



Pavel Drábek, Jan Štěpánek

Výpočet ztrát 3,3kV IGBT IHV modulů

Technická zpráva

Pracovní balíček:

WP8 – Elektrické části pohonů, hybridní pohony, rekuperace

Rok řešení:

2018



Projekt č. TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

Výpočet ztrát 3,3kV IGBT IHV modulů

Pracoviště: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky / RICE
Číslo dokumentu: 22190-052-2018
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Pavel Drábek, Jan Štěpánek
Hlavní řešitel: Zdeněk Peroutka
Počet stran: 12
Datum vydání: Prosinec 2018
Oborové zařazení: JA – Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Pavel Drábek
tel. 377634437
drabek@rice.zcu.cz

Tato práce vznikla za podpory projektu TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ řešeného s finanční podporou TA ČR.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá výpočtem ztrát IGBT modulů pro stavbu trakčního měniče plného výkonu se středofrekvenčními transformátory. Trakční měnič se sestává ze 4 IGBT součástek v zapojení DC-DC měniče s reverzací napětí i proudu – tzv. „H-můstek“. Ve zprávě je proveden výpočet ztrát IGBT modulu v závislosti na přenášeném výkonu a spínací frekvenci pro IHV modul od firmy INFINEON FZ1500R33HE3 s parametry 3,3kV a 1500A. IGBT modul FZ1500R33HE3 obsahuje 3 paralelně spojené IGBT tranzistory a celý měnič tedy potřebuje 4 moduly.

Klíčová slova

Trakční měnič, IGBT, H-můstek

Název zprávy v anglickém jazyce

Calculation of 3,3kV IGBT IHV modules losses

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the IGBT module power losses calculation for design of a traction converter of full power with medium-frequency transformers. Traction converter consists of 4 IGBT components in the DC-DC inverter with voltage and current reversing - so-called "H-bridge". The report calculates IGBT module losses based on transmitted power and switching frequency for the INFINEON FZ1500R33HE3 IHV module with parameters 3.3kV and 1500A. IGBT module FZ1500R33HE3 contains three parallel connected IGBT inverter and therefore we needs 4 modules in H-bridge topology.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Traction converter, IGBT, Full-bridge

Seznam symbolů a zkratk

IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IHV	IGBT High- Voltage Modules

