

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky



**Elektromechanický návrh rotujícího usměrňovače
synchronního stroje**

**Electromechanical Design of Rotating Rectifier for
Synchronous Machine**

2018

Bc. Filip Gardian

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Gardian**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Elektromechanický návrh rotujícího usměrňovače synchronního stroje.
Electromechanical Design of Rotating Rectifier for Synchronous
Machine.**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Budicí systémy synchronních strojů.
Návrh buzení s rotujícím usměrňovačem pro vybraný synchronní stroj.
Elektromechanický a tepelný výpočet.
Vícekritériální vyhodnocení návrhu.

Seznam doporučené odborné literatury:

PATOČKA, M.: Výkonová elektronika, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí, skriptum FEKT, Brno, 2010
KOŽEŠNÍK, J.: Mechanika elektrických strojů točivých, ČSAV 1960
ČEMUS, J., HAMATA, V.: Obecné řešení dynamiky synchronních motorů, Academia Praha, 1960
HORA, O.: Regulační a budicí systémy synchronních strojů, SNTL 1985
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, C.Sc.
vedoucí katedry

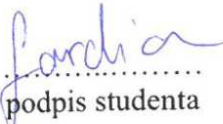


prof. Ing. Pavel Brandštetter, C.Sc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2018*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce, Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za rady a konzultace k vypracování a oponentovi Ing. Martinu Melišíkovi, Ph.D. za provedení posudku. V neposlední řadě chci poděkovat rodině a všem známým za nemalou podporu a nekonečnou trpělivost, kterou během mého studia nešetřili.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na elektrický a mechanický návrh budiče a usměrňovače pro synchronní generátory.

Klíčová slova

SYNCHRONNÍ STROJ; GENERÁTOR; BUDIČ; USMĚRŇOVAČ; BUDÍCÍ
VINUTÍ; DIMENZOVÁNÍ

Abstract

This diploma thesis is focused on electrical and mechanical design of exciter and rectifier for synchronous generator.

Key words

Synchronous machine; generator; exciter; rectifier; exciter winding; desing;

Seznam použitých symbolů

U_s	Usměrněné rotorové napětí	V
I_s	Usměrněný rotorový proud	A
$2p$	Počet pólů	-
H	Osová výška	m
D_e	Vnější průměr statoru	m
D	Vnitřní průměr statoru	m
d	Vnější průměr rotoru	m
d_i	Vnitřní průměr rotoru	m
l	Délka paketu (jádra)	m
δ	Vzduchová mezera	m
n	Otáčky	min^{-1}
f	Frekvence	Hz
B_δ	Indukce ve vzduchové mezeře	T
$\cos \varphi$	Účinník stroje	-
U_{ef}	Efektivní rotorové napětí	V
U_f	Fázové napětí	V
I_f	Fázový proud rotoru	A
U_{max}	Maximální rotorové napětí	V
I_{max}	Maximální rotorový proud	A
S_n	Jmenovitý výkon	VA
P_i	Vnitřní výkon	VA
α_δ	Činitel pólového krytí	-
k_B	Činitel tvaru pole	-
k_{v1}	Činitel vinutí rotoru	-
A	Předběžná lineární proudová hustota	A/m
ϕ	Magnetický tok	Wb
a	Počet paralelních větví	-

q_1	Počet drážek na pól a fázi	-
Q	Počet drážek	drážek
Q_p	Počet drážek na pól	drážky
y_d	Krok rotorového vinutí	drážek
β	Zkrácení kroku	-
k_r	Činitel rozlohy	-
k_y	Činitel zkrácení kroku pro první harmonickou	-
k_v	Činitel vinutí	-
V_d	Počet vodičů v drážce rotoru	vodičů
N	Počet vodičů celkem	vodičů
N_1	Počet závitů v sérii v jedné fázi	závitů
t_{pr}	Pólová rozteč	m
t_d	Drážková rozteč na povrchu rotoru	m
d_v	Průměr vodiče	m
a_{dt}	Počet paralelních drátů	-
S_v	Plocha vodiče	m^2
d_{diz}	Průměr vodiče i s izolací	m
r_{dkm}	Měrný odpor všech paralelních drátů	Ω/km
σ	Proudová hustota vodičů	A/mm^2
A	Lineární přepočtená proudová hustota	A/mm
k_{fe2}	Činitel plnění železa	-
b_1	Šířka drážky	m
b_z	Šířka zubu	m
B_z	Indukce v zubech rotoru	T
h_2	Výška těla drážky	m
b_0	Šířka otevření drážky	m
h_0	Výška krku	m
h_1	Výška klínové části	m

b_2	Průměr kruhového dna drážky	m
h_d	Celková výška drážky	m
S_d	Plocha drážky	m^2
S_v	Plocha vodičů	m^2
l_{ξ}	Střední délka čela	m
l_v	Délka vodiče	m
l_c	Celková délka vodičů	m
t_{ps}	Pólová rozteč statoru	m
h_{j2}	Výška rotorového jha	m
h_p	Výška pólu	m
σ_p	Předběžný činitel rozptylu	-
k_{Fe2}	Činitel plnění železa	-
B_p	Indukce v pólu	T
b_p	Šířka pólu	m
α_{δ}	Činitel pólového krytí	-
δ'	Střední hodnota velikosti vzduchové mezery	m
δ_{max}	Maximální vzduchová mezera	m
d_{vb}	Průměr vodiče	m
S_{vb}	Plocha jednoho drátu	m^2
N_b	Počet závitů	Závitů
a_b	Počet paralelních větví budícího vinutí	větev
h_c	Výška cívky	m
b_c	Šířka cívky	m
$l_{b\check{c}}$	Střední délka čela	m
l_{bz}	Střední délka závitu	m
l_{bv}	Délka budícího vinutí	m
S_c	Průřez cívky	m^2
R_b	Odpor budícího vinutí	Ω

I_b	Budící proud	A
U_b	Budící napětí	V
σ_b	Proudová hustota vodičů v budícím vinutí	A/m^2
k_c	Carterův činitel	-
F_δ	Magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře	A
$H_{zstř}$	Střední intenzita v zubech rotoru	A/m
l_z	Délka siločáry v zubu rotoru	m
B_z	Indukce v zubech rotoru	T
F_z	Magnetomotorická síla v zubech rotoru	A
l_{jr}	Délka siločáry ve jhu rotoru	m
B_{jr}	Indukce ve jhu rotoru	T
H_{jr}	Intenzita ve jhu rotoru	A/m
F_{jr}	Magnetomotorická síla ve jhu rotoru	A
F_r	Magnetomotorická síla rotoru	A
B_p	Indukce v pólu statoru	T
H_p	Intenzita v pólech statoru	A/m
F_p	Magnetomotorická síla pólu statoru	A
l_{js}	Délka siločáry ve jhu statoru	m
B_{js}	Indukce ve jhu statoru	T
H_{js}	Intenzita ve jhu statoru	A/m
F_{js}	Magnetomotorická síla jha statoru	A
F_s	Magnetomotorická síla statoru	A
F_{b0}	Celkové magnetické napětí budícího vinutí	A
ΔP_{vr}	Ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_{vs}	Ztráty ve vinutí statoru	W
k_{dj}	Činitel zvýšení ztrát	-
k_{dz}	Činitel zvětšení ztrát	-

$\Delta p_{1,0/50}$	Měrné ztráty na 1 kg materiálu	W
ΔP_{Fej}	Magnetické ztráty ve jhu rotoru	W
ΔP_{Fez}	Magnetické ztráty v zubech rotoru	W
v	Obvodová rychlost rotoru	m/s
t	Tloušťka plechu statoru	m
k_0	Činitel	-
B_0	Přepočítaná indukce ve vzduchové mezeře	T
$\Delta P_{\delta p}$	Dodatečné ztráty při chodu naprázdno	W
ΔP_d	Dodatečné ztráty při zatížení	W
ΔP	Celkové ztráty	W
η	Účinnost	%

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Úvod do synchronních strojů	- 15 -
1.1 Konstrukce a provedení synchronních strojů	- 15 -
1.2 Princip činnosti synchronního generátoru	- 15 -
1.3 Princip činnosti synchronního motoru.	- 16 -
2 Úvod do budících systémů synchronních strojů.....	- 17 -
2.1 Budící soustavy	- 17 -
2.1.1 Budící soustava statická	- 17 -
2.1.2 Budící soustava bezkartáčová.....	- 18 -
2.1.3 Závislá budící soustava	- 18 -
2.1.4 Nezávislá budící soustava.....	- 19 -
2.1.5 Kompaundní budící soustava	- 20 -
2.2 Budiče	- 20 -
2.3 Usměrňovače	- 20 -
2.4 Rotující usměrňovače budícího proudu.....	- 22 -
3 Elektromechanický návrh rotujícího usměrňovače a budiče.....	- 23 -
3.1 Rozbor návrhu	- 23 -
3.1.1 Základní parametry pro návrh	- 23 -
3.1.2 Drážkování stroje	- 27 -
3.1.3 Izolace drážky.....	- 29 -
3.1.4 Počet závitů a činitele kroku vinutí	- 29 -
3.1.5 Vzduchová mezera a póly statoru.....	- 30 -
3.2 Výpočet magnetického obvodu	- 32 -
3.3 Výpočet budícího vinutí	- 35 -
3.4 Ztráty a účinnost budiče	- 36 -
3.5 Návrh usměrňovače.....	- 37 -
3.5.1 Elektrický návrh usměrňovače	- 37 -
4 Vlastní návrh rotujícího usměrňovače a budiče - výpočet	- 39 -
4.1 Zadání budiče	- 39 -

4.1.1	Základní parametry.....	- 39 -
4.1.2	Rotor.....	- 41 -
4.1.3	Návrh drážky rotoru	- 42 -
4.1.4	Stator	- 43 -
4.1.5	Magnetické hodnoty stroje - elektromagnetický obvod	- 44 -
4.1.6	Magnetizační charakteristika.....	- 46 -
4.1.7	Usměrňovač.....	- 48 -
5	Vizualizace	- 49 -
5.1	Rotor.....	- 49 -
5.2	Stator	- 50 -
5.3	Usměrňovač.....	- 51 -
5.4	Schéma zapojení rotoru.....	- 52 -
	Vyhodnocení návrhu a závěr.....	- 53 -
	Použitá literatura	I
	Přílohy.....	II

Úvod

Synchronní stroje jsou většinou používány jako velmi výkonné generátory, jejichž výkon se pohybuje řádově v MVA. Tyto alternátory jsou umístěné především v elektrárnách, kde je turbína generátoru poháněná párou nebo vodou. Dnes se alternátory, jejichž výkon se pohybuje řádově v jednotkách MVA, konstruují především v provedení bezkroužkovém. Toto provedení vyžaduje umístění usměrňovače budícího proudu na hřídel rotoru. A protože ještě nebyl nalezen lepší způsob, jak přivést stejnosměrný proud do rotoru hlavního stroje, je potřeba užít usměrňovače, který usměrní naindukovaný střídavý proud z rotoru budiče do rotoru hlavního stroje.

Umístění modulu usměrňovače na hřídel stroje s sebou nese mnohé problémy. Jedním z nich je velké mechanické namáhání odstředivými silami. Ty působí na vnitřní strukturu usměrňovacích diod a poškozují je. Účelem této práce je tedy navrhnout takový usměrňovač, který vydrží bez poškození pracovat i ve vyšších otáčkách a s nimi spojenými odstředivými silami. Nesmí se také opomenout dimenzování modulu usměrňovače na oteplení usměrňovacích diod při práci.

Práce je složená z teoretického odvození elektrického a mechanického návrhu budiče a usměrňovače synchronního stroje. V další fázi se věnuji samotnému návrhu. Jsou zde prezentovány výsledky předchozí kapitoly. Pro výpočet těchto výsledků byl sestrojen výpočetní program v tabulkovém programu Excel.

V závěrečné fázi práce se věnuji zhodnocení výsledků a celého návrhu. Je zde k nahlédnutí vizualizace navrženého stroje.

1 Úvod do synchronních strojů

1.1 Konstrukce a provedení synchronních strojů

Synchronní stroj je točivý elektrický stroj pracující s třífázovým střídavým proudem. Skládá se ze statické části - statoru - a rotující části - rotoru. Jeho název "synchronní" je odvozen od vlastnosti rotoru, který se točí stejně (synchronně) s točivým polem statoru. Stator je konstruován s třífázovým vinutím umístěným v drážkách. Toto vinutí je u strojů s menším výkonem tvořené většinou kruhovými vodiči. U strojů vyšších výkonů už bývá cívka vinuta profilovým vodičem.

Statorová kostra dvojpólových strojů bývá jednodílná, svařovaná z řad silných žebry, spojených podélnými žebry s pravítky na upevnění plechů. Mezi žebry se vytvoří kanály na rozvedení chladícího vzduchu. Kostra musí být tuhá, aby se nechvěla, je kryta plechovým pláštěm dole s hrdlem na odvedení teplého vzduchu. [1]

Statorový paket je tvořen většinou z dynamoplechů zpravidla o tloušťce 0,5 mm a výše. Segmenty plechů se upevňují ke kostře pravítky, většinou klínovými a stahují se silnými postranicemi s nemagnetickými hřebeny. Plechy se izolují laky, smaltem a jinými izolačními materiály. V paketu jsou vytvořeny ventilační štěrbin. Ty jsou tvořeny vložkami vhodných tvarů tak, aby podporovaly odvod vzduchu. Bývají zpravidla nemagnetické. [1]

Rotor je tvořen buď z plechů z dynamické oceli, nebo z ocelolitinové konstrukce a pouze póly jsou tvořené z dynamoplechů. Odtud se rozlišují také dva druhy rotorů. Synchronní stroje s rotorem s vyniklými póly se nazývají hydrostroje, synchronní stroje s hladkým rotorem se nazývají turbostroje. Hydrostroje mají cívký nasazené přímo na pólech rotoru. Turbostroje mají na rotoru drážky a do nich zasazené vinutí. Používá se i provedení s permanentními magnety, kde je místo budícího vinutí rotor osazen permanentními magnety.

1.2 Princip činnosti synchronního generátoru

Synchronní stroje určené k výrobě elektrické energie jsou synchronní generátory - alternátory. Alternátory představují největší točivé elektrické stroje, které se vyrábějí pro výkony až několik set MVA. Tyto stroje velkých výkonů se vyznačují vysokým využitím aktivních materiálů, účinným chlazením, vysokou účinností a malými investičními náklady na 1 MVA.

Statorové vinutí dvoupólového stroje, je tvořeno třemi cívkami, kde každá reprezentuje jednu fázi (U, V, W). Tyto cívký jsou od sebe vzájemně prostorově pootočené o 120°. Rotorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, který vybudí stejnosměrné magnetické pole do statorového vinutí. Pokud bychom začali otáčet takto nabuzeným rotorem, začneme na svorkách statoru měřit střídavé napětí sinusového charakteru a to díky fyzickému natočení cívek o 120°. Alternátory jsou poháněné buď parními turbínami 3000 (1500) $ot * min^{-1}$, pak jde o turbo alternátory - $2p = 2$ (4) a nebo vodními turbínami, pak jde o mnohópólové stroje velkých rozměrů - hydroalternátory. [7]

1.3 Princip činnosti synchronního motoru.

Synchronní stroje se často používají také jako motory, zejména větších a velkých výkonů (pohon kompresorů). Jejich výhodou je dobrý účinnost, případně v přebuzeném stavu může být $\cos \varphi$ kapacitní, takže lze použít kompenzaci účinniku sítě. Jejich nevýhodou je obtížné spouštění, obtížná regulace rychlosti a potřeba budiče.

Konstrukčně je motor podobný synchronnímu generátoru. Stator motoru je připojen ke třífázové síti. Jeho napájením vytvoříme točivé magnetické pole. Jeho rychlost je daná dle frekvence napájecí sítě a počtem pólů statoru. Rotor je napájen stejnosměrným proudem. Ten je na rotorové vinutí přiveden přes kroužky, napřímo z budiče umístěného na hřídeli nebo z polovodičového usměrňovače. Synchronní motor musí být "nabuzený" a pro roztočení se používá dvou způsobů rozběhu. Samotný nabuzený synchronní motor se po přímém připojení na střídavou síť neroztočí. [7]



Obrázek 1.1: Rotor synchronního generátoru při vkládání do statoru.[11]

2 Úvod do budících systémů synchronních strojů

Synchronní stroj potřebuje přivést do rotoru hlavního stroje stejnosměrný proud. Protože ale není prozatím vhodnější způsob, jak jej bezkontaktně přivést, používá se k tomuto účelu rotující budič.

