

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh statické budicí soustavy

Autor práce: **Bc. Ondřej Rozhon**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej ROZHON**
Osobní číslo: **E21N0060P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Návrh statické budící soupravy pro synchronní generátor**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište statický budící systém a postup jeho návrhu.
2. Zvolte vhodné komponenty pro buzení zvoleného synchronního generátoru.
3. Navrhněte statickou budící soupravu pro zvolený synchronní generátor.
4. Ověřte správnost návrhu odbuzovacího obvodu při provozním a havarijním odstavení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Bartoš,V.: Teorie elektrických strojů. skripta ZČU 2005.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**





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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Návrh statického buzení synchronního generátoru je důležitou součástí zařízení pro produkci elektrické energie. V této práci byl navržen a otestován statický budicí systém pro synchronní generátor s využitím tyristorového usměrňovače.

Budicí souprava byla navržena tak, aby generovala regulované stejnosměrné napětí pro rotor generátoru pomocí řídicího systému. Systém byl v rámci diplomové práce testován, aby se zajistilo, že může produkovat stabilní napětí a že regulátor buzení funguje správně.

Dále byl simulován systém stejnosměrné přepěťové ochrany (crowbar), který chrání rotor generátoru a silovou část budicí soupravy v případě přepětí v budicím obvodu. Simulace zahrnovala návrh obvodu, který může rychle a automaticky odpojit budicí systém od generátoru v případě poruchy. Simulace také porovnávala vhodnost lineárních a nelineárních rezistorů v obvodu crowbar. Simulace byla požadována zejména kvůli ověření správnosti analytického výpočtu při návrhu a ke zjištění rychlosti odbuzení.

Celkově byl návrh, testování a simulace statického budicího systému s ochranou crowbar úspěšný a systém se ukázal jako spolehlivý a efektivní pro buzení synchronního turbogenerátoru.

Klíčová slova

statické buzení, synchronní generátor, tyristorový usměrňovač, návrh statického buzení, testování statického buzení, obvod crowbar.

Abstract

The design of static excitation for a synchronous generator is an important component of a power generation device. In this work, a static excitation system for a synchronous generator using a thyristor rectifier was designed and tested.

The excitation system was designed to generate regulated direct current voltage for the generator rotor through a control system. The system was tested as part of a thesis to ensure its ability to produce stable voltage and that the excitation controller functions properly.

Furthermore, a simulation of a direct current overvoltage protection system (crowbar) was conducted. This system protects the generator rotor and the power section of the excitation system in case of overvoltage in the excitation circuit. The simulation involved designing a circuit that can quickly and automatically disconnect the excitation system from the generator in the event of a fault. The simulation also compared the suitability of linear and nonlinear resistors in the crowbar circuit. The simulation was specifically requested to verify the accuracy of the analytical calculations in the design and to determine the speed of demagnetization.

Overall, the design, testing, and simulation of the static excitation system with crowbar protection were successful, and the system proved to be reliable and efficient for exciting a synchronous turbogenerator.

Keywords

static excitation, synchronous generator, thyristor rectifier, design of static excitation, testing of static excitation, crowbar protection.

Poděkování

V diplomové práci bych chtěl vyjádřit své upřímné poděkování firmě Brush za jejich vstřícnost a spolupráci během psaní práce. Firma Brush mi umožnila prozkoumat oblast, která mě velmi zajímá, a rozšířit své vědomosti a schopnosti v této oblasti. Díky jejich ochotě poskytnout mi přístup k potřebným informacím a materiálům jsem byl schopen úspěšně dokončit svoji práci. V této souvislosti bych chtěl zdůraznit, že spolupráce s firmou Brush byla klíčová pro mé osobní a profesní cíle. Jejich odborné znalosti a podpora mi poskytly velmi cenné zkušenosti a přispěly k mému dalšímu rozvoji.

Moje díky pak patří jmenovitě zaměstnancům ing. Lukáši Reindlovi, který mi byl mentorem po celou dobu psaní mé diplomové práce. A byl hlavní osobou pro vznik zmiňované spolupráce mezi mnou a firmou Brush. Dále pak ing. Pavlovi Hlaváčovi jehož cenné rady a zkušenosti pozvedly hodnotu samotné práce.

Obsah

Úvod	1
1 Statická budicí soustava	2
1.1 Synchronní generátor	2
1.2 Statická budicí soustava	3
1.2.1 Počáteční nabuzení	4
1.2.2 Budicí transformátor	5
1.2.3 Odbuzovací obvod a crowbar	5
1.2.4 Výkonový usměrňovač	9
1.2.4.1 Přepětíová ochrana	14
1.2.4.2 Konstrukční provedení a chladič	16
1.2.4.3 Provoz tyristorových můsteků	17
1.2.5 Regulátor buzení	19
2 Návrh komponent	20
2.1 Projektová data	20
2.2 Základní budicí parametry	21
2.2.1 Napěťové meze usměrňovače	21
2.2.2 Budicí transformátor	21
2.3 Návrh chlazení usměrňovače	22
2.4 Přepětíová ochrana	27
2.4.1 Střídávací přepětíová ochrana	27
2.4.2 Stejnoseměrná přepětíová ochrana crowbar	28
2.4.3 Odbuzovací rezistor	29
2.5 Odbuzování	30
2.5.1 Návrh odbuzovače	31
2.6 Obvod počátečního nabuzení	32
3 Zkoušky statické budicí soustavy	36
3.1 Formální shoda	36
3.2 Prohlídka rozvaděče	36

3.3	Dielektrická zkouška	36
3.4	Kontrola izolačních odporů	37
3.5	Kontrola ochranných opatření	37
3.6	Zkouška elektrické funkce	38
3.7	Test stejnosměrné přepěťové ochrany	38
3.8	Zkouška měniče při malém zatížení	38
3.9	Kontrola analogových vstupů	39
3.9.1	Kontrola měření statorových veličin	39
3.9.2	Kontrola měření napětí sítě a napětí generátoru pro srovnavač	39
3.9.3	Kontrola měření napájecího napětí měniče	39
3.9.4	Kontrola měření proudu ventilátorem	39
3.9.5	Kontrola měření budícího proudu	39
3.10	Kontrola synchronoskopu	40
4	Model obvodu crowbar	41
4.1	Stav naprázdno	44
4.2	Zkrat na svorkách generátoru	46
4.3	Zjištěné hodnoty	49
4.4	Srovnání s analytickým výpočtem	49
	Zhodnocení a závěr	52
	Literatura	54
	Příloha	I

Seznam symbolů

Obecné

D		zapojení do trojúhelníka
p_1		počet pólů
Y		zapojení do hvězdy

Elektrické pole

f	Hz	frekvence obvodu
P_T	W	činný výkon transformátoru
τ	s	časová konstanta
$\cos\phi$	-	účinník
C_p	F	kapacita ochranného kondenzátoru
$\frac{di}{dt}$	A	derivace proudu
$\frac{dt}{dt}$	s	derivace času
f_1	Hz	statorová frekvence
I	A	proud v ustáleném stavu
I_{1PART}	A	primární proud transformátoru počátečního nabuzení
I_2	A	sekundární proud budícího transformátoru
I_{dmax}	A	maximální proud usměrňovačem
I_{f0}	A	rotorový proud naprázdno
I_{fK}	A	rotorový proud při zkratu na svorkách generátoru
I_{fN}	A	jmenovitý budící proud
I_G	A	proud na hradle tyristoru
I_{GD}	A	nezapínací proud hradla
I_{GT}	A	spínací proud hradla
I_{INRUSH}	A	rozběhový proud transformátoru počátečního nabuzení
I_n	A	jmenovitý proud
I_{P2}	A	sekundární proud transformátoru počátečního nabuzení
I_{PART}	A	potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení

I_R	A	závěrný proud tyristoru
I_{RRM}	A	opakovatelný špičkový proud v závěrném směru
i_0	A	magnetizační proud
I_d	A	proud usměřňovačem
I_f	A	rotorový proud
I_H	A	vratný proud tyristoru
I_L	A	přidržený proud tyristoru
i_T	A	osa propustného proudu
K	-	materiálová konstanta nelineárního odporu
L_{f0}	H	rotorová indukčnost naprázdno
L_{fK}	H	rotorová indukčnost nakrátko
P	W	ztráty
$P_{G(AV)}$	W	dovolený ztrátový výkon
P_{max}	W	maximální ztráty
Q_{rr}	C	komutační náboj
R_{ff}	Ω	rezistor pro stejnosměrné napájení obvodu počátečního nabuzení
R_z	Ω	zátěžný odpor obvodu mimo řídící elektrodu
R_f	Ω	rotorový odpor
R_P	Ω	vybíjecí odpor
R_S	Ω	omezovací odpor
r_T	Ω	diferenciální odpor
S_{PART}	VA	sdužený výkon transformátoru počátečního nabuzení
S_T	VA	sdužený výkon budícího transformátoru
T	s	čas v ustáleném stavu
T'_d	s	časová konstanta při zátěži
T'_{d0}	s	časová konstanta naprázdno
T_{D0}	s	časová konstanta odbuzení v chodu naprázdno
T_{DK}	s	časová konstanta odbuzení při zkratu na svorkách generátoru
u	V	okamžitá hodnota napětí
U	V	napětí v ustáleném stavu
$U_{(BO)}$	V	spínací napětí v propustném směru, přechod do vodivého stavu
$U_{(BR)}$	V	napětí v závěrném směru, přechod do oblasti průrazu
U_2	V	sekundární napětí budícího transformátoru
U_c	V	napětí na kondenzátoru
U_d	V	napětí na zátěži
U_{d0}	V	výstupní usměrněné napětí při $\alpha = 0$

U_{DC}	V	napětí výkonové baterie
U_{di}	V	výstupní usměrněné napětí
U_{DRM}	V	opakovatelné špičkové blokovací napětí
U_{DWM}	V	opakovatelné blokovací napětí pro danou aplikaci
U_{fN}	V	jmenovité budící napětí
U_{GD}	V	nezapínací napětí hradla
U_{GT}	V	spínací napětí hradla
U_{i0}	V	napětí zdroje naprázdno
U_{nl0}	V	napětí na nelineárním rezistoru při proudu naprázdno
U_{nlK}	V	napětí na nelineárním rezistoru při zkratovém proudu
U_p	V	horní mez napětí usměřovače
U_{P2}	V	sekundární napětí transformátoru počátečního nabuzení
U_{PART}	V	potřebné napětí z obvodu počátečního nabuzení
U_{pn}	V	dolní mez napětí usměřovače
$U_{POJISTKA}$	V	napětí na pojistce
U_R	V	závěrné napětí tyristoru
U_{RM}	V	amplituda závěrného napětí
U_{RRM}	V	opakovatelné špičkové napětí v závěrném směru
U_{RWM}	V	opakovatelné závěrné napětí pro danou aplikaci
U_{Smax}	V	amplituda napájecího napětí
U_T	V	stejnsměrné napětí mezi anodou a katodu sepnutého tyristoru
U_{T0}	V	prahové napětí tyristoru
U_{TEST}	V	testovací napětí rotorového obvodu
U_c	V	spouštěcí napětí crowbar
U_G	V	napětí na hradle tyristoru
U_s	V	sdílené napětí sítě
W	J	energie uložená v rotorové indukčnosti
W_0	J	energie uložená v rotorové indukčnosti při stavu naprázdno
W_c	J	energie kondenzátoru
W_k	J	energie uložená v rotorové indukčnosti při zkratu na svorkách generátoru
x_d	p.u	podélná synchronní reaktance
x'_d	p.u	přechodná podélná synchronní reaktance
α	°	řídící úhel
α_r	-	materiálová konstanta nelineárního odporu
β	-	materiálová konstanta nelineárního odporu
δ	°	bezpečnostní úhel

ω	rad/s	úhlová rychlost
$\bar{\Phi}$	Wb	celkový magnetický tok
$\bar{\Phi}_a$	Wb	tok točivého magnetického pole
$\bar{\Phi}_b$	Wb	tok budícího magnetického pole

Teplotní pole

Q	m^3/hod	celkový průtok
R_{thch}	K/W	tepelný spád mezi základnou prvku a chladičem
R_{thjc}	K/W	tepelný spád mezi polovodičovou destičkou a základnou
R_{thra}	K/W	tepelný spád mezi chladičem a chladícím médiem
T	K	oteplení
T_j	$^{\circ}C$	mezní teplotní hodnota součástky
Z_{thra}	K/W	tepelná impedance mezi chladičem a chladícím médiem
$\Delta P_{FILT_{max}}$	Pa	úbytek tlaku se zanesenými filtry
$\Delta P_{FILT_{min}}$	Pa	úbytek tlaku s čistými filtry
$\Delta P_{TOTAL_{max}}$	Pa	maximální celkový úbytek
$\Delta P_{TOTAL_{min}}$	Pa	minimální celkový úbytek
Δp_r	Pa	tlakový úbytek
θ_a	$^{\circ}C$	teplota okolí
θ_r	m/s	rychlost chladiwa

Seznam zkratek

AC	Alternating current/Střídavá veličina
AVR	Automatic voltage regulator/Regulátor buzení
DC	Direct current/Stejnsměrná veličina

Úvod

Tato práce se zaměřuje na problematiku spojenou s návrhem statické budící soustavy pro synchronní generátor. Hlavním cílem je zverifikovat a popřípadě i vylepšit postupy pro návrh statické budící soupravy společnosti Brush, která je předním světovým výrobcem synchronních generátorů, motorů a budících systémů. V průběhu práce jsou vysvětleny standardní postupy společnosti Brush spojené s návrhem statické budící soustavy. Jednotlivé kroky jsou detailně popsány a objasněny, aby bylo zřejmé, jaké řešení by mělo být zvoleno a jakým způsobem se postupuje při návrhu. Vzhledem k tomu, že práce je zaměřena na reálný projekt společnosti Brush, jsou představeny konkrétní požadavky a parametry projektu. To umožňuje lépe pochopit, jakými výzvami je návrh statické budící soustavy pro synchronní generátor spojen. Celkově tedy tato práce poskytuje ucelený pohled na problematiku návrhu statické budící soustavy pro synchronní generátor a představuje standardní postupy společnosti Brush, které lze aplikovat při řešení podobných projektů. Text se pomyslně dělí na teoretickou a praktickou část pro lepší orientaci v textu.

Teoretická část této práce se zaměřuje na popis řešeného typu budící soustavy a vysvětlení důvodů, proč byl zvolen pro tuto konkrétní práci. V této části je tedy popsán základní princip budící soustavy a jsou vysvětleny její klíčové výhody, které ji činí vhodnou pro náš projekt. Dále se teoretická část soustředí na vlastní komponenty řešené budící soustavy. Jednotlivé komponenty jsou podrobně rozebírány, aby se získal lepší nadhled o funkci každé z nich a jakým způsobem přispívají k celkové funkčnosti budící soustavy. Cílem teoretické části je tedy poskytnout jasný nadhled do praktické části práce. Díky teoretickému rozboru jednotlivých komponent budící soustavy budou moci čtenáři lépe pochopit praktickou implementaci, což zvýší kvalitu a efektivitu návrhu celé soustavy.

Praktická část této práce je rozdělena do tří hlavních částí. První část se zaměřuje na samotný návrh jednotlivých komponent budící soustavy. V této části jsou popsány postupy společnosti Brush, které jsou použity pro návrh a výběr jednotlivých komponent. Cílem této části je poskytnout návod pro návrh každého z komponentů, tak aby byly splněny požadavky na výkon a spolehlivost celé soustavy. Druhá část praktické části se věnuje zkouškám budící soustavy, které jsou prováděny opět společností Brush. Tyto zkoušky mají za úkol ověřit praktický návrh a nastínit potřebnou práci pro potvrzení funkčnosti celé budící soustavy. V rámci těchto zkoušek jsou testovány jednotlivé komponenty a celá budící soustava za různých provozních podmínek, aby byla zajištěna její spolehlivost a efektivita. Poslední část praktické části je věnována modelování DC přepěťové ochrany (crowbar). V této části jsou sledovány veličiny vytvořené havarijním odpojením budící soustavy od generátoru pomocí numerického modelu. Cílem tohoto modelu je pomocí simulací porovnat ochranný nelineární odpor s lineárním odporem a určit, který odpor je pro danou aplikaci vhodnější. Celkovým cílem praktické části je tedy ověřit funkčnost navržené budící soustavy a zajistit její spolehlivost a efektivitu.

1 Statická budící soustava

1.1 Synchronní generátor

Výroba elektrické energie (výkonu) spočívá ve spojení hybné síly (turbíny), která převádí mechanickou energii na elektrický generátor. Generátor pak následně mechanickou energii převádí na elektrickou. Elektrické generátory obvykle pracují v rozsáhlých energetických sítích. Mnohé z nich zajišťují napěťovou a frekvenční stabilitu kvůli proměnlivé zátěži. Nebo mohou pracovat samostatně. Zásobu elektrické energie obvykle obstarává rozvodná síť. Ta se skládá z elektrických elektráren, přenosových vedení a distribučních soustav. Pro rozvodné sítě s pyramidovou strukturou, výroba – přenos – distribuce, platí přísně podmínky připojení generátoru. Pravidla a normy jsou nezbytné pro zajištění kvalitního výkonu z hlediska kontinuity, napěťové a frekvenční stálosti, fázové symetrie a zpracování poruch [1]. Synchronní generátor se řadí mezi točivé stroje. Rotor stroje se budí stejnosměrným proudem k vytvoření točivého budícího magnetického pole s tokem $\bar{\Phi}_b$, působení toku je v ose pólu. Rychlost rotoru je synchronní a označuje se n_s . Díky elektromagnetické indukci, vytvořené pole generuje střídavé elektrické napětí v cívkách statoru. Státorem začnou protékat trojfázové proudy, které vytvářejí své vlastní točivé magnetické pole $\bar{\Phi}_a$. Poloha a velikost magnetického pole $\bar{\Phi}_a$ závisí na provozovaném stavu stroje. Pole $\bar{\Phi}_b$ a $\bar{\Phi}_a$ na sebe silově působí a otáčejí se spolu synchronní rychlostí n_s . Toto působení se nazývá reakce kotvy. Součtem těchto polí získáme celkový tok $\bar{\Phi}$.

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_b, \quad (1.1)$$

kde $\bar{\Phi}$ je celkový magnetický tok, $\bar{\Phi}_a$ je tok točivého magnetického pole, $\bar{\Phi}_b$ je tok budícího magnetického pole.

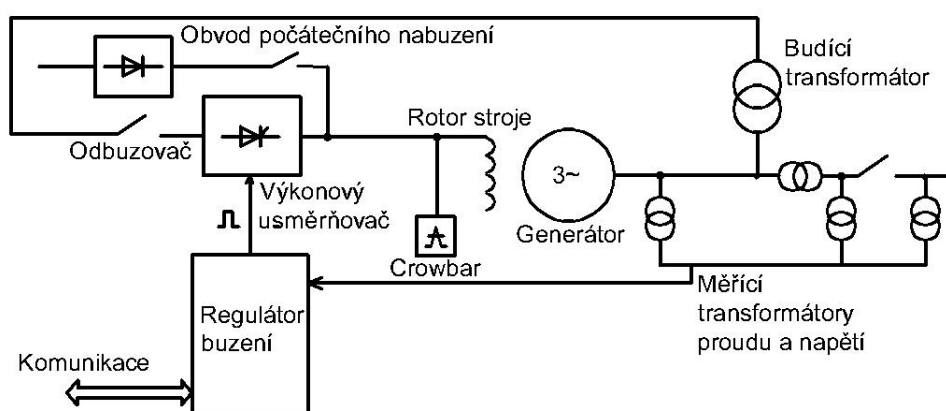
Velikostí buzení se dá měnit stav stroje na přebuzený nebo podbuzený. Vliv buzení také ovlivňuje poměr mezi $\bar{\Phi}$ a $\bar{\Phi}_b$. Přebuzený stroj má vyšší hodnotu $\bar{\Phi}_b$ oproti $\bar{\Phi}$ a produkuje jalový výkon. Podbuzený stroj má vyšší hodnotu $\bar{\Phi}$ a odebírá jalový výkon [2, 3]. Pro optimální přenos krouticího momentu z turbíny je elektrický generátor umístěn na společném rotoru a spolu s turbínou tvoří jeden celek – turbogenerátor. Synchronní generátory mají obecně statorový magnetický obvod vyrobený z plechů opatřený drážkami, v nichž je umístěno třífázové střídavé vinutí a rotor. Rotor může být elektricky buzený nebo s permanentními magnety. V ideálním stavu na sebe působí dvě pole, statoru a rotoru, vytvářejí tak relativně hladký moment. Stroje jsou konstruovány s hladkým rotorem s počtem pólů $p_1 = 2, 4$ (vysokorychlostní nebo turbogenerátory) nebo s vyniklými póly $p_1 > 4$ (pomaluběžné nebo hydrogenerátory). S rostoucím výkonem vzrůstá i obvodová rychlost rotoru. Proto se stává nezbytným umísťovat stejnosměrné buzení do drážek s koncovými spoji odolných proti odstředivým silám. To přispívá k sinusovému průběhu ve vzduchové mezeře. V důsledku toho je menší podíl harmonických složek vytvořených indukovaným napětím na statoru. Tělo rotoru je vyrobeno z plného železa pro lepší mechanickou tuhost a přenos tepla. Statorové drážky ve velkých synchronních generátorech jsou otevřené a někdy jsou

opatřeny magnetickými klíny, aby se ještě více zmenšily prostorové harmonické a přídavné ztráty na tlumiči rotoru. Pro $n = \frac{f_1}{p_1}$ a ustálený stav platí, že se proudy v tlumiči rovnají 0. Pokud by však došlo k nějakému zatížení nebo mechanickým přechodům, objeví se tlumící kleci vířivé proudy, které zeslabují kmitání rotoru. U hydrogenerátoru jsou jisté odlišnosti, které v této práci nejsou řešeny [1, 3, 4].

1.2 Statická budíčí soustava

Jak bylo řečeno, synchronní generátory ke své činnosti potřebují vybuzený stejnosměrný proud. Tímto úkolem se zabývá budíčí soustava nebo permanentní magnet. Buzení permanentním magnetem je jednodušší. Na druhou stranu jejich nevýhodou je ztráta kontroly nad vzduchovou mezerou (konstantní magnetický tok), takže jejich svorkové napětí se reguluje velmi těžko. S tím se i vytrácí schopnost stroj podbuzovat či přebuzovat, to z energetického hlediska představuje problém. Mezi první budíčí soustavy se řadí budiče stejnosměrné s cizím, vlastním nebo smíšeným buzením. U těchto budičů byla nevýhoda pomalé reakce na změny v síti. Jelikož svorkové napětí se řídilo změnou budíčího proudu budičů. Jejich výkon byl navíc omezen komutátorem. Postupným vývojem polovodičových součástek se vyvinul střídavý budič s diodami. Toto zařízení dosahovalo vyšších výkonů, bohužel reakce na změny v síti byly stále pomalé. Příchod tyristorů dal za vznik rychlé statické budíčí soustavě, která je vhodná i pro vyšší výkony. Tyristorový usměrňovač může být napájen z jiné sítě (nezávislá budíčí souprava) nebo z jiného generátoru (závislá budíčí souprava). V současnosti nejrozšířenější je bezkroužkové buzení. Neřízený usměrňovač se spolu se střídavým budičem umístí na společnou hřídel s generátorem. Výhodou této metody je vynechání kluzného kontaktu, tím pádem se dosahuje menšího mechanického opotřebení. Ale hlavně budíčí souprava operuje jen s malými proudy (běžně 2-25 A), což umožňuje použít stejný typ buzení pro generátory od 1 MVA po cca 300 MVA. U této metody se ovšem projevovalo mnoho vad u vyšších výkonech, jejich použití se ustálilo na středních a nižších výkonech. Jejich zásadní nevýhodou je rychlost regulace a pomalé odbuzení v případě poruchy. Tato práce se věnuje statickému buzení (self). Buzení je provedeno tyristory staticky umístěných v rozvaděči. Část vyrobené elektrické energie se pak přenáší zpět a využívá se ke konstantnímu buzení, proto se dá použít označení self [5, 6]. Typický obvod self budíčí soustavy je zapojení budíčího transformátoru na výstup synchronního generátoru. Tento jednoduchý režim, umožňuje vysokou spolehlivost buzení. Budíčí transformátor obvykle není vybaven automatickým vypínačem. Vysokonapěťovou stranu lze doplnit vysokonapěťovou pojistkou. Zapojení vinutí budíčího transformátoru je standardně dáno Dy1. Jako usměrňovač se nejčastěji používá 3fázový můstek s jedním až třemi paralelními tyristory. Můstky mohou být plně nebo polo řízené. Obě varianty mají stejnou schopnost buzení. Při potlačení buzení však může polo řízený můstek ovládat pouze budíčí napětí jedné polarity, zatímco plně ovládaný můstek může vyvolat záporné budíčí napětí a při invertujícím provozu rychle snížit budíčí proud na nulu. Chlazení usměrňovače je většinou vzduchové nucené a to zejména kvůli ekonomickým důvodům. U pasivního chlazení je pak nutné předimenzování komponent. Další částí jsou ochranné obvody složené z odporů, kondenzátorů nebo speciálních tyristorů. Jejich hlavní úlohou je ochrana proti přepětím. Při rozpojování budíčího obvodu je potřeba pohltit energii, která je v budíčím vinutí. Pro tuto činnost je odbuzovač. Při této činnosti nesmí vzniknout

přepětí, které by mohlo poškodit vinutí rotoru, popřípadě budíčí soupravu. Jsou dva typy odbuzovačů, energie je buď přeměňována v odporníku nebo v sériově řazených elektrických obloucích na teplo. Pro prvotní nabuzení slouží obvod počátečního nabuzení, který zajišťuje počáteční buzení generátoru na cca 15% jmenovitého napětí. Je-li napájen ze střídavého zdroje, obsahuje snížovací transformátor, stykač a diodový usměrňovač. U stejnosměrného napájení je využito výkonové baterie. Obvod se skládá ze stykače, omezovacího odporu a blokovací diody. Mozkem celé soustavy je regulátor napětí AVR (automatic voltage regulátor). V zjednodušeném podání to je počítač, který vyhodnocuje poruchové stavy. Řídí statorový a rotorový proud, hlídá mez podbuzení, umožňuje paralelní chod a nastavuje účinník $\cos \phi$ [5, 6, 7, 8]. Přehled jednotlivých částí je budíčí soustavy vyobrazen na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Přehledové schéma statické budíčí soustavy [9]

1.2.1 Počáteční nabuzení

Na začátku rozběhu, u otáček blízkým jmenovitým, je napětí na statoru generátoru reziduální. Velikost reziduálního napětí je většinou 1% – 2% jmenovitého napětí. V tomto případě nemůže obvod správně fungovat. Transformátor negeneruje potřebné veličiny, tím se vytrácí i funkčnost tyristorového usměrňovače. Pro případ, že budíčí transformátor je připojen na výstup generátoru je vhodné použít obvod počátečního nabuzení. Obvod počátečního nabuzení se dělí na dvě podoblasti. První podoblast využívá reziduálního napětí generátoru. Tento postup se používá, pokud je velikost reziduálního napětí dostatečně velká k nabuzení generátoru. Pokud tomu tak není, musí se použít druhého způsobu. Druhý způsob se provozuje s odděleným zdrojem a obvodem, zde dochází k rychlému prvotnímu nabuzení. Po dosažení hodnoty, ze které je generátor schopen pracovat sám, se obvod počátečního nabuzení oddělí (rozpojí). Napětí zdroje obvodu počátečního nabuzení by mělo být tak velké, aby rychle nabudilo 15% – 20% jmenovitého napětí generátoru (ve stavu naprázdno). Rozlišují se dvě varianty napájení tohoto způsobu. První variantou je stejnosměrné napájení obvodu. Zde se používá výkonová baterie, odpojovač, rezistor pro omezení proudu a blokovací dioda. Výkonové baterie by měla mít vyšší napětí než je potřebné pro obvod počátečního nabuzení. Obecně lze udávat 0,25 jmenovitého budíčího napětí (používané

výkonové baterie mají napětí 110 V nebo 220 V). Důležitou veličinou je pak proud z baterie, který se reguluje rezistorem. Proud z baterie by měl odpovídat 0,15 - 0,25 budícího proudu naprázdno. Pokud je obvod napájen ze střídavého zdroje, využívá se snižovacího transformátoru, odpojovače a neřízeného usměrňovače [6, 10, 11].

