,00 s	OK
Trip f<<	48 Hz / 100 ms	48 Hz/ 128,6 ms	OK
Alarm f>	51 Hz / 5,00 s	51 Hz/ 5,00 s	OK
Trip f>>	52 Hz / 100 ms	52,01 Hz/ 108,5 ms	OK

Ochrana proti podbuzení a ztrátě buzení 40.1 40.2 (X<)

Ochrana se nastavuje podle P-Q diagramu výrobce generátoru. V programu AQtivate se nastavují dva body v diagramu, které určí přímku. Příмка je pomyslná mez, na které se ochrana okamžitě aktivuje. Selektivita ochrany a omezovače je zobrazena v kapitole zabývající se omezovači buzení.



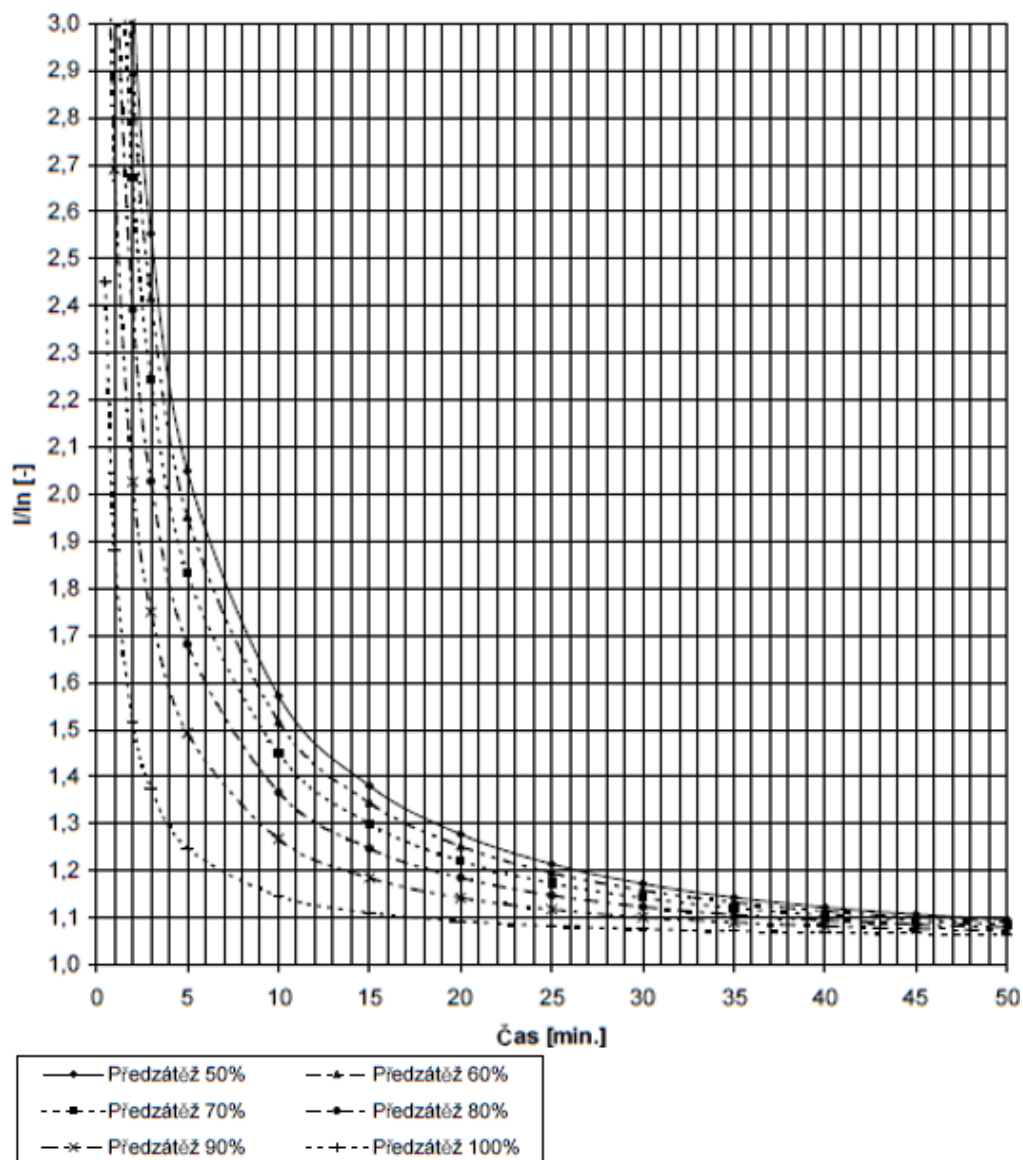
Obr. 27 - Nastavení ochrany proti podbuzení v programu AQtivate