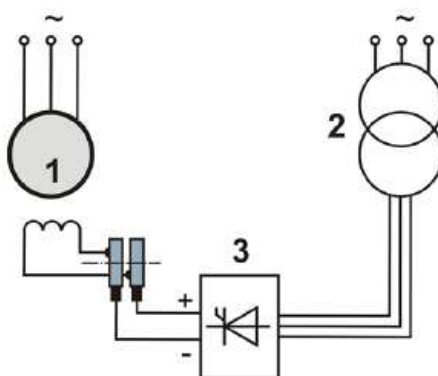
2.1 Budící soustavy

Budící soustavou synchronního stroje rozumíme zdroj regulovaného stejnosměrného proudu, pracující v uzavřené regulační smyčce, který zajišťuje buzení synchronního stroje. Budící soustava zahrnuje zpravidla budič s odbuzovačem, regulátor buzení, ruční řízení a čidla pro měření regulovaných veličin. [6]

Rychlý růst jednotkových výkonů synchronních strojů, nároky na automatizaci najíždění, provozu a odstavení a prudký rozvoj polovodičové techniky způsobily, že dříve nejrozšířenější budící soustava - stejnosměrný točivý budič - byla nahrazena tyristorovým usměrňovačem. Pro zjednodušení, zlevnění a snazší údržbu byl místo budícího alternátoru použit snižovací napěťový transformátor, který se připojí přímo ke svorkám regulovaného stroje. Někteří výrobci doplnili tuto soustavu ještě proudovou kompenzací. Potíže při přenosu budícího proudu přes sběrné ústrojí způsobily, že se začala používat bezkartáčová budící soustava, kdy na hřídeli synchronního stroje rotuje polovodičový diodový usměrňovač. Perspektivně je vyvíjen i rotující tyristorový usměrňovač. [6]

2.1.1 Budící soustava statická

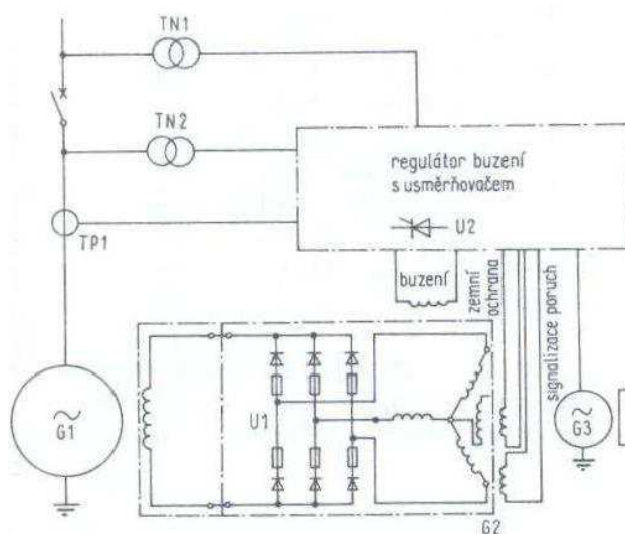
Statická soustava je tvořena řízeným nebo neřízeným usměrňovačem, který je umístěn mimo hlavní stroj. U neřízených soustav se stejnosměrný budič nahrazuje střídavým budičem. Obvykle se používá jeden hlavní a jeden pomocný střídavý budič. Oba budiče jsou umístěny na jednu hřídel s rotorem hlavního stroje. Na pomocném budiči se udržuje konstantní napětí. [6]



Obrázek 1.2: Schéma statické budící soustavy [9]

2.1.2 Budící soustava bezkartáčová

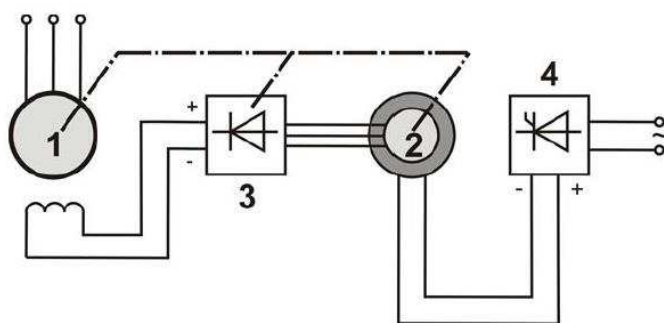
Bezkartáčová budící soustava nemá sběrné ústrojí a přenos budící energie je veden uvnitř hřídele kabely. Hlavní výhodou bezkartáčové soustavy je tedy odstranění sběracího ústrojí. Střídavý budič se nachází na rotoru. Má navinuté trojfázové vinutí, které napájí usměrňovač. Výstup z usměrňovače vede přímo do budícího vinutí. Tato soustava se vyznačuje velkým namáháním usměrňovače. Odstředivé síly, které na něj působí, vznikají díky přímému spojení s rotorem generátoru, který se točí synchronní rychlostí. Proto by měl být usměrňovač navržen tak, aby obsahoval co nejméně součástí. Tyto budící soustavy se používají do prostředí s agresivními látkami - např. korozivní prostředí, protože vyžadují minimální údržbu.[6]



Obrázek 1.3: Schéma bezkartáčové budící soustavy [6]

2.1.3 Závislá budící soustava

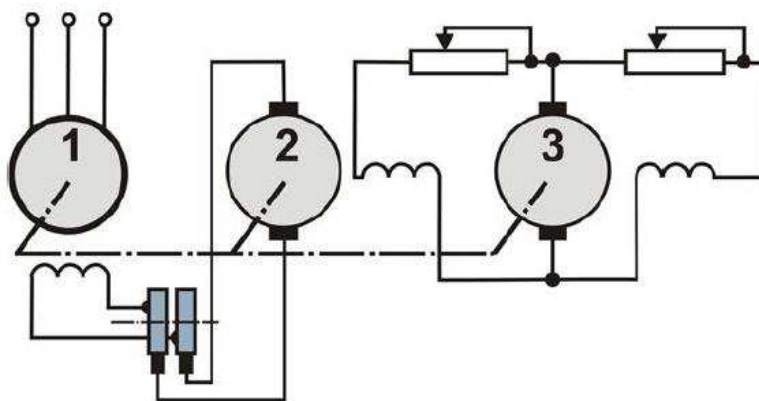
Závislá budící soustava odebírá elektrickou energii ze stejné sítě, na kterou je připojen i hlavní stroj. Je proto nutné ji usměrnit usměrňovačem, který bývá umístěn na hřídeli rotoru. Synchronní stroj pohání střídavý budič. Vinutí budiče je umístěné na statoru. Rotor má navinuté vinutí třífázové. Po usměrnění se stejnosměrný budící proud přivádí přímo do budícího vinutí synchronního stroje. Řízení buzení se provádí změnou budícího proudu v přívodech do usměrňovače. Výhodou závislé budící soustavy jsou menší rozměry budiče, takže je vhodná spíše pro rychloběžné stroje. Další variantou závislé budící soustavy je užití natáčivého transformátoru.



Obrázek 1.4: *Závislá budící soustava, buzení s nesenými ventily [9]*

2.1.4 Nezávislá budící soustava

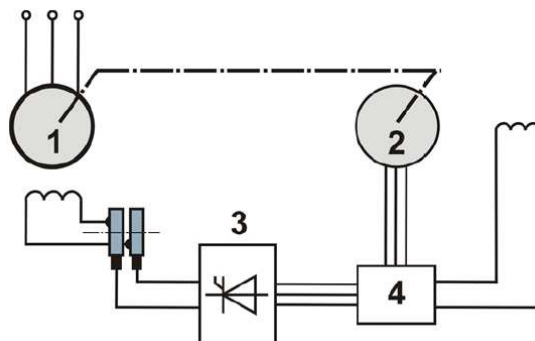
Nezávislá budící soustava se vyznačuje svou nezávislostí na napájecí síti pro hlavní stroj. Zdrojem buzení je točivý stejnosměrný nebo střídavý budič, usazený na stejné hřídeli jako stroj hlavní. Zdrojem buzení je stejnosměrný budič s paralelním buzením nebo pomocný budič s paralelním buzením. Další variantou je použití střídavého budiče umístěného na hřídeli hlavního stroje. Na hřídeli je také umístěn usměrňovač, který usměrní střídavý proud na stejnosměrný a ten je dále veden do vinutí rotoru hlavního stroje. Přivedení elektrického proudu na rotor vyžaduje užití sběrných kroužků, které jsou jeho hlavní nevýhodou. Výhodou je naopak velmi rychlá odezva na změnu budícího proudu.



Obrázek 1.5: *Nezávislá budící soustava [9]*

2.1.5 Kompaundní budicí soustava

Obsahuje kromě složky, která je závislá na napětí i další, obvykle proudové komponenty.



Obrázek 1.6: *Buzení synchronního generátoru pomocí střídavého budiče a řízeného usměrňovače s kompaundní budicí soustavou [9]*

2.2 Budiče

Budiče jsou obvykle přímo spojené s rotorem. Stator budiče je obvykle napevno přichycen ke štítu stroje. Rotor je umístěn na stejné hřídeli spolu s rotorem hlavního stroje. Budicí výkon se přenáší ze statoru budiče do rotoru budiče magnetickým polem. Rotor i stator budiče jsou složeny z izolovaných plechů, sešroubovaných do jednoho svazku. Statorové vinutí má několik pólů a pro samo nabuzení stroje se do jednoho až dvou pólů umísťují permanentní magnety. Dalo by se říct, že stator a rotor budiče tvoří samostatný synchronní stroj. Rotor budiče reprezentuje kotvu. Do statorového vinutí vtéká stejnosměrný proud, který vybudí magnetické pole. Rotor budiče napájí rotor hlavního stroje stejnosměrným proudem pro vytvoření severních a jižních magnetických pólů. Jelikož je ale výstupní proud z rotoru budiče střídavý, je potřeba jej usměrnit usměrňovačem. Ten je umístěn na stejné hřídeli spolu s rotorem budiče i hlavního stroje. Jeho umístění se volí zpravidla na čele hřídele. Vývody usměrňovače jsou vedeny vnitřním otvorem v hřídeli. [2]

2.3 Usměrňovače

Usměrňovače jsou elektrotechnická zařízení sloužící k přeměně střídavých napětí a proudů na stejnosměrná napětí a proudy. Usměrňovače se síťovou komutací nepotřebují pro vypnutí polovodičových součástek zvláštní vypínací obvody. Vypnutí a přenesení proudu na jinou součástku (komutace) probíhá působením okamžitých hodnot napětí napájecí sítě v okamžiku, kdy je na některou z dalších součástek schématu přiveden zapínací impuls. Polovodičové součástky přicházející v úvahu pro usměrňovače se síťovou komutací jsou diody u neřízených usměrňovačů a tyristory u řízených usměrňovačů. [8]

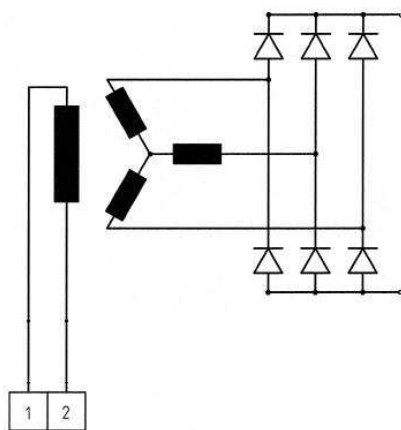
Usměrňovače se začaly rozvíjet již v době, kdy se v elektrotechnice začal prosazovat ve výrobě a rozvodu střídavý systém, který nahradil původní stejnosměrný systém. V průběhu rozvoje techniky byla přeměna střídavého elektrického proudu prováděna rotačními

elektrickými stroji (konvertory), motorgenerátory, kontaktními usměrňovači, rtuťovými usměrňovači a polovodičovými usměrňovači. [8]

Rozvoj polovodičové techniky směřuje ke stálému zlepšování parametrů polovodičových součástek a jejich spolehlivosti. Statické měniče, jak se někdy měniče s polovodičovými součástkami nazývají, se v současnosti prosadily téměř výhradně vzhledem k vysoké účinnosti a malým nárokům na údržbu. Nemají problém mechanického provozního opotřebování, mají vysokou životnost a přijatelné ceny. Jejich všeobecné používání způsobilo, že vynikly i jejich negativní vlastnosti. Usměrňovače odebírají z napájecí střídavé sítě proud nesínového průběhu. Negativní vlastnosti usměrňovačů jsou způsobeny harmonickými složkami proudu a zhoršeným účínkem. [8]

Principem každého měniče jsou nelineární vlastnosti jeho součástek a jejich přechod z vodivého do nevodivého stavu v závislosti na řízení. Každá změna vodivosti součástky znamená změnu topologické struktury měniče, to je změnu elektrického obvodu vedoucího elektrický proud. Časové úseky, během nichž se struktura elektrického obvodu nemění, nazýváme "taktu vedení". Během jednoho taktu vedení probíhá elektromagnetický přechodný děj popsany matematickou rovnicí. Sled taktů vytváří ustálený chod usměrňovače. [8]

Použití usměrňovačů se rozšířilo do následujících technických oborů: elektrolýzy, elektrické dráhy, městské dopravy, těžební stroje, válcovny a podobně. Buzení elektrických strojů stejnosměrných a střídavých, včetně turbo a hydro alternátorů, konverze elektrického proudu při stejnosměrných přenosech elektrické energie, usměrňovače pro automobily a další. Usměrňovače se vyrábějí v rozsahu napětí několika voltů až několik set kV, v rozsahu proudů od mA až 100 kA a v rozsahu výkonů W až několik stovek MW.



Obrázek 1.7: Šestipulzní usměrňovač spojený s rotorem budiče. Usměrněná energie se následně vede do rotoru synchronního stroje.

2.4 Rotující usměrňovače budícího proudu

Rotující usměrňovače plní stejnou funkci jako standardní usměrňovače. Liší se ovšem tím, že nejsou umístěny na stacionárním podkladu, ale jsou pevně spojeny s hřídelí stroje, která se otáčí určitou rychlostí. Problematika konstrukčního řešení takového usměrňovače není tak jednoduchá, jako problematika usměrňovače stacionárního. Jelikož je mnoho aplikací generátorů řádů jednotek MVA směřováno do lodního průmyslu, bývá jejich nejčastějším poháněcím strojem dieselový motor. Ten kromě otáčivého pohybu přenáší na hřídel také torzní kmitání a chvění, které mechanicky namáhá nejen usměrňovač, ale i celý generátor.

Rotující usměrňovače jsou konstruovány jako třífázové, jejichž napájecí kmitočet může být (a z pravidla bývá) vyšší, než je jmenovitý kmitočet sítě 50 Hz (60 Hz). Usměrňovače generátorů této výkonové kategorie musí být schopny usměrnit a přenést do rotoru výkony desítek KVA a přitom musí být odolné jak mechanicky tak i elektricky a tepelně. [2]

Mezi polovodičové usměrňovače patří například tyristorový usměrňovač. Tento usměrňovač s řídicími obvody, regulátorem buzení a ochranami tvoří celek, který vždy uvádí do provozu technik výrobního závodu. [6]

3 Elektromechanický návrh rotujícího usměrňovače a budiče

3.1 Rozbor návrhu

V této části je odvozen postup návrhu stroje. Výsledky výpočtu jsou prezentovány v další části práce.

3.1.1 Základní parametry pro návrh

Základními parametry pro návrh jsou:

- Jmenovitý zdánlivý výkon: S_n
- Síťové napětí: U_n
- Síťový proud: I_s
- Jmenovité otáčky: n_N
- Síťová frekvence: f
- Účinník: $\cos\varphi$
- Počet fází: m

Následuje výpočet dalších veličin.

Jmenovité fázové napětí:

$$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} [V] \quad (3.1)$$

Vnitřní elektromagnetický výkon:

$$P_i = k_E * S_n [VA] \quad (3.2)$$

Kde k_E je poměr indukovaného elektromotorického napětí v kotvě při jmenovitém zatížení k napětí jmenovitému. Závisí na $\cos\varphi$ a na impedanci statorového vinutí. Obvykle se volí v rozmezí $k_E \approx 1,05$ až $1,06$.

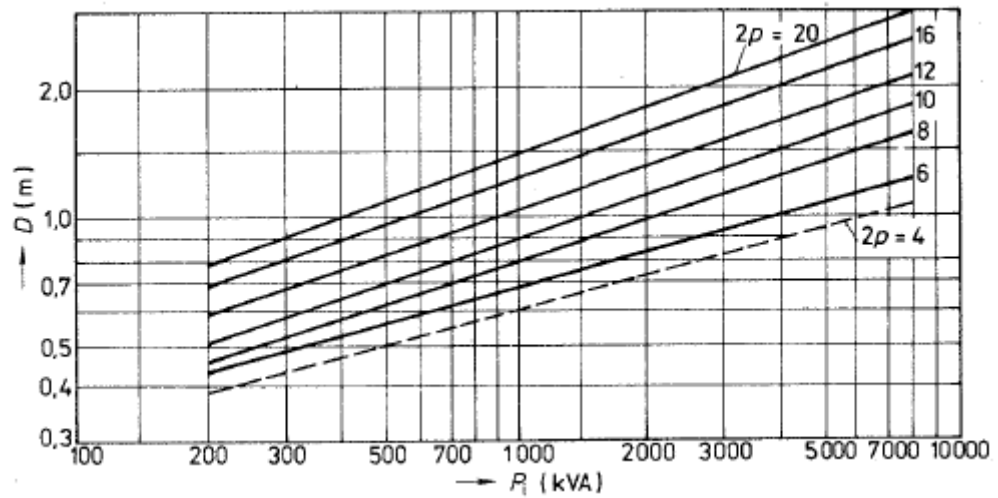
Jmenovitý fázový proud:

$$I_f = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_n} [A] \quad (3.3)$$

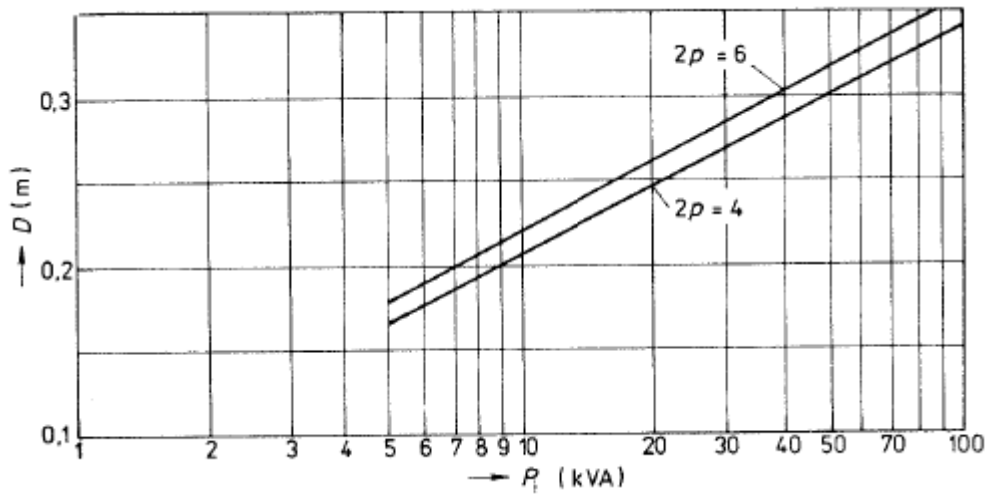
Počet pólových dvojic:

$$p = \frac{60 * f}{n_N} [-] \quad (3.4)$$

Následuje volba předběžného průměru rotoru z obrázku podle výkonu.



Obrázek 1.8: Závislost $D = f(P_i)$ synchronních strojů pro různé počty pólů; $P_i > 100 \text{ kVA}$ [10]



Obrázek 1.9: Závislost $D = f(P_i)$ synchronních strojů pro různé počty pólů; $P_i < 100 \text{ kVA}$ [10]

Předběžný průměr rotoru je třeba přepočítat dle vztahu:

$$D_e = K_D * D \text{ [m]} \quad (3.5)$$

Za hodnotu činitele dosazujeme horní a spodní mez činitele. Vyjde nám rozmezí průměrů.

Činitel K_D se určuje dle počtu pólů a následující tabulky.

Tabulka 1.1: Hodnoty činitele $K_D = D_e/D$ synchronních strojů v závislosti na počtu pólů. [10]

$2p$	4	6	8	10	12	16
K_D	1,43 až 1,52	1,4 až 1,45	1,35 až 1,4	1,3 až 1,35	1,28 až 1,33	1,22 až 1,28

Dle další tabulky se může přiřadit normalizovaný průměr a osovou výšku do již vypočítaného rozmezí.

Tabulka 1.2: Normalizované velikosti strojů D_e a přiřazené výšky osy h . [10]

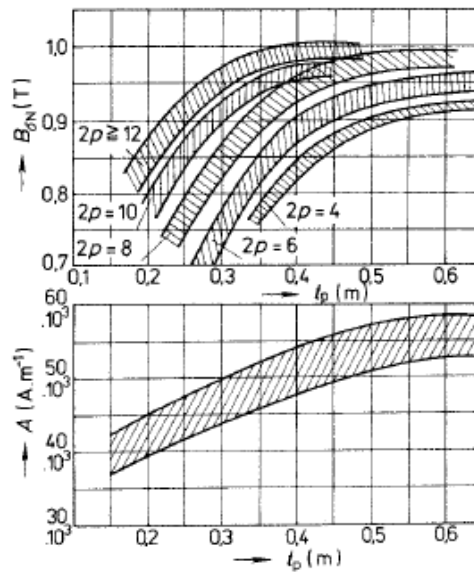
Typová velikost	Vnější průměr D_e (mm)	Výška osy h (mm)
5	280	180
6	327	200
7	393	225
8	423	250
9	493	280
10	520	315
11	590	355
12	660	400
13	740	450
14	850	500
15	990	560
16	1 180	630
17	1 430	630
18	1 730	630
19	2 150	630
20	2 600	630
21	3 250	630

Pokud se nalezený průměr D_e nachází v rozmezí vytýčeném činitelem K_D není třeba průměr D nijak upravovat.

Ze zvoleného průměru se vypočítá pólová rozteč.

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} [m] \quad (3.6)$$

Z vypočítané pólové rozteče se následně vybírá proudová A hustota a indukce ve vzduchové mezeře B_{δ} .



Obrázek 1.10: Závislost $B_{\delta N}$ a A na pólové rozteči t_p při výkonech $P_N > 100 \text{ kW}$. [10]

Následně se zvolí činitel pólového krytí α_{δ} v rozmezí 0,65 až 0,68 a činitel tvaru pole k_B v rozmezí 1,14 až 1,16. Volí se také předběžný činitel vinutí k_{v1} na hodnotu 0,92.

Ze získaných hodnot se vypočítá ideální délka rotoru dle vztahu:

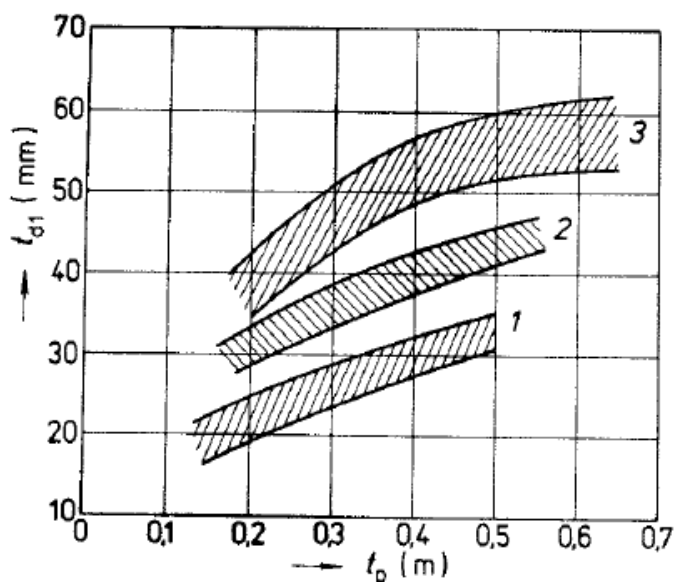
$$l_i = \frac{6,1 \cdot P_i}{\alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot D^2 \cdot n_N} \quad [m] \quad (3.7)$$

U velkých strojů se řeší štíhlostní poměr λ a skutečnou délku stroje l_1 . Budiče jsou ale stroje vesměs malé. Tyto dvě hodnoty se tedy řeší především u alternátorů.

3.1.2 Drážkování stroje

Dle fázového proudu se volí počet paralelních větví. Pokud je $I_f < 200 \text{ A}$ volí se počet paralelních větví $a = 1$. Nad 200 A se už musí upravovat výpočty dle konečných výsledků.

Z obr 1.11 vybereme možné drážkové rozteče t_{d1min} a t_{d1max} .



Obrázek 1.11: Zavislost drážkové rozteče t_{d1} na pólové rozteči t_p pro synchronní stroje velikosti 1 - 13,14; 2 - 16,17; 3 - 18,21. [10]

Ze zvolené drážkové rozteče se vypočítá horní a spodní hranici drážek rotoru.

$$Q_{1max} = \frac{\pi D}{t_{dmin}} [-] \quad (3.8)$$

$$Q_{2min} = \frac{\pi D}{t_{dmax}} [-] \quad (3.9)$$

Z tohoto rozmezí se volí takový počet drážek (celé číslo) pro které jsou splněny následující požadavky:

- Q_1 musí být číslo dělitelné počtem fází m a počtem paralelních větví a ; Q_1 musí být celé číslo
- Počet drážek na pól a fázi $q_1 = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} [-]$ musí být celé číslo nebo zlomek $q_1 = \frac{q_0}{c} [-]$, který nelze zkrátit, přičemž c nesmí být dělitelné počtem fází m a musí být menší než počet pólových dvojic p . Pro zběžné synchronní stroje o počtu pólů $2p < 8$ se nejčastěji volí vinutí celistvé s celým počtem drážek na pól a fázi $q = 3$ (2) až 5. Větší číslo pro stroje s menším počtem pólů.
- Počet paralelních větví musí být celé číslo (celistvá vinutí - $2p/a$; zlomková - $2p/ac$)
- Pro zlepšení volby segmentů statorových plechů je žádoucí, aby se počet drážek dal rozložit na pokud možno velký počet činitelů.

Z dříve vypočítaného rozmezí drážek se zvolí takový počet drážek, který co nejlépe vyhovuje výše vypsáním požadavkům. Následně se určuje počet efektivních vodičů v drážce V_d a drážkové rozteče t_{d1}

$$V_d = \frac{\pi * D * A}{Q_1 I_{Nf}} [-] \quad (3.10)$$

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší sudé číslo. Dále se vypočítá přesná hodnota lineární hustoty proudu statoru

$$A = \frac{Q_1 * V_d * I_{Nf}}{\pi * a * D} [A/m] \quad (3.11)$$

Nejvýhodnější varianta počtu drážek se jeví taková, kdy se upřesněná hodnota lineární hustoty proudu nepatrně liší, nebo je velmi podobná určené hodnotě ze začátku výpočtu (+/- 5 %) a drážková rozteč odpovídá hodnotám uvedených na obr. 1.11.

Předběžná šířka drážky rotoru se vypočítá dle:

$$b_{d1} = (0,34 \text{ až } 0,50) * t_{d1} [m] \quad (3.12)$$

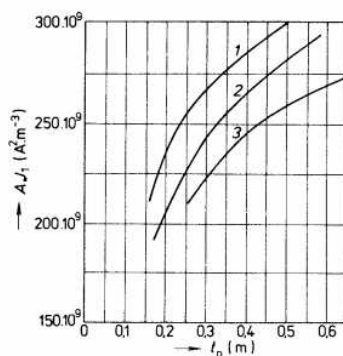
Hodnota konstanty, která se násobí zvolenou drážkovou roztečí, se volí podle velikosti stroje. Pro větší stroje se volí hodnota menší, pro stroje malé velikosti se volí hodnota větší.

Po určení předběžné šířky drážky lze vypočítat průřez efektivního vodiče rotorového vinutí dle vztahu:

$$S_{ef} = \frac{I_f}{a * J_1} [m^2] \quad (3.13)$$

Kde dovolená proudová hustota J_1 se určuje podle takzvaného AJ kritéria a následného vzorce a obr. 1.12.

$$J_1 = \frac{(AJ)}{A} [A/m] \quad (3.14)$$



Obrázek 1.12: Závislost AJ na pólové rozteči t_p pro běžné synchronní stroje. Křivka 1 pro velikosti do 14, křivka 2 pro stroje velikosti 16 a 17 a křivka 3 pro stroje velikosti 18 až 21.[10]

3.1.3 Izolace drážky

Z možné šířky drážky lze spočítat možnou šířku izolovaného vodiče nutnou k určení drážky. Podle typu izolace se určuje oboustranná šířká izolace v drážce δ_{id} a možná šířka izolovaného vodiče je pak tedy:

$$b'_{ui} = b_{d1} - \delta_{id} [m] \quad (3.15)$$

Dle tohoto rozměru je možné určit rozměry drážky, se kterou se bude nadále počítat. Tabulka pro výběr drážky se nachází v příloze.

Nyní se vypočítá upřesněná hustota proudu ve vodiči rotorového vinutí,

$$J_1 = \frac{I_f}{a * S_{ef}} [A/m] \quad (3.16)$$

a provede se přibližná kontrola maximální indukce v zubu dle vztahu

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta N} * t_{d1} * l_i}{(t_{d1} - b_{d1}) * l_{Fel} * k_{Fe}} [T] \quad (3.17)$$

kde činitel plnění železa k_{Fe} se obvykle udává v hodnotě 0,93 a l_{Fel} je délka rotorového paketu.

Provede se kontrola magnetické indukce ve jhu statoru,

$$B_{j1} = \frac{\alpha_{\delta} * B_{\delta N} * t_p * l_i}{2 * h_{jl} * l_{Fel} * k_{Fe}} [T] \quad (3.18)$$

kde výška statoru h_{jl} je

$$h_{jl} = \frac{D_e - D}{2} [m] \quad (3.19)$$

Pro kontrolu se může vypočítat teplotní spád v drážkové izolaci a teplotní gradient v drážkové izolaci.

$$\Delta\vartheta_{id} = \frac{J_1 * A * k_d}{4,2 * 10^{11}} * \frac{t_{d1}}{2 * (b_{d1} + h_{dl} - h_k)} * \frac{0,5 * \delta_{id}}{\lambda_i} [^{\circ}C] \quad (3.20)$$

$$\Delta\vartheta'_{id} = \frac{\Delta\vartheta_{id}}{0,5 * \delta_{id}} [^{\circ}C] \quad (3.21)$$

Kde $\lambda_i = 1,6 * 10^{-5}$ pro kompaundovanou izolaci, $\lambda_i = 1,1 * 10^{-5}$ pro nekompaundovanou izolaci a $\lambda_i = 2,2 * 10^{-5}$ pro izolaci nažehlovanou.

3.1.4 Počet závitů a činitele kroku vinutí

Počet závitů ve fázi rotorového vinutí.

$$N_1 = 2p * q_1 * \frac{V_d}{2 * a} [-] \quad (3.22)$$

Pólová rozteč.

$$Q_p = \frac{Q}{2p} [m] \quad (3.23)$$

Kde se následně zkrácený krok pro dvouvrstvá vinutí rotoru určuje dle

$$y_1 = (0,8 \text{ až } 0,86) * Q_p \quad (3.24)$$

a zkrácení kroku

$$\beta = \frac{y_1}{Q_p} \approx 0,8 [-] \quad (3.25)$$

Následné činitele zkrácení kroku pro první harmonickou k_y a činitel zkrácení kroku rotorového vinutí k_r je

$$k_y = \sin\left(\frac{y_1}{Q_p} * \frac{\pi}{2}\right) [-] \quad (3.26)$$

$$k_r = \frac{0,5}{q_0 * \sin\left(\frac{30}{q_0}\right)} [-] \quad (3.27)$$

Celkový činitel rotorového vinutí je tedy

$$k_{v1} = k_r * k_y [-] \quad (3.28)$$

3.1.5 Vzduchová mezera a póly statoru

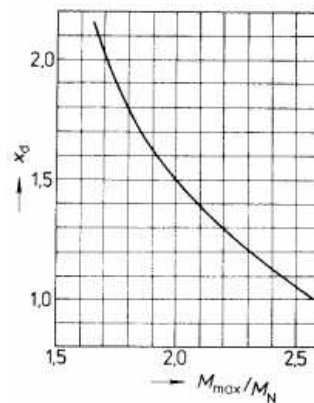
Indukce ve vzduchové mezeře se určí dle vztahu

$$B_{\delta 0} = 0,95 * B_{\delta} [T] \quad (3.29)$$

Přibližná velikost vzduchové mezery se určí dle vztahu

$$\delta = (0,27 \text{ až } 0,33) * 10^{-6} * \frac{A}{B_{\delta 0}} * \frac{t_p}{x_d} [m] \quad (3.30)$$

kde x_d je podélná synchronní reaktance. Ta se určí ze závislosti na momentové přetížitelnosti (obr 1.13).



Obrázek 1.13: Závislost x_d na momentové přetížitelnosti. [10]

Maximální hodnota vzduchové mezery je poté

$$\delta_{max} = 1,5 * \delta [m] \quad (3.31)$$

a její střední velikost

$$\delta' = \delta + \frac{1}{3}(\delta_{max} - \delta) [m] \quad (3.32)$$

Šířka pólového nástavce

$$b_{pn} = \alpha * t_p [m] \quad (3.33)$$

kde α je činitel pólového krytí. Ten se volí v rozmezí 0,68 až 0,73.

Výška pólového nástavce h_{pn} se určí dle tabulky 1.3

Tabulka 1.3: Výška pólu h_{pn} v závislosti na pólové rozteči t_p . [10]

t_p (m)	0,15 až 0,20	0,20 až 0,30	0,30 až 0,40	0,40 až 0,50	0,50 až 0,60	
h_{pn} (mm)	22 až 30	30 až 40	40 až 50	50 až 60	60 až 75	s tlumicím vinutím
	16 až 22	22 až 30	30 až 37	37 až 45	45 až 55	bez tlumicího vinutí

Tato tabulka je převzata pro synchronní generátory. Pro budiče, které jsou "obrácenými" synchronními stroji, však platí také.

Délka jádra pólu je stejná jako délka rotorového paketu.

Následně se spočítá činitel rozptylu pólů.

$$\sigma_p = 1 + k * \frac{0,35\delta}{t_p^2} \quad (3.34)$$

Kde za k , se zvolí hodnota dle tabulky 1.4.

Tabulka 1.4: Závislost k ku výšce pólu h_{pn} . [10]

h_{pn} (mm)	30	40	50	60	70
k	7	8,5	10	11	12

Následná výška statorového jha se spočítá dle vzorce

$$h_{js} = \frac{\alpha_\delta * B_{\delta N} * t_p * l_i * \sigma_p}{2 * B_{js} * l_{js}} [m] \quad (3.35)$$

kde indukce ve statoru B_{js} se volí v rozmezí 1 až 1,3 T.

3.2 Výpočet magnetického obvodu

Nejprve se musí zvolit materiál plechů pro magnetický obvod statoru a rotoru. Musí být známá jejich tloušťka, měrné ztráty $\Delta p_{B/f} [W * kg^{-1}]$ a magnetizační charakteristiky zvolených materiálů.

Následně se může vypočítat magnetický tok ve vzduchové mezeře.

$$\Phi = \frac{U_f}{4 * k_B * k_V * f * N_1} * e_i [Wb] \quad (3.36)$$

Upřesněná magnetická indukce ve vzduchové mezeře je poté.

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta * t_p * l_i} [T] \quad (3.37)$$

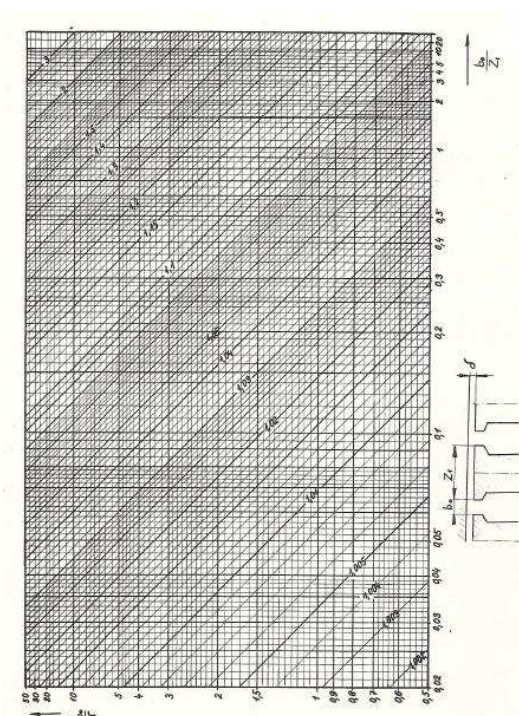
Carterův činitel zohledňuje vliv drážkování na magnetickou vodivost vzduchové mezery. Drážky pro uložení vinutí jsou vytvořeny v magneticky vodivém materiálu. Skládá se ze 2 dílčích činitelů. Činitele pro stator a rotor.

$$k_{cs} = \frac{t_{ds} + 10\delta'}{t_{ds} - b_{01} + 10\delta'} \quad (3.38)$$

$$k_{cr} = \frac{t_{dr} + 10\delta'}{t_{dr} - b_{02} + 10\delta'} \quad (3.39)$$

Celkový Carterův činitel:

$$k_c = k_{cs} * k_{cr} \quad (3.40)$$



Obrázek 1.14: Graf pro určení Carterova činitele pro drážkování rotoru[10]

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře je dle vztahu 3.41.

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} * k_c * \delta * B_{\delta} [A] \quad (3.41)$$

Pro výpočet dalších magnetických napětí, z nichž se vytvoří charakteristika naprázdno, musíme určit třetinové výšky a šířky zubů. Šířka zubu rotoru ve výšce $1/3 h_{d1}$ je

$$b_{z1^{1/3}} = t_{d1^{1/3}} - b_{d1} [m] \quad (3.42)$$

kde

$$t_{d1^{1/3}} = \frac{\pi * (D + \frac{2h_{d1}}{3})}{Q_1} [m] \quad (3.43)$$

Následná magnetická indukce v zubu rotoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} * t_{d1} * l_i}{b_{z1^{1/3}} * l_{Fe1} * k_{Fe}} [T] \quad (3.44)$$

Magnetické napětí zubů rotoru je tedy

$$F_{zr} = h_{d1} * H_{z1} [A] \quad (3.45)$$

Kde $H_{z1} [A * m^{-1}]$ je intenzita magnetického pole, která se určí z magnetizační charakteristiky materiálu plechu rotoru. Tato intenzita odpovídá příslušné indukci.

Magnetická indukce ve jhu rotoru je dle vztahu 3.46.

$$B_{jr} = \frac{\Phi}{2 * l_{Fe1} * h_{j1} * k_{Fe}} [T] \quad (3.46)$$

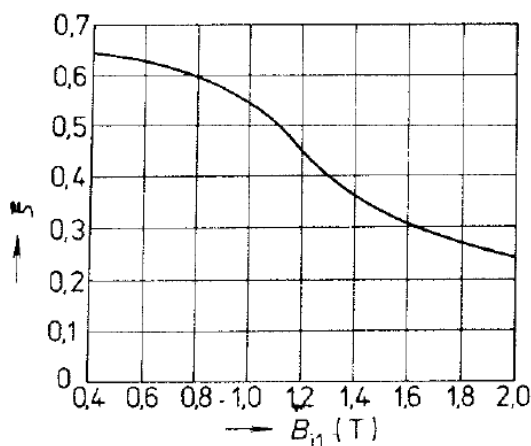
Pro magnetické napětí v rotorovém jhu se musí vypočítat střední délka indukční čáry ve jhu.

$$l_{j1} = \frac{\pi * (D_e - h_{j1})}{4p} [m] \quad (3.47)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru je tedy

$$F_{jr} = \xi * l_{j1} * H_{1l} [A] \quad (3.48)$$

kde $H_{1l} [A * m^{-1}]$ je intenzita magnetického pole ve jhu rotoru. Určí se ze stejné magnetizační křivky jako pro zub rotoru. $\xi [-]$ je bezrozměrný činitel nerovnoměrného rozložení magnetické indukce v průřezu jha. Určí se dle obr. 1.15.



Obrázek 1.15: Závislost činitele ξ na indukci ve jhu. [10]

Šířka statorového pólu ve výšce $1/3 h_{pn}$ se vypočítá dle vztahu 3.49.

$$b_{z2^{1/3}} = \frac{D-2\delta-\frac{2h_{pn}}{3}}{D-2\delta} * t_{d2} [m] \quad (3.49)$$

Následná magnetická indukce v pólu statoru,

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} * t_{d2} * l_i}{b_{z2^{1/3}} * l_{pn} * k_{Fe}} [T] \quad (3.50)$$

a magnetické napětí pólu statoru.

$$F_p = h_{pn} * H_{z2} [A] \quad (3.51)$$

Musí se také spočítat magnetická indukce v jádru pólu.

$$B_p = \frac{\Phi}{l_p * b_p * k_{Fe2}} [T] \quad (3.52)$$

A následné magnetické napětí ve styku mezi pólem a jhem statoru.

$$F_{\delta p} = 250 * B_p [A] \quad (3.53)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru je pak dle vztahu.

$$F_{js} = l_{js} * H_{js} [A] \quad (3.54)$$

Kde délka indukční čáry ve jhu statoru je.

$$l_{js} = \frac{\pi(D-2\delta-2*(h_p+h_{pn})-h_{js})}{4p} [m] \quad (3.55)$$

A následné magnetomotorické napětí F_{b0} vinutí je součtem všech počítaných magnetických napětí.

Z vypočteného magnetomotorického napětí se sestrojuje magnetizační charakteristika. Ta je závislostí procentuálního růstu fázového napětí na proudu budiče. Její hodnoty jsou uvedeny ve výsledkové kapitole.

3.3 Výpočet budícího vinutí

Na pólech statoru se nachází vinutí, jež se nazývá budící. Při jeho návrhu je potřeba zvolit některé rozměry statorové cívky.

- Poloměr zaoblení čela r
- Délka přímé části cívky při výstupu z drážky $l_{\zeta v}$
- Tloušťku izolace statorové drážky

Z rozměru pólu statoru (uvažuje se, že budící cívka se vejde pod pólový nástavec) určíme výšku h_c a šířku b_c statorové cívky. Pomocí geometrie se dopočítá střední délka čela $l_{b\zeta}$, střední délka jednoho závitu l_{bz} a celková délka budícího vinutí l_{bv} .

Střední délka závitu budícího vinutí.

$$l_{bz} = 2 * (l_p + b_p + 2a) [m] \quad (3.56)$$

Průřez vodiče budícího vinutí je dle 3.57.

$$S_b = \frac{\rho * 2p * F_0 * l_{bz}}{U_b} [m^2] \quad (3.57)$$

Budící proud je pak tedy

$$I_b = \sigma * S_b [A] \quad (3.58)$$

kde proudová hustota ve vodiči σ se volí.

Počet závitů budící cívky.

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} [-] \quad (3.59)$$

Odpor sériově spojeného budícího vinutí se spočítá dle vztahu 3.60.

$$R_b = 1,32 * \rho * \frac{l_{bz} * N_b * 2p}{S_b} [\Omega] \quad (3.60)$$

Oteplení budícího vinutí je poté dle vztahu 3.61.

$$\Delta\vartheta_{bv} = \frac{1,18 * \Delta P_{bv}}{\alpha * S_{tc}} [^\circ C] \quad (3.61)$$

Kde ΔP_{bv} jsou ztráty v budícím vinutí

$$\Delta P_{bv} = \frac{R_b}{I_b^2} [W] \quad (3.62)$$

a S_{tc} je plocha, kterou se celé budící vinutí ochlazuje. Jedná se o plochu všech cívek. Budící napětí U_b [V] se následně dopočítá dle Ohmova zákona z odporu budícího vinutí a budícího proudu.

3.4 Ztráty a účinnost budiče

Výkonové ztráty mají velký dopad na účinnost stroje. Při jejich výpočtu se zohledňují vlastnosti materiálu a elektrické vlastnosti stroje.

Ztráty ve vinutí rotoru jsou dle vztahu 3.63.

$$\Delta P_{vs} = (R_b * I_{bN}^2 + 2 * \Delta U_k * I_{bN}) * 10^{-3} [W] \quad (3.63)$$

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{vr} = m * R_{1(t)} * I_{nF}^2 * 10^{-3} [W] \quad (3.64)$$

Magnetické ztráty ve jhu rotoru

$$\Delta P_{Fej} = k_{dj} * \Delta p_{1,0/50} * B_{j1}^2 * \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} * m_{j1} * 10^{-3} [W] \quad (3.65)$$

kde k_{dj} je činitel zvýšení ztrát. Ten se určuje dle výkonu stroje (do 100 kW je $k_{dj} = 1,5$, nad 100 kW je $k_{dj} = 1,3$).

Magnetické ztráty v zubech rotoru.

$$\Delta P_{Fez} = k_{dz} * \Delta p_{1,0/50} * B_z^2 * \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} * m_{j1} * 10^{-3} [W] \quad (3.66)$$

Kde k_{dz} je činitel zvýšení ztrát. Ten se určuje dle výkonu stroje (do 100 kW je $k_{dz} = 2$, nad 100 kW je $k_{dz} = 1,7$).

Mechanické ztráty stroje

$$\Delta P_{mech} = 3,68 * p * \left(\frac{v}{40}\right)^3 * \sqrt{l_1} [W] \quad (3.67)$$

kde v je obvodová rychlost, která se spočítá dle

$$v = \frac{\pi * D * n}{60} [m * s^{-1}] \quad (3.68)$$

Dodatečné ztráty vznikají ve stroji jak při chodu naprázdno, tak při zatížení.

Při chodu naprázdno vznikají ztráty na povrchu pólů důsledkem kolísání indukce vlivem drážkování.

$$\Delta P_{\delta p} = 0,5 * 2p * \alpha * t_p * l_1 * k_0 * \left(\frac{Q_{1*n}}{10000}\right)^{1,5} * (B_0 * t_{d1} * 10^3)^2 * 10^{-3} [W] \quad (3.69)$$

Kde činitel $k_0 = 4,6$ u pólů složených z plechů tloušťky 1 mm, $k_0 = 8,6$ u pólů složených z plechů tloušťky 2 mm a $k_0 = 23,3$ u pólů složených z masivních plechů (například 5mm).

$$\text{Indukce ve vzduchové mezeře } B_0 = B_{\delta 0} * (k_{c1} - 1) [T] \quad (3.70)$$

Dodatečné ztráty při zatížení je možno určit dle procentuální hodnoty výkonu. U strojů do 1000 kVA je $\Delta P_d = 0,5\%$, u strojů nad 1000 kVA je $v\Delta P_d = 0,25\%$ až $0,4\%$.

Celkové ztráty jsou pak součtem všech ztrát ve stroji.

$$\Delta P = \Delta P_{vs} + \Delta P_{vr} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{\delta p} + \Delta P_d [W] \quad (3.71)$$

Účinnost budiče je pak

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} [\%] \quad (3.72)$$

3.5 Návrh usměrňovače

Modul rotujícího usměrňovače se navrhuje dle proudu, který dodává rotor budiče rotoru hlavního stroje. Na tento proud se dimenzují usměrňovací diody a proudová cesta, neboli propojení mezi jednotlivými moduly usměrňovače.

3.5.1 Elektrický návrh usměrňovače

Pro samotný návrh usměrňovače se vychází ze stejných zásad jako pro jiné obory. Polovodiivé součástky se dimenzují napětově tak, aby jejich závěrné napětí bylo alespoň 2,2 krát vyšší, než je amplituda napájecího napětí, které se na součástce bude vyskytovat. Jsou-li hodnoty napětí příliš vysoké, lze použít součástek více. Ty se pak řadí do série. Při tomto provedení se uvažuje ještě činitel rozdělení napětí 0,9.

Proudově se navrhuje měnič podle stropního proudu I_{bs} . Podle doporučení výrobce se stanoví maximální dovolený proud ventilem I_{1v} pro 120° a dané chladicí a teplotní podmínky. Odhadne se, že pro doby 10 až 50 s jsou polovodičové součástky přetížitelné o 20 % a stanovuje se počet paralelních větví a . Pro můstek tedy platí rovnice:

$$a \geq \frac{I_{bs}}{3 \cdot 0,9 \cdot I_{1v} \cdot 1,2} [-] \quad (3.73)$$

Pro zajištění velké provozní spolehlivosti polovodičových usměrňovačů se zpravidla požaduje, aby usměrňovač pracoval bez proudového omezení i při poruše jednoho z paralelně spojených ventilů ve větvi můstku.

Na výstupu z usměrňovače bývá obvykle připojen paralelně přídržný rezistor, který zajišťuje plynulou regulaci napětí na reaktoru při počátku nabuzování. Není-li použit, pak se při nabuzování rotoru objevuje proudový skok, neboť tyristory se v počátku neudrží ve vodivém stavu po celou dobu 120° .

Odpor přídržného rezistoru se stanovuje tak, aby pro řídicí úhel $\alpha = 90^\circ$ (při nulovém napětí reaktoru) procházel rezistorem alespoň proud, který udrží paralelně zapojené rezistory ve vodivém stavu. Pro trojfázový můstek poté platí:

$$R_p = \frac{U_f \sqrt{3}}{4 \cdot a \cdot I_p} [\Omega] \quad (3.74)$$

Kde I_p je přídržný proud polovodičové součástky.

Při navrhování točivého usměrňovače se musí dbát jistých zásad, neboť značné odstředivé síly a požadavek na maximální spolehlivost vyžadují, aby počet otáčivých částí byl co nejmenší. Dále platí:

- Sestavit usměrňovač s nejmenším možným počtem součástek, nejlépe jen z diod, a nepoužívat, je-li to možné ani pojistky ani komutační filtry RC.
- Použít vždy diody s co nejvyšším možným závěrným napětím
- Použít diody s největším proudem a měnič proudově dostatečně dimenzovat.
- Využít jako chladič nosný kotouč, je-li to možné.
- Konstruktivním řešením zajistit dobrý izolační stav v dlouhodobém provozu.
- Zajistit snadnou vyměnitelnost součástek.
- Zajistit dodržení hladiny hluku.

Při dimenzování propojení jednotlivých modulů usměrňovače se vychází z takzvaného "čtyř-milimetrového" pravidla - tedy že na jeden milimetr čtvereční připadají čtyři ampéry proudu. Pokud se tedy podělí dodávaný proud budiče průřezem vodiče (propoje) usměrňovače, měla by být výsledná hodnota menší než 4. Toto dimenzování se používá pro dlouhodobé provozy a mělo by zahrnovat jistou rezervu pro případnou dávku přetížení. Pro krátkodobé přetížení se může volit pravidlo šesti-milimetrové. Tato hodnota se ale nehodí pro dlouhodobé provozní doby.

Umístění modulu usměrňovače může být různé. Může se nacházet po obvodu hřídele s axiálně směřovanými moduly diod, nebo mezi čely vinutí budiče a hřídelí s radiálně směřovanými moduly. Usměrňovač může mít i vlastní nosič.

4 Vlastní návrh rotujícího usměrňovače a budiče - výpočet

4.1 Zadání budiče

- Usměrněné rotorové napětí $U_s = 116 V$
- Usměrněný rotorový proud $I_s = 170 A$
- Počet pólů $2p = 12$
- Účinitk stroje $\cos \varphi = 0,98$
- Osová výška $H = 355 mm$
- Zdánlivý výkon stroje $S_n = 20,7 kVA$

Tyto údaje bylo potřeba znát pro vlastní návrh budiče. Rozbor návrhu je popsán v kapitole 3 včetně vzorců a postupu určení jednotlivých hodnot a konstant. Pro účely výpočtu byl naprogramován výpočtový program v tabulkovém editoru MS Excel. Následující výsledky nejsou seřazeny dle postupu uvedeného v kapitole 3, ale jsou seřazeny k sobě do tabulek, aby dávaly větší smysl a podporovaly návaznost.

4.1.1 Základní parametry

Tabulka 1.5: Základní parametry budiče

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
U_s	Usměrněné rotorové napětí	116	V
I_s	Usměrněný rotorový proud	170	A
$2p$	Počet pólů	12	-
H	Osová výška	355	mm
D_e	Vnější průměr statoru	650	mm
D	Vnitřní průměr statoru	494	mm
d	Vnější průměr rotoru	491	mm
d_i	Vnitřní průměr rotoru	360	mm
l	Délka paketu (jádra)	100	mm
δ	Vzduchová mezera	1,5	mm
n	Otáčky	1000	min^{-1}
f	Frekvence	100	Hz

Tabulka 1.6: *Elektrické veličiny stroje*

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
B_{δ}	Indukce ve vzduchové mezeře	0,416	T
$\cos \varphi$	Účinnost stroje	0,98	-
U_{ef}	Efektivní rotorové napětí	85,93	V
U_f	Fázové napětí	49,61	V
I_f	Fázový proud rotoru	139,4	A
U_{max}	Maximální rotorové napětí	121,52	V
I_{max}	Maximální rotorový proud v jedné větvi	98,57	A
S_n	Jmenovitý výkon	20746	VA
P_i	Vnitřní výkon	24698	VA
α_{δ}	Činitel pólového krytí	0,541	-
k_B	Činitel tvaru pole	1,14	-
$\alpha_{\delta} * k_B$	[-]	0,61703	-
k_{v1}	Činitel vinutí rotoru	9445	-
A	Předběžná lineární proudová hustota	16,84	A/m
ϕ	Magnetický tok	2,893	mWb

4.1.2 Rotor

Tabulka 1.7: *Vypočtené hodnoty rotoru*

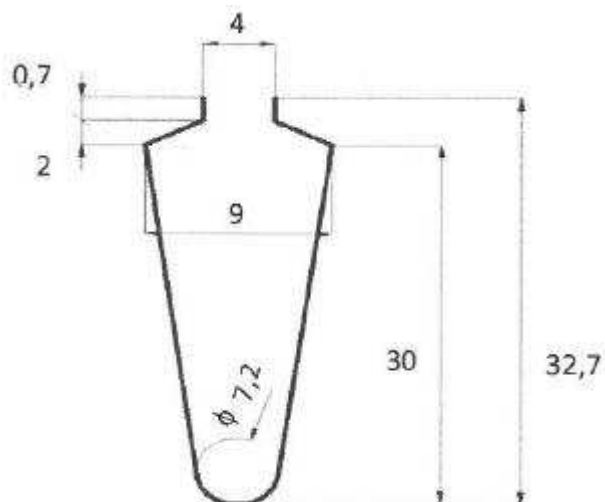
Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
	Zapojení vinutí	Y	-
	Počet vrstev vinutí	2	-
m	Počet fází	3	-
a	Počet paralelních větví	2	-
q_1	Počet drážek na pól a fázi	2,5	-
q_0	[-]	5	
c	[-]	2	
Q	Počet drážek	90	drážek
Q_p	Počet drážek na pól	7,5	drážky
γ_d	Krok rotorového vinutí	6	drážek
β	Zkrácení kroku	0,8	-
k_r	Činitel rozlohy	0,9567	-
k_y	Činitel zkrácení kroku pro první harmonickou	0,9511	-
k_v	Činitel vinutí	0,9099	-
V_d	Počet vodičů v drážce rotoru	6	vodičů
N	Počet vodičů celkem	540	vodičů
N_1	Počet závitů v sérii v jedné fázi	45	závitů
t_{pr}	Pólová rozteč	128,5	mm
t_d	Drážková rozteč na povrchu rotoru	17,14	mm
d_v	Průměr vodiče	1,5	mm
a_{dt}	Počet paralelních drátů	10	-
S_v	Plocha vodiče	1,767	mm^2
d_{diz}	Průměr vodiče i s izolací	1,608	mm
r_{dkm}	Měrný odpor všech paralelních drátů	0,992	Ω/km
σ	Proudová hustota vodičů	3,94	A/mm^2

A	Lineární přepočtená proudová hustota	24,4	A/mm
$A * \sigma$		96,25	A^2/mm^3
k_{fe2}	Čintiel plnění železa	0,95	-

4.1.3 Návrh drážky rotoru

Tabulka 1.8: Hodnoty návrhu drážky rotoru

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
	Typ drážky	W	-
	Typ dna drážky	Kruhové	-
	Typ uzávěru drážky	Klínový	-
b_1	Šířka drážky	9	mm
b_z	Šířka zubu	7,93	mm
B_z	Indukce v zubech rotoru	0,88	T
h_2	Výška těla drážky	30	mm
b_0	Šířka otevření drážky	4	mm
h_0	Výška krku	0,7	mm
h_1	Výška klínové části	2	mm
b_2	Průměr kruhového dna drážky	7,2	mm
h_d	Celková výška drážky	32,7	mm
S_d	Plocha drážky	247,25	mm^2
S_v	Plocha vodičů	155,14	mm^2
	Činitel plnění drážky	85,2	%
l_{ξ}	Střední délka čela	173,54	mm
l_v	Délka vodiče	273,54	mm
l_c	Celková délka vodičů	147,71	mm



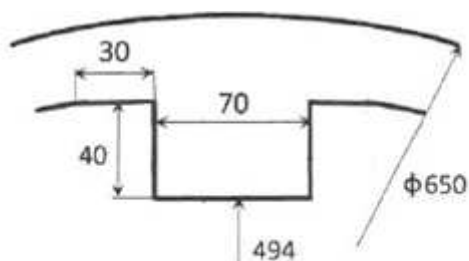
Obrázek 1.16: Výsledné rozměry rotorové drážky

4.1.4 Stator

Tabulka 1.9: Vypočtené hodnoty statoru

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
t_{ps}	Pólová rozteč statoru	129,33	mm
h_{j2}	Výška rotorového jha	30	mm
h_p	Výška pólu	40	mm
σ_p	Předběžný činitel rozptylu	1,032	-
k_{Fe2}	Činitel plnění železa	0,97	-
B_p	Indukce v pólu	0,44	T
b_p	Šířka pólu	70	mm
α_δ	Činitel pólového krytí	0,541	-
δ'	Střední hodnota velikosti vzduchové mezery	2,32	mm
δ_{max}	Maximální vzduchová mezera	3,97	mm
d_{vb}	Průměr vodiče	1,4	mm
a_{dtb}	Počet paralelních drátů	1	
S_{vb}	Plocha jednoho drátu	1,539	mm ²
N_b	Počet závitů	300	Závitů

a_b	Počet paralelních větví budícího vinutí	1	větev
h_c	Výška cívky	30	mm
b_c	Šířka cívky	22,68	mm
$l_{bč}$	Střední délka čela	120,7	mm
l_{bz}	Střední délka závitu	441,5	mm
l_{bv}	Délka budícího vinutí	1589,55	m
S_c	Průřez cívky	680,41	mm^2
R_b	Odpor budícího vinutí	18,116	Ω
I_b	Budící proud	4,78	A
U_b	Budící napětí	105,33	V
σ_b	Proudová hustota vodičů v budícím vinutí	3,11	A/mm^2
ϑ_{bv}	Oteplení budícího vinutí	55	$^{\circ}C$



Obrázek 1.17: Výsledné rozměry pólu statoru

4.1.5 Magnetické hodnoty stroje - elektromagnetický obvod

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
k_c	Carterův činitel	1,11	-
F_δ	Magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře	550,94	A
Rotor			
Materiál plechu rotoru		M400-50A	
$H_{zstř}$	Střední intenzita v zubech rotoru	0,099	A/mm
l_z	Délka siločáry v zubu rotoru	32,7	mm

B_z	Indukce v zubech rotoru	0,88	T
F_z	Magnetomotorická síla v zubech rotoru	3,22	A
l_{jr}	Délka siločáry ve jhu rotoru	51,42	mm
B_{jr}	Indukce ve jhu rotoru	0,46	T
H_{jr}	Intenzita ve jhu rotoru	0,04876	A/mm
F_{jr}	Magnetomotorická síla ve jhu rotoru	2,51	A
F_r	Magnetomotorická síla rotoru	5,73	A
Stator			
Materiál plechu statoru		11 373	
B_p	Indukce v pólu statoru	0,44	T
H_p	Intenzita v pólech statoru	0,2376	A/mm
F_p	Magnetomotorická síla pólu statoru	11,40	A
l_{js}	Délka siločáry ve jhu statoru	81,16	mm
B_{js}	Indukce ve jhu statoru	0,51	T
H_{js}	Intenzita ve jhu statoru	0,272	A/mm
F_{js}	Magnetomotorická síla jha statoru	22,07	A
F_s	Magnetomotorická síla statoru	33,48	A
F_{b0}	Celkové magnetické napětí budícího vinutí	590,14	A

Tabulka 1.10: Ztráty stroje

Veličina	Název veličiny	Hodnota	Jednotka
ΔP_{vr}	Ztráty ve vinutí rotoru	865,4	W
ΔP_{vs}	Ztráty ve vinutí statoru	503,7	W
k_{dj}	Činitel zvýšení ztrát	1,5	
k_{dz}	Činitel zvětšení ztrát	2	
$\Delta p_{1,0/50}$	Měrné ztráty na 1 kg materiálu	1700	W
ΔP_{Fej}	Magnetické ztráty ve jhu rotoru	42,2	W
ΔP_{Fez}	Magnetické ztráty v zubech rotoru	131,8	W

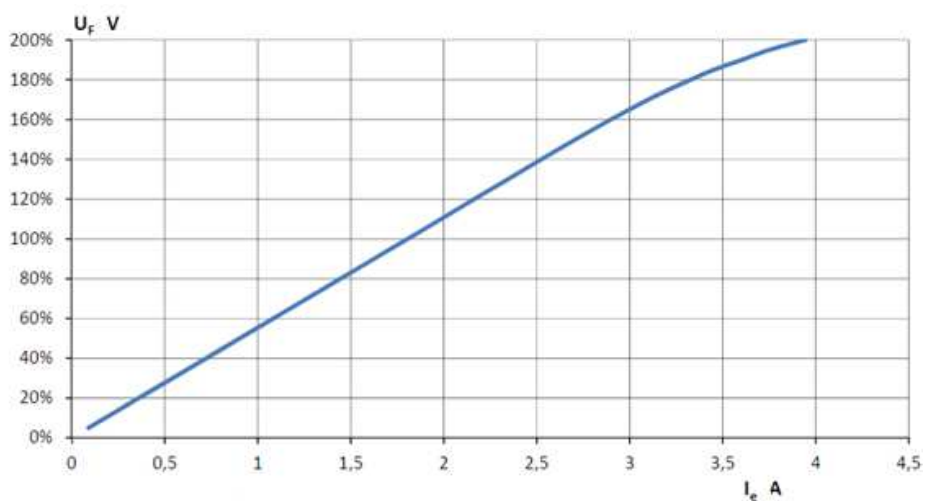
v	Obvodová rychlost rotoru	25,71	m/s
t	Tloušťka plechu statoru	5	mm
k_0	Činitel	23,3	
B_0	Přepočtená indukce ve vzduchové mezeře	0,0420	T
$\Delta P_{\delta p}$	Dodatečné ztráty při chodu naprázdno	13,6	W
ΔP_d	Dodatečné ztráty při zatížení	103,7	W
ΔP	Celkové ztráty	1660,4	W
η	Účinnost	92,6	%

4.1.6 Magnetizační charakteristika

Tabulka 1.11: *Tabulka výsledných hodnot pro magnetizační charakteristiku*

U [%]	F_z [A]	F_{jr} [A]	F_p [A]	F_{js} [A]	F_δ [A]	$F_{\delta p}$ [A]	F_{b0} [A]	I_{e0} [A]
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,139	0,109	0,518	0,877	25,301	25,819	26,944	0,090
10	0,283	0,218	1,037	2,191	50,602	51,639	54,331	0,181
20	0,555	0,491	2,074	3,944	101,204	103,278	108,267	0,361
30	0,838	0,709	3,110	6,136	151,806	154,916	162,598	0,542
40	1,138	0,927	4,147	8,327	202,408	206,555	216,947	0,723
50	1,415	1,145	5,184	10,080	253,010	258,194	270,834	0,903
60	1,692	1,417	6,221	12,271	303,612	309,833	325,216	1,084
70	1,989	1,635	7,258	14,462	354,214	361,472	379,558	1,265
80	2,256	1,853	8,294	16,215	404,816	413,111	433,435	1,445
85	2,387	1,962	8,8713	17,530	430,117	438,930	460,809	1,536
90	2,523	2,071	9,331	18,407	455,418	464,749	487,750	1,626
95	2,681	2,235	9,850	19,283	480,719	490,569	514,768	1,716
100	2,861	2,344	10,368	20,598	506,020	516,388	542,191	1,807
105	3,052	2,453	10,886	21,474	531,321	542,208	5698,187	1,897
110	3,254	2,562	11,405	22,075	556,622	568,027	595,917	1,986
115	3,548	2,671	11923	22,724	581,923	593,846	622,789	2,076

120	3,891	2,777	12,442	23,211	607,224	619,666	649,545	2,165
125	4,251	2,879	12,960	23,942	632,525	645,485	676,557	2,255
130	4,671	3,034	13,152	25,159	657,826	670,978	703,841	2,346
135	5,183	3,188	13,440	25,646	683,127	696,567	730,584	2,435
140	5,881	3,291	13,728	26,214	708,428	722,156	757,541	2,525
145	6,704	3,394	14,160	27,026	733,729	747,889	785,012	2,617
150	7,908	3,496	14,640	27,594	759,090	773,670	812,668	2,709
155	9,554	3,599	15,024	28,405	784,331	799,355	840,914	2,803
160	11,347	3,702	15,360	29,460	809,632	824,992	869,501	2,898
165	14,677	3,805	15,648	30,028	834,933	850,581	899,091	2,997
170	19,091	3,908	15,984	30,515	860,234	876,248	929,733	3,099
175	25,620	4,113	16,320	31,327	885,535	901,855	962,916	3,210
180	34,324	4,216	16,800	32,057	910,836	927,636	998,234	3,327
184	45,039	4,319	17,280	32,869	936,137	953,417	1035,644	3,452
190	63,498	4,473	17,568	33,762	961,438	979,006	1080,739	3,602
195	81,358	4,628	17,904	34,492	986,739	1004,643	1125,121	3,750
200	113,011	4,782	18,240	35,304	1012,040	1030,280	1183,377	3,945

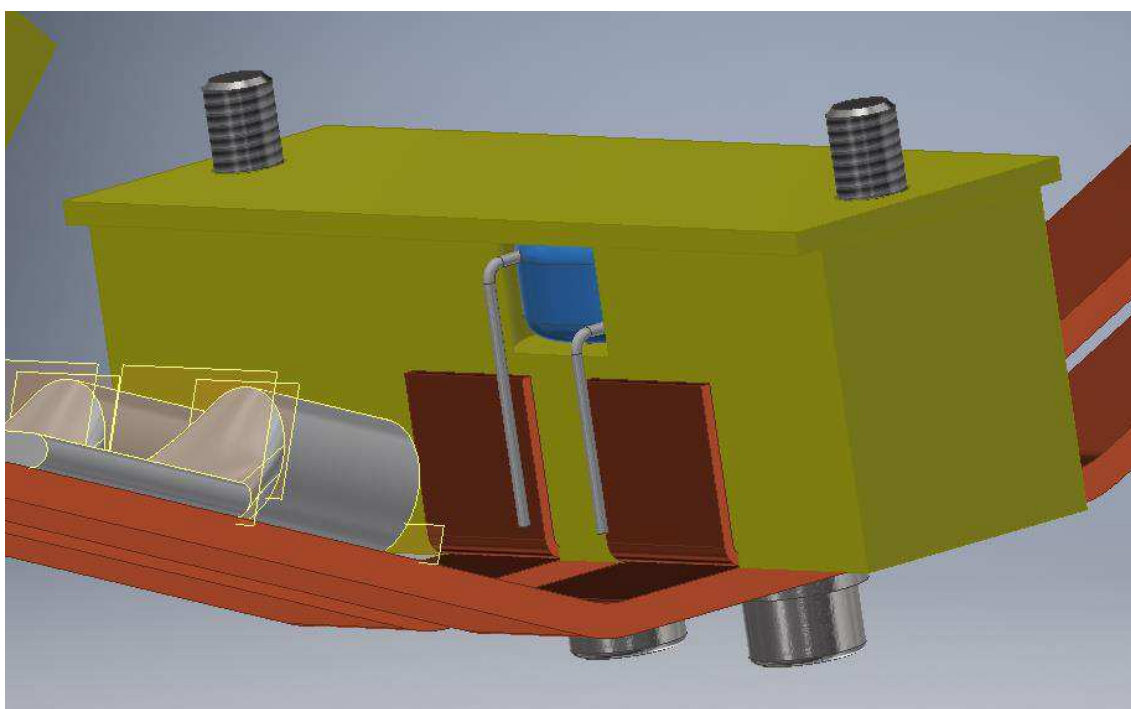


Obrázek 1.18: *Výsledná charakteristika naprázdno*

4.1.7 Usměrňovač

Dle hodnot fázového proudu a napětí budiče jsem navrhl dle "čtyř-milimetrového" pravidla měděný pás o rozměrech 15 x 3 mm. Tento pás bude nahrazovat uzel můstkového usměrňovače a bude vyhotoven ve dvou kusech.

Byl také zvolen diodový modul pro vytvoření usměrňovače a to modul od firmy Semikron, SKKD 162 jehož technický list se nachází v příloze této práce. V následující kapitole je možné shlédnout vizualizace usměrňovače. Z obrázku je patrné, že byly použity podložky pro vykompenzování velikosti modulu diod po obvodu rotoru. Tyto podložky jsou stejné velikosti jako samotné diodové moduly a jsou ze sklotextitového materiálu. Pro základní ochranu usměrňovače byl použit varistor CNR-20D911K od firmy CNR. Odpor varistoru se mění dle teploty, a proto funguje jako jednoduchá ochrana proti proudovému a tepelnému přetížení usměrňovače. Jeho technické specifikace se nachází v příloze této práce.

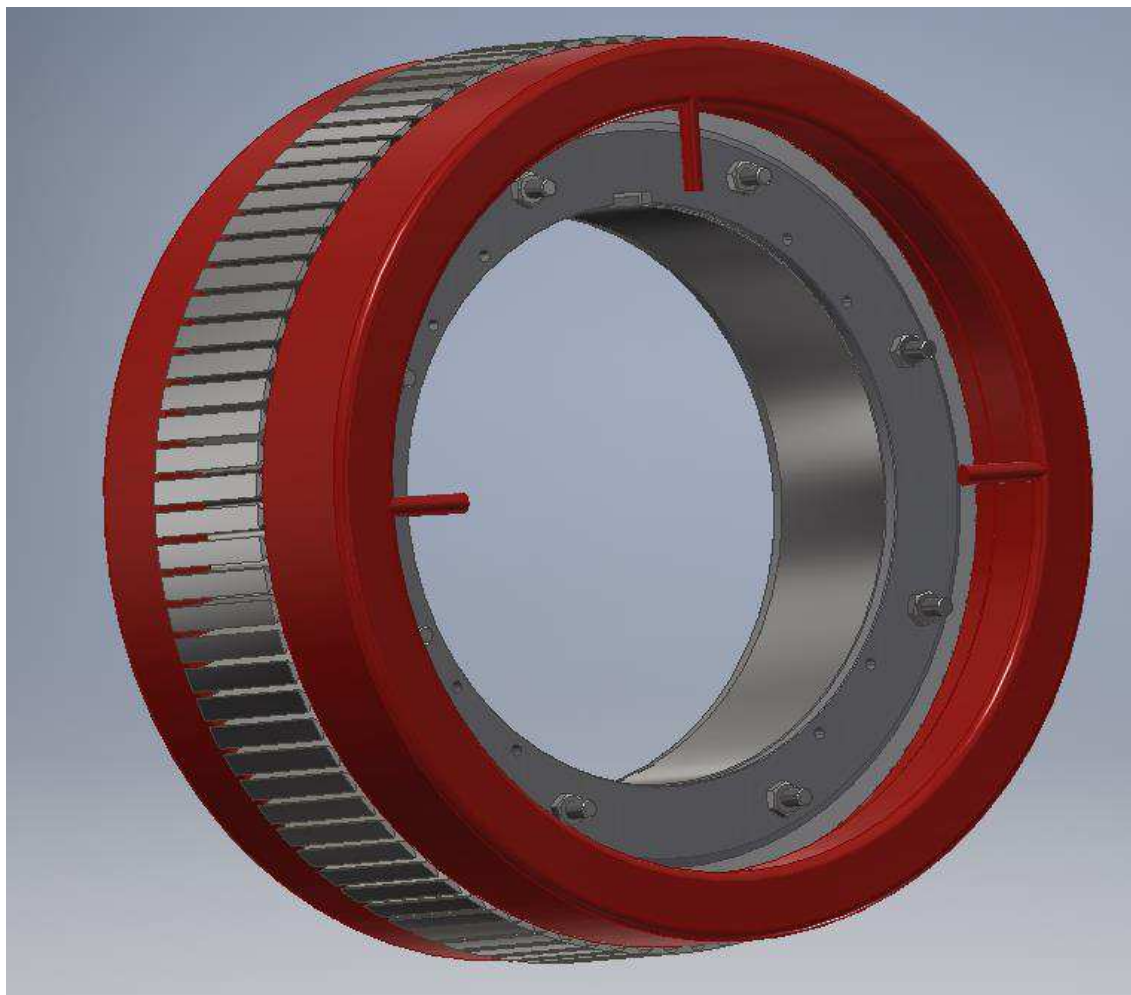


Obrázek 1.19: *Detail varistoru usměrňovače*

5 Vizualizace

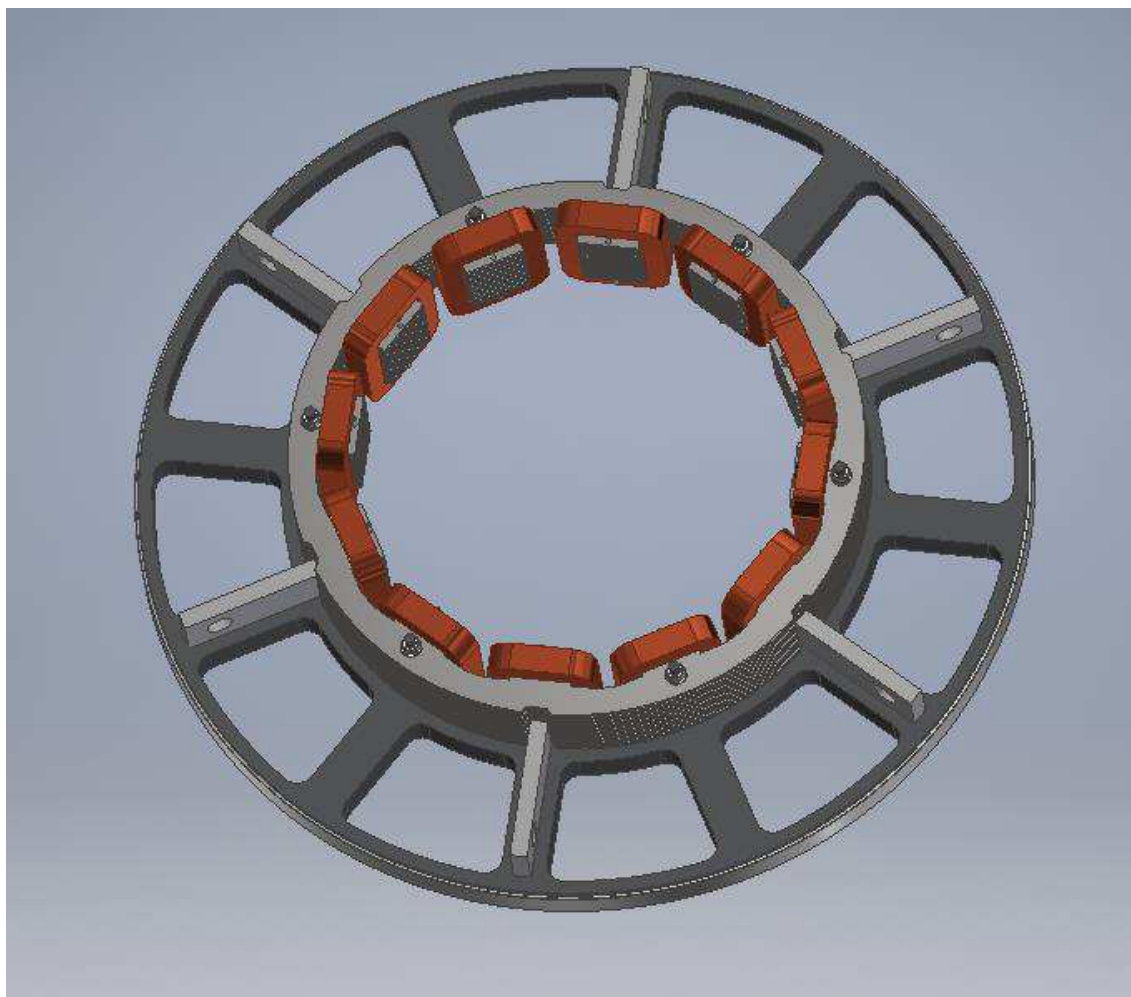
Modelování stroje jsem provádělo v programu Autodesk Inventor.

5.1 Rotor



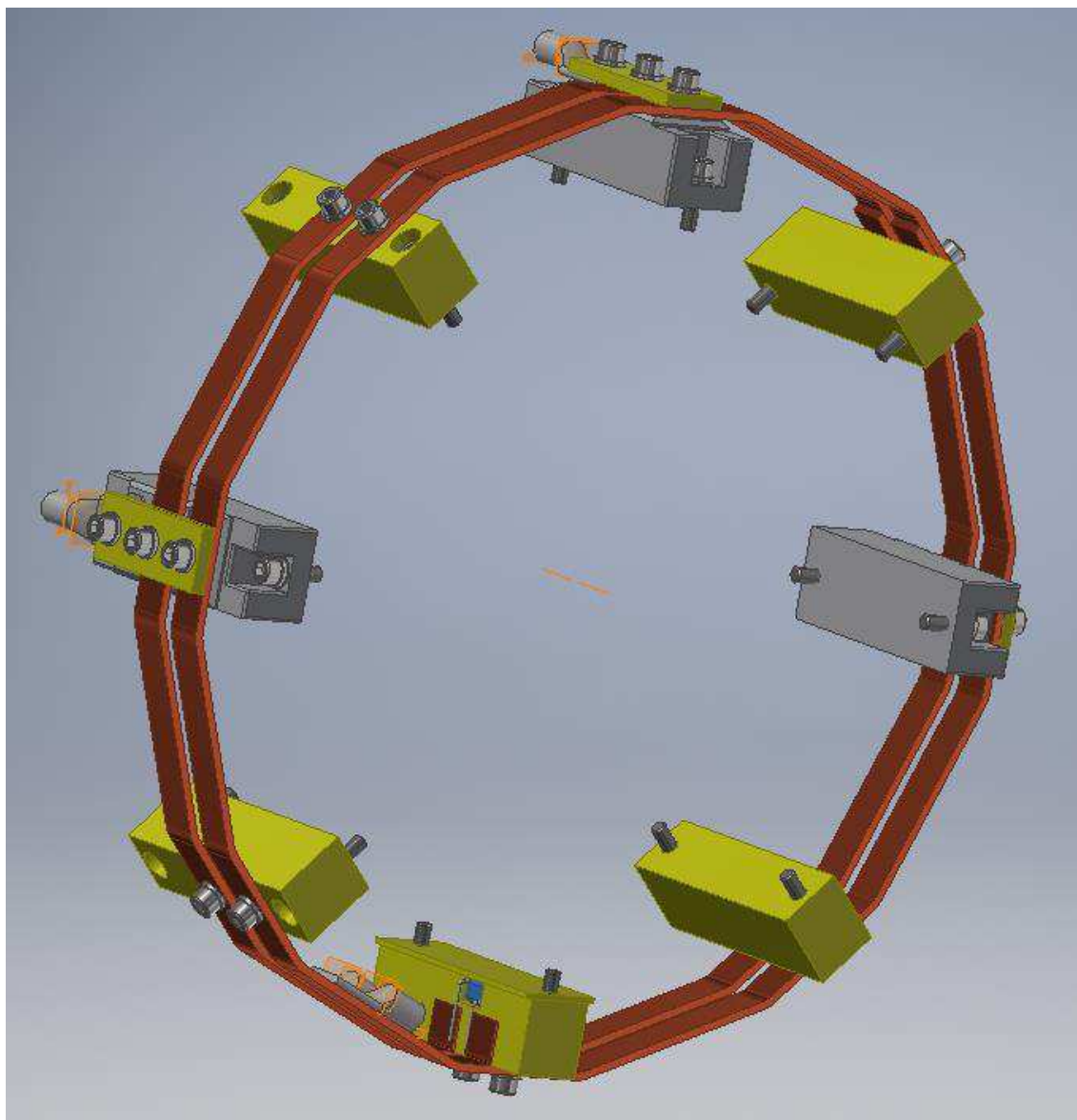
Obrázek 1.20: *Vizualizace rotoru budiče*

5.2 Stator



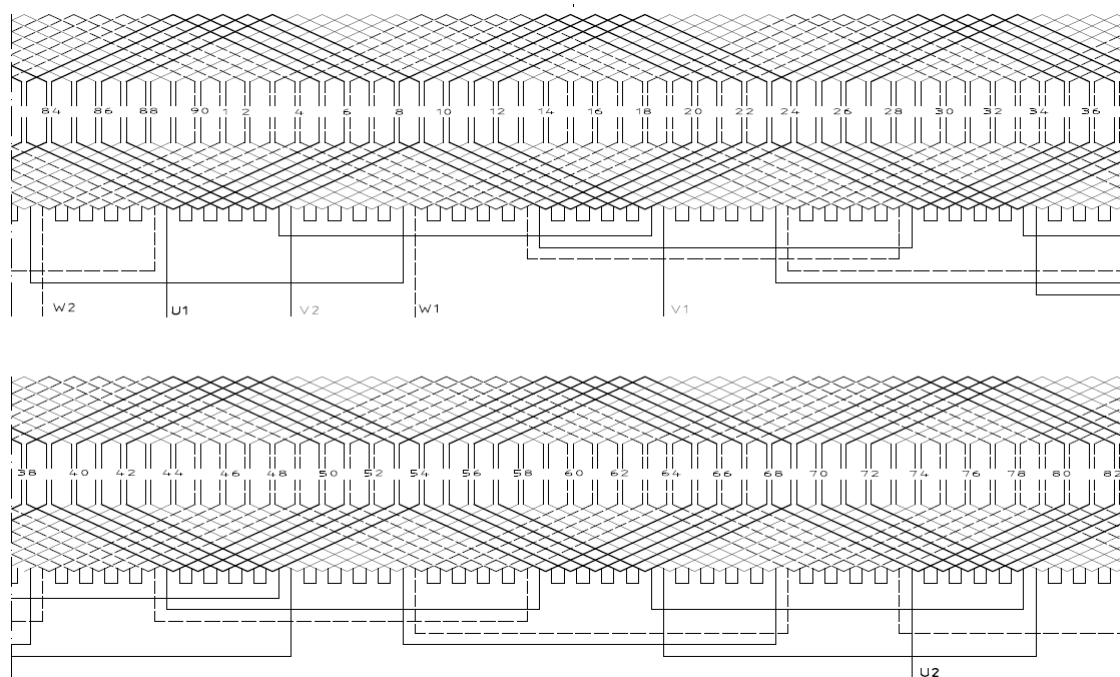
Obrázek 1.21: *Vizualizace statoru budiče*

5.3 Usměrňovač



Obrázek 1.22: Vizualizace usměrňovače

5.4 Schéma zapojení rotoru



Obrázek 1.23: Schéma zapojení vinutí rotoru budiče

Vyhodnocení návrhu a závěr

Problematika buzení synchronních strojů ukazuje, že největší výhody mají budící soustavy bezkartáčové. V podstatě se jedná o obrácený synchronní stroj, kde rotor je tvořen z tenkých dynamoplechů a vinutí je uloženo v drážkách. Statorové vinutí je pak umístěno na pólech. Statorový plech je pak tvořen ze silnějšího materiálu. Stroj, který nemá kartáče, netrpí na jejich poruchy a opotřebení a nezanáší se prachem z kartáčů. Naopak u bezkartáčového stroje je potřeba dbát na co nejlepší konstrukci diodového usměrňovače.

Návrh budiče s rotujícím usměrňovačem měl sloužit jako výpočet hodnot pro reálnou výrobu stroje. V rozboru návrhu ukazují jednotlivé kroky při návrhu budiče pro zadané parametry. Tyto parametry byly zvoleny z typového stroje dle objednávky na synchronní generátor, který vyráběla firma TES Vsetín. Pro výpočet všech potřebných hodnot, které jsou potřeba pro výrobu takového stroje, jsem vytvořil výpočetní program v tabulkovém editoru Excel. Tato část byla paradoxně tou nejtěžší, i když dle dostupných zdrojů měla být tou nejlehčí, jelikož se v průběhu sestrojování programu výsledky několikrát razantně odchýlily od standardních zvyklostí výpočtářských specialistů ve firmě. Následné konzultace jak s konstruktéry, tak i s učiteli na VŠB FEI pomohly odladit tento program a konečné výsledky k nejreálnějším hodnotám. Mé výsledky byly následně porovnány s výsledky firemního výpočtového programu a celkové odchylky byly do 5%.

Modelování stroje proběhlo v programu Autodesk Inventor. Tento program umožňuje modelovat ve 3D. Jelikož jsem nebyl v tomto modelování tak zběhlý jako v rýsování 2D bylo nutné se spoustu dovedností doučit.

Práce přinesla mnoho nových zkušeností a poznatků z oblasti návrhu i fungování elektrických strojů - hlavně synchronních.

Stroj považuji za dobře navržený.