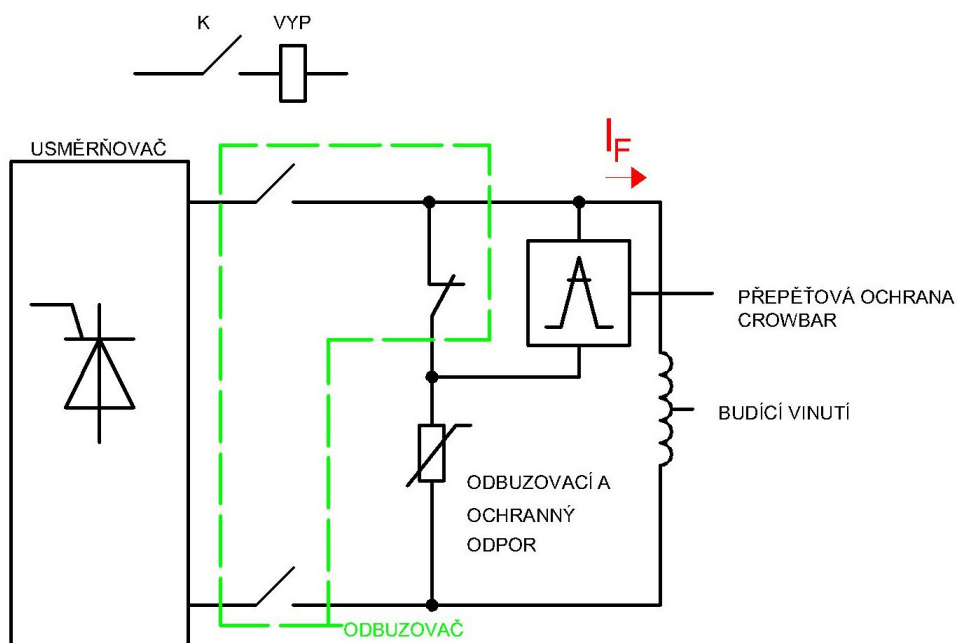
1.2.2 Budící transformátor

Provedení budícího transformátoru může být s ohledem na prostředí a způsob využívání odlišný. Nejčastěji používané jsou suché transformátory. Jejich primární chlazení je vzduchové (přirozené či nucené). K jejich chlazení tedy není potřeba žádné další médium, jako je například olej. Jádro transformátoru je vyrobeno z plechů kvalitní křemíkové oceli válcované za studena. Plechy jsou izolované lakem a stažené mechanickou konstrukcí. Vinutí transformátoru se může vyrábět z mědi nebo hliníku. Vinutí je dále zaléváno pryskyřicí. Pryskyřice chrání vinutí transformátoru před korozí a zamezuje vnikání vlhkosti do izolace vinutí, což by mohlo vést ke snížení izolačního odporu transformátoru a ke zkratu. Zalévání pryskyřicí také zvyšuje tepelnou stabilitu a mechanickou pevnost transformátoru. Pryskyřice může být zároveň elektricky izolační a snižovat riziko elektrického průrazu při vysokém napětí. U budícího transformátoru se vyskytují určité problémy, se kterými by se mělo počítat při jeho návrhu. Vyšší harmonické proudy způsobené usměrňovačem vytvářejí dodatečné ztráty. Dalším faktorem, který je třeba zohlednit při návrhu budícího transformátoru, jsou napěťové a proudové špičky, které mohou vzniknout při zapnutí a vypnutí usměrňovače. Tyto špičky mohou poškodit izolaci vinutí transformátoru, což může vést k jeho selhání. Proto je důležité při návrhu volit odpovídající kvalitu izolačního materiálu a zajistit dostatečné odstupy mezi vinutími a mezi vinutími a jádrem. Z hlediska výkonu je důležité zvolit správnou velikost transformátoru a zajistit jeho dostatečné chlazení. Při nadměrném zatížení může dojít k přehřátí transformátoru a jeho poškození. Proto je nutné zajistit dostatečný odvod tepla. Celkově je při návrhu budícího transformátoru důležité brát v úvahu jeho prostředí a způsob využití, ale také zohlednit faktory jako jsou ztráty způsobené vyššími harmonickými, napěťové a proudové špičky a dostatečné chlazení [6, 12].

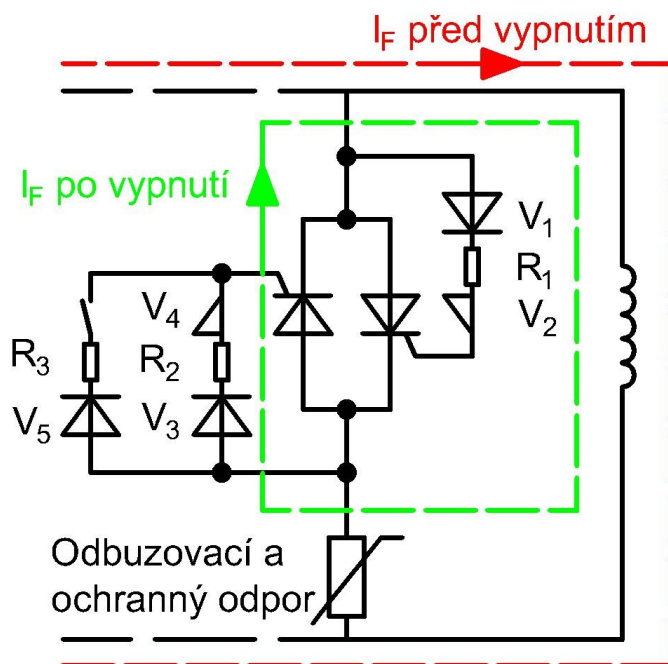
1.2.3 Odbuzovací obvod a crowbar

Odbuzovač je speciální přístroj, který má spřažené silové kontakty a pomocný kontakt tak, že pomocný kontakt sepne dříve než rozeprnou hlavní kontakty. Proud I_f se přepne z usměrňovače do odbuzovacího odporu. Přepěťová ochrana chrání v tomto případě před přepětím indukovaným ze statoru. Pokud se místo odbuzovače použije jistič nebo odpínač (jistič bez spouště), pomocný kontakt k připojení odporu zde chybí a je třeba ho nahradit funkcí přepěťové ochrany, která by měla ideálně spínat s předstihem před rozeprnutím hlavních kontaktů. Uspořádání odbuzovače je zobrazeno na obrázku 1.2. Je důležité podotknout, že odbuzovač na obrázku 1.2 je umístěn na stejnosměrné straně (za usměrňovačem). Toto zapojení je klasické a nejvýhodnější. Čím dál tím více návrhů se ale uskutečňuje s odbuzovačem na střídavé straně. S vyššími rotorovými proudy a vyššími rotorovými indukčnostmi se stává více obtížnější sestavení odbuzovače na stejnosměrnou stranu. Navíc, přerušovat střídavou veličinu je mnohem snazší než stejnosměrnou. Proto klesá i nabídka výrobců stejnosměrných odbuzovačů. Nevýhodou

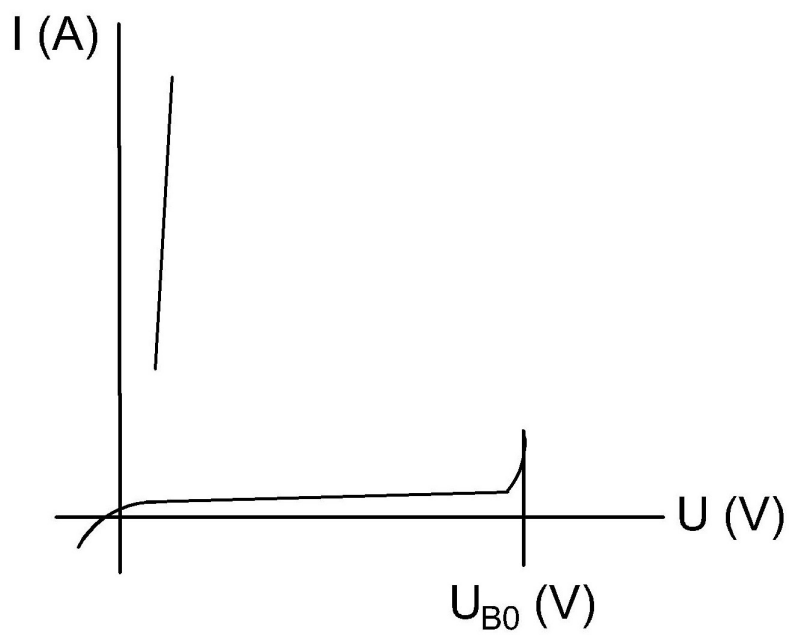
umístění odbuzovače na střídavé straně je ten, že se sice v případě poruchy odpojí napájení (ze střídavé strany), ale stejnosměrná strana stále může generovat nebezpečné veličiny. To znamená velké riziko pro celou soustavu. Z toho důvodu se umísťuje stejnosměrná ochrana crowbar. Podle obrázku 1.3 přepěťová ochrana (crowbar) pro systém s odbuzovačem pro spínání každé polarity obsahuje oddělovací diodu V1 (V3), bod diody V2 (V4) a omezovací odpor R1 (R2). Bod dioda (breakover diode) je spouštěcím článkem crowbar ochrany. Pokud přepětí dosáhne určité hodnoty, bod dioda přechází do nízkoimpedačního stavu. Procházející proud pak slouží ke spuštění tyristoru. Rozdíl oproti ostatním přepěťovým prvkům je, že bod dioda sleduje charakteristiku propustné větve tyristoru (obr. 1.4). Principiálně pak tedy funguje jako tyristor, který se spouští napětím. Po překročení zvoleného napětí, tyristor přebírá celý proud a napětí na bod diodě klesne na 0. Samotný tyristor je detailněji rozebírán v kapitole 1.2.4. Na obrázku 1.3 jsou zobrazeny směry proudů, pokud přepětí vytvoří rotorová indukčnost. Při přepětí vytvořené rotorovou indukčností je kladný potenciál nahoře a záporný dole. To představuje problém při vypínání ochrany. Proud má stále stejnosměrný charakter a neprochází 0. Z toho důvodu musí zareagovat regulátor buzení se zvýšením řídicího úhlu usměrňovače. Druhá větev crowbar ochrany pak chrání před přepětím přeneseným ze statoru. Polarity jsou zde obráceně než v předchozím případě, díky čemuž proud samovolně dojde k 0. Pro systém s jističem (odpínače) se přepěťová ochrana doplňuje obvodem, který ochranu spíná při vypnutí jističe (odpínače). Lze například použít stykač, který připojuje napětí na vypínací cívku a jeho kontakt pro obvod pro paralelní sepnutí tyristoru od vypínacího povelu (K, R3, V5). Předstih je zajištěn tím, že jističi trvá typicky 50 - 100 milisekund, než se po zadání povelu hlavní kontakt rozpojí. Pro absorpci vzniklé energie při rozpojení odbuzovače se používá rezistor. Rezistor se připojuje paralelně k rotorové cívice a má dvě základní varianty. První variantou je lineární rezistor, zde podle Ohmova zákona klesá proud společně s napětím. Hodnota odporu se volí jako 10x násobek rotorového odporu, jako kompromis mezi rychlostí odbuzení a vzniklého přepětí. Druhou variantou je rezistor nelineární, oproti lineárnímu rezistoru zde klesá proud rychleji než napětí. Nelineární rezistor se skládá z několika vrstev materiálů na bázi oxidů kovů, jako je oxid zinečnatý nebo oxid křemičitý. Tyto vrstvy jsou pečlivě stlačeny do pevného bloku a odděleny izolačními vrstvami, aby se zabránilo jejich přímému kontaktu. Když dojde k napěťovému rázu, odpor nelineárního rezistoru se dramaticky sníží, což mu umožní absorbovat přebytečnou energii a omezit nárůst napětí. Jeho hodnota odporu je značně menší než u lineárního [6, 8, 13, 14]. Problematice odbuzovacích odporů je věnovaná větší pozornost v kapitole 4.



Obr. 1.2 Obvod odbuzovače [13]



Obr. 1.3 Obvod crowbar [13]

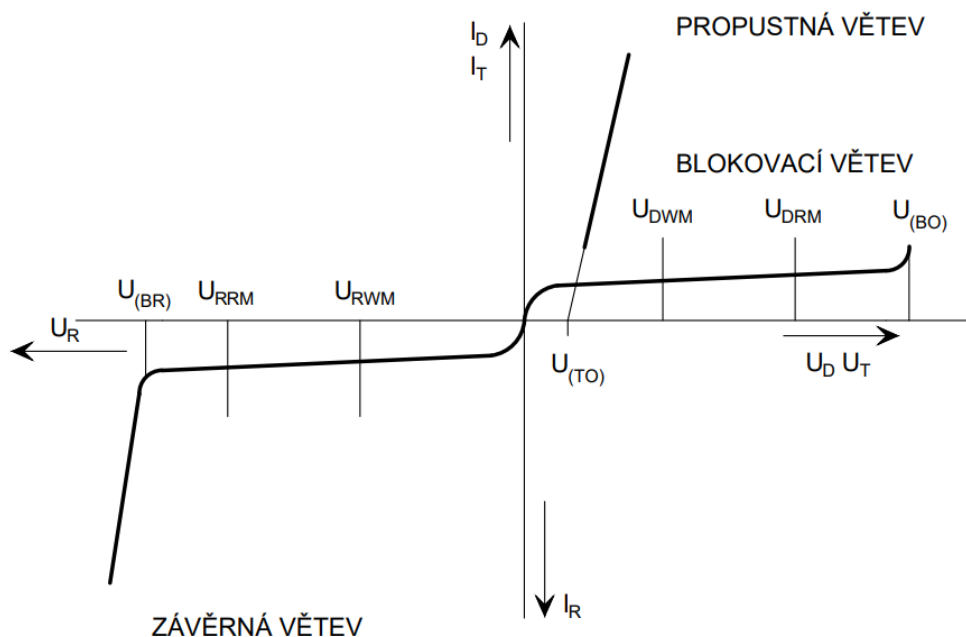


Obr. 1.4 Charakteristika bod diody [15]

1.2.4 Výkonový usměrňovač

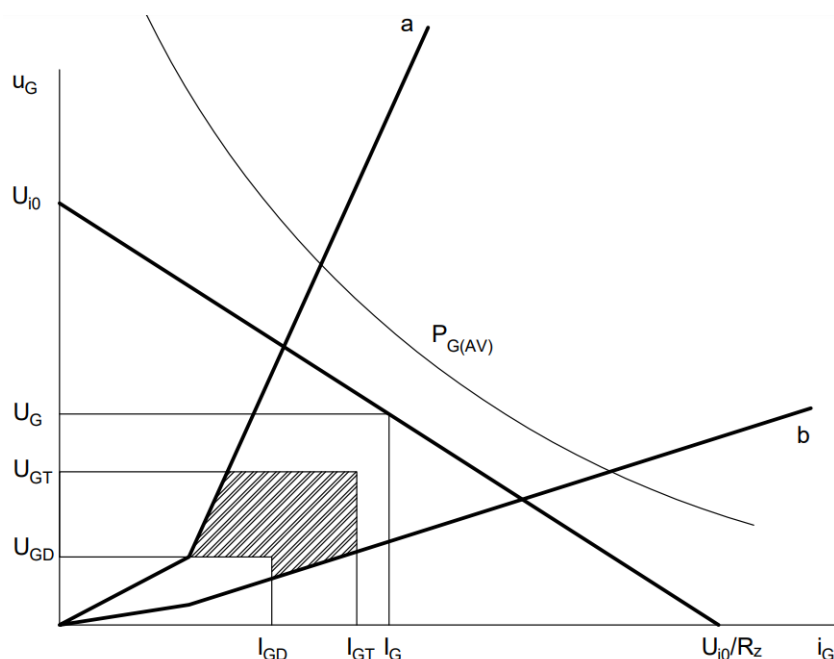
Jak vyplývá z textu uvedeného výše pro statickou budíčí soustavu o velkých výkonech se nejčastěji používá tyristorový usměrňovač. Samotný tyristor obsahuje tři PN přechody a má tři elektrody: anodu, katodu a hradlo. Pokud je anoda připojena na kladný potenciál, katoda na záporný (tzv. blokovací napětí) a je přiveden dostatečně velký proudový impuls na hradlo, tyristorem začne protékat proud od anody ke katodě. Pro vypnutí součástky je důležitý pokles proudu na nulu a opačná polarita napětí (závěrné napětí) než v předchozím případě. Vypnutí tyristoru nelze dosáhnout snížením proudu hradla. Pokles proudu je zajištěn vnějším obvodem, ve kterém je tyristor připojen. Výstupní Volt-Ampérová charakteristika tyristoru (obr. 1.5) ukazuje rozložení jeho 3 základních větví. Počínaje závěrnou větví, která je charakteristická závěrným napětím a velkým náhradním odporem $10^5 - 10^8 \Omega$. V části závěrné větve jsou obsaženy i limitující hodnoty napětí. Pokud amplituda závěrného napětí U_{RM} překročí stanovenou hodnotu $U_{(BR)}$. Vznikne závěrný proud, který je destruktivní pro přechod PN. Výrobce udává opakovatelné závěrné napětí U_{RRM} je nejvyšší možná hodnota, kterou se dá tyristor zatěžovat. Uvedené hodnotě napětí odpovídá proud I_{RRM} . Posledním vyznačeným napětím je U_{RWM} , které se vyskytuje v konkrétních případech. Velikost U_{RWM} se volí $1/3$ až $1/2 U_{RRM}$. U závěrné větve platí závislost na teplotě. S rostoucí teplotou vzrůstá proud I_R pro dané závěrné napětí U_R . Proud I_R narůstá i vyšším proudem hradla I_G . Vzniklý stav se označuje jako "tranzistorový efekt" a pro tyristor je nežádoucí. Důvodem je vznik přídavných ztrát, které zvyšují teplotu polovodivého materiálu a hrozí ztráta blokovací i závěrné schopnosti. Blokovací větev se podobně jako závěrná vyznačuje velkým odporem $10^5 - 10^6 \Omega$ a obsahuje významné body. Uvádí se nejvyšší hodnota blokovacího napětí pro danou aplikaci U_{DWM} . Výrobce daná možná nejvyšší hodnota opakovatelného blokovacího napětí U_{DRM} . A hodnota napětí $U_{(BO)}$ při které tyristor sepne i bez proudového impulsu. Takto provedené spínání se nedoporučuje, kvůli lavinovému násobení minoritních nosičů. U obou zmíněných větví se můžeme ještě setkat s nejvyšší hodnotou neopakovatelné špičkového napětí, které je uváděno výrobcem. Poslední větví je větev propustná, která se na rozdíl od 2 předchozích vyznačuje nízkým napětím ($U_T < 3 \text{ V}$) a velkým proudem. Propustná větev se dá parametrizovat přímkovou aproximací (1.2). Přímková aproximace je dána prahovým napětím $U_{(TO)}$ a tangentou úhlu, který svírá přímka s osou proudu i_T . Tangenta se označuje jako diferenciální odpor r_T .

$$u_T = U_{(TO)} + r_T \cdot i_T \quad (1.2)$$



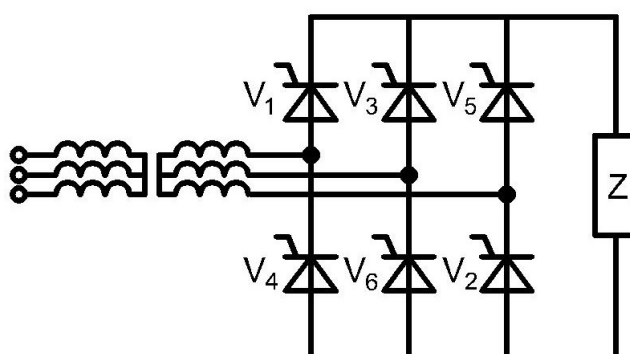
Obr. 1.5 Výstupní Volt-Ampérová charakteristika [16]

Jak je uvedeno výše, pokud se zvýší odpor vnějšího obvodu proud tyristoru poklesne. Přesněji k vypnutí je třeba, aby proud tyristoru poklesl pod danou hodnotu I_H . Nejmenší hodnota proudu I_H , při které se tyristor nachází v propustném se označuje jako vratný proud. S touto souvislostí se uvádí i přídržný proud I_L , který udává nejmenší hodnotu proudu při které se tyristor udrží v propustném stavu bez proudu hradlem. Obě hodnoty jsou definovány výrobcem. Pokud se uvedla výstupní VA charakteristika tyristoru je vhodné zmínit i vstupní. Vstupní VA charakteristika tyristoru vyjadřuje závislost mezi napětím U_G a proudem řídicí elektrody I_G . Poněvadž rozptyl vstupních charakteristik součástek stejného typu je značný, udávají se vždy dvě mezní charakteristiky (a, b), vymežující oblast, ve které se může vstupní charakteristika uvažovaného tyristoru pohybovat. Ve vymezené oblasti se vyskytují body u kterých je zaručeno sepnutí tyristoru. Pokud se plocha omezí minimálním napětím U_{GT} a proudem I_{GT} u kterých je zaručeno sepnutí. Získá se plocha ve které je zaručeno sepnutí v celém rozsahu pracovních teplot. Naopak oblast vymezená body U_{GD} a I_{GD} je oblast ve které nesepe ne žádný tyristor. Aby se zabránilo nadměrnému oteplení polovodiče je charakteristika ohraničena křivkou dovoleného ztrátového výkonu $P_{G(AV)}$. V charakteristice je dále vyobrazena zatěžovací charakteristika zdroje impulzů. Hraniční body jsou napětí zdroje naprázdno U_{i0} a zatěžovací odpor obvodu mimo hradlo R_z .



Obr. 1.6 Vstupní charakteristika tyristoru [16]

Třífázové usměrňovače vytvářejí obecně méně zvlněné napětí na výstupu a zatěžují napájecí transformátor menším obsahem harmonických oproti jednofázovým usměrňovačům. Nicméně, používaný šestipulzní můstkový usměrňovač je vlastně spojení dvou třípulzních uzlových usměrňovačů do série. Podle rozložení součástek na obrázku 1.7 se dá určit vedení proudu. Součástky V1, V3 a V5 (obr. 1.9) vedou proud při kladných půlvlnách napětí, zatímco součástky V2, V4 a V6 jsou proudem zatíženy při záporných půlvlnách napětí. V horní řadě bude dominantní ve vedení proudu ta součástka, která bude mít na své anodě největší kladný potenciál. Na zbývajících dvou součástkách bude závěrně napětí rovné sdruženému napětí příslušné fáze a fáze součástky, která je ve vedení. V dolní řadě bude naopak dominantní součástka s nejnižším potenciálem na své katodě, zbývajících dvě součástky mají závěrně napětí rovné sdruženému napětí své fáze a fáze dominantní diody.



Obr. 1.7 Třífázový můstkový šestipulzní usměrňovač [16]

Důležitým parametrem k popsání funkce usměrňovače je řídicí úhel α , tímto úhlem jsme schopni zpozdít otevření tyristoru a ovlivnit tak velikost výstupního napětí. Úhel α je zadáván řídicím impulzem na řídicí elektrodu tyristoru a jeho velikost může být od 0° do 180° . Přičemž hodnoty 180° se nedosahuje kvůli ohrožení usměrňovače, nebezpečí je v neuskutečnění komutace (invertorovému zkratu). Nastává stav kdy jednotlivé tyristory selhávají ve spínání. Ukázka řídicí charakteristiky je zobrazena na obrázku 1.8. V této charakteristice je zmíněn i invertorový chod usměrňovače (zde nejvíce hrozí neuskutečnění komutace), tento režim je přínosný k snižování velikosti proudu. Dále je vhodné zmínit bezpečnostní úhel usměrňovače δ , který předchází problému neuskutečnění komutace. Mnohem důležitější je však charakteristika z obrázku 1.9. Rotor generátoru o velkém výkonu má obecně velkou indukčnost (jednotky H). Z tohoto poznatku pak, při zanedbání některých veličin, k němu můžeme přistupovat jako k zátěži s indukčností blížící se k nekonečnu. Takto velká indukčnost vyhlazuje proudy do tvaru obdélníka, s tímto tvarem se mnohem lépe pracuje. První průběh ve zmíněné charakteristice, popisuje napětí na zátěži U_{dA} (horní řada usměrňovače) a U_{dB} (dolní řada usměrňovače). Dále jsou v tomto průběhu zobrazeny takty součástek V1 - V6 a velikost řídicího úhlu α . Řídicí úhel α se odečítá z charakteristiky od bodu v místě sepnutí diody (0°) k požadovanému úhlu otevření. Druhý průběh zobrazuje proudy dvou tyristorů V1 a V4. Na tento průběh pak navazuje třetí průběh, který zobrazuje průběh proudu ve fázi. Poslední průběh ukazuje usměrněné napětí a právě z tohoto průběhu se můstek jeví jako šestipulzní. S uvažováním průběhu na obrázku 1.9 se proud jeví jako nepřerušovaný. Pro střední a efektivní hodnoty proudů tyristorů platí rovnice 1.3 a 1.4. Rovnice vycházejí z integrace obdélníka (obr.1.9, 3. průběh) a využívají základní definice pro střední a efektivní hodnotu. Sekundárním vinutím budicího transformátoru protéká vždy střídavý proud obdélníkové průběhu totožný v kladných půlvlnách fáze 1 s proudem tyristoru V1 a v záporných půlvlnách s proudem tyristoru V4. Efektivní hodnota proudu vinutím transformátoru je dána vztahem 1.5. Výstupní usměrněné napětí je závislé na maximálním napětí a úhlu α , jak je ukázáno ve vzorcích 1.6 [17, 16, 18, 19, 20, 21]. Použití tyristorového usměrňovače obnáší vznik nechtěných vyšších harmonických. Výpočet vyšších harmonických není cílem této práce.

$$I_{V(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2}{3}\pi} I_d \cdot d\omega t = \frac{I_{d(AV)}}{3}, \quad (1.3)$$

$$I_{Ve} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2}{3}\pi} I_d^2 \cdot d\omega t} = \frac{I_{d(AV)}}{\sqrt{3}} = 0,577 \cdot I_d, \quad (1.4)$$

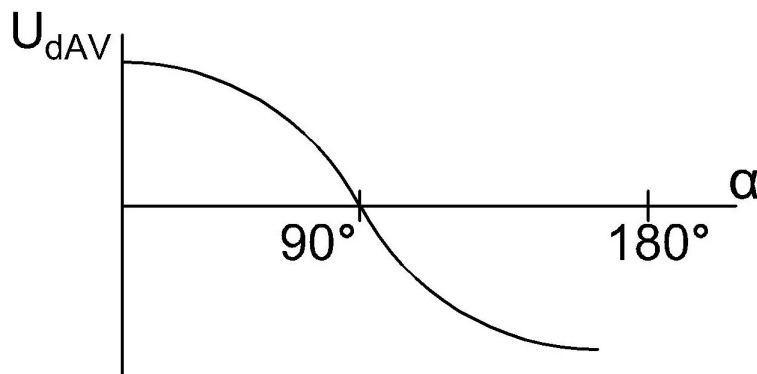
kde $I_{V(AV)}$ (A) je průměrný proud obdélníkové průběhu. I_{Ve} (A) je efektivní proud obdélníkového průběhu a $I_{d(AV)}$ (A) je střední hodnota usměrněného proudu.

$$I_{1e} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} I_{d(AV)}^2 \cdot d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{\pi} I_{d(AV)}^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{d(AV)}, \quad (1.5)$$

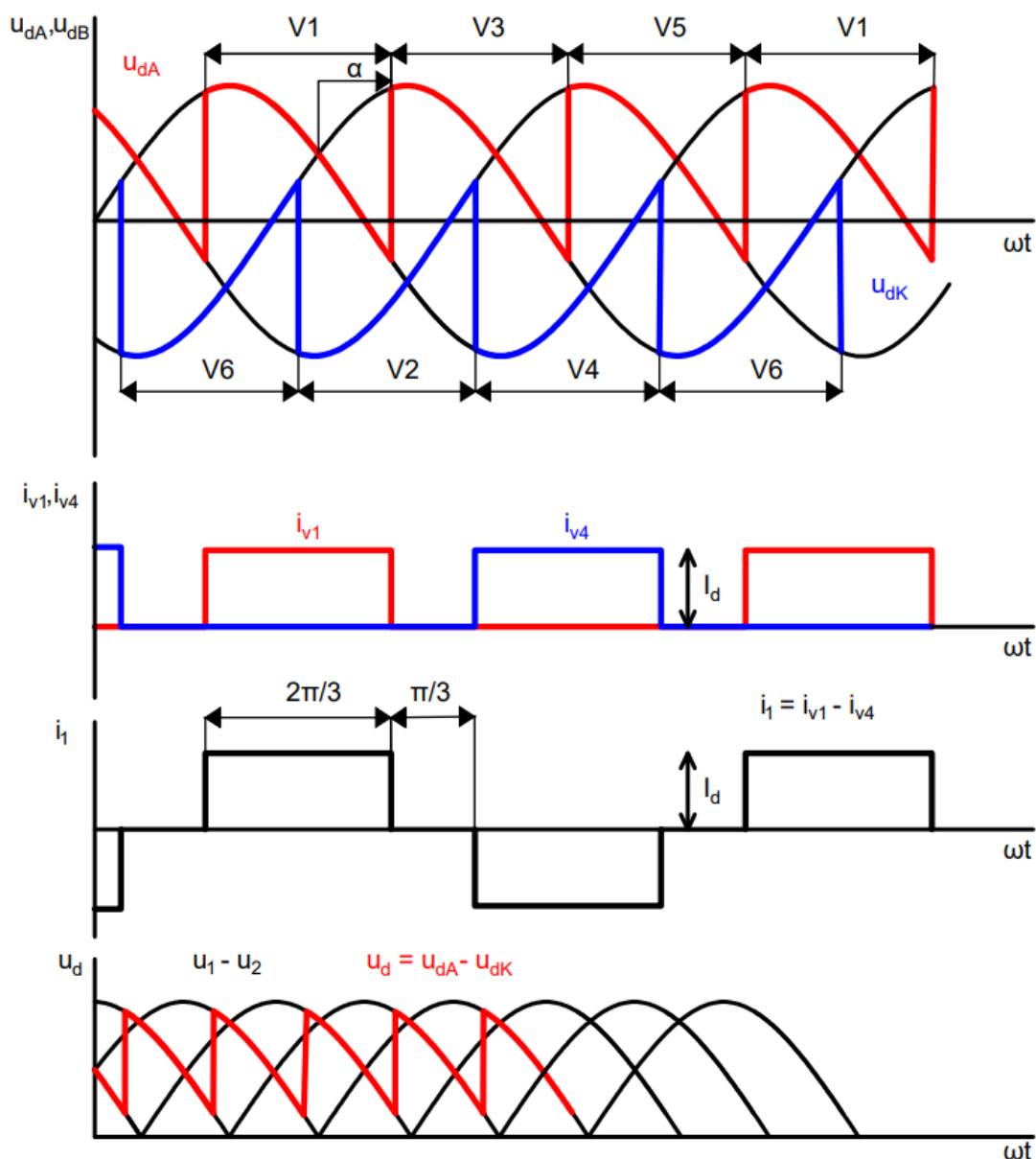
kde I_{1e} (A) je proud sekundárním vinutím budicího transformátoru a I_d (A) je střední hodnota usměrněného proudu.

$$U_{di} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha), \quad (1.6)$$

kde U_{di} (V) je výstupní usměrněné napětí, U_{di0} (V) je napětí při úhlu $\alpha = 0$ (maximální otevření) a α (-) je úhel řízení.



Obr. 1.8 Řídící charakteristika usměřovače pro RL s nepřerušovaným proudem [16]

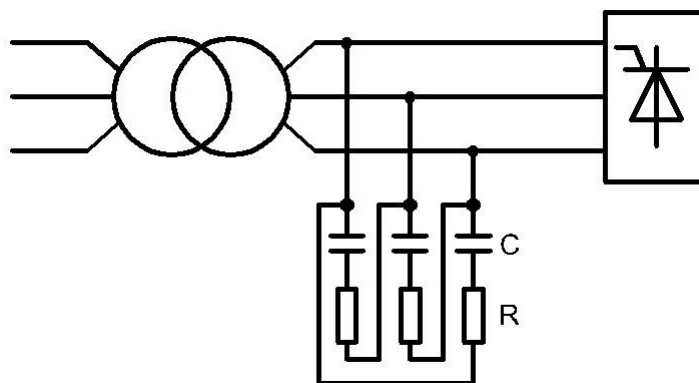


Obr. 1.9 Průběhy proudu a napětí plně řízeného trojfázového můstku při zátěži $L \rightarrow \infty$ [17]

1.2.4.1 Přepěťová ochrana

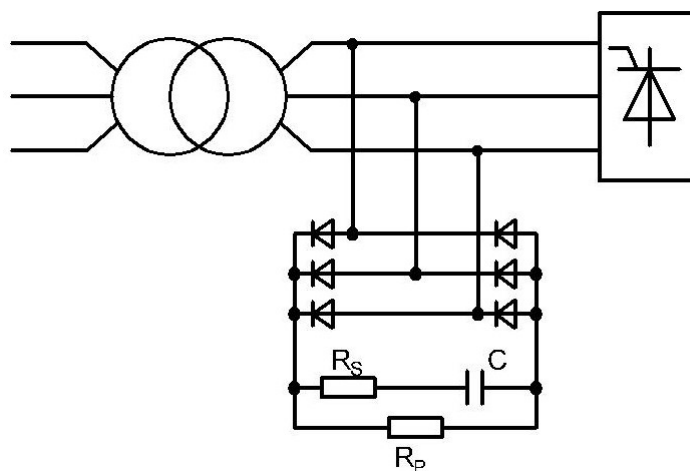
Hlavním úkolem přepěťové ochrany je ochrana tyristoru před zvýšeným napěťovým namáháním. Prioritou je zde úplné zabránění vstupu přepětí na součástku. V reálné aplikaci však ochrana přepětí pouze omezí, ale neodstraní. Přepětí může vzniknout na střídavé straně usměrňovače, přímo na usměrňovači nebo na stejnosměrné straně usměrňovače. Přepětí na střídavé straně jsou hlavně atmosférická nebo spínací. I když je u většiny objektů zajištěna ochrana proti atmosférickému přepětí bleskojistkami a dalšími ochranami. Tak se část přepětí přenesou přes budicí transformátor. Vypínání spínacích přístrojů dává za vznik spínacím přepětím. Pro usměrňovač je pak

zásadní přepětí, které vzniká při vypnutí magnetizačního proudu na primární straně budíčího transformátoru. Ukázka základní střídavé přepěťové ochrany je znázorněna na obrázku 1.10. Jedná se o sériové zapojení odporu R a kondenzátoru C , mezi přívodní sdružená napětí. Při přerušeném magnetizačním proudu budíčího transformátoru by měla být kapacita schopna pojmout vzniklou magnetickou energii. Tato metoda není často používána, z důvodu vzniku provozních ztrát a odporech R .



Obr. 1.10 Základní střídavá přepěťová ochrana [16]

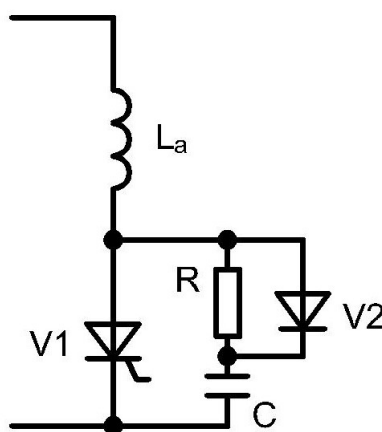
Daleko používanější je tzv. plovoucí ochrana (obr. 1.11). Název je odvozen od napětí na kondenzátoru, které se nabije na hodnotu U_{Smax} . A poté "plave" společně s amplitudou napájecího napětí. V okamžiku poruchy je přepětí přivedeno na kondenzátor přes příslušné diody. Zde podobně jako v předchozím případě je energie pohlcena kondenzátorem. Odpor R_P zde slouží jako vybíjecí odpor a odpor R_S jako omezovací odpor, který omezuje rychlost nabíjení kondenzátoru.



Obr. 1.11 Plovoucí přepěťová ochrana [16]

Kvůli nedokonalostem součástek je nutné chránit tyristor i před komutačním přepětím. Komutační přepětí jsou zejména způsobeny při komutaci součástek. Tato komutační přepětí jsou periodická a objevují se při každé

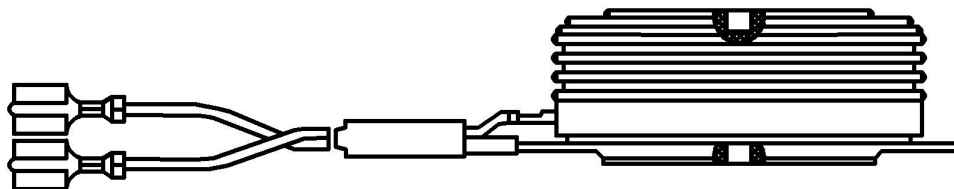
komutaci a jejich velikost při správně navržené komutační ochraně nepřevyšuje $1,3 U_{RWM}$. Komutační ochrana je uvedena na obrázku 1.12. Paralelně k tyristoru je zde připojen odpor R a kondenzátor C. Odpor má navíc paralelně připojenou diodu V2. Při vypnutí tyristoru začne zmíněným obvodem protékat proud, který odvádí komutační náboj Q_{rr} . Hrozí zde vznik přepětí kvůli nakumulované energii v indukčnosti L_a . Velikost přepětí se odvíjí podle velikosti parazitních kapacit obvodu. Tato energie se přenáší do kondenzátoru C. Pokud by tyristor V1 sepnul při nabitém kondenzátoru C hrozilo by jeho poškození. Proto se zařazuje odpor R a dioda V2, aby se kondenzátor C mohl vybíjet do určitého směru [6, 16, 22].



Obr. 1.12 Komutační ochrana [16]

1.2.4.2 Konstrukční provedení a chladič

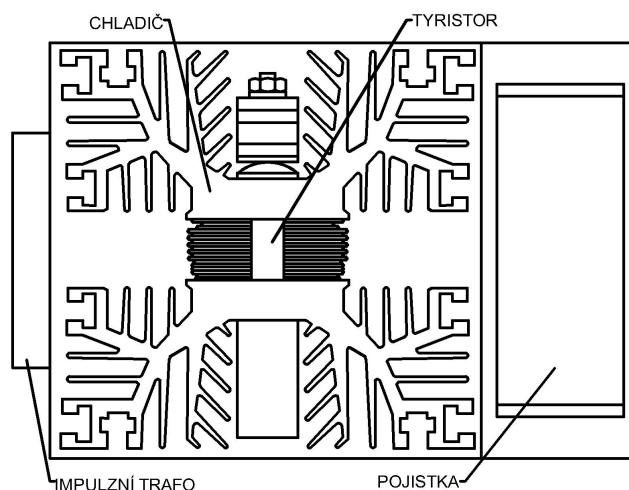
Samotný tyristor je vložen do pouzdra, které umožňuje přívod a odvod proudu, odvod tepla, izolační odolnost mezi elektrodami a hermetičnost. V současné době je používáno několik pouzder. Nicméně, kvůli stručnosti práce se bude popisovat pouzdro, které bylo použito v praktické části práce. Diskutovaným pouzdem je tedy pouzdro ve tvaru pastilky (obr. 1.13). Čelní kruhové plochy odvádějí proud i teplo do chladičů. Aby byl vytvořen dobrý tepelný přechod a dobré elektrické vodivé spojení, jsou chladiče přitlačeny pomocí vnější stahovací konstrukce. Vytváří se po celé ploše rovnoměrný kontaktní tlak.



Obr. 1.13 Pouzdro ve tvaru pastilky [23]

Jako u pouzdra existuje několik typů chladičů. Práce se bude zabývat pouze vzduchovým chladičem pro nucené chlazení. Velikost a tvar vzduchové chladiče se odvíjí od odváděných ztrát, rychlosti proudění chladičového vzduchu a použitým materiálem. Na obrázku 1.14 můžeme sledovat schéma tyribloku. Tyriblok je útvar zahrnující

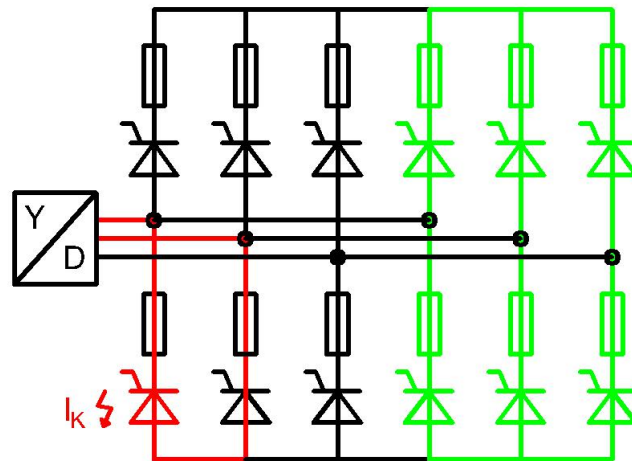
tyristor, chladič, impulzní transformátor a pojistku. Impulzní transformátor se často používá v obvodech s tyristory kvůli jeho schopnosti pracovat s vysokofrekvenčními impulzy a efektivně přenášet energii. Impulzní transformátor dokáže přenášet vysokofrekvenční impulzy, které se používají k řízení tyristorů, s velmi vysokou účinností. Pojistka slouží jako nadproudová ochrana.



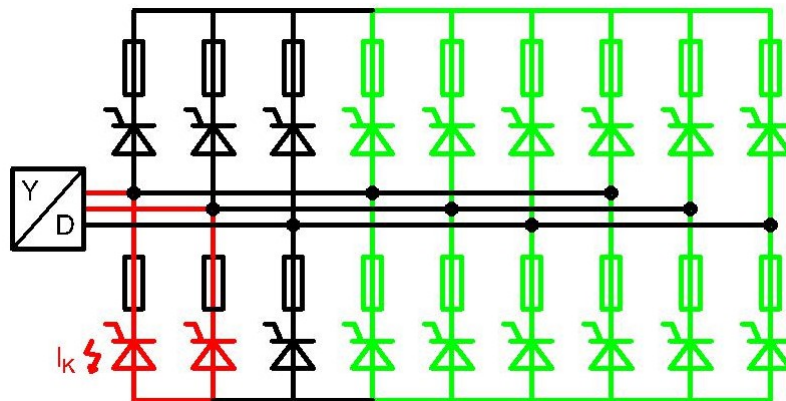
Obr. 1.14 Schéma tyribloku [24]

1.2.4.3 Provoz tyristorových můstků

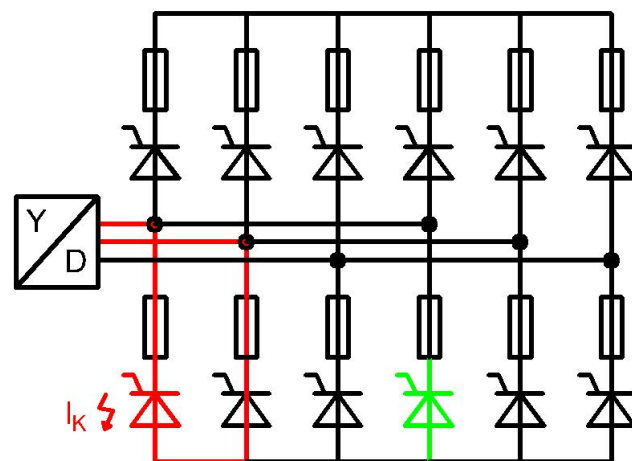
Pro zaručení spolehlivosti systému se často využívá paralelní kombinace dvou či více tyristorových můstků. Pokud dojde ke zkratu tyristorového prvku v důsledku poškození způsobeného přepětím nebo z jakéhokoliv jiného důvodu, odepnutí postiženého prvku obstarávají ochranné pojistky. Problémem je zde selektivita, pro nepřetržitý chod usměrňovače je důležité, aby pojistka správně odpojila vadný tyristor. Výsledek často závisí na charakteristice pojistky. Existuje několik způsobů zapojení můstků. První možností je zapojení 1+1, jeden můstek je v aktivním režimu, druhý v pohotovostním. V případě poruchy se vadný můstek odpojí a zátěž převezme nedotčený můstek. Z obrázku 1.15 si lze odvodit, že nedotčený prvek přebírá celý zátěžný proud I_n . Druhou možností je zapojení můstků N+1, běžné provedení obsahuje tři paralelní můstky (obr. 1.16), v tomto zapojení pracují všechny tři můstky paralelně. To znamená, že v provozu bez poruchy tyristorového prvku vedou tři prvky $I_n/3$ (platí pro kombinaci tří paralelně spojených můstků). Tím pádem pokud se na jednom prvku objeví zkrat, paralelní prvky přebírají $I_n/2$. U obou zmíněných zapojení nedochází k problému se selektivitou. Třetí možností je paralelní zapojení dvou můstky (obr. 1.17), které pracují současně. Toto zapojení využívá oba můstky zároveň, takže prvky vedou pouze $I_n/2$. V případě poruchy má bezporuchový prvek převzít proud z postiženého prvku a vést I_n . U tohoto zapojení hrozí největší problém se selektivitou, je nutné tedy správně nadimenzovat pojistku [25].



Obr. 1.15 Zapojení můstků pro provoz 1+1 [25]



Obr. 1.16 Zapojení můstků pro provoz N+1 [25]



Obr. 1.17 Paralelní provoz dvou můstků [25]

1.2.5 Regulátor buzení

Dle sekce 1.2 je regulátor nástrojem pro řízení budící soustavy. I když není regulátor součástí praktické části, je vhodné stručně nastínit jeho činnost. Práce se zaměří na typ regulátoru A50N od společnosti Brush, jelikož byl komponentou řešeného rozvaděče. Regulátor obsahuje mnoho funkcí, které umožňují přesné řízení napětí synchronního generátoru. Regulátor umožňuje nastavit požadované hodnoty napětí, proudů a výkonu generátoru, a to buď pomocí binárních (pulsních) vstupů, které upraví zadanou hodnotu, nebo pomocí analogových vstupů (např. přes komunikaci) nebo pomocí externího signálu. Regulátor pracuje v režimu automatického řízení, kdy se vypočítávají potřebné hodnoty napětí a proudu na základě nastavených parametrů a aktuálních podmínek provozu generátoru. Mezi další funkce regulátoru patří například ochranné funkce, které zajišťují spolehlivou ochranu generátoru před přetížením, nadproudovými událostmi, nadpětím, podpětím a dalšími nežádoucími stavy. Tyto ochranné funkce jsou implementovány pomocí různých algoritmů, které umožňují spolehlivou a rychlou detekci poruch a aktivaci odpovídajících ochranných opatření. Další důležitou funkcí regulátoru je automatické synchronizování generátoru. Tato funkce umožňuje snadné a bezpečné připojení generátoru k elektrické síti bez rizika poškození generátoru nebo sítě. Regulátor také obsahuje vestavěné komunikační rozhraní, které umožňuje snadné a rychlé připojení regulátoru k centrálnímu řídicímu systému. To umožňuje monitorování a řízení generátoru z jednoho místa a snižuje riziko chyb v provozu generátoru. Regulátor umožňuje také nastavit různé režimy provozu generátoru, jako jsou například režimy konstantního jalového výkonu, konstantního budícího proudu nebo konstantního napětí. Je i zde možnost nastavení různých parametrů a limitů, jako jsou například limity statorového / rotorového proudu, napětí, rychlosti změny napětí a další. Tyto limity jsou důležité pro ochranu generátoru před přetížením a zajišťují spolehlivý a bezpečný provoz generátoru. Další funkcí regulátoru je podpora různých typů senzorů a vstupů, jako jsou například senzory polohy rotoru, senzory proudu a napětí, vstupní signály pro řízení a synchronizaci generátoru a další. Regulátor také umožňuje nastavit různé typy signálů, jako jsou například analogové signály, digitální signály a sériové komunikační protokoly. Regulátor také umožňuje nastavit různé režimy a strategie pro řízení synchronizace generátoru s elektrickou sítí. Tyto režimy jsou navrženy tak, aby minimalizovaly nárazové proudy a zkraty při synchronizaci generátoru s elektrickou sítí [11, 9].

2 Návrh komponent

2.1 Projektová data

Tato kapitola se bude zabývat praktickým návrhem statické budicí soustavy generátoru k projektu AKSA Yalova. Pro správný návrh buzení je potřeba znát parametry generátoru nebo požadavky investora. Základní údaje generátoru k návrhu buzení jsou vypsány v tabulce 2.1. V tabulce 2.2 jsou uvedeny hodnoty pro buzení vybraného generátoru. A nakonec v tabulce 2.3 jsou zohledněny vnější vlivy v nichž se generátor nachází.

Tab. 2.1 Zadání generátoru

Statorové napětí	6,3	kV
Jmenovitý výkon	41	MVA
Statorový proud	3757,4	A
Účinnost	0,85	-
Jmenovité otáčky	3000	ot/min
Odpor rotoru při 20 °C	0,116	Ω
Odpor rotoru 130 °C	0,152	Ω
Časová konstanta T'_{d0}	7	s
Časová konstanta T'_d	0,8	s
Reaktance x_d	2,04	p.u.
Reaktance x'_d	0,32	p.u.

Tab. 2.2 Zadání buzení

Způsob zátěže	Budicí napětí (V)	Budicí proud (A)
Jmen. buzení naprázdno	42	362
Jmenovitá zátěž	161	1013

Tab. 2.3 Tabulka doplňujících dat

Max. okolní teplota	40 °C
Nadmořská výška	< 1000 m

2.2 Základní budící parametry

2.2.1 Napěťové meze usměrňovače

Výpočtem napěťových mezí usměrňovače se zjišťují maximální hodnoty napětí kterých je usměrňovač schopen dosáhnout. Kladná maximální hodnota napětí je vypočtena ve vzorci 2.1. Právě tato hodnota je většinou korigována investorem. Pokud není žádný požadavek, mez se uvádí jako dvojnásobek jmenovitého budící napětí, které je uvedeno v tabulce 2.2. Záporná hodnota se počítá ve vzorci 2.2. K získání záporné hodnoty se použije kladná hodnota a řídicí úhel α . Řídicí úhel byl zvolen 144° . Po přepočtu $\cos(144^\circ)$ pak vychází hodnota $-0,8$.

$$U_p = 2 \cdot U_{fN} = 2 \cdot 161 = 322 \text{ V}, \quad (2.1)$$

kde U_p (V) je horní mez napětí usměrňovače a U_{fN} (V) je jmenovité napětí při zátěži.

$$U_{pn} = \alpha \cdot U_p = -0,8 \cdot 322 = -257,6 \text{ V}, \quad (2.2)$$

kde U_{pn} (V) je dolní mez napětí usměrňovače, α ($^\circ$) je řídicí úhel a U_p (V) je horní mez napětí.

2.2.2 Budící transformátor

Sekundární napětí budícího transformátoru je vypočteno z kladné horní meze napětí usměrňovače. Konstanta 1,25 uvedena ve vzorci představuje inženýrský převod usměrněné hodnoty napětí na střídavou. V této konstantě jsou zahrnuty i nejistoty a provozní odchylky.

$$U_2 = \frac{U_p}{1,25} = \frac{322}{1,25} = 257,6 \text{ V}, \quad (2.3)$$

kde U_2 (V) je sekundární napětí budícího transformátoru a U_p (V) je horní mez napětí.

V tomto projektu byla hodnota sekundárního napětí budícího transformátoru zhotovena na zakázku s hodnotou 275 V.

Sekundární proud budícího transformátoru je vypočten z jmenovitého proudu usměrňovače a konstanty 0,82 převzaté z literatury [17]. Konstanta se používá pro získání efektivní hodnoty proudu sekundárem budícího transformátoru z hodnoty výstupního stejnosměrného proudu usměrňovače. Zvolení konstanty ovlivňuje například zapojení usměrňovače. Podrobný výpočet konstanty je uveden ve vzorci 1.5. Druhá konstanta obsažena ve vzorci počítá dimenzování soustavy. Soustava je tady dimenzována na 110 % budícího proudu generátoru

$$I_2 = 0,82 \cdot I_{fN} = 0,82 \cdot 1,1 \cdot 1013 = 913,7 \text{ A} \quad (2.4)$$

kde I_2 (A) je sekundární proud budícího transformátoru a I_{fN} (A) je budící proud při jmenovité zátěži.

Sdružený výkon transformátoru se klasicky vypočítá z napětí, proudu a odmocniny ze 3. Do rovnice se pak navíc ještě přidává konstanta 1,05 pro zohlednění vlivu harmonických.

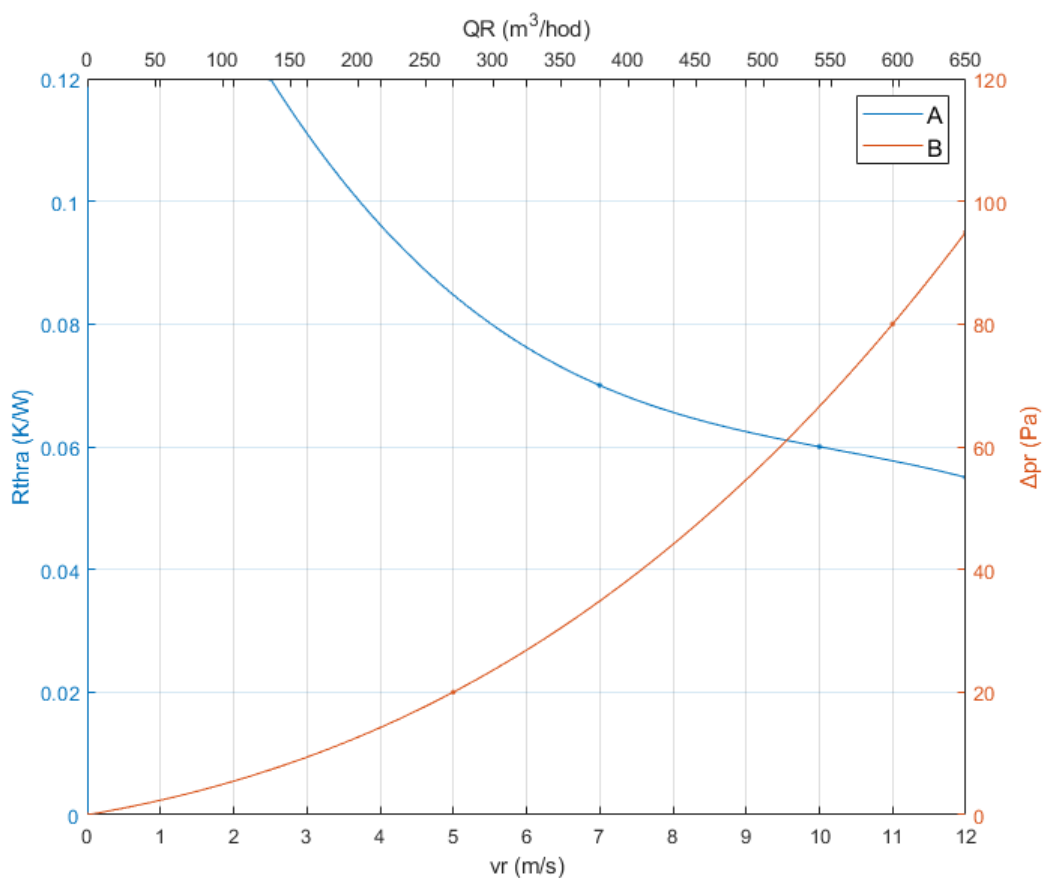
$$S_T = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot 1,05 = \sqrt{3} \cdot 275 \cdot 913,7 \cdot 1,05 = 457\,403,68 \text{ VA}, \quad (2.5)$$

kde S_T (VA) je sdružený výkon budícího transformátoru, U_2 (V) je sekundární napětí budícího transformátoru a I_2 (A) je sekundární proud budícího transformátoru.

Vypočtená hodnota výkonu transformátoru běžně neodpovídá vyráběným transformátorům, a proto se hodnota volí jako nejbližší vyšší. Pro tento případ se tedy volila hodnota 500 kVA. Standardním údajem transformátoru je napětí nakrátko, které může ovlivňovat funkci návrhu. Bohužel se v tomto návrhu výpočet zmíněného napětí nevyskytuje. Jelikož samotný výpočet se neprovádí ani ve společnosti Brush. Běžná hodnota veličiny je 4% - 8% (podle parametrů transformátoru) od výrobce.

2.3 Návrh chlazení usměrňovače

Všechny tyristorové jednotky (celkem 3) jsou usazeny uvnitř rozvaděče s přední ventilační mřížkou. V mřížce jsou dále vzduchové filtry jako ochrana proti prachu a udržení čistého vzduchu uvnitř rozvaděče. Pro uchlazení účinků jmenovitého proudu potřebuje tyristorový můstek nucené chlazení. Typ ventilátoru se nejvíce používá radiální. Jeho hlavní výhodou je, že může vyvinout vyšší tlak. Návrh ventilátoru se běžně provádí z křivky chladiče poskytované výrobcem. Křivka chladiče je důležitá pro zjištění potřebného tlaku a průtoku chladiva. Podle praktické zkušenosti se nejprve zvolí rychlost chladiva θ_r . Ta je většinou od 8 m/s do 10 m/s, důvodem je prakticky ověřená znalost pro dosáhnutí průtoku chladiva a zvládnutelných tlakových úbytků. Zvolená hodnota pro tuto práci byla 10 m/s. Chtěné hodnoty sledujeme z obrázku 2.1. Ze křivky A odečítáme hodnotu $R_{thra} = 0,06 \text{ K/W}$, která bude mít vliv na výpočet oteplení tyristoru. Křivka B nám dává údaj o tlakovém úbytku Δp_r , odečtem dostáváme hodnotu 70 Pa. Jelikož tyristorová jednotka obsahuje dva tyristory s chladiči za sebou musí být tato hodnota vynásobena 2x (rov. 2.6). Z dolní osy získáme informaci o potřebném průtoku, který činí $540 \text{ m}^3/\text{hod}$. Kvůli řazení tyristorových jednotek (tři tyristorové jednotky paralelně) je tato hodnota vynásobena jejich počtem, přesněji 3x (rov. 2.7). Pro lepší pochopení je uveden příklad na obrázku 2.2.



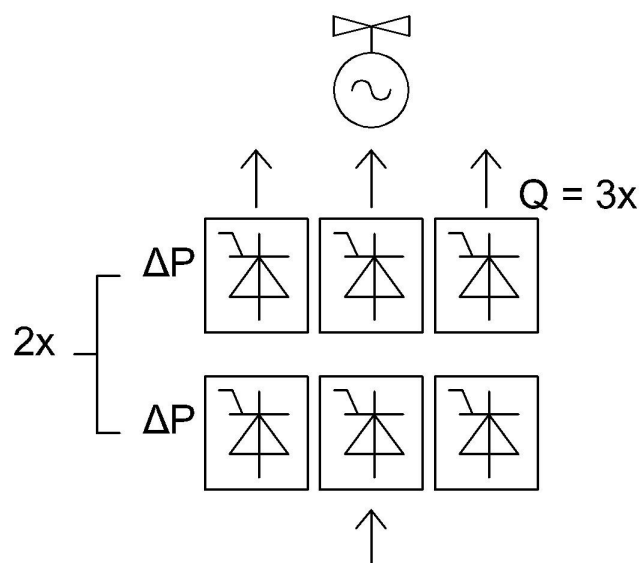
Obr. 2.1 Charakteristika chladiče [24]

$$\Delta P = 2 \cdot \Delta p_r = 2 \cdot 70 = 140 \text{ Pa}, \quad (2.6)$$

kde ΔP (Pa) je výsledný úbytek tlaku a Δp_r (Pa) je odečtený úbytek tlaku.

$$Q = 3 \cdot Q_R = 3 \cdot 540 = 1620 \text{ m}^3/\text{hod}, \quad (2.7)$$

kde Q (m^3/hod) je výsledný potřebný průtok a Q_R (m^3/hod) je odečtený průtok.



Obr. 2.2 Názorný příklad chlazení tyristorových jednotek

K návrhu ventilátoru patří i návrh filtrů. Filtry slouží k zamezení propuštění prachu a jiných nečistot do rozvaděče a běžně se usazují ve větším množství. Pro případ řešeného rozvaděče se uvažovaly 4 filtry. Nevýhoda filtrů spočívá v tom, že způsobují další tlakový úbytek. Úbytek je odlišný pokud jsou filtry čisté nebo zanesené. Proto se při návrhu ventilátoru musí tento úbytek brát v potaz. Dodavatel filtrů byl KLIMA-SERVICE a jejich použitý model byl G2. Jeden filtr má rozměry 280 mm x 280 mm s úbytkem tlaku 15/150 Pa (čistý/zanesený). Úbytek tlaku se rovnoměrně rozkládá na všechny filtry, proto je úbytek tlaku vydělen počtem filtrů. Pro čisté filtry platí rovnice 2.8 a pro zanesené rovnice 2.9.

$$\Delta P_{TOTAL_{min}} = \Delta P + \Delta P_{FILT_{min}} = 140 + \frac{15}{4} = 143,75 \text{ Pa}, \quad (2.8)$$

$$\Delta P_{TOTAL_{max}} = \Delta P + \Delta P_{FILT_{max}} = 140 + \frac{150}{4} = 177,5 \text{ Pa}, \quad (2.9)$$

kde $\Delta P_{TOTAL_{min}}$ (Pa) je minimální celkový tlakový úbytek, ΔP (Pa) je výsledný úbytek tlaku bez filtrů, $\Delta P_{FILT_{min}}$ (Pa) úbytek tlaku s čistými filtry, $\Delta P_{TOTAL_{max}}$ (Pa) je maximální celkový tlakový úbytek a $\Delta P_{FILT_{max}}$ (Pa) je úbytek tlaku se zanesenými filtry.

Ventilátor musí být schopen zvládnout největší tlakový úbytek. To znamená se zanesenými filtry. Vybraný ventilátor byl zvolen v programu FAN SELECT od společnosti ZIEHL-ABEGG. Parametry ventilátoru jsou uvedeny v tabulce 2.4.

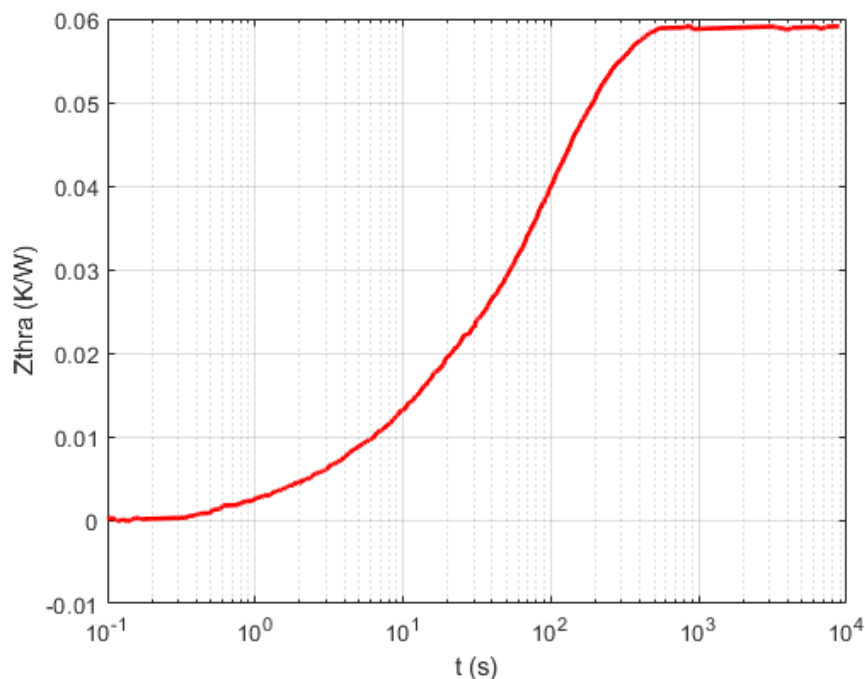
Tab. 2.4 Vybrané údaje zvoleného ventilátoru

typ	RH45V-6EK.6f.VR	
napětí	230	V
frekvence	50	Hz
příkon	337	W
průtok vzduchu	1642	m^3/h
tlak ventilátoru	183	Pa
otáčky	958	rpm
úroveň hluku	79	dB
hmotnost	16,2	kg

Po návrhu ventilátoru je zásadní vypočítat oteplení měniče. Oteplení měniče se spočítá jako výkon z parametrů tyristoru. Sledovaný tyristor byl zvolen od firmy ABB s označením 5STP 20f1601. Nejdůležitější parametry tyristoru jsou nastíněny v tabulce 2.5. V první řadě je nutné vypočítat výkon z jmenovité zátěže (rov. 2.10), tedy proudu obsaženém v tabulce 2.2. Celý vzorec se dělí 3, aby se dosáhlo hodnoty pouze na jednom tyristoru. Za druhé, se musí vypočítat oteplení při maximálním zatížení. Maximální zatížení pro zadaný měnič představuje hodnotu 1613 A. Pro celkové oteplení stačí použít rozdíl jmenovité od maximální hodnoty proudu, s výslednou hodnotou proudu pracuje vzorec 2.12. Aby se dosáhlo přímo teplot, oba vypočtené výkony se násobí hodnotami tepelných odporů. Tento postup popisuje vzorec 2.11 a 2.13. Tepelné odpory jsou uvedeny v katalogu tyristoru (příloha A). Rozdíl nastává v odporu mezi chladičem a chladičím médiem. U jmenovitého výkonu se dosazuje hodnota odporu nalezena v grafu 2.1. Pro maximální výkon se dosazuje hodnota impedance. Důvodem je doba trvání stropního proudu. Maximální stav se navrhuje pro dobu trvání cca 10 sekund. Takže se vlastně řeší přechodný stav a ne ustálený jako je to u jmenovité zátěže. Hodnotu impedance získáme podobně jako odpor z grafu. V sledovaném grafu 2.3 odečítáme hodnotu impedance z křivky pro rychlost 10 m/s a dobu trvání 20 sekund. Získaná hodnota je 0,015 K/W. Pro teplotu přechodu je nutné připočítat teplotu okolí (rov. 2.14). Celkovou teplotou se ověřuje teplotní namáhání součástky, mezní hodnota oteplení je opět uvedena v katalogu.

Tab. 2.5 Klíčové údaje tyristoru k výpočtu oteplení

U_{T0}	prahové napětí	0,948	V
r_t	vnitřní odpor	0,152	Ω
R_{thjc}	tepelný odpor mezi polovodičovou destičkou a základnou	16	K/kW
R_{thch}	tepelný odpor mezi základnou prvku a chladičem	4	K/kW

Obr. 2.3 Graf pro získání impedance Z_{thra} [24]

$$P = U \cdot I_d = ((U_{T0} + I_d \cdot r_t) \cdot I_d) / 3 = ((0,948 + 1013 \cdot 1,52 \cdot 10^{-4}) \cdot 1013) / 3 = 372,1 \text{ W}, \quad (2.10)$$

$$T = P \cdot (R_{thjc} + R_{thch} + R_{thra}) = 372,1 \cdot (0,016 + 0,004 + 0,06) = 29,77 \text{ K}, \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{max} = U \cdot I_d = ((U_{T0} + I_d \cdot r_t) \cdot I_d) / 3 = ((0,948 + 600 \cdot 1,52 \cdot 10^{-4}) \cdot 600) / 3 = 207,84 \text{ W}, \quad (2.12)$$

$$\Delta T_{max} = P \cdot (R_{thjc} + R_{thch} + Z_{thra}) = 207,84 \cdot (0,016 + 0,004 + 0,015) = 7,27 \text{ K}, \quad (2.13)$$

$$T_j = T + \Delta T_{max} + \theta_a = 29,77 + 7,27 + 40 = 77,04 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.14)$$

kde P (W) je tepelný výkon při jmenovité zátěži, U_{T0} (V) je prahové napětí tyristoru, I_d (A) je proud usměrňovačem, r_t (Ω) je vnitřní odpor tyristoru, T (K) je oteplení při jmenovité zátěži, R_{thjc} (K/W) je tepelný odpor mezi polovodičovou destičkou a základnou, R_{thch} (K/W) je tepelný odpor mezi základnou prvku a chladičem, R_{thra} (K/W) tepelný odpor mezi chladičem a chladícím médiem, Z_{thra} (K/W) je tepelná impe-

dance mezi chladičem a chladícím médiem, ΔP_{max} (W) je rozdílový maximální výkon, ΔI_d (A) je rozdílový maximální proud, ΔT_{max} (K) je oteplení při rozdílové maximální zátěži a θ_a ($^{\circ}C$) je teplota okolí.

K mezní hodnotě součástky která je 125° , se odečítá rezerva $10^{\circ}C$. Pokud tedy porovnáme výsledek ze vzorce 2.14 a zmíněné hodnoty, dostáváme uspokojivou výstupní hodnotu. Pro lepší náhled je postup vyobrazen ve vzorci 2.15.

$$\begin{aligned} T_j &\leq T_{jmax} - 10^{\circ}C & (2.15) \\ 77,04^{\circ}C &\leq 125^{\circ}C - 10^{\circ}C \\ 77,04^{\circ}C &\leq 115^{\circ}C \end{aligned}$$

Vypočtena hodnota vyhovuje maximální hodnotě oteplení uvedené v katalogu tyristoru.

2.4 Přepěťová ochrana

2.4.1 Střídává přepěťová ochrana

Na vstupu usměrňovače je umístěna plovoucí ochrana. Ochrana se navrhuje na vzniklou energii způsobenou poruchou. Ochranný kondenzátor má v použité standardní ochraně stanovenou kapacitu $32 \mu F$. Ochrana musí být schopna převzít energii z atmosférických a spínacích přepětí. Základní rovnice pro výpočet energie s kondenzátorem je rovnice 2.16. Jako plovoucí napětí je zde sekundární napětí budícího transformátoru. Nejvyšší napětí, které se může objevit je U_{RRM} . Rozdíl těchto napětí nám dá údaj o hodnotě napětí na plovoucí ochraně. Vypočtená energie s rozdílovým napětím, určuje kolik energie by měl být kondenzátor schopen přijmout i s energií od plovoucího napětí. Proto se rovnice 2.16 upravuje do podoby rovnice 2.17. Konstanta 1,3 pak v uvedeném vzorci představuje korekční faktor v případě, že očekávané napětí přesáhne svoji hodnotu.

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot U_c^2, \quad (2.16)$$

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (U_{RRM}^2 - (1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2)^2) = \frac{1}{2} \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot (1600^2 - (1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 275)^2) = 40 \text{ J}, \quad (2.17)$$

kde W_c (J) je elektrická energie kondenzátoru, U_c (V) je napětí na kondenzátoru, C_p (F) je kapacita ochranného kondenzátoru, U_{RRM} (V) je nejvyšší hodnota opakovatelného závěrného napětí na tyristoru a U_2 (V) je sekundární napětí budícího transformátoru.

Omezovací odpor plovoucí ochrany R_S se navrhuje podle parametrů transformátoru a opakovatelného špičkového napětí. Jedním z potřebných parametrů transformátoru je jeho činný výkon, který se určuje podle vzorce 2.18.

Výsledný činný výkon se aplikuje do vzorce 2.19. Tento vzorec určuje velikost potřebného omezovacího odporu. Konstanta 2,9 uvedena ve vzorci značí, že se jedná o 3f můstek.

$$P_T = S_T \cdot \cos\phi = 457403,68 \cdot 0,85 = 388\,793,128 \text{ W} \quad (2.18)$$

$$R_S = \frac{2,9 \cdot U_{RRM}}{\sqrt{f \cdot i_0 \cdot P_T \cdot C_p}} = \frac{2,9 \cdot 1600}{\sqrt{50 \cdot 3 \cdot 388793,128 \cdot 32 \cdot 10^{-6}}} = 108 \, \Omega, \quad (2.19)$$

kde P_T (W) je činný výkon budícího transformátoru, S_T (VA) je sdružený výkon budícího transformátoru R_S (Ω) je omezovací odpor plovoucí ochrany, U_{RRM} (V) je nejvyšší hodnota opakovatelného závěrného napětí na tyristoru, f (Hz) je frekvence obvodu, i_0 (A) je magnetizační proud, a C_p (F) je kapacita ochranného kondenzátoru.

Jako další se navrhuje vybíjecí odpor R_P . Tento odpor se navrhuje na základě požadované časové konstanty pro vybití kondenzátoru. Vzorec pro výpočet odporu R_P je odvozen z rovnice 2.20, kde je zvolena časová konstanta $\tau = 10^6$.

$$\tau = R_P \cdot C_p \rightarrow R_P = \frac{\tau}{C_p} = \frac{10^6}{32} = 31\,250 \, \Omega, \quad (2.20)$$

kde τ (s) je časová konstanta, R_P (Ω) je vybíjecí odpor plovoucí ochrany a C_p (μ F) je kapacita ochranného kondenzátoru.

Ochrana musí být také schopna převzít energii v případě odpojení primárního vinutí budícího transformátoru. Energie uložená v transformátoru se vypočítá podle rovnice 2.21.

$$W = \frac{1}{2} \cdot i_0 \cdot \frac{S_T}{\omega} = \frac{1}{2} \cdot 0,003 \cdot \frac{500000}{314} = 2,4 \text{ J}, \quad (2.21)$$

kde i_0 (A) je magnetizační proud, S_T (VA) je výkon budícího transformátoru a ω (rad/s) je úhlová rychlost.

2.4.2 Stejnoseměrná přepěťová ochrana crowbar

Pro správný návrh obvodu crowbar je třeba definovat jeho spouštěcí úrovně (napětí). Spouštěcí úroveň crowbar by měla být alespoň o 300 V menší než hodnota U_{RRM} . Proto se zavádí 1. podmínka (rov. 2.22). Jako další, se zavádí 2. podmínka (rov. 2.24), podle které nesmí napětí rotoru překročit 80 % testovacího napětí rotoru [26]. Poslední podmínka (rov. 2.25) určuje, že crowbar pracuje přes limity pracovního napětí. Po zohlednění všech podmínek je pak celkové rozmezí napětí určeno v rovnici 2.26. Hodnota horní meze napětí je zaokrouhlená hodnota k 0 z výsledku rovnice 2.24.

$$U_c < U_{RRM} - 300V \rightarrow U_c < 1600V - 300V \rightarrow U_c < 1300V \quad (2.22)$$

$$U_{TEST} = 10 \cdot U_{fN} = 10 \cdot 161 = 1610V, \quad (2.23)$$

$$U_c \leq 0,8 \cdot 1610 \rightarrow U_c \leq 1288V, \quad (2.24)$$

$$U_c \geq U_p \rightarrow U_c \geq 322V, \quad (2.25)$$

$$322V < U_c < 1200V \quad (2.26)$$

kde U_c (V) je spouštěcí napětí crowbar, U_{RRM} (V) je nejvyšší hodnota opakovatelného závěrného napětí na tyristoru, U_{TEST} je testovací napětí rotorové obvodu a U_p (V) je horní mez napětí.

Hodnota spouštěcího napětí pro stejnosměrnou ochranu crowbar byla do projektu zvolena 600 ± 50 V.

2.4.3 Odbuzovací rezistor

Odbuzovací rezistor byl pro tento projekt zvolen jako nelineární. I v tomto případě se musí vypočítat energie, kterou je třeba absorbovat. Pro základní výpočet energie se využívá vztah 2.27. Z parametrů generátoru se nahrazuje rotorová indukčnost násobkem odporu rotoru a jeho časovou konstantou ve vyšetřovaném provozu. Odpor se také může lehce nahradit pomocí napětí a proudu buzení (tab. 2.2). Podle časové konstanty se pak rozlišují 2 rovnice. V režimu naprázdno platí rovnice 2.28 a v jmenovitém (poruchovém) režimu rovnice 2.29. Pro chod naprázdno se tedy postupuje podle vzorce 2.30. Předložený analytický postup se v rámci této práce verifikuje numerickým výpočtem v kapitole 4.

$$W = \frac{1}{2} \cdot L_f \cdot I_f^2, \quad (2.27)$$

$$L_{f0} = R_f \cdot T'_{d0}, \quad (2.28)$$

$$L_{fK} = R_f \cdot T'_d, \quad (2.29)$$

$$W_0 = \frac{1}{2} \cdot R_f \cdot T'_{d0} \cdot I_{f0}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{fN}}{I_{fN}} \cdot T'_{d0} \cdot I_{f0}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{161}{1013} \cdot 7 \cdot 362^2 = 72,89 \text{ kJ}, \quad (2.30)$$

kde W_0 (J) je energie uložená v rotorové indukčnosti při stavu naprázdno, L_f (H) je rotorová indukčnost, I_f (A) je rotorový proud, L_{f0} (H) je rotorová indukčnost naprázdno, L_{fK} (H) je rotorová indukčnost při zkratu, R_f (Ω) je rotorový odpor, T'_{d0} (s) je časová konstanta naprázdno a T'_d (s) je časová konstanta při zátěži.

Dále se musí počítat s nejhorsím stavem z hlediska velikosti zkratového proudu. Nejhorší stav znamená 3 fázový zkrat na svorkách generátoru. Zkratový proud se vypočítá z poměru reaktancí a proudu naprázdno podle rovnice 2.31. Jedná se vlastně o zjednodušenou náhradu. Při zkratovém proudu se impedance zátěže blíží 0, podobně jako u proudu naprázdno. Dále se uvažuje, že použité reaktance v případě zkratu jako jediné omezují zkratový proud. Jinými slovy, zkratový proud zde znamená vzniklý proud přenesený magnetickým polem ze statoru na rotor při stavu zkratu na svorkách generátoru. Použitý vzorec pro energii je pak 2.32.

$$I_{fK} = \left(\frac{x_d}{x'_d}\right) \cdot I_{f0} = \left(\frac{2,04}{0,32}\right) \cdot 362 = 2307,75 \text{ A}, \quad (2.31)$$

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot R_f \cdot T'_d \cdot I_{fK}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{fN}}{I_{fN}} \cdot T'_d \cdot I_{fK}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{161}{1013} \cdot 0,8 \cdot 2307,75^2 = 338,57 \text{ kJ}, \quad (2.32)$$

kde I_{fK} (A) je proud na rotoru při zkratu, x_d (p.u) je podélná synchronní reaktance, x'_d (p.u) je přechodná podélná synchronní reaktance, I_{f0} (A) je rotorový proud naprázdno a W_k (J) je vzniklá energie v rotorové indukčnosti při zkratu.

Odbuzovací rezistor musí být schopen pojmout energii $3 \cdot W_0 = 3 \cdot 72,89 \text{ kJ} = 218,67 \text{ kJ}$. Hodnota energie se násobí 3. Uvažuje se, že při poruše buzení se může nabudit až na 3. pokus. Tím pádem se vytvořená energie maří pouze v odbuzovacím rezistoru. Ve druhém případě je energie $W_k = 338,57 \text{ kJ}$. Navrhovaný rezistor má kapacitu 1000 kJ, takže jsou pokryty obě možnosti. Navrhovaný rezistor je dále vybírán podle toho, aby přepětí během odbuzování bylo nižší než 0,8 budícího testovacího napětí při maximálním proudu (rov. 2.24). Parametry zvoleného rezistoru jsou uvedeny v tabulce 2.6.

Tab. 2.6 Údaje navrhovaného odbuzovacího rezistoru

Typ	METROSIL 600A/US14/P	
Napětí	1200	V
Proud	3000	A
Energie	1000	kJ

2.5 Odbuzování

V tomto oddílu se kontrolují časy úspěšného odbuzení. To znamená za jak dlouhou klesne rotorový proud na minimální hodnotu (tj. na nulu). Pro tento výpočet se vychází z rovnice 2.33. Rovnice se dále upravuje do požadovaného tvaru v ustáleném stavu. Odbuzování může být provedeno za prvé ze stavu naprázdno. Pro tento případ je nezbytné vypočítat rotorovou indukčnost s časovou konstantou T'_{d0} (rov. 2.34). V rovnici 2.35 se poté počítá zmíněný čas úspěšného odbuzení označený jako T_{D0} . V rovnici se objevuje i napětí na nelineárním rezistoru pro daný proud. Napětí se určí z katalogového listu rezistoru pro proud naprázdno. Postup se poté analogicky opakuje pro případ zkratu na svorkách generátoru v rovnicích 2.36 a 2.37.

$$\begin{aligned}
 u &= L_f \cdot \left(\frac{di}{dt}\right) & (2.33) \\
 \frac{u}{L_f} &= \frac{di}{dt} \\
 dt &= \frac{di}{\frac{u}{L_f}} \\
 T &= \frac{I}{\frac{U}{L_f}}
 \end{aligned}$$

kde u (V) je okamžitá hodnota napětí, L_f (H) je rotorová indukčnost, di (A) je derivace proudu, dt (s) je derivace času, T (s) je čas v ustáleném stavu, I (A) je proud v ustáleném stavu, U (V) je napětí v ustáleném stavu.

$$L_f = R_f \cdot T'_{d0} = \frac{U_{fN}}{I_{fN}} \cdot T'_{d0} = \frac{161}{1013} \cdot 7 = 1,11 \text{ H}, \quad (2.34)$$

kde L_f (H) je rotorová indukčnost, T'_{d0} (s) je časová konstanta naprázdno, U_{fN} (V) je jmenovité budící napětí a I_{fN} (A) je jmenovitý budící proud.

$$T_{D0} = \frac{I_{f0}}{\frac{U_{n10}}{L_f}} = \frac{362}{\frac{150}{1,11}} = 2,67 \text{ s}, \quad (2.35)$$

kde T_{D0} (s) je časová konstanta úspěšného odbuzení ve stavu naprázdno, I_{f0} je rotorový proud naprázdno a U_{n10} (V) je odečtené napětí na nelineárním rezistoru z katalogu při proudu naprázdno.

$$L_f = R_f \cdot T'_d = \frac{U_{fN}}{I_{fN}} \cdot T'_d = \frac{161}{1013} \cdot 0,8 = 0,1271 \text{ H}, \quad (2.36)$$

$$T_{Dk} = \frac{I_{fk}}{\frac{U_{n1k}}{L_f}} = \frac{2307,75}{\frac{922,8}{0,1217}} = 0,317 \text{ s}, \quad (2.37)$$

kde T_{Dk} (s) je časová konstanta úspěšného odbuzení při zkratu na svorkách generátoru, I_{fk} (A) je rotorový proud při zkratu na svorkách generátoru a U_{n1k} (V) je odečtené napětí na nelineárním rezistoru z katalogu při zkratovém proudu.

2.5.1 Návrh odbuzovače

Odbuzovač se navrhoval na střídavou stranu podle dosavadních údajů, které jsou uvedeny v tabulce 2.7. Parametry odbuzovače jsou pak uvedeny v tabulce 2.8.

Tab. 2.7 Potřebné údaje pro zvolení odbuzovače

Jmenovitá zátěž	831 A
Sekundární napětí budícího transformátoru	275 V
Stropní proud	2307,75 A

Tab. 2.8 Parametry odbuzovače

Typ	ARION - AIR CIRCUIT BREAKER
Jmenovitý proud	1000 A

2.6 Obvod počátečního nabuzení

Podle teoretického rozboru uvedeného v kapitole 1.2.1, má být obvod počátečního nabuzení schopen poskytnout 15 % jmenovitého napětí. Vezmeme-li v úvahu magnetizační křivku generátoru, úsek od počátku do 0,15 poměrné jednotky (dále jako per unit) se může považovat za přímku. Proto se může pracovat se vzorcem 2.38, který počítá potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení do rotoru stroje. Vypočtený proud je obvykle aplikován po dobu 10 s. Napětí obvodu počátečního nabuzení je počítáno dle vzorce 2.39. Součástí obvodu počátečního nabuzení je transformátor, který se navrhuje pro potřeby střídavého napájení (3x 400 V) obvodu počátečního nabuzení. Transformátor by měl mít na sekundární straně veličiny adekvátní pro potřebné stejnosměrné hodnoty ze vzorců 2.38 a 2.39. Sekundární napětí na transformátoru bude dle vzorce 2.40. Konstanta 4 V hradí úbytky na diodách. Sekundární proud je poté spočítán dle rovnice 2.41. Nakonec je vypočítán výkon transformátoru v rovnici 2.42. Údaje navrhovaného transformátoru jsou uvedeny v tabulce 2.9.

$$I_{PART} = 0,15 \cdot I_{f0} = 0,15 \cdot 362 = 54,3 \text{ A}, \quad (2.38)$$

kde I_{PART} (A) je potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení a I_{f0} (A) je rotorový proud naprázdno.

$$U_{PART} = R_f \cdot I_{PART} = \frac{U_{fN}}{I_{fN}} \cdot I_{PART} = \frac{161}{1013} \cdot 54,3 = 9 \text{ V}, \quad (2.39)$$

kde U_{PART} (V) je potřebné napětí obvodu počátečního nabuzení, R_f (Ω) je rotorový odpor, U_{fN} (V) je jmenovité budící napětí, I_{fN} (A) je jmenovitý budící proud a I_{PART} (A) je potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení.

$$U_{P2} = 4 + \frac{U_{PART}}{1,25} = 4 + \frac{8,64}{1,25} = 11 \text{ V}, \quad (2.40)$$

kde U_{P2} (V) je sekundární napětí transformátoru obvodu počátečního nabuzení a U_{PART} (V) je potřebné napětí obvodu počátečního nabuzení.

$$I_{P2} = 0,82 \cdot I_{PART} = 0,82 \cdot 54,3 = 44,5 \text{ A}, \quad (2.41)$$

kde I_{P2} (A) je sekundární proud transformátoru obvodu počátečního nabuzení a I_{PART} (A) je potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení.

$$S_{PART} = \sqrt{3} \cdot U_{P2} \cdot I_{P2} = \sqrt{3} \cdot 11 \cdot 44,5 = 850 \text{ VA}, \quad (2.42)$$

kde S_{PART} (VA) je výkon transformátoru při počátečním nabuzení, U_{P2} (V) je sekundární napětí transformátoru obvodu počátečního nabuzení a I_{P2} (A) je sekundární proud transformátoru obvodu počátečního nabuzení.

Tab. 2.9 Data 3f transformátoru pro obvod počátečního nabuzení

Jmenovitý výkon	1000 VA
Převod	400 - 12 V, 50 Hz
Zapojení	Yy0

Po návrhu transformátoru počátečního nabuzení je nezbytné navrhnout další komponenty obvodu počátečního nabuzení. Mezi tyto další komponenty se řadí 3 fázový neřízený usměrňovač. Usměrňovač je navrhován tak, aby byl schopný dodávat minimálně 200 A / 20 s (bez chlazení). Podmínkou u usměrňovače je aby jeho napětí U_{RRM} bylo větší nebo rovno rozdílu mezi stropním napětím U_P a maximální napětím transformátoru počátečního nabuzení na sekundární straně U_{P2} . Podmínku popisuje vztah 2.43. V tomto vztahu je i implementován bezpečnostní faktor o hodnotě 1,5. Specifikace navrhovaného usměrňovače jsou poté popsány v tabulce 2.10.

$$U_{RRM} \geq 1,5 \cdot (U_P - 2 \cdot U_{P2}) \geq 1,5 \cdot (322 - 2 \cdot 11) \geq 450 \text{ V}, \quad (2.43)$$

kde U_{RRM} (V) je opakovatelné závěrné napětí, U_P (V) je horní mez napětí usměrňovače a U_{P2} (V) je sekundární napětí transformátoru obvodu počátečního nabuzení.

Tab. 2.10 Parametry navrhovaného usměrňovače pro obvod počátečního nabuzení

Typ	B6U 250/335-200
U_{RRM}	1200 V
Stejnoseměrný proud	200 A / 20 s

V případě, že je třeba přerušit počáteční nabuzení v průběhu, musí se počítat s plným napětím počátečního nabuzení. Podle této skutečnosti se musí navrhnout stykač. Stykač byl vybrán s údaji popsány v tabulce 2.11.

Tab. 2.11 Parametry stykače pro obvod počátečního nabuzení

Počet pólů	4
Povelové napětí	220/240 V AC/DC
Jmenovitý proud	160 A

Jako ochrana usměrňovače byly zvoleny rychlé pojistky. Jmenovité napětí pojistek musí být větší než součet horní meze napětí U_P a maximální hodnoty napájecího napětí U_{P2} . Součet se poté dělí dvěma, protože jsou dvě pojistky v sérii, nebo má jedna kladný pól a druhá záporný. Tuto podmínku popisuje vztah 2.44. Parametry vybrané pojistky jsou uvedeny v tabulce 2.12.

$$U_{POJISTKA} \geq \frac{U_P + \sqrt{2} \cdot U_{P2}}{2} \geq \frac{322 + \sqrt{2} \cdot 11}{2} \geq 169 \text{ V}, \quad (2.44)$$

kde $U_{POJISTKA}$ (V) je napětí na pojistce, U_P (V) je horní mez napětí usměrňovače a U_{P2} (V) je sekundární napětí transformátoru obvodu počátečního nabuzení.

Tab. 2.12 Parametry pojistky

typ	P51R06 aR
jmenovitý proud	100 A
jmenovité napětí	440/690 V DC/AC

Další komponentou pro obvod počátečního nabuzení je jistič. Jistič se navrhuje podle primárního proudu transformátoru počátečního nabuzení. V rovnici 2.45 se primární proud transformátoru vypočítá z výkonu a napětí pro 3 fázové napájení. Dále je nutno započítat zapnutí transformátoru a tedy jeho velký rozběhový proud trvající 0,1 s. Rozběhový proud je počítán ve vzorci 2.46 jako 15 násobek primárního proudu.

$$I_{1PART} = \frac{S_{PART}}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,45 \text{ A}, \quad (2.45)$$

kde I_{1PART} (A) je primární proud transformátoru počátečního nabuzení, S_{PART} (VA) je sdružený výkon transformátoru počátečního nabuzení a U_s (V) je sdružené napětí sítě.

$$I_{INRUSH} < 15 \cdot I_{1PART} < 15 \cdot 1,45 < 21,75 \text{ A}(0,1 \text{ s}), \quad (2.46)$$

kde I_{INRUSH} (A) je rozběhový proud transformátoru počátečního nabuzení a I_{1PART} (A) je primární proud transformátoru počátečního nabuzení.

Poslední komponentou je ochranný odpor pro stejnosměrné napájení. Odpor se určoval z napětí výkonové baterie (220 V) a parametrů počátečního nabuzení. Postup je uveden ve vzorci 2.47.

$$R_{ff} \leq \frac{(0,8 \cdot U_{DC} - U_{PART})}{I_{PART}} \leq \frac{(0,8 \cdot 220 - 8,64)}{54,3} \leq 3,11 \Omega, \quad (2.47)$$

kde $R_{ff}(\Omega)$ je rezistor pro stejnosměrné napájení obvodu počátečního nabuzení, U_{DC} (V) je napětí výkonové baterie, U_{PART} (V) je potřebné napětí obvodu počátečního nabuzení a I_{PART} (A) je potřebný proud z obvodu počátečního nabuzení.

Je nezbytné podotknout, že projekt AKSA Yalova neměla stejnosměrně napájené počáteční nabuzení. Uvedené vzorce slouží pouze k ucelení s teoretickým rozbohem a k náhledu řešení problematiky.

Po návrhu poslední komponenty se vytvořilo zadávací schéma budící soustavy. Schéma navržené budící soustavy je nastíněno v příloze C. Po vypracování schématu se dokumentace zadala subdodavateli pro zkompletování budící soustavy (rozvaděče). Zkompletovaný rozvaděč se poté musel odzkoušet.

3 Zkoušky statické budící soustavy

K vyhledání a eliminaci chyb při výrobě rozvaděče buzení se využívá kusových zkoušek. Každá zkouška má svůj předpis a postup provedení. Kusovou zkouškou splní pouze ty rozvaděče buzení, které jsou plně funkční a ve shodě s projektovou dokumentací.

3.1 Formální shoda

Do této kategorie se řadí kontrola štítku a kompletnosti projektové dokumentace. Tento krok je na prvním místě. Správnost štítku a projektové dokumentace je zásadní pro začátek zkoušení. Pokud štítek nevyhovuje je třeba ho vyměnit. Jako další se kontroluje osazení přístrojů a jejich správná montáž. V případě špatné či nedostatečné projektové dokumentace je zapotřebí provést opravu nebo doplnění.

3.2 Prohlídka rozvaděče

Následující bod opět pracuje s projektovou dokumentací. Jedná se, ale už o manuální prověření správnosti spojů a zapojení. Každá svorka, vodič, zapojení i jejich označení musí souhlasit s projektovou dokumentací. Tato skutečnost se ověřuje multimetrem nebo vizuálně. U vodičů se ověřuje jejich uložení, zda jsou správně uloženy v žlabu či mimo něj. Důležité je i správné uchycení vodiče a kontrola dutinek. Nepřerušenosť izolace vodiče se poté kontroluje jen vizuálně. U holých vodičů, pasových vodičů a na usměrňovači rozvaděče se navíc provádí kontrola povrchových cest a vzdušné vzdálenosti. Vzdálenosti odpovídají požadavkům příslušných specifikací a musí být zachovány. Vzdálenosti jsou dány prostředím, jmenovitým napětím a stupněm znečištění. Rozvaděč buzení spadá pod stupeň znečištění 2. S kontrolou vodičů a jejich zapojení se také provádí kontrola usazení jednotlivých přístrojů. U odbuzovače je pak důležité zkontrolovat jeho funkci. Jedná se o kontrolu jeho motorového ovládání tak i jeho mechanického ovládání. Dále se provádí kontrola stykačů, relé, jističů, pojistek a jejich mechanických senzorů poruch. Zkouška se považuje za uspokojivou, pokud nedošlo ke zhoršení pracovních podmínek přístrojů, blokování a jestliže síla potřebná pro operace je prakticky stejná jako před zkouškou.

3.3 Dielektrická zkouška

Tato zkouška se provádí za účelem ověření elektrické pevnosti mezi jednotlivými celistvými obvody (24V (DC), 230V (AC), usměrněné budicí napětí atd.) rozvaděče navzájem a vodičem PE. Postup zkoušky je dán normou [27] a [28]. Rozvaděč musí být před zkouškou odpojen od jakéhokoliv vnějšího napájecího zdroje, umožňujícího jeho chod. Všechny spínací přístroje rozvaděče musí být zapnuty (jističe, pojistky, odbuzovač, atd.) a zkušební napětí musí být přivedeno do všech částí obvodu. Jednotlivé obvody jsou označeny písmeny A, B, C až X (závisí na množství obvodů) a čísla jejich svorek jsou uvedena v projektové dokumentaci. Jednotlivé svorkovnice v každé skupině se musí vodičově spojit za pomoci kabelu či pomocných propojek,

vývody těchto propojených skupin přivedeme mimo rozvaděč jako jeden vodič. Nejprve se změří izolační odpor mezi jednotlivými skupinami, aby nedošlo vlivem špatného zapojení k vodivému spojení mezi jednotlivými skupinami. Minimální odpor mezi jednotlivými skupinami nesmí být menší než-li 1 M Ω . Každá skupina má své specifické zkušební napětí, které je odvozeno od výše napětí jmenovitého a typu dané skupiny. Standardně jsou tyto v rozsahu od 500 V do 6 kV. Pro provedení dielektrické (napěťové) zkoušky se používá vysokonapěťový, regulovatelný, střídavý zdroj, například přenosný vysokonapěťový zdroj EP 501 280 (Rozsah 6 kV, 50 Hz). Měření probíhá následujícím způsobem skupina (například s označením "A") se připojí na jeden pól napájecího zdroje, všechny zbylé skupiny včetně vodiče PE se zapojí dohromady a připojí se na druhý pól napájecího zdroje. Po zapnutí zdroje se nastaví zkušební napětí na hodnotu uvedenou v projektové dokumentaci k dané skupině a testujeme 1 minutu. Dále se pokračuje se skupinou "B", která se připojí na jeden pól napájecího zdroje a testuje se opět proti všem ostatním pospojovaným skupinám, včetně skupiny "A". Takto se odzkouší všechny zbylé skupiny, kromě skupiny vodiče PE, která se sama proti ostatním skupinám netestuje. Při zkoušce je důležité dodržet ochranná opatření a neustále kontrolovat stav testu. Zkouška je úspěšná za předpokladu, že nedojde k průrazu elektrického proudu nebo přeskočku či k jinému vodivému či nízko-odporovému spojení mezi jednotlivými skupinami.

3.4 Kontrola izolačních odporů

Bezprostředně po napěťové zkoušce je nutné přesně změřit jednotlivé izolační odpory všech skupin mezi sebou. Měření probíhá ve studeném stavu, podobně jako u předchozí zkoušky se napětí volí od 500 V do 6 kV. Pro měření se použijeme měřicí přístroj izolačního odporu, který měří izolační odpor stejnosměrným napětím respektive proudem. Při měření se postupuje podobně jako při napěťové zkoušce, tedy nejprve se připojí na kladnou elektrodu vývod skupiny "A" a na zápornou potom všechny ostatní skupiny dohromady, včetně vodiče PE. Izolační odpory musí být větší než-li 1 M Ω , ve většině případů však vychází více než-li 20 G Ω , výjimkou jsou odpory skupiny s logickými vstupy, skupiny výstupu pro buzení generátoru a některé jiné.

3.5 Kontrola ochranných opatření

Opatření pro ochranu před dotykem živých částí je v rozvaděči provedeno většinou izolací živých částí a ochranou plastovými kryty, zabraňujícím dotyku živých částí. Je nutné zkontrolovat izolaci živých částí rozvaděče a správné upevnění plastových krytů nad neizolovanými částmi rozvaděče, jako je měnič, ochranný odpor generátoru (budiče), přívodní pasové vodiče výstupu buzení generátoru a jiné. Krytí skříně rozvaděče se zjistíme dle projektové dokumentace. Opatření pro ochranu před dotykem neživých částí jsou v rozvaděči provedena pomocí samočinného odpojení od zdroje. Celistvost ochranných obvodů musí být zkontrolována pomocí zkoušky injektáží proudu. Všechny kovové části rozvaděče, včetně dveří a případného krytu ovládacího panelu, musí být vodivě spojeny. Pohyblivé díly rozvaděče (např. dveře skříně) musí být propojené vodičem označeným barvou kombinací žluté a zelené s ochranným obvodem.

3.6 Zkouška elektrické funkce

Mezi zkoušky elektrické funkce se řadí několik zkoušek. První je kontrola napájecích zdrojů u které se vyhodnocuje stav napájení jednotlivých komponent. Po úspěšném ověření napájení se do regulátorů nahrává testovací program, pomocí kterého se mohou provádět další zkoušky. Zkoušky obsahují kontrolu logických vstupů a výstupů. Účelem zkoušek je ověřit funkčnost logických vstupů a výstupů regulátoru a ověřit správnost jejich zapojení v rozvaděči. Následuje kontrola analogových výstupů, zde se podobně jako v předchozím případě ověřuje funkčnost analogových proudových výstupů 4-20 mA. U této zkoušky je třeba zajistit externí napájení, jelikož analogové výstupy jsou pasivní. Další zkoušky budou popsány samostatně.

3.7 Test stejnosměrné přepěťové ochrany

Zkouška se provádí pomocí testeru přepěťových ochran. Testovací se připojuje na výstup budící soustavy, tedy paralelně k tyristorům přepěťové ochrany. Na jeho svorkovnici nastavíme nejbližší vyšší stejnosměrné napětí, než-li je spínací napětí ochrany. Před samotnou zkouškou je třeba vyzkratovat ochranný odpor generátoru a odpojit přídržný odpor na kterém je měřeno budící napětí, popř. i jiné obvody, které by umožnily průtok proudu jinudy než přes přepěťovou ochranu – např. zátěž používanou při měření charakteristiky měniče apod. To lze v některých případech provést příslušným jističem či pojistkami. Pokud je ochrana tvořena více paralelními větvemi tyristorů (redundance), je třeba vyzkoušet funkci každé větve zvlášť, přičemž ostatní větve je třeba alespoň na jedné straně odpojit. Po připojení a spuštění se tester začne nabíjet na zvolenou hodnotu, vzrůstající napětí může být sledováno na měřidle přístroje. Při nabíjení testeru, tedy v počátcích nabíjecí fáze svítí více potom se její jas zeslabuje a nakonec svítí trvale při sepnutí ochrany. Ve chvíli kdy nabíjecí napětí dosáhne hladiny spínacího napětí stejnosměrné ochrany, tyristor sepne a napětí poklesne a tyristorem prochází stálý proud. Spínací napětí přepěťové ochrany je tedy nutné odečíst z měřidla testeru jako nejvyšší hodnotu napětí před jeho poklesem. Poté se celá zkouška opakuje při opačně zapojeném smyslu napětí, aby se ověřila správnost funkce antiparalelně zapojeného tyristoru.

3.8 Zkouška měniče při malém zatížení

Cílem zkoušky je ověřit funkci tyristorového měniče a odečíst jeho charakteristiku. K zkoušce je vyžadováno vybavení o silovém napájení (obvykle zkušební transformátor), vhodném zatěžovacím odporu, voltmetru a osciloskopu. Zkouška se provádí připojením zatěžovacího odporu na výstup měniče. Na napájecí svorky rozvaděče se přivede jmenovité napětí měniče. Do regulátoru se nahraje testovací program s jehož pomocí se ověřuje správný sled fází napájení. Osciloskopem se zkontroluje přítomnost všech šesti pulsů na výstupu usměrňovače. Důležité je dodržet, aby osciloskop byl připojen přes oddělovací transformátor nebo aby pracoval z baterie. V testovacím programu se dále řídí otevření měniče. Pro určitou hodnotu otevření měniče se sleduje hodnota napětí. Napětí se kontroluje podle předepsaných kritérií. Pokud napětí neodpovídá nebo se mění nespokojitě. Musí se závada nalézt a odstranit.

3.9 Kontrola analogových vstupů

Účelem následujících zkoušek je provést kontrolu funkce a kontrolu správného nastavení měření analogových veličin. Pro tento typ zkoušek je potřeba přesný regulovatelný zdroj střídavého napětí a zdroj stejnosměrného napětí pro kontrolu měření budicího napětí.

3.9.1 Kontrola měření statorových veličin

Cílem této zkoušky je ověření správnosti měření statorového napětí a statorového proudu generátoru pomocí 3f pomocného zdroje. Prvním krokem je základní kontrola měření. Zde se kontroluje přítomnost všech napětí a proudů, jejich velikosti a vzájemné úhly. Dalším krokem je kontrola cejchování měření statorového napětí a statorového proudu. Z převodů měřicích transformátorů se vypočítá hodnota napětí a proudu na vstupu rozvaděče při jmenovitém napětí a proudu generátoru.

3.9.2 Kontrola měření napětí sítě a napětí generátoru pro srovnavač

Účelem této zkoušky je ověření správnosti měření napětí sítě a statorového napětí pro srovnavač (srovnávání napětí generátoru a sítě). Obě měření jsou jednofázová. Pro toto měření je třeba zdroj 100V/50Hz, který se připojuje na svorky měření napětí generátoru pro srovnavač a totéž napětí (kontrolují se i fázové rozdíly) se připojuje na svorky měření napětí sítě.

3.9.3 Kontrola měření napájecího napětí měniče

Účelem této zkoušky je ověření správnosti měření a kontrola sledu fází. Na příslušné svorky se připojí silové napájení. Poté se sériovým kabelem propojí zkoušený regulátor a počítač. Testovacím programem se provede ověření dat.

3.9.4 Kontrola měření proudu ventilátorem

Účelem této zkoušky je ověření měření proudu ventilátorem a nastavení logiky vyhodnocení poruchy ventilátoru. Měření proudu ventilátorem se necejchuje, je dáno kalibrací regulátoru. Ventilátor se pomocí testovacího programu uvede do provozu a zaznamená se jeho jmenovitý proud. Poté se ventilátor zabrzdí a zaznamená se jeho rozběhový proud. V posledním kroku se ucpe sání (případně výfuk ventilátoru) a opět se zaznamená jeho proud. Všechny proudy ventilátoru by měly splňovat dané předpisy.

3.9.5 Kontrola měření budicího proudu

Účelem této zkoušky je ověření správnosti měření a jeho případná korekce. Tuto zkoušku lze provést dvěma způsoby. Za prvé regulátor se odpojí od bočnicku a připojí se ke zdroji stejnosměrného napětí 0..250 mV. Může se použít běžný zdroj 0-30 V a odporový dělič. Odporový dělič musí být na výstupu dostatečně tvrdý ($R < 100$ ohmů). Za druhé buzení se spustí v režimu zkoušky ochrany. Výstup buzení se připojí na vhodnou induktivní

zátěž, jejíž odpor je srovnatelný se skutečným strojem. Obě metody pak opět vyžadují testovací program, jenž srovnává a kontroluje data.

3.10 Kontrola synchronoskopu

Synchronoskop (fázovač) zpravidla vyhodnocuje odchylku v amplitudě (ne vždy, záleží na typu) a fázi měřených napětí (vždy) a pokud tyto jsou v přednastavených mezích vydává fázovací impuls. Na synchronoskopu (dle typu) lze pomocí potenciometrů zpravidla nastavit meze povolené odchylky napětí, fáze a zpoždění blokového vypínače (udává de facto předstih pro vydání fázovacího impulsu). Obecně lze říci, že synchronoskop se připojuje 3 páry vodičů – 2 páry představují vstupní analogové signály z měničů (měřících transformátorů) napětí – napětí sítě a napětí generátoru, 3. pár je výstupní relé synchronoskopu, které vydává fázovací impuls (nebo funguje jako kontrolní obvod). Kontrola synchronoskopu vyžaduje 2 připojené testovací zdroje střídavého napětí (zpravidla 100 V st, 50 Hz) – v ideálním případě by alespoň jeden ze zdrojů měl mít nastavitelný kmitočet a amplitudu tak, aby šla generovat odchylka v napětí – ta se zkontroluje pomocí voltmetru (1 zdroj pevná amplituda, 2. nastavitelná amplituda) a odchylka fáze (nastavitelný kmitočet 1 zdroje, rozdílný oproti kmitočtu zdroje 2.) – pokud máme 2 zdroje shodné frekvence (např. 50 Hz) musí být oproti sobě alespoň fázově posunuté a mít alespoň trochu jiný kmitočet (např. 1 signál z autotransformátoru připojeného k síti – její kmitočet není přesně konstantní a 2. ze zdroje o kmitočtu (třeba i pevném) od sítě asynchronního). Takto lze ověřit, že synchronoskop detekuje odchylku napětí a měří fázový posun obou signálů a také lze ověřit, zda fázovací impuls je vydán v přednastaveném rozsahu odchylek napětí a fáze. Pomocí ohmmetru by mělo jít ověřit, zda relé synchronoskopu spíná – tj. zda je vydán fázovací impuls. Podle typu synchronoskopu tedy buď “dává napětí, nebo dává kontakt”. Je vhodné také ověřit obě polarity odchylek jak napětí, tak fáze a schopnost synchronoskopu vydat fázovací impuls pro všechny kombinace – fázování shora / zdola (jak ve frekvenci, tak v amplitudě).

4 Model obvodu crowbar

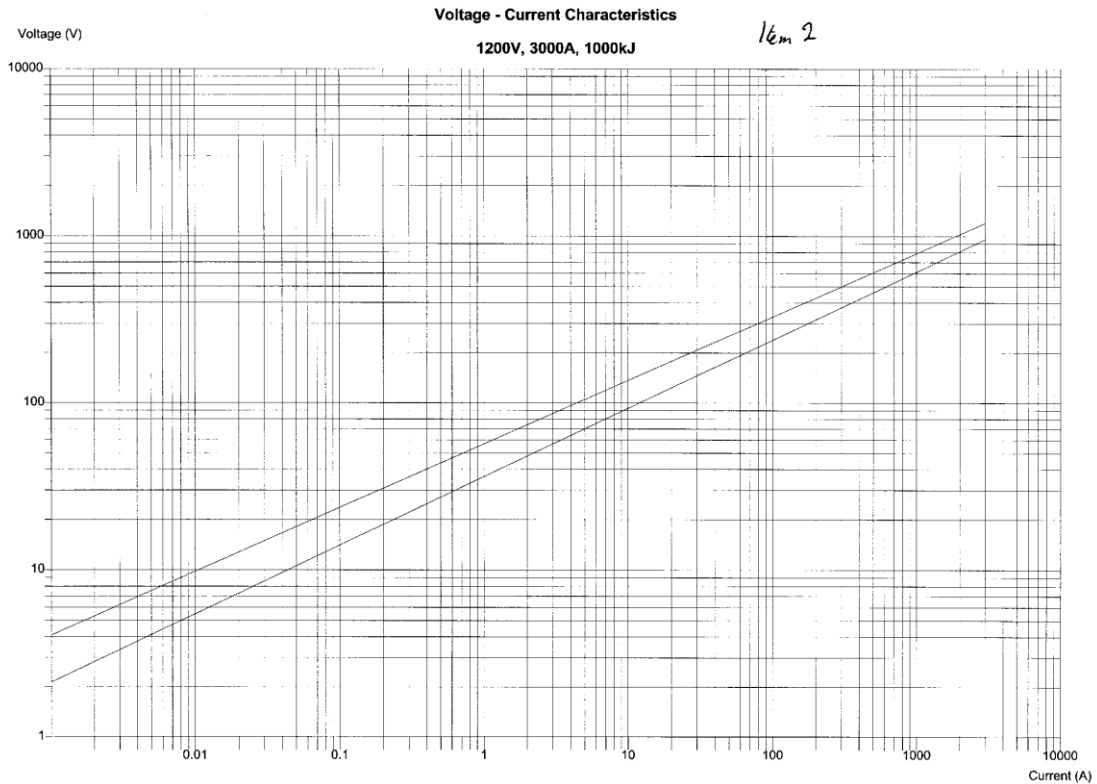
Cílem této kapitoly bylo namodelování a ověření výsledků s analytickým výpočtem pro výpočet potřebné energie nelineárního rezistoru. Mimo jiné se porovnával nelineární rezistor s lineárním. Lineární rezistor se v simulaci modeloval jako 10 násobek rotorového odporu. Pro úspěšné namodelování obvodu crowbar s nelineárním rezistorem, bylo důležité nejprve namodelovat charakteristiku samotného rezistoru. Z literatury společnosti Metrosil (příloha B) vyplývá, že pro výpočet napětí a proudu se užívají vztahy 4.1 a 4.2. Kde K (nebo H) a β ($=1/\alpha_r$) jsou konstanty pro jakýkoliv odpor. Hodnota K (nebo H) závisí na fyzikálních rozměrech rezistoru, jeho složení a výrobním procesu. Skutečné hodnoty K se mohou pohybovat od méně než 30 do 100 000. Hodnota β také závisí na složení a výrobním procesu a lze ji docílit tak, aby měla hodnotu od 0,14 do 0,5 ($\alpha_r=7$ až 2).

$$I = H \cdot U^{\alpha_r}, \quad (4.1)$$

$$U = K \cdot I^{\beta} \quad (4.2)$$

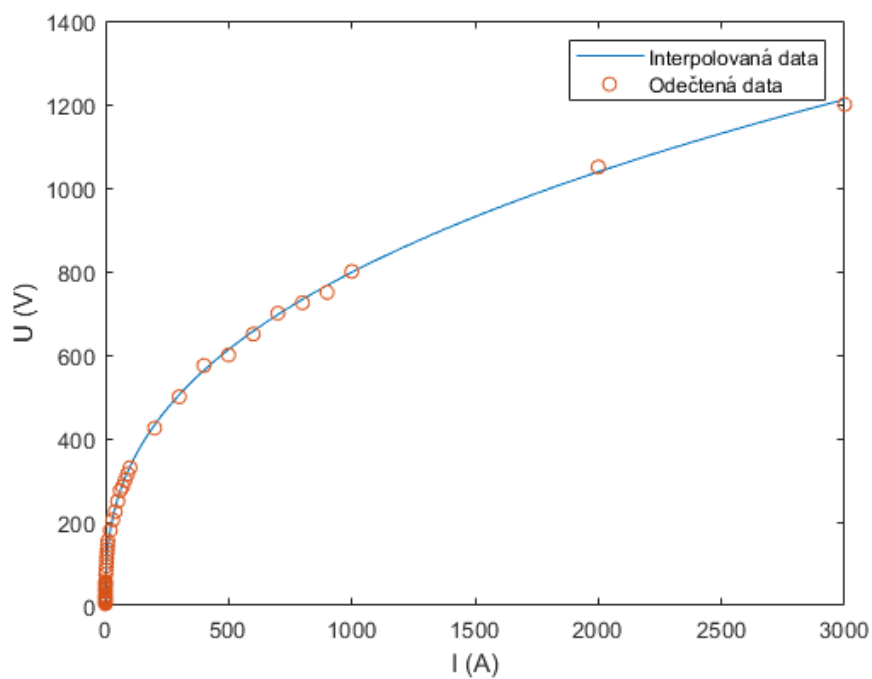
kde I (A) je proud nelineárního rezistoru, H / K (-) je materiálová konstanta nelineárního odporu, $\beta / 1/\alpha_r$ (-) je materiálová konstanta nelineárního odporu a U (V) je napětí nelineárního rezistoru

Pro zjištění koeficientů materiálových konstant se tedy nejprve odečetly body z VA charakteristiky s logaritmickou stupnicí pro zvolený rezistor. Zvolený rezistor byl podle sekce 2.4.3 1000 MJ. Snahou bylo odečíst co nejvíce bodů pro co nejpřesnější výpočet. Použitý graf byl poskytnut společností Metrosil a je uveden na obrázku 4.1.

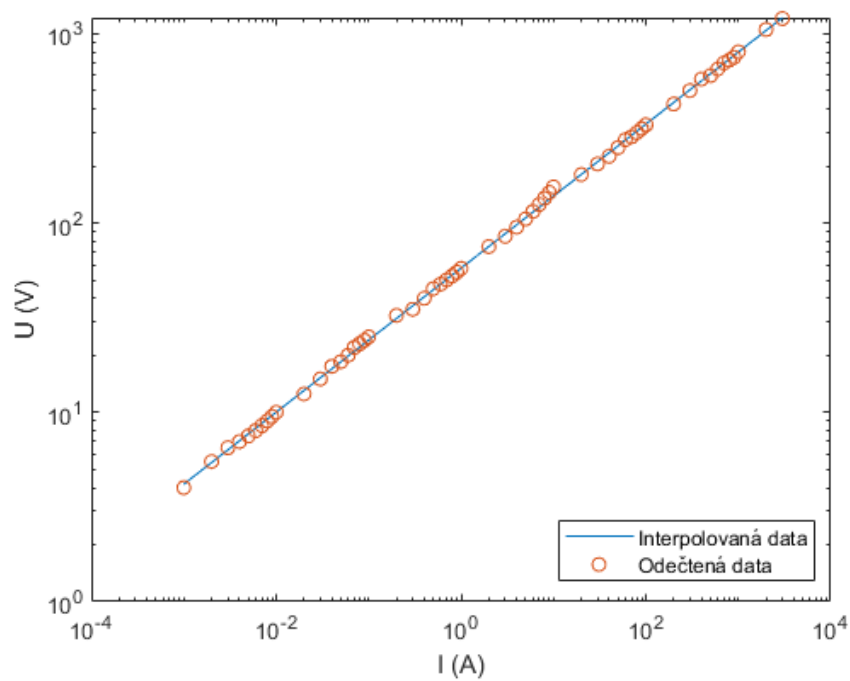


Obr. 4.1 Graf pro odečet bodů nelineárního rezistoru [29]

Pro odečtené body se vytvořil jednoduchý kód v programu MatLab (příloha D). Program měl za úkol z odečtených bodů nalézt koeficienty materiálové konstanty K a β . Z obrázků 4.2 a 4.3 jdou vidět odečtené body z grafu a jejich proložení v programu Matlab. Obrázek 4.2 ukazuje křivku v kartézských souřadnicích a představuje vytvořenou VA charakteristiku pomocí kódu. Zatímco obrázek 4.3 ukazuje křivku na logaritmické stupnici a ověřuje jestli se křivka pohybuje v rozmezí křivek uvedených na obrázku 4.1. Oba grafy poukazují na správnost odečtených dat a jejich správném proložení.



Obr. 4.2 Proložené body v kartézských souřadnicích

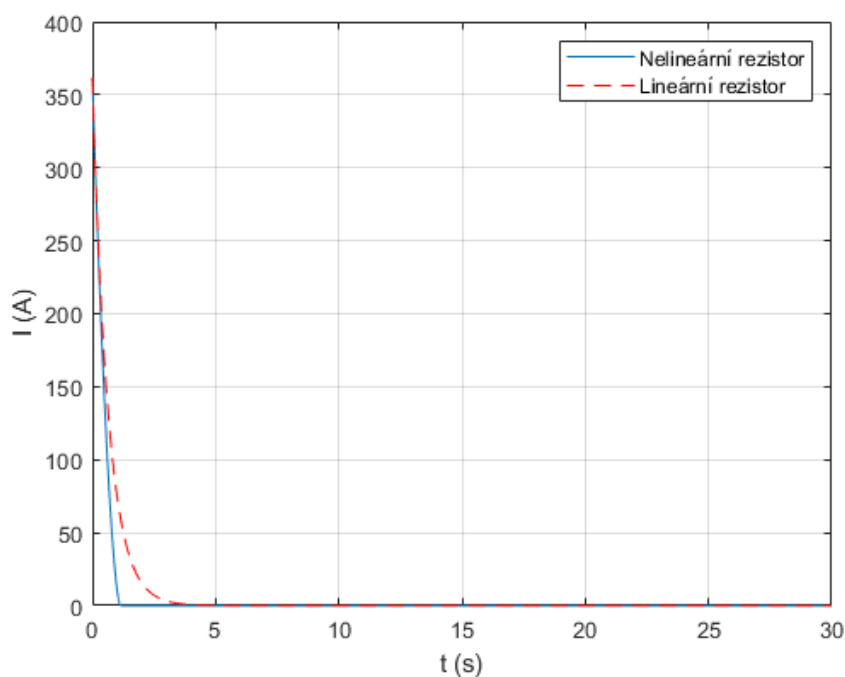


Obr. 4.3 Proložené body na logaritmické stupnici

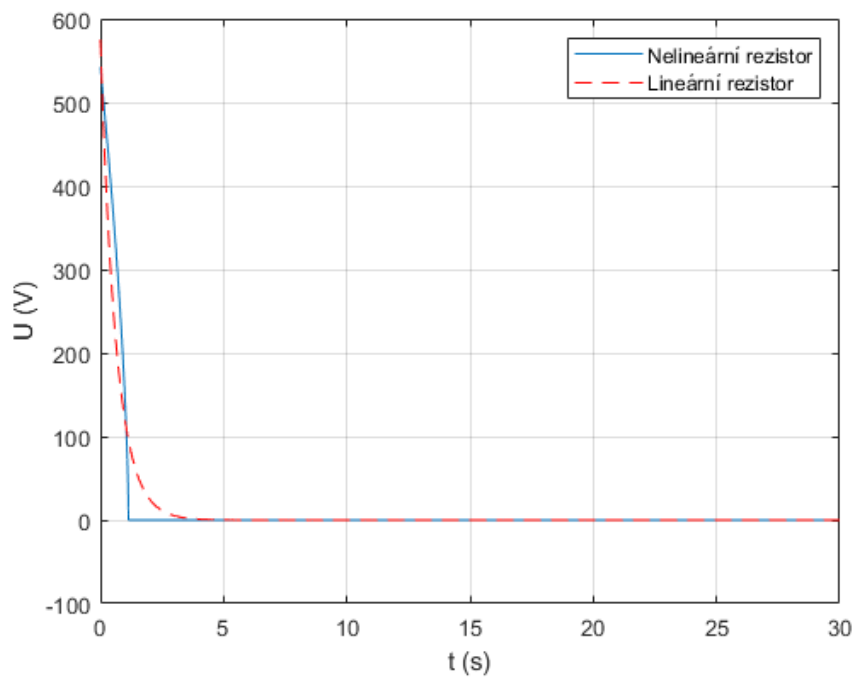
Výsledné koeficienty vycházejí následovně: $K = 57,7021$ a $\beta = 0,38$. Tímto výsledkem se tedy také potvrzuje správnost výpočtu, jelikož oba výsledky jsou v daných mezích. Se zjištěnými koeficienty se mohlo přistoupit k samotnému výpočtu energie. Obvod se řešil numericky opět v programu MatLab (příloha E).

4.1 Stav naprázdno

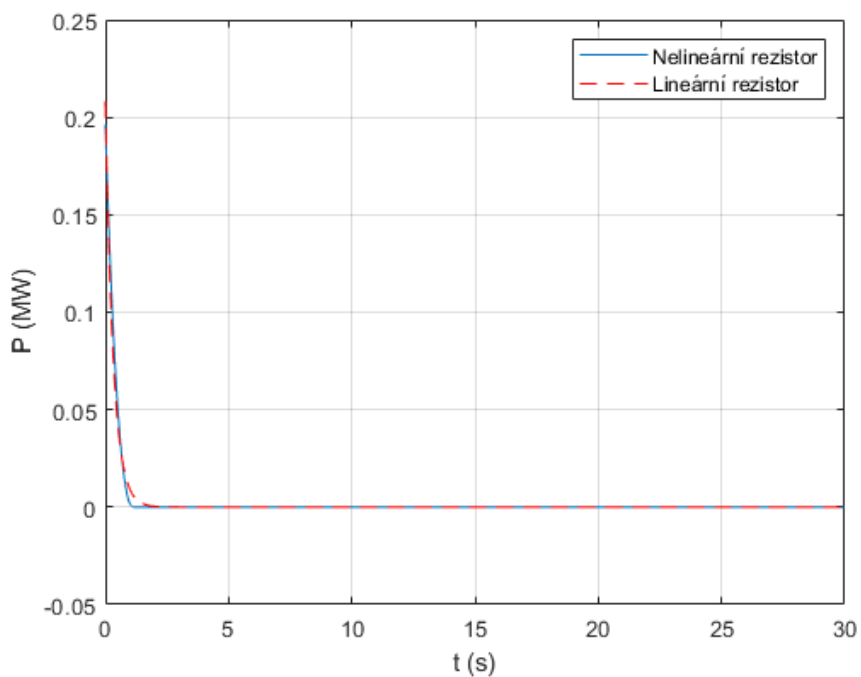
Prvním řešeným stavem byl chod naprázdno s časovou konstantou $T'_{d0} = 7$ s a proudem $I_0 = 362$ A. Simulace vyhodnocovala následující parametry: čas kdy napětí a proud poklesnou k nulové hodnotě, výkon na rezistoru a energii zmařenou na rezistoru. U řešeného stavu naprázdno se průběhy proudu a napětí obou rezistorů mohou sledovat na obrázcích 4.4 pro proud a 4.5 pro napětí. Výkony jsou uvedeny na obrázku 4.6 a energie pak na obrázku 4.7. Průběhy trvají do nekonečna, protože simulace nebyla řádně ošetřena na předání energie z odbuzovacího rezistoru do okolí. V rámci práce tato chyba nijak nevadí, jelikož se zjišťují hlavně maximální hodnoty.