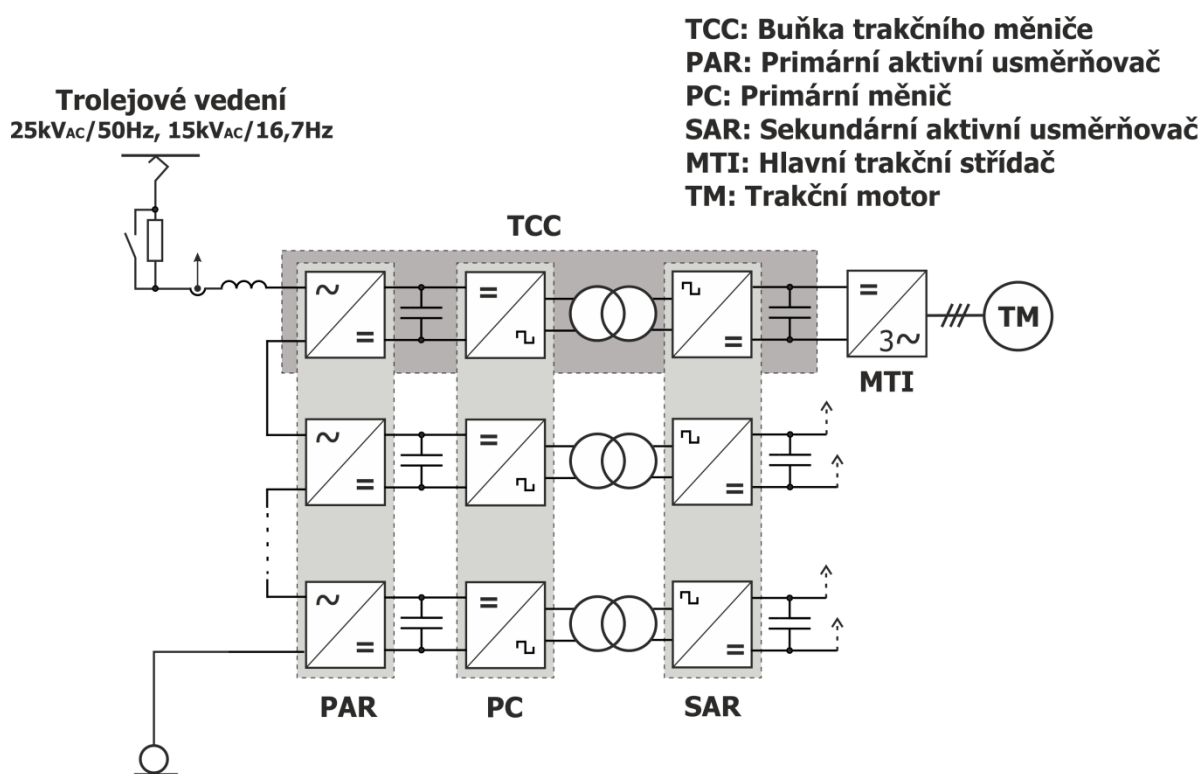
Obsah

1	ÚVOD	5
2	VÝPOČET ZTRÁT 3,3KV MODULU FZ1500R33HE3	7
3	ZÁVĚR	12

1 Úvod

Tato výzkumná zpráva se zabývá stavbou trakčního měniče plného výkonu se středofrekvenčními transformátory s využitím IGBT prvků 3,3kV.

Topologie trakčního měniče se středofrekvenčními transformátory s uvažováním n-stupňů je zobrazena na obr.1. Počet stupňů bude záležet na velikosti napájecího trolejového systému (25kV/50Hz nebo 15kV/16,7Hz) a zvolených výkonových prvcích (3,3kV/4,5kV/6,5kV/???).

