

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Návrh rezonančního měniče s širokým rozsahem napájecího napětí
Jméno autora:	Bc. Filip Frollov
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra elektrických pohonů a trakce
Oponent práce:	Ing. Michal Richter
Pracoviště oponenta práce:	POLL, s.r.o.

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Složitost zadání spočívá v množství topologií, který by bylo možné podrobit analýze. Volba rezonančního tanku podle postupů uváděných v odborné literatuře obvykle není jednoznačná a vyžaduje nejen teoretické znalosti, ale též zkušenosti získané odbornou praxí.	
Zvýšené nároky se promítly též do aplikační části, kde bylo nutné provést návrh měniče třikrát.	

Splnění zadání	splněno
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Jednotlivé body zadání jsou zastoupeny v dostatečné míře. S ohledem na rozsah diplomové práce je akceptovatelné, že návrh měničů končí na úrovni simulace silových obvodů.	

Zvolený postup řešení	správný
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
V úvodu diplomant konkretizuje potřebný rozsah vstupního napětí měniče pracujícího na síti 600/750V _{DC} . Následuje kapitola objasňující původ ztrát na tranzistoru ve spínacím režimu, tuto část by bylo možné zestručnit. Prostřednictvím popisu technik redukce spínacích ztrát se autor dostává k rezonančním měničům. V textu lze nalézt výhody i nevýhody rezonančních měničů, je zde zmínka, že určitých pozitivních vlastností rezonančních měničů (například ZVS) lze docílit i u jednodušších topologií mimo jiné pomocí řízení fázovým posuvem společně s vhodnou volbou rezonanční tlumivky. Přednosti a nedostatky LLC však mohly být souhrnně zachyceny například tabulkou. Teoretická část nabízí odvození napěťového přenosu SRC, PRC a LLC měniče. Pro tyto účely je též zpracována analýza FHA. Napěťový přenos považuji za stěžejní pro další návrh měniče, věnovaný prostor této problematice v teoretické části hodnotím jako adekvátní. S volbou topologií potenciálně vhodných pro aplikaci s velkým regulačním rozsahem souhlasím. Perspektivně se jeví zejména varianta umožňující buzení rezonančního tanku plným i polovičním trolejovým napětím.	

Odborná úroveň	B - velmi dobře
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Zvolené téma jistě vyžadovalo četné samostudium. V praktické části student prokázal znalost simulačního prostředí LTspice, které použil k ověření napěťového přenosu měničů. Diplomant odvodil podmínky ZVS a měkké spínání ověřil pomocí simulace. Zkušenosti získané odbornou praxí využívá autor pouze místy. Odvození napěťových přenosů je zpracováno dostatečně podrobně. Vliv parazitních indukčností na přenos je však komentován pouze stručně. Simulace obsahuje reálné modely polovodičových součástek, bylo by ale možné doplnit rozptylovou indukčnost transformátoru nebo odlehčovací síť k diodám usměrňovače. Simulací by bylo možné ověřit též dostatečné dimenzování součástek například z hlediska ztrát nebo napěťového namáhání. Předchozí nedostatky uvádím spíše pro úplnost, jelikož cílem simulace bylo ověření napěťového přenosu měniče, přičemž tento účel simulace splňují.	

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

B - velmi dobře

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Jednotlivé celky na sebe logicky navazují. Ke strukturování textu mám pouze drobné výhrady – například v kapitole 6 nepovažuji za vhodné jednotlivé podkapitoly stavit na stejnou úroveň.

Obrázky jsou většinou dobře čitelné. Obecně lze však doporučit u technických výkresů, schémat, grafů či diagramů používat vektorovou grafiku. Zejména u průběhů demonstrujících ustálený stav by bylo vhodné zkrátit časovou základnu. Za dostatečné považuji vyobrazení dvou až pěti period. Vykreslení kratšího časového intervalu doporučuji např. u obr. 47 nebo obr. 50, kde je sice několika milisekundový interval opodstatněný potřebou zachytit rozběh měniče, ale u některých veličin je viditelná pouze obálka.

Autor sklouzává k hovorovému jazyku a místy se dopouští gramatických chyb. V hodnocení jazykové a formální stránky je nutné zohlednit, že autor není rodilý mluvčí. Do hodnocení promítám dobrou srozumitelnost textu a poměrně malé množství chyb.

Rozsah práce odpovídá požadavkům.

Výběr zdrojů, korektnost citací

B - velmi dobře

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Byla prokázána schopnost efektivního využití cizojazyčné literatury. Výběr zdrojů je relevantní vzhledem k zadání. Oceňuji studium odborných článků, které obvykle popisují modifikované topologie LLC měniče na vysoké odborné úrovni. Porozumění takovému textu vyžaduje nejen dobrou jazykovou vybavenost, ale často též dodatečné studium okrajově zmíněných témat.