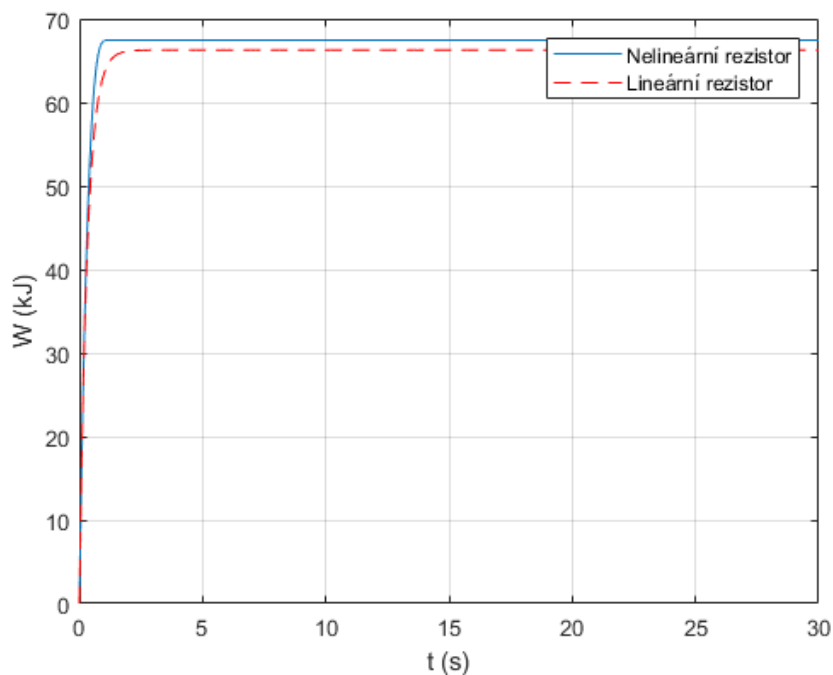
Obr. 4.4 Průběhy proudů jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno



Obr. 4.5 Průběhy napětí jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno



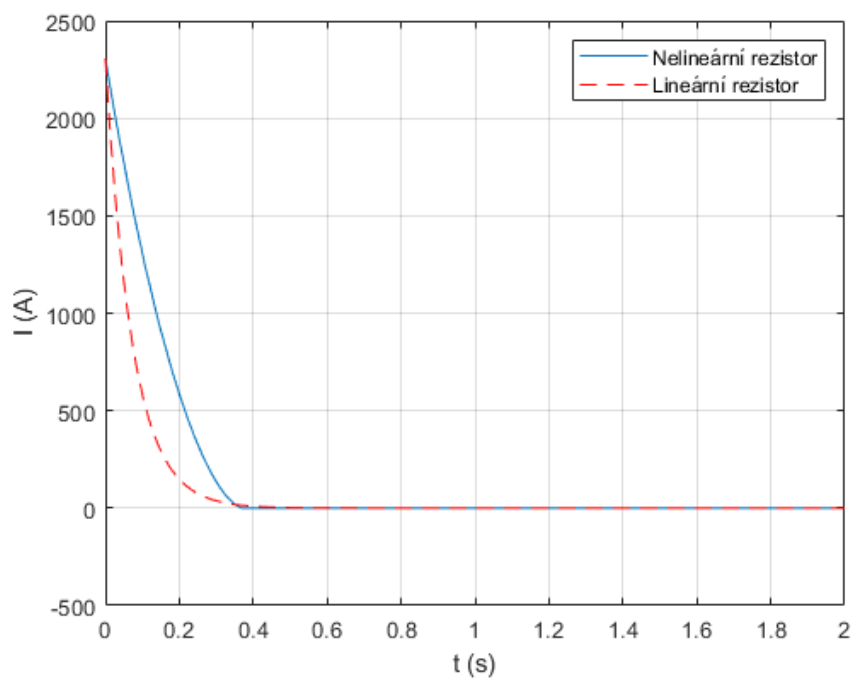
Obr. 4.6 Průběhy výkonů jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno



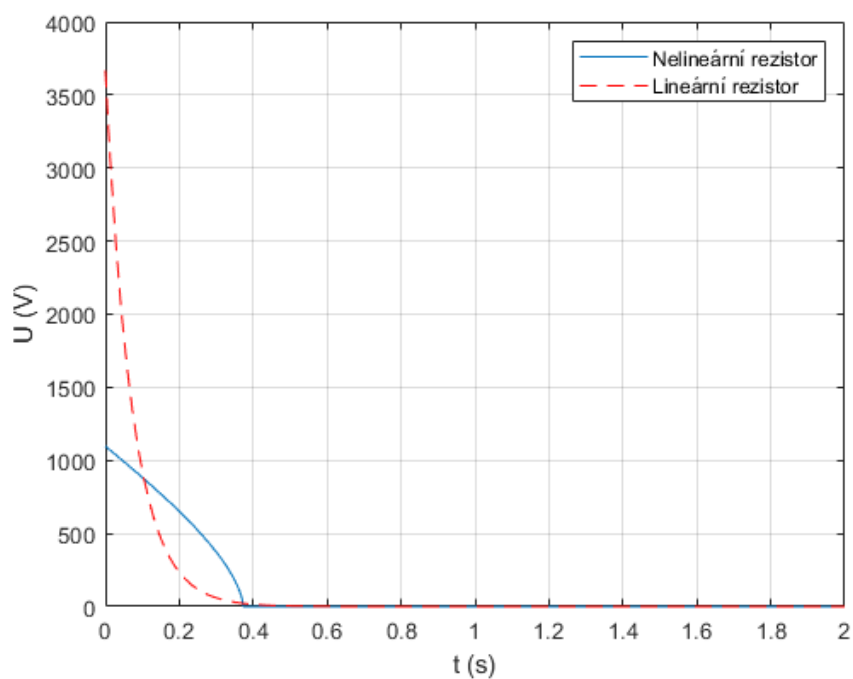
Obr. 4.7 Průběhy energií jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno

4.2 Zkrat na svorkách generátoru

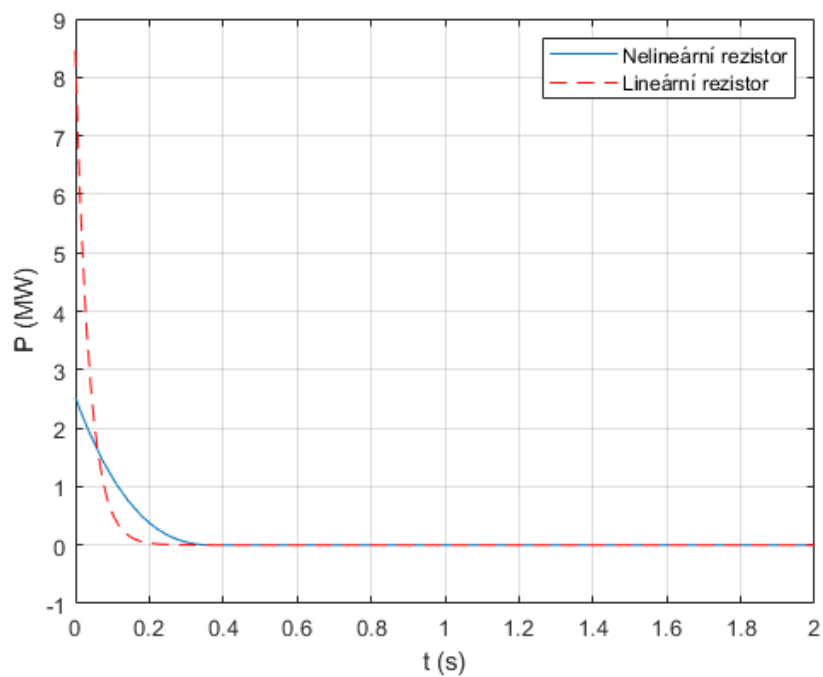
Pro zkrat na svorkách generátoru se počítaly stejné veličiny jako pro stav naprázdno. Rozdíl byl v proudu a časové konstantě. Hodnota proudu zde byla použita ze vzorce 2.31, tedy 2307,75 A. Hodnota časové konstanty poté byla 0,8 s. Podobně jako u stavu naprázdno se vykreslovaly charakteristiky pro proud (obr. 4.8), napětí (obr. 4.9), výkon (obr. 4.10) a energii (obr. 4.11).



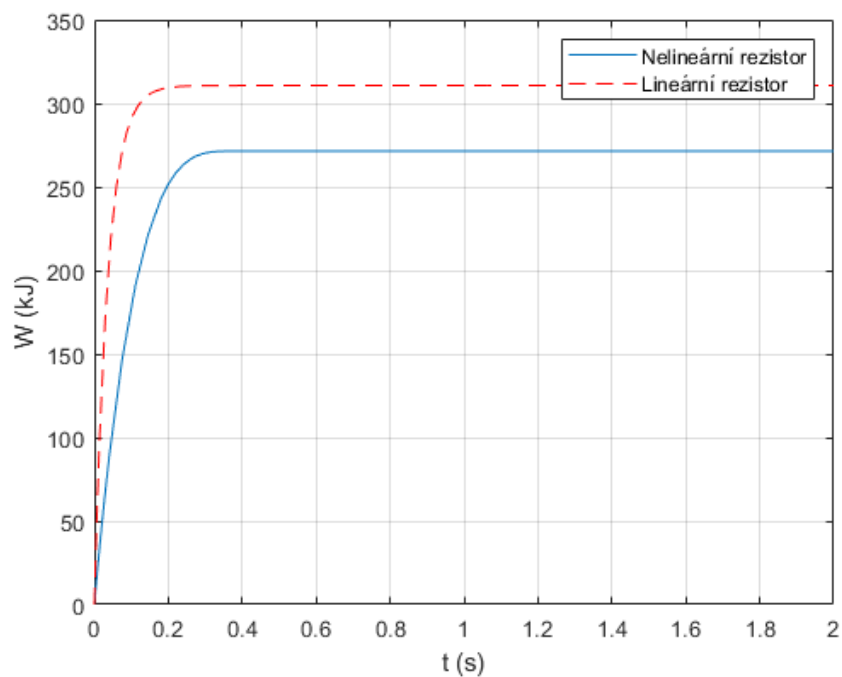
Obr. 4.8 Průběhy proudů jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru



Obr. 4.9 Průběhy napětí jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru



Obr. 4.10 Průběhy výkonů jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru



Obr. 4.11 Průběhy energií jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru

4.3 Zjištěné hodnoty

V tomto oddílu jsou uvedeny hodnoty zjištěné v programu MatLab pro oba stavy. Hodnoty pro stav naprázdno jsou uvedeny v tabulce 4.1. Pro zkrat na svorkách na generátoru jsou hodnoty uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.1 Zjištěné hodnoty pro nelineární a lineární rezistor ve stavu naprázdno programem MatLab

veličina	jednotka	nelineární r.	lineární r.
čas do 0 pro I a U	s	1,139	15,695
max. P	MW	0,196	0,208
max. W	kJ	67,683	66,884
max. U	V	543	575

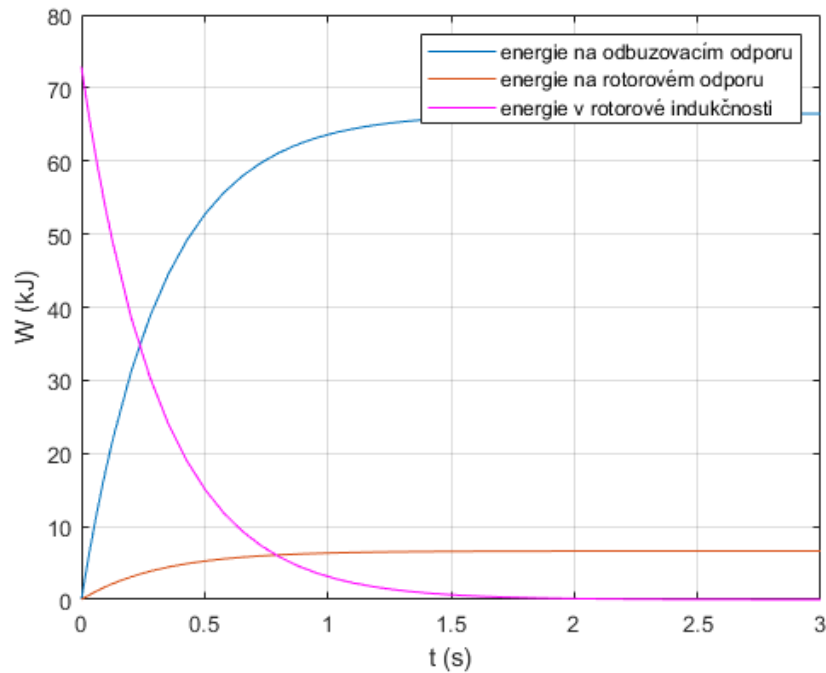
Tab. 4.2 Zjištěné hodnoty pro nelineární a lineární rezistor ve stavu zkratu programem MatLab

veličina	jednotka	nelineární r.	lineární r.
čas do 0 pro I a U	s	0,372	1,850
max. P	MW	2,53	8,464
max. W	kJ	271,358	310,655
max. U	V	1096	3667

Jak lze pozorovat z vypočítaných hodnot, nelineární rezistor má daleko rychlejší čas odbuzení než lineární rezistor. Ve stavu naprázdno je rozdíl dokonce cca 13 s. Z průběhů se může zdát, že se lineární rezistor dostane na 0 hodnotu mnohem dříve. Nicméně, kvůli velkému oddálení nelze vidět, že se 0 hodnotě pouze přibližuje. Nelineární rezistor má i podle zjištěných dat nižší ztráty. To je zapříčiněno jeho povahou lépe pracovat s elektrickými veličinami než lineární rezistor.

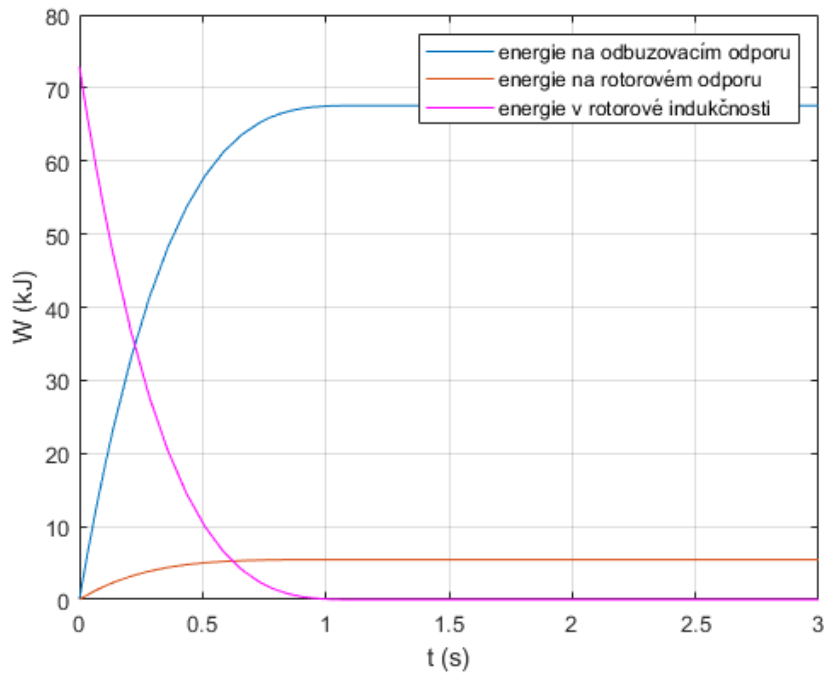
4.4 Srovnání s analytickým výpočtem

Pokud nejprve srovnáme výsledné energie ve stavu naprázdno, je dobré si připomenout analytický vzorec (rov. 2.30). Ve kterém vyšla energie $W_0 = 72,89$ kJ pro lineární odpor. Nastává zde rozdíl oproti výsledku $W_0 = 66,884$ kJ z numerického řešení pro lineární odpor. Pokud se jednotlivě zaměříme na vzorec a kód, zjistíme, že obě metody počítají odlišné věci. Analytický vzorec počítá čistě energii v rotorové indukčnosti, naopak simulace počítá energii na odbuzovacím odporu. Zároveň je simulace schopna počítat energii i na rotorovém odporu. Pro podložení tvrzení je průběh na obrázku 4.12. Z daného průběhu vycházejí následující energie, pro energii v rotorové indukčnosti vychází 72,89 kJ a pro energii na rotorovém odporu 6,68 kJ. Jednoduchým součtem zmařených energií na obou rezistorech dostáváme energii v rotorové indukčnosti.



Obr. 4.12 Ověření energií s lineárním rezistorem

Další výhodou oproti analytickému výpočtu je, že jsme schopni simulovat i nelineární odpor. To takto daný vzorec 2.30 nedovoluje. Pro ověření výsledků jsou na obrázku 4.13 znázorněny i energie s nelineárním rezistorem. Energie s nelineárním rezistorem vycházely takto, energie v rotorové indukčnosti 72,89 kJ a energie na rotorovém odporu 5,48 kJ. Výsledné hodnoty pro zkrat na svorkách generátoru pak jsou, energie v rotorové indukčnosti 338,35 kJ, energie na rotorovém odporu 31,04 kJ pro lineární odpor. Pro nelineární rezistor pak vycházela energie v rotorové indukčnosti 338,35 kJ a energie na rotorovém odporu 68,62 kJ. Průběhy pro zkrat na svorkách generátoru jsou velmi podobné těm naprázdno, z toho důvodu jsou umístěny v příloze F.



Obr. 4.13 Ověření energií s nelineárním rezistorem

Stejnou úvahou pak můžeme porovnávat časy odbuzení spočítané numericky a analyticky podle vzorců 2.35 a 2.37 pro nelineární rezistor. Analyticky spočítané časy jsou daleko delší. Protože jak už bylo řečeno, analytický vzorec i zde nepočítá s rotorovým odporem.

Podle vzorce 2.24 se určovalo napětí, které obvod crowbar vydrží a nesmí se přesáhnout. To je důvodem proč se vypisovalo maximální napětí ze simulace. Limitující napětí je podle zmíněné rovnice 1200 V. Ve stavu naprázdno podle tabulky 4.1 jsou napětí na obou rezistorech únosná. Na druhou stranu hodnota napětí v tabulce 4.2 je při lineárním rezistoru neúnosná, zatímco nelineární rezistor je pořád v mezích. Korekcí lineárního rezistoru by bylo zmenšení jeho odporu. Bohužel by se pak, ale ještě více prodloužil čas odbuzování, který je už tak u lineárního rezistoru dlouhý.

Zhodnocení a závěr

Diplomová práce si vzala za cíl představit čtenáři postup při návrhu a zkoušení statické budící soustavy. V teoretické části byly detailně rozebrány základní úvahy a principy, které jsou nezbytné k lepšímu pochopení problematiky statických budících soustav. V teoretické části byly představeny základní pojmy, principy a techniky související s návrhem statických budících soustav. Byly vysvětleny různé typy statických budících soustav a jejich využití v průmyslových aplikacích. Tato část sloužila jako úvod do praktické části práce, kde byly tyto teoretické poznatky aplikovány a prověřeny.

Cílem praktické části práce bylo provést návrh statické budící soustavy v souladu s postupy společnosti Brush. Práce se zaměřovala na zkoumání a aplikaci doporučených postupů při návrhu a testování soustavy. Během práce byly pečlivě studovány postupy společnosti Brush týkající se návrhu statických budících soustav. Tato studie poskytla ucelený pohled na správné techniky a přístupy, které je třeba uplatnit při návrhu takového systému. Při výběru komponent byly zohledněny nejen jejich technické parametry a výkonnost, ale také ekonomické hledisko a snadná výměna. Komponenty byly předdimenzovány s ohledem na požadované parametry a zároveň byla zajištěna jejich dostupnost a případná výměna v případě poruchy nebo potřeby údržby. Tímto přístupem k výběru komponent bylo zajištěno, že navržená statická budící soustava je nejen výkonná a spolehlivá, ale také ekonomicky efektivní a snadno udržovatelná. Předdimenzování komponent umožňuje soustavě pracovat s dostatečnou rezervou a minimalizuje riziko přetížení či poruch. Zároveň snadná výměna komponent přispívá ke snížení času a nákladů spojených s opravami a údržbou soustavy.

Následně se přistoupilo k implementaci navržené soustavy a provedení jejího zkoušení. Zkoušky byly prováděny s ohledem na doporučené postupy a metodiky společnosti Brush. Během těchto zkoušek byla sbírána data o výkonu, spolehlivosti a dalších klíčových parametrech soustavy. Tyto zkoušky byly nezbytné k ověření, zda je navržená soustava splňuje požadavky a očekávání společnosti Brush.

Důležitou částí práce bylo také provedení porovnání analytického výpočtu odbuzovacího odporu s numerickým výpočtem. Analytický výpočet byl proveden na základě matematického modelu, zatímco numerický výpočet byl proveden pomocí simulačního softwaru. Porovnáním těchto výpočtů bylo ověřeno, zda jsou výsledky srovnatelné a zda je navržená soustava schopna poskytnout očekávané výsledky. Díky provedení numerického výpočtu bylo zjištěno, že analytický výpočet statické budící soustavy zohledňuje pouze energii v budícím vinutí a nezahrnuje energii zmařenou na rotorovém odporu. Numerický výpočet se ukázal jako přesnější, protože umožňuje lépe modelovat nelineární odpory v systému. Tímto způsobem numerický výpočet přesněji odhaduje celkovou energetickou bilanci soustavy. Analytický výpočet není nutně chybný, ale vykazuje určité omezení, kterým je nepočítání s energií zmařenou na rotorovém odporu. Toto omezení vychází z předpokladu lineárního chování odporu, který je často v praxi nelineární. Přestože analytický výpočet neposkytuje úplný obraz odbuzovacího odporu, stále se používá při návrhu statických budících soustav. Předdimenzování odbuzovacího odporu v

rámcí analytického výpočtu je přístupem, který zajišťuje bezpečný provoz soustavy. Tento přístup je v souladu s ekonomickým hlediskem, protože předimenzování odbuzovacího odporu minimalizuje riziko přetížení a poruch soustavy. Přestože předimenzování může znamenat mírné zvýšení nákladů na komponenty, je to kompromis, který zajistí spolehlivost a dlouhodobou stabilitu provozu statické budící soustavy. Celkově lze tedy konstatovat, že numerický výpočet přináší výhody v přesnějším modelování energetické bilance a nelineárního odporu v systému. Analytický výpočet, i přes určitá omezení, stále zůstává důležitým nástrojem při návrhu statických budících soustav. Předimenzování odbuzovacího odporu v analytickém výpočtu je způsobem, jak zabezpečit spolehlivý provoz soustavy, a je podpořeno ekonomickým hlediskem.

Literatura

1. BOLDEA, I. *Electric Generators Handbook - Two Volume Set*. Taylor & Francis, 2015. ISBN 9781498723411.
2. ČEZ, Skupina. *Jak funguje uhelná elektrárna* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/flash-model-jak-funguje-uhelna-elektrarna>.
3. KOBRLE, Pavel. *Elektrické stroje - SPŠ Resslerova 5* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <http://kobra.wz.cz/>.
4. BAYEGAN, Markus. A Vision of the Future Grid. *Power Engineering Review, IEEE*. 2002, roč. 21. Dostupné z DOI: 10.1109/39.969598.
5. SKALA, Bohumil. *Návrh buzení* [online]. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/est/prednasky.html>.
6. LI, Jicheng. *Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation Systems*. 2019. ISBN 9781118841006.
7. KUTSYK, A.s; SEMENIUK, Mykola; KORKOSZ, Mariusz; PODSKARBI, Grzegorz. Diagnosis of the Static Excitation Systems of Synchronous Generators with the Use of Hardware-In-the-Loop Technologies. *Energies*. 2021, roč. 14. Dostupné z DOI: 10.3390/en14216937.
8. BINNAR, Ravina. Analysis of Static Excitation System Models for Synchronous Machine. *International Journal of Engineering Research and*. 2020, roč. V9. Dostupné z DOI: 10.17577/IJERTV9IS090027.
9. HLAVÁČ, Pavel. *Operating & maintenance manual PRISMIC® A50N Excitation Controller*. BRUSH SEM, 2020.
10. GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ, Gustavo; SILVA, A.s; ZENI, Nelson. Identification of synchronous machine parameters from field flashing and load rejection tests with field voltage variations. *Electric Power Systems Research*. 2016, roč. 143. Dostupné z DOI: 10.1016/j.epsr.2016.08.025.
11. HLAVÁČ, Pavel. BRUSH PRISMIC A50 EXCITATION SYSTEMS. 2006.
12. SHLLBWT. *Excitation transformer* [online]. Dostupné také z: <https://www.leilang-electric.com/info-detail/excitation-transformer-37>.
13. TABORDA, Jose. Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008, s. 1–8. Dostupné z DOI: 10.1109/PES.2008.4596955.
14. NIKKILÄ, Antti-Juhani; KUUSELA, Antti; LAASONEN, Minna; HAARLA, Liisa; PAHKIN, Arto. Self-Excitation of a Synchronous Generator During Power System Restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019, roč. 34, č. 5, s. 3902–3911. Dostupné z DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2909050.

15. ELECTRIC, Darrah. *Breakover Diodes* [online]. Dostupné také z: <https://www.darrahelectric.com/media/documents/IXB0D1-25RD.pdf>.
16. PAVELKA, Jiří; ČEŘOVSKÝ, Zdeňek. *Výkonová elektronika*. Nakladatelství ČVUT, 2000.
17. VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. Nakladatelství ZČU Plzeň, 1994.
18. HRADEBNÍ, SPŠ SOŠ SOU. *Výkonové polovodičové součástky* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/218/Pohony/V-1_Vykonove_polovodicove_soucastky.pdf.
19. ELUCIKAP. *Elektrotechnika* [online]. Dostupné také z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/606>.
20. PERRIN, Eugene M.; SCHONHOLZER, Emil T. Fundamental Operation of Rectifiers with Thyristor AC Power Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1973, roč. IA-9, č. 4, s. 453–461. Dostupné z DOI: 10.1109/TIA.1973.349974.
21. CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I.* [Online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/VE1/Polovodicove%5C%20soucastky.pdf>.
22. LAWATSCH, H.M.; VITINS, J. Protection of thyristors against overvoltage with breakover diodes. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1988, roč. 24, č. 3, s. 444–448. Dostupné z DOI: 10.1109/28.2894.
23. ABB. *Datasheet tyristoru 5STP20F1601* [online]. Dostupné také z: <https://new.abb.com/products/5STP20F1601/5stp20f1601>.
24. ELEKTROTECHNIKA, ČKD. *Datasheet chladiče M 250 typ 17.2* [online]. Dostupné také z: <http://www.elektrotechnika.cz/public/files/Nove%5C%20katalogy/chladice-a-prislusenstvi.pdf?726d24acec>.
25. HLAVÁČ, Pavel. *Redundancy in high current rectifiers for static excitation systems and alternator fed controlled rectifier excitation systems*. BRUSH SEM, 2017.
26. IEEE Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems for Synchronous Machines. *IEEE Std 421.3-1997*. 1998, s. 1–12. Dostupné z DOI: 10.1109/IEEESTD.1998.85954.
27. *Rozvaděče nízkého napětí - Část 1: Obecná ustanovení*. 2022-07. Standard. Česká agentura pro standardizaci.
28. *Rozvaděče nízkého napětí - Část 2: Výkonové rozvaděče*. 2012-05. Standard. Česká agentura pro standardizaci.
29. METROSIL. *Metrosil disc introduction* [online]. Dostupné také z: <https://www.metrosil.com/wp-content/uploads/2018/09/Metrosil-Introduction.pdf>.

