

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Provoz a projekční příprava malé vodní elektrárny**

**Autor:** Bc. Jan Täuber

**Studijní obor:** Aplikovaná Elektrotechnika

**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

**Plzeň 2019**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TÄUBER**

Osobní číslo: **E17N0041K**

Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Provoz a projekční příprava malé vodní elektrárny**

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 :

Diplomová práce "Provoz a projekční příprava malé vodní elektrárny" bude zaměřena na tyto body:

1. Definujte hydroenergetický potenciál na území ČR.
2. Charakterizujte jednotlivé technologické celky a komponenty pro provoz MVE.
3. Na základě konkrétní volby MVE se zaměřte na jednopólové provozní schéma a rozeberte principiálně vlastnosti uvažovaných ochran.
4. Proveďte výpočet, návrh a odůvodnění použití nastavení jednotlivých ochran ve zvolené MVE.
5. Zhodnoťte vliv provozování vodních elektráren na elektrizační soustavu, do níž jsou MVE připojeny.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

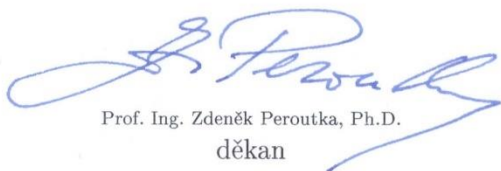
1. GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK. Malé vodní elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
2. BEDNÁŘ, Josef. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
3. Malé vodní elektrárny v České republice 2011: současnost a budoucí perspektivy odvětví : 13. října 2011, Praha. Praha: B.I.D. services, 2011. ISBN 978-80-87534-07-6.
4. Přednášky či skripta z doporučených předmětů.
5. Elektronické informační zdroje, katalogy, projekční podklady.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**

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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá znalostmi provozu a elektrických ochran malých vodních elektráren.

Teoretická část se zaměřuje na provozování malých vodních elektráren na území ČR a na rozbor jednotlivých technologických celků a komponentů pro jejich provoz. V závěru teoretické části je zhodnocen vliv provozování vodních elektráren na elektrizační soustavu.

Praktická část se zabývá teoretickým rozbohem a praktickým výpočtem zkratových poměrů v rozvodně. Následně pokračuje návrhem nastavení, zdůvodněním a odzkoušením generátorové ochrany na MVE Štvanice.

Klíčová slova: Malá vodní elektrárna, vodní turbíny, zkrat, hydroalternátor, elektrická ochrana, SR489, primární zkoušky, sekundární zkoušky, ostrovní provoz

## **Abstract**

This diploma thesis deals with knowledge of the operation and electrical protections of small hydro power plants.

The theoretical part focuses on the operation of small hydroelectric power plants in the Czech Republic and on the analysis of individual technological units and components for their operation. At the end of the theoretical part is evaluated the influence of the operation of hydroelectric power plants in the power system.

The practical part deals with the theoretical analysis and practical calculation of short-circuit conditions in the substation. It continues with the proposal of setting, justification and testing of generator protection relay at the small hydro power plant Štvanice.

Keywords: Small hydro power plant, hydraulic turbines, short circuit, hydroalternator, electrical protection, SR489, primary tests, secondary tests, island mode operation

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem danou práci vypracoval samostatně a veškeré použité zdroje uvedl v seznamu použité literatury. Nejvíce informací jsem použil z projektových dokumentací a odborných literatur.

V Plzni, dne: ..... 2019

.....  
Bc. Jan Täuber

### **Poděkování:**

Rád bych poděkoval mé vedoucí diplomové práce, paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. nejen za odborné vedení, cenné rady a čas poskytnutý během zpracování práce, ale i za vstřícný a trpělivý přístup. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Kalandrovi a kolegům za jejich ochotu a odborné poznatky. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za plnou podporu během studia.

Bc. Jan Täuber

## Obsah

OBSAH .....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD.....	12
1 HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL NA ÚZEMÍ ČR.....	13
1.1 Zdroje vodní energie .....	13
1.2 Hydroenergetické hospodářství a rozvoj MVE v ČR .....	14
1.3 Hydroenergetický potenciál vodního toku .....	15
1.4 Dělení vodních elektráren.....	16
1.5 Vliv provozování vodních elektráren na elektrizační soustavu .....	17
2 STAVEBNĚ HYDRAULICKÉ ŘEŠENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN .....	19
2.1 Vtokové objekty.....	19
2.2 Savky .....	19
2.3 Česle .....	20
3 STROJNÍ ZAŘÍZENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN .....	21
3.1 Základy teorie a dělení vodních turbín.....	21
3.1.1 Rovnotlaké vodní turbíny .....	21
3.1.1.1 Peltonova turbína .....	21
3.1.1.2 Bánkiho turbína .....	22
3.1.2 Přetlakové turbíny .....	22
3.1.2.1 Francisova turbína.....	23
3.1.2.2 Kaplanova turbína.....	23
3.2 Uzávěry.....	25
4 ELEKTROTECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN .....	26
4.1 Hydroalternátory .....	26
4.1.1 Technický popis konstrukce .....	26
4.1.2 Provozní PQ diagram mezních zatížení alternátoru .....	27
4.1.3 Fázování synchronního alternátoru k síti.....	28
4.2 Transformátory .....	29
4.3 Rozvodny .....	30
4.3.1 Konstrukční řešení rozváděče UniGear ZS1 .....	31
4.3.2 Vakuové vypínače .....	31



4.3.3	Plynem izolované vypínače.....	33
<b>4.4</b>	<b>Vlastní spotřeba MVE .....</b>	<b>34</b>
<b>4.5</b>	<b>Řídicí systémy a komunikace.....</b>	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Snímače elektrických veličin .....</b>	<b>35</b>
<b>4.7</b>	<b>Snímače neelektrických veličin .....</b>	<b>36</b>
4.7.1	Měření teploty.....	36
4.7.2	Snímače tlaku .....	37
4.7.3	Měření hladin .....	38
4.7.4	Měření polohy .....	39
4.7.5	Snímání otáček .....	40
<b>5</b>	<b>TECHNICKÝ POPIS MVE ŠTVANICE.....</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Základní charakteristika MVE Štvanice.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Turbína .....</b>	<b>42</b>
<b>5.3</b>	<b>Generátor .....</b>	<b>43</b>
<b>5.4</b>	<b>Vývodový transformátor .....</b>	<b>45</b>
<b>5.5</b>	<b>Budící soustava .....</b>	<b>45</b>
<b>5.6</b>	<b>Vyvedení výkonu .....</b>	<b>48</b>
<b>5.7</b>	<b>Vlastní spotřeba.....</b>	<b>51</b>
<b>5.8</b>	<b>Řídicí systém .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>TEORETICKÝ ROZBOR A PRAKTICKÝ VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1</b>	<b>Rozbor výpočtu zkratových proudů.....</b>	<b>53</b>
6.1.1	Předpoklady pro výpočet.....	53
6.1.2	Postup výpočtu .....	53
6.1.3	Zkratové impedance elektrických zařízení.....	54
6.1.3.1	Náhradní impedance síťového napáječe .....	54
6.1.3.2	Náhradní impedance synchronního alternátoru .....	54
6.1.3.3	Náhradní impedance transformátoru .....	55
6.1.3.4	Náhradní impedance asynchronního motoru .....	56
6.1.3.5	Náhradní impedance kabelů .....	56
6.1.4	Počáteční souměrný rázový zkratový proud .....	56
6.1.5	Nárazový zkratový proud .....	57
6.1.6	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud .....	57
<b>6.2</b>	<b>Výpočet zkratových proudů .....</b>	<b>58</b>
6.2.1	Sestavení náhradního schéma .....	58
6.2.2	Výpočet zkratových impedancí.....	59
6.2.2.1	Síťový napáječ.....	59
6.2.2.2	Synchronní generátor.....	59
6.2.2.3	Vývodový transformátor T1 .....	60
6.2.2.4	Transformátor vlastní spotřeby T2, T3 .....	60

6.2.2.5	Kabelová vedení 3x10–CXEKVCEY 1x50mm <sup>2</sup> .....	61
6.2.2.6	Kabelová vedení 3x1-YY 1x150 + 1x1-YY 1x150 mm <sup>2</sup> .....	62
6.2.2.7	Kabelové vedení 2  3x10–CXEKVCEY 1x120mm <sup>2</sup> .....	62
6.2.2.8	Kabelové vedení 3x22–CXEKVCEY 1x50mm <sup>2</sup> .....	63
6.2.2.9	Pohony vlastní spotřeby .....	63
6.2.3	Výpočet pro rozvodnu R6 .....	64
6.2.4	Výpočet pro rozvodnu R1 .....	67
6.2.5	Kontrola oteplení kabelu při zkratu .....	68
6.2.6	Shrnutí výsledků .....	69
<b>7</b>	<b>ELEKTRICKÉ OCHRANY, NÁVRH NASTAVENÍ A ZKOUŠKY OCHRAN .....</b>	<b>70</b>
<b>7.1</b>	<b>Druh možných vzniknuvších poruch na elektrická zařízení .....</b>	<b>70</b>
<b>7.2</b>	<b>Základní požadavky na ochrany .....</b>	<b>71</b>
<b>7.3</b>	<b>Rozbor a návrh nastavení generátorové ochrany SR 489 .....</b>	<b>73</b>
7.3.1	Specifikace generátorové ochrany SR 489 .....	73
7.3.2	Rozdílová ochrana generátoru – 87G .....	75
7.3.3	Zkratová ochrana – 50 .....	76
7.3.4	Nadproudová ochrana uvolňovaná podpětím – 51V .....	76
7.3.5	Ochrana při zapnutí nenabuzeného generátoru do sítě – 50/27 .....	78
7.3.6	Ochrana při nesymetrickém zatížení – 46 .....	78
7.3.7	Ochrana zemního spojení statoru 95 % – 59N .....	79
7.3.8	Nadpětíová ochrana – 59 .....	80
7.3.9	Podpětíová ochrana – 27 .....	81
7.3.10	Frekvenční ochrany – 81O, 81U .....	81
7.3.11	Ochrana při podbuzení a ztrátě buzení – 40 .....	82
7.3.12	Zpětná wattová ochrana – 32R .....	84
7.3.13	Ochrana proti zemnímu spojení rotoru .....	85
<b>7.4</b>	<b>Kontrola a zkoušky ochran .....</b>	<b>85</b>
7.4.1	Sekundární zkoušky .....	85
7.4.2	Primární zkoušky .....	87
7.4.2.1	Proudové zkoušky .....	87
7.4.2.2	Napětíové zkoušky .....	88
7.4.2.3	Přifázování na síť .....	89
7.4.2.4	Výkonové zkoušky .....	90
7.4.3	Ostrovní provoz .....	90
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>92</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>95</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>		<b>97</b>

## Seznam symbolů a zkratek

Veličina	Jednotka	Název
S	(VA)	Jmenovitý zdánlivý výkon
P	(W)	Jmenovitý činný výkon
U	(V)	Jmenovité napětí
I	(A)	Jmenovitý proud
f	(Hz)	Jmenovitá frekvence
n	1/min	Jmenovité otáčky
J	(kg·m <sup>2</sup> )	Moment setrvačnosti
x <sub>d</sub>	(%)	Podélná synchronní reaktance
x <sub>d</sub> '	(%)	Přechodná podélná reaktance
x <sub>d</sub> ''	(%)	Rázová podélná reaktance
T <sub>d0</sub> '	(s)	Přechodná podélná časová konstanta naprázdno
T <sub>d</sub> '	(s)	Přechodná podélná časová konstanta zkratu
T <sub>d</sub> ''	(s)	Rázová podélná časová konstanta zkratu
P <sub>0</sub>	(W)	Ztráty naprázdno
P <sub>k</sub>	(W)	Ztráty nakrátko
U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub>	(V)	Primární/sekundární jmenovité napětí
K <sub>G</sub>	(-)	Korekční součinitel
Z	(Ω)	Impedance
u <sub>k</sub>	(%)	Napětí nakrátko
U <sub>b</sub>	(V)	Budící napětí
I <sub>b</sub>	(A)	Budící proud
cosφ	(-)	Účinník
I <sub>K</sub> ''	(A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud
i <sub>p</sub>	(A)	Nárazový zkratový proud
I <sub>th</sub>	(A)	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
c	(-)	Napět'ový součinitel
m	(-)	Souč. pro tepelné účinky stejnosměrné složky I <sub>K</sub> ''
n	(-)	Souč. pro tepelné účinky střídavé složky I <sub>K</sub> ''
K	(-)	Koeficient pro výpočet S <sub>min</sub>
c <sub>0</sub>	(J/cm <sup>3</sup> /°C)	Specifické teplo při 0 °C
ρ <sub>20</sub>	(Ωmm <sup>2</sup> /m)	Specifická rezistance při 20 °C
θ <sub>f</sub>	(°C)	Fiktivní teplota vodiče
θ <sub>k</sub>	(°C)	Nejvyšší dovolená teplota při přetížení
θ <sub>1</sub>	(°C)	Nejvyšší dovolená provozní teplota
S	(mm <sup>2</sup> )	Jmenovitý průřez

## **Úvod**

Hlavním cílem této diplomové práce je uvést základní způsoby v provozování malých vodních elektráren a také nahlédnout do systému digitálních elektrických ochran, včetně praktického návrhu jejich nastavení.

V úvodu práce se zabývám stručným popisem provozování vodních elektráren na území České republiky z pohledu hydroenergetického potenciálu a hospodaření s vodní energií od počátku elektrifikace.

V další části práce se již věnuji pouze zařízením malých vodních elektráren, a to popisu vybraných stavebně hydraulických částí. Poté navazuji strojní částí, kde uvádím nejčastěji užívané vodní turbíny v různých provedeních a další zařízení.

Následující kapitoly se zaměřují na podrobnější funkční popisy elektrotechnických zařízení, která jsou důležitá pro provoz malých vodních elektráren. Jedná se jak o silové prvky, jako hydroalternátor, transformátor a výkonové jističí přístroje, ale i řídicí systémy a snímače.

V další části práce se zabývám odborným technickým popisem a technickou specifikací jednotlivých elektrických zařízení a přístrojů na MVE Štvanici v Praze. Na jednopólovém schématu vysvětlím způsob vyvedení výkonu z generátorů přes rozvodnu do distribuční sítě.

Následující část práce je věnována systému elektrických ochran. Nejprve provedu výpočet zkratových poměrů a z nich kontrolu dimenzování rozvodny. Uvedu možné druhy poruch na elektrických zařízeních a poté informuji o základních požadavcích na elektrické ochrany. Následně se zabývám popisem jednotlivých ochranných funkcí elektrických ochran, které jsou zapotřebí pro bezpečný provoz generátoru. Na závěr se zaměřím na praktické odzkoušení generátorové ochrany SR 489.

## 1 Hydroenergetický potenciál na území ČR

Vodní energie je již od počátku elektrifikace nejdůležitějším obnovitelným zdrojem, jímž Česká republika disponuje a spolu s energií větru je nejstarším zdrojem energie.

### 1.1 Zdroje vodní energie

Voda se v přírodě vyskytuje jako nositel energie chemické, tepelné a především mechanické.

Chemická forma energie vody se projevuje vznikem solných roztoků. Voda ročně rozpustí přibližně  $27 \times 10^6$  tun tuhých látek, avšak malá koncentrace těchto roztoků brání jejímu praktickému využití.

Zdroj vodní energie s největším potenciálem se skrývá v oceánech v podobě energie tepelné. Oceán si lze představit jako obrovský akumulátor s objemem 1,3 miliardy krychlových kilometrů, tedy 97 % veškerého vodstva planety Země. Využívá se principu tepelného spádu, který se vyskytuje především v tropických mořích. Voda na povrchu je o teplotách nad 20 °C a v hloubkách klesá ke 4 °C. Možnost využití energie z tepelných spádů lze získat i z energie mořských proudů. Největší teoretický výkon, údajně 25 000 MW, dosahuje Golfský proud. Avšak při uvážení hrozeb, které by nastaly při zpomalení tohoto proudu, je nepravděpodobné pokračování v dalších studiích. Další výzkumy se zajímaly například o využití tepelné energie z tepelného spádu mezi vodou nezamrzajících arktických řek a ovzduším. Tepelného spádu by se docílilo rozdílnými teploty 0 °C až 4 °C a 25 °C až 40 °C.

Využití této energie je teoreticky možné, některé praktické postupy jsou již ve vývoji, jako například systém OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion).

Mechanická energie vody se v přírodě vyskytuje jako mechanická energie atmosférických srážek, mechanická energie ledovců, mechanická energie moří či oceánů a mechanická energie vodních toků. Tato forma energie je dána přirozeným koloběhem vody na zeměkouli. Vzhledem k tomu, že zdrojem tohoto koloběhu je sluneční energie, patří energie vod k nevyčerpatelným energetickým zdrojům.

Nejvíce technicky využívaná energie vod v přírodě je mechanická energie vodních toků, takzvané bílé uhlí. Tato energie zajišťuje přibližně 20% celkové světové dodávky elektrické energie. Dle studií je světový celkový technicky využitelný potenciál vodní

energie přibližně 14 400 TWh/rok, z nichž přes 8000 TWh/rok v současnosti považováno za ekonomicky využitelné pro další rozvoj. Současný instalovaný výkon je přibližně 692 GWh.

## 1.2 Hydroenergetické hospodářství a rozvoj MVE v ČR

Vodní elektrárny mají v ČR dlouholetou tradici. První elektrárna byla postavena roku 1887 v Písku na řece Otavě, šlo tehdy o přestavbu vodního mlýna. Na díle se tenkrát podílel i vynálezce František Křižík.



Obrázek 1.1 Vodní elektrárna královského města Písku

Při vývoji elektrizace počátkem 20. století došlo na našem území k vybudování několika vodních elektráren a již ve 30. letech bylo v provozu přibližně 15 000 vodních elektráren s celkovým instalovaným výkonem cca 200 MW. Technologii tvořila především vodní kola, ale i Kaplanovy a Francisovy turbíny. Rovněž došlo k postavení přibližně 20 elektráren na řece Labi a také vznikala Vltavská kaskáda.

Velkým skokem hydroenergetiky na našem území byla po roce 1945 výstavba několika hydroenergetických děl s instalovanými výkony přes 100 MW, těmi byly VE Slapy, VE Lipno a VE Orlický. V 60. letech se vodní elektrárny podílely 10 % na celkové výrobě elektrické energie.

Další větší zájem o výrobu elektrické energie ve vodních elektrárnách přišel v 70. letech 20. století, kdy světová energetika procházela krizí a takzvaným ropným šokem. Došlo na výstavbu technicky a stavebně náročnějších přečerpávacích elektráren.

V současnosti se na krytí spotřeby elektrické energie podílejí vodní elektrárny cca 4 % (3200 MWh). Pokrývají 10 % z celkového instalovaného výkonu elektrizační soustavy ČR. Územně jsou značně rozptýlené. Elektráren s rozsahem výkonu od 1 kW do 10 MW je evidováno 1 572.

### 1.3 Hydroenergetický potenciál vodního toku

Hydroenergetický potenciál povrchového vodního toku je údaj sloužící jako celková informace o možnostech využití jeho potenciální energie a lze ho rozdělit na hrubý, teoretický a reálně využitelný hydroenergetický potenciál.

Hrubý hydroenergetický potenciál povrchových toků vychází z nadmořských výšek hodnocené oblasti a příslušných průměrných průtoků. Stanovuje se k hladině moře nebo ke kótě hladiny toků na státních hranicích a slouží k evidenčním účelům.

Teoretický hydroenergetický potenciál vychází z metody výpočtu po jednotlivých částech řeky. Uvažovaný tok se rozdělí na jednotlivé úseky podle profilů, kde lze umístit vzdouvací stupně, jako například jezy nebo přehrad. Výšky profilů jsou voleny reálně tak, aby vznikla souvislá kaskáda s vodorovnými hladinami v jednotlivých úsecích.

Mezi dvěma zvolenými profily lze pak vypočítat daný potenciální výkon úseku řeky dle vztahu:

$$P_{1-2} = 9,81 \cdot \frac{Q_1 + Q_2}{2} \cdot H_{1-2} \text{ (kW)} \quad (1.1)$$

Je tedy počítáno s průměrnými průtoky v daném úseku toku 1-2.

Z hydrologických podkladů jsou počítány výkony pro dvě hodnoty průtoků.  $Q_{50}$ , což je střední průtok s 50 % pravděpodobností překročení průtoků a  $Q_{95}$ , takzvaný minimální průtok s 90 % pravděpodobností překročení průtoků.

Dále je možné určit specifický výkon řeky v úseku o délce  $l_{1-2}$  dle vztahu:

$$p_{1-2} = \frac{P_{1-2}}{l_{1-2}} \text{ (kW} \cdot \text{km}^{-1}\text{)} \quad (1.2)$$

Střední teoretický potenciál celého toku  $\sum_1^n P_{t50\%}$  je dán součtem výkonů jednotlivých  $n$  úseků. Minimální teoretický potenciál toku je pak dán hodnotou  $\sum_1^n P_{t95\%}$ .

Pokud vynásobím výsledky konstantou 8760 dostávám se na přibližné teoretické množství energie  $\sum_1^n E_{50\%}$  unášené řekou za celý rok.

$$\sum_1^n E_{50\%} = 3600 \cdot 24 \cdot 365 \cdot \sum_1^n P_{50\%} \text{ (kJ} \cdot \text{rok}^{-1}\text{)} \quad (1.3)$$

Reálně využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je ve skutečnosti menší než teoretický hydroenergetický potenciál, neboť vodní tok nelze beze zbytku energeticky využít celý. V cestě mu stojí města, komunikace, chráněná území a další. V tuzemských podmínkách je reálně využitelný hydroenergetický potenciál roven přibližně 40 až 50 % potenciálu teoretického. [3]

#### 1.4 Dělení vodních elektráren

Vodní elektrárny lze třídit dle různých hledisek. Třídění odpovídá platné normě ČSN 75 01 20 „Vodní hospodářství – Názvosloví využití vodní energie“ a ČSN 75 2601 „Malé vodní elektrárny – Základní požadavky“.

Ve shodě s uvedenými normami se vodní elektrárny dělí dle instalovaného výkonu na:

- malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW,
- střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10 do 200 MW,
- velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200 MW,

MVE lze dále rozdělit na:

- domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW,
- vodní mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW,
- vodní mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW,
- průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW.

Podle využití vodní energie určitého úseku vodního toku lze rozdělit MVE dle získaného spádu:

- přehradová vodní elektrárna, jejíž spád je vytvořen přehradou,
- jezová vodní elektrárna, jejíž spád je vytvářen jezem,
- derivační vodní elektrárna, využívající soustředěného spádu získaného derivací vody,
- vodní elektrárna bez vzdouvací stavby, využívající energii vody proudící v potrubí, v otevřených korytech vodních toků nebo kanálech,



Důležitým charakterem rozdělení vodních elektráren je podle pracovního režimu rozdělení na:

- průtočné, bez ovlivnění přirozeného průtoku,
- akumulační, pracující s řízeným odběrem vody z akumulační nádrže vytvářející spád,

Dále se vodní elektrárny dělí podle velikosti spádu na:

- nízkotlakové vodní elektrárny, se spádem do 20 m,
- středotlaké vodní elektrárny, využívající spád od 20 do 100 m,
- vysokotlaké vodní elektrárny, se spádem nad 100 m.

Vodní elektrárny lze například rozdělit i podle řízení provozu, kde elektrárna může být řízena výhradně ručně obsluhou až po výhradně automatizovanou elektrárnu.

## 1.5 Vliv provozování vodních elektráren na elektrizační soustavu

MVE pracují paralelně s elektrizační sítí. Nejmenší výkony jsou připojovány k síti nízkého napětí v rámci objektu a vyrobená elektrická energie je určena pro vlastní spotřebu, případně přebytek výkonu dodává do lokální distribuční sítě. Malé vodní elektrárny větších výkonů se zpravidla připojují do distribuční sítě VN. Vodní elektrárny patří mezi zdroje, které nejsou závislé na fosilních palivech, proto je možné, je pokládat za prostředky ke zvýšení bezpečnosti dodávky elektrické energie. Mimo to přispívají k redukci emisí skleníkových plynů.

Malé vodní elektrárny pracující paralelně s elektrizační soustavou jsou instalovaným výkonem vyvedeny do distribučních soustav rozptýleně. Provoz MVE nesmí především v distribuční soustavě způsobit zhoršení kvality napětí nad dovolené meze. Proto je zapotřebí při projektování respektovat všechna platná nařízení a předpisy tak, aby elektrárna byla vhodná pro paralelní provoz se sítí.

Z pohledu vlivu na síť jsou malé vodní elektrárny velkým zdrojovým přínosem. Na rozdíl od ostatních zdrojů jsou schopny velmi rychlého najetí soustrojí a přifázování do sítě. Tento pochod trvá běžně v řádu jednotek minut. Avšak mohou mít i negativní vliv na síť, neboť zdroje o výkonu do 10 MW se běžně nepodílejí na regulaci a jsou řízeny místní hladinovou regulací, která je závislá mnohdy na kolísavém průtoku.

Ke kritickým momentům může dojít při povodních. Příkladem mohou být povodně v roce 2002, kdy docházelo k okamžitým odstavením a zaplavováním elektráren na Vltavské kaskádě. Na takové výpadky musely reagovat přečerpávací elektrárny.

Z celkového instalovaného výkonu vodních elektráren 2,2 GW je 300 MW pokryto MVE. Jejich rovnoměrné rozmístění je výhodou, neboť oproti např. větrným elektrárnám nezpůsobují nárazy výkonu v jedné oblasti. [7]

## 2 Stavebně hydraulické řešení vodních elektráren

K řešení hydraulického obvodu vodní elektrárny se řadí všechny objekty a konstrukční prvky, které jsou obtékány vodou. Jsou to především vtokové objekty, lapače písku, přivaděče vody a odpady. Přivaděče mohou být tlakové nebo beztlakové. Hlavními stavebními částmi MVE jsou vtokové objekty, přivaděče a budova se strojovnou včetně rozvodny.

### 2.1 Vtokové objekty

Vtokové objekty se nachází u každé vodní elektrárny. Jejich úkolem je zajištění přítoku vody na turbínu s nejmenšími možnými ztrátami. Je nutné, aby svojí konstrukcí zabránily průniku vzduchu do hydraulického systému turbíny. Rovněž nesmí dojít k vytváření víru na vtoku a ucpání česlí.

Vtokové objekty lze dělit z hlediska tlakových poměrů na beztlakové a tlakové.

Beztlakové vtokové objekty se využívají pro odběr vody k beztlakovým přivaděčům nebo jako vtok před tlakovými vtoky. Voda těmito objekty proudí s volnou hladinou. Pro zachycení plavenin a plovoucích předmětů se využívají norné stěny, prahy na dně a hrubé česle.

Tlakové vtokové objekty se využívají k odběru vody přímo na turbínu nebo na tlakový přivaděč. Je důležité, aby vstupní profil těchto vtoků byl vždy pod hladinou vody. Většinou bývá součástí i provizorní hrazení a rychlouzávěr, a v některých případech i zavzdušňovací ventil.

### 2.2 Savky

Savky jsou součástí u přetlakových turbín a slouží k odvedení vody z turbíny. Savka pomáhá využívat část energie vody, význam má především u menších spádů, kde lze využít 30 až 50 % energie vody. Hermeticky propojuje prostor pod oběžným kolem až po dolní hladinu vody. Mezi základní funkce savky patří:

- plné využití hrubého spádu,
- využití co největšího množství kinetické energie vody, která odchází z oběžného kola turbíny,
- savka umožňuje umístění turbíny nad dolní vodou.

## **2.3 Česle**

Česle slouží k zachycení plovoucích splavenin na hladině i pod ní. Jde především o spadané listí a větve, které mohou poškodit části turbíny nebo změnit proudění vody a tím může dojít k poklesu výkonu. Používají se hrubé a jemné česle. Konstrukčním požadavkem je, že česle musí při ucpání a plném tlaku vody z přívodní strany vydržet bez poškození. Čištění česlí se provádí ručně nebo čistícím strojem.

### 3 Strojní zařízení vodních elektráren

#### 3.1 Základy teorie a dělení vodních turbín

Vodní stroje, v dnešní době z nich dominantní vodní turbíny, patří mezi nejstarší stroje zkonstruované člověkem. Vodní turbína je základní technologická část každé vodní elektrárny.

Soudobé vodní turbíny lze rozdělit podle třech různých způsobů:

- přenosu energie vody na oběžné kolo – rovnotlaké a přetlakové,
- průtoku vody oběžným kolem vzhledem k hřídeli – radiální (odstředivé, dostředivé), axiální, radiálně axiální, diagonální, se šikmým průtokem, tangenciální nebo s dvojnásobným průtokem,
- polohy hřídele – vertikální, horizontální a šikmé.

##### 3.1.1 Rovnotlaké vodní turbíny

Nejdůležitějším znakem rovnotlakých turbín je, že celý užitečný spád se mění v rozváděcím kole na rychlost vodního proudu a z něho vytéká již při nulovém hydrostatickém tlaku. Voda na oběžném kole odevzdá svoji kinetickou energii a padá volně do odtoku. Pro dosažení nulového přetlaku na oběžném kole se musí docílit proudění vody s volnou hladinou, tedy spodní hladina musí být níže než oběžné kolo. V případě stoupnutí spodní hladiny se může začít oběžné kolo takzvaně brodit a v takovém případě dochází ke zhoršení účinnosti.

Typickými rovnotlakými turbínami jsou Peltonova a Bánkiho.

##### 3.1.1.1 Peltonova turbína

Peltonovy turbíny se používají nejčastěji v horizontálním uspořádání, mohou být ale také ve vertikálním. Použití těchto turbín je vhodné v lokalitách s velkým spádem (400 až 2000 m) a malými průtoky již od 0,01 až do 3 m<sup>3</sup>/s.

U Peltonovy turbíny je voda na oběžné kolo přiváděna jednou nebo více tryskami, kde odevzdává svou kinetickou energii narážením na lopatky. Voda odtéká volně mimo turbínu se stejným tlakem jako na vstupu, je tudíž rovnotlaká.

K plynulé regulaci průtoku, bez rázových jevů, se používá jehlový uzávěr trysky. Jako rychlouzávěr, pro zamezení průtoku vody, zde slouží deflektor pro odříznutí proudu

vody před oběžným kolem, anebo deviátor, který paprsek odkloní.

[1,3]



*Obrázek 3.1 Detailní pohled na Peltonovu turbínu*

### 3.1.1.2 Bánkiho turbína

V případě Bánkiho turbíny jde o radiální turbínu s horizontální hřídelí, kde je voda přiváděna na oběžné kolo dostředivou silou a při výstupu z lopatek pokračuje jako volný průtok přes oběžné kolo a dopadá znovu na lopatky obrácenou odstředivou silou. Voda tedy protéká turbínou dvakrát, poté volně odtéká. Oběžné kolo má válcový tvar. Je vhodná k použití u malých výkonů do 1000 kW, pro průtoky 0,05 až 0,9 m<sup>3</sup>/s a spády 1,5 až 200 m.

K regulaci výkonu turbíny slouží otočné vodící lopatky, které usměřňují vodní paprsek do vhodných míst, čímž dochází k menším ztrátám. Jako uzávěr turbíny slouží samotné lopatky nebo stavítko.

### 3.1.2 Přetlakové turbíny

V případě přetlakových reakčních turbín se využívá převážně tlakové energie vody. V rozváděcím kole se přemění pouze část spádu na pohybovou energii a část spádu působí ještě s hydrostatickým tlakem, kterým působí na oběžné kolo turbíny, kde se mění na pohybovou energii. Energie vody protékající kanálem se tedy směrem k výtoku zvětšuje, čehož se dosáhne zmenšováním průřezu kanálu směrem k výtoku. Na rozdíl od rovnotlakých turbín tedy nevádí, pokud je oběžné kolo umístěné pod hladinou vody.

Typickými zástupci přetlakových turbín jsou turbína Francisova a Kaplanova.

### 3.1.2.1 Francisova turbína

Francisova turbína je radiálně axiální přetlaková turbína, jejíž uspořádání je možné s vertikální nebo horizontální hřídelí. Voda je na oběžné kolo přiváděna pomocí vysokotlaké spirály, která se postupně směrem k rotoru zužuje. V případě menších spádů lze využít i přívod odkrytou kašnou. Voda radiálním směrem vtéká do rozváděcího a posléze do oběžného kola, kde odevzdává svou energii rotoru a směr proudění se mění na axiální. Voda z turbíny vystupuje do nízkotlaké kuželovitě rozšiřující se savky. K regulaci slouží natáčivé lopatky rozváděcího kola, které slouží také jako uzávěr turbíny, mohou zcela uzavřít celý přítok vody na oběžné kolo. Oběžné kolo, nalisováno na hřídeli turbíny, se skládá z ocelových lopatek zapuštěných do náboje a věnce turbíny.

Francisovy turbíny nejsou vhodné v lokalitách s kolísáním spádu nebo průtoku, z důvodu rychle se snižující účinnosti. Je vhodná k použití od středních průtoků a spádů zhruba od 100 do 500 metrů. Její použití je časté také v přečerpávacích vodních elektrárnách jako reverzní Francisova turbína.



Obrázek 3.2 Soustrojí s Francisovou turbínou na MVE Želivka

### 3.1.2.2 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína se používá s horizontální nebo vertikální osou. U menších výkonů se využívá horizontální uspořádání, které je méně náročné na stavební práce a dispoziční řešení. Skládá se z přívodní spirály, popřípadě kašny, z rozváděcího a oběžného kola a savky.

Oběžné kolo turbíny má na náboji osazené otočné lopatky, které se díky čepům umístěných v náboji dají otáčet. Počet těchto lopatek se volí dle spádu v dané lokalitě mezi 3 až 10.

Výhodou Kaplanovy turbíny je možnost regulace lopatkami rozváděcího i oběžného kola, velice dobře se tedy přizpůsobuje změnám průtoku nebo spádu. Obě tyto regulace musí být mezi sebou svázané regulační vazbou. Kaplanova turbína se využívá od nejnižších spádů až po spády do zhruba 100 m.

Jednou z důležitých součástí soustrojí s Kaplanovou turbínou je zavzdušňovací ventil, který v případě uzavření lopatek rozváděcího kola turbíny zavzdušní prostor pod oběžným kolem. V případě absence tohoto ventilu by při rychlejším uzavření rozváděče turbíny mohlo dojít vlivem setrvačnosti vody k velkému podtlaku a v důsledku toho může dojít k odtržení vodního sloupce, který by se po odčerpání energie mohl s nárazem na oběžné kolo vrátit.

U Kaplanovy turbíny může snadno docházet ke spárové kavitaci, která vzniká v prostoru mezi lopatkami oběžného kola a komorou. Tato kavitace je způsobená velkými rychlostmi vody ve spáře a vzniká na stěnách komory a na spodní straně konce lopatek.



Obrázek 3.3 Kaplanova turbína (MVE Štětí)



Obrázek 3.4 Demontovaná Kaplanova turbína (MVE Štvanice)



### **3.2 Uzávěry**

Uzávěr je nedílnou součástí strojní části vodní elektrárny. Jeho funkcí je zastavení průtoku vody soustrojím a bezpečné oddělení všech zatápěných prostor pro následné revize a opravy.

Lze je rozdělit například dle charakteru provozu na regulační a neregulační. S regulovaným rozváděčem turbíny se lze setkat u Kaplanovy turbíny nebo také jako Reiffensteinova klapka. Veškeré ostatní jsou neregulační a nejsou k regulaci vhodné.

Dle funkce je nutné uvést rychlouzávěry, které slouží k okamžitému přerušení průtoku turbínou během několika sekund. Jsou to například rychlouzávěry stavidlové, klapkové nebo segmentové.

## 4 Elektrotechnická zařízení vodních elektráren

Nyní v této kapitole popíši jednotlivá elektrotechnická zařízení. Vzhledem k tomu, že jednotlivé partie lze rozčlenit podle několika způsobu užití, zaměřím se tedy pouze na zařízení, která se aplikují na malých vodních elektrárnách.

### 4.1 Hydroalternátory

Jako elektromechanický měnič lze v soustrojích vodních elektráren využít kromě hydroalternátoru i asynchronní generátor nebo stejnosměrné dynamo. Avšak jejich výskyt je ojedinělý, proto se budu zabývat pouze synchronními hydroalternátory.

#### 4.1.1 Technický popis konstrukce

Hlavním specifikem hydroalternátorů je jejich konstrukce, která je ovlivněna vyniklými póly na rotoru, jejichž počet vychází ze synchronní rychlosti stroje. Hydroalternátor může být se 4 až 60 póly, z čehož vychází velký průměr rotoru. Osová délka generátoru bývá malá do 2 metrů.

Kostra statoru synchronního alternátoru je svařovaná. Železo statoru je z nízkoztrátových dynamových plechů. Jeho statoru je rozděleno na jednotlivé bloky, které jsou vzájemně odděleny vložkami. Kanály mezi bloky slouží k ventilaci statoru.

Vinutí statoru je třífázové, dvouvrstvé, spojené do hvězdy. Tyče jsou v otevřených drážkách a mají termosetickou izolaci. Čela jsou vyztužena proti zkratovým silám. Vinutí je opatřeno polovodivým nátěrem pro zamezení vzniku korony. Z generátoru je vyvedeno 6 konců vinutí.

K rotorovému tělesu jsou pomocí šroubů připojeny póly z ocelových plechů. Tvar pólových nástavců odpovídá sinusovému průběhu napětí při chodu naprázdno. Vinutí rotoru je z měděných pasů a jednotlivé závity jsou izolovány. Proti železu jsou cívky izolovány skelnou izolací. V pólových nástavcích se nachází tlumící



Obrázek 4.1 Demontovaný rotor hydroalternátoru (MVE Štvanice)

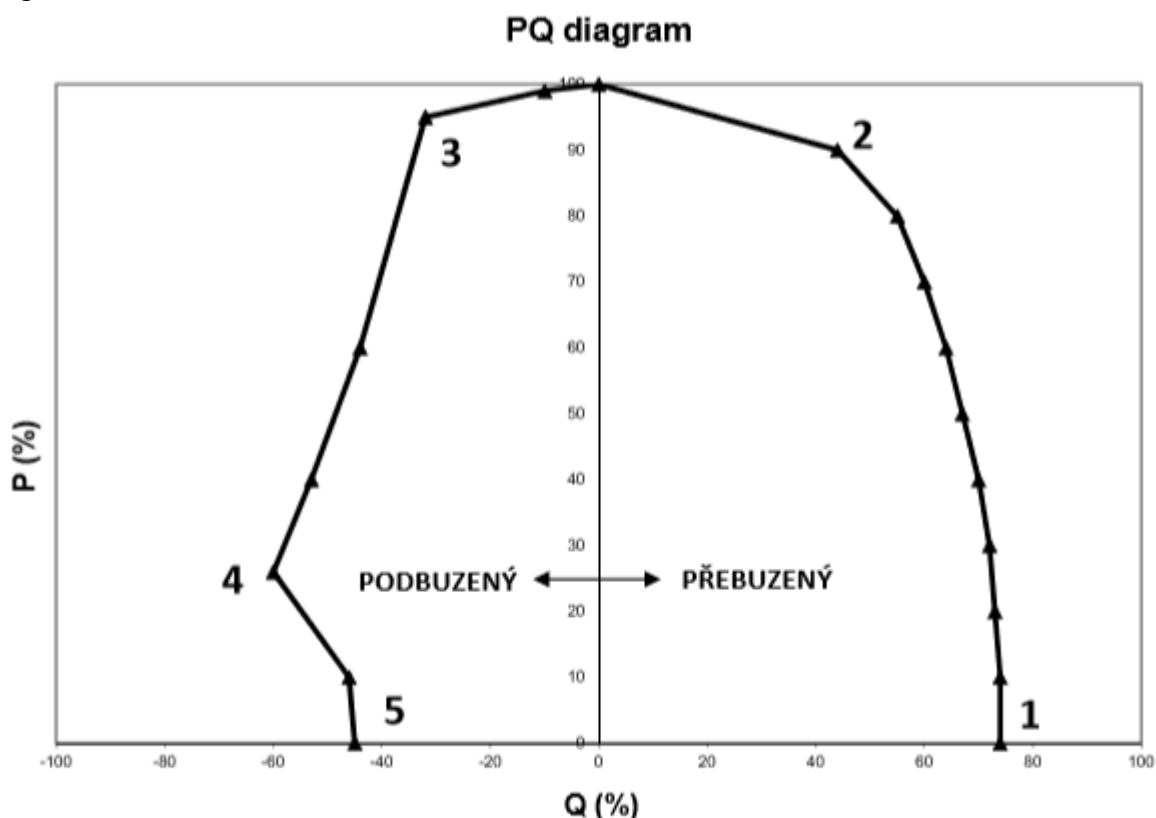
vinutí, amortizér, které je složené z měděných tyčí spojených v čelech do kruhů. Příznivě působí na kývání a dynamickou stabilitu stroje.

Sběrné ústrojí je tvořeno sběracími kroužky a kartáči. Sběrací kroužky jsou ocelové. Budící proud je přiváděn ke kartáčovým roubíkům kabelovým vedením. Od kroužků je budící proud veden měděnými pasy k pólům.

#### 4.1.2 Provozní PQ diagram mezních zatížení alternátoru

Provozní PQ diagram alternátoru je graf závislosti činného a jalového výkonu, popisující mezní provozní stavy alternátoru. Diagram je vyjádřený pouze ve dvou kvadrantech, neboť provoz alternátoru v motorickém režimu není přípustný. Pro I. kvadrant je stroj přebuzený, proto činnou i jalovou energii dodává do sítě. Ve druhém případě, kdy se alternátor pohybuje ve II. kvadrantu je stroj podbuzený, tedy činnou energii dodává do sítě a jalovou energii ze sítě odebírá.

PQ diagram je nezbytně nutnou součástí každé dokumentace k dodávanému generátoru.



Obrázek 4.2 PQ diagram synchronního stroje

Pracovní oblasti stroje lze vymežit omezujícími faktory:

- Oteplení statorového vinutí (omezení výkonem turbíny) 2–3,
- oteplení rotorového budícího vinutí 1–2,
- oteplení magnetickým polem v čele železa statoru 3–4,
- omezení statickou stabilitou 4-5.

### **Provoz alternátoru v přebuzeném stavu**

Pro základní určení omezujících faktorů v přebuzeném stavu vycházíme z tepelných omezení při jmenovitém chodu alternátoru.

Statorový proud nesmí svou velikostí překročit danou hodnotu s ohledem na maximální teplotu statorového vinutí, která je dána teplotní třídou dle normy. Dalším limitujícím faktorem velikosti statorového proudu, tedy dodávky činného výkonu z alternátoru do sítě je maximální výkon turbíny.

Stejně tak i velikost rotorového proudu musí zohledňovat maximální teplotu rotorové vinutí. Velikost budícího proudu přímo ovlivňuje dodávku jalové energie z alternátoru.

### **Provoz alternátoru v podbuzeném stavu**

Při tomto stavu se pracovní body stroje nachází ve II. kvadrantu a jsou omezeny oteplením čelních prostor statoru a statickou stabilitou stroje.

Oteplení konstrukčních částí čel statoru souvisí s rozptylovým magnetickým polem, které vstupuje z prostoru spojek statorového vinutí do čelních ploch magnetického obvodu statoru.

Omezení statickou stabilitou vychází ze synchronizačního momentu, který je na mezi statické stability nulový. Po překročení této meze vypadává stroj ze synchronismu. Velikost tohoto momentu je přímo úměrná sinusu zátěžného úhlu. Pro setrvání stroje v synchronním stavu je zapotřebí, aby byl synchronizační moment kladný.

#### **4.1.3 Fázování synchronního alternátoru k síti**

Fázování alternátoru je proces, kdy dochází k propojení alternátoru se sítí pomocí výkonového spínacího prvku, vypínačem. Synchronní alternátor je možné spínat se sítí přesným fázováním, samosynchronizací nebo asynchronně. Nejčastěji však přesným

synchronním sepnutím. Pro uskutečnění ideálního fázování je potřeba dodržet tyto podmínky:

- stejný sled fází generátoru a soustavy
- stejný kmitočet
- stejný modul napětí
- minimální vzájemný posuv fází

Avšak v provozu přesné dodržení těchto podmínek není nutné, a kromě dodržení podmínky stejného sledu fází se připouští určité difference.

Sled fází stroje a sítě se kontroluje pouze před prvním přifázováním nebo pokud došlo ke změnám v zapojení silových částí, anebo v primárních a sekundárních měřicích obvodech. K nabuzení stroje dojde při dosažení cca 70 % synchronních otáček a při přibližně 95 % se srovnává napětí generátoru s napětím sítě a současně i otáčky stroje s frekvencí sítě. Po splnění těchto dvou fázovacích podmínek se sleduje fázový posuv vektorů napětí generátoru a sítě. Po vyrovnání vektorů napětí regulací otáček turbíny je možné sepnutí generátor k síti.

Zajištění splnění těchto podmínek se provádí automaticky nebo ručně. Automatické fázování provádí synchronizátor, který impulsy ovládá regulátory buzení a turbíny a jak již bylo zmíněno výše snaží se o shodu napětí a otáček s napětím a frekvencí sítě. Popřípadě se používají tzv. srovnávače. Po tomto vyrovnání čeká na moment, kdy je vektor napětí generátoru a sítě nulový a s časovým předstihem vysílá zapínací impuls. Předstih zapnutí se používá, neboť je vhodné respektovat reálné zpoždění zapnutí vypínače po vyslání impulsu k sepnutí.

## **4.2 Transformátory**

Transformátor je netočivý stroj transformující střídavé napětí na jiné se stejným kmitočtem. Velikost změny transformace určuje převod transformátoru, což je poměr primárního a sekundárního napětí.

V elektrárnách mohou dělit transformátory na dva typy podle jejich funkce, tedy na hlavní vývodový transformátor (popřípadě blokový) a transformátor pro napájení vlastní spotřeby elektrárny.

Transformátor na vývodu MVE je třífázový a nejčastěji v suchém provedení. Při instalaci transformátoru ve venkovním prostředí se používají transformátory olejové. U olejového transformátoru ponoření celého transformátoru do oleje v nádobě zajišťuje přenos tepla do chladičů a následné ochlazování oleje. Roztažnost oleje je vyrovnávána konzervátorem. V dnešní době se používají výhradně hermetizovaná řešení, kdy je nádoba pomocí speciální konstrukce hermeticky utěsněna. Při zvýšených teplotách oleje se roztažnost oleje vyrovnává chladičimi žebry.

Zapojení vinutí transformátoru je na straně generátoru většinou do trojúhelníku, neboť se potlačí nulové složky soustavy a vyšší harmonické vzniklé v důsledku nesymetrie.

Transformátory ve vlastní spotřebě jsou většinou suché s pryskyřicovou izolací a přirozeným chlazením. [3]

### 4.3 Rozvodny

Rozvodny bývají uspořádány jako kobkové nebo skříňové. Dnes již převládají skříňové rozvodny, a to vzduchem izolované nebo zapouzdřené.

Zjistil jsem, že vzduchem izolované rozvodny jsou nejčastějším řešením v malých vodních elektrárnách. I tímto způsobem jsou řešeny rozvodny na MVE Štvanice, proto jsem se rozhodl zabývat se pouze teoretickým rozborem tohoto typu rozvodny jako komplexního celku přístrojů výkonového vypínače a zkratovače.

Vypínač je výkonový spínací přístroj, který je schopen spínat/rozpínat obvody až do své vypínací/zapínací zkratové schopnosti. Základními parametry třídění vypínačů je dle použitého zhašecího média a způsobu ovládání hlavních kontaktů. Dále se pak vypínače rozlišují svými elektrickými vlastnostmi, jako napěťová hladina nebo zkratová vypínací schopnost.

a) dle zhašecího média:

- olejové
- maloolejové
- tlakoplynové
- vakuové

b) dle způsobu ovládání hlavních kontaktů:

- pneumatické
- hydraulické
- elektromotorické s pružinovým střadačem

Jako vzor pro následující popis skříňové rozvodny jsem použil výrobky od společnosti ABB. Konkrétně je to rozváděč UniGear ZS1 s možností použití vakuového vypínače VD4 nebo plynem SF<sub>6</sub> izolovaného vypínače HD4. Specifikovanějšímu popisu se budu věnovat i při popisu technologie MVE Štvanice, kde jsou konkrétně použity vypínače VD4 v systému UniGear ZS1.

#### 4.3.1 Konstrukční řešení rozváděče UniGear ZS1

Prostor rozvodnice lze rozdělit na tři silové prostory, a to prostory vypínače, přípojnic a kabelů a také nízkonapěťový prostor s pomocnými přístroji a svorkovnicemi. Rozváděč musí být také odolný proti vnitřním obloukovým zkratům a vznikajícím spalinám při hoření. Pro takové účely jsou rozváděče vybaveny odfukovým kanálem.

Prostor hlavních přípojnic obsahuje vzduchem izolované přípojnice, které jsou pomocí odboček připojeny k horním kontaktům vypínače. Hlavní přípojnice jsou vyrobeny z elektrolytické mědi. Prostor připojení kabelů obsahuje systém rozbočení (plochých sběrnic), který je určen pro připojení silových kabelů ke spodním kontaktům vypínače. Uzemňovač slouží pro uzemnění kabelů vývodu, lze jej také instalovat přímo na hlavní systém přípojnic. Je možné ho ovládat ručně manipulacemi z čela rozváděče nebo motorovým pohonem. Stav uzemňovače musí být zobrazen mechanickým indikátorem, který je viditelný z přední strany rozváděče. Izolační průchodky, jednopólové z epoxidové pryskyřice, v prostoru vypínače, propojují vypínač s prostorem přípojnic, případně s prostorem kabelů.