Práce obsahuje prohrašky proti citační normě. V seznamu literatury chybí například použitá drážní norma. Nepřímé citace jsou značeny spíše výjimečně. U některých obrázků není zřejmé, zda jde o vlastní tvorbu, nebo přímou citaci.

Záporně hodnotím také opomenutí interní dokumentace firmy POLL, které student mohl využít.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Následující řádky věnuji poznámkám k realizaci jednotlivých prezentovaných variant měniče s velkým regulačním rozsahem.

1. Varianta – LLC plný můstek

- a) Topologie – vhodná, zvolen vhodný typ usměrňovače.
- b) Dimenzování polovodičových součástek – pro vstupní napětí 400V se vyskytují vysoké vodivostní ztráty.
- c) Rezonanční tank – napěťový přenos je dostatečný, avšak z praktického hlediska návrh není výhodný. Simulace potvrdila správnost výpočtu napěťového přenosu rezonančního tanku. Zároveň ale ukázala, že tyto parametry tanku nejsou výhodné mimo jiné z pohledu velkého rozsahu spínací frekvence nebo poklesu činitele filtrace souvisejícího s tvarem proudu, který protéká rezonanční kapacitou při vstupním napětí 400V. Úpravou poměru L_r/C_r lze dosáhnout strmější křivky napěťového zesílení (zejména ve smyslu přiblížení obou rezonančních frekvencí). Dostatečné zesílení nabízí například tank $40\mu\text{H}$, $120\mu\text{H}$ a 30nF . Spínací frekvence by se při nominálním výkonu pohybovala v rozmezí od 85kHz ($U_{in}=400\text{V}$) do 145kHz ($U_{in}=1000\text{V}$) pro převodový poměr transformátoru 35/1-1. Pochopitelně lze uvést nevýhody zvoleného řešení – například vysoké napěťové namáhání rezonanční kapacity spojené s nutností příslušného dimenzování izolačních vzdáleností nebo volby konstrukce se zalitým rezonančním tankem společně s transformátorem do izolační hmoty z hlediska elektrického a s dodatečnou vodivostí z pohledu šíření tepla. Cirkulační proud vzhledem k použitým tranzistorům nehodnotím jako zásadní nevýhodu.
- d) Transformátor
Požadujeme-li nízkou rozptylovou indukčnost transformátoru, bude nutné volit konstrukci s minimální vzdáleností primárního a sekundárního vinutí. Zároveň je potřeba si uvědomit, že rozptyl poroste i s velikostí magnetického obvodu.

2. Varianta - neřízený LLC plný můstek se zvyšujícím měničem
 - a) Topologie – vhodná, sekundární měnič je jednoduchý, množství součástek tak vzrostlo minimálně.
 - b) Dimenzování polovodičových součástek – vysoké nároky na chlazení tranzistoru i diody zvyšujícího měniče, poměrně nízká rezerva v závěrném napětí.
 - c) Rezonanční tank - vhodný

3. Varianta - tříúrovňový měnič s LLC rezonančním tankem
 - a) Topologie – vhodná
Tříúrovňový měnič redukuje napětí na transformátoru a umožňuje volit výhodnější převod.
 - b) Dimenzování polovodičových součástek – opět namáhání primárních tranzistorů i usměrňovacích diod vysokými proudovými špičkami.
 - c) Rezonanční tank – napěťový přenos mohl být oproti 1. variantě zredukován, topologie umožňuje budít rezonanční tank plným nebo polovičním vstupním napětím.

U žádné varianty není uveden způsob řízení pro pracovní bod charakterizovaný vysokým vstupním napětím (1000V) a nízkou zátěží (například 20A).

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Zadání si vyžádalo návrh tří měničů, tyto návrhy byly realizovány pomocí simulací v programu LTspice, který je v praxi rozšířený pro obsáhlou knihovnu součástek a dobrou vybavenost, zvláště v kontextu ceny – jedná se o freeware. Prezentované simulace jsou funkční a využívají reálných modelů polovodičových součástek. K návrhu rezonančního tanku mám jisté výhrady. Také bych ocenil srovnání více různých tanků. Domnívám se však, že srovnání několika topologií i rezonančních tanků by rozsahem citelně převyšovalo rámec diplomové práce. Student si s náročným zadáním poradil vcelku dobře. A nad rámec rozsáhlého zadání řešil například rozběh rezonančního měniče.

K obhajobě pokládám následující otázky:

1. Stručně komentujte vliv velkého rozsahu spínací frekvence na ztrátový výkon transformátoru. Diskutujte použitelnost planární technologie pro transformátor uvažovaný v simulačním schématu na obrázku 38.
2. Jaké jsou další výhody SiC tranzistorů vyjma zmíněného rozsahu provozních teplot?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B - velmi dobře**.

Datum: 9.6.2018

Podpis: