

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Návrh budicího systému pro synchronní stroj

Autor práce: **Bc. Jan Řimnáč**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ŘIMNÁČ**  
Osobní číslo: **E22N0027P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Návrh budicího systému pro synchronní stroj**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teorii budících systémů synchronních strojů.
2. Navrhněte napájecí část, pomocné obvody a odbuzovací část budicího systému synchronního generátoru pomocí empirických vztahů.
3. Navrhněte tyto části budicího systému pomocí výpočetního programu UNISMART.
4. Porovnejte obě metody výpočtů.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Jaroslav Doležal; Jiří Štastný; Jan Špetlík; Stanislav Bouček; Zbyněk Brettschneider. Jaderné a klasické elektrárny. Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
2. Beran, Miloš. Elektrická zařízení tepelných elektráren. 1. vyd. Plzeň : VŠSE, 1988.
3. Technická dokumentace software UNISMART zajištěná konzultantem z firmy Invelt – elektro s.r.o.

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

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



L.S.

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

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

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem budicího systému pro synchronní stroj. V první části pojednává o obecné teorii budících systému, z čeho se budící systémy skládají a jaké jsou na ně kladené požadavky. Druhá část diplomové práce se zabývá praktickým návrhem napájecí části, pomocných obvodů a odbuzovacího obvodu pomocí vztahů získaných empiricky z technické praxe. V poslední části je proveden návrh ve výpočetním programu UNISMART firmy ABB, který je poskytnutý firmou Invelt-elektro s.r.o. Následně je provedeno porovnání těchto výsledků.

## **Klíčová slova**

budící systém, odbuzení synchronního stroje, tyristorový usměřovač, synchronní stroj, synchronní generátor, odbuzovač, CROWBAR, první nabuzení, budící transformátor

## **Abstract**

Diploma thesis deals with design of excitation system for synchronous machine. In the first part it discusses the general theory of excitation systems, what excitation systems consist of and what are the requirements for them. In second part, thesis deals with practical design of auxiliary circuit, non-essential auxiliary circuits and field-circuit breaker by empirical experiences. In the last part, design of carried out in the computational software UNISMART created by ABB Industry, which is provided by company Invelt-elektro s.r.o. A comparison of these results is made.

## **Keywords**

excitation system, deexcitation of synchronous machine, thyristor rectifier, synchronous machine, synchronous generator, field circuit breaker, CROWBAR, field flashing, excitation transformer

## **Prohlášení**

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

V Plzni 23.5.2024

---

Bc. Jan Řimnáč

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Teorie budících systémů</b>	<b>2</b>
1.1 Základní požadavky na budící systémy	2
1.2 Přehled budících souprav	3
1.2.1 Budící systém se stejnosměrným rotačním budičem	4
1.2.2 Statický budící systém se střídavým pomocným budičem	5
1.2.3 Bezkroutkový budící systém se střídavým rotačním budičem	6
1.2.4 Statické budící systémy	7
1.3 Odbuzování generátorů	8
1.3.1 Odbuzovač s paralelním odporem	9
1.3.2 Odbuzovač se zhášecí komorou	10
1.3.3 Odbuzení pomocí invertovaného chodu budícího systému	11
1.3.4 Stejnosměrná přepěťová ochrana CROWBAR	12
1.4 Řídící funkce budícího systému	13
1.4.1 Regulace napětí (voltage regulation)	13
1.4.2 Kompenzace zatěžovacího proudu (load current compensation)	13
1.4.3 Omezení přebuzení (overexcitation limitation)	13
1.4.4 Omezení podbuzení (underexcitation limitation)	13
1.4.5 Omezení poměru napětí/kmitočet (V/Hz limitation)	14
1.4.6 Stabilizace výkonového systému (power system stabilization)	14
1.5 Vybavení budících systému	14
1.5.1 Ruční řízení	15
1.5.2 Automatické řízení	15
1.5.3 Jednotka automatického najetí a odstavení	16
1.5.4 Jednotka automatického srovnání napětí	16
1.5.5 Přizpůsobení žádané hodnoty	16
1.5.6 Sledování žádané hodnoty (vlečná regulace)	16
1.5.7 Rozhraní řídicích obvodů s obvodů elektrárny	16
1.5.8 Záznam dat (data logger)	17

## OBSAH

1.5.9	Komunikační rozhraní pro digitální budící systémy . . . . .	18
1.5.10	Řídící a ochranný zdroj napájení . . . . .	18
1.5.11	Ochrany . . . . .	18
1.6	Ostatní sounáležitosti pro návrh budících systémů . . . . .	18
1.6.1	Pracovní prostředí . . . . .	18
1.6.2	Krytí rozvaděče . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Návrh statického budícího systému pro synchronního stroj</b>	<b>20</b>
2.1	Parametry synchronního stroje . . . . .	20
2.2	Výpočet parametrů budiče . . . . .	20
2.3	Výpočet parametrů budícího transformátoru . . . . .	21
2.4	Dimenzování přívodních vodičů . . . . .	25
2.5	Návrh výkonového měniče . . . . .	26
2.5.1	Spolehlivost výkonové měniče . . . . .	29
2.5.2	Chlazení výkonového měniče . . . . .	29
2.6	Návrh odbuzovače s odbuzovacím rezistorem . . . . .	31
2.6.1	Návrh odbuzovacího rezistoru . . . . .	31
2.6.2	Návrh odbuzovače . . . . .	33
2.7	Návrh přepětové ochrany CROWBAR . . . . .	34
2.8	Návrh obvodu prvního nabuzení . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Návrh ve výpočetním programu UNISMART</b>	<b>40</b>
3.1	Vstupní data pro výpočetní program UNISMART . . . . .	41
3.2	Výsledky návrhu . . . . .	42
3.2.1	Budící transformátor . . . . .	42
3.2.2	Výkonový měnič . . . . .	43
3.2.3	Odbuzovač s odbuzovacím rezistorem . . . . .	43
3.2.4	Stejnoseměrná přepětová ochrana CROWBAR . . . . .	43
3.2.5	Obvod prvního nabuzení . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Porovnání výsledků návrhu budícího systému</b>	<b>45</b>
4.1	Budící transformátor . . . . .	45
4.2	Výkonový měnič . . . . .	45
4.3	Odbuzovač s odbuzovacím nelineárním rezistorem . . . . .	46
4.4	Přepětová ochrana CROWBAR . . . . .	46
4.5	Obvod prvního nabuzení . . . . .	47
	<b>Závěr</b>	<b>48</b>



*OBSAH*

<b>Bibliografie</b>	<b>50</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>i</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>iii</b>

## Seznam symbolů

$U$	V	elektrické napětí
$I$	A	elektrický proud
$R$	$\Omega$	elektrický odpor
$I_P$	A	stropní budící proud
$U_P$	V	stropní budící napětí
$R_H$	$\Omega$	elektrický odpor odbuzovacího odporu
$U_{NG}$	V	statorové jmenovité napětí
$I_{NG}$	A	statorový jmenovitý proud
$U_f$	V	budící elektrické napětí
$I_f$	A	budící elektrický proud
$U_{fN}$	V	nominální budící elektrické napětí
$I_{fN}$	A	nominální budící elektrický proud
$S_N$	VA	jmenovitý zdánlivý výkon
$U_N$	V	jmenovité napětí
$I_N$	A	jmenovitý proud
$\cos \phi$	-	účinník
$f_N$	Hz	jmenovitá frekvence
$n_N$	ot./min	jmenovité otáčky za minutu
$J$	A/m <sup>2</sup>	proudová hustota
$S_{Cu}$	mm <sup>2</sup>	průřez měděných pasů
$R_{fN}$	$\Omega$	jmenovitý odpor budícího vinutí
$W$	J	energie
$\Delta U$	V	úbytek napětí

## Seznam symbolů

$P_{max}$	W	maximální zatížitelnost
$P_R$	W	ztrátový výkon rezistoru
$W_k$	J	akumulovaná energie ve vinutí rotoru
$I_{eN}$	A	jmenovitý proud budiče
$U_{eN}$	V	jmenovité napětí budiče
$U_{2min}$	V	minimální napětí na vstupu usměrňovače
$U_{di0}$	V	ideální hodnota usměrněného napětí diodového usměrňovače
$S_{nT}$	VA	jmenovitý výkon budícího transformátoru
$U_{RRM}$	V	maximální blokovací napětí tyristorů
$S_{Tvent}$	VA	jmenovitý výkon transformátoru pro ventilátory
$W_{Rcelk}$	J	celková energie odbuzovacího odporu
$I_{ff}$	A	proud při prvním nabuzení
$U_{ff}$	V	napětí ekvivalentního obvodu prvního nabuzení
$R_{ff}$	$\Omega$	odpor ekvivalentního obvodu prvního nabuzení
$R_{1  2}$	$\Omega$	odpor obvodu prvního nabuzení po korekci
$R_{ffI}$	$\Omega$	externí odpor obvodu prvního nabuzení
$P_R$	W	ztrátové teplo v rezistorech obvodu prvního nabuzení
$S_{Nff}$	VA	jmenovitý výkon transformátoru prvního nabuzení
$U_{1N}$	V	jmenovité primární napětí transformátoru
$U_{2N}$	V	jmenovité sekundární napětí transformátoru
$x_k$	%	zkratová reaktance transformátoru
$m$	-	počet fází
$U_{INmax}$	V	maximální vstupní napětí

## Seznam symbolů

$x''_d$	%	podélná reaktance rázová
$x'_d$	%	podélná reaktance přechodná
$x_d$	%	podélná reaktance
$x''_q$	%	příčná reaktance rázová
$x'_q$	%	příčná reaktance přechodná
$x_q$	%	příčná reaktance
$x_{(2)}$	%	zpětná složka reaktance
$x_{(0)}$	%	netočivá složka reaktance
$x_{(1)}$	%	sousledná složka reaktance
$T''_d$	s	rázová podélná časová konstanta zkratu
$T'_d$	s	přechodná podélná časová konstanta zkratu
$T'_{d0}$	s	přechodná podélná časová konstanta naprázdno
$T''_{d0}$	s	rázová podélná časová konstanta naprázdno
$T''_q$	s	rázová příčná časová konstanta zkratu
$T'_q$	s	časová konstanta příčná přechodná zkratu
$T''_{q0}$	s	časová konstanta příčná nakrátko
$T'_{q0}$	s	časová konstanta příčná naprázdno
$T_a$	s	časová konstanta zkratu vinutí kotvy

## Seznam zkratek

ŘUs	řízený usměrňovač
BS	budící systém
PSS	power system stabilizer
AVR	automatic voltage regulator (automatický regulátor napětí)
HMI	human machine interface (uživatelské rozhraní)
DŠP	Doosan Škoda Power, s.r.o.
ICU	Input coupling unit (jednotka propojení vstupů)
USM	usměrňovač
BS	budící systém
BOD	break over dioda
SES	statický budící systém (static excitation system)

## Úvod

Tato práce se věnuje problematice návrhu budících systému pro synchronní generátor. Hlavním cílem práce je navrhnout základní komponenty budícího systému pro synchronní generátor a ověřit standardizované postupy společnosti Invelt-elektro, s.r.o. spojené s návrhem budícího systému. Diplomová práce se dělí na teoretickou část, kde jsou vysvětleny základní funkce budícího systému, základní požadavky na budící systémy, a s tím spojené parametry, které definují vlastnosti budícího systému. Práce se zaměřuje na reálný projekt společnosti Invelt-elektro s.r.o., a respektuje její postupy při návrhu budícího systému. Práce je rozdělena do čtyř kapitol.

V první kapitole jsou uvedeny základní definice a specifikace budícího systému, jaké jsou na ně kladeny požadavky, které vycházejí z norem a předpisů. Jsou zde uvedeny příklady provedení používaných budících systémů a vysvětleny jejich hlavní, ochranné a řídicí funkce.

V druhé kapitole se věnuji samotnému návrhu statického budícího systému s ohledem na postupy společnosti Invelt-elektro, s.r.o. V této kapitole jsou provedeny výpočty základní požadavky pro statický budící systém. Dále je proveden návrh základních komponentů, které musí budící systém obsahovat. Jedná se o sílové vodiče, budící transformátor, výkonový měnič, odbuzovací obvod se stejnosměrnou přepěťovou ochranou a obvod prvního nabuzení.

V třetí kapitole je proveden návrh statického budícího systému ve výpočetním programu společnosti ABB UNISIMART pro stejný synchronní generátor jako v předchozí kapitole se stejnými požadavky specifikace statického budícího systému. V poslední kapitole je uvedeno porovnání získaných výsledků návrhu statické budící soupravy pro synchronní generátor získaných v druhé a třetí kapitole.

# 1 Teorie budících systémů

Budícím systémem synchronního stroje rozumíme zdroj regulovaného stejnosměrného proudu, pracující v uzavřené regulační smyčce, který zajišťuje buzení synchronního stroje. Budící souprava zahrnuje zpravidla budič s odbuzovačem, regulátor buzení, ruční řízení a čidla pro měření regulovaných veličin.[1]

## 1.1 Základní požadavky na budící systémy

Budící systémy synchronních generátorů tvoří zdroj stejnosměrného proudu pro napájení budícího vinutí, jehož proud vytváří magnetické pole rotoru. Vazbu mezi mechanickým momentem turbíny na rotoru a momentem elektromagnetického pole statoru zprostředkovává točivé magnetické pole rotoru vznikající otáčením stejnosměrného pole budícího vinutí umístěného na rotoru. Tato vazba je podstatná pro činnost generátoru. [2]

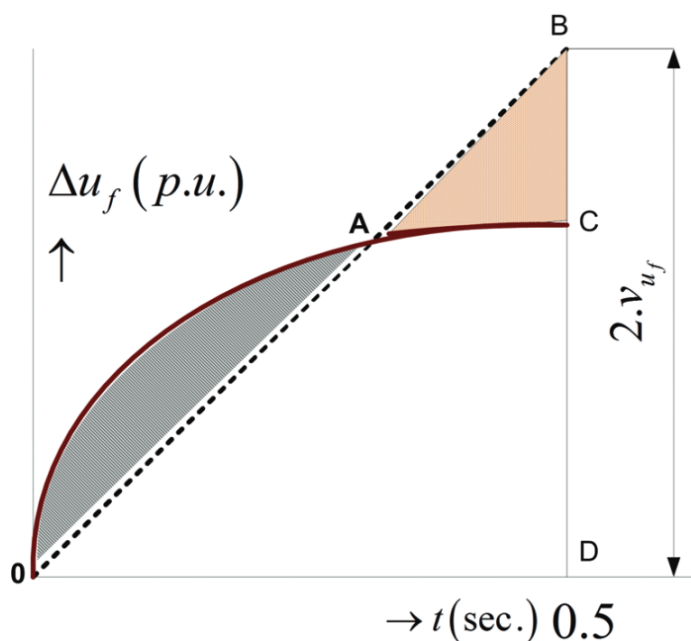
### Základní funkce budícího systému:

- Generovat stejnosměrný budící proud pro napájení budícího vinutí synchronního stroje
- Plnit důležité ochranné a řídicí funkce (hlídání mezi budícího proudu, omezovače proudu-hlídání mezi pracovního bodu v PQ diagramu)

### Hlavní požadavky na budící systém:

- Vysoká provozní spolehlivost: Větší než samotného generátoru, obvykle bývá budič zálohován.
- Poměrné stropní napětí: Je dáno poměrem maximálního stopního napětí a jmenovitým napětím budiče. Slouží pro zajištění celého provozního rozsahu generátoru s rezervou stropu pro destabilizační přechodné děje. Poměrné stropní napětí se pohybuje v rozsahu  $1,6 \div 2x$  jmenovité hodnoty budícího napětí, závisí na typu budícího systému.
- Odezva napětí: Požadujeme rychlý nárůst napětí, pro dosažení nejrychlejší regulace. Je to hodnota, kterou získáme vyhodnocením vzrůstu napětí na budiči v časovém intervalu 0 až 0,5 s, popř 0 až 0,1 s pro rychlé budící systémy viz Obr. 1.1.
- Doba stropního buzení: je doba, po kterou je na rotor synchronního stroje přiloženo stropní napětí. [1]
- Doba odezvy napětí: je doba, kdy napětí na budiči dosáhne 95 % rozdílu mezi stropní hodnotou napětí a jmenovitého budícího napětí [1]. Pokud je tato doba menší než 0,1s označujeme tento systém jako rychlá budící souprava.

Budící souprava tvoří spolu se strojem v uzavřené regulační smyčce řízený systém. Na Obr. 2 je znázorněna typická odezva napětí generátoru vybaveného řízeným budícím systémem na skokovou změnu na vstupu a jsou na něm zakresleny veličiny, které slouží ke klasifikaci budících systémů. [1] Z Obr. 1.2 je patrné, že odezvu budícího systému můžeme popsat překyvem, počtem kyvů a dobou ustálení.



Obr. 1.1 Stanovení odezvy budiče [2]

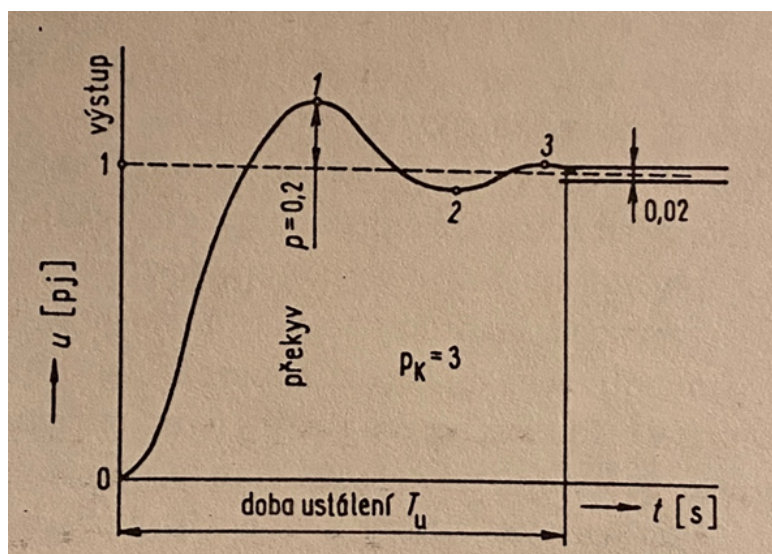
## 1.2 Přehled budících souprav

Relativně rychlý nárůst výkonů synchronních strojů, nároky na automatizaci najíždění, provozu a odstavení a prudký rozvoj polovodičové techniky způsobily, že dříve nejrozšířenější budící systém – stejnosměrný točivý budič, byl nahrazen budícím alternátorem a statickým diodovým nebo tyristorovým usměrňovačem. Pro zjednodušení, zlevnění a snadnější údržbu byl místo budícího alternátoru použit snížovací transformátor, který se připojuje přímo k svorkám regulovaného stroje. Někteří výrobci doplnili tento systém o proudovou kompaundaci. Potíže při přenosu budícího proudu přes sběrné ústrojí způsobily, že se začal používat bezkartáčový budící systém, kdy na hřídeli synchronního stroje rotuje polovodičový diodový usměrňovač. [1]

Budící systémy může rozdělit z několika hledisek: [1]

- Odkud je zajištěno napájení budiče: Podle zajištěného napájení budiče rozlišujeme budící systémy na závislé a nezávislé. Závislé budící systémy jsou takové systémy, kdy budící příkon budiče závisí na napětí regulovaného stroje. Nezávislý budící systém se vyznačuje tím, že dodávaná energie je nezávislá na výstupu regulovaného stroje.
- Jaký typ budiče je použit: Podle typu použitého budiče lze členit budící systémy s točivými budiči, statické, a bezkartáčové budící systémy.
- Podle rychlosti působení: Podle rychlosti lze budící systémy klasifikovat na rychlé nebo klasické. Rychlé budící systémy mají dobu odezvy menší než 0,1 s. Ostatní budící systémy nazýváme klasické.

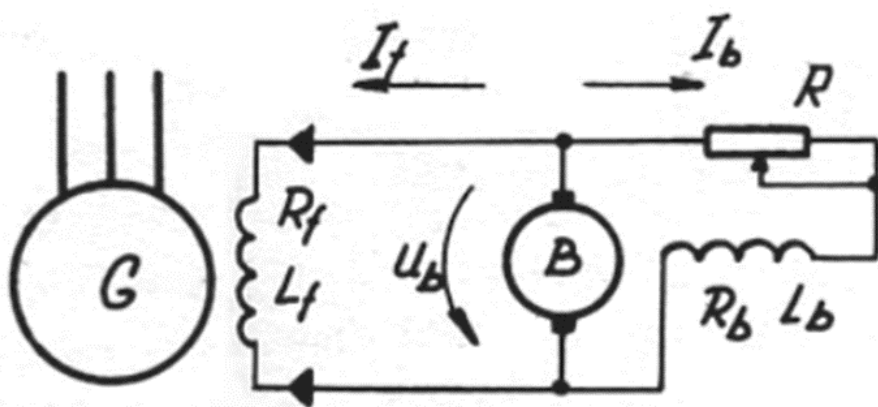




Obr. 1.2 Doba odezvy napětí regulovaného generátoru na skok žádané hodnoty [1]

### 1.2.1 Budicí systém se stejnosměrným rotačním budičem

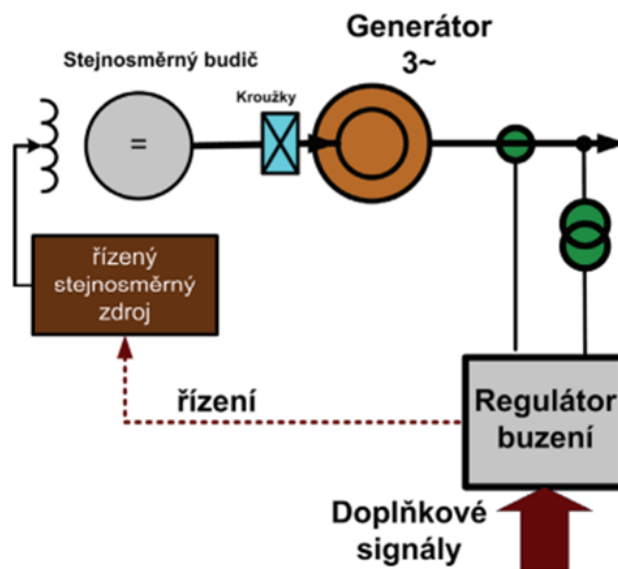
Historicky nejstarší budicí systém, využívaný pro generátory do výkonu 125 MVA. Změna budicího napětí je lepší u vysokootáčkových strojů, proto u hydroalternátorů je budič poháněn asynchronním motorem napájeným z vlastní spotřeby. Tento systém neumožňuje plynulou regulaci pro malé hodnoty budicího proudu. [3] Největším problémem tohoto budicího systému je přítomnost komutátoru, který snižuje spolehlivost budicí soupravy.



Obr. 1.3 Budicí systém se stejnosměrným derivačním rotačním budičem [3]

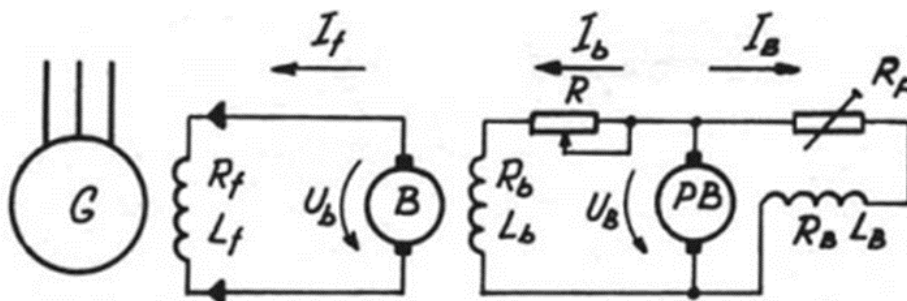
Dalším řešením budicí soupravy s rotačním stejnosměrným budičem viz Obr. 1.4 je využití cize buzeného dynama, které je oproti derivačnímu dynamu tvrdším zdrojem napětí, vyžaduje však přítomný zdroj stejnosměrného proudu.

Dalším řešením tohoto budicího systému bylo přidání pomocného budiče. Viz Obr. 1.5 se souprava skládá



Obr. 1.4 Budicí systém se stejnosměrným cize buzeným rotačním budičem [2]

z hlavního budiče a pomocného budiče. Přidáním pomocného se zlepšila plynulost regulace a zlepšila se rychlost nárazového přibuzení. U této budicí soupravy se vyskytují 2 komutátory, které snižují provozní spolehlivost.

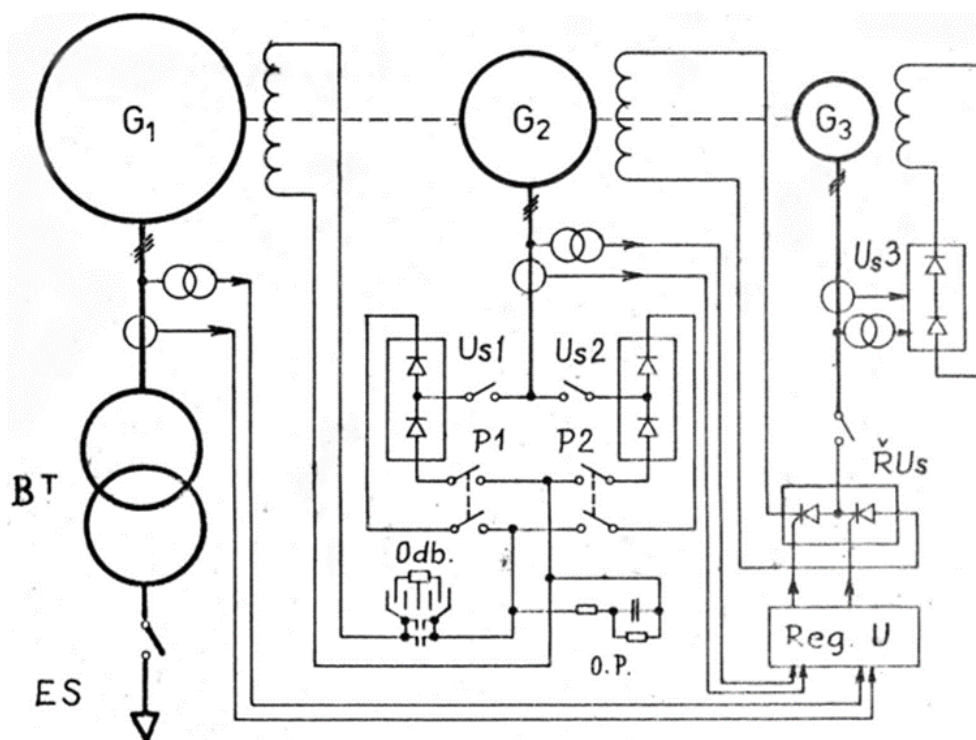


Obr. 1.5 Budicí souprava s hlavním a pomocným rotačním budičem [3]

### 1.2.2 Statický budicí systém se střídavým pomocným budičem

Nezávislá budicí souprava pro generátory 220 MW s pomocným budičem viz Obr. 1.6. Topologie budicího systému je podobná jako u systému se stejnosměrným rotačním budičem. Vlivem nízké provozní spolehlivosti komutátoru byly nahrazeny dynamy za synchronní generátory.

V tomto případě generátor G2 slouží jako hlavní budič, který přes neřízený diodový usměrňovač Us1 a Us2 (Us1 jako hlavní usměrňovač, Us2 jako záložní) napájí budicí vinutí generátoru G1. Regulace napětí je v této topologii zajištěna řízeným tyristorovým usměrňovačem ŘUs, který napájí budicí vinutí hlavního budiče G2



Obr. 1.6 Statický budicí systém se střídavým pomocným budičem [3]

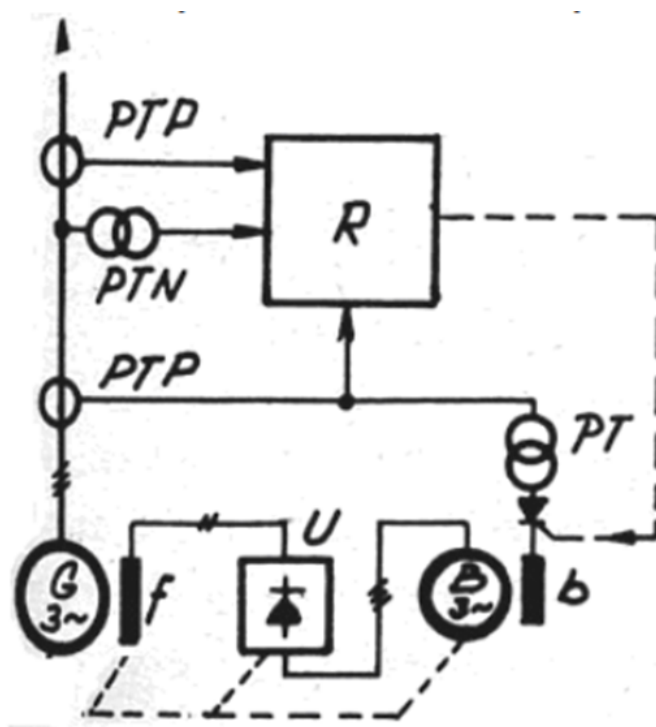
a jeho napájení je zajištěno z pomocného budiče G3. Pracovní kmitočet budičů G2 a G3 bývá 150 až 400 Hz [1].

### 1.2.3 Bezkrůžkový budicí systém se střídavým rotačním budičem

Budicí proud nad 5 000 A je již obtížné převést přes kroužky do rotoru a sběrací ústrojí začíná být vážným technickým problémem [1]. Z tohoto důvodu se vytvořilo technické řešení, které odstraňuje problém sběracího ústrojí, neboť na společné hřídeli je umístěny nejen usměrňovač, ale i část střídavého zdroje v inverzním provedení (budicí vinutí na statoru a střídavým vinutím na rotoru) [3].

Výhodou takového provedení je vysoká spolehlivost, nevýhodou je menší dynamika regulace [3]. Ovšem budicí soupravu uvedenou na obr. 7 nelze použít pro nejvyšší výkony z důvodu pomalého odbuzení. V Plzni vyráběno pro výkony do 250 MW včetně. Problematiku ohledně odbuzování podrobněji vysvětlím v kapitole 1.3 Odbuzování synchronního stroje.

Zlepšení dynamické odezvy je možné dosáhnout nahrazením neřízeného diodového usměrňovače řízeným tyristorovým usměrňovačem viz 1.8

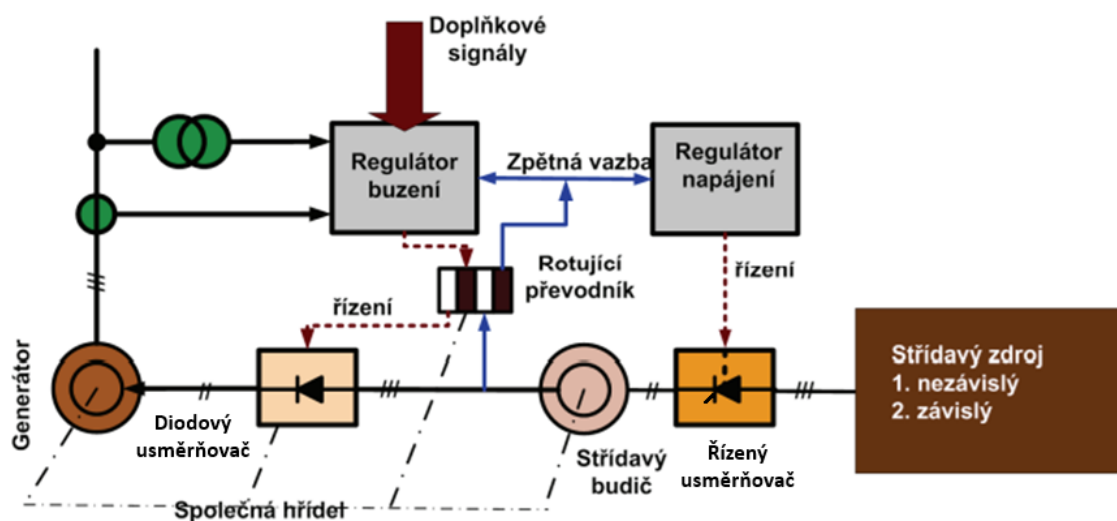


Obr. 1.7 Budící souprava bezkroužková s neřízeným usměrňovačem a střídavým budičem [3]

Na hřídeli rotuje řízený tyristorový usměrňovač, rotor střídavého budiče a rotující vícekanálový převodník, který převádí signály z regulátoru na řízené tyristory a zpětnou vazbu o napětí budiče pro regulátor. U tohoto provedení je vysoká provozní spolehlivost, dynamika regulace a vysoký strop buzení. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, doporučuje se pro generátory vyšších výkonů.

#### 1.2.4 Statické budící systémy

Odstraněním rotačních budičů z budícího obvodu se docílí velké dynamiky regulace budícího proudu. Jedná se o závislé buzení, které má vysokou provozní spolehlivost, jelikož je možné zálohovat řízené tyristorové usměrňovače. Ovšem přenos budící energie je zde proveden přes sběrací ústrojí generátoru, to komplikuje použití této budící soupravy pro nejvyšší výkony. Další nevýhodou tohoto budícího systému je nutnost zajistit prvotní nabuzení (field flashing) v případě, že generátor nemá zbytkové napětí vlivem remanence, je nutné zajistit jeho první nabuzení sníženým napětím z nezávislého zdroje napětí, popř. ze záložních baterií elektrárny.



Obr. 1.8 Bezkroužkový budící systém s řízeným tyristorovým usměrňovačem a střídavým rotačním budičem [2]

### 1.3 Odbuzování generátorů

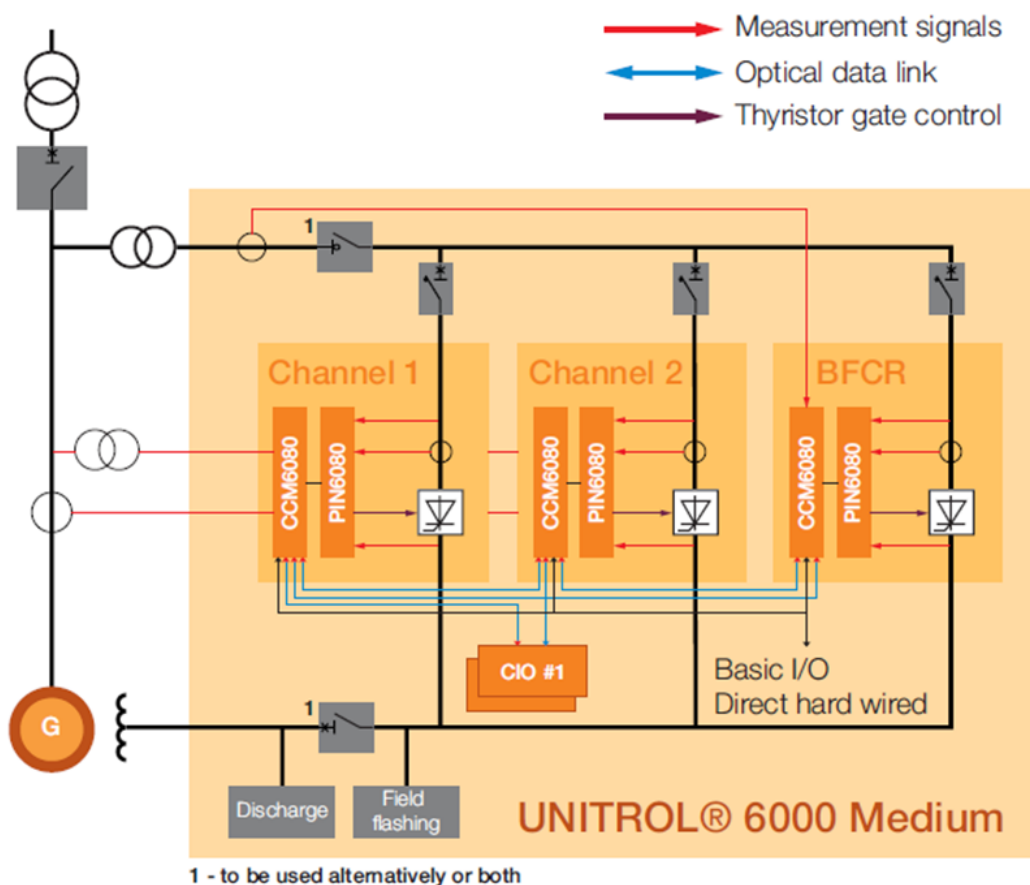
Odbuzení v poruchových stavech je nutné pro odvedení nahromaděné elektromagnetické energie a snížení vnitřního napětí, respektive svorkového napětí generátoru, nejčastěji přeměnou na teplo. Optimálně rychlé odbuzení se provádí nejčastěji zařazením činného odporu do budícího obvodu o maximální velikosti, které však nezpůsobí přílišný nárůst napětí, které by ohrozilo izolaci stroje. Vzniklé přepětí musí být menší než 75 % zkušebního napětí. [5]

Systémy odbuzování:

- • Odbuzení pomocí paralelního odporu
- Odbuzení se zhasíací komorou
- Odbuzení invertorovým chodem budícího systému (pouze pro řízené tyristorové usměrňovače)

Požadavky na odbuzovače:[2]

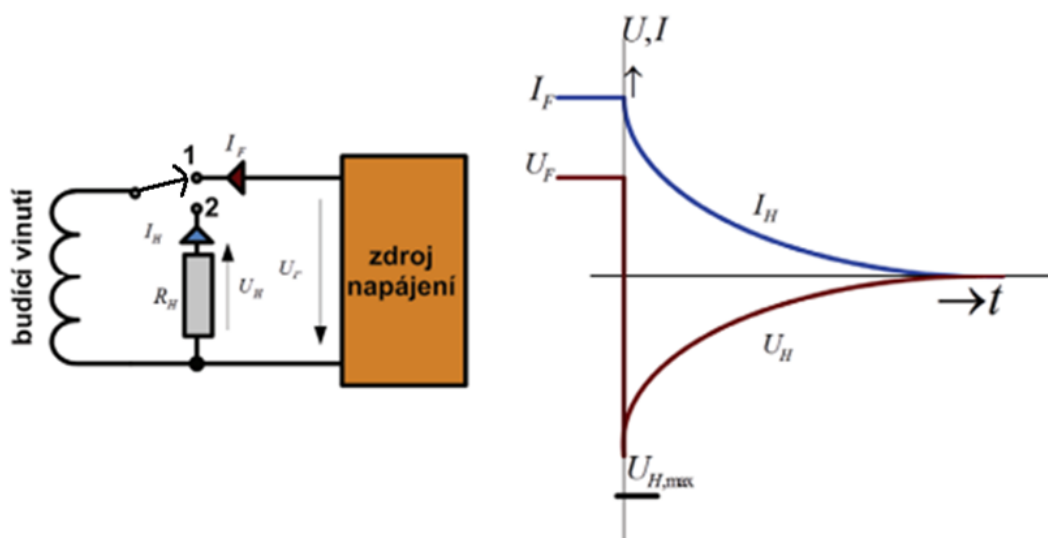
- Vysoká provozní spolehlivost
- Vysoká rychlost odbuzování
- Dodržení mezí pro přechodná napětí vznikající při odbuzování
- Zajištění reakce na signály ochrany a dálkového ovládání



Obr. 1.9 Statická budící souprava (Discharge-odbuzovací obvod, Field flashing-obvod prvního nabuzení, Channel 1, 2 -kanál 1, 2, BFCR-záložní kanál, CIO-karta vstupů a výstupů, Measurement signals-signály měření proudů a napětí, Optical data link-komunikace pomocí optických kabelů, Thyristor gate control-signály přiváděné na hradla tyristorů) [4]

### 1.3.1 Odbuzovač s paralelním odporem

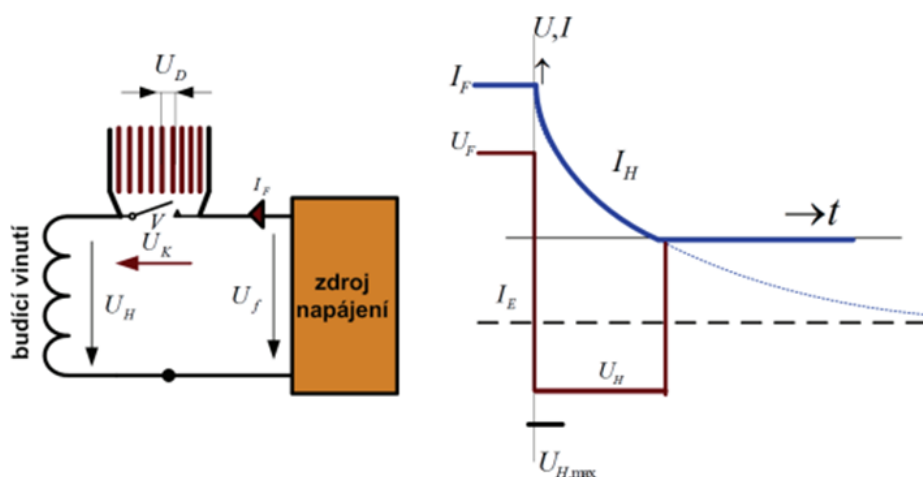
Princip odbuzení pomocí paralelního odporu spočívá v připojení paralelního odporu a rozpojení budícího obvodu. Připojení odporu a odpojení zdroje napájení viz Obr. 1.10 musí proběhnout sekvenčně, tak aby nedošlo nejdříve k odepnutí zdroje a následnému připojení odporu. To by mohlo mít za následek vznik velkého přepětí, které by mohlo poškodit budící vinutí. Je tedy nutné připojit nejdříve do obvodu odbuzovací odpor a teprve následně odpojit zdroj napájení. Z budícího vinutí se stává ze spotřebiče zdrojem, který generuje proud odbuzení  $I_H$  vycházející z počáteční hodnoty před odbuzením (proud indukčnosti se nemůže měnit skokem). Napětí na svorkách budícího vinutí má proti chodu jako spotřebič obrácenou polaritu. Aby se dosáhlo co nejkratší doby odbuzení, musí být odbuzovací odpor  $R_h$  co největší, ale takový, aby se nepřekročilo mezní napětí na svorkách budícího vinutí dané hodnotou menší než 75 % zkušební napětí. [2]



Obr. 1.10 Odbuzovač s paralelním odporem a průběh napětí a proudu při procesu odbuzení [2]

### 1.3.2 Odbuzovač se zhášecí komorou

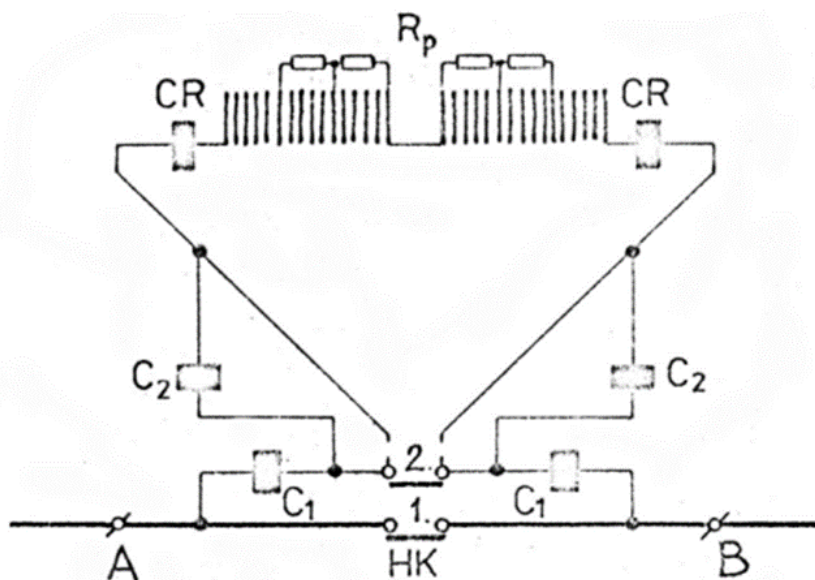
Využívá fyzikálních vlastností krátkého elektrického oblouku konstantní délky 2 až 3 mm udržující prakticky konstantní napětí 25 až 30 V v širokém rozsahu protékajícího proudu. Oblouk vzniklý na opalovacích kontaktech V viz obr. 11 se při jejich rozpínání pomocným magnetickým polem vtahuje do zhášecí komory tvořené řadou vzájemně izolovaných měděných destiček, jejichž počet zajišťuje nepřekročení napětí oblouku  $U_{Hmax}$ . Oblouk je rozdělen na řadu krátkých sériově řazených oblouků a výsledné napětí na celé komoře zůstává po celý proces (vyjma uhašení oblouku) prakticky konstantní a obrácené polarity. [2]



Obr. 1.11 Odbuzovač se zhášecí komorou a průběh napětí a proudu při procesu odbuzení [2]

Napětí na svorkách budícího vinutí je tedy při procesu odbuzení konstantní a obrácené polarity. Elektromagnetická energie budícího vinutí se přeměňuje na energii tepelnou zahříváním vzduchu a měděných destiček.

Podrobnější pohled na zhášecí komoru je vidět na Obr. 1.12. Při procesu odbuzení nejprve dochází k rozpojení kontaktů HK1, tak aby při rozpojení kontaktů HK2 došlo k vytvoření magnetického pole a oblouk byl vtahován do zhášecí komory.



Obr. 1.12 Detailnější pohled na zhášecí komoru odbuzovače [5]

Indukčnosti  $CR$  jsou v obvodu přítomné z důvodu, aby vzniklý elektrický oblouk rotoval a měděné destičky se při odbuzení ohřívaly rovnoměrně. Odpory  $RP$  snižují vzniklé přepětí při zhašení elektrického oblouku [5]. Odbuzovač se zhášecí komorou je využit např. na přečerpávací elektrárně Dalešice.

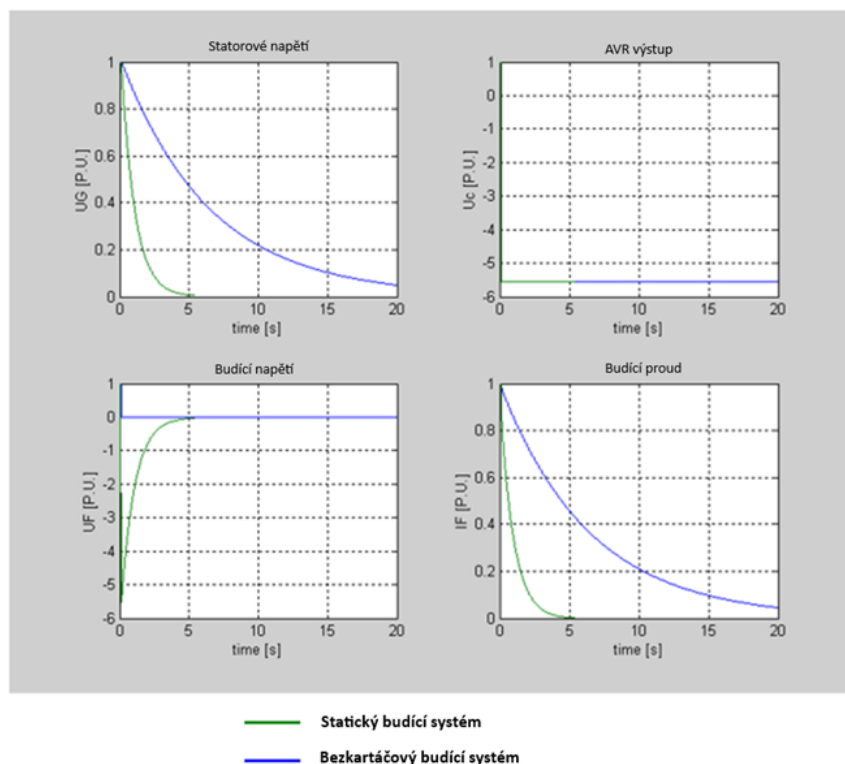
### 1.3.3 Odbuzení pomocí invertovaného chodu budícího systému

Obuzení pomocí invertovaného chodu budícího systému je možné pouze u budících systému s řízeným tyristorovým usměrňovačem, kde lze snadno otočit polaritu budícího napětí bez nutnosti rozpojení budícího obvodu. Tento proces nelze zajistit u neřízeného diodového usměrňovače. Používá se k plánovaným odbuzováním, havarijní odbuzování při obvykle nepříznivějších proudových podmínkách a potenciálně vyšším namáháním tyristorů se zajišťuje klasickými systémy odbuzování [5].

Na obr. 1.13 je porovnání procesu odbuzení pro statickou budící soupravu a bezkartáčový budící systém. V pravém horním grafu nastal požadavek na odbuzení pomocí invertovaného chodu usměrňovače, v důsledku toho došlo u statického budícího systému k otočení polarity výstupního napětí řízeného usměrňovače, oproti tomu u bezkartáčového budícího systému došlo k poklesu výstupní napětí diodového usměrňovače k 0, jelikož neumožňuje generovat zápornou polaritu napětí (levý dolní graf). U statického BS vlivem záporné polarity napětí dochází k rychlejšímu přechodnému ději a budící proud, respektive statorové napětí se snižuje rychleji,



než je tomu u bezkartáčového BS. Je vidět, že odbuzení pomocí invertovaného chodu statického budicího systému je 4x až 5x rychlejší než klasický způsob odbuzení u bezkartáčového BS.

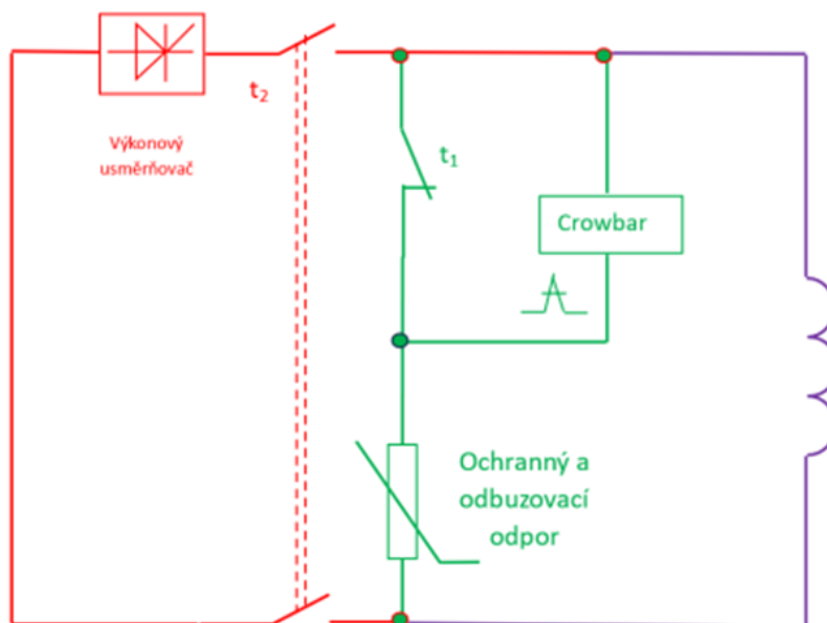


Obr. 1.13 Porovnání procesu odbuzení statického budicího systému a bezkroužkového budicího systému [6]

### 1.3.4 Stejnoseměrná přepěťová ochrana CROWBAR

U statických řízených budících souprav dochází k provoznímu odbuzení stroje pomocí invertovaného chodu. K odbuzení musí dojít i v případě poruchy, na kterou zareaguje odbuzovač nezávislý na regulátoru buzení. Odbuzení stroje je firmou ABB standardně řešeno instalací odbuzovače na střídavé straně měniče (odbuzovač je zapojen mezi budicí transformátor a střídavou stranu řízeného tyristorového měniče), za současného použití přepěťové ochrany CROWBAR na stejnosměrné straně měniče. Na Obr. 1.14 je znázorněno zapojení přepěťové ochrany do budicího obvodu (zde včetně odbuzovače na DC straně)

Detailnější pohled na přepěťovou ochranu CROWBAR je znázorněn na Obr. 1.14. Jedná se o zapojení dvou antiparalelních tyristorů doplněných o „brakeover“ diody, které se uvedou do propustného stavu vhodnou velikostí přiloženého napětí a tím vyšlou signál na tyristor a dojde k odpojení zdroje buzení a následné odbuzení pomocí nelineárního odporu (v případě ekonomičtějšího řešení je nelineární odpor nahrazen klasickým zhášečím odporem).



Obr. 1.14 Budící obvod s odbuzovačem a přepětovou ochranou CROWBAR [7]

## 1.4 Řídící funkce budícího systému

### 1.4.1 Regulace napětí (voltage regulation)

Jedná se o funkci BS, která má za účel porovnat aktuální napětí synchronního stroje s referenční hodnotou a řídit tak výkon budiče v závislosti na odchylkách. [8]

### 1.4.2 Kompenzace zatěžovacího proudu (load current compensation)

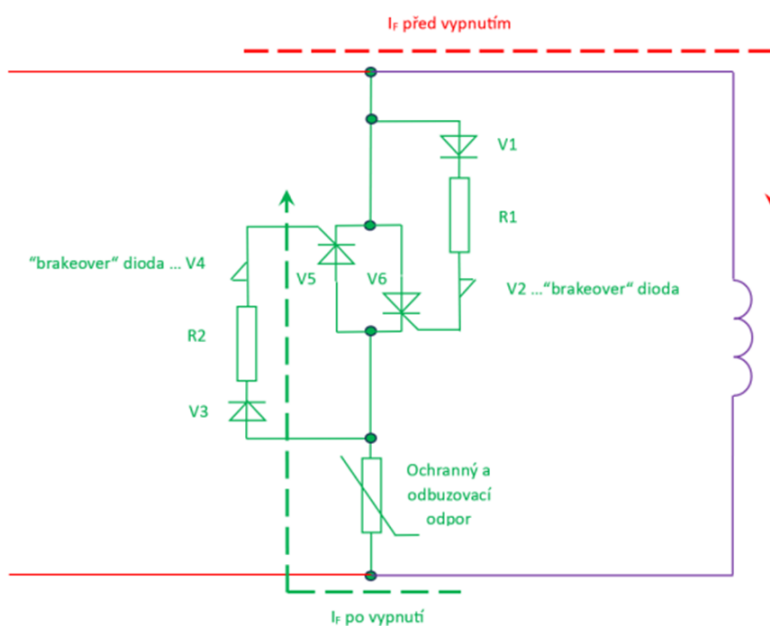
Funkce, která ovlivňuje regulaci napětí pro řízení napětí na místě, kde se neměří napětí synchronního stroje. [8]

### 1.4.3 Omezení přebuzení (overexcitation limitation)

Funkce, jejímž účelem je omezit budící proud synchronního stroje a budícího systému na dovolené hodnoty. [8] Jedná se o omezení maximálního dovoleného budícího proudu a omezení satorového proudu v přebuzeném stavu.

### 1.4.4 Omezení podbuzení (underexcitation limitation)

Účelem omezovače podbuzení je omezit budící proud tak, aby nedocházelo k porušení meze stability nebo tepelné kapacity synchronního stroje v důsledku ohřevu čel vinutí statoru. [8]



Obr. 1.15 Vnitřní zapojení stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR [7]

#### 1.4.5 Omezení poměru napětí/kmitočet (V/Hz limitation)

Účelem této funkce je docílit poklesu regulovaného napětí synchronního stroje úměrně k omezení kmitočtu, pokud kmitočet poklesne pod předem stanovenou hodnotu. [8]

#### 1.4.6 Stabilizace výkonového systému (power system stabilization)

Účelem této funkce je ovlivnit výkon budiče takovým způsobem, aby byly utlumeny oscilace výkonu synchronního stroje. Jednotlivé parametry stabilizace výkonového systému jsou popsány v standardu IEEE Std. 421.2-2014. Specifikace by měla obsahovat popis aplikace včetně pásma oscilačních frekvencí. Měl by být uveden zdroj vstupního signálu PSS, tj. přístrojové transformátory proudu a napětí, otáčkoměr atd. Specifikace by měla zároveň dbát na ohledu na možné nežádoucí interakce PSS s přirozenými mechanickými torzními oscilacemi hřídele stroje. Aby se předešlo takové interakci, je nutné odfiltrovat torzní signály, doplnit regulační systém o ochranná zařízení a vypnout PSS při poruše regulačních obvodů. [8]

### 1.5 Vybavení budících systému

Tato část kapitoly se věnuje základnímu vybavení budících systému synchronních strojů dle normy IEEE Std. 421.4-2014. Zahrnuje popsání nejčastějších parametrů používaných pro budící systémy. Většina nastavitelných parametrů, které ovlivňují výkon systému jsou zahrnuty v ovládacích obvodech budícího systému, tj. detektor chyb automatického napěťového regulátoru (AVR), kompenzátory, stabilizátory a limity budícího systému.

Je důležité rozlišovat mezi pomocnými řídicími funkcemi, které jsou součástí automatického řízení budicího systému, které jsou zmíněny v kapitole 1.4 a řídicími obvody v rozhraní mezi budícím systémem a provozem elektrárny. Je třeba poznamenat, že specifikace samotných parametrů regulátoru (stropní napětí, zesílení a časové konstanty budicího systému, parametry synchronního stroje atd.) nestačí k dosažení požadovaného výkonu. Impedance napájecí soustavy výrazně ovlivňuje výkonnost systému regulace buzení. Primární funkcí regulátoru synchronního stroje je řízení svorkového napětí. Regulátor může ovlivňovat stabilitu synchronního stroje při lokálních nebo mezioblastních frekvencích v závislosti na zesílení, které zahrnuje AVR, budič, synchronní stroj a energetickou soustavu. V moderních budících systémech jsou často používáno PSS, které zajišťuje potřebnou stabilitu na malých signálech, a tedy i potřebné utlumení kmitů. V podkapitolách zmíním nejčastěji používané vybavení budících systémů. [9]

### 1.5.1 Ruční řízení

U stejnosměrných rotačních budičů lze ruční ovládání realizovat pomocí reostatu. V současné době se u většiny ostatních typů budičů používají některé stejnosměrné regulátory jako nedílná součást digitálního budicího systému, který zajišťuje regulaci budicího napětí nebo proudu. Automatický přechod na ruční řízení budicího napětí a/nebo proudu může být důsledkem poruchy řídicí součásti, nebo detekce funkční poruchy nebo přebuzení (přepětí, nadproud). Ruční převod zadaný obsluhou je užitečný pro přímé řízení budicího napětí nebo proudu pro zkušební účely nebo online údržbu regulátoru. Automatický napěťový regulátor je vyžadován pro stabilní provoz a převod na ruční řízení není v některých případech povolen s výjimkou ztráty snímání napětí. Selhání AVR může mít za následek vypnutí jednotky nebo přechod na záložní AVR, pokud je k dispozici. [9]

### 1.5.2 Automatické řízení

Pro specifikaci automatické řízení, je nutné definovat rozhraní mezi uživatelem a výrobcem. Typickým požadavkem na výrobce je zajistit specifikovanou změnu svorkového napětí nebo jalového výkonu pro každé sepnutí kontaktu. Doba trvání sepnutí každého kontaktu by měla být rovněž specifikována. Má-li být žádanou hodnotou budicího systému analogová nebo digitální veličina, a nikoliv signál pro spínání kontaktů více/méně, pak by měla být definována změna svorkového napětí nebo jalového výkonu pro definovanou změnu žádané hodnoty. V takovém případě je nutný spolehlivý signál žádané hodnoty dodávaný uživatelem. Měla by se vzít v úvahu potřeba řízení a monitorování provozu budicího systému ze vzdáleného místa. I v plně automatizovaných systémech může být rozumné mít nějakou formu dálkového ručního ovládání. Možnost ručního ovládání u digitálních systémů je třeba zajistit ověření provozuschopnosti komunikačního spojení. Doporučuje se také zajistit místní obsluhu a monitorování v místě instalace. Rozhraní (HMI) s využitím standardních průmyslových technologií pro uvádění do provozu, buď Modbus, Ethernet, Profibus/Profinet včetně světelné signalizace, diskretních ovládacích prvků a měření, nebo alternativně lidskou obsluhu v rozvaděči budicího systému. HMI může poskytovat prostředky pro zobrazení diagnostiky stavu budicího zařízení včetně alarmů, teplot rozvaděče a výkonových modulů usměrňovačů, stavu přenosu, stavu vedení výkonového usměrňovacího můstku atd. [9]

### 1.5.3 Jednotka automatického najetí a odstavení

Pokud je specifikováno automatické najetí a/nebo odstavení, měla by být specifikována rozhraní mezi zařízením dodaným uživatelem a zařízením dodaným výrobcem. Typická specifikace by vyžadovala, aby výrobce dodal veškeré vybavení potřebné k uvedení budicího systému do provozu (nebo k jeho odstavení z provozu) při sepnutí kontaktu. Mělo by být řešeno automatické nastavení všech nastavitelných regulačních bodů. Obecně je nutné, aby docházelo k přednastavení ovládacích prvků buď před automatickým spuštěním, nebo po automatickém vypnutí. Velmi užitečné mohou být místní metody ovládání a ustanovení pro dálkové ovládání. [9]

### 1.5.4 Jednotka automatického srovnání napětí

Běžně se používá možnost automatického srovnání napětí ve spojení s automatickým synchronizačním zařízením pro přizpůsobení napětí. Je třeba zvážit požadavky na rozhraní mezi automatickou synchronizační soupravou a budicím zařízením. [9]

### 1.5.5 Přizpůsobení žádané hodnoty

Provozování budicího zařízení za účelem zvýšení nebo snížení napětí nebo jalového výkonu lze provádět několika způsoby. Nejčastěji používanou metodou u nových instalací je dnes použití digitálních regulátorů žádané hodnoty. V některých aplikacích mohou být vyžadovány analogové nebo digitální signály z automatického dohledového zařízení. Mělo by být specifikováno zajištění tohoto rozhraní mezi zařízením dodávaným uživatelem a zařízením dodávaným výrobcem. Je důležité specifikovat rozsah činnosti žádané hodnoty z hlediska svorkového napětí. V případě provozu s kontaktem více/méně to může mít podobu definované doby sepnutí nebo počtu sepnutí pro zajištění definované změny svorkového napětí nebo jalového výkonu. Potřeba dálkového ovládání žádané hodnoty by měla být zvážena spolu s potřebou místního ovládání v místě budicího zařízení. U automatizovaných systémů je třeba zvážit potřebu ručního i automatického ovládání. [9]

### 1.5.6 Sledování žádané hodnoty (vlečná regulace)

V mnoha aplikacích je důležité zvážit potřebu zařízení pro sledování žádané hodnoty. Toto zařízení způsobuje, že ruční nebo záložní žádaná hodnota sleduje požadavky na buzení pro pracovní bod synchronního stroje, aby v případě výpadku automatické nebo primární regulace měl budicí systém k dispozici vhodnou ruční nebo záložní žádanou hodnotu. [9]

### 1.5.7 Rozhraní řídicích obvodů s obvody elektrárny

Rozhraní mezi řídicími obvody buzení a obvody elektrárny může mít různá napětí a proudy. Pro usnadnění návrhu je nutná koordinace mezi uživatelem a výrobcem. U řídicích obvodů se používá široká škála stejnosměrných napětí, včetně standardních bateriových obvodů 48 V, 125 V nebo 250 V DC. Je třeba specifikovat jmenovitý rozsah stejnosměrného napětí. Typický rozsah je 80 % až 115 % vzhledem k zatížení a podmínkám

nabití baterie. V řídicích obvodech se také používá široký rozsah střídavých napětí včetně standardních napětí 120 V, 240 V, 480 V nebo 600 V. Používají se jednofázová i třífázová napětí. Opět je třeba specifikovat rozsah, přičemž typický rozsah je 90 % až 110 %.

Některá provedení umožňují krátkodobé přerušení napájení řídicího systému, zatímco jiné vyžadují nepřetržité napájení. Historicky se takové nepředvídatelné situace řešily specifikací mechanicky blokováných relé. Nedávná praxe používání polovodičového spínání vyžaduje, aby uživatelé specifikovali maximální dobu trvání přerušení napájení. Pro některé instalace, kde může jít o zařízení se „startem ze tmy“, může být nezbytné první nabuzení (field flashing). Pro první nabuzení může být použito střídavé nebo stejnosměrné napětí, které může být stejné jako napětí pro řídicí obvody nebo může pocházet ze samostatného zdroje. Měl by být specifikován proud a maximální doba trvání tohoto proudu. Specifikace by měla rovněž odrazet odstraňování poruch a údržbu technického personálu uživatelského zařízení.[9]

Je třeba zvážit typ a počet přístrojových transformátorů potřebných k zajištění střídavých napěťových a proudových signálů pro budicí systém. Rovněž by se měl zvážit typ a počet snímačů potřebných ke sledování parametrů budicího systému. Pokud jsou v napájecím obvodu řídicího systému požadovány jističe, měly by být specifikovány včetně případného umístění.[9]

U nových moderních budících systémů může být nutné zvážit strategie rozhraní, které zahrnují:[9]

- Nové budicí systémy mohou potřebovat signál pro otáčky hřídele, který v původním systému neexistují, což vyžaduje přidání nového snímače otáček hřídele.
- Některé hydrogenerátory mohou pracovat buď v režimu generátoru, kompenzátoru, nebo čerpadla. Zde může být vyžadována dodatečná signalizace, která indikuje, který režim byl zvolen, aby byla zajištěna správná činnost omezovačů buzení, PSS atd.
- Do budicího systému mohou být vyžadovány další přístrojové transformátory proudu pro monitorování a měření.
- Instalace vysokoproudých stejnosměrných vodičů z kroužků sběrače generátoru vyžaduje, aby projektant specifikace popsal způsob a metodu připojení vodičů.
- Měl by být uveden popis připojení transformátoru k budicí soustavě (umístění na pravé nebo levé straně) a k výstupním vodičům generátoru.
- Některé budicí systémy mohou vyžadovat vstupy nebo výstupy, které pro úspěšné ovládací rozhraní vyžadují přidání pomocných relé do stávajících řídicích obvodů.

### **1.5.8 Záznam dat (data logger)**

V mnoha dnešních budících systémech je k dispozici záznam dat, který zaznamenává různé veličiny měřené v rámci budicího systému. Data jsou uložena v záznamech, které lze vyhledat a zkontrolovat. Představují provozní

údaje v době události, např. poruchy systému. Provozní údaje jsou spouštěny tak, aby se informace uložily do záznamu a časového razítka, které s v případě potřeby načtou do softwaru pro zobrazení. Lze zaznamenávat posloupnost událostí, aby se definovala konkrétní činnost během provozu budicího systému. [9]

### 1.5.9 Komunikační rozhraní pro digitální budicí systémy

Digitální budicí systémy jsou často vybaveny komunikačním rozhraním, které uživateli umožňuje ovládat, obsluhovat a přijímat informace. Tyto informace nebo úkoly mohou mimo jiné zahrnovat kalibraci a nastavení buzení, kontrolu parametrů stroje, monitorování, měření atd. Přenos informací mezi budicím systémem a externím médiem je zpracováván různými jedinečnými nebo společnými protokoly prostřednictvím komunikačního portu sériové linky, např. RS485 nebo RS232 nebo portu USB. Pro komunikaci je k dispozici několik různých protokolů, například Modbus, Ethernet nebo Profibus/Profinet. Výběr protokolu je založen na řadě různých faktorů, včetně preferencí, interních standardů a schopnosti komunikovat s řízením závodu, které je v souladu s bezpečnostními směrnicemi závodu. K přenosu dat do počítače nebo na vnější komunikační linku lze použít modemy. Specifikace by měla požadovat komunikační software a podpůrnou dokumentaci pro zamýšlené provozní zařízení. [9]

### 1.5.10 Řídící a ochranný zdroj napájení

Uživatel by měl specifikovat, zda jsou požadovány redundantní zdroje napájení pro řídicí nebo ochranné funkce (včetně požadavků na zdroj). Doporučuje se, aby alespoň jeden zdroj byl nepřerušitelný, například staniční baterie. Běžnou praxí je druhý zdroj napájený ze svorek generátoru. [9]

### 1.5.11 Ochrany

Moderní budicí systémy obvykle poskytují vyšší stupeň ochrany než starší budicí systémy. Je potřeba zvážit oznamování abnormálních stavů, tak aby byla obsluha informována o blížícím se ochranném zásahu na zařízení. [9]

Ochrany se obecně dělí do dvou kategorií: [9]

- Ochrana budicího systému
- Ochrana zařízení vně budicího systému

## 1.6 Ostatní sounáležitosti pro návrh budicích systémů

### 1.6.1 Pracovní prostředí

Prostředí, ve kterém bude budicí systém umístěn, by mělo být jasně definováno a měly by být stanoveny příslušné požadavky. Mělo by být specifikováno prostředí, které vystavuje budicí systém elektrickým přechodným jevům, rádiovému rušení, extrémním teplotám, vlhkosti, nadmořské výšce, vibracím, korozivnímu

prostředí nebo jakýmkoli neobvyklým podmínkám. Mělo by se rovněž zvážit rušení generované budicím systémem. Dále by měly být uvedeny všechny zvláštní požadavky, jako je tropizace (zapouzdražení, ochrana před vlhkostí, hlodavci a hmyzem) nebo seismické požadavky. Výrobci by měly upřesnit podrobné informace o chlazení, včetně primárního chladicího média, maximální a minimální teploty a tlaku chladicího média, materiálu chladicí trubice, katodové ochrany a všech nezbytných rozhraní zařízení. [9]

### **1.6.2 Krytí rozvaděče**

Po určení konečného umístění v závodě by měl uživatel určit vhodný rozvaděč. Jeho vhodnost závisí na několika faktorech, příkladem může být umístění rozvaděče u zdi s omezeným přístupem. Měly by být uvedeny konkrétní údaje týkající se snadného přístupu k jednotlivým položkám zařízení v krytu a jejich vyjmutí. Pokud má rozvaděč přístup ze všech stran, může být žádoucí specifikovat dveře na všech stranách pro snadnou údržbu. V závislosti na teplotních omezeních by měly být zahrnuty vhodné chladicí otvory nebo mřížky pro nezbytné chlazení či větrání, případně obojí, zejména pokud jsou použity chladicí ventilátory. [9]



## 2 Návrh statického budícího systému pro synchronního stroje

### 2.1 Parametry synchronního stroje

V kapitole 2 se věnuji návrhu a dimenzování statického budícího systému synchronního generátoru o výkonu 206,824 MVA. V Tab. 2.1 jsou uvedeny základní parametry stroje potřebné pro návrh z katalogu generátoru. Dále jsou stanoveny požadavky na budící systém v technické specifikaci od uživatele Doosan Škoda Power, s.r.o.

Tab. 2.1 Parametry synchronního stroje [10]

Jmenovitý výkon	$S_N$	MVA	206,82
Jmenovité napětí	$U_N$	kV	15,75
Jmenovitý proud	$I_N$	kA	7,582
Jmenovitý účinník	$\cos \phi$	-	0,85
Jmenovitá frekvence	$f_N$	Hz	50
Jmenovité otáčky	$n_N$	ot./min	3000
Budící proud naprázdno	$I_{f0}$	A	118
Budící napětí naprázdno	$U_{f0}$	A	433
Jmenovitý budící proud	$I_{fN}$	A	1199
Jmenovité budící napětí	$U_{fN}$	A	328
Odpor rotorového vinutí při 20 °C	$R_{f20^\circ C}$	$m\Omega$	203,4
Odpor rotorového vinutí při provozní teplotě	$R_{fN}$	$m\Omega$	273,48
Podélná rázová reaktance	$x''_d$	%	14,8
Podélná přechodná reaktance	$x'_d$	%	26,4
Podélná reaktance	$x_d$	%	190

### 2.2 Výpočet parametrů budiče

Budící systém musí být schopen trvale dodávat proud o 10 % více než je jmenovitá hodnota budícího proudu. Jmenovitou hodnotu proudu budiče získáme z rovnice (2.1).

$$I_{eN} = 1.1 \cdot I_{fN} \quad (2.1)$$

$$I_{eN} = 1.1 \cdot 1199 = 1318.9 \text{ (A)} \quad (2.2)$$

Obdobným způsobem vypočítáme jmenovité napětí budiče podle rovnice (2.3).

$$U_{eN} = 1.1 \cdot U_{fN} \quad (2.3)$$

$$U_{eN} = 1.1 \cdot 328 = 360.8 \text{ (V)} \quad (2.4)$$

Dalším požadavkem budiče jsou stropní hodnoty budíčího napětí a proudu. Ty mají být dle standardu IEEE minimálně 150 % jmenovité hodnoty budíčího napětí a proudu. Pro nezávislé budíčí systémy je stropní budíčí napětí a proud 1,6násobek jmenovité hodnoty a pro závislé budíčí systémy 2násobek, který musí budíčí systém dodávat po dobu 10 s. Podle rovnice (2.5) a (2.6) určíme stropní hodnoty napětí a proudu pro budíčí systém.

$$U_p = 2 \cdot U_{fN} \quad (2.5)$$

$$I_p = 2 \cdot I_{fN} \quad (2.6)$$

$$U_p = 2 \cdot 328 = 656 \text{ (V)} \quad (2.7)$$

$$I_p = 2 \cdot 1199 = 2398 \text{ (A)} \quad (2.8)$$

### 2.3 Výpočet parametrů budíčího transformátoru

Budíčí transformátor zajišťuje přívod energie do budíčího systému a galvanicky odděluje obvod od vývodu generátoru. Většinou se jedná o suché transformátory chlazené vzduchem s přirozeným nebo nuceným průtokem vzduchu. Jádro transformátoru bývá vyrobeno z křemíkové oceli válcované za studena. Plechy jsou izolované lakem a stažené mechanickou konstrukcí. V tomto případě bude transformátor napájet výkonový tyristorový můstkový usměrňovač, proto je třeba dbát na vliv vyšších harmonických při dimenzování jeho výkonu, jelikož vyšší harmonické zvyšují přídavné ztráty, a tím dochází k většímu ohřívání transformátoru. Při nadměrném zahřátí transformátoru dochází k rychlejšímu stárnutí izolace. Z hlediska výkonu je třeba zvolit správnou velikost transformátoru a zajistit dostatečné chlazení. Napětí sekundárního vinutí, které je přivedeno na vstup tyristorového usměrňovače musí být dimenzováno na stropní budíčí napětí a musí respektovat minimální úhel otevření tyristorového usměrňovače. Dále musí být budíčí transformátor dimenzován na 4–6 % zkratovou impedanci. Napětí primárního vinutí je dáno jmenovitým napětím generátoru, v tomto případě 15,75 kV. Výpočet velikosti efektivní hodnoty sekundárního vinutí je uveden v rovnici (2.9). Pro jednoznačnost definujeme primární stranu jako stranu s vyšším napětím a sekundární stranu jako stranu s nižším napětím.

$$U_{2\min} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot U_p \quad (2.9)$$

Kde konstanta  $\frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}}$  respektuje převod stejnosměrné veličiny na efektivní hodnotu střídavého napětí pro třífázový tyristorový usměrňovač. Zjednodušeným vztahem z rovnice (2.10) získáme minimální napětí sekundárního vinutí.

$$U_{2min} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot 656 = 485.76 \text{ (V)} \quad (2.10)$$

Ovšem tímto vztahem získáme jen velikost efektivní hodnoty napětí, která musí být přivedena na vstup výkonového usměrňovače nikoliv velikost napětí sekundárního vinutí.

Pro výpočet je nutné respektovat tyto proměnné:

- Úbytek indukovaného napětí v transformátoru -  $\Delta U_T$
- Úbytek napětí na kartáčích stroje -  $\Delta U_{dx}$
- Úbytek napětí na vedení mezi transformátorem a měničem -  $\Delta U_V$
- Úbytek napětí na tyristorech -  $\Delta U_V$
- Minimální úhel otevření tyristorů

Pro přesný výpočet napětí transformátoru bychom museli vyjít ze vztahu (2.11) pro výpočet ideálního usměrněného napětí.

$$U_{di0} = \frac{1}{1-k} \cdot (U_p + \Delta U_T + \Delta U_{dx} + \Delta U_b + \Delta U_V) \quad (2.11)$$

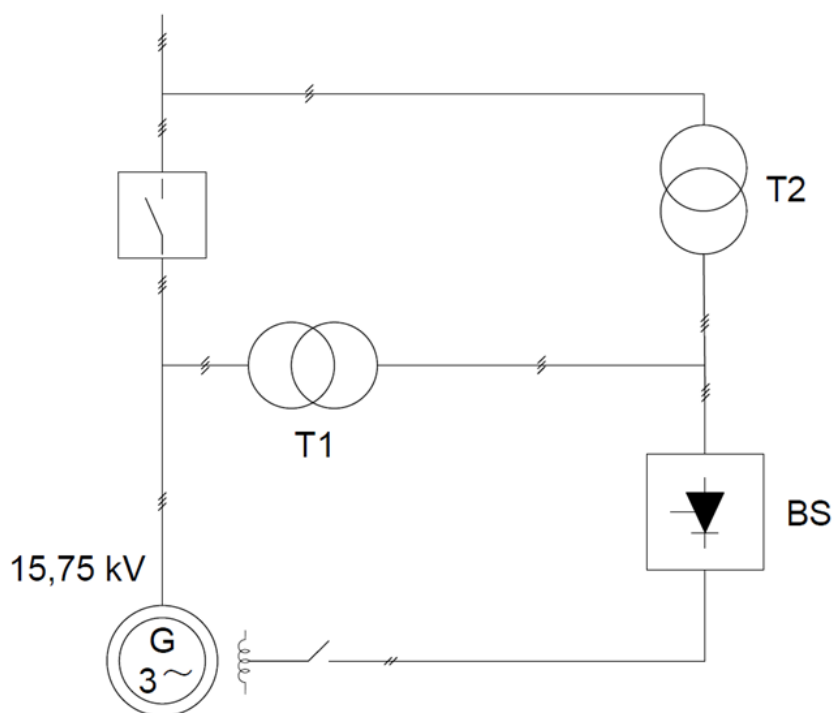
Dosazením rovnice (2.11) do rovnice (2.10)  $U_{di0}$  za  $U_p$  dostaneme finální vztah pro výpočet velikosti sekundárního napětí viz rovnice (2.12).

$$U_2 = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot (1-k) \cdot \cos(\alpha_{min})} \cdot (U_p + \Delta U_T + \Delta U_{dx} + \Delta U_b + \Delta U_V) \quad (2.12)$$

Dle technické specifikace je požadavek od DŠP na jmenovité napětí sekundárního vinutí 690 V. Tato hodnota převyšuje vypočtené minimální sekundární napětí  $U_{2min}$  a výše zmíněné úbytky nezpůsobí pokles napětí tak, aby nebylo zajištěné dostatečně velké napětí na vstupu tyristorové usměrňovače. Proto můžeme stanovit  $U_2 = 690 \text{ V}$ .

Pro topologii budícího systému viz Obr. 2.1 je patrné, že ve schématu se nachází 2 budící transformátory. Transformátor T1 je hlavní budící transformátor, který zajišťuje napájení při normálním provozu a transformátor T2 slouží k přivedení energie při uvádění budícího systému do provozu a provádění primárních zkoušek, kdy je výstup generátoru zkratován a z důvodu rozepnutého vypínače vývodu generátoru by nebylo možné zajistit přívod energie. Transformátor T2 bývá obvykle dimenzován na jmenovité hodnoty budícího proudu a napětí.

V našem případě bylo zjištěno (dodáním elektrického jednopólového schématu vývodu generátoru), že připojení primární strany transformátoru je provedeno až za výkonovým vypínačem viz Obr. 2.2. Z tohoto důvodu stačí dimenzovat pouze hlavní budící transformátor.



Obr. 2.1 Topologie napájení budícího systému s dvojicí transformátorů

Nyní potřebujeme získat velikost proudu na sekundární straně transformátoru. Tu získáme přepočtem pomocí rovnice (2.13).

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{fN} \quad (2.13)$$

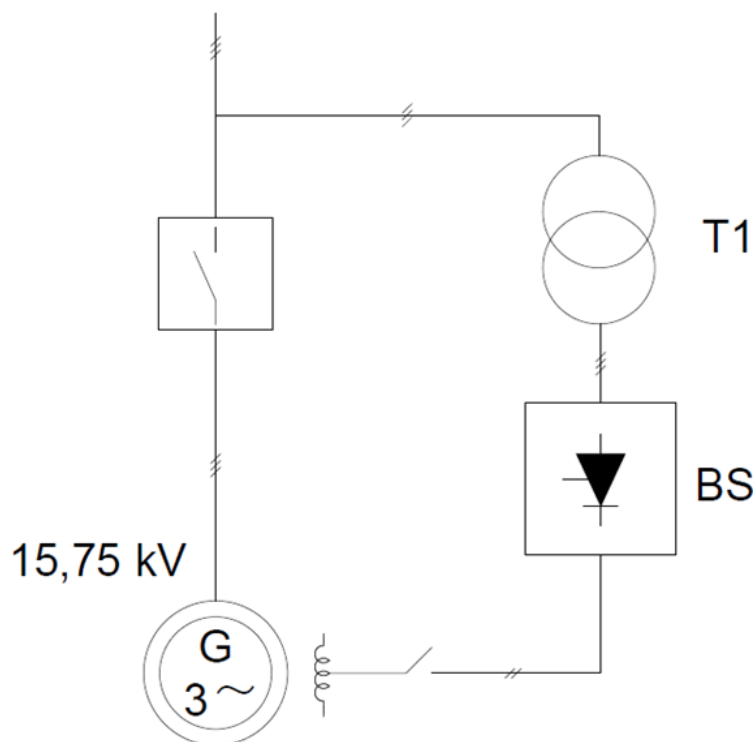
$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 1199 = 978,98 \text{ (A)} \quad (2.14)$$

Kde konstanta  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  respektuje přepočet stejnosměrné hodnoty proudu na výstupu třífázového tyristorového můstkového usměrňovače na efektivní hodnotu sinusového proudu na střídavé straně můstku. Ze znalosti napětí a proudu na sekundární straně transformátoru můžeme stanovit zdánlivý výkon transformátoru pomocí rovnice (15).

$$S_{NT} = 1,15 \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \quad (2.15)$$

$$S_{NT} = 1,15 \cdot \sqrt{3} \cdot 690 \cdot 978,98 = 1345,49 \text{ (kVA)} \quad (2.16)$$

Kde konstanta 1,15 zohledňuje vliv vyšších harmonických. Zároveň při výběru transformátoru je nutné respektovat jeho přetížitelnost vzhledem k oteplovací charakteristice transformátoru při požadavku stropního



Obr. 2.2 Topologie napájení budíčího systému s jedním transformátorem

budíčího proudu 200 %  $I_{FN}$ , respektive  $I_P$ . V našem případě se jedná o přetížení po dobu 10 s.

Z jmenovité řady výkonů transformátorů je nejbližší výkon  $S_{NT}$  1,35 MVA. V technické specifikaci byl zároveň se sekundárním napětím uveden výkon transformátoru 1,36 MVA, který by bylo možné navýšit v případě potřeby. Takto dimenzovaný transformátor bude dostatečný pro zajištění napájení budíčího systému s převodem 15,75 kV/690 V. Ze zvoleného výkonu transformátoru lze nyní vypočítat proudy primárním a sekundárním vinutím pomocí rovnic (2.17) a (2.18).

$$I_{1N} = \frac{S_{NT}}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (2.17)$$

$$I_{2N} = \frac{S_{NT}}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad (2.18)$$

$$I_{1N} = \frac{1,36 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15\,750} = 49,85 \text{ (A)} \quad (2.19)$$

$$I_{2N} = \frac{1,36 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} = 1137,97 \text{ (A)} \quad (2.20)$$

## 2.4 Dimenzování přívodních vodičů

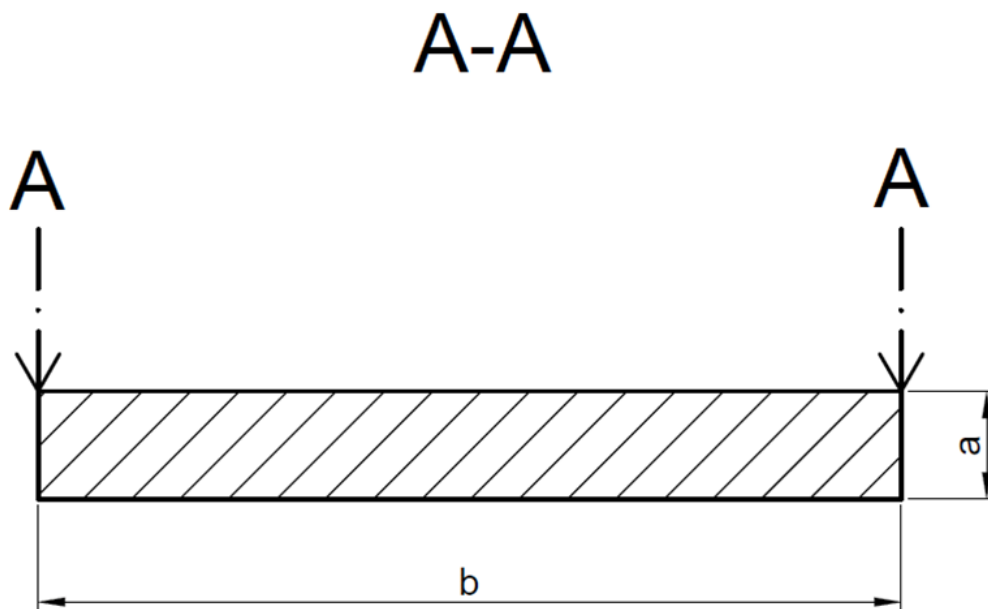
Pro zajištění dodávky napájení z vývodu generátoru až ke svorkám budíčího vinutí jsou určeny přívodní vodiče z technické specifikace. Pro přívod k primárnímu vinutí budíčího transformátoru z vývodu generátoru jsou určeny zapouzdřené vodiče o ampacitě 10 kA se zkratovou odolností  $I_{th}$  129 kA/1 s a maximálním dynamickým zkratovým proudem  $I_{dyn}$  374 kA. Pro přívod ze sekundárního vinutí budíčího transformátoru na vstup do rozvaděče je určen kabel XLPE-Cu 3x1x240 mm<sup>2</sup> o délce 15 m.

Uvnitř rozvaděče bude silový rozvod zajištěn pomocí měděných pasů, které je potřeba nadimenzovat a určit jejich rozměry a průřez. Pro dimenzování měděných pasů na stejnosměrné straně měniče je třeba uvažovat stropní budící proud, v našem případě  $I_P$  2 398 A. Pro zjištění minimálního průřezu musíme zvolit proudovou hustotu  $J$ , kterou volíme v rozsahu 3÷5 A/mm<sup>2</sup>. Pro náš případ budeme uvažovat 3 A/mm<sup>2</sup>. Pomocí rovnice (2.21) získáme minimální průřez měděných pasů.

$$S_{Cu.min} = \frac{I_P}{J} \quad (2.21)$$

$$S_{Cu.min} = \frac{2398}{3} = 799.33 \text{ (A/mm}^2\text{)} \quad (2.22)$$

Průřez měděných pasů nyní zvolíme větší, než nám vyšel minimální potřebný průřez  $S_{Cu.min}$ . Průřez vodičů  $S_{Cu}$  volíme 800 mm<sup>2</sup>. Nyní zvolíme tloušťku  $a$  viz Obr. 2.3 a pomocí známého průřezu  $a$  dopočteme rozměr  $b$  pomocí vztahu (2.23) ze známého průřezu  $S_{Cu}$ . Tloušťku  $a$  volíme 10 mm.

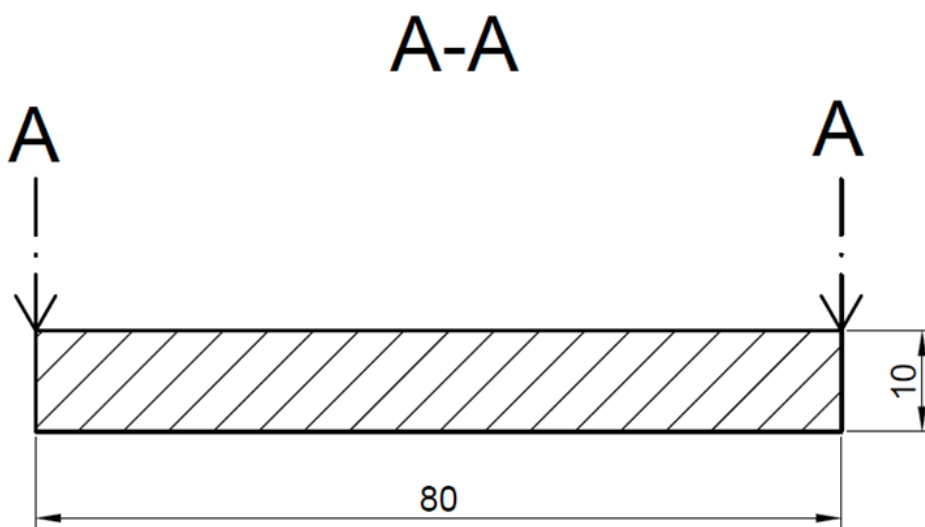


Obr. 2.3 Pohled v řezu na měděný vodič

$$b = \frac{S_{Cu}}{a} \quad (2.23)$$

$$b = \frac{800}{10} = 80 \text{ mm} \quad (2.24)$$

Takto dimenzovaný vodič může být použit i na střídavé straně výkonové měniče a jeho rozměry jsou 80x10 mm viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Rozměry měděných pasů v rozvaděči budícího systému

## 2.5 Návrh výkonového měniče

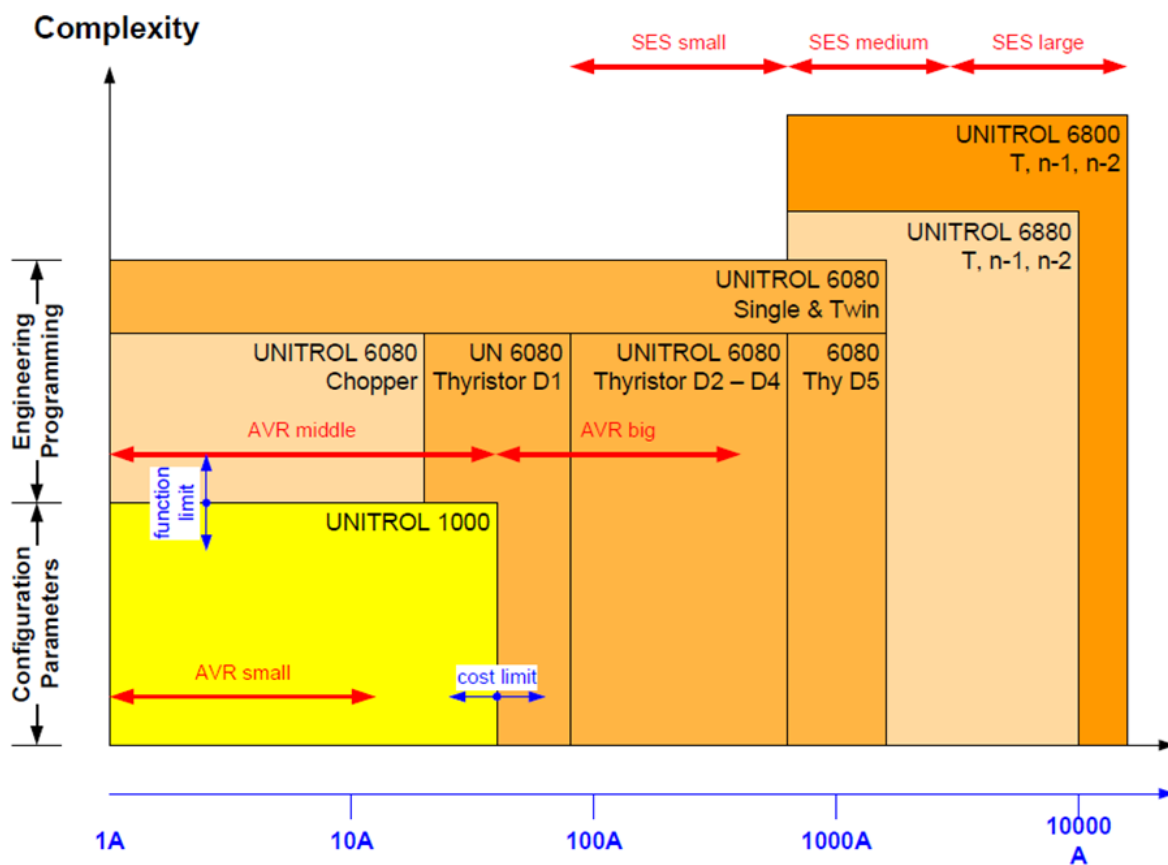
Společnost Invelt-elektro s.r.o. je dlouholetým partnerem firmy ABB Industry AG s.r.o., z tohoto důvodu pro dimenzování budícího systému využívá jejich výkonové měniče z řady ABB UNITROL, pro statické budící soupravy se jedná o řadu ABB UNITROL 6000.

Pro návrh třífázového tyristorového usměrňovače v můstkovém provedení víme z předešlého výpočtu viz rovnice (2.2) a (2.4), že jmenovitý proud budiče musí být o 10 % větší, než je jmenovitý budící proud, dalším kritériem je minimální blokovací napětí tyristorů 2,75násobkem stropního budícího napětí, které určíme pomocí vztahu (2.25)

$$U_{RRM} = 2.75 \cdot U_P \quad (2.25)$$

$$U_{RRM} = 2.75 \cdot 656 = 1804 \text{ (V)} \quad (2.26)$$

Dále je nutné zohlednit maximální vstupní napětí, které je v našem případě 690 V. Výkonové měniče UNITROL 6080 jsou rozděleny do jmenovité řady s označením D1-D5 znázorněno na Obr. 2.5



Obr. 2.5 Rozdělení výkonové řady UNITROL 6000, (SES-statický budící systém)

Dle katalogu viz Obr. 2.6 vybereme vhodný měnič pro naši konfiguraci. Pro budící proud 1 199 A vyhovuje model výkonového měniče UNS7905b/cV7200, který je určený pro synchronní stroje s budícím jmenovitým proudem do 1 660 A. Varianta s označením „b“ je s jednofázovým ventilátorem a varianta „c“ je s třífázovým ventilátorem. Pro naši aplikaci zvolíme variantu „b“ s jednofázovým ventilátorem. Dále je v 5. sloupci tabulky viz Obr. 2.6 uvedeno maximální vstupní napětí pro třífázové napájení, které je pro tento typ 718 V. V našem případě bude napájecí napětí 690 V a tomuto kritériu vyhovuje.

Další tabulka z katalogu znázorněna viz Obr. 2.7 specifikuje maximální blokovací napětí tyristorů. V rovnici (2.26) jsem vypočítal hodnotu 1 804 V, která je menší než uvedená hodnota 2 800 V. Tento měnič splňuje všechny požadavky pro výkonový měnič a může být použit v této konfiguraci budícího systému.



<i>Converter module</i>	<i>IP</i>	<i>Nominal field current <math>I_{FN}</math> (A)</i>	<i>Excitation nominal voltage <math>U_{FN}</math> (V)</i>	<i>Secondary voltage of excitation transformer <math>U_{20}</math> (V ac)</i>	<i>Losses per converter (Forward+Fuse+Busbar+Snubber+Switch+Fan) (W)</i>
UNS7905b/cV5120 UNS79x5aV5120	31	<b>832</b>	353	460	3587 (2301+255+109+110+263+550)
	43	<b>832</b>			3587 (2301+255+109+110+263+550)
	54	<b>818</b>			3526 (2250+245+109+110+263+550)
UNS7905b/cV5150 UNS79x5aV5150	31	<b>1364</b>			5356 (3360+348+293+242+262+550)
	43	<b>1364</b>			5356 (3360+348+293+242+262+550)
	54	<b>1320</b>			5170 (3519+322+274+242+262+550)
UNS7905b/cV5180 UNS79x5aV5180	31	<b>1500</b>			5563 (3668+277+254+252+263+550)
	43	<b>1500</b>			5563 (3668+277+254+252+263+550)
	54	<b>1452</b>			5184 (3532+256+332+252+263+550)
UNS7905b/cV5200 UNS79x5aV5200	31	<b>1818 *)</b>			6895 (4584+439+520+540+263+550)
	43	<b>1818 *)</b>			6895 (4584+439+520+540+263+550)
	54	<b>1818 *)</b>			6895 (4584+439+520+540+263+550)
UNS7905b/cV7090 UNS79x5aV7090	31	<b>670</b>	474	616	4015 (2387+269+71+224+515+550)
	43	<b>670</b>			4015 (2387+269+71+224+515+550)
	54	<b>656</b>			3932 (2320+256+68+224+515+550)
UNS7905b/cV7150 UNS79x5aV7150	31	<b>1180</b>			5985 (3376+334+219+397+1109+550)
	43	<b>1180</b>			5985 (3376+334+219+397+1109+550)
	54	<b>1160</b>			5869 (3298+321+212+396+1093+550)
UNS7905b/cV7200 UNS79x5aV7200	31	<b>1660</b>	553	718	7100 (4171+455+434+497+992+550)
	43	<b>1660</b>			7100 (4171+455+434+497+992+550)
	54	<b>1625</b>			6937 (4063+433+416+497+979+550)

Obr. 2.6 Jmenovitá řada výkonových měničů UNITROL  
6000 D5 [11]

Converter Module	Thyristor $V_{RRM}$ [V]	Max. 3 phase input voltage @ safety factor 2.75 [V]
UNS 7905 b/c V5120	1800	460
UNS 7905 b/c V5150		
UNS 7905 b/c V5180		
UNS 7905 b/c V5200		
UNS 7905 b/c V7090	2400	616
UNS 7905 b/c V7150	2800	718
UNS 7905 b/c V7200		
UNS 7915 b/c V5120	1800	460
UNS 7915 b/c V5150		
UNS 7915 b/c V5180		
UNS 7915 b/c V5200		
UNS 7915 b/c V7090	2800	718
UNS 7915 b/c V7150		
UNS 7915 b/c V7200		
UNS 7915 b/c V9150	4200	1000

Obr. 2.7 Maximální vstupní a blokovací napětí tyristorů měniče D5 [11]

### 2.5.1 Spolehlivost výkonové měniče

Výkonový měnič je opatřen externí velmi rychlou pojistkou, která chrání zařízení v případě nadproudu nebo zkratu budíčího systému. Když dojde k vybavení pojistky je vyslán povel k automatickému vypnutí buzení. Pro případ zálohy měniče se do budíčího systému umísťuje redundantní výkonový měnič. Výkonové měniče pracují ve funkci hlavní + záložní měnič.

### 2.5.2 Chlazení výkonového měniče

Tyristorové měniče jsou opatřeny ventilátory pro zajištění nuceného chlazení uvnitř rozvaděče, rozvaděč proto musí být opatřen výřezy a mřížkou s prachovým filtrem pro přívod a odvod vzduchu z rozvaděče. V naší konfiguraci se jedná o jednofázové ventilátory se střídavým motorem. Parametry ventilátoru jsou uvedeny níže viz Tab. 2.2.

Tab. 2.2 Jmenovité parametry ventilátorů [11]

Jmenovité napětí	230 V $\pm 10$ %, 50/60 Hz
Jmenovitý výkon pro 50/60 Hz	550/790 W
Jmenovitý/zapínací proud pro 50 Hz	2,5/3,75 A
Jmenovitý/zapínací proud pro 60 Hz	3,4/4,5 A
Průtok vzduchu	1 100 m <sup>3</sup> /hod
Životnost	40 000 h
Maximální okolní teplota	55 °C
Jmenovité otáčky pro 50/60 Hz	2500/2400 ot./min

Pro zajištění napájení ventilátoru je nutné dimenzovat transformátor. Zároveň transformátor bude napájet jednotku ICU (input coupling unit) pro zajištění stejnosměrného napětí pro ovládací a pomocné obvody. Dle následujících výpočtů určím parametry tohoto transformátoru. Z jmenovitých parametrů dopočítám zdánlivý výkon ventilátoru pomocí rovnice (2.27).



Obr. 2.8 UNITROL 6000 D5 [11]

$$S_{Nvent} = I_{Nvent} \cdot U_{Nvent} \quad (2.27)$$

$$S_{Nvent} = 2.5 \cdot 230 = 575 \text{ (VA)} \quad (2.28)$$

Z rovnice (2.28) jsem získal zdánlivý výkon ventilátoru, který nyní použiji pro stanovení výkonu transformátoru pomocí rovnice (2.29).

$$S_{Tvent} = 2 \cdot S_{ventN} \quad (2.29)$$

$$S_{Tvent} = 2 \cdot 575 = 1150 \text{ (VA)} \quad (2.30)$$

Kde konstanta 2 respektuje dva ventilátory, protože se v budícím systému vyskytují dva výkonové měniče s dvěma ventilátory je nutné dimenzovat transformátor na výkon všech ventilátorů. Jelikož je stav chodu obou ventilátorů nepravděpodobný (z důvodu funkce hlavní+záložní) můžeme výkonovou rezervu ponechat pro ovládací a pomocné obvody. Z těchto důvodů lze zvolit transformátor z jmenovité řady o výkonu 1 300 VA. Pro vyšší spolehlivost můžeme do budícího systému umístit dva transformátory, jeden bude napájen z hlavního budícího transformátoru 690 V a druhý bude mít zajištěno napájení z nezávislého zdroje třífázového napětí

400 V. Nutnou podmínkou pro funkci budíčího systému je dodržení maximální provozní teploty jednotlivých komponent, proto je třeba dbát na velkou spolehlivost chlazení výkonového měniče, jehož dovolené provozní teploty jsou uvedeny v datasheetu měniče D5. Jak jsem zmínil výše, transformátor zároveň napájí jednotku ICU, která má vstupní střídavé napětí 170 V. Transformátory tedy musí být opatřeny odbočkou na 170 V.

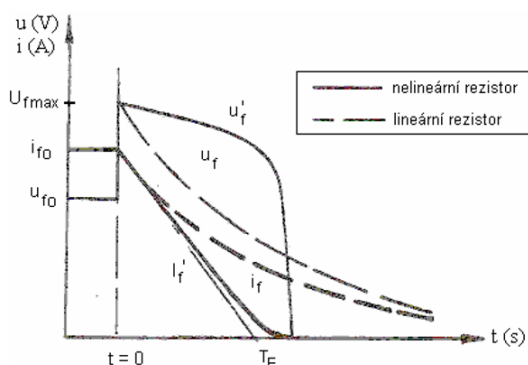
Budící systém bude opatřen těmito transformátory:

- 1300 VA, 690//230/170 V, 50 Hz
- 1300 VA, 400//230/170 V, 50 Hz

## 2.6 Návrh odbuzovače s odbuzovacím rezistorem

V případě požadavku na odbuzení stroje máme dvě možnosti odbuzení, provozní a havarijní. V kapitole 1.3 jsem uvedl různé druhy odbuzení. Pro detailnější zařazení můžeme zařadit odbuzení s paralelním odporem a odbuzení se zhášecí komorou do procesu havarijního odbuzení. Odbuzení pomocí invertorového chodu měniče je proces provozního odbuzení.

Pro proces havarijního odbuzení musíme navrhnout odbuzovač, v tomto případě se bude jednat o návrh odbuzovače s paralelním rezistorem. Jsou dvě možnosti, buď se jedná o variantu s lineárním nebo nelineárním rezistorem. Nelineární odpor je variantou dražší, ale zaručuje rychlejší proces odbuzení ve srovnání s lineárním odporem, neboť je optimální, aby na odporu bylo co největší a zároveň konstantní napětí. Průběhy porovnání procesu odbuzení s lineárním a nelineárním odporem jsou znázorněny na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Porovnání procesu havarijního odbuzení s lineárním a nelineárním odporem [4]

### 2.6.1 Návrh odbuzovacího rezistoru

Pro návrh odbuzovacího nelineárního odporu je nutné stanovit akumulovanou energii v rotoru při nejhorším provozním stavu, tj. požadavek na stropní budící proud. Ze vztahu (2.8) jsme získali velikost stropního budícího proudu. Nyní můžeme pomocí vztahu (2.31) určit velikost akumulované energie, pro kterou musí být nelineární odpor dimenzován.

$$W_{fK} = \frac{1}{2} \cdot L_f \cdot I_{fK}^2 \quad (2.31)$$

Kde  $L_f$  je indukčnost rotoru, kterou můžeme přepočítat pomocí časové konstanty  $T'_d$  uvedenou v katalogu generátoru pomocí vztahu (2.32) a dosadit do vztahu (2.31).

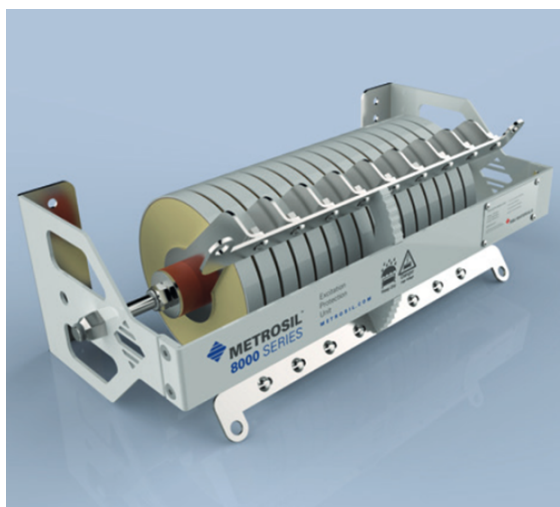
$$L_f = R_f \cdot T'_d \quad (2.32)$$

Po dosazení získáme vztah pro výpočet akumulované energie v rotoru viz rovnice (2.33).

$$W_{fK} = \frac{1}{2} \cdot R_f \cdot T'_d \cdot I_{fK}^2 \quad (2.33)$$

$$W_{fK} = \frac{1}{2} \cdot 273.48 \cdot 10^{-3} \cdot 1.119 \cdot 2398^2 = 879.88 \text{ (kJ)} \quad (2.34)$$

Pomocí známe velikosti energie a respektování ostatních provozních parametrů můžeme z katalogu výrobce Metrosil vybrat vhodnou konfiguraci nelineárního odporu pro budící systém. Pomocí výše zmíněných výpočtů lze vybrat nelineární odpor Metrosil série 8000 z karbidu křemíku (SiC) viz Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Nelineární odpor Metrosil 8000 US16 [12]

Z katalogu výrobce viz Obr. 2.11 můžeme zvolit konkrétní nelineární odpor. Pro naší konfiguraci se bude jednat o zapojení dvou nelineárních odporů paralelně a každý bude obsahovat 16 disků typu 600-A/S1/1198. Tedy v celkové konfiguraci se jedná o rezistory 600-A/US16/P 558,4 kJ. Jmenovitá akumulovaná energie, kterou může odbuzovací rezistor absorbovat je dopočtena pomocí vztahu (2.35).

$$W_{R_{celk}} = n \cdot W_{RN} \quad (2.35)$$

Type Number	Nominal dimensions		Continuous operating conditions			Typical Protection Levels		Rated Power Dissipation	Rated Energy Absorption
	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Rated Voltage		Current at dc voltage (mA ± 50%)	Peak Volts	Peak Amps	W	J
			dc (V)	ac (V)					
600-A/S1/1199	152	25.4	680	600	10	5,000	50	20	69900
600-A/S1/832	152	19.1	550	480	15	4,000	50	20	52400
600-A/S1/1198	152	12.7	400	350	20	2,500	50	20	34900
600-A/S1/699	152	7.6	250	220	30	1,500	50	20	21000
600-A/S1/831	152	3.8	125	110	50	750	50	20	10500

Obr. 2.11 Katalog nelineárních odporů Metrosil [13]

$$W_{\text{Rcelk}} = 2 \cdot 16 \cdot 34900 = 1116.8 \text{ (kJ)} \quad (2.36)$$

### 2.6.2 Návrh odbuzovače

Nyní je potřeba vybrat vhodný odbuzovač, který zajistí rozpojení budícího obvodu. Odbuzovač se může nacházet jak na střídavé straně měniče, tak i na stejnosměrné straně měniče. Pro odbuzovače na stejnosměrné straně jsou kladeny vyšší nároky z důvodu obtížnějšího zhášení elektrického oblouku a zároveň musí být usměrňovač opatřen funkcí blokování pulsů, tj. aby v případě rozpojeného odbuzovače nedocházelo k spínání tyristorů usměrňovače. Pro naši konfiguraci zvolím střídavý odbuzovač z důvodu nižší pořizovací ceny. V případě střídavého odbuzovače je také potřeba navrhnout do obvodu buzení přepěťovou ochranu CROWBAR, princip této ochrany je vysvětlen v kapitole 1.3.4 Jako odbuzovač budu vybírat jistič nízkého napětí ABB SACE Tmax XT, který je vhodný pro použití odbuzovače. Jedná se o odbuzovač s motorovým střadačem, který při sepnutí natáhne pružinu pomocí stejnosměrného motoru, který je napájený z bateriového systému elektrárny. Přivedením signálu lze tak zajistit rychlé rozpojení budícího obvodu. Dále je odbuzovač opatřen podpěťovou cívkou, která zajistí vypnutí budícího obvodu v případě, že by došlo k výpadku dodávky elektřiny a nebylo by možné zajistit povel na vypnutí buzení. Pro naše použití budeme volit odbuzovač z řady Tmax XT7 a konkrétně se jedná o verzi pro jmenovitý proud do 1250 A, typ XT7 1250 třípólový. Jednotlivé jmenovité proudy odbuzovačů XT7D jsou uvedeny v Tab. 2.3

Tab. 2.3 Jmenovité parametry ventilátorů [11]

Varianta	Jmenovitý proud (A)
XT7D 800	800
XT7D 1000	1000
XT7D 1250	1250
XT7D 1600	1600

Na Obr. 2.12 je vidět vybraný odbuzovač, který je opatřen mechanickou páčkou pro 3 režimy zapnuto-blokováno-vypnuto. Režim blokování je používán v případě, že se v obvodu nachází dva odbuzovače, první je v provozu a druhý v režimu blokování a opatřen mechanickým krytem, aby nedošlo k nedovolené manipulaci.



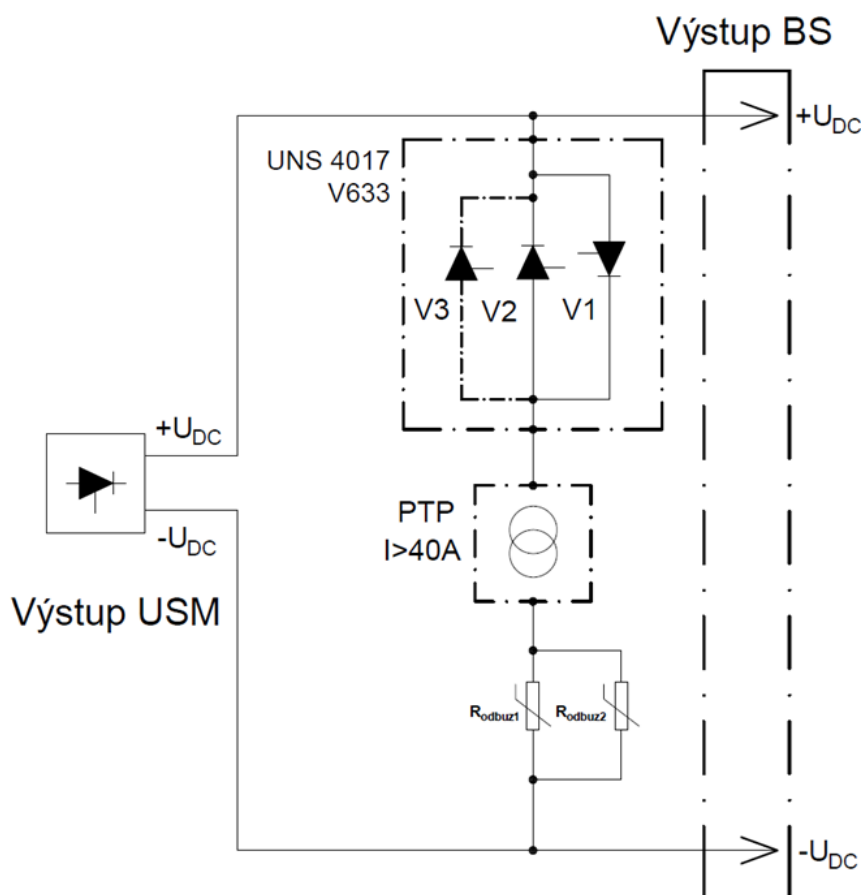
Obr. 2.12 Odbuzovač ABB XT7D [14]

## 2.7 Návrh přepětové ochrany CROWBAR

Princip stejnosměrné přepětové ochrany CROWBAR je zmíněn v kapitole 1.3.4. V obvodu budíčího systému plní dvě základní funkce. Primárně stejnosměrné přepětové ochrany budíčího obvodu a zároveň slouží ke kontrolovanému odbuzení synchronního stroje bez odbuzovacího kontaktu. Při aktivaci ochrany dochází k sepnutí tyristoru, který paralelně k budíčímu vinutí připojí odbuzovací odpor a vyšle povel na vypnutí odbuzovače, aby byla dodržena sekvence procesu odbuzení. Schéma zapojení ochrany CROWBAR jsem znázornil na Obr. 2.13. Ochrana se skládá z tyristorového modulu, jednotky pulsů (firing unit), který obsahuje breakover diodu (BOD) pro detekci přepětí a přístrojového transformátoru proudu pro signalizaci působení ochrany. Pro návrh ochrany je tedy potřebné vhodně dimenzovat tyristorový modul a k němu zvolit jednotku pulsů.