#### 4.3.2 Vakuové vypínače

Vypínač VD4 používá vakuum jednak pro uhašení vzniklého elektrického oblouku, ale i jako izolační médium. Po přerušení proudu dochází velmi rychle k opětovnému obnovení dielektrických vlastností vakua. Vakuová zhášedla jsou zabudována v pólech vypínače a tím se vytváří robustní konstrukce, díky které je zhášedlo chráněno proti nárazům a nánosům prachu i vlhkosti. Vakuové zhášedlo spolu se zabudovanými kontakty tvoří zhášecí komoru. Těleso zhášedla je tvořeno keramickým izolátorem uzavřeným na obou koncích ocelovými nerezovými kryty. Kontakty jsou vyrobeny z čisté mědi a slinutého chrómu a jsou přivařeny

k měděným svorkám vývodů. Komponenty zhášedla jsou sestaveny a svařeny v prostředí velmi silného vakua, které zaručuje, že vakuum ve zhášedle dosáhne hodnoty nižší než 10-5 Pa, tím je zajištěno, že zhášedlo neobsahuje žádný ionizovatelný materiál.



*Obrázek 4.3 Póly vakuového vypínače*

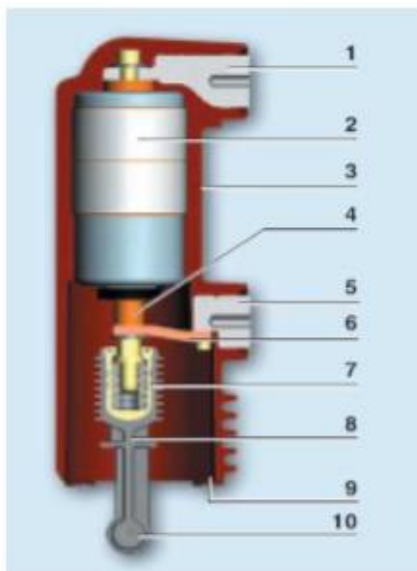
Při hašení oblouku zhášedla přerušují oblouk při průchodu proudu nulovou hodnotou a eliminují jevy související se znovuzapálením oblouku. Rychlé omezení intenzity proudu a rychlá kondenzace kovových par, vyvolané v okamžiku průchodu proudu nulovou hodnotou, umožňují během několika sekund obnovit maximální dielektrickou pevnost mezi kontakty zhášedla.

Ovládací mechanismus vypínače je mechanický střadač energie. Nezávislý vypínací mechanismus umožňuje provést na pohonu nezávislé vypínací i zapínací manipulace. Ovládací mechanismus pružinového systému se natahuje prostřednictvím z převodovaného motoru. Vypnutí a zapnutí vypínače je možné provést prostřednictvím tlačítek umístěných na čelním panelu, nebo pomocí elektrických spouští (zapínací spoušť, vypínací spoušť a podpěťová spoušť). Vypínače jsou vždy vybaveny zařízením proti pumpování, které vyloučí možnost současné aktivace vypínacího a zapínacího povelu, aktivace povelu pro zapnutí



v době, kdy nejsou pružiny nataženy, nebo ve stavu, kdy hlavní silové kontakty nejsou v koncových polohách.

Podvozek je vybaven kolečky, které umožňují i při zavřených dveřích s vypínačem manipulovat, tedy vypínač uvnitř prostoru vypínače z pracovní polohy vysunout a zpět do pracovní polohy zasunout.



- 1 Horní vývod
- 2 Vakuové zhášedlo
- 3 Pouzdro z epoxidové pryskyřice
- 4 Roubík pohyblivého kontaktu
- 5 Spodní vývod
- 6 Flexibilní připojení
- 7 Odpružená vidlice táhla
- 8 Táhlo
- 9 Upevnění pólu
- 10 Připojení k pohonu



Obrázek 4.4 Řez pólem vakuového vypínače

Obrázek 4.5 Detail odpojovacích kontaktů

### 4.3.3 Plynem izolované vypínače

Vypínač HD4 používá pro zhášení i jako izolační médium fluorid sírový (plyn SF<sub>6</sub>). Plyn má vynikající vlastnosti, a proto se přerušení proudu uskutečňuje bez potřeby rozdělení oblouku na dílčí části i bez vzniku přepětí. Po přerušení proudu nedochází k jevům

souvisejícím se znovuzapálením oblouku a dielektrické vlastnosti prostředí jsou po přerušení oblouku velmi rychle obnoveny.

Využívají vypínací systém s automatickým ofukováním, kdy dochází ke kombinaci techniky komprese a ofukování. Kombinace techniky komprese a techniky ofukování umožňuje docílit nejlepších výsledků při rozepínání proudů. Do procesu spínání nebo rozpínání proudu se vždy zapojují obě techniky. Zatímco technika komprese funguje optimálně při spínání (rozpínání) malých proudů, technika ofukování působí účinně při vypínání vyšších proudů. Technika automatického ofukování umožňuje použití menšího množství plynu a také je výrazně snížen tlak plynu. Tato technika zaručuje vypínací izolační napětí a vypínací schopnost až do 30 % jmenovitých hodnot i při nulovém relativním tlaku izolačního plynu.

Ovládací mechanismy a provedení podvozku je obdobné jako u vakuového vypínače VD4.

#### **4.4 Vlastní spotřeba MVE**

Při řešení napájení vlastní spotřeby (VS) malé vodní elektrárny jsem vycházel z celkového řešení elektrárny, a především jejího vývodu. Spotřebiče VS jsem rozdělil dle charakteru napájecího napětí na střídavé a stejnosměrné.

Střídavá vlastní spotřeba je nejčastěji napájena z vývodu. V případě, že je generátor elektrárny na nízkém napětí, lze VS napájet přímo z tohoto vývodu. Pokud je generátor na vysokém napětí, realizuje se napájení VS přes transformátor napojený z vývodové rozvodny. Podle normy ČSN EN 60038 – Normalizovaná napětí IEC je zapotřebí uvažovat se spotřebičovým jmenovitým napětím 400V/230V 50Hz. Při projektování napájecího systému je důležité brát ohled na ochrany proti nebezpečnému dotyku dle ČSN 33 2000-4-41 ed.3: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem. Taková bezpečnostní opatření jsou provedena podmínkami sítě TN, ve které se všechny neživé části spojují s uzemňovacím bodem sítě přes ochranné vodiče.

Pro zvýšení spolehlivosti napájení VS, a tedy plynulému chodu MVE, se používá zálohované napájení. To může být realizováno z jiné sítě nebo z instalovaného dieselgenerátoru v blízkosti elektrárny. V případě ztráty původního napájení dojde automaticky k záskoku napájení. Dalším zdrojem zálohovaného napájení mohou být UPS, které se nejčastěji uplatňují pro napájení operátorských PC.

Pro napájení řídicího systému a automatik se nejčastěji používá stejnosměrné napětí. Jako centrální zdroj stejnosměrného napětí se využívají niklkadmiové baterie vybavené nabíječem. Nebo se využívá distribuovaných stejnosměrných zdrojů, které jsou již součástí rozváděčů s automaty. Pro stejnosměrné rozvody v MVE se nejčastěji používají napětí o jmenovitých hodnotách 24, 48 a 110 VDC.

#### 4.5 Řídící systémy a komunikace

Řídící systém elektrárny umožňuje řízení jednotlivých technologií. Jeho prací je měření a ověřování technologických veličin, jejich přenos a logické řízení včetně vyhodnocování mezních stavů.

Existují dvě struktury systému, centralizovaný a distribuovaný. Centralizovaný řídicí systém se využívá u malých systémů s malým počtem regulačních smyček a je založen na samostatné řídicí jednotce. Oproti tomu distribuované řídicí systémy se využijí v rozsáhlých systémech větších elektráren. Vytváří strukturu navzájem propojených podsystémů s připojenými vstupy a výstupy ke snímačům a akčním členům technologie. V rámci distribuovaných systémů jsou samostatné řídicí jednotky rozmístěny u jednotlivých technologických celků. Každá jednotka řídí svůj technologický celek a s ostatními je propojena po páteřní procesní sběrnici.

Hlavním prvkem pro sběr dat je měřicí řetězec, který se skládá ze senzoru, A/D převodníku a mikroprocesoru pro digitální zpracování signálu. Senzor je čidlo sledující fyzikální veličinu a převádí ji na unifikovaný analogový elektrický signál. Podle typu měřených veličin pak mohou rozdělit senzory na analogové a binární.

Analogové senzory měří spojitě veličiny, jako například tlak, teplota a rychlost. Jejich výstupem je pak napěťový ( $\pm 10$  V) nebo proudový ( $0 \div 20$  mA,  $4 \div 20$  mA) signál.

Binární senzory pak slouží pro měření stavů procesu, například OTEVŘENO/ZAVŘENO nebo ZAP/VYP. Logická hodnota pak na výstupu odpovídá určité úrovni proudu nebo napětí.

#### 4.6 Snímače elektrických veličin

Měření elektrických veličin zahrnuje měření pro přehled o stavu soustrojí, měření pro potřeby automatu a ochran a také pro potřeby účtování energie. Nejčastěji se měření provádí přímo přes měřicí transformátory proudu (MTP) a měřicí transformátory napětí (MTN), které jsou rozebrány níže.

Hlavní funkcí přístrojových měřících transformátorů je transformace měřené veličiny na hodnoty, na které jsou dimenzovány proudové a napěťové vstupy přístrojů. Slouží jako odizolování od obvodu vysokého napětí a od obvodů, ve kterých působí silná magnetická a elektrická pole.

Vysoký důraz je kladen na spolehlivost činnosti přístrojových transformátorů, stanovují se požadavky na jejich parametry a také na vedení mezi transformátorem a zařízením na něj připojený.

Nyní uvedu příklad měřícího transformátoru proudu.

Násuvný ASK 231.5 od společnosti GHV Trading pro primární jmenovité proudy od 80–500 A, sekundární proud 1 nebo 5 A, jmenovité výkony 1,5 až 5 VA a možnost tříd přesnosti 0,5 a 1.



Obrázek 4.6 – MTP ASK 231.5

## 4.7 Snímače neelektrických veličin

Měření neelektrických veličin se odvíjí od rozsahu strojní části elektrárny a slouží pro orientaci obsluhy o stavu strojní technologie, stavu pro automatiku a zabezpečovací obvody. Takové snímače slouží pro měření teplot, tlaků, průtoků, hladin, poloh a otáček. Jejich výstupy jsou dány účelem měřené veličiny, mohou mít analogový nebo dvouhodnotový signál.

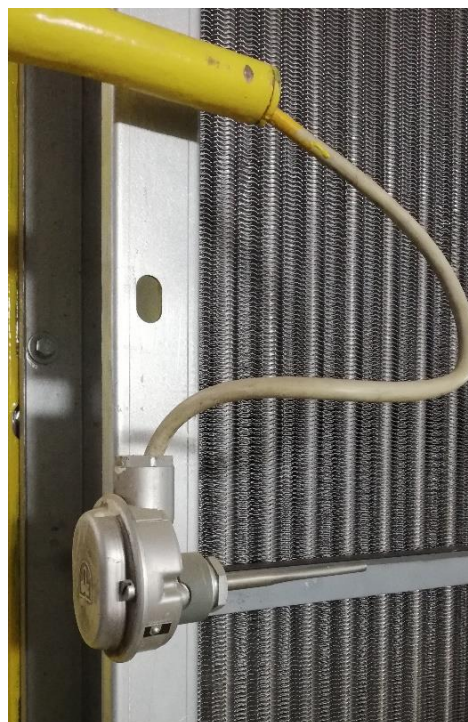
### 4.7.1 Měření teploty

Pro měření teplot v technologii vodních elektráren se využívají stonkové termostaty a odporové teploměry.

Pro ukázkou použijí termostaty řady TH 140 od firmy *APATOR METRA*, které jsou teplotně závislé jednopólové spínače využitelné například jako snímače maximální teploty kapaliny. Pracují na principu nestejné tepelné dilatace dvou různých kovů. Teplotně citlivý element je stonek termostatu, tvořený mosaznou nebo antikorozií trubkou. Signalizace stavu je provedena přepínacím třívorkovým kontaktem. Regulační rozsah této řady je  $20 \div 200$  °C s běžnou diferencí spínací teploty  $1 \div 5$  °C.



Obrázek 4.7 Snímač maximální teploty oleje TH143



Obrázek 4.8 Odporový snímač teploty Pt100

Dále velmi často používaným čidlem je pasivní odporový teploměr, který vyhodnocuje teplotu změnou odporu. Ten je v základním provedení osazen platinovým měřicím odporem. Jeho výhodou je vysoký rozsah hodnot měření. Nevýhodou je pomalá změna teploty a nízká citlivost. Některé teploměry mohou být již v hlavici osazeny převodníkem, který převádí měřený odpor na proudový signál 4–20 mA. Běžně používaným materiálem je platina, pro příklad odporový snímač Pt100 na *Obr. 4.8*, který při teplotě 0 °C je roven 100 Ω.

#### 4.7.2 Snímače tlaku

Snímače tlaku můžeme rozdělit na čidla měřící tlaky absolutní, nebo tlaky vůči atmosféře, popř. tlaky rozdílové. Pro potřeby obsluhy vystačí manometry s přímým



ukazováním hodnoty, pro potřeby automatu je zapotřebí měřit tlak dvouhodnotově nebo analogovým signálem.

Příkladem mohou být snímače na obrázku *Obr. 4.10*, zleva dva senzory tlaku SN63 od výrobce WIKA, slouží pouze jako vizuální snímače pro  $0 \div 250$  bar. Dále tlakový senzor PT5301 od IFM s měřicím rozsahem  $0 \div 250$  bar a výstupním analogovým signálem  $0 \div 20$  mA a také elektronický tlakový snímač TSE1-N od ARGO HYTOS s rozsahem měření  $0 \div 400$  bar. Snímacím prvkem je piezorezistivní křemíkový snímač. Výstupem je tranzistorově spínaný proud do 200 mA.



*Obrázek 4.10 Snímače tlaku, zleva:  
2xSN63, PT5301 a TSE1-N*



*Obrázek 4.9 Snímače tlaku s  
konektorem*

### 4.7.3 Měření hladin

Měření hladin se uplatňuje v olejových nádobách, jímkách s vodou a také pro měření hladiny na řece před a za turbínou. Měření se nejčastěji provádí analogově pomocí tlakových piezoelektrických snímačů. Hladiny v jímkách mohou být pak vyhodnocovány dvouhodnotově pomocí plováků.

Pro ukázkou snímač NT63 od Buhler Technologies měřící hladinu oleje, kterou vyhodnocuje jako analogový signál. K dostání je tento snímač také jako kombinovaný snímač hladiny a teploty kapaliny.



Obrázek 4.11 Snímač hladiny NT63



Obrázek 4.12 Snímač hladiny NT63 v detailu

#### 4.7.4 Měření polohy

Jako snímače polohy se využívají koncové mechanické spínače a také bezkontaktní indukční snímače. U koncových snímačů se spíná mechanická spínací jednotka, která dále svými kontakty signalizuje stav. Indukční snímače využívají principu rozladění rezonančního obvodu cizím feromagnetickým materiálem.

Vhodným příkladem snímače polohy může být indukčním snímač polohy rozváděcího kola turbíny *BTL5-E10-M0300-P-S32* od firmy Balluff. Jedná se o lineární provedení, kde analogová hodnota výstupního signálu závisí od zasunutí jádra do solenoidu.

Snímač je napájen 24 VDC a dokáže snímat pohyb v rozsahu 0 ÷ 300 mm. Jeho výstupem je analogový signál 4 ÷ 20 mA.



*Obrázek 4.13 Snímač polohy  
rozdávěcího kola*

#### **4.7.5 Snímání otáček**

Při snímání otáček se využívá impulsní metody, například pomocí indukčních snímačů. Ty detekují zuby na otáčející se hřídeli a jejich výstupem jsou pulsy, které jsou dále vyhodnocovány. Otáčky se poté dopočítávají ze znalosti počtu zubů.

Pro ukázkou například indukční snímač IFC229 od výrobce IFM.



*Obrázek 4.14 Indukční snímač  
IFC229*



## 5 Technický popis MVE Štvanice

Vodní dílo Štvanice se nachází v západní části pražského ostrova Štvanice na říčním kilometru 50,69. Bylo dokončeno na počátku 20. století v roce 1913 při řešení zesplavnění Vltavy.

Celé dílo sestává z Helmovského jezů v levém rameni s vorovou propustí u levého břehu a soustavy plavebních komor v pravém rameni. Mezi Helmovským jezem a ostrovem je vestavěna odlehčovací (štěrková) propust. Na horní špičce ostrova je umístěna MVE Štvanice. V pravém rameni se u levého břehu nachází plavební komory. V pravé části pravého ramene se nachází pohyblivý jez a sportovní slalomový kanál.



Obrázek 5.1 Situace vodního díla



Obrázek 5.2 MVE Štvanice

## 5.1 Základní charakteristika MVE Štvanice

Technologickou část MVE tvoří tři stejná turbosoustrojí s přímoproudými Kaplanovými turbínami typu 4-KPK-10, každá o hltnosti  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  spojenými s alternátory typu H 760460/56 o instalovaném výkonu 1,89 MW se jmenovitými otáčkami  $107,1 \text{ min}^{-1}$  a jmenovitým napětím 6,3 kV. Průměr oběžného kola je 3 500 mm. Jmenovitý čistý spád je 4 m.

Vtok do MVE je zajištěn z levého i pravého ramene řečiště a je chráněn česlicovými poli, která jsou tvořena svislými pruty  $90 \times 10 \text{ mm}$  s roztečí 100 mm. Česle jsou čištěny čistícím strojem. Naplaveniny jsou ukládány do kontejneru, který je průběžně odvážen. Odtok je vyústěn do levého ramene.

## 5.2 Turbína

Na MVE Štvanice jsou tři horizontální Kaplanovy S-turbíny od firmy MAVEL, a.s. o maximálním výkonu 1930 kW a jmenovitých otáčkách  $107,14 \text{ min}^{-1}$ . Průběžné otáčky turbíny jsou  $280 \text{ min}^{-1}$  pro 15 minut. Turbína jmenovitě zpracovává čistý spád 4 m s jmenovitým průtokem  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Regulace probíhá rozváděcím kolem se 16 rozváděcími lopatkami a 4 lopatkami na oběžném kole. Regulačními pohony jsou lineární dvojčinné hydromotory, jednotlivě pro každé kolo. Všechny turbíny jsou stejných parametrů a po rekonstrukci v roce 2018 byly zprovozněny.



Obrázek 5.3 Pohled na turbínu



Obrázek 5.4 Pohled na turbínu s generátorem



Obrázek 5.5 Štítek turbíny

### 5.3 Generátor

Použitý generátor je horizontální synchronní generátor typu H 760460/56 od Škoda Plzeň s následujícími parametry:

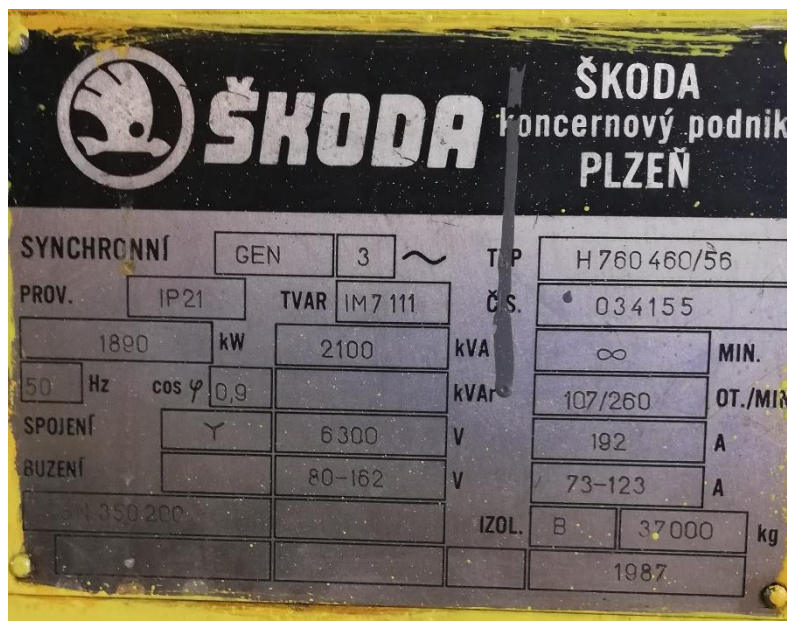
Jmenovitý zdánlivý výkon	S	= 2 100 kVA
Jmenovitý činný výkon	P	= 1 890 kW
Jmenovité napětí	U	= 6 300 V
Jmenovitý proud	I	= 192 A
Jmenovitý účinník	cosφ	= 0,9
Jmenovitá frekvence	f	= 50 Hz
Jmenovité / průběžné otáčky	n	= 107,14/ 280 1/min
Moment setrvačnosti	J	= 45 000 kg·m <sup>2</sup>
Budící napětí	U <sub>b</sub>	= 80-162 V
Budící proud	I <sub>b</sub>	= 73-123 A
Podélná synchronní reaktance	x <sub>d</sub>	= 83,3 %
Přechodná podélná reaktance	x <sub>d</sub> '	= 32,6 %



Rázová podélná reaktance	$x_d''$	= 17,3 %
Přech. podélná čas. konst. naprázdno	$T_{d0}'$	= 1,73 s
Přech. podélná čas. konst. zkratu	$T_d'$	= 0,58 s
Rázová podélná čas. konst. zkratu	$T_d''$	= 0,016 s



Obrázek 5.6 Hydroalternátor 2,1 MVA



Obrázek 5.7 Štítek generátoru

## 5.4 Vývodový transformátor

Vývodový transformátor T1 je olejový hermetizovaný transformátor typu OTN od výrobce *SEA*.

Jmenovitý výkon	$S_n$	= 6 300 kVA
Jmenovité primární napětí	$U_1$	= 22 kV
Jmenovité sekundární napětí	$U_2$	= 6,3 kV
Frekvence	$f$	= 50 Hz
Ztráty naprázdno	$P_0$	= 5 000 W
Ztráty nakrátko (při 75°C)	$P_k$	= 40 000 W
Napětí nakrátko (při 75°C)	$u_k$	= 8%
Zapojení	$Yd1$	
Materiál vinutí	Cu/Cu	
Třída izolace	A/A	
Chlazení	ONAN	
Stupeň krytí	IP54	
Regulace strany VN		$\pm 2 \times 2,5\%$

## 5.5 Budicí soustava

Z rozváděče buzení se zajišťuje buzení synchronního generátoru. Každý generátor má svůj rozváděč, který je vybavený budícím transformátorem, výkonovými prvky a regulátorem včetně ochranných obvodů. Pro buzení generátorů se na MVE Štvanice používá systém statického buzení SBS/G od firmy Tenel.

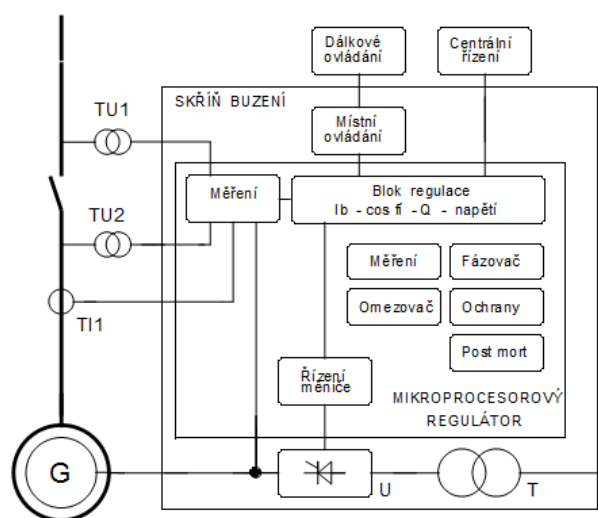


Obrázek 5.8 Štítek skříně statického buzení pro TG na MVE Štvanice

Pro regulaci napětí generátoru je použit mikroprocesorový regulátor buzení TE-5403. Regulátor řídí silovou část statického buzení s plně řízeným tyristorovým můstkem. Regulátor umožňuje tyto regulační režimy:

- regulace budícího proudu,
- regulace napětí se statikou,
- regulace napětí při provozu do vyčleněné sítě,
- regulace  $\cos \phi$ ,
- regulaci jalového výkonu,
- možnost použití PSS.

Regulátor komunikuje s řídicím systémem prostřednictvím dvouhodnotových vstupů a výstupů a pomocí sběrnice RS485 v protokolu ModBus a Ethernet. Regulátor obsahuje i automatický synchronizátor, který zajišťuje srovnání napětí generátoru, kontroluje a předává informaci o srovnání otáček stroje s kmitočtem sítě a po kontrole fázového rozdílu vyšle zapínací povel na vývodový výkonový vypínač generátoru. Fázovač obsažený v regulátoru umožňuje fázování dvou fázovaných vypínačů. Fázování je umožněno i ručně, kdy obsluha pomocí tlačítek srovnává napětí a otáčky se sítí. Po srovnání napětí, otáček a fáze vysílá obsluha tlačítkem zapínací povel na cívku vypínače generátoru. Chybné vyslání zapínacího povelu je blokováno základními blokadami fázovací soupravy, jako synchronoskop a synchrocheck.



Obrázek 5.9 Blokové schéma zapojení buzení

Regulátor obsahuje i ochranné funkce, které fungují jako omezovače. Jejich úkolem je rychlé omezení hodnot v případě překročení určité meze. Meze jsou voleny i s ohledem na činnost ostatních zařízení. Základní ochranné funkce jsou:

- omezení rotorového proudu,
- omezení statorového proudu,
- hlídač meze podbuzení,
- podfrekvenční ochrana  $U/f$ ,
- stabilizace výkonu systémovým stabilizátorem.



Obrázek 5.10 Pohled na vnitřní uspořádání komponentů



Obrázek 5.11 Rozváděč buzení a fázování

Transformátor buzení je vzduchový trojfázový transformátor s přirozeným chlazením a izolací třídy F. Výkon 63 kVA a převodem 400/300 V, Dy1, 50 Hz. Jmenovitým výstupním parametrem buzení je jmenovité napětí 250 V, jmenovitý proud 150 A. Hodnota stropního napětí je 400 V a proudové přetížení 300 A (20s).



## 5.6 Vyvedení výkonu

Výkon z generátorů G1, G2 a G3 je vyveden silovými kabely 3x10 – CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup> do polí R6.2, R6.3 a R6.4 rozvodny R6-6,3kV. Kabely jsou většinou vedeny na kabelových lávkách a jsou odděleny od NN kabelů pomocí tepelně izolačních ceminových desek.

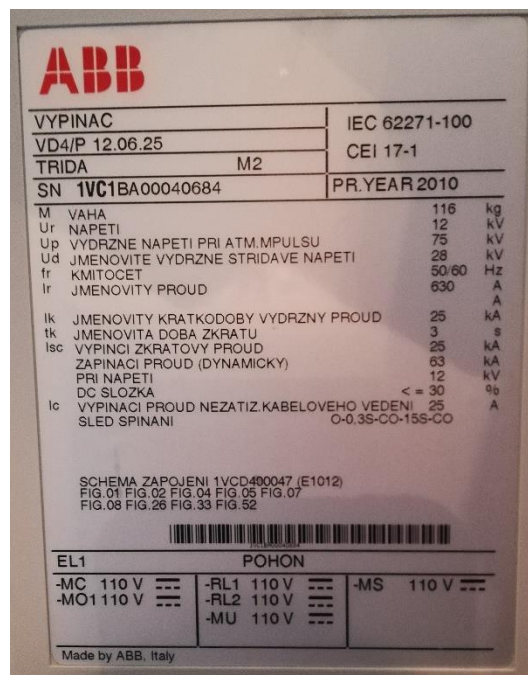


Obrázek 5.12 Štítek rozváděče

Pole rozvodny R6.2, R6.3 a R6.4 jsou identické, jedná se o systém UniGear ZS1 od ABB. Ve spodní VN části je výsuvný vypínač VD4, uzemňovač a přístrojové transformátory. MTP má jedno ochranné jádro pro generátorovou ochranu F251 (SR489-GE), jedno měřící jádro pro místní měření a pro regulátor buzení RB1 a jedno cejchované jádro určené pro fakturační měření. MTN s jedním jádrem pro měření generátorové ochrany, převodníku UF251, místního měření a regulátoru buzení. Pohon vypínače je na stejnosměrné napětí 110 VDC, které je jištěno jističem umístěným v NN nástavbě rozváděče. Uzemňovač má mechanický ruční pohon.



Obrázek 5.13 Vakuový vypínač VD4 od ABB



Obrázek 5.14 Štítek vypínače



Na horních dveřích NN části je multifunkční generátorová ochrana F251 (SR489-GE), schéma s prvky rozváděče s optickou signalizací stavu, přepínač pro odpojení napájení, tlačítka pro volbu místní ovládnání vypínače (ZAP/VYP), ampérmetr, voltmetr, kontrolka poruchy, tlačítko testu kontrolky a napěťový indikátor.



Obrázek 5.15 Rozvodna R6-6,3kV



Obrázek 5.16 Pohled do NN části

Z pole R6.6 je vývod na transformátor T1 22/6,3kV kabelem 2||3x10–CXEKVCEY 1x120mm<sup>2</sup>. Konstrukce a uspořádání tohoto pole je stejné jako u předešlých polí. MTP s jedním ochranným jádrem pro transformátorovou ochranu F251 (SR745-GE) a jedním měřicím jádrem pro místní měření. Na přípojnicích je umístěn MTN, jehož jedno jádro je využito pro tři měření fázování, umístěného v rozvaděčích buzení RB1-3 jednotlivých generátorů, místní měření a pro měření ochrany F251. Druhé cejchované jádro je určeno pro fakturační měření. V horní NN části je na dveřích umístěna multifunkční transformátorová ochrana F251 (SR745).

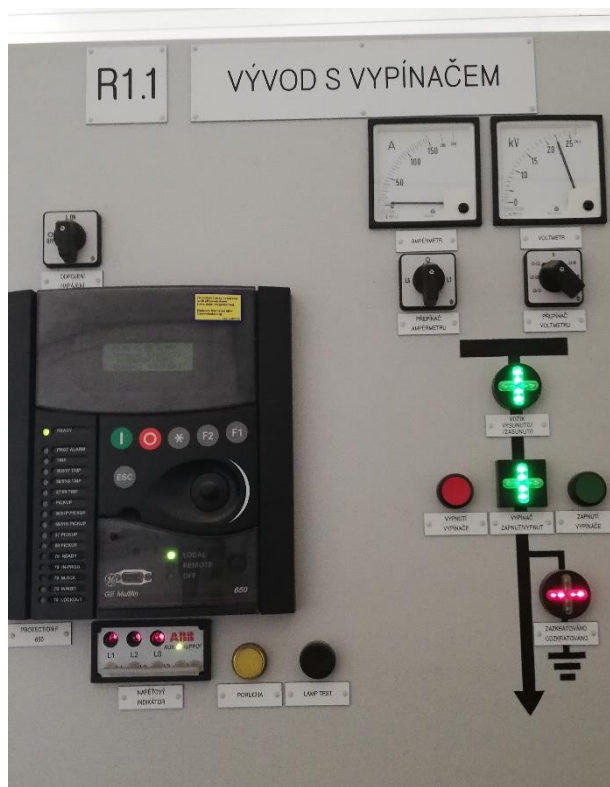


Obrázek 5.17 Pohled na horní dveře skříně

Rozvodna R1-22kV sestává ze dvou polí typu UniGear ZS1. Skříň R1.1 obsahuje vývod s výsuvným vakuovým vypínačem pro vývod na transformátor T1 kabelem 3x22–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>, uzemňovač, svodič přepětí a MTP s jedním ochranným jádrem pro vývodovou ochranu F251 (F650), převodník U111 a jedno měřicí jádro pro místní měření a MTN pro měření vývodové ochrany, převodníku a místního měření. Pohon vypínače je na stejnosměrné napětí 110 VDC.

V horní NN části je na dveřích umístěna multifunkční vývodová ochrana F251 (F650), schéma s prvky optické signalizace stavu, paketový přepínač pro odpojení napájení a tlačítka pro volbu místní ovládnání vypínače (ZAP/VYP), ampérmetr, voltmetr, kontrolka poruchy, tlačítko testu kontrolky a napěťový indikátor.

Do skříně R1.2 jsou připojeny dva paralelní kabely typu 22 - AXEKCY 240 mm<sup>2</sup> pro připojení MVE k transformační stanici TS2860 – „NULTÁ OPĚRA“. Spodní VN část obsahuje uzemňovač s mechanickým ručním pohonem, MTP s jedním měřicím cejchovaným jádrem určeným pro fakturační měření elektroměru a jedním ochranným jádrem pro transformátorovou ochranu F251 (SR745) (v poli R6.6) a MTN jehož cejchované jádro je pro fakturační měření elektroměru. V horní NN části je na dveřích umístěno schéma s prvky optické signalizace stavu, paketový přepínač pro odpojení napájení, kontrolka poruchy, tlačítko testu kontrolky a napěťový indikátor.



Obrázek 5.18 Pohled na dveře rozváděče R1.1

Kabely v rozvodně jsou ukončeny VN koncovkami pro vnitřní instalaci s lisovanými kabelovými.

## 5.7 Vlastní spotřeba

Pro napájení obvodů vlastní spotřeby elektrárny slouží dva suché nízkoztrátové transformátory s měděným vinutím T2 a T3 400kVA 6,3/0,4kV. Ty jsou instalovány na podestách nad soustrojím TG2 a TG3. Připojení transformátorů je z polí rozvodny R6.1 a R6.5 VN kabely typu 3x10-CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup> a z každého transformátoru jsou napájeny rozváděče +RH1 a +RH2 kabely typu 3x1-YY 1x150 mm<sup>2</sup>+1x 1-YY 1x150 mm<sup>2</sup>, viz jednopólové schéma v příloze.

Transformátory T2 a T3 typu TTR-A od výrobce *SEA* jsou následujících parametrů:

Jmenovitý výkon zdánlivý	S	= 400 kVA
Jmenovité primární napětí	U <sub>1</sub>	= 6,3 kV
Jmenovité sekundární napětí	U <sub>2</sub>	= 0,4 kV
Frekvence	f	= 50 Hz
Ztráty naprázdno	P <sub>0</sub>	= max. 750 W
Ztráty nakrátko (při 75°C)	P <sub>k</sub>	= max. 3700 W
Napětí nakrátko (při 75°C)	uk	= 6%
Zapojení	Dyn1	
Materiál vinutí	Cu/Cu	
Třída izolace	F/F	
Chlazení	AN	
Stupeň krytí	IP21	
Regulace strany VN		± 2x2,5%

Pro potřeby napájení vlastní spotřeby v období povodní a pro režim startu ze tmy je vedle elektrárny instalován mobilní dieselagregát, ten je připojen na přívodní jistič v rozváděči +RH1. Jistič je společný pro přívod dieselagregátu i přívod NN sítě PRE. Volba napájení je volena manuálně přepínačem obsluhou.



*Obrázek 5.19 Suchý transformátor pro vlastní spotřebu*

## 5.8 Řídicí systém

Řídicí systém elektrárny je rozdělen na řídicí systém společných částí a na jednotlivé části pro každé soustrojí. Společná část řídicího systému je umístěna v rozváděči +DC1. Jednotlivé řídicí systémy soustrojí v rozváděčích +DT11(+DT21, +DT31) a jejich oddělené části v blízkosti turbín v rozváděčích +DT12, resp. +DT22 a +DT32.

Řídicí systém pro společnou část je složen z procesoru PM583-ETH, komunikační jednotky a vstupní/výstupní moduly pro připojení technologických zařízení a dalších přístrojů. Procesor umožňuje časovou synchronizaci protokolem SNTP (Simple Network Time Protocol) a komunikační jednotky zařizují připojení sítě Ethernet (Modbus TCP) a RS485 (Modbus RTU). Ve dveřích rozváděče je instalován dotykový panel, na kterém se zobrazuje kompletní technologie a je možné z něj ovládat jednotlivé automaty soustrojí.

Složení rozváděčů řídicích systémů pro jednotlivé turbíny je obdobných komponentů jako u společné části. Základ tvoří procesor, komunikace a analogové/binární karty. Zajišťují sekvenční řízení soustrojí, sběr dat o stavu technologie soustrojí a zajišťují spolupráci s podsystemy řízení soustrojí jako je regulátor turbíny, regulátor buzení a obvody zabezpečovací automatiky. V rámci rozváděče je řešena i diagnostika vibrací generátoru a turbíny.

## 6 Teoretický rozbor a praktický výpočet zkratových poměrů

V této kapitole se věnuji stručnému teoretickému rozboru výpočtu zkratových proudů. Postup výpočtu je stanoven normou ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů.

Dále tyto postupy aplikuji na výpočet zkratových proudů na MVE Štvanice, kde výsledkem ověřím dimenzování rozvodny. Při návrhu budu respektovat impedance kabelů.

### 6.1 Rozbor výpočtu zkratových proudů

Při výpočtu zkratových proudů se vychází z jmenovitých údajů elektrických zařízení a topologického uspořádání soustavy. Výpočtem se zjišťuje maximální zkratový proud, který určuje zkratovou odolnost elektrického zařízení a minimální zkratový proud, který je základem pro následný návrh nastavení ochran.

#### 6.1.1 Předpoklady pro výpočet

- Při výpočtu zkratu budu předpokládat, že se parametry prvků při průběhu trvání zkratu nemění.
- Soustava je před zkratem symetrická.
- Nebudu uvažovat odpory elektrických oblouků.

#### 6.1.2 Postup výpočtu

Výpočet provedu metodou ekvivalentního napěťového zdroje, který se umístí do místa zkratu a bude jediným aktivním zdrojem napětí soustavy. Postupovat budu přibližně podle následujících bodů:

1. Sestavil jsem náhradní schéma soustavy.
2. Vypočetl jsem pro všechny prvky soustavy jejich sousledné složky impedance, které jsou vztažené ke jmenovitým výkonům a napětím daných prvků.
3. Určil jsem místo zkratu a tím i vztažné napětí.
4. Jednotlivé impedance prvků jsem přepočítal na příslušnou napěťovou hladinu v místě zkratu pomocí vztahu:

$$Z_P = Z_N \cdot \left(\frac{U_V}{U_N}\right)^2 \quad (\Omega) \quad (6.1)$$

kde:  $Z_P$  – přepočítaná impedance ( $\Omega$ )

$Z_N$  – původní impedance při jmenovitém napětí ( $\Omega$ )

$U_V$  – vztažné napětí v místě zkratu (V)

$U_N$  – jmenovité napětí prvku (V)

5. Pomocí postupného zjednodušení získám výslednou impedanci v místě zkratu.
6. Vypočtu počáteční rázový zkratový proud, popřípadě další složky zkratového proudu.

### 6.1.3 Zkratové impedance elektrických zařízení

#### 6.1.3.1 Náhradní impedance síťového napáječe

Sousledná složka impedance sítě se určí vztahem:

$$Z_S = \frac{c \cdot U_{nS}}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3S}} \quad (\Omega) \quad (6.2)$$

Kde:  $c$  – napěťový součinitel (-), jeho velikost je určena jmenovitým napětím sítě a volbou výpočtu pro maximální/minimální zkratový proud podle ČSN EN 60909-0

$U_{nS}$  – jmenovité napětí soustavy v bodě připojení (V)

$I''_{k3S}$  – počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení (A)

Dále určím  $X_S = 0,995 \cdot Z_S$  a  $R_S = 0,1 \cdot X_S$ . Potom výsledná impedance sítě ve složkovém tvaru:

$$\overline{Z}_S = R_S + jX_S \quad (\Omega) \quad (6.3)$$

#### 6.1.3.2 Náhradní impedance synchronního alternátoru

V případě, že je soustava napájena přímo z generátoru, používá se pro výpočet rázových zkratových proudů v sousledné složkové soustavě následující vztah.

$$\overline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX''_d) \quad (\Omega) \quad (6.4)$$

kde:  $K_G$  – korekční součinitel (-), viz vztah (6.4)

$R_G$  – rezistence generátoru ( $\Omega$ )

- tato hodnota je určena podle ČSN EN 60909-0

- pro generátory s  $U_{rG} > 1$  kV a  $S_{rG} < 100$  MVA platí  $R_G = 0,07X''_d$

$X''_d$  – podélná rázová reaktance generátoru ( $\Omega$ )

Korekční součinitel  $K_G$  se určí podle vztahu:

$$K_G = \frac{U_n}{U_G} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (-) \quad (6.5)$$

kde:  $U_n$  – jmenovité napětí soustavy (V)

$U_G$  – jmenovité napětí generátoru (V)

$c_{max}$  – napěťový součinitel (-)

$\varphi_{rG}$  – fázový úhel mezi napětím a proudem generátoru (°)

$x_d''$  – poměrná rázová reaktance generátoru (-), která se vypočítá jako:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{nG}} = \frac{X_d''}{\left(\frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}\right)} \quad (-) \quad (6.6)$$

kde:  $X_d''$  – podélná rázová reaktance generátoru ( $\Omega$ )

$S_{nG}$  – zdánlivý výkon generátoru (VA)

### 6.1.3.3 Náhradní impedance transformátoru

Impedance dvojitvinutového transformátoru lze určit jako:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (\Omega) \quad (6.7)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (\Omega) \quad (6.8)$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} \quad (A) \quad (6.9)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega) \quad (6.10)$$

$$\overline{Z}_T = R_T + jX_T \quad (\Omega) \quad (6.11)$$

kde:  $U_{rT}$  – jmenovité napětí transformátoru (V)

$S_{rT}$  – jmenovitý zdánlivý výkon generátoru (VA)

$u_k$  – napětí nakrátko (%)

$\Delta P_{krT}$  – jmenovité ztráty nakrátko transformátoru (W)

$I_{rT}$  – jmenovitý proud transformátoru (A)

#### 6.1.3.4 Náhradní impedance asynchronního motoru

Impedance asynchronního motoru lze určit jako:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\sum S_{rM}} \quad (\Omega) \quad (6.12)$$

kde:  $U_{rM}$  – jmenovité napětí motoru (V)

$\sum S_{rM}$  – suma jmenovitých zdánlivých výkonů AM ve vlastní spotřebě (VA)

$I_{LR}/I_{rM}$  – poměr záběrného proudu ke jmenovitému při zabrzděném motoru

Dále určím  $X_M = 0,922 \cdot Z_M$  a  $R_M = 0,42 \cdot X_M$ .

$$\overline{Z}_M = R_M + jX_M \quad (\Omega) \quad (6.13)$$

#### 6.1.3.5 Náhradní impedance kabelů

Sousledná složka zkratové impedance vedení se určí z parametrů a délky vodiče jako:

$$\overline{Z}_V = (R_V + jX_V) \cdot l_V \quad (\Omega) \quad (6.14)$$

kde:  $l_V$  – délka vedení (km)

$R_V$  – rezistence vedení na jednotku délky při 20°C ( $\Omega/\text{km}$ )

$X_V$  – reaktance vedení na jednotku délky ( $\Omega/\text{km}$ )

#### 6.1.4 Počáteční souměrný rázový zkratový proud

Počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I_k''$  je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (A) \quad (6.15)$$

kde:  $c$  – napěťový součinitel (-)

$U_n$  – jmenovité napětí v místě zkratu (V)

$Z_k$  – zkratová impedance v místě zkratu ( $\Omega$ )



### 6.1.5 Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud  $i_p$  je maximální okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. Jeho velikost závisí na okamžiku vzniku zkratu. Při dimenzování elektrických zařízení se bere ohled na tento proud z hlediska silových účinků zkratového proudu.

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (A) \quad (6.16)$$

kde:  $\kappa$  – součinitel pro výpočet  $i_p$ , je závislý na poměru  $R/X$  a vychází z:

$$\kappa = 1,02 \cdot 0,98^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (-) \quad (6.17)$$

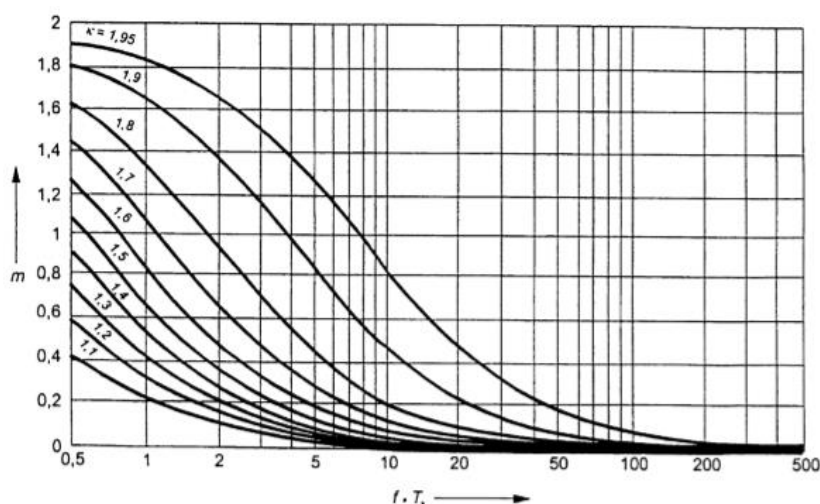
### 6.1.6 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud.

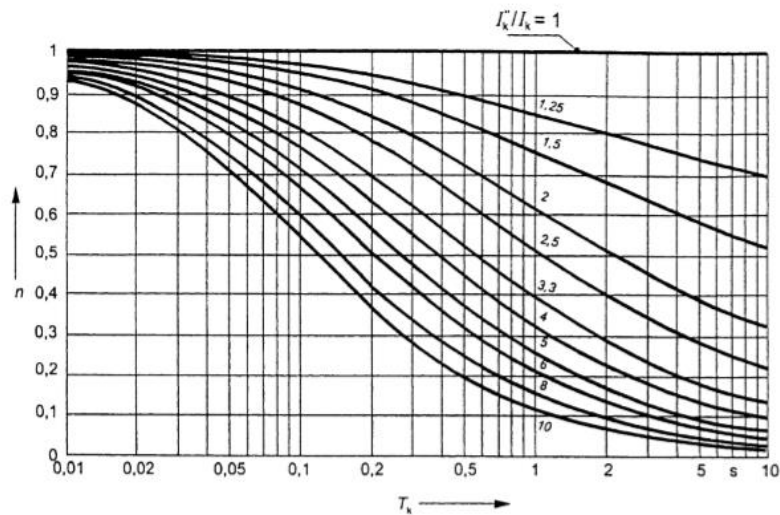
$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (A) \quad (6.18)$$

kde:  $m$  – součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky pro každý zkratový proud (-), viz *Obr. 6.1*

$n$  – součinitel pro tepelné účinky střídavé složky pro každý zkratový proud (-), viz *Obr. 6.2*

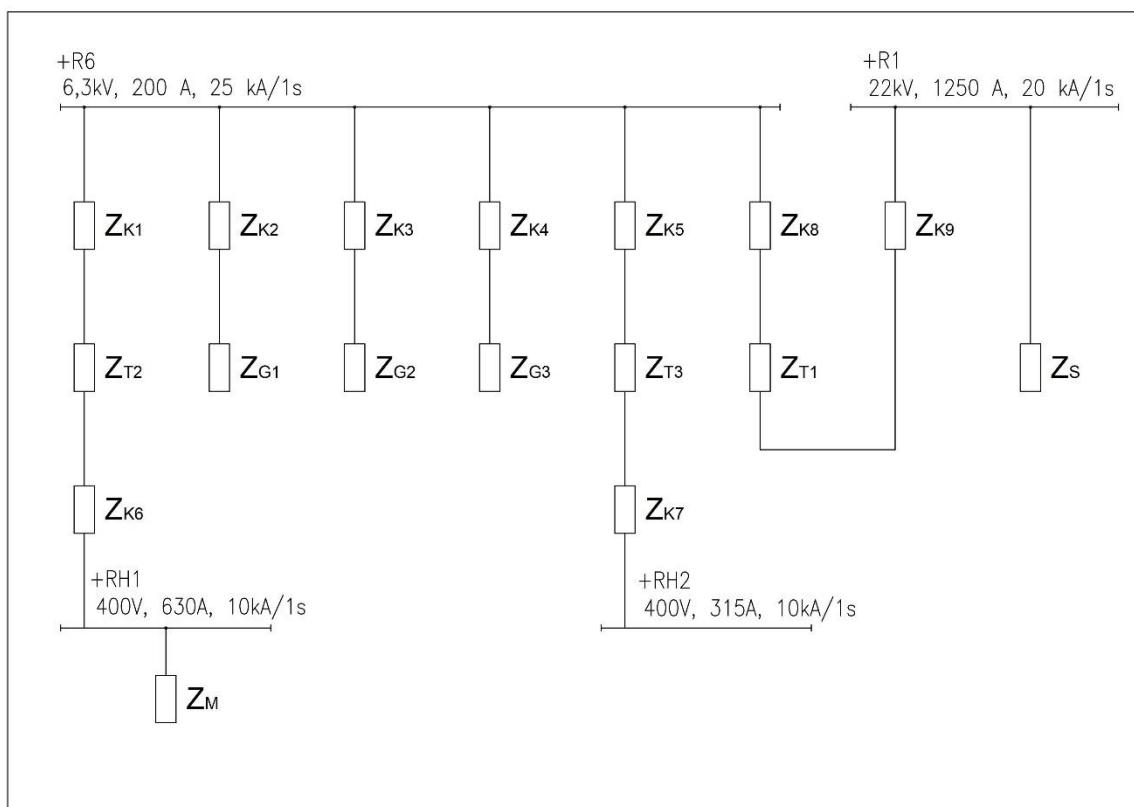


Obrázek 6.1 Součinitel  $m$

Obrázek 6.2 Součinitel  $n$ 

## 6.2 Výpočet zkratových proudů

### 6.2.1 Sestavení náhradního schéma



Obrázek 6.3 Náhradní schéma

Vstupní údaje pro výpočty byly převzaty ze štítků přístrojů a katalogových listů.