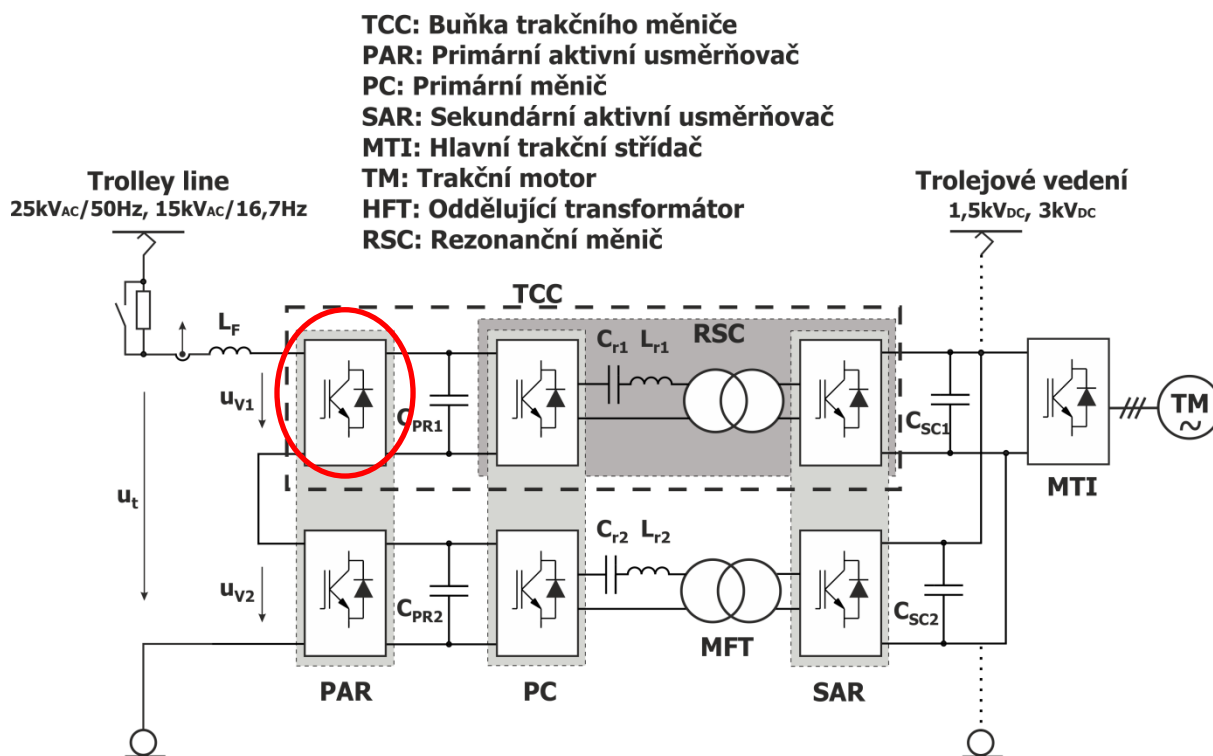


Obr. 1 Topologie trakčního měniče se středofrekvenčními transformátory pro n-stupňů

Problematikou trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem se na pracovišti RICE zabýváme několik let a pro účely testování řídicích algoritmů byl postaven funkční prototyp malého výkonu s 1200V součástkami sestávající se ze 2 stupňů (obr.2), který byl plně uchozen a vyzkoušeny řídicí algoritmy.

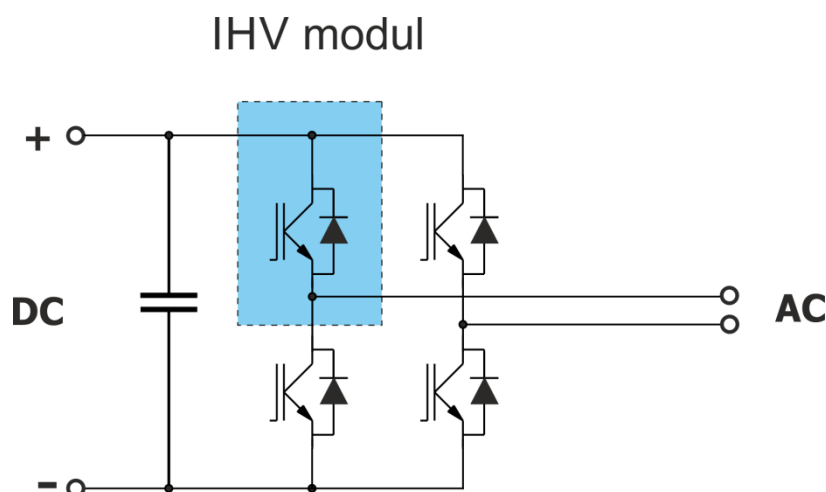
Tato výzkumná zpráva se zabývá výpočtem ztrát výkonového měniče v zapojení H-můstku pro návrh funkčního prototypu trakčního měniče plného výkonu se středofrekvenčními transformátory. Vzhledem k předpokládané ceně prototypu se počítá v první fázi se stavbou pouze jednoho stupně. Jak je patrné z topologie na obr.2 jeden stupeň trakčního měniče obsahuje 3 H-můstky a jeden středofrekvenční transformátor. První H-můstek pracuje s tvrdou komutací jako vstupní 1-fázový napěťový pulsní usměrňovač, zbylé 2 měniče pracují s měkkou komutací.

Zaměříme se na vstupní výkonový měnič (na obr.2 označen červeně) pracující jako pulsní usměrňovač.