Testování probíhalo tak, že se injektovaly do zařízení napětí a proudy odpovídající jednotlivým jalovým a činným výkonům. Ochrana byla vyzkoušena pouze pro jeden bod, a to 60 % činného výkonu. Ochrana reagovala dle očekávání a vybavovala dle nastavené přímkou v P-Q diagramu.

Ochrana proti proudovému přetížení statoru 49 (T>)

Pro tuto ochranu jsou důležité zejména křivky přípustného přetížení stroje, které vychází z teplotních modelů a jsou stanoveny výrobcem generátoru. Ochrana musí počítat i s předchozím zatížením stroje, jelikož brání hlavně nedovolenému oteplení statorového

vinutí. Křivky stanovené výrobcem pro daný synchronní generátor jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



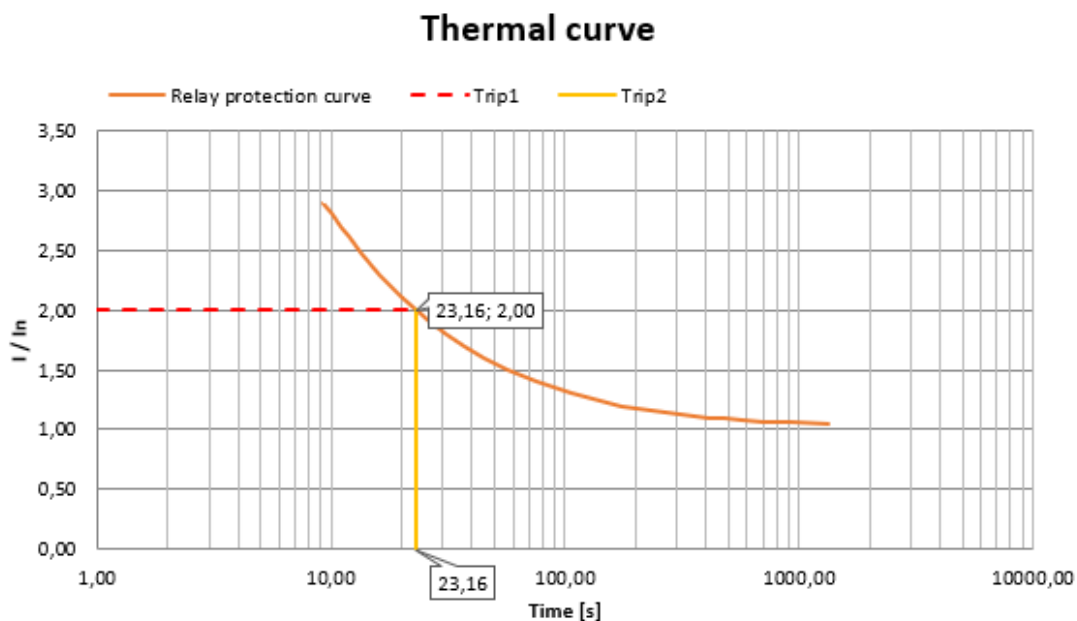
Obr. 28 - Křivky přípustného přetížení

Od ochrany je vyžadováno, aby její charakteristiky byly buď totožné se zobrazenými, nebo se musí křivky ochrany nacházet bod křivkami přípustného zatížení synchronního generátoru. Pro správné nastavení byl společností Arcteq zaslán excel, kde lze grafem ověřit správnost tohoto nastavení. Při testu ochrany bylo proměřeno pouze pár hodnot, jelikož se po každém vybavení ochrany musí čekat na vychladnutí generátoru. Ochrana však vybavovala vždy pokaždé o něco dříve, než bylo vypočteno v excelu. Výrobce zařízení byl na toto upozorněn.