## 6.2.2 Výpočet zkratových impedancí

### 6.2.2.1 Síťový napáječ

Vstupní údaje pro výpočet

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

$$I''_{kS} = 7,4 \text{ kA (údaj získán od pracovníků PRE)}$$

$$c_{MAX} = 1,1$$

$$Z_S = \frac{c \cdot U_{nS}}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3S}} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 7,4 \cdot 10^3} = 1,88 \text{ } (\Omega) \quad (6.19)$$

$$X_S = 0,995 \cdot Z_S = 0,995 \cdot 1,88 = 1,87 \text{ } (\Omega) \quad (6.20)$$

$$R_S = 0,1 \cdot X_S = 0,1 \cdot 1,87 = 0,19 \text{ } (\Omega) \quad (6.21)$$

$$\overline{Z}_S = R_S + jX_S = 0,19 + j1,87 \text{ } (\Omega) \quad (6.22)$$

### 6.2.2.2 Synchronní generátor

Vstupní údaje pro výpočet

$$S_{nG} = 2 \text{ } 100 \text{ kVA}$$

$$U_{nG} = 6 \text{ } 300 \text{ V}$$

$$\cos\varphi_G = 0,9$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$x''_d = 17,3 \%$$

Výpočet

$$X''_d = \frac{x''_d}{100} \cdot \left( \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \right) = \frac{17,3}{100} \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{2,1 \cdot 10^6} = 3,27 \text{ } (\Omega) \quad (6.23)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_G} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x''_d \cdot \sin\varphi_{rG}} = \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{(6,3 \cdot 10^3)^2} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,173 \cdot 0,43} = 1,023 \text{ } (-) \quad (6.24)$$

$$R_G = 0,07 \cdot X''_d = 0,07 \cdot 3,27 = 0,23 \text{ } (\Omega) \quad (6.25)$$

$$\overline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX''_d) = 1,023 \cdot (0,23 + j3,27) = 0,24 + j3,35 \text{ } (\Omega) \quad (6.26)$$

**6.2.2.3 Vývodový transformátor T1**Vstupní údaje pro výpočet

$$S_n = 6\,300 \text{ kVA}$$

$$U_2 = 6,3 \text{ kV}$$

$$I_{rt} = 577 \text{ A}$$

$$P_k = 40\,000 \text{ W}$$

$$u_k = 8\%$$

Výpočet

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{(6,3 \cdot 10^3)^2}{6300 \cdot 10^3} = 0,504 \text{ } (\Omega) \quad (6.27)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} = \frac{40000}{3 \cdot 577^2} = 0,04 \text{ } (\Omega) \quad (6.28)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,504^2 - 0,04^2} = 0,502 \text{ } (\Omega) \quad (6.29)$$

$$\overline{Z}_{T1} = R_T + jX_T = 0,04 + j0,502 \text{ } (\Omega) \quad (6.30)$$

**6.2.2.4 Transformátor vlastní spotřeby T2, T3**Vstupní údaje pro výpočet

$$S_n = 400 \text{ kVA}$$

$$U_2 = 0,4 \text{ kV}$$

$$P_k = 3700$$

$$u_k = 6\%$$

Výpočet

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(0,4 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^3} = 0,024 \text{ } (\Omega) \quad (6.31)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} = \frac{3700}{3 \cdot 577,35^2} = 0,0037 \text{ } (\Omega) \quad (6.32)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,024^2 - 0,0037^2} = 0,0237 \text{ } (\Omega) \quad (6.33)$$

$$\overline{Z}_{T2} = R_T + jX_T = 0,0037 + j0,0237 \ (\Omega) \quad (6.34)$$

### 6.2.2.5 Kabelová vedení 3x10–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>

Kabel typu 3x10–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup> je použit pro připojení všech generátorů a transformátorů pro vlastní spotřebu T2, T3 do polí rozvodny R6-6,3kV. Jednotlivé výpočty provádím pro odlišné délky a s uvažováním indukčnosti kabelu při rovinném uspořádání.

#### Vstupní údaje pro výpočet

Typ kabelu: 3x10–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,387 \ \Omega/\text{km}$$

$$L_k = 0,590 \ \text{mH}/\text{km}$$

#### Výpočet z +T2 do +R6.1

$$l_{k1} = 0,03 \ \text{km}$$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{k1} &= R_k \cdot l_{k1} + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot l_{k1} \cdot L_k \\ &= 0,387 \cdot 0,03 + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 0,03 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,0116 + j5,56 \cdot 10^{-3} (\Omega) \end{aligned} \quad (6.35)$$

#### Výpočet z +G1 do +R6.2

$$l_{k2} = 0,03 \ \text{km}$$

$$\overline{Z}_{k2} = 0,0116 + j5,56 \cdot 10^{-3} (\Omega)$$

#### Výpočet z +G2 do +R6.3

$$l_{k3} = 0,04 \ \text{km}$$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{k3} &= R_k \cdot l_{k3} + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot l_{k3} \cdot L_k \\ &= 0,387 \cdot 0,04 + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 0,04 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,0155 + j7,41 \cdot 10^{-3} (\Omega) \end{aligned} \quad (6.36)$$

#### Výpočet z +G3 do +R6.4

$$l_{k4} = 0,05 \ \text{km}$$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{k4} &= R_k \cdot l_{k4} + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot l_{k4} \cdot L_k \\ &= 0,387 \cdot 0,05 + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 0,05 \cdot 0,59 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,0194 + j9,27 \cdot 10^{-3} \ (\Omega) \end{aligned} \quad (6.37)$$

**6.2.2.6 Kabelová vedení 3x1-YY 1x150 + 1x1-YY 1x150 mm<sup>2</sup>**

Kabely typu 3x1-YY 1x150mm<sup>2</sup> + 1x1-YY 1x150mm<sup>2</sup> slouží pro připojení hlavních silových rozváděčů +RH1 a +RH2 k transformátorům vlastní spotřeby T2 a T3. Díky dispozičnímu uspořádání mohou zjednodušit výpočty a uvažovat jednotkou délku vedení 25 metrů.

Vstupní údaje pro výpočet

Typ kabelu: 3x1-YY 1x150+1x 1-YY 1x150 mm<sup>2</sup>

$R_k = 0,124 \text{ } \Omega/\text{km}$

Výpočet z +T2 do +RH1

$l_{k6} = 0,025 \text{ km}$

$$\overline{Z}_{k6} = R_k \cdot l_{k6} = 0,124 \cdot 0,025 = 0,0031 \text{ } (\Omega) \quad (6.38)$$

**6.2.2.7 Kabelové vedení 2||3x10–CXEKVCEY 1x120mm<sup>2</sup>**

Pro připojení transformátoru T1 z rozvodny R6-6,3kV slouží kabel typu 2||3x10–CXEKVCEY 1x120mm<sup>2</sup>.

Vstupní údaje pro výpočet

Typ kabelu: 3x10–CXEKVCEY 1x120mm<sup>2</sup>

$R_k = 0,153 \text{ } \Omega/\text{km}$

$L_k = 0,530 \text{ mH/km}$

Výpočet z +R6.6 do +T1

$l_{k8} = 0,03 \text{ km}$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{k8} &= \frac{1}{2} \cdot (R_k \cdot l_{k8} + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot l_{k8} \cdot L_k) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (0,153 \cdot 0,03 + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 0,03 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (0,00459 + j0,005) \\ &= 2,295 \cdot 10^{-3} + j2,5 \cdot 10^{-3} \text{ } (\Omega) \end{aligned} \quad (6.39)$$

### 6.2.2.8 Kabelové vedení 3x22–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>

K vyvedení výkonu z T1 do rozvodny R1-22kV je použit kabel typu 3x22–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>.

#### Vstupní údaje pro výpočet

Typ kabelu: 3x22–CXEKVCEY 1x50mm<sup>2</sup>

$$R_k = 0,387 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$L_k = 0,640 \text{ mH/km}$$

#### Výpočet z +T1 do +R1.1

$$l_{k9} = 0,08 \text{ km}$$

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{k9} &= (R_k \cdot l_{k9} + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot l_{k9} \cdot L_k) \\ &= (0,387 \cdot 0,04 + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 0,04 \cdot 0,64 \cdot 10^{-3}) \\ &= 0,015 + j8,042 \cdot 10^{-3} \text{ } (\Omega) \end{aligned} \quad (6.40)$$

### 6.2.2.9 Pohony vlastní spotřeby

Ve výpočtech budu respektovat vliv asynchronních motorů, které přispívají ke zkratovému proudu. Budící transformátory napájejí statický systém buzení, který se při zkratu nebude chovat jako zdroj zkratového příspěvku, nebudu je tedy při výpočtech uvažovat.

#### Vstupní údaje pro výpočet

$$\Sigma S_{rM} = 140 \text{ kVA}$$

$$U_{rM} = 400 \text{ V}$$

$$I_{LR}/I_{rM} = 5$$

#### Výpočet

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\Sigma S_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{400^2}{140 \cdot 10^3} = 0,228 \text{ } (\Omega) \quad (6.41)$$

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M = 0,922 \cdot 0,228 = 0,21 \text{ } (\Omega) \quad (6.42)$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M = 0,42 \cdot 0,21 = 0,09 \text{ } (\Omega) \quad (6.43)$$

$$\overline{Z}_M = R_M + jX_M = 0,09 + j0,21 \text{ } (\Omega) \quad (6.44)$$

### 6.2.3 Výpočet pro rozvodnu R6

Nyní postupnými kroky přes sério-paralelní kombinace zjednoduším obvod na jednu zkratovou impedanci. Při výpočtech respektuji přepočtení reaktancí na napěťovou hladinu v místě zkratu.

Jako zdroje zkratového proudu uvažuji příspěvky z generátorů, ze sítě a z motorických zátěží ve vlastní spotřebě elektrárny. Budící transformátory napájejí statický systém buzení, který se při zkratu nebude chovat jako zdroj zkratového příspěvku, nebudu je tedy při výpočtech uvažovat.

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p1} &= \overline{Z}_{K1} + (\overline{Z}_{T2} + \overline{Z}_{K6} + \overline{Z}_M) \cdot p^2 \\ &= 0,0116 + j5,56 \cdot 10^{-3} \\ &\quad + (0,0037 + j0,0237 + 0,0031 + 0,09 + j0,21) \\ &\quad \cdot \left(\frac{6,3 \cdot 10^3}{400}\right)^2 = 24,02 + j57,98 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.45)$$

$$I''_{kp1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p1}|} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot |24,02 + j57,98|} = 63,75 \quad (A) \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p2} &= \overline{Z}_{G1} + \overline{Z}_{K2} = 0,24 + j3,35 + 0,0116 + j5,56 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,25 + j3,36 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.47)$$

$$I''_{kp2} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p2}|} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot |0,25 + j3,36|} = 1187,25 \quad (A) \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p3} &= \overline{Z}_{G2} + \overline{Z}_{K3} = 0,24 + j3,35 + 0,0155 + j7,41 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,26 + j3,36 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.49)$$

$$\begin{aligned}I''_{kp3} &= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p3}|} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot |0,26 + j3,36|} \\ &= 1187,25 \quad (A)\end{aligned}\quad (6.50)$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p4} &= \overline{Z}_{G3} + \overline{Z}_{K4} = 0,24 + j3,35 + 0,0194 + j9,27 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,26 + j3,36 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.51)$$

$$I''_{kp4} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p4}|} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot |0,26 + j3,36|} = 1187,25 \quad (A) \quad (6.52)$$



$$\begin{aligned}
\overline{Z}_{p5} &= \overline{Z}_{K8} + \overline{Z}_{T1} + (\overline{Z}_{K9} + \overline{Z}_S) \cdot p^2 \\
&= 2,295 \cdot 10^{-3} + j2,5 \cdot 10^{-3} + 0,04 + j0,502 \\
&+ (0,015 + j8,042 \cdot 10^{-3} + 0,19 + j1,87) \cdot \left(\frac{6,3}{22}\right)^2 \\
&= 0,059 + j0,658 \quad (\Omega)
\end{aligned} \tag{6.53}$$

$$I''_{kp5} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p5}|} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot |0,059 + j0,658|} = 6062,18 \quad (\text{A}) \tag{6.54}$$

$$\begin{aligned}
I''_{kR6} &= \sum_{i=1}^5 I''_{kpi} \\
&= 63,75 + 1187,25 + 1187,25 + 1187,25 + 6062,18 \\
&= 9687,68 = 9,7 \quad (\text{kA})
\end{aligned} \tag{6.55}$$

Celkový nárazový zkratový proud v R6 vypočtu jako součet nárazových zkratových proudů z jednotlivých větví.

Součinitelé  $\kappa$  jsou následující.

$$\begin{aligned}
\kappa_{p1} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{24,02}{57,98}} \\
&= 1,3 \quad (-)
\end{aligned} \tag{6.56}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_{p2} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,25}{3,36}} \\
&= 1,8 \quad (-)
\end{aligned} \tag{6.57}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_{p3} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,25}{3,36}} \\
&= 1,8 \quad (-)
\end{aligned} \tag{6.58}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_{p4} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,25}{3,36}} \\
&= 1,8 \quad (-)
\end{aligned} \tag{6.59}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_{p5} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,059}{0,658}} \\
&= 1,77 \quad (-)
\end{aligned} \tag{6.60}$$

$$\begin{aligned}
i_{pR6} &= \kappa_{p1} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp1} + \kappa_{p2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp2} + \kappa_{p3} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp3} + \kappa_{p4} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp4} \\
&\quad + \kappa_{p5} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp5} \\
&= 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 63,75 + 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1187,25 + 1,8 \cdot \sqrt{2} \\
&\quad \cdot 1187,25 + 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1187,25 + 1,77 \cdot \sqrt{2} \cdot 6062,18 \\
&= 24358,53 = 24,4 \text{ (kA)} \tag{6.61}
\end{aligned}$$

Nyní vypočítám ekvivalentní oteplovací zkratový proud pro rozvodnu R6 a také samostatný oteplovací proud z vývodu jednoho generátoru pro který následně ověřím oteplení kabelu při zkratu.

Podle ČSN EN 60909-0 je pro výpočty oteplovacího proudu potřeba znát hodnotu ustáleného zkratového proudu. Ten určím jako součet jednotlivých příspěvků ustálených zkratových proudů. Jako zjednodušení budu uvažovat u síťového napáječe, že ustálený zkratový proud je roven počátečnímu rázovému zkratovému proudu. Dalším zjednodušením je nulový ustálený zkratový proud asynchronních motorů z RH1.

$$\begin{aligned}
I_k &= 3 \cdot \lambda \cdot I_{rG} + I''_{kp5} = 3 \cdot 3,3 \cdot 193 + 6062,18 = 7972,88 \\
&= 7,97 \text{ (kA)} \tag{6.62}
\end{aligned}$$

Nyní mohu přejít k výpočtu ekvivalentního oteplovacího proudu. V první řadě je potřeba stanovit koeficienty  $m$  a  $n$  z grafů na Obr XX. Pro koeficient  $m$  (součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky) uvažuji  $\kappa = 1,8$  a  $f \cdot T_k = 50$ . Z grafu tedy vyplývá hodnota  $m = 0,15$ . Pak koeficient  $n$  (součinitel pro tepelné účinky střídavé složky) kdy  $T_k = 1$  s a poměr  $I''_{kR6}/I_k = 9,7/7,97 = 1,22$  volím  $n = 0,85$ .

$$I_{thR6} = I''_k \cdot \sqrt{m + n} = 9,7 \cdot \sqrt{0,15 + 0,85} = 9,7 \text{ (kA)} \tag{6.63}$$

Obdobně vypočtu ekvivalentní oteplovací zkratový proud z jednoho generátoru.

$$\kappa = 1,805, f \cdot T_k = 50 \rightarrow m = 0,15$$

$$T_k = 1 \text{ s}, I''_{kp2}/\lambda \cdot I_{rG} = 1187,25/3,3 \cdot 193 = 1,87 \rightarrow n = 0,7$$

$$\begin{aligned}
I_{thp2} &= I''_{kp2} \cdot \sqrt{m + n} = 1187,25 \cdot \sqrt{0,15 + 0,7} \\
&= 1094,59 \text{ (A)} \tag{6.64}
\end{aligned}$$

### 6.2.4 Výpočet pro rozvodnu R1

Při výpočtu zkratových proudů pro skříně rozvodny R1 se budu držet stejného postupu. Vzhledem k tomu, že pohony vlastní spotřeby a místo zkratu oddělují dva transformátory, není zapotřebí uvažovat jejich vliv.

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p1} &= \overline{Z}_{p2} = \overline{Z}_{p3} = \overline{Z}_{p2} \cdot p^2 = (0,25 + j3,36) \cdot \left(\frac{22}{6,3}\right)^2 \\ &= 3,05 + j40,97 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.66)$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p4} &= (\overline{Z}_{K8} + \overline{Z}_{T1}) \cdot p^2 + \overline{Z}_{K9} \\ &= (2,295 \cdot 10^{-3} + j2,5 \cdot 10^{-3} + 0,04 + j0,502) \cdot \left(\frac{22}{6,3}\right)^2 \\ &\quad + 0,015 + j8,042 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,53 + j6,16 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.67)$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{p5} &= \left(\frac{1}{\overline{Z}_{p1}} + \frac{1}{\overline{Z}_{p2}} + \frac{1}{\overline{Z}_{p3}}\right)^{-1} + \overline{Z}_{p4} \\ &= \left(\frac{1}{3,05 + j40,97} + \frac{1}{3,05 + j40,97} + \frac{1}{3,05 + j40,97}\right)^{-1} \\ &\quad + 0,53 + j6,16 = 1,55 + j19,82 \quad (\Omega)\end{aligned}\quad (6.68)$$

$$I''_{kp5} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{p5}|} = \frac{1,1 \cdot 22000}{\sqrt{3} \cdot |1,55 + j19,82|} = 702,1 \quad (A)\quad (6.69)$$

$$I''_{kR1} = I''_{p5} + I''_{kQ} = 702,1 + 7400 = 8102 \cong 8,1 \quad (kA)\quad (6.70)$$

$$\begin{aligned}\kappa_{p5} &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{1,55}{19,82}} \\ &= 1,8 \quad (-)\end{aligned}\quad (6.71)$$

$$\begin{aligned}\kappa_Q &= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{0,19}{1,87}} \\ &= 1,74 \quad (-)\end{aligned}\quad (6.72)$$

$$\begin{aligned}i_{pR1} &= \kappa_{p5} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kp5} + \kappa_Q \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kQ} \\ &= 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 702,1 + 1,74 \cdot \sqrt{2} \cdot 7400 \\ &\cong 20 \quad (kA)\end{aligned}\quad (6.73)$$

$$\begin{aligned}
 I_k &= 3 \cdot \lambda \cdot I_{rG} + I''_{kS} = 3 \cdot 3,3 \cdot 193 \cdot \left(\frac{6,3}{22}\right) + 7,4 \cdot 10^3 = 7947,15 \\
 &= 7,95 \text{ (kA)}
 \end{aligned} \tag{6.74}$$

$$\kappa = 1,8, f \cdot T_k = 50 \rightarrow m = 0,15$$

$$T_k = 1 \text{ s}, I''_{kR1}/I_k = 8,102/7,95 = 1,02 \rightarrow n = 1$$

$$I_{thR1} = I''_{kR1} \cdot \sqrt{m+n} = 8,102 \cdot \sqrt{0,15+1} = 8,688 \text{ (kA)} \tag{6.75}$$

### 6.2.5 Kontrola oteplení kabelu při zkratu

Rozhodl jsem se provést kontrolní výpočet pro kabel z generátoru do rozvodny R6 na oteplení při zkratu. Je nutné navrhnout kabel s takovým průřezem, aby dokázal odolávat tepelným účinkům zkratového proudu. Nesmí docházet k nadměrnému oteplování nad provozní teplotu při normálním provozu nebo překročení maximální dovolené teploty při přetíženích. Překročení takových hodnot může vést k poškození izolace.

Tepelné účinky lze určit dle výpočtem předpokládaného ekvivalentního zkratového proudu  $I_{ke}$ , dobou trvání zkratu  $t_k$  a koeficientem  $K$ . Nejmenší možný průřez, který bude vyhovovat na tepelné namáhání lze určit následujícím výpočtem.

$$\begin{aligned}
 K &= \sqrt{\frac{c_0 \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} \\
 &= \sqrt{\frac{3,5 \cdot (20 + 234,5)}{0,01786} \cdot \ln \frac{234,5 + 130}{234,5 + 90}} \\
 &= 76,14 \text{ (-)}
 \end{aligned} \tag{6.76}$$

kde:  $c_0$  – specifické teplo při 0°C (pro Cu 3,5 J/cm<sup>3</sup>/°C)

$\rho_{20}$  – specifická rezistence při 20°C (pro Cu 0,01786 Ωmm<sup>2</sup>/m)

$\vartheta_f$  – fiktivní teplota vodiče (pro Cu 234,5°C)

$\vartheta_k$  – nejvyšší dovolená teplota při přetížení (dle ČSN 33 2000)

$\vartheta_1$  – nejvyšší dovolená provozní teplota dle ČSN 33 2000

$$S = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K} = \frac{1094,59 \cdot \sqrt{1}}{76,14} = 14,37 \text{ (mm}^2\text{)} \tag{6.77}$$

kde:  $I_{ke}$  – ekvivalentní oteplovací zkratový proud ( $I_{ke}=I_{th2}=1994,59$  A)

Z výsledku je patrné ( $50\text{mm}^2 > 14,37\text{mm}^2$ ), že zvolený průřez vyhověl kontrole na tepelné účinky zkratového proudu. Při zachování stejného typu kabelu, bych zvolil kabel s menším průřezem, dle *Tabulky č.1* je nejmenším průřezem  $35\text{mm}^2$ . Lze si všimnout, že by zvolený kabel byl při provozu na hranici své proudové zatížitelnosti. Z těchto důvodů tedy volím kabel  $3 \times 10$  CXEKVCEY  $1 \times 50\text{mm}^2$ .

Tabulka č.1 Katalog kabelu CXEKVCEY

Počet a průřez žil (mm <sup>2</sup> )	Tvar jádra	Průměr inf. (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)	Poloměr ohybu (mm)	Činný odpor (Ω/km)	Ekvivalentní zkrat. proud (kA)	Časová oteplovací konst. (sec)	Zatížitelnost na vzduchu (A)	Zatížitelnost v zemi (A)
No. of cores (mm <sup>2</sup> )	Shape of the conductor	Diameter appr. (mm)	Cable mass appr. (kg/km)	Radius of bend (mm)	Effect. resist. of conductors (Ω/km)	Short circuit current-equiv. (kA)	Time heating constant (sec)	Current carrying cap. in air (A)	Current carrying cap. in ground (A)
						•   °	°°   °°°	°°   °°°	°°   °°°
1x35/16	RMV	28	1 080	420	0,524	5,01   3,20	299   211	193   230	180   204
1x50/16	RMV	29	1 180	495	0,387	7,15   3,20	426   298	231   276	211   239
1x70/16	RMV	31	1 410	525	0,268	10,00   3,20	537   379	288   343	257   290

## 6.2.6 Shrnutí výsledků

Tabulka č.2 Shrnutí výsledků

Místo zkratu	Napěťová hladina	Vypočtené hodnoty			Současné dimenz.		Vyhovuje
		$I_{k3}$ [kA]	$I_{th}$ [kA/1s]	$I_{p3}$ [kA]	$I_{pk}$ [kA]	$I_{cw}$ [kA/1s]	
R6	6,3 kV	9,7	9,7	24,4	63	25	ANO
R1	22 kV	8,1	8,7	20	50	20	ANO

Každý rozváděč je zapotřebí navrhnout tak, aby odolával tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu. Takové účinky lze z pohledu rozváděče charakterizovat hodnotami jmenovitého krátkodobého výdržného proudu  $I_{cw}$  (ten musí být větší než efektivní hodnota předpokládaného zkratového proudu) a jmenovitému dynamickému proudu  $I_{pk}$  (musí být větší než vrcholová hodnota předpokládaného zkratového proudu). Při znalosti těchto hodnot, mohou provést základní rozmysl na dimenzování rozváděče na zkratové účinky. Dle shrnující tabulky je patrné, že rozvodna R1 a R6 vyhoví na zkratové účinky a je vhodně dimenzována. Hodnoty současných dimenzování jsem opsal ze štítků rozváděčů při pochůzce.

## 7 Elektrické ochrany, návrh nastavení a zkoušky ochran

Nyní se budu věnovat elektrickým ochranám, potřebě jejich užití a návrhem ochrany pro generátor 2,1 MVA / 6,3 kV na MVE Štvanice. V rámci rekonstrukce technologie jsem provedl výpočet nastavení a parametrizaci generátorové ochrany SR 489 a relé pro ochranu proti zemnímu spojení rotoru XR1. Následně jsem ochrany odzkoušel sekundárně ve zkušební laboratoři firmy ELPAK Praha spol. s r.o. Primární zkoušky jsem provedl na MVE Štvanice.

Základní normou pro návrh elektrických ochran pro hydroalternátory je ČSN 33 3051. Norma rozděluje zdrojové jednotky do výkonových skupin a pro každou určuje druhy požadovaných a doporučovaných ochran. Vzhledem k faktu, že norma pochází z roku 1992, kdy byly rozšířeny především elektromechanické ochrany a neexistovaly digitální multifunkční relé, je potřeba uvažovat předpisy v normě pouze informativně. Při výběru ochranných funkcí, jsem se držel možnostmi dodaných ochran, způsobem řešení jednopólového schéma a provozem generátoru v předepsaných provozních oblastech.

### 7.1 Druh možných vznikuvších poruch na elektrická zařízení

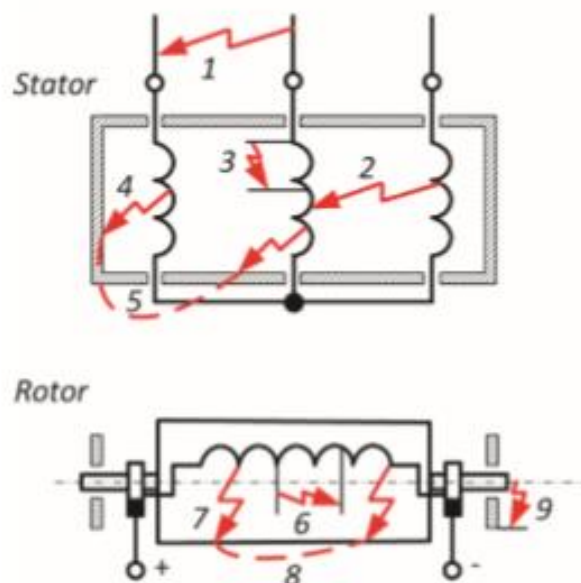
Pro správný výběr vhodného systému ochran a jejich následnou parametrizaci je zapotřebí provést analýzu všech možných vznikuvších poruch na zařízení. Při následujícím návrhu se budu věnovat generátoru, jako nejvýznamnějšímu zařízení v elektrárně, z toho důvodu nyní nastíním poruchy na generátoru.

Izolační poruchy – stator

1. vnější zkrat
2. vnitřní zkrat
3. závitový zkrat
4. zemní spojení
5. druhé zemní spojení

Izolační poruchy – rotor

1. závitový zkrat
2. zemní spojení
3. druhé zemní spojení
4. ložiskové proudy



Obrázek 7.1 Izolační poruchy

Nenormální podmínky chodu pak lze rozdělit podle místa působení.

Ve statoru může dojít k přetížení, kdy průchodem příliš velkého množství energie dochází k vyššímu proudovému zatížení, a to má za následek tepelné namáhání a urychlení stárnutí izolace. Spínacími pochody může vzniknout přepětí, které má nepříznivý vliv na izolaci a může dojít k její poškození.

Na rotor má negativní vliv nesouměrné zatížení generátoru a ztráta buzení. Při nesouměrném zatížení jsou jednotlivé fáze generátoru zatíženy rozdílnými proudy. V důsledku toho vzniká zpětná složka proudu, která vytváří magnetické pole otáčející se dvojnásobnou úhlovou rychlostí rotoru v opačném směru. Do rotoru se indukují vířivé proudy a rotor se začne zahřívat.

Nenormálními stavy na soustrojí může být například zpětný tok výkonu.

Nejzávažnější poruchou je zkrat, který nastává při vodivém spojení dvou a více pólů nebo jednoho pólu se zemí v případě přímo uzemněných soustav. Lze je tedy dělit na:

- jednopólový
- dvoupólový
- dvoupólový zemní
- trojpólový

Následky zkratu jsou pak negativní účinky v soustavě, které se mohou projevit jako:

- zvýšené tepelné namáhání elektrického vedení
- silové namáhání vedení
- nebezpečné zvýšení potenciálu země

[4] [5] [6]

## 7.2 Základní požadavky na ochrany

Základní funkcí elektrických ochran energetických zařízení je zjištění nenormálních provozních či poruchových stavů. V takových případech je potřeba odpojit poškozené zařízení a tím zamezit následkům poruchy v dalším rozšíření na ostatní energetická zařízení.

Základní požadavky kladené na správnou funkci ochran jsou selektivita, citlivost, spolehlivost a rychlost působení ochrany.

Selektivita ochrany nám zajišťuje vypnutí poruchy pouze v chráněném úseku nebo daného chráněného zařízení.

Ochrana, musí být také dostatečně citlivá, avšak je zde potřeba vyvarovat se příliš velké citlivosti, která by mohla vést k chybným působením ochrany, například u nadproudových funkcí atd. Citlivost ochrany se vyjadřuje koeficientem citlivosti  $k_c$ .

Rychlost ochrany musí zajistit co nejkratší dobu vypnutí poruch, a to z důvodů:

- snížení nebezpečí ohrožení osob, zvířat a majetku,
- zachování dynamické stability elektrizační soustavy,
- zmenšení rozsahu poškození zařízení,
- zkrácení doby provozu spotřebitelů se sníženým napětím v neporušené části systému.

Napájení elektrických ochran musí mít samostatné jištění, které bude oddělené od ostatních obvodů a bude mít stálou kontrolu obvodů napájení. Elektrické ochrany důležitých energetických zařízení musí obsahovat časovou synchronizaci. O činnosti ochran musí být podávány informace do řídicího systému. [6]

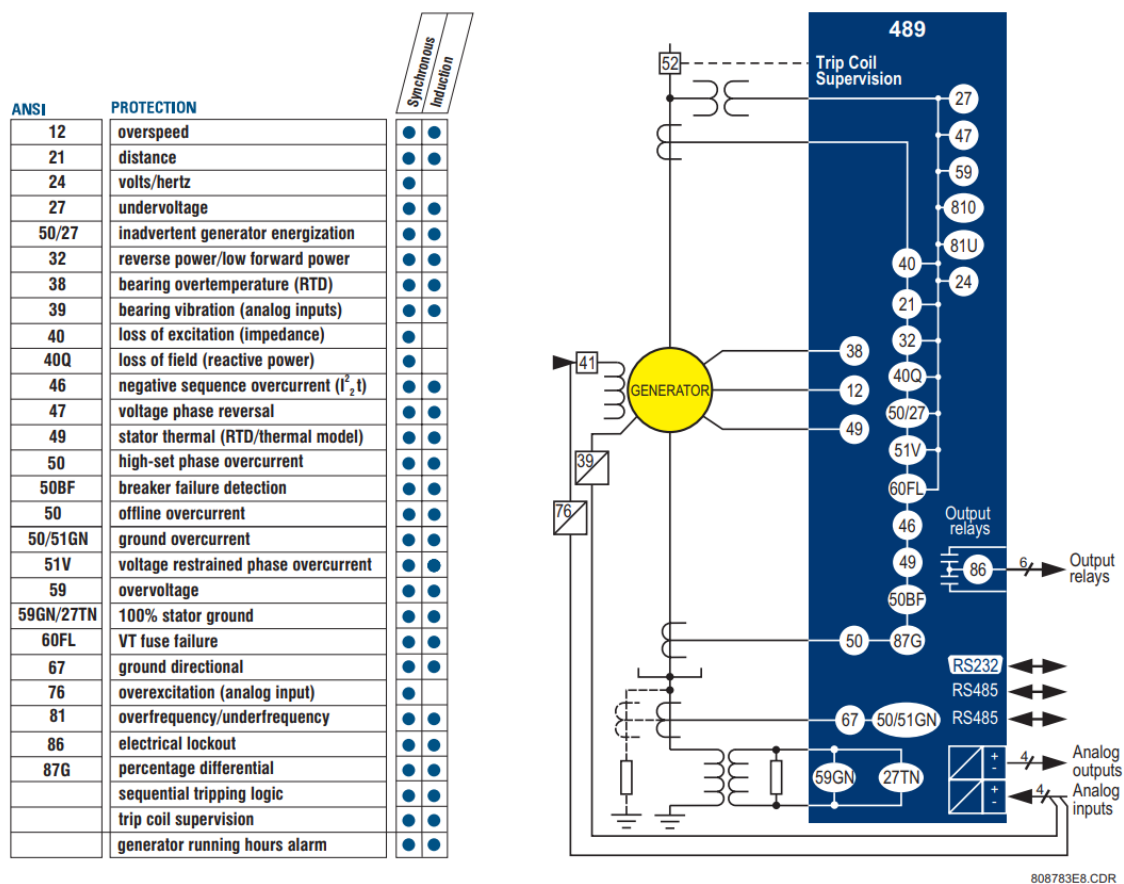


### 7.3 Rozbor a návrh nastavení generátorové ochrany SR 489

V této kapitole se zaměřím na rozbor generátorové ochrany a nastavení ochranných funkcí. Uvažuji mikroprocesorové relé SR 489 od společnosti GE.

#### 7.3.1 Specifikace generátorové ochrany SR 489

Relé SR 489 je určeno pro ochranu synchronních generátorů pro výkony v rozsahu 1÷100 MW. Pro svoji aplikaci na MVE Štvanice je v specifikováno konkrétně ochrana 489P5 – HI-A20. Taková ochrana je vybavena 6 výstupními relé pro TRIP a ALARM, 9 binárními vstupy a 4 analogovými vstupy a 4 analogovými výstupy 4÷20 mA. Ochrana obsahuje 6 proudových vstupů s nominálním proudem 5A pro měření proudů na vývodu a v nule generátoru. Vstupy pro měřicí transformátory napětí na vývodu generátoru jsou 100/√3 V. Napájecí napětí pro ochranu je specifikací určeno na 90÷300 VDC; 70÷265 VAC a 48÷62 Hz. Na následujícím obrázku je znázorněno jednopólové schéma ochrany. Ze schéma je patrné, ze kterých měřicích míst a veličin je vyhodnocována která ochranná funkce. Každé ochranné funkci je přiřazen ANSI kód, který je přiřazen v tabulce.



Obrázek 7.2 Přehledové schéma ochrany SR489 [15]

Pro správu ochran společnosti GE je určen program Enervista, který svými softwarovými nástroji zjednodušuje operace s ochranami. Je zapotřebí si uvědomit, že výpočty ochranných funkcí se mohou v některých případech lišit. Rozdíly mohou být mezi odbornými literaturami a různými výrobci digitálních ochran. V zásadě se nejedná o velké rozdíly. Při následujících výpočtech jsem postupoval podle manuálu k ochraně SR 489 a výsledné nastavení jsem parametrizoval v programu Enervista.



Obrázek 7.3 Čelní deska ochrany [15]

Při výpočtech a nastavení se používají následující zkratky a koeficienty.

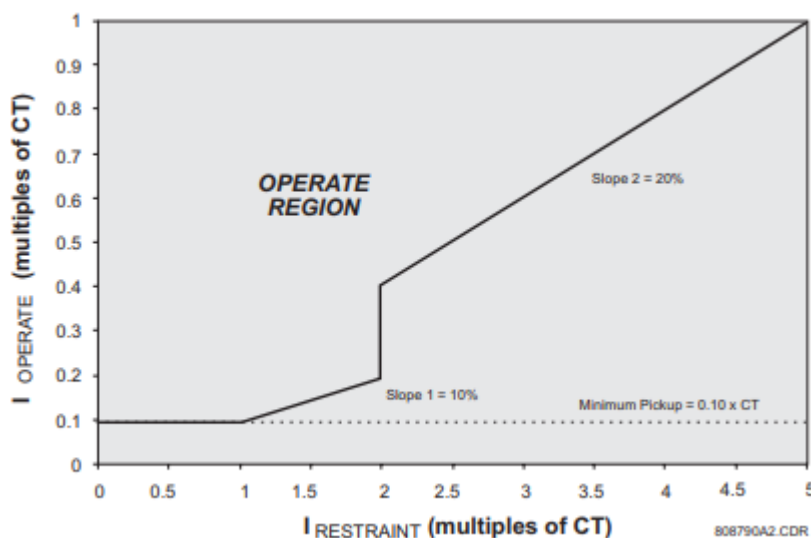
- Alarm – ochrana působí signalizací do řídicího systému
- Trip – ochrana působí na odstavení soustrojí
- Rated MW – jmenovitý činný výkon generátoru
- ONLINE/OFFLINE – Generátor přiřazovaný k síti (ZAP/VYP vypínač)
- FLA – full load amps

$$\begin{aligned}
 \text{Generator FLA} &= \frac{\text{Generator Rated MVA}}{\sqrt{3} \times \text{Generator Rated Phase - Phase Voltage}} \\
 &= \frac{2,1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,3 \cdot 10^3} \cong 193 \text{ A} \quad (7.1)
 \end{aligned}$$

### 7.3.2 Rozdílová ochrana generátoru – 87G

Rozdílová ochrana patří mezi základní ochrany. Jejím úkolem je zachycení vnitřních zkratů ve statorovém vinutí generátoru. Ochrana porovnává proudy na vývodu generátoru s proudy v nule generátoru. Při normálním provozu jsou si proudy rovny s opačnou orientací, rozdílový proud je tedy nulový. V případě, že nastane porucha v generátoru, vznikne proudová nerovnováha, která se projeví velikostí rozdílového proudu.

Ochrana vypočítává diferenciální proud  $I_{OPERATE}$  a stabilizační proud  $I_{RESTRAINT}$  pro každou fázi zvlášť. Hodnota diferenčního proudu, při které ochrana reaguje, závisí na stabilizačním proudu, podle vypínací charakteristiky na *Obr. 7.4*, kde jsou  $I_{OPERATE}$  a  $I_{RESTRAINT}$  vztaženy k jmenovité hodnotě CT.



Obrázek 7.4 Charakteristika 87G [15]

U alternátorů je běžné nastavovat náběhovou hodnotu rozdílového proudu na  $0,1 \div 0,3 I_n$ , zvolím  $0,2 \times CT$ . Nastavení musí respektovat chybu měřících transformátorů proudu. Pro nastavení sklonu křivek jsem zvolil doporučení od výrobce ochrany, viz níže. Časové zpoždění zvolím minimální.

- Differential Trip Min. Pickup             $0.20 \times CT$
- Differential Trip Slope 1                  $10 \%$
- Differential Trip Slope 2                  $20 \%$
- Differential Trip Delay                     $0 \text{ Cycles}$

### 7.3.3 Zkratová ochrana – 50

Zkratová nadproudová ochrana působí s časově nezávislým zpožděním. Nastavení ochrany se volí v rozsahu  $1,2 \div 20$  In. Při překročení nastavené hodnoty a uplynutí nastaveného času působí ochrana na odstavení soustrojí. Ochranu nastavuji na 150 % jmenovitého proudu generátoru, časové zpoždění nastavuji na 0,2 s pro co největší eliminaci účinků zkratového proudu.

$$I_{psek} = \frac{1,5 \cdot I_{nG}}{I_{PTPprim}} \cdot I_{PTPsek} = \frac{1,5 \cdot 193}{200} \cdot 5 = 7,24 \text{ (A)}$$

$$\rightarrow 1,45 \times CT \quad (7.2)$$

kde: 1,5 –bezpečnostní koeficient

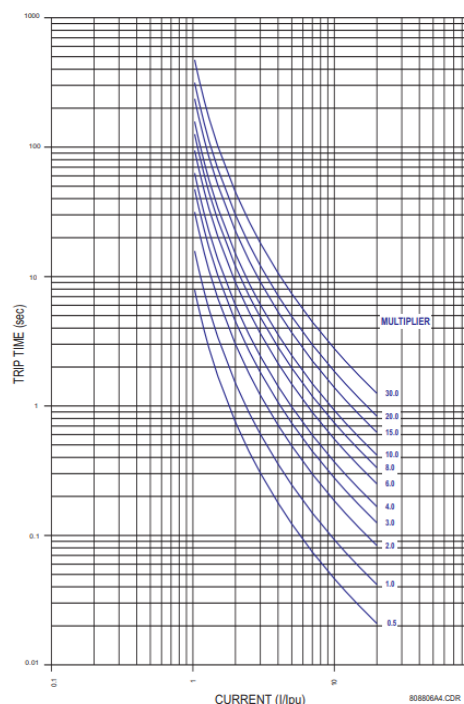
$I_{PTPprim}$  –primární proud PTP (A)

$I_{PTPsek}$  – sekundární hodnota proudu PTP (A)

- High-Set Phase O/C Pickup            1.45 x CT
- High-Set Phase O/C Delay            0.20 s

### 7.3.4 Nadproudová ochrana uvolňovaná podpětím – 51V

Nadproudová ochrana působí při přetížení statoru generátoru a využívá časově závislou charakteristiku. Pro tuto aplikaci jsem zvolil extrémně inverzní charakteristiku IEC-C, která je vhodná pro použití u hydroalternátorů a je definována vztahem 7.3 a grafem na Obr. 7.5. Vybavovací hodnotu proudu volím od 1,1 x FLA. Vypočtená hodnota T udává časový limit pro vybavení ochrany. Tato ochrana provozně odstavuje soustrojí signálem TRIP. Funkce je vybavena možností Voltage Restraint, tedy podle velikosti podpětí dochází ke změně multiplikátoru a přepočítání proudové spouště.



Obrázek 7.5 Extrémně inverzní křivka IEC-C [15]

$$I_{Pickupsek} = 1,1 \cdot I_{nG} \cdot \frac{I_{PTPsek}}{I_{PTPprim}} = 1,1 \cdot 193 \cdot \frac{5}{200} = 5,3075 \text{ (A)}$$

$$\rightarrow I_{Pickup} = 1,06 \times CT \quad (7.3)$$

Nyní uvedu příklad výpočtu časového zpoždění působení ochrany při nadproudu 140 %  $I_{nG}$ .

$$T = M \cdot \left( \frac{K}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^E - 1} \right) = 0,5 \cdot \left( \frac{80}{\left( \frac{1,4 \cdot 193}{1,06 \cdot 200} \right)^2 - 1} \right)$$

$$= 64,1 \text{ (s)} \quad (7.4)$$

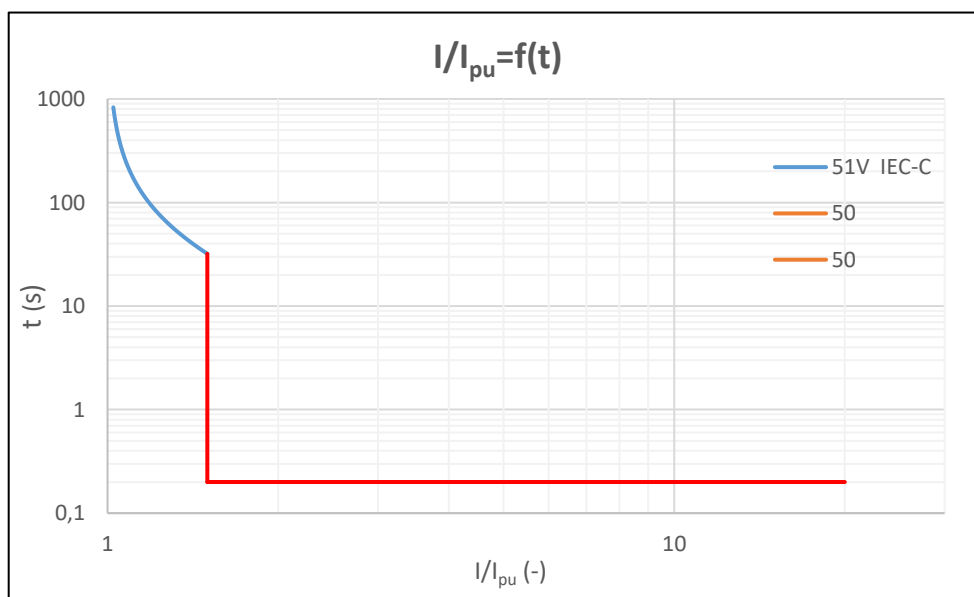
kde:  $I$  – poruchový proud generátoru (A)

$I_{pickup}$  – náběhový proud (A)

$K$ ,  $E$ ,  $M$  – konstanty, pro IEC-C ( $K=80$ ;  $E=2$ ;  $M=0,5$ )

- Phase Overcurrent Pickup            1.06 X CT
- Curve Shape                            IEC Curve C (BS142)
- Overcurrent Curve Multiplier        0.50

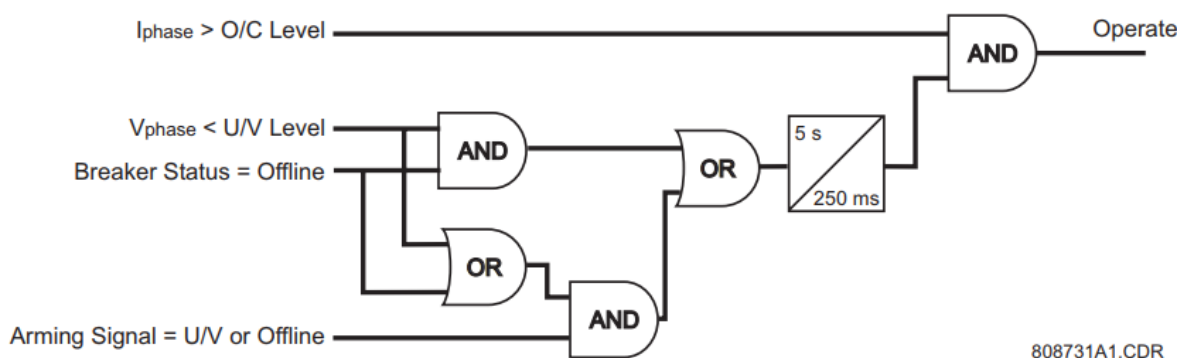
Charakteristiky ochranných funkcí 50 a 51V jsem vynesl do grafu, viz. *Obr. 7.6*.



Obrázek 7.6 Koordinace ochranných funkcí 50, 51V

### 7.3.5 Ochrana při zapnutí nenabuzeného generátoru do sítě – 50/27

Tato ochrana zajišťuje, aby nenabuzený generátor nebyl zapnut do sítě. Podle logického diagramu na Obr. 7.7 je patrné, že ochrana je aktivována po 5 s od odpojení generátoru od sítě a jeho odbuzení a zůstává v činnosti i 250 ms po přifázování. Ochrana se nastavuje na danou úroveň k fázovému napětí. Pokles napětí pod tuto hodnotu je případ nenabuzeného generátoru. Funkce je aktivována za předpokladu, že kterýkoli z fázových proudů na vývodu překročí naprogramovanou úroveň nadproudu.



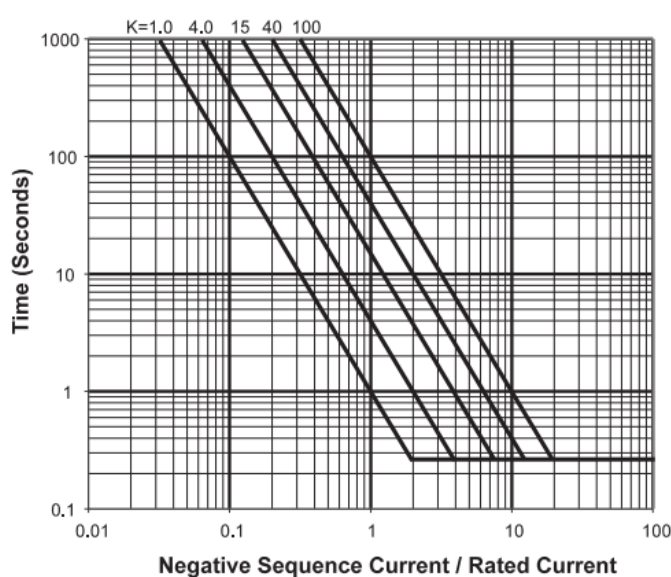
808731A1.CDR

Obrázek 7.7 Logika funkce 50/27 [15]

- Arming Signal                      U/V and Offline
- Inadvertent Energize            O/C Pickup    0.30 X CT
- Inadvertent Energize            U/V Pickup    0.50 X Rated V

### 7.3.6 Ochrana při nesymetrickém zatížení – 46

Ochrana při nesymetrickém zatížení vyhodnocuje zpětnou složku satorového proudu, jejím důsledkem je zahřívání rotoru. Ochrana se nastavuje na 2 stupně. První stupeň ALARM je časově nezávislý a je signalizován do ŘS. Druhý stupeň je časově závislý, definovaný inverzní křivkou a havarijně odstavuje soustrojí.



Obrázek 7.8 Inverzní křivky ochrany 46 [15]

Ochrana by se správně měla nastavit dle hodnoty dovoleného nesymetrického zatížení generátoru a konstanty respektující přípustnou dobu trvání nesymetrie určených výrobcem generátoru. Vzhledem k absenci těchto údajů, volím parametry dle normy ČSN EN 35 0220. Norma udává poměr zpětné složky proudů k jmenovitému pro hydroalternátory do 100 MVA – 12 %. Pro hydroalternátory s nepřímým vzduchovým chlazením udává norma, že  $K=40$  s.

První stupeň (ALARM) nastavím na poloviční hodnotou nesymetrie s časovým zpožděním 100 ms. Druhý havarijný stupeň volím dle výše uvedeného.

- Neg. Sequence Alarm Pickup      6 % FLA
- Negative Sequence Alarm Delay      100.0 s
- Neg. Sequence O/C Trip Pickup      12 % FLA
- Neg. Sequence O/C Constant k      40

### 7.3.7 Ochrana zemního spojení statoru 95 % – 59N

K zemnímu spojení statoru dochází při poruše izolace statorového vinutí a k následnému průrazu na kostru. Tato porucha nastává v izolovaných sítích. Příznakem zemního spojení je zvýšení napětí nepostižených fází na sdruženou hodnotu vůči zemi a vznik napětí mezi uzlem generátoru a zemí, které je ovlivněno místem poruchy. Tato ochranná funkce zajišťuje ochranu pro 95 % vinutí generátoru.

Principem detekce zemních spojení v této aplikaci, je měření velikosti nulové složky napětí  $U_0$ . To se provádí buď zapojením sekundárních vinutí MTN do otevřeného trojúhelníka nebo napěťový transformátor v nule generátoru. Touto ochranou je chráněno jen 95 % vinutí od svorek, neboť velikost napětí směrem k uzlu klesá k nule. Okolí uzlu lze poté chránit 100 % statorovou ochranou, která je založena na třetí harmonické složce napětí ve statorovém vinutí, tuto ochranu ale neuvažují.

Pro nastavení využívá ochrana dva stupně. První jako signalizace poruchy do ŘS a druhý stupeň jako TRIP na havarijný odstavení. Ochranu nastavuji na 5 %  $U_{nf}$  generátoru, tímto nastavením budu mít zaručenou ochranu pro 95 % vinutí. Napětí zemního spojení měřím napěťovými transformátory na vývodu zapojenými do otevřeného trojúhelníka s jmenovitým napětím 100/3 V.

$$U_0 = \frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{PTNSEK}}{U_{PTNPRIM}} \cdot 0,05 = \frac{6300}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\frac{100}{3}}{\frac{6300}{\sqrt{3}}} \cdot 0,05 = 1,66 \text{ (V)} \quad (7.6)$$

#### Neutral Overvoltage Alarm

- Neutral O/V Alarm Level                    1 V
- Neutral Overvoltage Alarm Delay       5.0 s

#### Neutral Overvoltage Trip

- Neutral O/V Trip Level                    1.66 V
- Neutral O/V Trip Element                Definite Time
- Neutral Overvoltage Trip Delay        2.0 s

### 7.3.8 Nadpět'ová ochrana – 59

Nadpětí může na svorkách generátoru vzniknout například v případě odlehčení zátěže. Nadpět'ová ochrana generátoru souvisí s regulátorem buzení, který udržuje napětí v předepsaných mezích pomocí regulátoru napětí a vlastních omezovačů. Nadpět'ová ochrana pak působí v případě, kdy dojde k selhání regulátoru nebo v případě provozních poruch. Ochrana je řešena jako dvoustupňová.

Při nastavení jsem respektoval dokument *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy* od PRE [16], který udává doporučené nastavení napět'ových článků ochran. První, časově nezávislý stupeň, který slouží pro detekci přepětí nastavím na 115 % Ung. Časové zpoždění náběhu ochrany nastavím na čas 30 s, tedy takový čas, který bude dostatečný pro regulátor buzení. Druhý stupeň nastavuji na 125 % Ung. Druhý stupeň je možné časovat dle určeného času nebo přes křivku. Pro okamžité působení volím časové zpoždění podle [16] na 0,1 s.

Ochrana působí na havarijní odstavení soustrojí. Ochrana je ve funkci pouze v případě, když je generátor v ONLINE.

#### Overvoltage Alarm

- Overvoltage Alarm Pickup                1.15 x Rated
- Overvoltage Alarm Delay                30.0 s

#### Overvoltage Trip



- Overvoltage Trip Pickup 1.25 x Rated
- Overvoltage Trip Delay 0.1 s
- Overvoltage Curve Element Definite Time

### 7.3.9 Podpět'ová ochrana – 27

Obdobně jako u nadpět'ové ochrany i podpět'í je omezováno v rámci buzení. Tento článek se nastavuje dvoustupňově s ohledem na doporučené nastavení [15]. Ochrana druhého stupně působí taktéž na havarijní odstavení. Ochrana je ve funkci pouze v případě, když je generátor v ONLINE.

#### Undervoltage Alarm

- Undervoltage Alarm Pickup 0.85 x Rated
- Undervoltage Alarm Delay 3.0 s

#### Undervoltage Trip

- Undervoltage Trip Pickup 0.7 x Rated
- Undervoltage Trip Delay 0.7 s

### 7.3.10 Frekvenční ochrany – 81O, 81U

Hodnota frekvence svorkového napětí je přímo úměrná hodnotě otáček rotoru. Frekvence je celosystémový parametr, tudíž frekvence soustavy je rovna frekvenci generátoru. Frekvenční ochrana je velice důležitá při ostrovním provozu, kdy dojde k odpojení zátěže a reakcí k tomu je navýšení otáček. V případě prudšího nárůstu mimo meze může hrozit mechanické poškození soustrojí. Obdobně i při připojení větší činné zátěže, dochází k poklesu otáček, ty mohou mít v případě dosažení kritických otáček za následek vznik mechanických rezonancí nebo zvýšení magnetického toku a tím zvýšení tepelného namáhání.

Tato ochrana je blokována stavem vypínače, to znamená, že je funkční až po přifázování soustrojí k síti s časovým zpožděním 1 s. Dále je blokována při poklesu napětí pod 50 %  $U_n$ . Nastavení frekvenční ochrany závisí silně na vlastnostech chráněného zařízení a na požadavcích provozovatele distribuční sítě. Při nastavení jsem respektoval dokument *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy* od PRE [16]. Je běžné nastavovat tři stupně ochrany, jednou ALARM a dvakrát TRIP na odstavení soustrojí.

**Overfrequency Alarm**

- Overfrequency Alarm Level 51.00 Hz
- Overfrequency Alarm Delay 2.0 s

**Overfrequency Trip**

- Overfrequency Trip Level 1 52.00 Hz
- Overfrequency Trip Delay1 1.0 s
- Overfrequency Trip Level2 53.00 Hz
- Overfrequency Trip Delay2 0.1 s

**Underfrequency Alarm**

- Underfrequency Alarm Level 49.00 Hz
- Underfrequency Alarm Delay 5.0 s

**Underfrequency Trip**

- Underfrequency Trip Level 1 48.00 Hz
- Underfrequency Trip Delay 1 3.0 s
- Underfrequency Trip Level 2 47.00 Hz
- Underfrequency Trip Delay 2 1.0 s

**7.3.11 Ochrana při podbuzení a ztrátě buzení – 40**

Chování synchronního stroje přímo ovlivňuje budící magnetický tok, na němž závisí jalová složka výkonu. Při dostatečné velikosti toku je schopen generátor dodávat do sítě jalovou energii, v opačném případě, kdy je budící proud malý, generátor začne odebírat ze sítě jalovou energii a dochází k poklesu napětí na vývodu generátoru. Při takovém stavu dochází k nepříznivému zahřívání stroje. Pokud dojde k přímé ztrátě budícího toku, generátor vypadáva ze synchronního stavu a v případě hydroalternátorů dochází k okamžitému odstavení soustrojí. Se ztrátou buzení mírně vzrostou otáčky soustrojí.

Ztráta buzení se vyhodnocuje impedanční kružnicovou charakteristikou, která je zobrazena v impedanční rovině. Na ochranu lze pohlížet jako na záložní, neboť tato ochrana by měla působit při selhání nebo špatné parametrizaci regulátoru buzení, který má běžně nastavený hlídač meze podbuzení na  $-0,4Q_n$ .

Ochrana SR489 se nastavuje na dvě kružnice. První, větší kružnice se nastavuje na podélnou synchronní reaktanci generátoru  $X_d$  a offset kružnice ve směru  $-jX$  je nastaven na přechodnou synchronní reaktanci generátoru  $0,5X_d'$ . Druhá kružnice vychází z nastavení na  $0,7X_d$  s posunem  $0,5X_d'$  a minimálním časovým zpožděním.

Ochrana je blokována v případě výpadku jističů napětových obvodů nebo při generátoru v OFFLINE.

Pro parametrizaci ochrany se zadávají hodnoty impedancí v sekundárních hodnotách, viz. následující výpočet. Na obrázku níže jsou zobrazeny impedanční charakteristiky.

$$X_{sek} = \frac{U_{nG}}{\sqrt{3} \cdot I_{nG}} \cdot \frac{n_I}{n_U} \cdot X_{p.j.} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 193} \cdot \frac{40}{63} \cdot X_{p.j.} = 11,97 \cdot X_{p.j.} \quad (7.7)$$

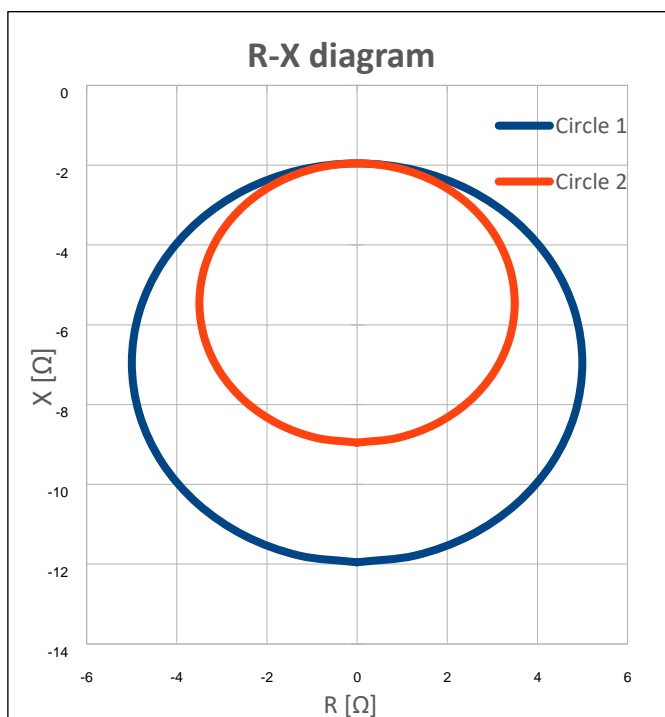
Circle 1

$$X_{dsek} = 11,97 \cdot X_{dp.j.} = 11,97 \cdot 0,833 = 9,96 \quad (\Omega) \quad (7.8)$$

$$X_{offset} = 0,5 \cdot X_d' = 0,5 \cdot 11,97 \cdot 0,326 = 1,95 \quad (\Omega) \quad (7.9)$$

Circle 2

$$X_{dsek2} = 0,7 \cdot X_{dsek} = 0,7 \cdot 9,96 = 6,97 \quad (\Omega) \quad (7.10)$$



Obrázek 7.9 R-X diagram

## CIRCLE 1

- Circle 1 Diameter 10.0 Ohm sec
- Circle 1 Offset 2.0 Ohm sec
- Circle 1 Trip Delay 0.5 s

## CIRCLE 2

- Circle 2 Diameter 7.0 Ohm sec
- Circle 2 Offset 2.0 Ohm sec
- Circle 2 Trip Delay 0.1 s

**7.3.12 Zpětná wattová ochrana – 32R**

Tato ochrana chrání generátor před motorickým chodem alternátoru. To je poruchový stav, kdy přifázovaný generátor vlivem uzavřeného přítoku vody na turbínu přeměňuje elektrický výkon ze sítě na mechanický a pohání turbínu. Velikost zpětného výkonu je úměrná velikosti mechanických ztrát celého soustrojí. Rizikem motorického chodu je především ohrožení turbíny vlivem tepelných a mechanických účinků.

Velikost mechanických ztrát se běžně určuje při primárních zkouškách. Pro nastavení vycházím z původního nastavení 2 %  $P_n$ .

Ochrana je nastavena jako dvoustupňová a je funkční až 5 s po přifázování generátoru.

$$P_{ReverseTrip} = 0,02 \cdot P_{nG} = 0,02 \cdot 1890 = 37,8 \text{ (kW)} \quad (7.11)$$

## Reverse Power Alarm

- Reverse Power Alarm Level 0.02 x Rated MW
- Reverse Power Alarm Delay 5.0 s

## Reverse Power Trip

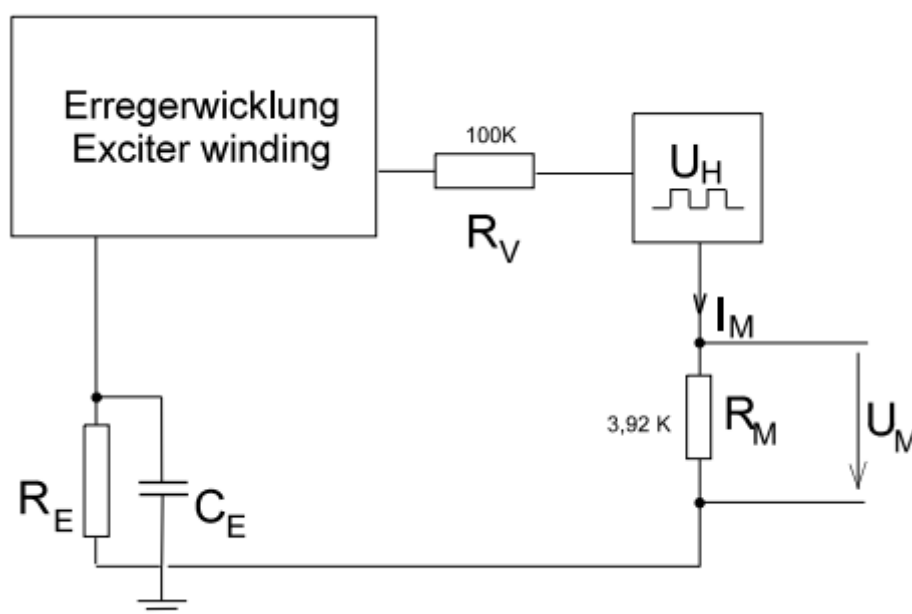
- Reverse Power Trip Level 0.02 x Rated MW
- Reverse Power Trip Delay 10.0 s

### 7.3.13 Ochrana proti zemnímu spojení rotoru

Při bezporuchovém stavu je obvod buzení izolován od země. Jednopolový zemní zkrat v rotorovém vinutí není pro stroj nebezpečný, avšak při dvojitým zemním spojení dojde ke zkratu na části rotorového vinutí. Tím dojde k narušení magnetického pole rotoru a následné velké mechanické momenty mohou těžce poškodit generátor. Pro ochranu izolačního stavu jsem zvolil ochranné relé *XRI*, to měří izolační odpor mezi rotorovým vinutím a zemí. Relé se nastavuje na 2 hodnoty izolačního odporu, pro ALARM a TRIP.

Princip činnosti je znázorněn na *Obr. 7.10*, na rotorové vinutí a těleso rotoru je přiloženo střídavé napětí. Izolační odpor je měřen přes úbytek na odporu  $R_M$ .

Nastavené hodnoty se nastavují potenciometry na čelním panelu relé. Pro výstrahu zemního spojení je k dispozici rozsah  $20 \div 140 \text{ k}\Omega$  a pro vypnutí při zemním spojení  $0 \div 30 \text{ k}\Omega$ .



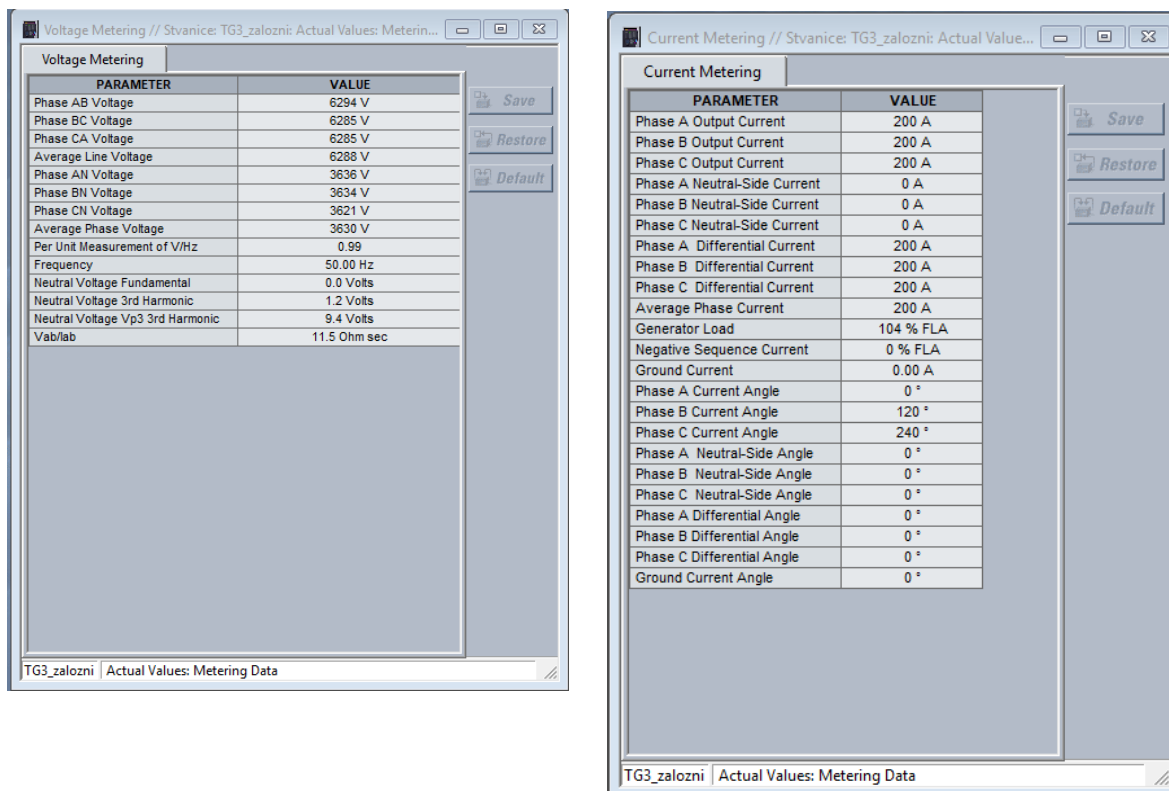
Obrázek 7.10 Princip činnosti *XRI*

## 7.4 Kontrola a zkoušky ochran

### 7.4.1 Sekundární zkoušky

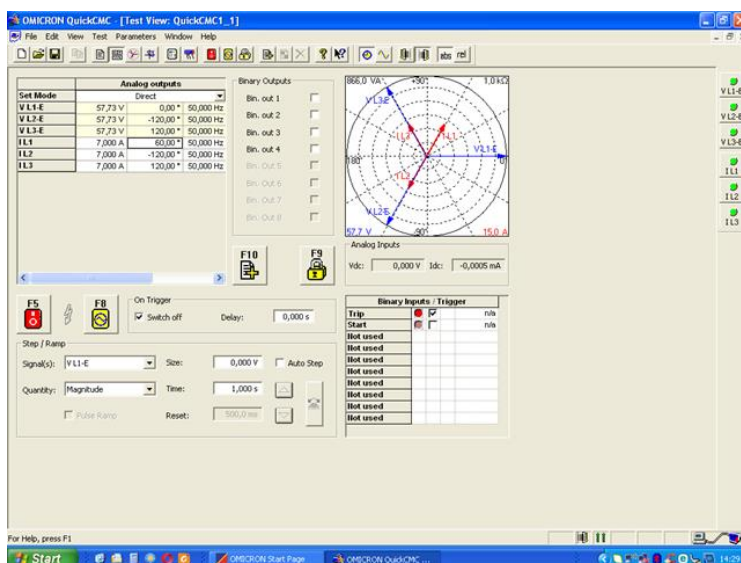
Sekundární zkoušky jsem provedl ve zkušební laboratoři. Pomocí zkušebního zdroje Omicron CMC156 jsem injektoval do obvodů ochrany poruchové hodnoty elektrických veličin odpovídající poruchovým stavům. Injektování bylo přímo do ochrany bez zapojení měřících transformátorů.

Po zapojení zkušebního zdroje do ochrany jsem vytvořil komunikační spojení mezi PC a ochranou pomocí sériové linky RS232 a USB/RS232 převodníku. Poté jsem vytvořil a nahrál do ochrany SR 489 parametrizační sadu. Následně jsem zkušebním měřením zkontroloval správnost zapojení, viz. *Obr. 7.11*.



Obrázek 7.11 Aktuální hodnoty měření, program Energista

Poté jsem jednotlivě odzkoušel všechny ochranné funkce, ze kterých jsem následně vypracoval protokol o sekundárním odzkoušení. Vizualizace programu OMICRON Test Universe ukazuje *Obr. 7.12*. V přílohách přikládám náhled na výstupní protokol z programu, který dokazuje správné zapůsobení ochrany.



Obrázek 7.12 Vizualizace programu OMICRON Test Universe

## 7.4.2 Primární zkoušky

Účelem primárních zkoušek je vyzkoušení soustavy ochran s vazbou od měřících přístrojových transformátorů a dalších příslušenství. Tyto zkoušky ověřují správné připojení sekundárních obvodů měřících přístrojů a také vazeb na vypínací prvky.

Na MVE Štvanice se primární zkoušky provádí z vytvořeného pracoviště v rozvodně R6-6,3 kV kde jsou v jednotlivých polích generátorové vypínače a generátorové ochrany. Při zkouškách dochází k častým manipulacím s vypínačem. Při zkouškách je v silovém obvodu vyvolána poruchová hodnota a sleduje se chování výstupních signálů ochrany, například kdy signalizuje, kdy vypíná, kdy je blokována a kdy a co signalizuje do řídicího systému. Při zkouškách jsou vyhodnocovány záznamy jednotlivých působení ochran a záznamů v řídicím systému.

Primární zkoušky lze rozdělit na zkoušky proudové, napěťové a výkonové.

Nyní popíšu postupy provádění jednotlivých zkoušek.

### 7.4.2.1 Proudové zkoušky

Při proudových zkouškách jsem vysunul vypínač generátoru a místo něj jsem zasunul zkratovací vozík. Tím jsem vytvořil zkrat za proudovým transformátorem a provedl jsem kontrolu uzavřenosti proudových transformátorů na vývodu a v nule generátoru tím, že se roztočené soustrojí nabudilo na 20 %  $I_n$  generátoru. Poté jsem odečetl měřené hodnoty z ochrany, které dokládám na *Obr. 7.14*.



Obrázek 7.13 Zkratovací vozík

Při zkoušení jednotlivých proudových ochran jsem zablokoval ostatní ochrany a také jsem zkoušenou ochranu přenastavil na pouhé signalizování do ŘS. Aby zkratovací souprava nebyla namáhána plným zkratovým proudem, nastavil jsem v rámci primárních zkoušek menší vybavovací hodnoty. Při zkoušení nadproudové ochrany jsem nastavil zkrat na 60 %  $I_n$ . Soustrojí bylo roztočeno a nabuzeno na 50 %  $I_n$  a pak zvýšeno na 60 %  $I_n$ . Tímto jsem provedl působení ochrany.

Rozdílovou ochranu jsem odzkoušel se zkratovanými svorkami generátoru i sepnutým zkratovačem na vývodu. Roztočený generátor byl nabuzen na 30 %  $I_n$  a odzkoušel jsem působení rozdílové ochrany.

Current Metering		RTD Temperature	V
PARAMETER		VALUE	
Phase A Output Current			12 A
Phase B Output Current			12 A
Phase C Output Current			12 A
Phase A Neutral-Side Current			12 A
Phase B Neutral-Side Current			12 A
Phase C Neutral-Side Current			13 A
Phase A Differential Current			0 A
Phase B Differential Current			0 A
Phase C Differential Current			0 A
Average Phase Current			12 A
Generator Load			6 % FLA
Negative Sequence Current			0 % FLA
Ground Current			0.00 A
Phase A Current Angle			0 °
Phase B Current Angle			120 °
Phase C Current Angle			240 °
Phase A Neutral-Side Angle			179 °
Phase B Neutral-Side Angle			301 °
Phase C Neutral-Side Angle			60 °
Phase A Differential Angle			0 °
Phase B Differential Angle			0 °
Phase C Differential Angle			0 °
Ground Current Angle			0 °

Obrázek 7.14 Aktuální hodnoty proudů

Ochranu nesymetrie generátoru jsem odzkoušel zkratováním sekundárního vinutí proudového transformátoru na jedné fázi generátoru při nabuzeném generátoru na 20 %  $I_n$ .

Po odzkoušení všech proudových článků jsem vrátil všechna nastavení a obnovil jsem působení ochrany.

#### 7.4.2.2 Napět'ové zkoušky

Při napět'ových zkouškách je vývod bez zkratu a vypínač vypnut. Kontrolu měřících obvodů jsem provedl při roztočeném a nabuzeném generátoru na 25 %  $U_n$ .