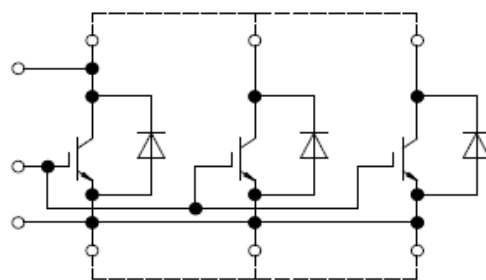


Obr. 2 Topologie trakčního měniče se středofrekvenčními transformátory pro 2-stupně

Trakční měnič se sestává ze 4 IGBT součástí v zapojení DC-DC měniče s reverzací napětí i proudu – tzv. „H-můstek“ (obr.3). Ve zprávě je proveden výpočet ztrát IGBT modulu v závislosti na přenášeném výkonu a spínací frekvenci pro IHV modul od firmy INFINEON FZ1500R33HE3 s parametry 3,3kV a 1500A. IGBT modul FZ1500R33HE3 obsahuje 3 paralelně spojené IGBT tranzistory (obr.4) a celý měnič tedy potřebuje 4 moduly.



Obr. 3 Topologie trakčního měniče se středofrekvenčními transformátory pro 2-stupně



Obr. 4 IGBT IHV moduly FZ1500R33HE3 (3,3kV / 1500A) [1]

Při předpokladu provozu trakčního měniče dle obr.1 s moduly 3,3kV a doporučeným DC meziobvodem 1500-1800V nám pro provoz na českém trolejovém systému 25kV/50Hz vychází cca 33 stupňů/buněk měniče (25kV včetně amplitudy a povoleného kolísání napětí).

Při uvažovaném výkonu trakčního vozidla cca 6,5MW vychází na jeden stupeň měniče výkon cca 200kW a následující parametry $U_{in} = 800-1000V$, $U_{DC} = 1500-1800V$, $I_{in} = 200-250A$ a předpokládaná spínací frekvence 1kHz a více.

Z důvodu použití navrhovaného H-můstku i pro jiné účely budeme počítat ztráty pro doporučené parametry napětí v DC meziobvodu výrobcem pro různé proudové zatížení a spínací frekvenci a z vytvořených map bude možné vybírat pracovní bod výkonového měniče podle potřeby a nebude potřeba pro každý nový pracovní bod přepočítávat ztráty a teploty modulu.

2 Výpočet ztrát 3,3kV modulu FZ1500R33HE3

Pro výpočet ztrát výkonového IGBT modulu je potřeba uvažovat následující ztráty (obr.5). Významnými ztrátami jsou zvláště spínací a vodivostní ztráty IGBT a diody:

Vodivostní ztráty:

$$P_{CT} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} p_T(t) dt = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (u_{CE0} \cdot i_C(t) + r_C \cdot i_C^2(t)) dt = u_{CE0} \cdot I_{cav} + r_C \cdot I_{crms}^2 \quad (1)$$

$$P_{CD} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} p_{CD}(t) dt = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (u_{D0} \cdot i_D(t) + r_D \cdot i_D^2(t)) dt = u_{D0} \cdot I_{Dav} + r_D \cdot I_{Drms}^2 \quad (2)$$