Použitá literatura

- [1] HAK, Josef. *Elektrotechnika 2, Elektrické stroje - část 1*. 3. vydání. Praha: SNTL, 1969.
- [2] NĚMEC, J, ONDRŮŠEK Č. *Návrh rotujícího usměrňovače pro synchronní bezkroužkové generátory výkonů v jednotkách MVA- část 1*, 2007, ISSN 1213-1539, <http://www.elektrorevue.cz>
- [3] NĚMEC, J, ONDRŮŠEK Č. *Návrh rotujícího usměrňovače pro synchronní bezkroužkové generátory výkonů v jednotkách MVA- část 2*, 2007, ISSN 1213-1539, <http://www.elektrorevue.cz>
- [4] MIKESKA, Bc. Jan. *Diplomová práce - Budící systémy synchronních alternátorů*. Západočeská Univerzita v Plzni, Plzeň 2012
- [5] MIZNER, Martin. *Bakalářská práce - výkonová část statické budící soupravy pro generátor 57 MW*. ČVUT v Praze, Praha 2014.
- [6] HORA, Oldřich. *Regulační a budící systémy synchronních strojů*. Praha: SNTL, Praha 1985
- [7] KEPPERT, Prof. Ing. Svetozar, *Elektrické stroje - IV, Synchronní stroje*. Ústřední knihovna VŠB v Ostravě, Ostrava 1982
- [8] PAVELKA, Prof. Ing. Jiří, *Výkonová elektronika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
- [9] VOŽENÍLEK P., NOVOTNÝ V., MINDL P. *Elektromechanické měniče*, nakladatelství ČVUT 2011
- [10] I.P. KOPYLOV, *Stavba elektrických strojů*, Nakladatelství technické literatury, Praha 1988
- [11] https://www.army.mil/article/189754/crew_installs_249_ton_hydropower_rotor_at_center_hill_dam

Přílohy

Příloha A: *Technický list použitého usměrňovacího modulu*

SKKD 162, SKKE 162



SEMPACK[®] 2

Rectifier Diode Modules

SKKD 162
SKKE 162

Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

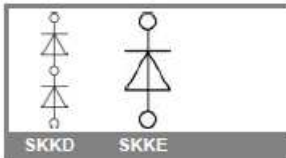
Typical Applications*

- Non-controllable rectifiers for AC/AC converters
- Line rectifiers for transistorized AC motor controllers
- Field supply for DC motors

¹⁾ SKKD types only

V_{RSM} V	V_{RRM} V	$I_{FRMS} = 310$ A (maximum value for continuous operation) $I_{FAV} = 160$ A (sin. 180; $T_c = 95$ °C)	
900	800	SKKD 162/08	SKKE 162/08
1300	1200	SKKD 162/12	SKKE 162/12
1500	1400	SKKD 162/14	SKKE 162/14
1700	1600	SKKD 162/16	SKKE 162/16
1900	1800	SKKD 162/18	SKKE 162/18
2100	2000	SKKD 162/20H4	
2300	2200	SKKD 162/22H4	

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{FAV}	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C	195 (150)	A
I_b	P3/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	90 / 115	A
	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	210 / 260	A
I_{FSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	6000	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	5000	A
\bar{t}	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	180000	A ² s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	125000	A ² s
V_F	$T_{vj} = 25$ °C; $I_F = 500$ A	max. 1,5	V
$V_{(TO)}$	$T_{vj} = 135$ °C	max. 0,85	V
r_T	$T_{vj} = 135$ °C	max. 1,2	mΩ
I_{RD}	$T_{vj} = 135$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$	max. 9	mA
$R_{\theta(j-c)}$	per diode / per module ¹⁾	0,18 / 0,09	K/W
$R_{\theta(c-a)}$	per diode / per module ¹⁾	0,1 / 0,05	K/W
T_{vj}		-40 ... +135	°C
T_{stg}		-40 ... +135	°C
V_{test}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
V_{test}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min. for SKK...H4	4800 / 4000	V~
M_b	to heatsink	5 ± 15 %	Nm
M_t	to terminals	5 ± 15 %	Nm
a		5 * 9,81	m/s ²
m	approx.	165	g
Case	SKKD	A 23	
	SKKE	A 24	



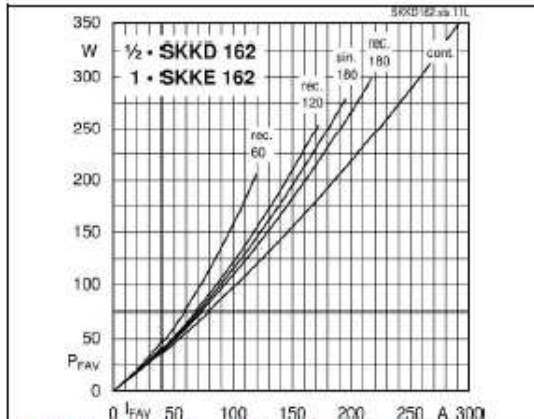


Fig. 11L Power dissipation per diode vs. forward current

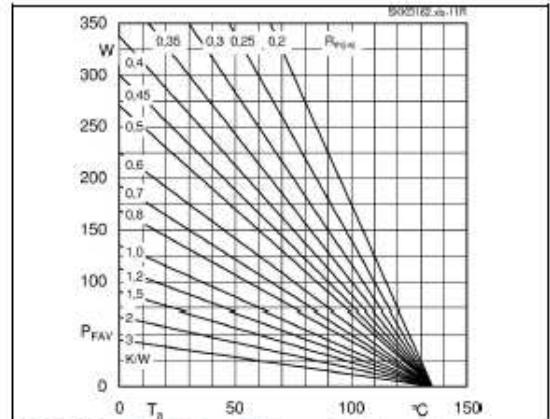


Fig. 11R Power dissipation per diode vs. ambient temperature

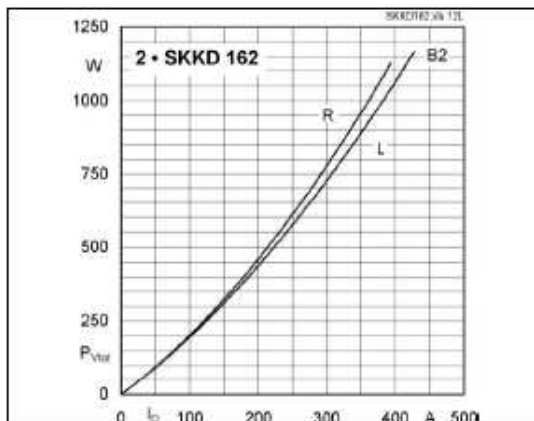


Fig. 12L Power dissipation of two modules vs. direct current

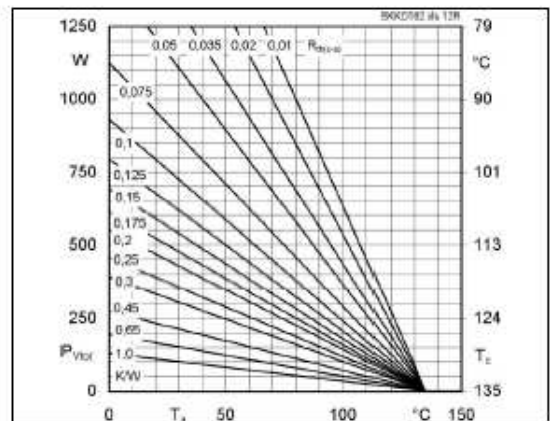


Fig. 12R Power dissipation of two modules vs. case temperature

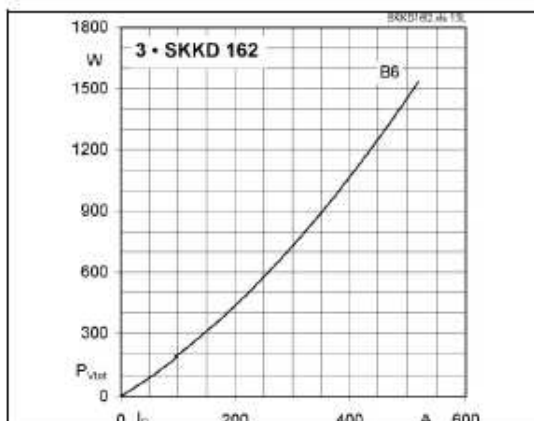


Fig. 13L Power dissipation of three modules vs. direct current

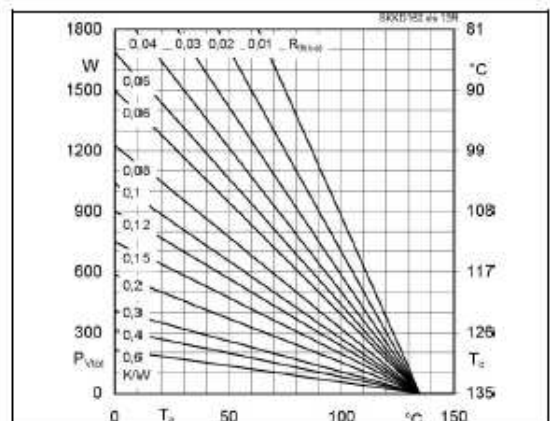
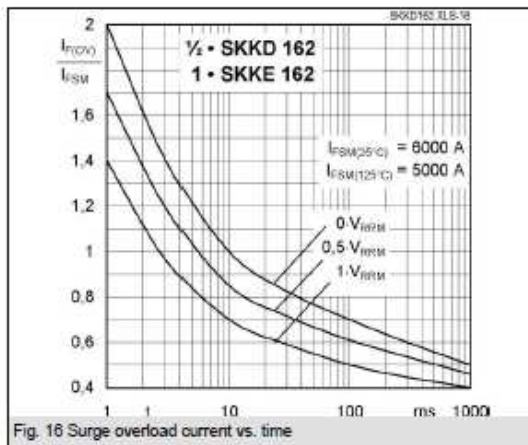
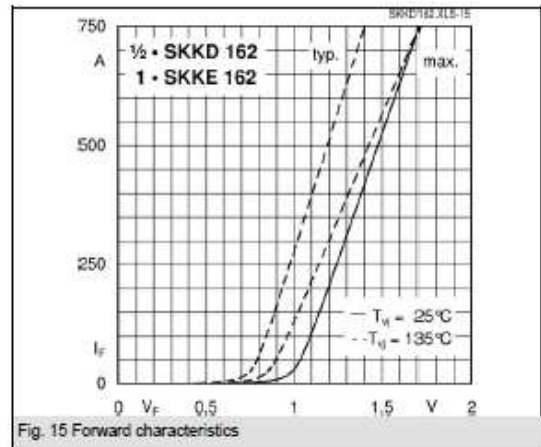
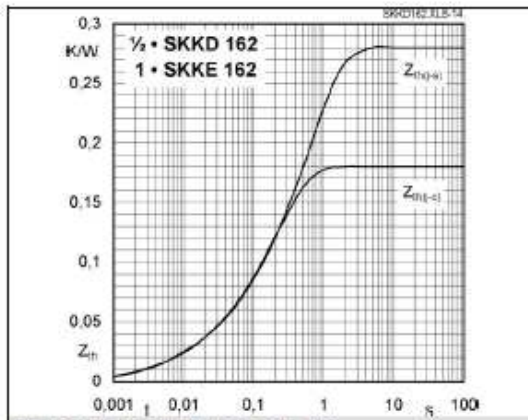


Fig. 13R Power dissipation of three modules vs. case temperature

SKKD 162, SKKE 162



Příloha B: *Materiál plechu statoru*

ČSN 11373 – nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce



1. Orientační srovnání se zahraničními normami

DIN	EN 10027-1	EN 10027-2	EN 10025:90	GOST
USt37-2	S235JRG1	1.0036	Fe360BFU	St2kp

2. Chemické složení (rozbor tavby) v %

C	Mn	Si	P	S	N	Al
max. 0,170			max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007	

3. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti	Provedení	
	tepelně nezpracované	normalizačně žhané
Pevnost v tahu R_m [MPa]	min. 370	min. 350
Mez kluzu R_e [MPa]	min. 250	min. 220
Tažnost A_{10} [%]	min. 7	min. 20

4. Charakteristika oceli a příklady použití

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Součásti svařované kovářsky.

Typical data for SURA® M310-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,07	33,3	0,05	0,12	0,34	1,62	6,31
0,2	0,08	0,19	43,9	0,20	0,50	1,36	5,63	21,8
0,3	0,17	0,33	51,2	0,40	1,04	2,83	11,5	45,9
0,4	0,27	0,50	57,7	0,66	1,73	4,75	19,5	80,2
0,5	0,40	0,69	64,2	0,97	2,56	7,14	29,7	128
0,6	0,53	0,91	71,2	1,32	3,54	10,0	42,6	193
0,7	0,68	1,16	79,1	1,72	4,67	13,5	58,4	279
0,8	0,85	1,45	88,4	2,16	5,96	17,5	77,8	390
0,9	1,03	1,79	100	2,65	7,42	22,1	101	526
1,0	1,23	2,21	116	3,19	9,07	27,4	130	695
1,1	1,45	2,75	139	3,78	10,9	33,6	163	
1,2	1,71	3,50	175	4,44	13,0	40,7		
1,3	2,00	4,80	251	5,22	15,3	48,6		
1,4	2,40	8,14	470	6,17	18,0	58,0		
1,5	2,83	20,4	1230	7,31	21,1	68,5		
1,6	3,25	55,7	3070					
1,7	3,57	125	6150					
1,8	3,86	239	10700					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	2,83
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,23
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,79

Coercivity [DC], A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	970
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	52

Yield strength, N/mm ²	385
Tensile strength, N/mm ²	500
Young's modulus, RD, N/mm ²	185 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	200 000
Hardness HV5 (VPN)	190

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher



June 2008



CNR 20D 突波吸收器

Device Ratings and Characteristics

元件的額定值與特性

Part No. 型號	Maximum Allowable Voltage 最大容許電壓		Varistor Voltage 突波吸收器動作電壓 (@1mA)			Maximum Clamping Voltage 抑制電壓 @ Test Current (8/20µs)		Maximum Energy 最大吸收能量	Maximum Peak Current 最大電流耐量 (8/20µs)	Rated Power 消耗功率	Typical Capacitance 參考電容值 (@1KHz)	Standards 安規
	ACrms(V)	DC(V)	Min.	Vb(Vdc)	Max.	Vc (V)	Ip (A)	10/1000µs	(A)	(W)	(pF)	
CNR-20D180K	11	14	14.4	18	21.6	39	20	11.0	2000	0.2	40000	☆
CNR-20D220K	14	18	18.7	22	26.0	43	20	14.0	2000	0.2	30000	☆
CNR-20D270K	17	22	23.0	27	31.1	53	20	18.0	2000	0.2	24500	☆
CNR-20D330K	20	26	29.5	33	36.5	65	20	23.0	2000	0.2	20000	☆
CNR-20D390K	25	31	35	39	43	77	20	26.0	2000	0.2	13800	☆
CNR-20D470K	30	38	42	47	52	93	20	33.0	2000	0.2	13500	☆
CNR-20D560K	35	45	50	56	62	110	20	41.0	2000	0.2	12200	☆
CNR-20D680K	40	56	61	68	75	135	20	46.0	2000	0.2	11500	☆ □
CNR-20D820K	50	65	74	82	90	135	100	36.0	6500	1.0	8200	☆ △ ○ □
CNR-20D101K	60	85	90	100	110	165	100	45.0	6500	1.0	8000	☆ △ ○ □
CNR-20D121K	75	100	108	120	132	200	100	55.0	6500	1.0	6500	☆ △ ○ □
CNR-20D151K	95	125	135	150	165	250	100	70.0	6500	1.0	4200	☆ △ ○ □
CNR-20D181K	115	150	162	180	198	300	100	85.0	6500	1.0	2500	☆ △ ○ □
CNR-20D201K	130	170	185	200	225	340	100	95.0	6500	1.0	2300	☆ △ ○ □
CNR-20D221K	140	180	198	220	242	360	100	100.0	6500	1.0	2200	☆ △ ○ □
CNR-20D241K	150	200	216	240	264	395	100	108.0	6500	1.0	2200	☆ △ ○ □
CNR-20D271K	175	225	247	270	303	455	100	127.0	6500	1.0	2100	☆ △ ○ □
CNR-20D301K	195	250	270	300	330	500	100	150.0	6500	1.0	1800	☆ △ ○ □
CNR-20D331K	210	275	297	330	363	550	100	163.0	6500	1.0	1750	☆ △ ○ □
CNR-20D361K	230	300	324	360	396	595	100	163.0	6500	1.0	1700	☆ △ ○ □
CNR-20D391K	250	320	351	390	429	650	100	180.0	6500	1.0	1400	☆ △ ○ □
CNR-20D431K	275	350	387	430	473	710	100	190.0	6500	1.0	1350	☆ △ ○ □
CNR-20D471K	300	385	423	470	517	775	100	220.0	6500	1.0	1200	☆ △ ○ □
CNR-20D511K	320	410	459	510	561	845	100	220.0	6500	1.0	1050	☆ △ ○ □
CNR-20D561K	350	460	504	560	616	915	100	220.0	6500	1.0	850	☆ △ ○ □
CNR-20D621K	385	505	558	620	682	1025	100	220.0	6500	1.0	570	☆ △ ○ □
CNR-20D681K	420	560	612	680	748	1120	100	230.0	6500	1.0	550	☆ △ ○ □
CNR-20D751K	460	615	675	750	825	1240	100	255.0	6500	1.0	530	☆ △ ○ □
CNR-20D781K	485	640	702	780	858	1290	100	265.0	6500	1.0	500	☆ △ ○ □
CNR-20D821K	510	670	738	820	902	1355	100	282.0	6500	1.0	500	☆ △ ○ □
CNR-20D911K	550	745	819	910	1001	1500	100	310.0	6500	1.0	480	☆ △ ○ □
CNR-20D102K	625	825	900	1000	1100	1650	100	342.0	6500	1.0	460	☆ △ ○ □
CNR-20D112K	680	895	990	1100	1210	1815	100	383.0	6500	1.0	400	☆ △ ○ □

CNR 壓敏電阻 (MOV)

CNR 電涌保護器 (SPD)