Motor Thermal image settings		Environmental settings	
Injected current	854,00 A (pri)	CT	600 A/Pri
Nominal current	427 A (pri)		1,00 A/Sec
Pick-up current (x In)	1,04 xIn		
NPS Biasing in use	No NPS biasing		
Time constants	Single		
Long Heat T const (cold)	14,00 min		
Long Cool T const Stop	3,00 min		
Cold Reset Theta Default	100,00 %		
Trip level	100,00 %		
Dev.Temp (tmax)			F
Amb. T Selection			Manual Set
Man.Amb.Temp.Set			20,00 deg
Ambient line or curve			Linear est.
Temp.reference (tref)			20,00 deg
Max.ambient temp			60,00 deg
k at max.amb.temp.			0,90 xIn
Min.ambient temp			10,00 deg
k at min.amb.temp.			1,04 xIn
Calculated values		Motor characteristics	
Injected current	1,42 A (sec)	Motor sevice factor	1,00 xIn
Current scaled to In	2,00 pu	Hot Condition theta limit	70,00 %
Time to trip	23,16 s	Max. Locked rotor current	3,00 xIn

Obr. 29 - Excel zaslaný firmou Arcteq

Na předchozím obrázku je vypočteno, že při dvojnásobku statorového proudu by měla ochrana vybavit v čase 23,16 sekundy. Naměřená hodnota pro tuto hodnotu však byla 16,25 sekundy. Jelikož je hodnota nižší, nebyl by stroj ohrožen a už by působil omezovač statorového proudu, jehož charakteristika je uvedena v kapitole zabývající se omezovači buzení. Na následujícím grafu je zobrazena charakteristika vytvořená pomocí výpočtu v excelu zaslaným výrobcem.



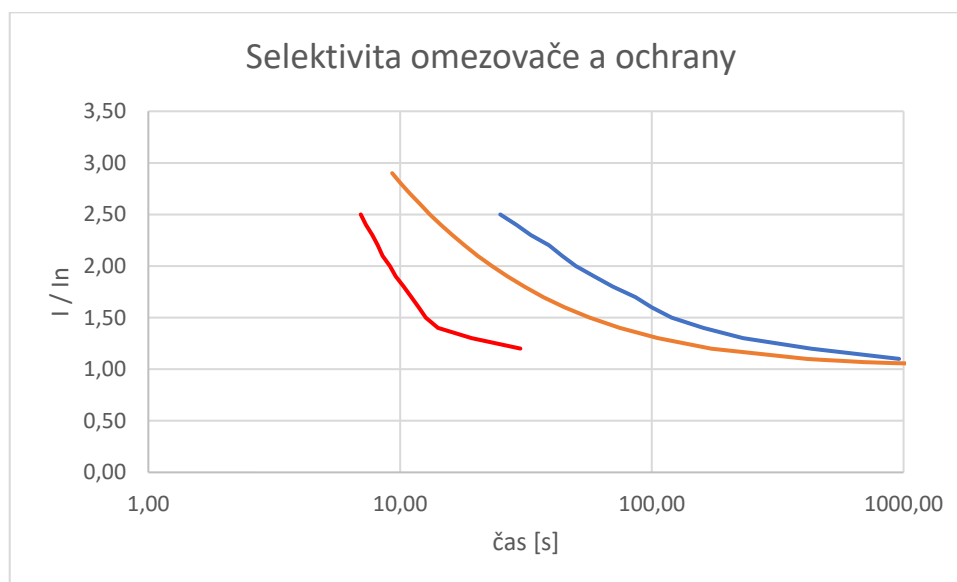
Obr. 30 - Křivka působení ochrany podle výpočtu zaslaným výrobcem

3.7 Nastavení a sekundární zkoušky omezovačů buzení

Pro synchronní generátor a jeho bezpečný provoz je mimo správné nastavení ochran, také důležité správné nastavení omezovačů buzení. Z pravidla nejprve zasahují omezovače a poté ochrany.