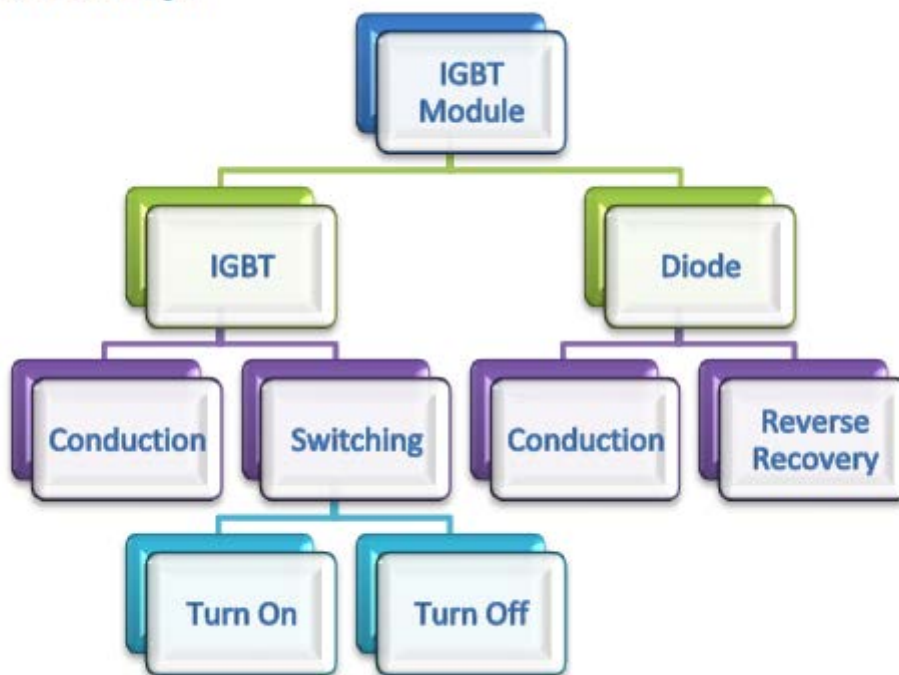
Spínací ztráty:

$$P_{sw.IGBT} = (E_{on} + E_{off}) \times f_{sw} \quad (3)$$

$$P_{rec.Diode} = E_{rec} \times f_{sw} \quad (4)$$

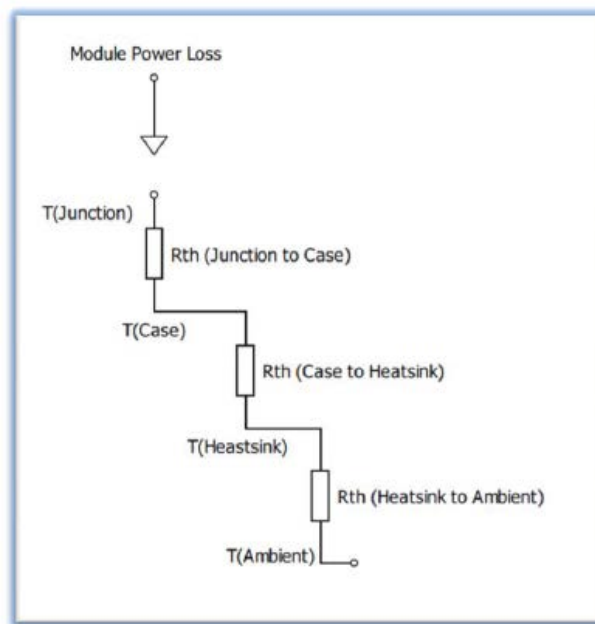
Základním problémem při výpočtu ztrát je proměnlivost parametrů IGBT modulu, např. parametrů u_{CE0} , u_{D0} , E_{on} , E_{off} , které jsou funkcí (I_C , T , U_{CE} , U_{GE} , R_G atd.) – obr.7 a 8.

Losses Hierarchy:



Obr. 5 Ztráty ve výkonovém modulu IGBT s antiparalelní diodou [1]

Po vypočtení ztrát IGBT modulu se provede výpočet tepelného modelu IGBT součástky, kde je klíčová teplota polovodičového chipu v modulu (a to jak vlastní IGBT, tak i dioda). Při překročení maximální teploty chipu dojde k destrukci polovodičové součástky, nicméně i provoz součástky při vyšší teplotě než je výrobcem doporučena, případně tepelné cykly s větším ΔT než deklaruje výrobce, mohou vést k výraznému zkrácení doby životnosti, což je jeden z klíčových parametrů pro elektrovýzbroj trakčních vozidel. Proto je teplotní model polovodičové součástky velmi důležitý.



Obr. 6 Tepelný model IGBT modulu [1]

Výpočet ztrát byl uvažován pro následující parametry:

- $P=200\text{kW}$
- $U_{DC}=1800\text{V}$ (pro 1500V nejsou charakteristiky součástky – obr.7, ztráty vyjdou příznivěji)
- $U_{in/out}=800\text{V}$ (záleží aplikaci H-můstku, U_{in} u pulzního 1f usměrňovače, U_{out} u 1f střídače)
- $U_{in/out}=100\text{-}1000\text{A}_{\text{RMS}}$
- $f_{SW}=500\text{-}2000\text{Hz}$
- Chlazení vzduchem ($T_A = 40^\circ\text{C}$, $R_{thA} = 0,06\text{K/W}$) a vodou ($T_W = 40^\circ\text{C}$, $R_{thW} = 0,01\text{K/W}$)

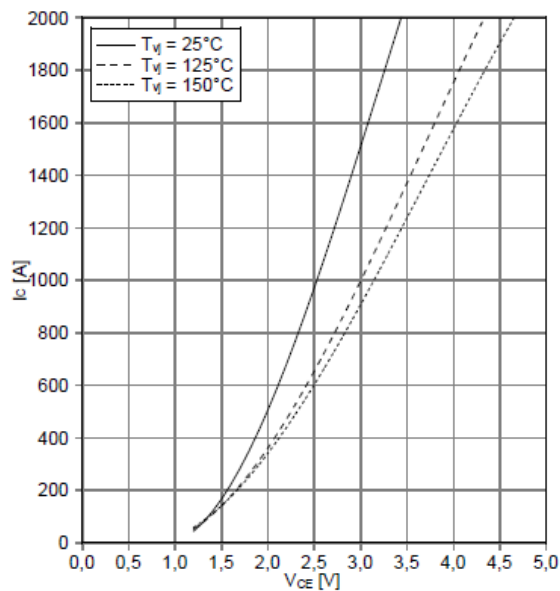
Na základě uvedených parametrů se provedly výpočty ztrát výkonových modulů pro konfiguraci H-můstku v 1-fázové aplikaci jako napěťový pulzní usměrňovač nebo napěťový střídač s uvažováním parametrů IGBT (obr.7) a diody (obr.8) dle obvodových veličin. Následně se spočítal tepelný model a dle vypočtených hodnot teplot na chipu se přepočítaly parametry součástky a znovu spočítaly ztráty. Po změně hodnoty ztrát se znovu spočítal tepelný model a tento postup se několikrát provedl.

Výsledné mapy výsledků jsou uvedeny na obr.9 a 10. Obr.9 zobrazuje mapu výsledků pro trakční měnič se vzduchovým chlazením a obr.10 pro vodní chlazení, jsou zde zobrazeny následující výsledky:

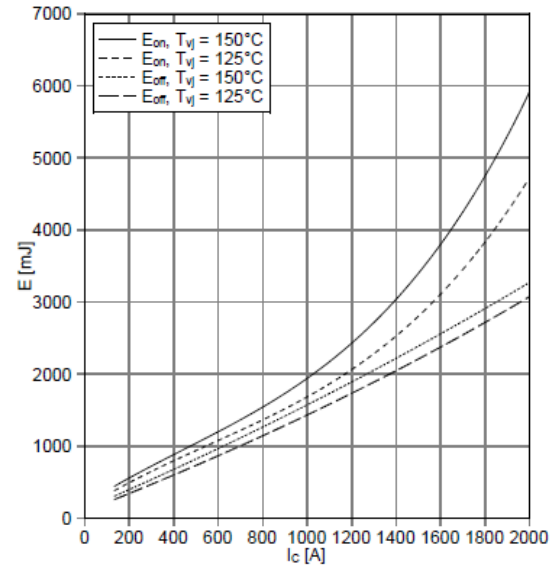
- Celkové ztráty výkonového modulu P_{tot} v závislosti na protékajícím proudu a spínací frekvenci (červeně vyznačeny pracovní body, kdy celkové ztráty modulu překračují maximální hodnotu 2400W, kterou je pouzdro modulu schopné fyzicky vůbec přenést nebo došlo k překročení teploty chipu – NEVYHOVUJE pracovní bod)