Related Standards

安規說明

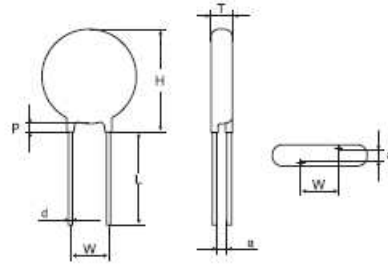
Standard No. 安規號碼	UL 1414	UL 1449 (3rd Edition)	CSA	VDE	CCC
Title 名稱	Across-The-Line Components	Surge Protective Device	Accessories and Parts for Electronic Products	Varistors for use in Electronic equipment	GB/T10193 GB/T10194 GB4898 GB4943.1
File No. 檔案號碼	E165143	E316325	LR109736-1	21587-4790-001	CCC02001002471 CCC08001023767 CCC08001023768 CCC08001023769
Symbol 符號	△	☆	*	○	□



Dimension of Component for Standard Product 標準品之尺寸規格

Dimension Table Unit: mm

Model Symbol	05D	07D	10D	14D	18D	20D
D(max.)	7,5	9,0	14,0	17,5	23,0	25,0
H(max.)	10,0	12,0	17,0	20,5	26,0	28,0
W(±1,0)	5,0	5,0	7,5	7,5	7,5	7,5/10,0
P(max.)	3,0					
L(min)	25,0					
d(±0,05)	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8/1,0
	Cuorcp	Cuorcp	Cuorcp	Cuorcp 152 Korly Cu	Cuorcp	Cuorcp 1,0 Korly Cu



T max. Table Unit: mm

Part No.	05D	07D	10D	14D	18D	20D	a (±0,4)
180K	3,3	3,5	3,9	4,0	4,2	4,3	1,0
220K	3,6	3,8	4,2	4,3	4,5	4,6	1,1
270K	3,8	4,0	4,4	4,5	4,7	4,8	1,2
330K	3,3	3,5	3,9	4,0	4,2	4,3	1,1
390K	3,5	3,7	4,1	4,2	4,4	4,5	1,3
470K	3,7	3,9	4,3	4,4	4,6	4,7	1,4
560K	4,0	4,2	4,6	4,7	4,9	5,0	1,5
680K	4,3	4,5	4,9	5,0	5,2	5,3	1,7
820K	3,3	3,5	3,9	4,0	4,2	4,3	1,0
101K	3,6	3,8	4,2	4,3	4,5	4,6	1,0
121K	3,8	4,0	4,4	4,5	4,7	4,8	1,1
151K	4,1	4,3	4,7	4,8	5,0	5,1	1,3
181K	3,2	3,4	3,8	3,9	4,1	4,2	1,0
201K	3,3	3,5	3,9	4,0	4,2	4,3	1,0
221K	3,4	3,6	4,0	4,1	4,3	4,4	1,1
241K	3,5	3,7	4,1	4,2	4,4	4,5	1,2
271K	3,7	3,9	4,2	4,3	4,5	4,6	1,3

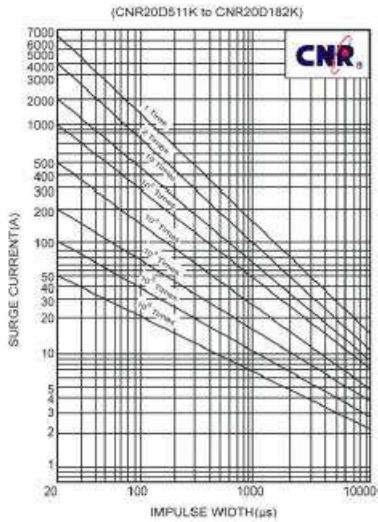
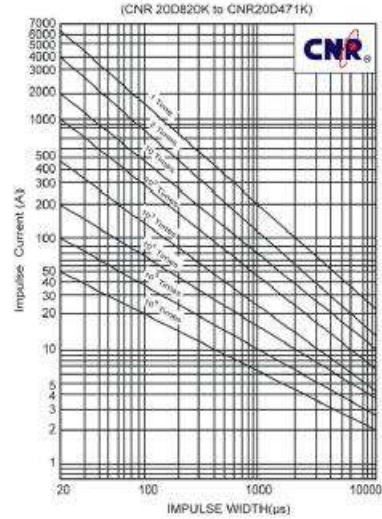
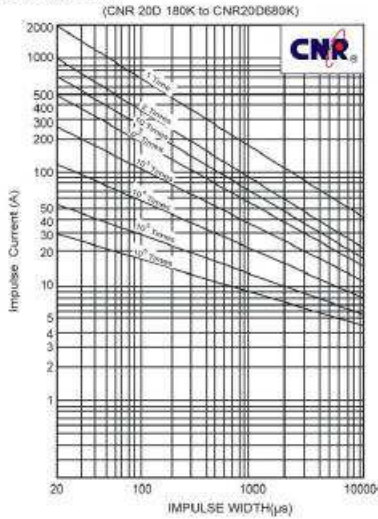
Part No.	05D	07D	10D	14D	18D	20D	a (±0,4)
301K	3,9	4,1	4,3	4,4	4,6	4,7	1,4
331K	4,0	4,2	4,5	4,6	4,8	4,9	1,5
361K	4,1	4,3	4,7	4,8	5,0	5,1	1,2
391K	4,2	4,4	4,8	4,9	5,1	5,2	1,3
431K	4,4	4,6	5,0	5,1	5,3	5,4	1,4
471K	4,6	4,8	5,2	5,3	5,5	5,6	1,5
511K	4,8	5,0	5,3	5,4	5,6	5,7	1,7
561K	5,0	5,2	5,5	5,6	5,8	5,9	1,8
621K	5,3	5,5	5,7	5,8	6,0	6,1	2
681K	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	2,2
751K	5,6	5,8	6,0	6,1	6,3	6,4	2,4
781K	5,8	6,0	6,3	6,4	6,6	6,7	2,5
821K	-	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	2,6
911K	-	-	6,6	6,7	6,9	7,0	3
102K	-	-	7,0	7,1	7,3	7,4	3,3
112K	-	-	7,4	7,5	7,7	7,8	3,6
182K	-	-	-	11,5	11,7	11,9	5,5



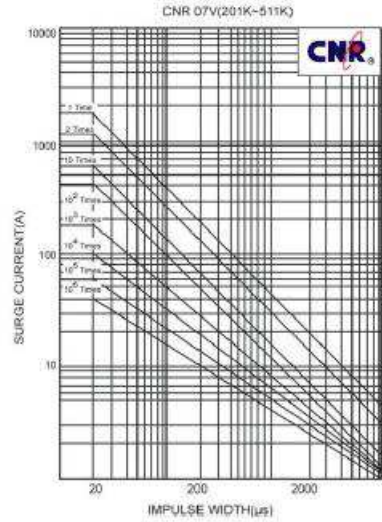
Impulse Life Time Rating Curves 額定脈衝壽命次數曲線

2 times: 5 minutes interval
up to 10 times: 2 minutes interval
up to 10⁶ times 10 seconds interval

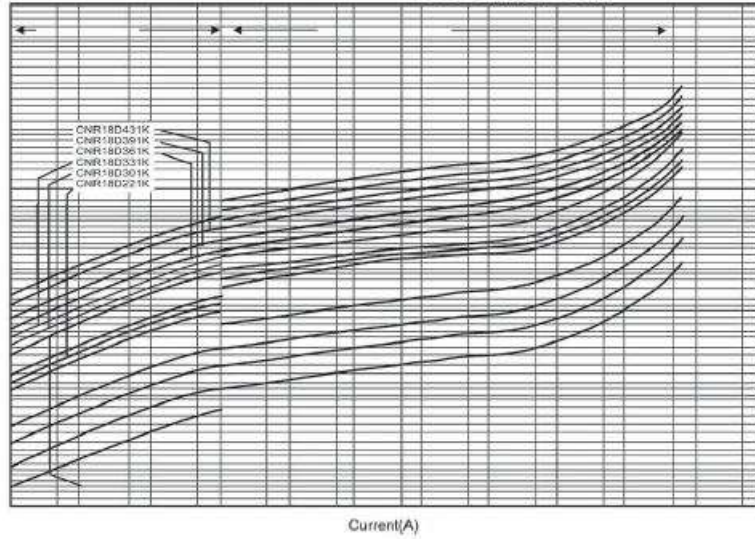
20D Series



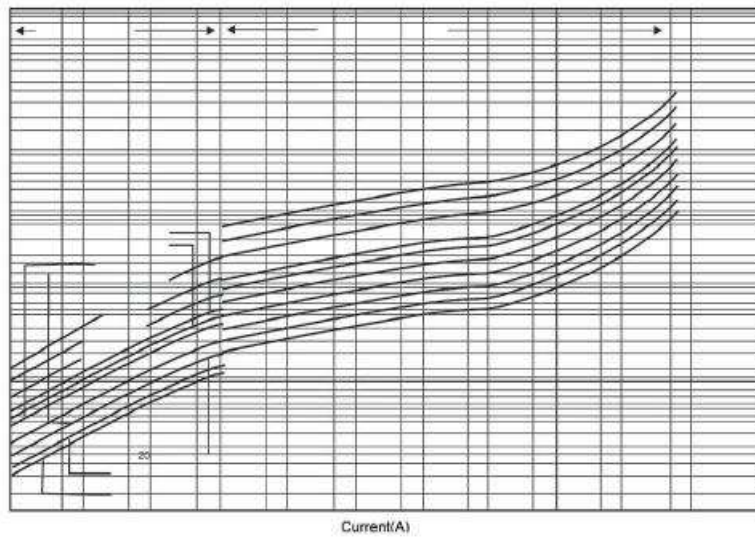
07V Series



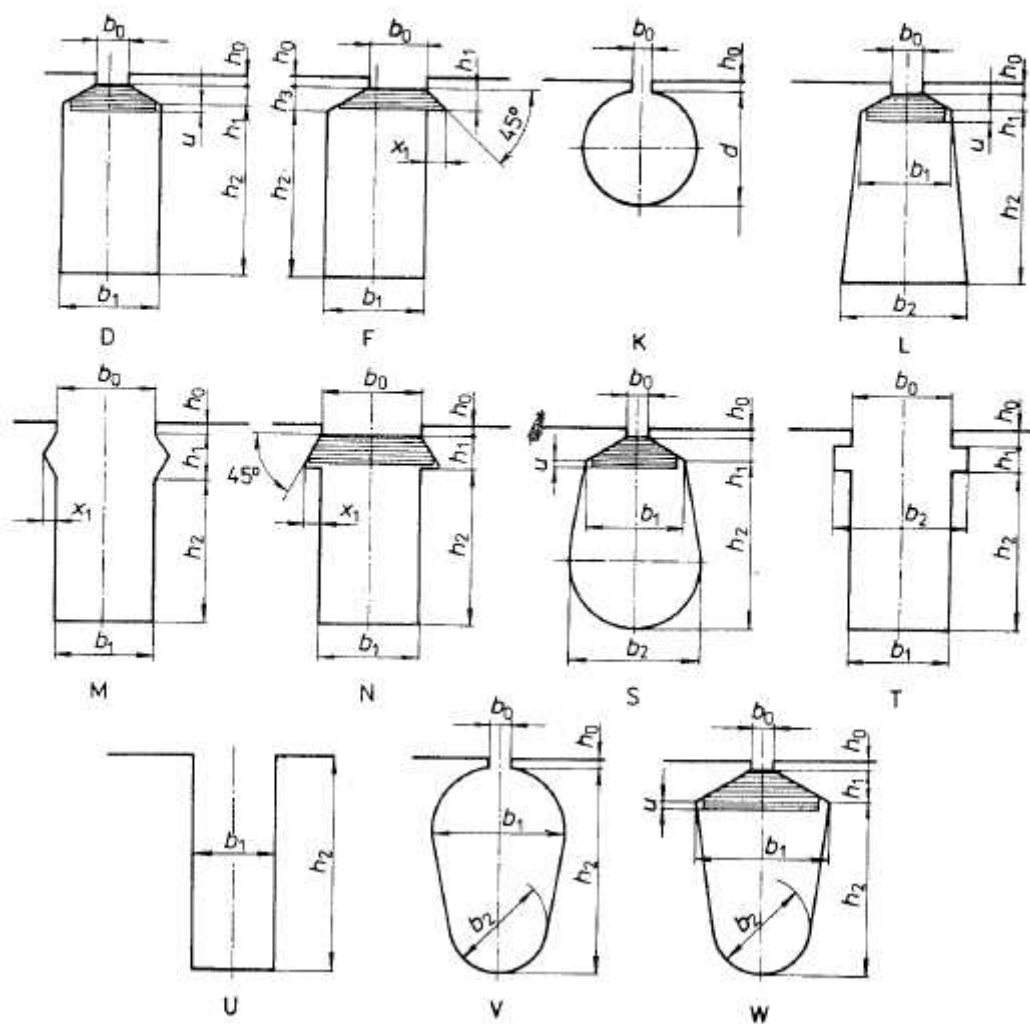
V-I Curve CNR20D820K to CNR20D471K 電壓-電流特性曲線



V-I Curve CNR20D511K to CNR20D112K 電壓-電流特性曲線



Rozměry drážek a drážkových klínů



Drážka M					Drážka W						Drážka U
b_1	h_0	h_1	x_1	λ_z	b_1	b_0	h_0	h_2	u	λ_z	b_1
5	0,7	3,5	1,2	0,704	4	2,2	0,5	0,90	1,50	0,561	1,4
5,2		3,3	1,1	0,658	4,2			1,00	1,40	0,587	1,5
5,5		3,6	1,2	0,664	4,4	2,5		0,95	1,55	0,516	1,6
5,8		3,5	1,2	0,621	4,6			1,05	1,45	0,540	1,7
6		3,3	1,1	0,581	4,8	2,8		1,15	1,35	0,562	1,8
6,3		4,0	1,4	0,630	5			1,25	1,25	0,583	1,9
6,6		3,6	1,25	0,580	5,2	3,0		1,35	1,15	0,603	2
7		4,0	1,4	0,576	5,5			1,35	1,25	0,553	2,2
7,3		3,6	1,25	0,517	5,8	3,2		1,50	1,10	0,580	2,4
7,6		4,0	1,4	0,536	6			1,50	1,00	0,550	2,6
8	4,0	1,4	0,522	6,2	3,5	1,60	0,90	0,567	2,8		
8,5	3,6	1,15	0,455	6,5		1,75	0,75	0,590	3		
9	4,0	1,4	0,462	6,8	4,0	1,90	0,60	0,613	3,2		
9,5	3,6	1,15	0,412	7		1,90	0,50	0,585	3,4		
10	1,0	4,0	1,4	0,420	7,2	4,5	0,7	2,00	0,40	0,599	3,6
10,5				0,402	7,5			1,60	1,40	0,477	3,8
11				0,386	7,8	1,72		1,28	0,493	4	
11,5				0,371	8	1,80		1,20	0,503	4,2	
12				0,356	8,5	1,80		1,20	0,506	4,4	
12,5				0,343	9	2,00		1,00	0,528	4,6	
13				0,331	9,5	2,20		0,80	0,550	4,8	
13,5				0,404	10	2,20		0,80	0,505	5	
14				0,390	10,5	2,40		0,60	0,524	5,2	
14,5				0,372	11	2,60		0,40	0,541	5,5	
15	5,0	1,65	0,366	0,366	11,5	5,0	1,95	1,05	0,412	5,8	
15,5				0,355	12		2,10	0,90	0,424	6	
16	0,345	12,5	0,392	0,345	13	5,5	2,25	0,75	0,436	6,2	
16,5	0,392	13,5	0,391	0,391	14		2,25	1,25	0,407	6,5	
17	6,0	1,6	0,368	0,368	14,5	6,0	2,40	1,10	0,418	6,8	
17,5				0,362	15		2,55	0,95	0,428	7	
18	0,362	15,5	0,352	0,352	16	1,0	2,55	0,95	0,403	7,2	
18,5	0,352	17	0,344	0,344	17		2,70	0,80	0,412	7,5	
19	0,344	18	0,461	0,461	18	6,0	2,85	0,65	0,472	7,8	
19,5	0,461	19	0,450	0,450	19		3,00	0,50	0,480	8	
20	9,0	2,45	0,389	0,450	20	7,0	3,15	0,85	0,489	8,5	
20,5				0,441	21		0,441	0,441	21	3,30	0,70
21	0,430	22	0,430	0,430	22	6,0	3,45	0,55	0,504	9,5	
21,5	0,415	23	0,415	0,415	23		3,60	0,40	0,512	10	
22	0,405	24	0,405	0,405	24	1,0	3,75	0,25	0,519	10,5	
22,5	0,397	25	0,397	0,397	25		3,90	0,10	0,525	11	
23	9,0	2,45	0,389	0,389	26	7,0	2,80	1,20	0,414	11,5	
23,5				0,388	27		0,388	0,388	27	3,00	1,00
24	0,382	28	0,382	0,382	28	3,20	0,80	0,430	12,5		
25	0,367	29	0,367	0,367	29	3,40	0,60	0,436	13		
26	0,354	30	0,354	0,354	30	3,40	0,60	0,395	13,5		
27	0,342	31	0,342	0,342	31	3,60	0,40	0,402	14		
28	0,322	32	0,322	0,322	32	3,80	0,20	0,408	14,5		
30	0,310		0,310	0,310		4,00	0,00	0,413	15		
32	0,292		0,292	0,292		4,20	0,80	0,419			