Omezovač statorového proudu

Omezovač statorového proudu počítá vždy s předzátěží 100 %. Jeho křivka, kdy začíná působit, musí být vždy pod ochranami vyhodnocující tepelné přetížení statoru. Zároveň je výrobcem generátoru stanoveno, že stator nesmí být přetěžován 2,5 násobkem jmenovitého proudu po dobu delší jak 10 sekund. Na následujícím grafu je zobrazena vzájemná selektivita ochrany proti přetížení statoru a omezovače statorového proudu.



Obr. 31 - Vzájemná selektivita ochrany proti tepelnému přetížení statoru a omezovače statorového proudu

Červenou barvou je naznačen omezovač, oranžovou barvou ochrana při stoprocentní předzátěži, která byla teoreticky vypočtena pomocí excelu, který byl poslán společností Arcteq. Modrou barvou je pak znázorněna křivka dovoleného zatížení generátoru stanovená výrobcem. Z grafu je jasně vidět, že omezovač bude vždy zasahovat jako první a zároveň je generátor chráněn ochranou proti tepelnému přetížení. Křivka omezovače je vynesena přímo z reálných naměřených hodnot při sekundárních zkouškách. Nastavení omezovače v zařízení AQ-G257 jsem vybral podle orientačního výpočtu uvedeného v manuálu k zařízení a následném doladění jednotlivých konstant, které nebyly v orientačním výpočtu uvedeny, tak aby byla správná selektivita ochrany a omezovače.

Tabulka 11 – Tabulka s časy, kdy přešel omezovač do aktivního stavu

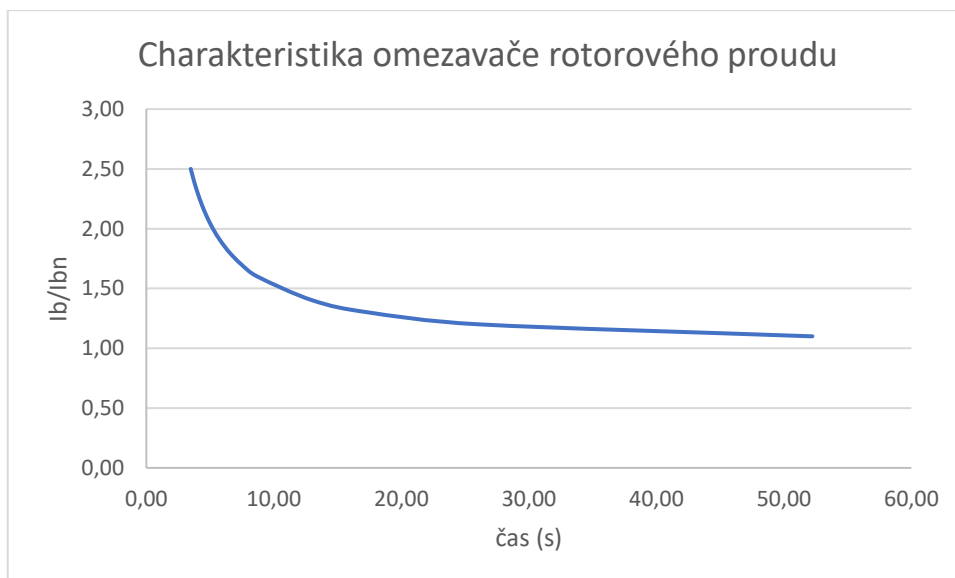
I/I_n (-)	čas (s)
2,5	6,98
2,4	7,314
2,3	7,75
2,2	8,15
2,1	8,52
2	9,1
1,9	9,62
1,8	10,35
1,7	11,1
1,6	11,86
1,5	12,65
1,4	14,14
1,3	19,22
1,2	30,05

Omezovač rotorového proudu

Při testování omezovače rotorového proudu se až během konzultací s výrobcem zjistilo, že regulátor vztahuje hodnoty budicího proudu k budicímu proudu naprázdno I_{b0} . Po optimalizaci nastavení parametrů omezovače jsem získal následující tabulku zobrazující čas zapůsobení omezovače pro různé hodnoty budicího proudu.

Tabulka 12 - Tabulka vypočtených hodnot omezovače budicího proudu

I_{b0} (A)	I_{bn} (A)	I_{bn}/I_{b0} (-)	I_b (A)	I_b/I_{b0} (-)	čas (s)	I_b/I_{bn} (-)
2,10	6,00	2,86	15,00	7,14	3,48	2,50
2,10	6,00	2,86	14,40	6,86	3,73	2,40
2,10	6,00	2,86	13,80	6,57	4,02	2,30
2,10	6,00	2,86	13,20	6,29	4,35	2,20
2,10	6,00	2,86	12,60	6,00	4,75	2,10
2,10	6,00	2,86	12,00	5,71	5,22	2,00
2,10	6,00	2,86	11,40	5,43	5,80	1,90
2,10	6,00	2,86	10,80	5,14	6,53	1,80
2,10	6,00	2,86	10,20	4,86	7,46	1,70
2,10	6,00	2,86	9,60	4,57	8,71	1,60
2,10	6,00	2,86	8,40	4,00	13,06	1,40
2,10	6,00	2,86	7,80	3,71	17,41	1,30
2,10	6,00	2,86	7,20	3,43	26,12	1,20
2,10	6,00	2,86	6,60	3,14	52,24	1,10



Obr. 32 - Charakteristika omezovače budícího proudu vynesena z vypočtených hodnot

Příklad výpočtu:

$$t = \frac{k1}{k2 \cdot \left(\frac{I_b}{I_{b0}} - \frac{I_{bn}}{I_{b0}}\right)} = \frac{1}{0,067 \cdot \left(\frac{8}{2,1} - \frac{6}{2,1}\right)} = 15,67 \text{ s} \quad (6)$$

Kde:

K1 a K2 - Konstanty, které se nastavují v programu AQtivate

I_b - Budící proud

I_{bn} - Jmenovitý budící proud

I_{b0} - Budící proud naprázdno

Působení omezovače jsem ověřil pro následující hodnoty:

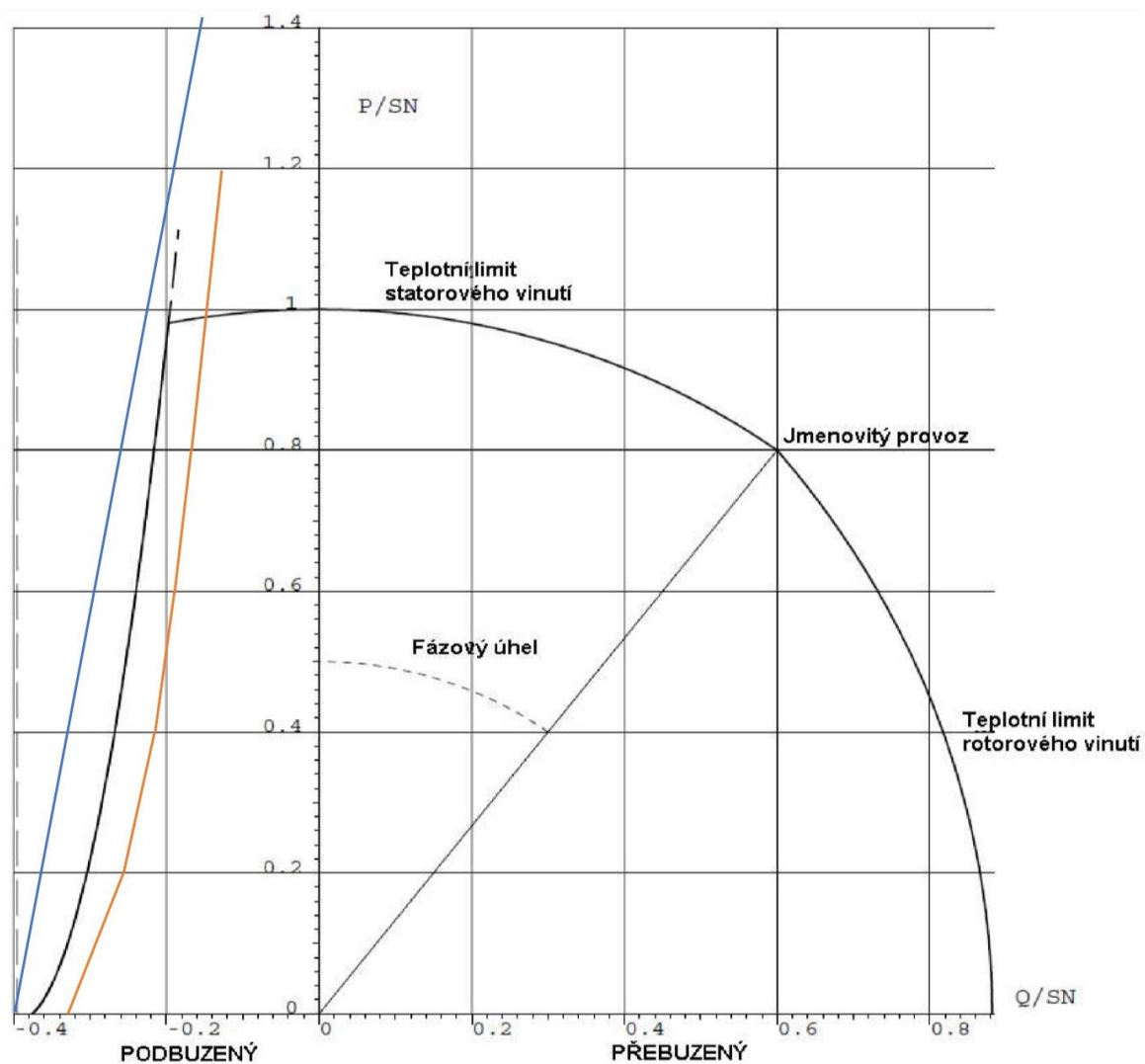
Tabulka 13 - Tabulka s porovnáním naměřených a vypočtených hodnot

I _b (A)	čas (s) vypočtený	čas (s) naměřený
8	15,67	15
7	31,34	30,7
6,5	62,69	62,1

Z tabulky je jasné vidět, že výpočet přibližně odpovídá naměřeným hodnotám.

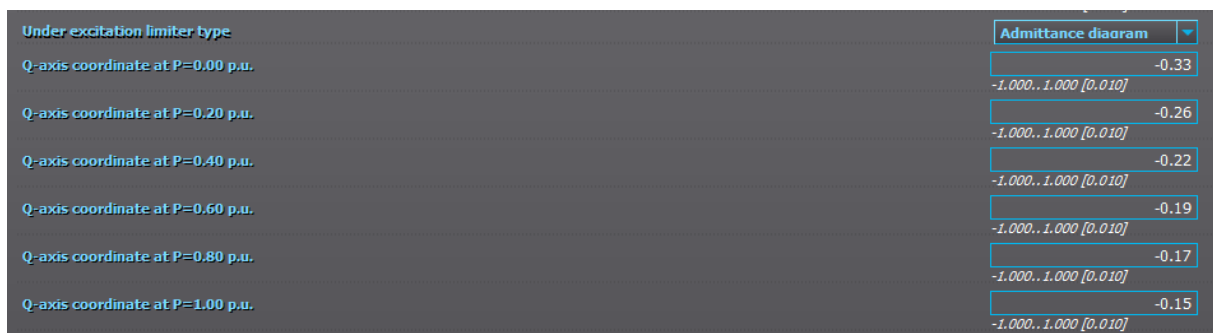
Omezovač meze podbuzení

Omezovač meze podbuzení se nastavuje podle datasheetu výrobce generátoru. Vychází z P-Q diagramu, jehož význam byl zmíněn v teorii. Na následujícím obrázku je zobrazen P-Q diagram synchronního generátoru, pro který byly ochrany a omezovače nastaveny. Omezovač meze podbuzení je znázorněn oranžovými přímkami a ochrana proti podbuzení je znázorněna modrou přímkou.



Obr. 33 - P-Q diagram synchronního generátoru s nastaveným omezovačem podbuzení a ochranou proti podbuzení

Nastavení omezovače se obvykle nastavuje 5 % S_n před mez podbuzení danou výrobcem. Na nadcházejícím obrázku je snímek obrazovky z nastavení omezovače, který je součástí jednotky Arcteq AQ-G257 IED. Omezovač se nastavuje v poměrných jednotkách vztažených k jmenovitému zdánlivému výkonu generátoru.



Obr. 34 - Nastavení omezovače meze podbuzení v programu AQtivate

Test omezovače byl proveden pouze pro jeden bod P-Q diagramu, a to pro 60 % činného výkonu, signalizací toho, že se omezovač aktivoval. Do zařízení AQ-G257 byly injektovány proudy a napětí odpovídající daným hranicím P-Q diagramu obdobně jako tomu bylo u ochrany proti podbuzení. Dynamické chování omezovač se testuje až při uvádění synchronního generátoru do provozu. Omezovač přecházel do aktivního stavu dle předpokladů.

Omezovač V/Hz (přesycení)

Omezovač byl nastaven na poměr $U/f = 1,05$, aby byl umožněn provoz při zvýšeném napětí +5 % U_n . Omezovač reagoval dle očekávání, tedy pokud se poměr napětí a frekvence odchýlil od požadované hodnoty, přešel omezovač do aktivního stavu. Omezovač byl otestován při konstantní frekvenci 50 Hz a při překročení $1,05 \times U_n$ zareagoval. Na následující obrázku je zobrazeno nastavení zařízení v programu AQtivate.



Obr. 35 - Nastavení omezovače proti přesycení v programu AQtivate

Závěr

V rámci této práce jsem vypracoval rešerši na téma buzení a ochran pro synchronní generátory. Popsal jsem zde problematiku budicích systémů a jejich návrhu. Jsou vysvětleny principy budicích systémů a jejich základní rozdělení. Uvedl jsem ochrany pro synchronní generátory, které se v praxi používají a zároveň jsem uvedl rozdělení použití jednotlivých ochran dle českých norem v závislosti na výkonu stroje.

Na základě tohoto rozdělení jsem vybral ochrany, které by byly použity pro malý generátor v rozmezí výkonu od pěti do deseti MVA. Navrhl jsem jednopólové schéma ochran pro generátor ve zmíněném rozmezí výkonu. Schéma jsem kreslil v programu ProfiCad a v návrhu jsem použil budicí systém Arcteq. Použité ochrany ve schématu byly popsány a vysvětleny v teoretické části. Do vybraných ochran jsem zahrnul také ochranu proti podbuzení a ztrátě buzení, kterou norma nevyžaduje. Je však důležitá její selektivita společně s omezovačem podbuzení, což je pro stoprocentní ochranu stroje zásadní.

Hlavním cílem práce bylo nastudovat, a otestovat budicí systém Arcteq. Po studii manuálu k tomuto systému jsem popsal jeho základní podstatu. Zmínil jsem jeho hlavní dvě části, což jsou zařízení AQ-G257 IED a AQ-C30. Vysvětlil jsem spolupráci těchto zařízení a jejich hlavní funkce. Zároveň jsem nastínil PC aplikaci AQtivate, ve kterém se zařízení AQ-G257 IED spravuje a nastavuje.

Při prvním testu zařízení jsem zapojil buzení do zatěžovacího odporu. Test měl ověřit funkci módu over-loop. Při tomto testu se IGBT tranzistor v zařízení AQ-C30 neotevřel, což bylo způsobeno nesprávnou zátěží. Při zapojení vhodné indukčnosti a odporu zařízení fungovalo, nicméně průběh napětí nevypadal dle očekávání. Po zhodnocení všech možných příčin tvaru průběhu a provedení simulací v simulačním programu, jsem problém vyřešil vhodnějším třífázovým napájením.

Dále jsem navrhl stojan dle schématu zapojení, které bylo zasláno společností Arcteq a upraveno společností Invelt pro testovací účely. Návrh stojanu jsem nakreslil v programu CAD a stojan byl sestaven pracovníky společnosti Invelt. Po sestavení stojanu jsem zkontroloval zapojení dle schématu.