Seznam obrázků

1.1	Přehledové schéma statické budící soustavy [9]	4
1.2	Obvod odbuzovače [13]	7
1.3	Obvod crowbar [13]	7
1.4	Charakteristika bod diody [15]	8
1.5	Výstupní Volt-Ampérová charakteristika [16]	10
1.6	Vstupní charakteristika tyristoru [16]	11
1.7	Třífázový můstkový šestipulzní usměrňovač [16]	11
1.8	Řídicí charakteristika usměrňovače pro RL s nepřerušovaným proudem [16]	13
1.9	Průběhy proudu a napětí plně řízeného trojfázového můstku při zátěži $L \rightarrow \infty$ [17]	14
1.10	Základní střídavá přepěťová ochrana [16]	15
1.11	Plovoucí přepěťová ochrana [16]	15
1.12	Komutační ochrana [16]	16
1.13	Pouzdro ve tvaru pastilky [23]	16
1.14	Schéma tyribloku [24]	17
1.15	Zapojení můstků pro provoz 1+1 [25]	18
1.16	Zapojení můstků pro provoz N+1 [25]	18
1.17	Paralelní provoz dvou můstků [25]	18
2.1	Charakteristika chladiče [24]	23
2.2	Názorný příklad chlazení tyristorových jednotek	24
2.3	Graf pro získání impedance Z_{thra} [24]	26
4.1	Graf pro odečet bodů nelineárního rezistoru [29]	42
4.2	Proložené body v kartézských souřadnicích	43
4.3	Proložené body na logaritmické stupnici	43
4.4	Průběhy proudů jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno	44
4.5	Průběhy napětí jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno	45
4.6	Průběhy výkonů jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno	45
4.7	Průběhy energií jednotlivých rezistorů při chodu naprázdno	46
4.8	Průběhy proudů jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru	47

4.9	Průběhy napětí jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru	47
4.10	Průběhy výkonů jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru	48
4.11	Průběhy energií jednotlivých rezistorů při zkratu na svorkách generátoru	48
4.12	Ověření energií s lineárním rezistorem	50
4.13	Ověření energií s nelineárním rezistorem	51

Seznam tabulek

2.1	Zadání generátoru	20
2.2	Zadání buzení	20
2.3	Tabulka doplňujících dat	20
2.4	Vybrané údaje zvoleného ventilátoru	25
2.5	Klíčové údaje tyristoru k výpočtu oteplení	25
2.6	Údaje navrhovaného odbuzovacího rezistoru	30
2.7	Potřebné údaje pro zvolení odbuzovače	32
2.8	Parametry odbuzovače	32
2.9	Data 3f transformátoru pro obvod počátečního nabuzení	33
2.10	Parametry navrhovaného usměrňovače pro obvod počátečního nabuzení	33
2.11	Parametry stykače pro obvod počátečního nabuzení	34
2.12	Parametry pojistky	34
4.1	Zjištěné hodnoty pro nelineární a lineární rezistor ve stavu naprázdno programem MatLab	49
4.2	Zjištěné hodnoty pro nelineární a lineární rezistor ve stavu zkratu programem MatLab	49

Seznam příloh

Příloha A	Katalog tyristoru	I
Příloha B	Schéma navržené budící soustavy	V
Příloha C	Katalog odporu Metrosil	VII

Příloha D Program pro zjištění koeficientů pro model nelineární rezistoru	VIII
Příloha E Program pro výpočet daných veličin rezistorů	X
Příloha F Ověření energií při zkratu	XIV

Příloha A Katalog tyristoru

5STP 20F1601



5STP 20F1601

Old part no. T 918-2010-16

Phase Control Thyristor

Properties

- High operational capability
- Possibility of serial and parallel connection

Applications

- Controlled rectifiers
- AC drives

Key Parameters

V_{DRM}, V_{RRM}	= 1 600	V
I_{TAVm}	= 1 901	A
I_{TSM}	= 27 300	A
V_{TO}	= 0.948	V
r_T	= 0.152	mΩ

Types

	V_{RRM}, V_{DRM}
5STP 20F1601	1 600 V
Conditions:	$T_j = -40 \div 125 \text{ }^\circ\text{C}$, half sine waveform, $f = 50 \text{ Hz}$

Mechanical Data

F_m	Mounting force	22 ± 2 kN
m	Weight	0.48 kg
D_s	Surface creepage distance	25 mm
D_a	Air strike distance	13 mm

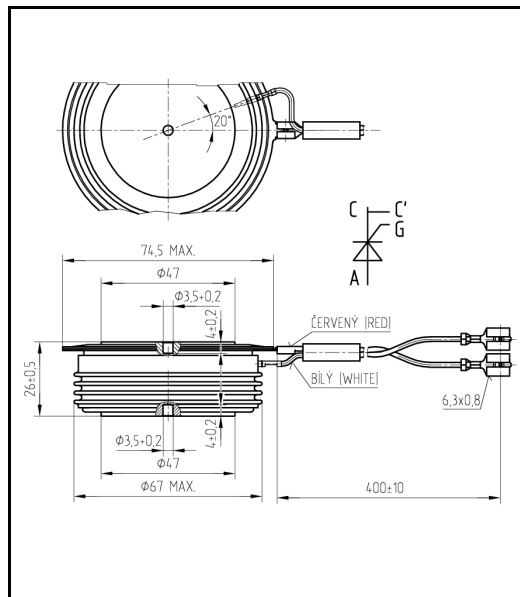


Fig. 1 Case



ABB s.r.o.

Novodvorska 1768/138a, 142 21 Praha 4, Czech Republic

tel.: +420 261 306 250, <http://www.abb.com/semiconductors>

5STP 20F1601

Maximum Ratings		Maximum Limits	Unit
V_{RRM} V_{DRM}	Repetitive peak reverse and off-state voltage $T_j = -40 \div 125 \text{ }^\circ\text{C}$	1 600	V
I_{TRMS}	RMS on-state current $T_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, half sine waveform, $f = 50 \text{ Hz}$	2 987	A
I_{TAVm}	Average on-state current $T_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, half sine waveform, $f = 50 \text{ Hz}$	1 901	A
I_{TSM}	Peak non-repetitive surge half sine pulse, $V_R = 0 \text{ V}$	$t_p = 10 \text{ ms}$ 27 300 $t_p = 8.3 \text{ ms}$ 29 200	A
I^2t	Limiting load integral half sine pulse, $V_R = 0 \text{ V}$	$t_p = 10 \text{ ms}$ 3 730 000 $t_p = 8.3 \text{ ms}$ 3 540 000	A²s
$(di_T/dt)_{cr}$	Critical rate of rise of on-state current $I_T = I_{TAVm}$, half sine waveform, $f = 50 \text{ Hz}$, $V_D = 2/3 V_{DRM}$, $t_r = 0.3 \text{ } \mu\text{s}$, $I_{GT} = 2 \text{ A}$	200	A/μs
$(dv_D/dt)_{cr}$	Critical rate of rise of off-state voltage $V_D = 2/3 V_{DRM}$	1 000	V/μs
P_{GAVm}	Maximum average gate power losses	3	W
I_{FGM}	Peak gate current	10	A
V_{FGM}	Peak gate voltage	12	V
V_{RGM}	Reverse peak gate voltage	10	V
$T_{jmin} - T_{jmax}$	Operating temperature range	-40 \div 125	$^\circ\text{C}$
$T_{stgmin} - T_{stgmax}$	Storage temperature range	-40 \div 125	$^\circ\text{C}$

Unless otherwise specified $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$

ABB s.r.o., Novodvorska 1768/138a, 142 21 Praha 4, Czech Republic

ABB s.r.o. reserves the right to change the data contained herein at any time without notice
TS - T/068/02b Oct-11

2 of 7

5STP 20F1601

Characteristics		Value			Unit
		min.	typ.	max.	
V_{TM}	Maximum peak on-state voltage $I_{TM} = 2\ 000\ A$			1.250	V
V_{T0}	Threshold voltage			0.948	V
r_T	Slope resistance $I_{T1} = 2\ 380\ A, I_{T2} = 7\ 139\ A$			0.152	m Ω
I_{DM}	Peak off-state current $V_D = V_{DRM}$			150	mA
I_{RM}	Peak reverse current $V_R = V_{RRM}$			150	mA
t_{gd}	Delay time $T_j = 25\ ^\circ C, V_D = 0.4\ V_{DRM}, I_{TM} = I_{TAVM},$ $t_r = 0.3\ \mu s, I_{GT} = 2\ A$			2	μs
t_q	Turn-off time $I_T = 2\ 000\ A, di_T/dt = 12.5\ A/\mu s,$ $V_D = 2/3\ V_{DRM}, dv_D/dt = 50\ V/\mu s$		150		μs
Q_{rr}	Recovery charge the same conditions as at t_q		2 200		μC
I_H	Holding current	$T_j = 25\ ^\circ C$ $T_j = 125\ ^\circ C$		170 90	mA
I_L	Latching current	$T_j = 25\ ^\circ C$ $T_j = 125\ ^\circ C$		450 350	mA
V_{GT}	Gate trigger voltage $V_D = 12V, I_T = 4\ A$	$T_j = -40\ ^\circ C$ $T_j = 25\ ^\circ C$ $T_j = 125\ ^\circ C$	0.25	4 3 2	V
I_{GT}	Gate trigger current $V_D = 12V, I_T = 4\ A$	$T_j = -40\ ^\circ C$ $T_j = 25\ ^\circ C$ $T_j = 125\ ^\circ C$	10	500 250 150	mA

Unless otherwise specified $T_j = 125\ ^\circ C$

Thermal Parameters		Value	Unit
R_{thjc}	Thermal resistance junction to case double side cooling	16.0	K/kW
	anode side cooling	25.0	
	cathode side cooling	45.0	
R_{thch}	Thermal resistance case to heatsink double side cooling	4.0	K/kW
	single side cooling	8.0	

ABB s.r.o., Novodvorska 1768/138a, 142 21 Praha 4, Czech Republic

ABB s.r.o. reserves the right to change the data contained herein at any time without notice
TS - T/068/02b Oct-11

3 of 7

5STP 20F1601

Transient Thermal Impedance

Analytical function for transient thermal impedance

$$Z_{thjc} = \sum_{i=1}^4 R_i (1 - \exp(-t / \tau_i))$$

Conditions:

$F_m = 22 \pm 2$ kN, Double side cooled

Correction for periodic waveforms

180° sine:	add 1.3 K/kW
180° rectangular:	add 1.8 K/kW
120° rectangular:	add 3.0 K/kW
60° rectangular:	add 5.1 K/kW

i	1	2	3	4
τ_i (s)	0.4653	0.1533	0.0375	0.0034
R_i (K/k)	5.50	7.24	2.00	1.34

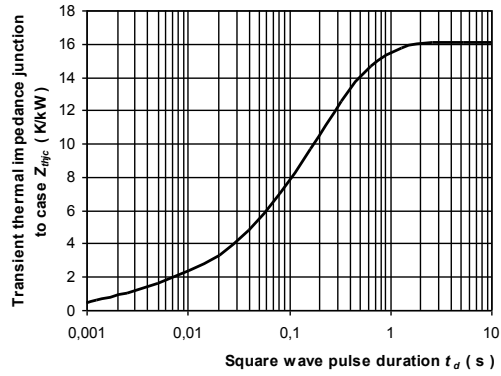
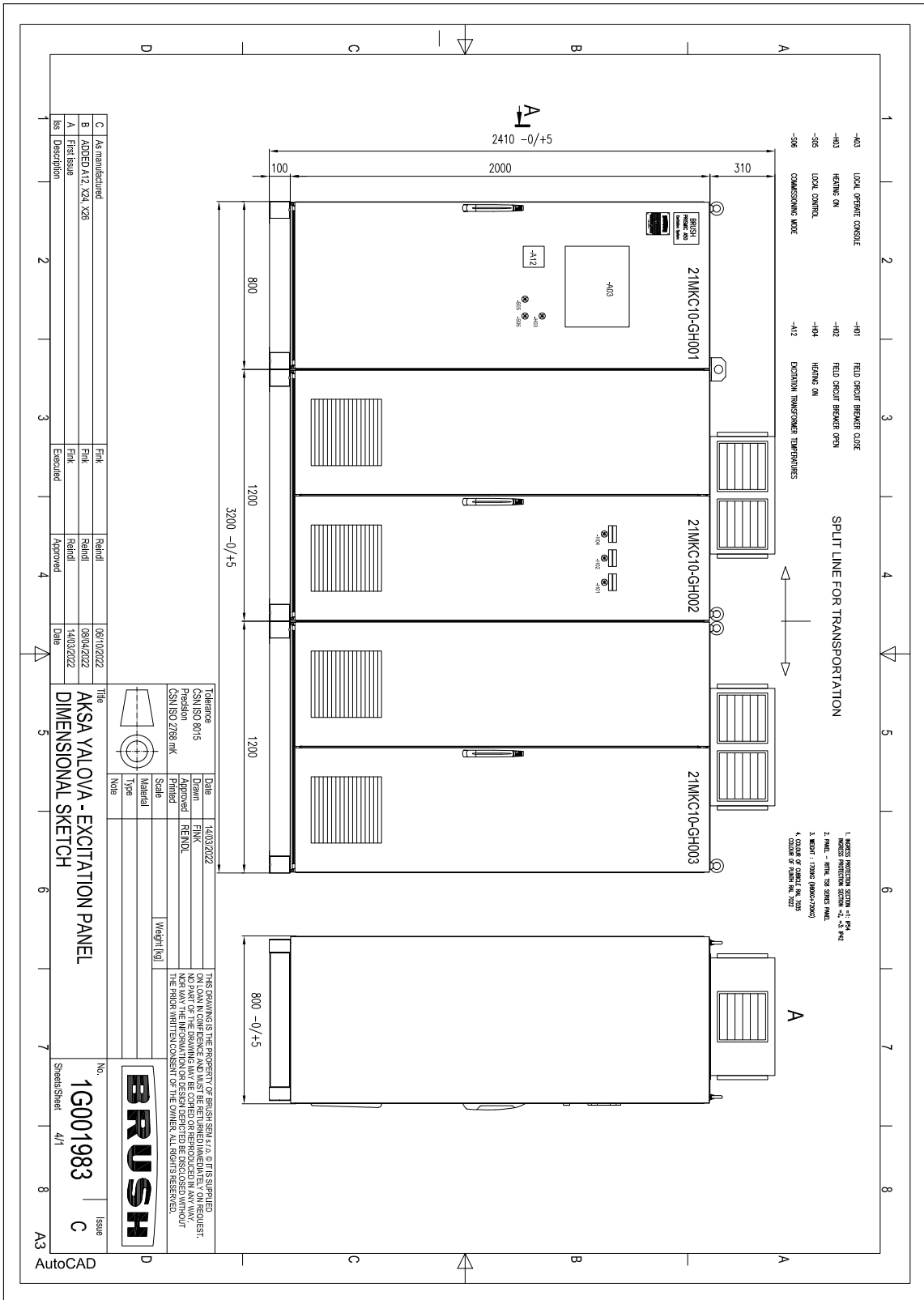


Fig. 2 Dependence transient thermal impedance junction to case on square pulse

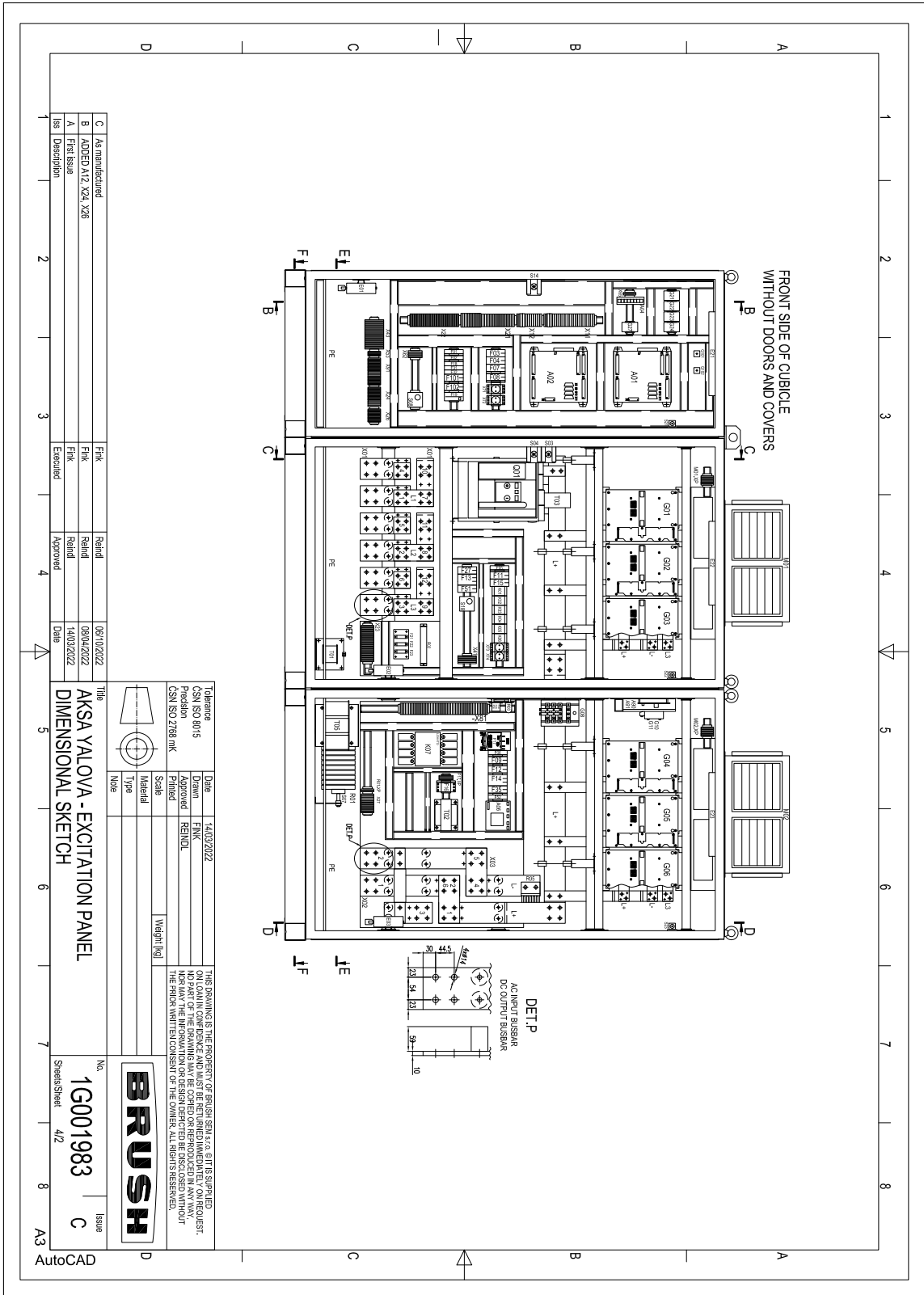
ABB s.r.o., Novodvorska 1768/138a, 142 21 Praha 4, Czech Republic

ABB s.r.o. reserves the right to change the data contained herein at any time without notice
 TS - T/068/02b Oct-11

Příloha B Schéma navržené budíčí soustavy



B SCHÉMA NAVRŽENÉ BUDÍČÍ SOUSTAVY



Příloha C Katalog odporu Metrosil

SEPTEMBER 2018
PAGE 1/3



METROSIL DISC INTRODUCTION

INTRODUCTION

Metrosil discs are available in sizes from 25mm to 150mm diameter. They can be supplied as plain unmounted discs or mounted on central studs either as single discs or as multi-disc assemblies arranged in series or parallel. The smallest size can be supplied with suitable wire terminations and encapsulated in PVC or other materials as required.



METROSIL CHARACTERISTICS

The voltage-current relationship of Metrosil resistors is generally as indicated in Figure 1 - the characteristic is symmetrical. Traditionally, the relationship is expressed by:

$$V=KI^\beta$$

$$I=HV^\alpha$$

where K (or H) and β ($=1/\alpha$) are constants for any resistor. The value of K (or H) depends on the physical dimensions of the resistor, its composition and the manufacturing process. Actual values of K may vary from less than 30 to 100,000.

The value of β also depends on the composition and manufacturing process and can be made to have a value from 0.14 to 0.5 ($\alpha=7$ to 2).

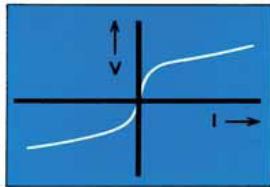


Figure 1 - V-I Relationship for Metrosil Resistors

SPECIFICATION

Varying the composition and processing conditions involved in the manufacture of Metrosil discs can achieve a broad spectrum of electrical characteristics. A large number of electrical specifications are available as standard items and others can be manufactured on request.

METROSIL APPLICATIONS

Most of the applications of Metrosil make use of its non-linear properties to provide an "electrical safety valve" for protecting equipment and insulation from the effects of overvoltages.

When an inductive dc current is broken suddenly, there is a transient rise in voltage across the inductance, which can be 10 to 20 times the supply voltage and may damage insulation or circuit components. The source of this overvoltage is the energy that is stored in the magnetic field of the inductance at the moment of switching off.

It is therefore essential to provide some means for this energy to dissipate itself harmlessly. This can be achieved by connecting a discharge resistor across the inductive coil. At the instant when the circuit is broken, the current briefly held constant by the inductance of the coil is diverted through the resistor and rapidly decays to zero. The voltage across the coil is therefore limited to the voltage necessary to pass the coil current through the resistor, the value of which is so chosen that the voltage is a safe one. The transient voltage reduction is illustrated by the oscillograms overleaf.

If an ordinary linear resistor is used and it is permanently connected across the coil, there will be a continuous waste of power at normal voltage. If the resistor is inserted just before the circuit is broken, additional contacts and wiring will be required. A Metrosil resistor, on the other hand, can be permanently connected across the coil and yet will consume at normal voltages only a small fraction of the power taken by the ordinary resistor.

Metrosil discharge resistors can be supplied for all ac and dc voltages and for use with almost any inductive device such as contactor, clutch and brake coils, relay coils and solenoids, electromagnets and the fields of motors, generators and alternators of all sizes. Other applications include:

- Current and voltage transformer protection
- Telecommunication equipment protection
- Protection of high impedance relays
- Telephone line protection
- EMP protection
- Traction units
- Rotor protection



Příloha D Program pro zjištění koeficientů pro model nelineární rezistoru

```
% Data
I = [0.001,0.002,0.003,0.004,0.005,0.006,...]
U = [4,5.5,6.5,7,7.5...]

% Lineární model
log_I = log(I);
log_U = log(U);

% Použití lineární regrese pro nalezení koeficientů
X = [ones(length(log_I),1) log_I'];
b = X\log_U';

% Nalezení koeficientů mocniné funkce
a = exp(b(1));
b = b(2);

% Interpolace dat mocninou funkcí
I_interp = 0.001:0.001:3000;
U_interp = a*I_interp.^b;

% Vykreslení interpolovaných dat
figure(1)
plot(I_interp,U_interp)
hold on
scatter(I,U)
xlabel('I (A)')
ylabel('U (V)')
legend('Interpolovaná data','Odečtená data')

%Vykreslení interpolovaných dat (log)
figure(2)
loglog(I_interp,U_interp)
hold on
```

```
scatter(I,U)
xlabel('I (A)')
ylabel('U (V)')
legend('Interpolovaná data','Odečtená data')
```


Příloha E Program pro výpočet daných veličin rezistorů

```
close all;
clc;
format long;

Uf = 161;
If = 1013;
T_d = 7;
i0 = 362;
R = Uf/If;
L = R*T_d;
R_lin = 10*R;

% koeficienty nelineárního odporu
K = 57.702127393466680;
beta = 0.380251299478230;

f_nl = @(t, i_nl) (1/L)*( - R*i_nl - K.*max(i_nl, 0).^beta); % nelineární odpor
f_l = @(t, i_l) (1/L)*(- R*i_l - R_lin*i_l); % lineární odpor

tspan = [0,3]; %[od do] cas simulace

options = odeset('RelTol',1e-9,'AbsTol',1e-12); % nastavení tolerance
[t_nl, i_nl] = ode45(f_nl, tspan, i0);%, options); % použití nastavení tolerance
[t_l, i_l] = ode45(f_l, tspan, i0);%, options); % použití nastavení tolerance

%jednotlivé energie nelineární rezistor
W_n = cumtrapz(t_nl, (K.*i_nl.^beta).*i_nl);
W_rn = cumtrapz(t_nl, R*i_nl.^2);
W_Ln = 0.5 * (Uf/If) * T_d * i_nl.^2;
```

```

%jednotlivé energie lineární rezistor
W_l = cumtrapz(t_l, R_lin.*(i_l.^2));
W_rl = cumtrapz(t_l, R*i_l.^2);
W_Ll = 0.5 * (Uf/If) * T_d * i_l.^2;

%energie vytvořená cívkou
W = 0.5 .* ((Uf/If) .* T_d) .* i0^2;
W_L = 0.5 .*L .* i0^2;

% výpočet napětí
v_nl = K.*(i_nl.^beta);
v_l = R_lin.*i_l;

% výpočet napětí na indukčnosti
v_L_nl = L * diff(i_nl)./diff(t_nl);
v_L_l = L * diff(i_l)./diff(t_l);

%výkony
p_nl = K.*(i_nl.^beta).*i_nl;
p_l = R_lin*i_l.^2;

% měřený čas do 0
t_nl_zero = t_nl(find(i_nl < eps, 1));
t_l_zero = t_l(find(i_l < eps, 1));

% proudy a napětí lineární vs nelineární rezistor
figure(1)

plot(t_nl, i_nl);
hold on
plot(t_l, i_l, 'r--');
hold off
xlabel('t (s)');
ylabel('I (A)');
grid on
legend('Nelineární rezistor', 'Lineární rezistor');

```

```
figure(2)
plot(t_n1, v_n1);
hold on
plot(t_1, v_1, 'r--');
hold off
xlabel('t (s)');
ylabel('U (V)');
grid on
legend('Nelineární rezistor', 'Lineární rezistor');

% jednotlivé energie
figure(3)
plot(t_n1, W_n/1000);
xlabel('t (s)');
ylabel('W (kJ)');
hold on
grid on
plot(t_1, W_1/1000, 'r--');
xlabel('t (s)');
ylabel('W (kJ)');
grid on
legend('Nelineární rezistor', 'Lineární rezistor');

% ověření energií
figure(4)
plot(t_1, W_1/1000);
xlabel('t (s)');
ylabel('W (kJ)');
hold on
grid on
plot(t_1, W_r1/1000);
xlabel('t (s)');
ylabel('W (kJ)');
plot(t_1, (W_L1/1000), 'm');
xlabel('t (s)');
```

```
ylabel('W (kJ)');
hold on
legend('energie na odbuzovacím odporu', 'energie na rotorovém odporu',
      'energie v rotorové indukčnosti');

figure(5)
plot(t_nl, p_nl/1e6);
xlabel('t (s)');
ylabel('P (MW)');
hold on
grid on
plot(t_l, (p_l/1e6), 'r--');
xlabel('t (s)');
ylabel('P (MW)');
hold on
legend('Nelineární rezistor', 'Lineární rezistor');

fprintf('Time for nonlinear resistor to reach zero current: %f s\n',
      t_nl_zero);
fprintf('Time for linear resistor to reach zero current: %f s\n',
      t_l_zero);
```

Příloha F Ověření energií při zkratu