- Teplotu chipu IGBT a diody (červeně vyznačeny pracovní body, kdy překračují či jsou velice blízko max. teplotě chipu 150°C, oranžově pokud je vyšší než doporučená teplota 135°C z důvodu životnosti))

Ausgangskennlinie IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$

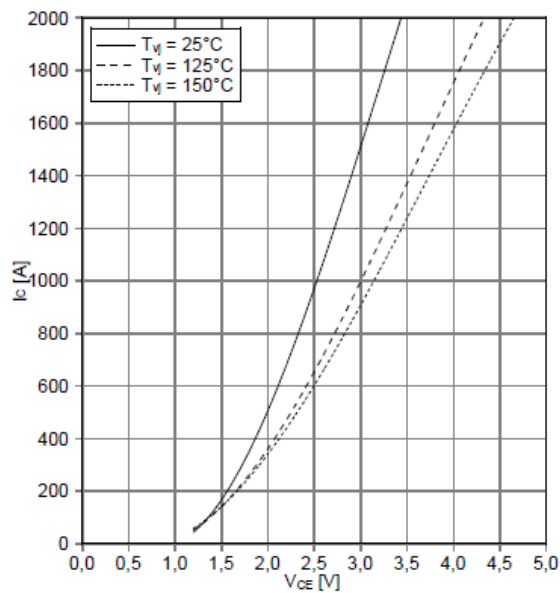


Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)
 $E_{on} = f(I_c)$, $E_{off} = f(I_c)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Gon} = 0.71\ \Omega$, $R_{Goff} = 2.3\ \Omega$, $V_{CE} = 1800\text{ V}$, $C_{GE} = 220\text{ nF}$

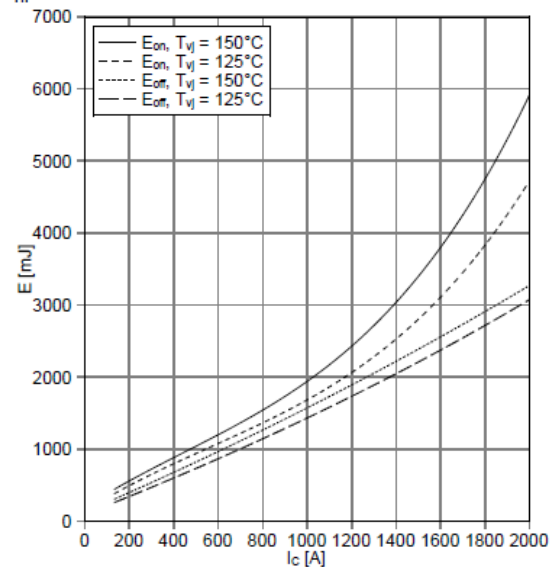


Obr. 7 Základní parametry IGBT pro ilustraci závislosti [1]

Ausgangskennlinie IGBT, Wechselrichter (typisch)
output characteristic IGBT, Inverter (typical)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$



Schaltverluste IGBT, Wechselrichter (typisch)
switching losses IGBT, Inverter (typical)
 $E_{on} = f(I_c)$, $E_{off} = f(I_c)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Gon} = 0.71\ \Omega$, $R_{Goff} = 2.3\ \Omega$, $V_{CE} = 1800\text{ V}$, $C_{GE} = 220\text{ nF}$



Obr. 8 Základní parametry diody pro ilustraci závislosti [1]

Ptot (W)	Iout (A)	100	250	400	600	700
fsw	800	0	0	917	1577	2096
	1000	0	0	1094	1983	0
	1200	0	0	1295	2350	0
	1400	0	888	1529	0	0
	1600	0	1017	1816	0	0

Chlazení vzduchem:

$$T_A = 40^\circ\text{C}, R_{th} = 0,06\text{K/W}$$

Tj_Tr	Iout (A)	100	250	400	600	700
fsw	800	0	0	97	139	173
	1000	0	0	108	164	0
	1200	0	0	120	187	0
	1400	0	94	134	0	0
	1600	0	102	151	0	0

Tj_Dioda	Iout (A)	100	250	400	600	700
fsw	800	0	0	85	117	141
	1000	0	0	95	137	0
	1200	0	0	105	155	0
	1400	0	85	118	0	0
	1600	0	93	133	0	0

Obr. 9 Výpočet ztrát, teploty přechodu chipu IGBT a diody v závislosti na frekvenci a procházejícím proudu při vzduchovém chlazení

Ptot (W)	Iout (A)	400	600	700	800	900
fsw	800	0	0	0	2002	2474
	1000	0	0	1928	2353	2884
	1200	0	0	2231	2760	
	1400	0	2064	2578		
	1600	1432	2346	2996		

Chlazení vodou: $T_w = 40^\circ\text{C}$, $R_{th} = 0,01\text{K/W}$

Tj_Tr	Iout (A)	400	600	700	800	900
fsw	800	0	0	0	120	137
	1000	0	0	116	133	156
	1200	0	0	127	149	
	1400	0	120	141		
	1600	94	130	156		

Tj_Dioda	Iout (A)	400	600	700	800	900
fsw	800	0	0	0	86	95
	1000	0	0	86	95	106
	1200	0	0	94	105	
	1400	0	91	103		
	1600	77	99	114		

Obr. 10 Výpočet ztrát, teploty přechodu chipu IGBT a diody v závislosti na frekvenci a procházejícím proudu při vodním chlazení

3 Závěr

Tato výzkumná zpráva se zabývá výpočtem ztrát IGBT modulů pro stavbu trakčního měniče plného výkonu se středofrekvenčními transformátory. Trakční měnič se sestává ze 4 IGBT součástek v zapojení DC-DC měniče s reverzací napětí i proudu – tzv. „H-můstek“. Ve zprávě je proveden výpočet ztrát IGBT modulu v závislosti na přenášeném výkonu a spínací frekvenci pro IHV modul od firmy INFINEON FZ1500R33HE3 s parametry 3,3kV a 1500A. IGBT modul FZ1500R33HE3 obsahuje 3 paralelně spojené IGBT tranzistory a celý měnič tedy potřebuje 4 moduly.

Na základě zvolených parametrů trakčního měniče:

- $P=200\text{kW}$
- $U_{DC}=1800\text{V}$ (pro 1500V nejsou charakteristiky součástky – obr.7, ztráty vyjdou příznivěji)
- $U_{in/out}=800\text{V}$ (záleží aplikaci H-můstku, U_{in} u pulzního 1f usměrňovače, U_{out} u 1f střídače)
- $U_{in/out}= 100\text{-}1000\text{A}_{\text{RMS}}$
- $f_{SW}=500\text{-}2000\text{Hz}$
- Chlazení vzduchem ($T_A = 40^\circ\text{C}$, $R_{thA} = 0,06\text{K/W}$) a vodou ($T_W = 40^\circ\text{C}$, $R_{thW} = 0,01\text{K/W}$)

Na základě uvedených parametrů se provedly výpočty ztrát a teplot chipů výkonových modulů pro konfiguraci H-můstku pro vzduchové a vodní chlazení.

Z výsledků je patrné, že pro tyto výkonové aplikace je vzduchové chlazení nedostatečné, kdy s vodním chlazením se dosahuje při stejných procházejících proudech podstatně vyšší spínací frekvence, či při stejné spínací frekvenci vyšší proudové zatížitelnosti.

Na základě těchto výsledků se rozhodlo pro vodní chlazení při stavbě funkčního prototypu výkonového měniče z důvodu dosažení vyšších výkonů.

Literatura

[1] www.infineon.com – IGBT moduly

Seznam obrázků

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	add	P. Drábek