Vhodný tyristorový modul vyberu z podle parametrů výstupního napětí budíčího transformátoru 690 V a jmenovitého budíčího proudu 1 199 A podle katalogu ABB viz Obr. 2.14.

Ze zvolených parametrů je možnost zvolit tyristorový modul typu C1 nebo C2. Typ C1 obsahuje pouze dva tyristory, oproti tomu typ C2 má dva redundantní tyristory pro odbuzení a jeden tyristor pro případ přepětí opačné polarity. Z tohoto důvodu volím tyristorový modul č. 12.



Obr. 2.13 Schéma zapojení stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR

Typ jednotky pulsů je v tom případě nutné zvolit UNS 0017, jelikož u druhé varianty jednotky pulsů UNS0007 lze nastavit maximální napětí BOD 1 400 V (break over dioda, zajišťuje detekci přepětí v budícím obvodu viz kapitola 1.3.4). Napětí BOD musí respektovat námi stanovené maximální blokovací napětí tyristorů a musí být větší než námi spočtená hodnota ze vztahu (2.26) 1 804 V, tedy volím napětí BOD z jmenovité řady 2 000 V.

## 2.8 Návrh obvodu prvního nabuzení

Obvod prvního nabuzení (field flashing) slouží pro případ, kdy není možné skrz budící transformátor zajistit dostatek energie pro správnou činnost budícího systému. Z tohoto důvodu se paralelně k budícímu vinutí připojí záložní nezávislý zdroj, který zajistí první nabuzení do požadované hodnoty svorkového napětí generátoru a následně dojde k přechodu na hlavní budící obvod a k odpojení obvodu prvního nabuzení. Obvod prvního nabuzení může být napájen z bateriového systému elektrárny, popřípadě z nezávislého zdroje střídavého napětí. Výhodou použití střídavého zdroje je galvanické oddělení obvodu a nezatěžování bateriového systému, který



Version		Max. sec. volt. of excitation transformer	Max. rated field current	Thyristor blocking volt. Crowbar	Test voltage Rotor
C2	C1				
No.	No.	$U_{T2}$ [V ac]	[A]	$U_{RRMc}$ [V]	$U_{pr}$ [kV]
6	5	490	860	1600	6
12	11	840	3000	2600	8
18	17	910	5600	2800	8
23	-	910	9800	2800	8
14	13	1190	1950	3600	8
20	19	1400	4200	4200	8
24	-	1750	7200	5200	8
25	-	1400	8000	4200	8

Obr. 2.14 Jmenovité parametry tyristorových modulů CROWBAR [15]

může být využíván pro jiné účely. Proto zde provedu návrh varianty se střídavým zdrojem. Pro návrh obvodu je potřeba navrhnut transformátor, usměrňovač a činný odpor, jelikož odpor vinutí je velmi malý (desetiny ohmu) vlivem činného odporu v obvodu dojde k snížení napětí na budícím vinutí (princip napěťového děliče). Schéma zapojení obvodu prvního nabuzení je znázorněn na Obr. 2.15.

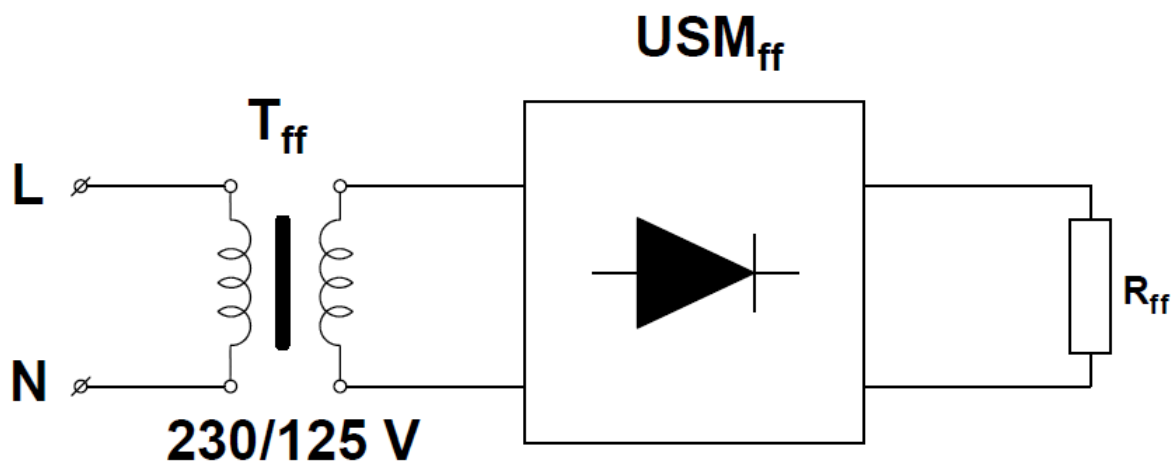
Primární vinutí bude napájeno z nezávislého zdroje napětí o 230 V, sekundární napětí transformátoru se obvykle volí 125 V. Pro výpočet velikosti odporu  $R_{ff}$ , který je součtem připojeného externího odporu a odporu budícího vinutí je potřeba určit velikost proudu, který je potřeba pro první nabuzení. Velikost proudu se určuje empiricky a závisí na konkrétním typu synchronního stroje. Velikost proudu pro obvod prvního nabuzení určíme poměrem budícího proudu naprázdno a jmenovitého budícího napětí synchronního stroje pomocí vztahu (2.37).

$$I_{ff} = 10 \cdot \frac{I_{f0}}{U_{fN}} \quad (2.37)$$

$$I_{ff} = 10 \cdot \frac{433}{326} = 12,09 \text{ (A)} \quad (2.38)$$

Ze vztahu (2.38) jsme získali velikost proudu potřebnou pro obvod prvního nabuzení. Nyní ze znalosti velikosti napětí na výstupu usměrňovače získaného ze vztahu (2.39) dopočítáme potřebnou velikost odporu  $R_{ff}$  ze znalosti ohmova zákona pomocí vztahu (2.41).

$$U_{ff} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{T2ff} \quad (2.39)$$



Obr. 2.15 Náhradní schéma zapojení obvodu prvního nabuzení

Kde konstanta  $\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi}$  respektuje převod střídavé efektivní hodnoty napětí na stejnosměrnou hodnotu jednofázového diodového můstkového usměrňovače.

$$U_{ff} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 125 = 112,54 \text{ (V)} \quad (2.40)$$

$$R_{ff} = \frac{U_{ff}}{I_{ff}} \quad (2.41)$$

$$R_{ff} = \frac{112,54}{12,09} = 8,47 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.42)$$

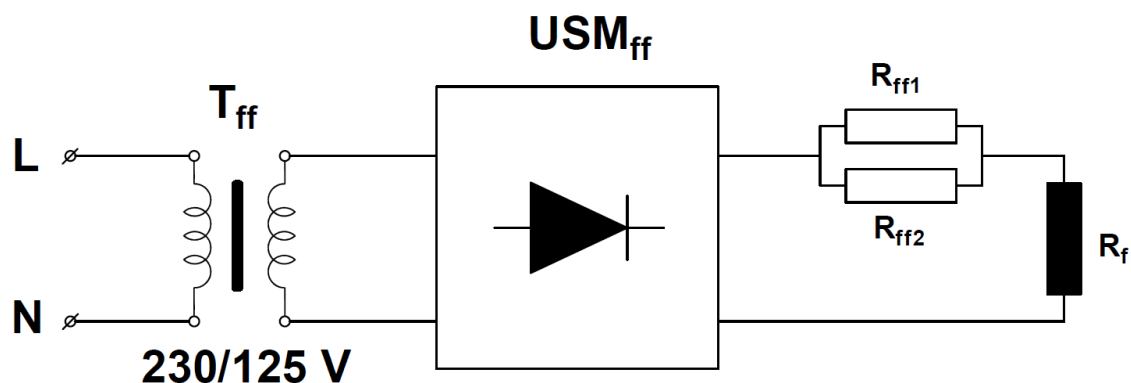
Ze znalosti celkového odporu náhradního obvodu viz Obr. 2.15 nyní odečteme velikost odporu budícího vinutí a zvolíme z jmenovité řady výrobce hodnotu odporu. Následně dopočítáme ztrátové teplo vzniklé v externím odporu. Podle katalogu výrobce vybereme vhodný typ rezistoru. Pro nižší nároky na ztrátové teplo rezistoru lze vybrat dva odpory a zapojit je paralelně viz Obr. (2.31).

$$R_{f1||2} = R_{ff} - R_f \quad (2.43)$$

$$R_{f1||2} = 8,47 - 273,482 \cdot 10^{-3} = 8,197 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.44)$$

$$R_{ff1} = R_{ff2} = 2 \cdot R_{f1||2} \quad (2.45)$$

$$R_{ff1} = R_{ff2} = 2 \cdot 8,197 = 16,394 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.46)$$



Obr. 2.16 Schéma zapojení obvodu prvního nabuzení s dvojicí paralelně zapojených rezistorů

Kde  $R_{f||2}$  je velikost připojovaného externího odporu,  $R_{f1}$  a  $R_{f2}$  jsou velikosti jednotlivých rezistorů zapojených paralelně. Rezistory volím podle jmenovité řady výrobce Tesla Blatná, s.r.o., z katalogu viz Obr 2.17.

Parametry a rozměry				Parameters and dimensions						
Jmenovité zatížení při 25°C Nominal load at 25°C										
Typ	Type	bez chladiče / without heatsink		s chladičem with heatsink	rozsah hodnot resistance range	UL hodnoty UL range	max. pracovní napětí max. operating voltage	L <sub>1</sub> /mm/	L <sub>2</sub> /mm/	m /g/
		P <sub>NED=30%/W/</sub>	P <sub>NED=100%/W/</sub>	P <sub>N</sub>						
TR 314	(T)	120	45	150 W	1R0 - 180R	1R3 - 180R	1 000 V≅	90	79	180
TR 315	(T)	160	60	200 W	1R3 - 240R	1R8 - 240R	1 000 V≅	105	94	208
TR 316	(T)	240	70	300 W	2R7 - 430R	3R6 - 120R	1 500 V≅	155	144	310
TR 317	(T)	320	80	400 W	3R6 - 620R	5R6 - 620R	2 000 V≅	200	189	400
TR 318	(T)	400	100	500 W	5R1 - 910R	7R5 - 470R	2 300 V≅	260	249	515
TR 319	(T)	480	120	600 W	6R8 - 1K2	N/A	2 800 V≅	320	309	635

Obr. 2.17 Katalog rezistorů TR 314 – TR 319 Tesla Blatná, a.s. [16]

Velikost odporu volím podle výpočtu (2.46) z jmenovité řady nejbližší vyšší velikost odporu. Tedy 2x rezistor 18 Ω s označením 18R0. Nyní je potřeba dopočítat velikost ztrátového tepla pomocí vztahu (2.47) a zvolit vhodný typ z řady TR 314 – TR 319. Pro přesnější výpočet přepočítám velikost proudu, jelikož jsem zvolil větší odpor, než byl skutečně vypočítán.

$$P_R = \frac{R_{fN1}}{2} \cdot \left( \frac{U_{ff}}{\left( \frac{R_{fN1}}{2} + R_f \right)} \right)^2 \quad (2.47)$$

$$P_R = \frac{18}{2} \cdot \left( \frac{112,54}{\left( \frac{18}{2} + 273,482 \cdot 10^{-3} \right)} \right)^2 = 1325,47 \text{ (W)} \quad (2.48)$$

Tato energie je vypočtena pro celkový odpor, pro jednotlivé rezistory volíme polovinu ztrátového výkonu z důvodu paralelního zapojení a rozdělení proudu mezi jednotlivé rezistory, tj. minimálně 662,74 W. Proto

volím řadu rezistorů TR 317 se ztrátovým výkonem až 400 W, která krátkodobě umožňuje přetížít rezistor až na desetinásobek po dobu 10 s. V poslední řadě je potřeba určit jmenovitý výkon transformátoru pomocí vztahu (2.49).

$$S_{Tff} = U_{2T} \cdot I_{ff} \quad (2.49)$$

$$S_{Tff} = 125 \cdot 12,09 = 1511,25 \text{ (VA)} \quad (2.50)$$

Pomocí výkonu  $S_{Tff}$  z jmenovité řady výkonů transformátorů vybereme nejbližší vyšší hodnotu, tj. 1 600 VA.

### 3 Návrh ve výpočetním programu UNISMART

V této části diplomové práce využiji pro návrh budicího systému pro synchronní stroj výpočetní program UNISMART firmy ABB, který byl poskytnut konzultantem z firmy Invelt-elektro s.r.o., který slouží k návrhu budicí soupravy v konfiguraci podle ABB. Z tohoto důvodu zde nelze publikovat dokumenty, které UNISMART generuje, ale uvedu zde pouze výsledky výpočtu návrhu budicího systému pro synchronní stroj, pro který jsem provedl návrh pomocí empirických zkušeností získaných z praxe v kapitole 2. Zároveň je UNISMART využíván pro předběžný návrh budicího systému a slouží především jako předloha specifikace pro finální volbu všech komponentů budicího systému. Zároveň musím zmínit, že v průběhu vypracování diplomové práce se UNISMART potýkal s několika velkými problémy, kdy v první řadě docházelo k problému připojení k serverům ABB a častými výpadky. Následně jsem narazil na problém, kdy nebylo možné zadat vstupní data a v důsledku toho nedocházelo ke generování výsledků podstatných částí budicího systému, např. jmenovitý výkon budicího transformátoru.

Pro výpočet návrhu budicího systému UNISMART je potřeba:

- Katalog synchronního generátoru
- Technická specifikace uživatele

Vstupní data jsou rozdělena do několika kritérií:

- Konfigurace aplikace: Zajišťuje základní informace o budicím systému a definuje základní specifikace.
- Enviromentální podmínky: Respektuje vliv okolní teploty a nadmořskou výšku, a ochrany IP pro stanovení typu rozvaděče.
- Parametry synchronního stroje: Základní parametry synchronního stroje z katalogu výrobce, pro který je prováděn výpočet.
- Parametry točivého budiče: Základní parametry budiče z katalogu výrobce. V mé konfiguraci budicího systému se točivý budič nenachází.
- Systémové parametry: Zde se zadávají parametry o velikosti budicího proudu, dále se definují parametry stropního buzení, silové přívody a vývody budicího systému.
- Data o dodávce: Zde se dimenzují jednotlivé transformátory, popřípadě zadávají parametry již existujících transformátoru, pro ověření jejich parametrů.

### 3.1 Vstupní data pro výpočetní program UNISMART

Zde v jednotlivých tabulkách uvedu všechna data, které jsem respektoval při výpočtu. Základní parametry stroje jsou stejné jako v Tab. 2.1. Dále jsem pro výpočet zadával časové konstanty stroje a reaktance stroje viz Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Reaktance synchronního stroje [10]

Reaktance stroje	Hodnota (%)
$x_d''$	14,8
$x_d'$	23,8
$x_d$	190
$x_q''$	16,3
$x_q'$	45,3
$x_q$	170

Časové konstanty synchronního stroje jsou uvedeny v Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Časové konstanty synchronního stroje [10]

Časová konstanta stroje	Hodnota (s)
$T_d''$	0,029
$T_d'$	1,119
$T_{d0}'$	9,558
$T_{d0}''$	0,041
$T_q''$	0,070
$T_q'$	0,507
$T_{q0}'$	2,500
$T_{q0}''$	0,150
$T_a$	0,339

V Tab. 3.3 jsou uvedeny parametry prostředí a požadavek na ochranu IP z technické specifikace.

Tab. 3.3 Reaktance synchronního stroje [10]

Parametr	Hodnota
Nadmořská výška	< 1 000 m.n.n
Ochrana IP	IP31
Okolní teplota	od 5 do 45 °C

Dalšími vstupními parametry pro výpočet, jsou parametry zdrojů pro pomocné obvody:

- 400 V AC TN-S
- Dva bateriové systémy 110 V DC

Do výpočtu jsem dále zahrnul parametry budící transformátoru z požadavku z technické specifikace k ověření, zda může být použitý pro tuto aplikaci. Parametry budícího transformátoru jsou uvedené v Tab. 3.4.

Vstupní data ohledně parametrů velikosti budícího proudu a napětí vycházejí z Tab. 2.1. v kapitole 2.1, respektive z katalogu generátoru.

Tab. 3.4 Parametry budícího transformátoru

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Primární napětí	$U_{NT1}$	kV	15,75
Sekundární napětí	$U_{NT2}$	V	690
Zapojení	-	-	Dy1
Jmenovitý výkon	$S_{NT}$	MVA	1,36

Další vstupní hodnoty pro výpočet jsou:

- Odbuzovač na střídavé straně
- Obvod prvního nabuzení se střídavým zdrojem
- Redundantní tyristor stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR
- Ventilace výkonových měničů napájena jednofázově
- Požadavek na ochranu IP31
- Nelineární odbuzovací rezistor

### 3.2 Výsledky návrhu

V této části zpracuji výsledky výpočtu UNISMART a v kapitole 4 provedu jejich porovnání s navrženými komponenty z kapitoly 2.

#### 3.2.1 Budící transformátor

Do vstupních dat výpočtu jsem zadal parametry budícího transformátoru, které vychází z technické specifikace viz kapitola 2.1 Tab. 3.4, pro ověření parametrů transformátoru vycházející z požadavku uživatele. Z výpočtu jsem získal požadavky na minimální parametry transformátoru viz Tab. 3.5.

Tab. 3.5 Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý výkon	$S_N$	kVA	1 249,86
Primární napětí	$U_{N1}$	kV	15,75
Sekundární napětí	$U_{N2}$	V	670,036
Jmenovitý proud sekundárního vinutí	$I_{N2}$	A	1076,96
Zkratová reaktance	$x_k$	-	0,06
Počet fází	m	-	3
Jmenovitá frekvence	$f_N$	Hz	50
Zapojení	-	-	Dy1

### 3.2.2 Výkonový měnič

Vybrané parametry tyristorového můstkového usměrňovače získané z výpočtu jsou uvedeny v Tab. 3.6.

Tab. 3.6 Vypočtené parametry výkonového měniče (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Typ měniče	D5 - UNS7905bV7200	-	-
Maximální vstupní napětí	$U_{INmax}$	V	718
Jmenovitý proud měniče	$I_N$	A	2 000
Průtok vzduchu	$Q_{vzduch}$	m <sup>3</sup> /hod	1 100

### 3.2.3 Odbuzovač s odbuzovacím rezistorem

Výsledkem výpočtu je typ odbuzovače s odbuzovacím rezistorem včetně vypočtené akumulované energie v obvodu vinutí 651,62 kJ.

- Typ odbuzovače: XT7D 1250 3p
- 2x odbuzovací nelineární rezistor: 600A/US16/P, 500 kJ

### 3.2.4 Stejnoseměrná přepěťová ochrana CROWBAR

Výsledkem výpočtu jsou označení jednotlivých komponentů ochrany CROWBAR (typ tyristorového modulu, typ jednotky pulsů).

- Tyristorový modul: UNS4017 v633
- Jednotka pulsů: UNS0017
- Napětí BOD: 2 000 V



### 3.2.5 Obvod prvního nabuzení

Výsledkem výpočtu je navržení transformátoru, rezistoru, celkového odporu obvodu a jednofázového můstkového diodového usměrňovače. Parametry jednotlivých prvků jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 3.7 Vypočtené parametry rezistoru pro první nabuzení (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Odpor	$R_{f1}$	$\Omega$	6,8
Maximální zatížitelnost	$P_{\max}$	W	2 500
Celkový ekvivalentní odpor obvodu	$R_{ff}$	$\Omega$	6,924

Tab. 3.8 Vypočtené parametry transformátoru pro první nabuzení (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý výkon	$S_N$	VA	1 320
Primární napětí	$U_{N1}$	V	230
Sekundární napětí	$U_{N2}$	V	125
Přetížitelnost 60s/1hod	$S_{T\max}$	VA	2 750
Jmenovitá frekvence	$f_{Nff}$	Hz	50

Zároveň byl vypočten jmenovitý proud usměrňovače pro obvod prvního nabuzení 64 A.

Označení usměrňovače:

– IXYS MDD 44-18N1B

## 4 Porovnání výsledků návrhu budícího systému

V kapitole 2 jsem se věnoval návrhu napájecí části, odbuzovací části a pomocných obvodů budícího systému pomocí empiricky získaných zkušeností z praxe. V kapitole 3 jsem provedl návrh těchto komponent ve výpočetním programu UNISMART, v této kapitole bych se chtěl věnovat porovnáním získaných výsledků. V kapitole 2 jsem zároveň navrhl průřez vodičů pro silovou část budícího systému a např. transformátor pro napájení ventilátorů chlazení výkonového měniče, tyto části nejsou součástí výsledků výpočetního programu UNISMART, proto zmíněné komponenty budícího systému zde nebudu uvádět.

### 4.1 Budící transformátor

V Tab. 4.1 jsou uvedeny ve 4. sloupci výsledky získané výpočetním programem UNISMART a v 5. sloupci hodnoty vypočtené empiricky.

Tab. 4.1 Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	UNISMART	Výpočetně
Jmenovitý výkon	$S_N$	MVA	1 249,86	1 345,90
Primární napětí	$U_{N1}$	kV	15,75	15,75
Sekundární napětí	$U_{N2}$	V	670,036	690,000
Jmenovitý proud sekundárního vinutí	$I_{N2}$	A	1076,96	1033,79
Zkratová reaktance	$x_k$	-	0,06	0,05
Počet fází	m	-	3	3
Jmenovitá frekvence	$f_N$	Hz	50	50
Zapojení	-	-	Dy1	Dy1

Při porovnání výsledků parametrů hlavního budícího transformátoru k odchylce výkonu do 8 %. Z důvodu výkonové rezervy v případě možného navýšení výkonu synchronního generátoru a požadavku z technické specifikace zákazníka došlo k volbě jmenovitého výkonu transformátoru 1,36 MVA. Z hlediska výstupního sekundárního napětí se výpočet liší o 20 V, tj. rozdíl 3 % . Volba sekundárního napětí 690 V nijak neporušuje maximální vstupní napětí komponentů, které napájí. Z tohoto důvodu jsou obě hodnoty validní a zároveň nižší hodnota získaná z výpočtu UNISMART je vyšší než námi vypočítané napětí pro splnění stropního budícího napětí, tj. 485,76 V.

### 4.2 Výkonový měnič

Co se týče výkonové měniče, došel jsem k stejnému závěru při výpočtu v kapitole 2.5 a výpočtu UNISMART, tj zvolený typ měniče pro budící systém je:

– **ABB UNITROL 6080 D5 UNS 7905bV7200**

S jmenovitým proudem 2 000 A a maximálním vstupním napětím 718 V.

### 4.3 Odbuzovač s odbuzovacím nelineárním rezistorem

Samotný odbuzovač, jehož parametry byly navrženy v kapitole 2.6.2, se shoduje se stejným typem získaným z výpočtu UNISMART, tj. typ odbuzovače:

- **ABB XT7D 1250 3p**

Při dimenzování nelineárního rezistoru došlo k rozdílnému výsledku výpočtu akumulované energie. Z návrhu odbuzovacího odporu v kapitole 2.6.1, jsem vypočítal akumulovanou energii v rotoru při nejhorším provozním stavu, tj. vinutím rotoru protéká stropní budící proud 2 398 A, o velikosti 879,88 kJ. Výsledkem výpočtu UNISMART je vypočtená energie pro dimenzování odbuzovacího rezistoru 651,624 kJ. Tedy mnou vypočtená energie je přibližně o 35 % větší. Nemám přístup k přesnému postupu výpočtu UNISMART, ale výsledkem bylo navržení nelineárního rezistoru jako paralelní kombinace dvou rezistorů typu 600A/US16/P, 500 kJ. Tedy celková jmenovitá energie takto zapojených rezistorů je 1 MJ. Já jsem navrhl typ odbuzovacího rezistoru 600A/US16/P, 558,4 kJ. Z výpočtu jsem zvolil kombinaci rezistorů, které můžou absorbovat přibližně o 11,7 % více energie než při výpočtu UNISMART.

### 4.4 Přepěťová ochrana CROWBAR

Výpočtem v kapitole 2.7 jsem došel k stejnému závěru jako při výpočtu UNISMART volbou komponentů tyristorového modulu, jednotky pulsů s označením a breakover diodou:

- **Tyristorový modul: ABB UNS 4017 v633**
- **Jednotka pulsů: ABB UNS0017**
- **Napětí BOD: 2 000 V**

#### 4.5 Obvod prvního nabuzení

Při návrhu obvodu prvního nabuzení došlo z celého návrhu komponentů budícího systému k největším rozdílům celého návrhu. To může být zapříčiněno odlišným přístupem k stanovení požadavku proudu na první nabuzení synchronního stroje. Porovnání výsledků je uvedeno níže v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART)

Parametr	Označení	Jednotka	UNISMART	Výpočetně
Odpor rezistoru	$R_{ff1}$	$\Omega$	6,8	$2 \times 18$
Maximální zatížitelnost rezistorů	$P_{max}$	W	2 500/5s	4 000/10s
Celkový ekvivalentní odpor obvodu	$R_{ff}$	V	6,924	9,273
Jmenovitý výkon transformátoru	$S_{Nff}$	A	1 320	1 600
Primární napětí	$U_{N1ff}$	-	230	230
Sekundární napětí	$U_{N2ff}$	-	125	125
Jmenovitá frekvence	$f_N$	Hz	50	50

Při porovnání výsledků je vidět, že výpočtem provedeným v kapitole 2.8 jsem vycházel z požadavku na velikost proudu pro 12,09 A, oproti tomu výpočtem UNISMART jsem došel k velikosti 19,6 A. Vlivem vyššího proudu dochází k vyšším nárokům na dovolený ztrátový výkon rezistoru.

## Závěr

Cílem práce bylo provést návrh základních komponent statického budícího systému pro synchronní stroj. Návrh vychází z požadavků norem a předpisů. V teoretické části jsou zmíněny jednotlivé typy budících systémů a jejich základní vlastnosti pro lepší pochopení této problematiky. Následně je proveden praktický návrh statického budícího systému.

Pro návrh statického budícího systému byl zvolen projekt do elektrárny v Kazachstánu společností Invelt-elektro s.r.o., jež je zadavatelem této diplomové práce. Momentálně je projekt v procesu vytváření projektové dokumentace. V této diplomové práci prezentuji postup návrhu základních prvků budícího systému, na kterém jsem se podílel pod dohledem konzultanta. Návrh v této práci je nepostradatelnou částí kompletního návrhu a realizace budícího systému, který zahrnuje vytvoření kompletní projektové dokumentace, vlastní sestavení elektrického zařízení, typové zkoušky, nastavení regulátoru, odladění funkčnosti a následně uvedení do provozu.

Návrh vychází z technické specifikace projektu, kde jsou stanoveny základní informace od objednatele, potřebné pro provedení návrhu prvků budícího systému. Návrh v této práci je realizován pomocí dvou výpočetních metod. První metoda je založena na empiricky získaných zkušenostech a druhou metodou je využití moderního výpočetního programu UNISMART, který za pomoci správně definovaných vstupních parametrů vyhodnotí základní komponenty budícího systému a ušetří tak spoustu času při návrhu. První metoda je detailně popsána a naznačena na jednotlivých schématech, kde se jednotlivé prvky v budícím systému nachází. U druhé metody pouze publikuji vstupní data a jednotlivé výsledky, jelikož UNISMART neumožňuje zpřístupnit metodiku výpočtu. Následně je provedeno porovnání výsledků obou metod výpočtu.

Postup návrhu statického budícího systému vycházel ze stanovení základních parametrů budiče, od kterého se odvíjí další návaznosti. Dále došlo k dimenzování budícího transformátoru o výkonu 1,36 MVA s převodem 15,75/0,69 kV. Dalším krokem došlo k dimenzování vodičů uvnitř rozvaděče o průřezu 800 mm<sup>2</sup> v provedení měděných pasů, zároveň pro dimenzování těchto vodičů neproběhla kontrola na účinky zkratu z důvodu nedostatečných informací o napájecí síti. Následně byl dimenzován říditelný výkonový měnič s respektováním parametrů stropního buzení. Výkonový měnič byl vybrán třífázový tyristorový můstkový usměrňovač s označením ABB UNITROL 6080 D5 UNS 7905bV7200. Dále došlo k dimenzování dvojice transformátoru pro zajištění napájení ventilátorů k chlazení výkonového měniče a pomocných a ovládacích obvodů o výkonu 1 300 VA se sekundárním napětím 230 V s odbočkou na 170 V pro ostatní obvody, první transformátor má napětí primárního vinutí 690 V a je napájen z budícího transformátoru a druhý má napětí primárního vinutí 400 V, který je napájen z nezávislého zdroje. Dimenzování havarijního odbuzení je realizováno návrhem odbuzovače s paralelním rezistorem, jedná se o střídavý odbuzovač typu ABB XT7D 1250 3p. Paralelní odbuzovací odpor byl navržen pomocí dvojice paralelně zapojených nelineárních rezistorů z karbidu křemíku, který dokáže absorbovat energii 1 116,8 MJ naakumulované ve vinutí rotoru. Součástí odbuzovacího obvodu byl proveden návrh stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR. Pro CROWBAR byl zvolen tyristorový modul typu

UNS4017 v633 a jednotka pulsů UNS0017 s napětím breakover diody 2 000 V. Následně pro zajištění prvního nabuzení generátoru byl dimenzován transformátor o výkonu 1 600 VA s převodem 230/125 V. Do obvodu prvního nabuzení je zařazena dvojice paralelně zapojených rezistorů o odporu  $2 \times 18 \Omega$  a usměrňovač typu IXYS MDD44-18N1B.

## Bibliografie

- [1] Oldřich Hora. *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*. 1. Vyd. Knižnice automatizace. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [2] Jaroslav Doležal. *Jaderné a klasické elektrárny*. 1. Vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN: 978-80-01-04936-5.
- [3] Noháč Karel. *Budicí systémy alternátorů*. <https://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast06-v2.pdf>. [cit. 2023-12-05]. 2023.
- [4] ABB, Industry AG, s.r.o. *Introduction to UNITROL 6080 System*. Tech. zpr. 2008.
- [5] Noháč Karel. *Odbuzování alternátorů*. <https://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast07-v1.pdf>. [cit. 2023-12-06]. 2023.
- [6] Kučera Stanislav. *Invelt-elektro s.r.o.* Interní dokumenty.
- [7] Skala Bohumil. *Budicí systémy synchronních strojů, přednášky KEV/EST2*. Lectures.
- [8] Česká technická norma (ČSN). *Točivé elektrické stroje - Část 16-1: Systémy buzení pro synchronní stroje - Definice*. Tech. zpr. Ún. 2012.
- [9] IEEE. *IEEE Std. 421.4*. Tech. zpr. 2014.
- [10] *Dokumentace budicího systému B1, Kazachstan, Turkistan*. Tech. zpr. 2024.
- [11] ABB, Industry AG, s.r.o. *UN6000 Datasheet Converter D5*. Tech. zpr. 2022.
- [12] M&I MATERIALS. *METROSIL 8000 SERIES*. Tech. zpr. 2021.
- [13] M&I MATERIALS. *METROSIL SERIES 300-A & 600-A VARISTORS*. Tech. zpr. 2018.
- [14] ABB, Industry AG s.r.o. *Informace o produktu XT7D 1250 3p F F*. <https://new.abb.com/products/cs/1SDA101907R1/xt7d-1250-3p-f-f>. [cit. 2024-05-16]. 2024.
- [15] ABB, Switzerland Ltd. *UNITROL 6000 Operating instructions - Overvoltage protection (CROWBAR)*. Tech. zpr. 2015.
- [16] Tesla Blatná, a.s. *Drátové rezistory v Al pouzdru*. <https://www.tesla-blatna.cz/fe/files/rezistory/alresistors.pdf>. [cit. 2024-05-21]. 2024.

## Seznam tabulek

2.1	Parametry synchronního stroje [10] . . . . .	20
2.2	Jmenovité parametry ventilátorů [11] . . . . .	29
2.3	Jmenovité parametry ventilátorů [11] . . . . .	33
3.1	Reaktance synchronního stroje [10] . . . . .	41
3.2	Časové konstanty synchronního stroje [10] . . . . .	41
3.3	Reaktance synchronního stroje [10] . . . . .	41
3.4	Parametry budícího transformátoru . . . . .	42
3.5	Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART) . . . . .	42
3.6	Vypočtené parametry výkonového měniče (UNISMART) . . . . .	43
3.7	Vypočtené parametry rezistoru pro první nabuzení (UNISMART) . . . . .	44
3.8	Vypočtené parametry transformátoru pro první nabuzení (UNISMART) . . . . .	44
4.1	Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART) . . . . .	45
4.2	Vypočtené parametry budícího transformátoru (UNISMART) . . . . .	47



## Seznam obrázků

1.1	Stanovení odezvy budiče [2] . . . . .	3
1.2	Doba odezvy napětí regulovaného generátoru na skok žádané hodnoty [1] . . . . .	4
1.3	Budící systém se stejnosměrným derivačním rotačním budičem [3] . . . . .	4
1.4	Budící systém se stejnosměrným cize buzeným rotačním budičem [2] . . . . .	5
1.5	Budící souprava s hlavním a pomocným rotačním budičem [3] . . . . .	5
1.6	Statický budící systém se střídavým pomocným budičem [3] . . . . .	6
1.7	Budící souprava bezkroužková s neřízeným usměrňovačem a střídavým budičem [3] . . . . .	7
1.8	Bezkroužkový budící systém s řízeným tyristorovým usměrňovačem a střídavým rotačním budičem [2] . . . . .	8
1.9	Statická budící souprava (Discharge-odbuzovací obvod, Field flashing-obvod prvního nabuzení, Channel 1, 2 -kanál 1, 2, BFCR-záložní kanál, CIO-karta vstupů a výstupů, Measurement signals-signály měření proudů a napětí, Optical data link-komunikace pomocí optických kabelů, Thyristor gate control-signály přiváděné na hradla tyristorů) [4] . . . . .	9
1.10	Odbuzovač s paralelním odporem a průběh napětí a proudu při procesu odbuzení [2] . . . . .	10
1.11	Odbuzovač se zhášecí komorou a průběh napětí a proudu při procesu odbuzení [2] . . . . .	10
1.12	Detailnější pohled na zhášecí komoru odbuzovače [5] . . . . .	11
1.13	Porovnání procesu odbuzení statického budícího systému a bezkroužkového budícího systému [6] . . . . .	12
1.14	Budící obvod s odbuzovačem a přepěťovou ochranou CROWBAR [7] . . . . .	13
1.15	Vnitřní zapojení stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR [7] . . . . .	14
2.1	Topologie napájení budícího systému s dvojicí transformátorů . . . . .	23
2.2	Topologie napájení budícího systému s jedním transformátorem . . . . .	24
2.3	Pohled v řezu na měděný vodič . . . . .	25
2.4	Rozměry měděných pasů v rozvaděči budícího systému . . . . .	26
2.5	Rozdělení výkonové řady UNITROL 6000, (SES-statický budící systém) . . . . .	27
2.6	Jmenovitá řada výkonových měničů UNITROL 6000 D5 [11] . . . . .	28
2.7	Maximální vstupní a blokovací napětí tyristorů měniče D5 [11] . . . . .	29
2.8	UNITROL 6000 D5 [11] . . . . .	30
2.9	Porovnání procesu havarijního odbuzení s lineárním a nelineárním odporem [4] . . . . .	31

2.10	Nelineární odpor Metrosil 8000 US16 [12] . . . . .	32
2.11	Katalog nelineárních odporů Metrosil [13] . . . . .	33
2.12	Odbuzovač ABB XT7D [14] . . . . .	34
2.13	Schéma zapojení stejnosměrné přepěťové ochrany CROWBAR . . . . .	35
2.14	Jmenovité parametry tyristorových modulů CROWBAR [15] . . . . .	36
2.15	Náhradní schéma zapojení obvodu prvního nabuzení . . . . .	37
2.16	Schéma zapojení obvodu prvního nabuzení s dvojicí paralelně zapojených rezistorů . . . . .	38
2.17	Katalog rezistorů TR 314 – TR 319 Tesla Blatná, a.s. [16] . . . . .	38