Stojan byl použit na testování automatického regulátoru napětí na Fakultě elektrotechnické ZČU, kde byl buzen generátor o výkonu 10 kVA. Test probíhal za přítomnosti vedoucího oddělení buzení společnosti Invelt. Byla ověřena správná funkce tohoto regulátoru v chodu naprázdno.

Ve společnosti Invelt jsem provedl sekundární zkoušky všech ochran použitých v navrženém jednopólovém schématu. Sekundární zkoušky jsem prováděl pomocí přístroje Omicron cmc 256-6. Všechny ochrany splňovaly požadované parametry a vybavovaly dle nastavených hodnot. Jediná zemní ochrana rotoru nemohla být odzkoušena kvůli absenci doplňkového zařízení. Nicméně citlivý proudový vstup fungoval bez problému, tudíž se dá předpokládat správná funkce této ochrany za správného zapojení doplňkového zařízení. Pomocí sekundárních zkoušek byla ověřena i správná aktivace omezovačů buzení. Jelikož se dynamické chování těchto omezovačů zkoušet prakticky nedá, bude ověřeno až v praxi.

Na základě získaných poznatků docházím k závěru, že zařízení lze bezpečně použít pro funkci ochran. Omezovače buzení fungují také bezpečně, nicméně jejich nastavení není pro uživatele dostatečně vysvětleno v manuálu k přístroji a vznikají tak komplikace při správném nastavení těchto omezovačů. Zároveň přístroj nemá implementováno zobrazovací zařízení, které by trvale zobrazovalo záznam důležitých hodnot, jako mají některé konkurenční výrobky. Také chybí zobrazení P-Q diagramu v programu AQtivate. Toto by výrazně zjednodušilo a zkrátilo postup při správném nastavení přístroje a ověření dynamického chování při uvádění do provozu. Tyto nedostatky jsou však spojeny s tím, že zařízení bylo zpočátku navrženo pouze jako ochrana a systém buzení byl navržen až následně. Proto se dá předpokládat, že budou v budoucnu tyto nedostatky opraveny aktualizací softwaru nebo budou obsaženy v dalších verzích přístroje. Integrace ochran a buzení do jednoho kompaktního přístroje má v praxi velký potenciál a lze tedy očekávat, že tato zařízení budou nasazována čím dál častěji a touto cestou se vydají i jiní výrobci ochran a buzení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Máslo, Jan.** výuka. *powerwiki*. [Online] [Citace: 09. 10 2019.] <https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/%C5%98%C3%ADzen%C3%AD%20a%20stabilita%20elektriza%C4%8Dn%C3%AD%20soustavy.pdf>.
- [2] **Hora, Oldřich.** *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*. Praha : SNTL, 1985. 508/21,826.
- [3] **ČSN 35 0255.** *Budicí systémy turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů*. Praha : Český normalizační institut, 1987.
- [4] **EGU.** *Synchronous generators*. [Online] [Citace: 1. 12 2019.] <http://www.egu-prg.cz/synchronous-generators>.
- [5] **Arcteq.** *Generator commander manual* . Vaasa : Arcteq Relays Ltd. Finland.
- [6] **Olšanský, Jindřich.** *fei1.vsb.cz. Ochrany generátorů*. [Online] [Citace: 5. 11 2019.] http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/soes/Ochrany_generatoru1.pdf.
- [7] **Mišák, Stanislav.** *Chránění generátoru*. [Online] [Citace: 24. 11 2019.] http://www.stanislav-misak.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=23:ms3&id=4:model-site&Itemid=1044.
- [8] **Analýza asynchronního chodu generátorů.** [Online] [Citace: 15. 11 2019.] <https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/atp-2003-1-62.pdf>.
- [9] **VEO.** *VEO-MSV (VERSION 3) CURRENT INJECTION DEVICE* . [Online] [Citace: 06. 02 2020.] https://arcteq.fi/wp-content/uploads/2017/03/VEO-MSV_manual_rev3.pdf.

Přílohy