Current Metering	RTD Temperature	Voltage Metering	Speed	Power
PARAMETER		VALUE		
Phase AB Voltage				5844 V
Phase BC Voltage				5831 V
Phase CA Voltage				5829 V
Average Line Voltage				5835 V
Phase AN Voltage				3361 V
Phase BN Voltage				3372 V
Phase CN Voltage				3370 V
Average Phase Voltage				3377 V
Per Unit Measurement of V/Hz				0.93
Frequency				49.82 Hz
Neutral Voltage Fundamental				0.0 Volts
Neutral Voltage 3rd Harmonic				45.3 Volts
Neutral Voltage Vp3 3rd Harmonic				75.6 Volts
Vab/lab				0.0 Ohm sec

Obrázek 7.15 Kontrola měření napět'ových obvodů

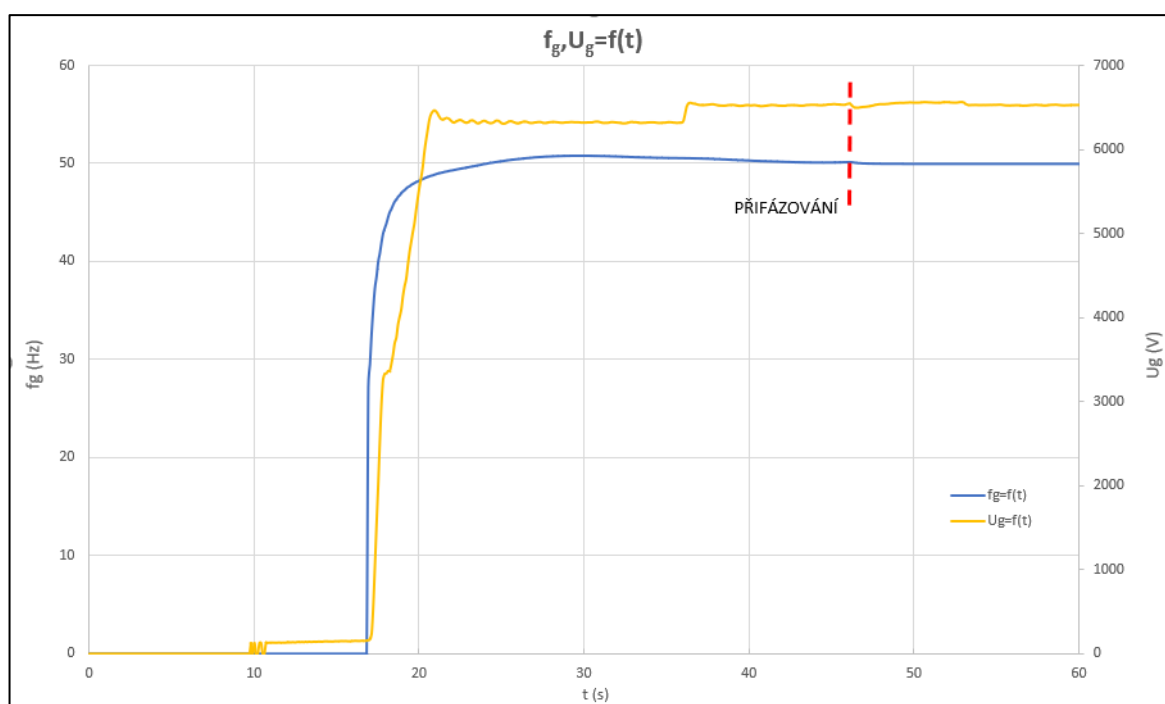


Ochranu zemního spojení statoru jsem provedl s nainstalovanou zkratovací soupřavou mezi jednou fází a kostrou rozváděče, vypínač byl vysunut. Stroj se roztočil a byl postupně nabuzován až do působení ochrany.

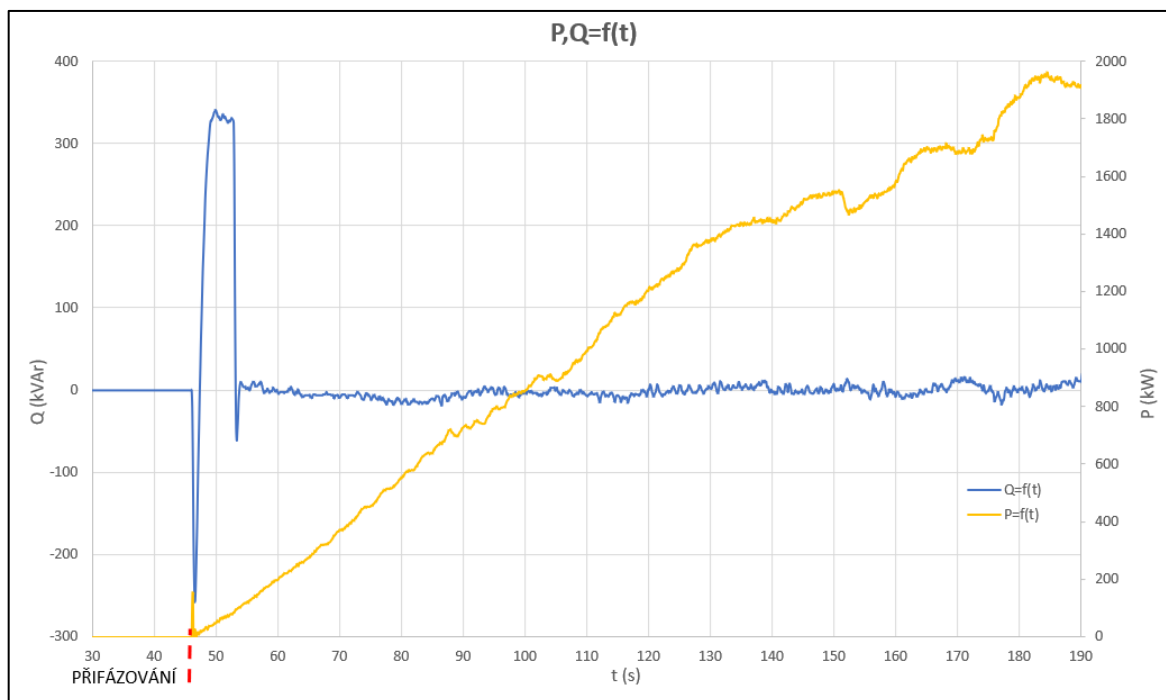
Nadpět'ové a podpět'ová ochrany jsem odzkoušel jednotlivě. Při roztočeném generátoru se buzením nastavovala hodnota napětí až do působení ochrany.

#### 7.4.2.3 Přifázování na síť

Fázování generátoru je realizováno ze skříně buzení. Fázovacím místem je generátorový vypínač. První fázování se pro zkoušku sepnutí vypínače povel provedlo při vypínači v servisní poloze, nedošlo tedy k připnutí generátoru k síti. Následně se přešlo k úplnému přifázování generátoru. Nejdříve jsem zablokoval působení zpětné wattové ochrany a malého dopředného výkonu. V prvním kroku byl generátor roztočen na jmenovité otáčky a regulátorem nabuzen na nominální napětí. Povel FÁZOVÁNÍ se aktivoval automatický fázovač, který provedl fázovací proces. V první fázi regulátor srovnal napětí generátoru a sítě, posléze srovnal i otáčky. V dalším kroku již regulátor kontroloval diferenci otáček a diferenční napětí a čekal na správný úhel mezi fázory generátoru a sítě. Při splnění posledního kroku vyslal povel na zapínací cívku generátorového vypínače. Generátor byl ponechán na výkonu 10 %  $P_n$  a po kontrole všech měřících obvodů jsem přešel na závěrečné výkonové zkoušky. Fázovací proces a sepnutí generátoru na síť dokládám následujícími grafy, ihned po přifázování došlo k najetí generátoru na jmenovitý výkon.



Obrázek 7.16 Průběhy frekvence a napětí generátoru při fázování generátoru



Obrázek 7.17 Průběhy činného a jalového výkonu po přifázování

#### 7.4.2.4 Výkonové zkoušky

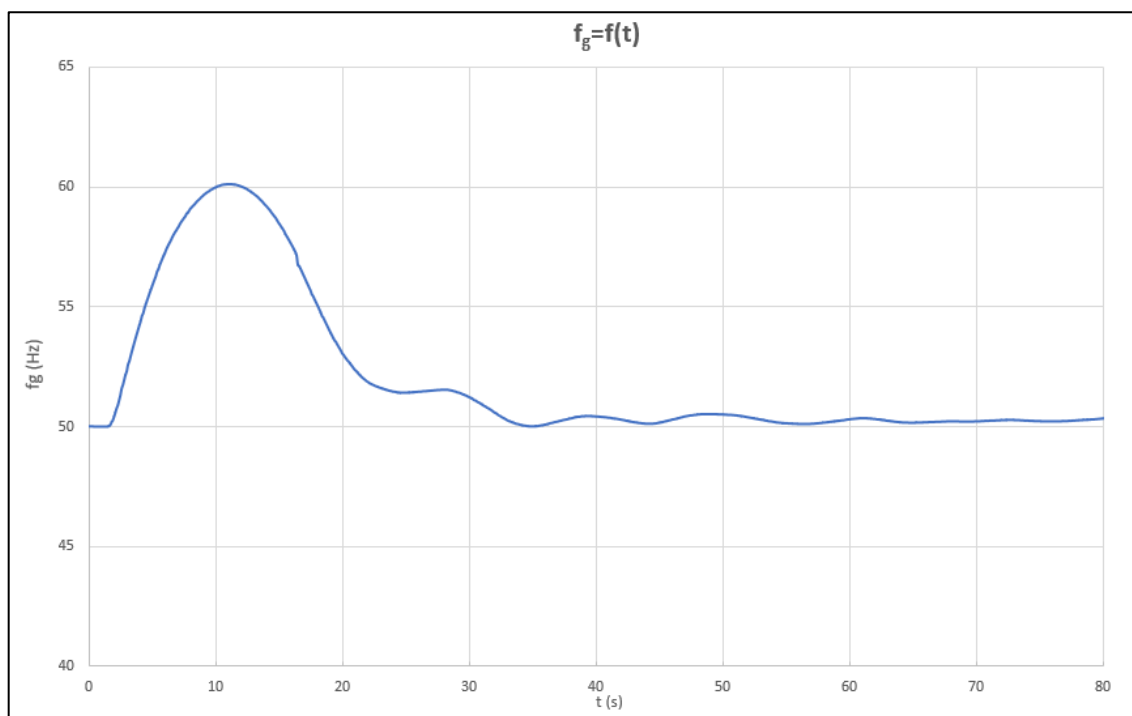
Výkonové zkoušky jsem provedl po přifázování soustrojí a po zatížení generátoru na jmenovitý výkon. V průběhu byly odzkoušeny omezovače budicí soupravy ochrany podbuzení a na závěr jsem odzkoušel ochranu na zpětný výkon.

#### 7.4.3 Ostrovní provoz

Při síťových poruchách, jakými mohou být vybočení velikosti frekvence nebo napětí mimo stanovené meze, se mohou výrobní odpojit od ostatní části elektrizační soustavy. Působení frekvenčních ochran musí být zajištěno vhodnou koordinací mezi výrobcem a provozovatelem soustavy. Provoz do vyčleněné soustavy nazýváme ostrovním provozem, většinou se pak jedná o napájení vlastní spotřeby.

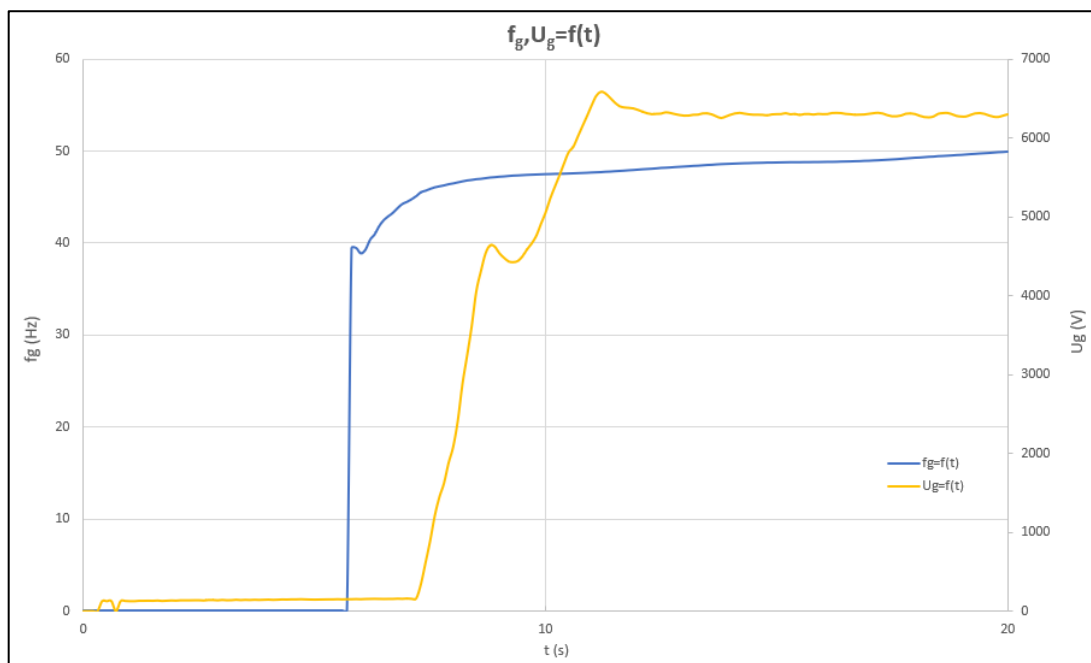
MVE Štvanice je navržena jak pro paralelní provoz se sítí, tak i ostrovní provoz. Do něj přechází elektrárna v případě výpadku sítě na straně 22 kV. V tom okamžiku dojde k odstavení dvou soustrojí a jedno soustrojí postupně převezme vlastní spotřebu elektrárny. Při přechodu do ostrovního provozu dojde k vypnutí vypínačů pro vývodový transformátor T1 a jeden z transformátorů vlastní spotřeby.

Po obnovení původního stavu distribuční soustavy se přes vypínač vývodového transformátoru přifází elektrárna zpět k síti a popřípadě se uvedou do provozu i ostatní stroje.



Obrázek 7.18 Průběh frekvence při přechodu do ostrovního provozu

Při ostrovním provozu je elektrárna schopna i startu ze tmy, tedy bez napětí v síti. Pro takové najetí jsou zapotřebí baterie pro prvotní nabuzení, záložní UPS, naakumulované hydraulické agregáty a popřípadě mobilní dieselařegát pro napájení vlastní spotřeby.



Obrázek 7.19 Průběh frekvence a napětí generátoru při najíždění ze tmy do vlastní spotřeby

## **Závěr**

Cílem této práce bylo nastínit provoz malých vodních elektráren a základní myšlenky pro jejich projektování z pohledu dimenzování zkratu a návrhu nastavení generátorové ochrany.

Na začátku teoretické části jsem se věnoval popisu provozování vodních elektráren na území České republiky a jejich vlivu na elektrizační soustavu. Zjistil jsem, že nejefektivnější formou energie je mechanická energie vody, která zajišťuje až 20 % celkové světové dodávky elektrické energie. Zároveň jsem usoudil, že provozování vodních elektráren je jak velikostí instalovaného výkonu, tak i svým provozem velkým přínosem pro elektrizační soustavu.

Dále jsem zjistil, že vtokový objekt, česle, budova strojovny a v některých případech i savka jsou základní stavební části každé vodní elektrárny a svými konstrukcemi udávají hydraulický profil a charakter vodní elektrárny.

Při popisu strojních zařízení jsem definoval základní rozdělení vodních turbín a nastínil jsem funkci uzávěru. Nejběžnějším znakem turbíny je to, jakým způsobem je voda přenášena na oběžné kolo turbíny. Z toho mi vychází turbíny rovnotlaké a přetlakové. Hlavním a v praxi nejčastěji zastoupeným typem rovnotlakých turbín je turbína Peltonova, ta se využije v oblastech s velkým spádem a menším průtokem. Oproti tomu u přetlakových turbín, které jsou na území ČR ve větším zastoupení jsou turbíny Kaplanova a Francisova. Oba typy turbín se hodí pro široký rozsah průtoků i spádů a lze je provozovat ve vertikální i horizontální poloze.

V další kapitole jsem se zaměřil na technický popis vybraných elektrotechnických zařízení sloužící pro přeměnu mechanické energie turbíny na elektrickou energii, její transformaci a bezpečné vyvedení do distribuční sítě. Ve vodních elektrárnách se využijí především synchronní hydroalternátory, ty jsou oproti turboalternátorům specifické svojí konstrukcí, která se odvíjí od parametrů turbíny, především jejích otáček. Zjistil jsem, že specifickým zařízením elektráren jsou vypínače generátoru, ty v součinnosti s generátorovou ochranou zajišťují bezpečný provoz generátoru. Stručně jsem nastínil prvky řídicího systému, který slouží pro spolehlivý provoz elektrárny a také jsem určil základní předpoklady řešení obvodů vlastní spotřeby výroby. Pro sledování chování jednotlivých celků technologie slouží snímače elektrických nebo neelektrických veličin. Z jednopólového schéma vyplývá, že pro snímání veličin jako je napětí a proud slouží měřicí transformátory

proudu a napětí, které transformují primární hodnotu veličin na sekundární výstup, ze kterých jsou hodnoty přenášeny do řídicích nebo ochranných obvodů. Pro snímání veličin jako jsou teplota, tlak, hladina nebo poloha jsem jako ukázky použil vybrané snímače z technologických obvodů elektrárny MVE Štvanice. Usoudil jsem, že většina snímačů využívá analogový výstup pro přenos naměřené veličiny do řídicího systému, v některých případech se vyskytují i binární snímače, v takových případech snímač sděluje pouze dva stavy.

V úvodu praktické části jsem technicky popsal situaci a technologii vodního díla, které jsem si vybral pro svoji diplomovou práci. Při návštěvách na vodním díle Štvanice jsem se dopodrobna seznámil s jednotlivými částmi elektrárny. Vodní elektrárna je situována na špici pražského ostrova Štvanice s přilehlým jezem a plavebními komorami. Technologii elektrárny utváří tři soustrojí o Kaplanových turbínách s hlností  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  a hydroalternátory o výkonu 2,1 MVA. Výkon z generátorů je přes rozvodnu 6,3 kV s vakuovými vypínači veden do vývodového transformátoru 22/6,3 kV a následně přes rozvodnu do distribuční sítě PRE. Spolehlivý provoz elektrárny zajišťuje distribuovaný řídicí systém.

V první polovině praktické části jsem vypočítal zkratové poměry v rozvodně R6-6,3 kV a R1-22 kV, abych mohl následně ověřit správné dimenzování stávajících rozvodů. Jako podklady pro výpočet jsem použil parametry zařízení z projektové dokumentace nebo jako v případě zkratového příspěvku ze sítě jsem údaj obdržel od pracovníků PRE. Na základě výsledku jsem zjistil, že obě rozvodny jsou vhodně navrženy na silové i tepelné účinky zkratových proudů. Dále jsem výpočtem navrhl a zkontroloval minimální průřez kabelu sloužícího k vyvedení výkonu z generátoru do rozvodny R6. Zvolil jsem kontrolu na tepelné účinky zkratového proudu. Z výsledku a z katalogového listu jsem usoudil, že je při zachování stejného typu kabelu zvolen průřez správně s ohledem na dovolené velikosti zkratových proudů a jmenovité proudové zatížitelnosti.

V dalším úseku praktické části jsem řešil systém generátorových ochran. Uvedl jsem možné vzniknuvší poruchy na hydroalternátoru a základní požadavky na ochrany. Pro rozbor a návrh nastavení digitální ochrany jsem se zaměřil na generátorovou ochranu SR489 od společnosti GE. Pokračoval jsem technickou specifikací ochrany a následně popisu a návrhu jednotlivých ochranných článků. Při parametrizování jsem zjistil, že lze ochranné funkce synchronních generátorů rozdělit na proudové, napěťové a výkonové. Při návrhu jsem

uvažoval i koordinaci s regulátorem buzení, který svým nastavením udržuje a chrání generátor v předepsaných pracovních oblastech.

V závěru praktické části jsem zvolenou ochranu odzkoušel. Zjistil jsem, že před uváděním do provozu se provádí sekundární a primární zkoušky ochrany. Sekundární zkoušky jsem provedl v laboratoři za pomoci zkušebního zdroje. Výsledkem zkoušek jsem si potvrdil správnost měření ochrany, správné působení ochranných článků, její parametrizaci a schopnost bezproblémové komunikace mezi ochranou a servisním notebookem. Primární zkoušky jsem provedl při uvádění soustrojí do provozu. Zkouškami jsem ověřil správnost zapojení měřících transformátorů a jednotlivé ochranné funkce. Součástí zkoušek bylo i první přifázování na síť, vyzkoušení přechodu elektrárny do ostrovního provozu a start elektrárny ze tmy.

Parametrizování a odzkoušení generátorové ochrany mi poskytlo velmi technicky zajímavé nahlédnutí do problematiky elektrických ochran a bohatou zkušenost využitelnou pro budoucí uplatnění.

## **Seznam použité literatury**

- [1] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. *Navrhování vodních elektráren*. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 8001022145.
- [2] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Jan VOJTEK. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 8001018080.
- [3] GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK. *Malé vodní elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 8001018121.
- [4] GRYM, Rudolf, Petr HOCHMAN, Jiří BERMAN, Josef MACHOŇ a Břetislav CICHONĚ. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9.
- [5] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2019-04-24]. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [6] PNE 38 4065. *Provoz, navrhování a zkoušení ochranných a automatik*. 4. vydání. 2017.
- [7] *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy* [online]. 2017, 1-111 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/Files/legislativa/ppds-priloha-4/>
- [8] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2019-04-23]. ISBN 978-800-1049-372.
- [9] *Power Engineering Guide: Technická příručka pro energetiky*. Edice 6.1. Praha: Siemens Energy Sector, 2012.
- [10] *Protection & Control: Reference Guide*. Vydání 23. China: GE Digital Energy, 2015.
- [11] BERAN. *Elektrické ochrany strojů a zařízení elektrizační soustavy*. Plzeň: VŠSE v Plzni, 1980.
- [12] *Chránění I: elektrická zařízení do 1000 V*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903-5401-7.

- [13] DOHNÁLEK, Petr. Ochrany pro průmysl a energetiku. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-030-0630-9.
- [14] IBLER, Zdeněk a Miloš BERAN. Elektrárny II. Plzeň, 1982.
- [15] 489 GENERATOR MANAGEMENT RELAY: Instruction Manual [online]. Ontario (Canada): GE Multilin, 2008 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.gegridsolutions.com/products/manuals/489/489man-eb.pdf>
- n m
- [16] Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy [online]. 2018, 85 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/Files/legislativa/ppds-priloha-4-2019/>
- [17] ČSN 35 0220. Hydroalternátory: Základní parametry a technické požadavky. 1985.
- [18] Rotor Earth Fault Relay [online]. In: . WOODWARD, s. 12. Dostupné z: [http://www.avrelectronics.com/downloads/professional\\_line/xr1\\_e\\_Rotor\\_Earth\\_Fault\\_Relay.pdf](http://www.avrelectronics.com/downloads/professional_line/xr1_e_Rotor_Earth_Fault_Relay.pdf)
- [19] DOHNÁLEK, Petr. Provoz a údržba ochran v energetice. 1. vydání. Praha: SNTL.



## **Seznam příloh**

Součástí mé diplomové práce jsou následující přílohy.

Příloha A – Jednopolové schéma MVE Štvanice

Příloha B – Přehledové schéma zapojení generátorové ochrany

Příloha C – Protokol z Omicronu o správném zapůsobení ochrany 51V



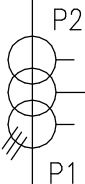
3~50Hz, 12kV, 1250A, 25kA/1s, IT

-QM1  
VD4  
630 A  
12 kV  
25 kA

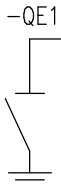


Vypínací cívka

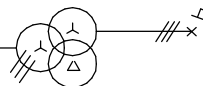
-CT1  
TPU 40.23  
200/5/5/5 A  
30/30/10 VA  
0,5FS5/10P5/0,5FS5  
CEJCH.



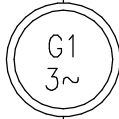
-PT1  
TJC 4  
6.3/V3 kV  
0.1/V3 kV  
50/50 VA  
0.5/3P



-QE1



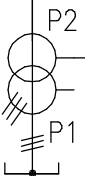
-G1  
2.1 MVA  
6.3 kV  
192 A  
PF 0.9  
50 Hz  
107 ot/min



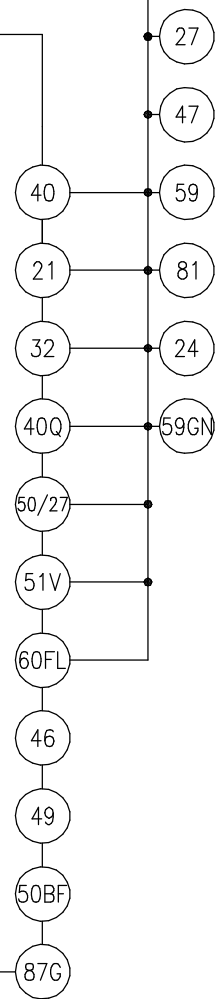
Ochrana zemního  
spojení rotoru  
SEG XR1



-CT1N  
200/5/5 A  
10P5/5P10  
30/30 VA



Generátorová ochrana  
GE  
SR489



# QuickCMC1

## Test Module

Name:	OMICRON QuickCMC	Version:	2.40 SR 1
Test Start:	02-IV-2019 13:42:08	Test End:	02-IV-2019 13:56:13
User Name:		Manager:	
Company:			

## Test Results

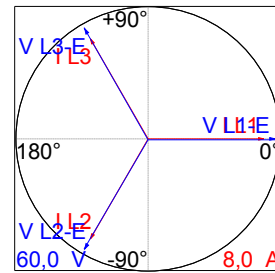
Title: OMC\_TG3\_PHASE\_OVERCURRENT

### Fault Calculator:

Table Inputmode	Parameters (All values are secondary)			
Direct	V L1-E	57,73 V	0,00 °	50,000 Hz
	V L2-E	57,73 V	-120,00 °	50,000 Hz
	V L3-E	57,73 V	120,00 °	50,000 Hz
	I L1	7,000 A	0,00 °	50,000 Hz
	I L2	7,000 A	-120,00 °	50,000 Hz
	I L3	7,000 A	120,00 °	50,000 Hz

### Generator Settings

V L1-E	57,735V	0,00°
V L2-E	57,735V	-120,00°
V L3-E	57,735V	120,00°
I L1	7,000A	0,00°
I L2	7,000A	-120,00°
I L3	7,000A	120,00°



### Binary Inputs

Trip	Start
0->1	1->0
52,219s	n/a

### Summary

1 tests passed, 0 tests failed, 0 tests not assessed  
**Test passed**

100,00% passed