

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Název: **Comparison and Optimization of DC/DC Power Conversion Topologies using GaN FET Technology for High Efficiency and Power Density Power Converters**

Autor: **Ing. Michal Šír**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně
616 00 Brno, Technická 10

Školitel: **Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.**

Oponent: **Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.**
Katedra elektrických pohonů a trakce
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
166 27 Praha 6, Technická 2
Tel.: +420 224 352 147, e-mail: lettl@fel.cvut.cz

Doktorská disertační práce Ing. Michala Šíra se zabývá v současné době teoreticky zajímavou a prakticky významnou problematikou uplatnění nových výkonových polovodičových prvků na bázi GaN technologie v DC/DC měničích a jejich optimalizací z hlediska maximalizace účinnosti a objemové hustoty výkonu.

1. Aktuálnost a význam tématu disertační práce z hlediska současného stavu vědy

Téma doktorské disertační práce odpovídá doktorskému studijnímu oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika. Námet práce je vysoce aktuální a má praktický význam pro řešení specifických problémů spojených s nasazením výkonových polovodičových součástek na bázi GaN technologie v topologiích výkonových DC/DC měničů umožňujících konverzi stejnosměrného výkonu s vynikající účinností při vysoké objemové hustotě reálných zařízení. Jejich využití je perspektivní například v aplikacích zajišťujících korekci účinníku (PFC – Power Factor Correction), v přenosných nabíjecích stanicích pro elektromobilitu, atd.

2. Postup řešení, zvolené metody zpracování, splnění stanovených cílů

Stanovené cíle jsou shrnuty v pěti bodech písemně uvedených v kapitole 2 na str. 15 disertační práce. Zahrnují rozbor požadavků na drivery dnes dostupných GaN součástek, návrh inovativních způsobů chlazení, analýzu dynamických charakteristik odporu GaN součástek v sepnutém stavu, aplikaci získaných výsledků při návrhu a realizaci výkonového DC/DC měniče i využití moderních integrovaných obvodů v GaN aplikacích.

Vlastní disertace sestává z celkového počtu 99 stránek textu. Z toho cca 45,5 % (45 stránek) tvoří nezbytné úvodní pasáže včetně obsahu, přehledových seznamů a úvodu. K této části můžeme přiřadit převážně popisné a shrnující kapitoly 1 až 5 obsahující přehled současného stavu GaN technologie, požadavky na drivery, možné inovativní způsoby chlazení a provedení desek tištěných spojů. Za vlastní jádro práce lze považovat kapitoly 6 až 9, představující zbývajících 54,5 % (54 stránek) textu, které jsou věnovány analýze dynamických charakteristik odporu GaN součástek, návrhu a realizaci výkonového DC/DC měniče, jeho zprovoznění a ověření funkčnosti, jakož i proměření vlastností rekuperačního driveru.

Zvolené metody zpracování jsou dle mého názoru plně v souladu s obecnými zvyklostmi i se stanovenými cíli a zahrnují provedení příslušných rešerší, analýzu možných řešení včetně potřebných simulací, vytvoření nástrojů pro testování, návrh a realizaci výkonového měniče a ověření jeho funkčnosti.

Získané výsledky simulací a praktických experimentů, jakož i jejich shoda (viz například porovnání průběhů závislosti účinnosti na výstupním výkonu dle obr. 86 na str. 81, získaných měření, s průběhy dle obr. 87 na str. 81, získanými simulací) svědčí o oprávněnosti zvolených postupů a použité metodiky, a prokazují, že stanovené cíle byly splněny v plném rozsahu.

3. Výsledky disertační práce a původní přínos pro rozvoj vědního oboru

Nejdůležitější výsledky předložené disertační práce jsou:

- přehled základních charakteristik moderních struktur GaN polovodičových součástek (D-mode GaN tranzistor, E-mode GaN tranzistor, cascode GaN tranzistor, GIT-Gate Injection Transistor),
- shrnutí a rozbor požadavků na drivery GaN tranzistorů (nadproudová ochrana, ochrana před kmitáním napětí, specifika driverů pro GaN tranzistory E-mode, cascode a GIT,
- možnosti chlazení horní strany a dolní strany součástek, různá provedení desek plošných spojů výhodná pro chlazení dolní strany a přehled jejich tepelných odporů (viz např. obr. 30 na str. 32),
- rozbor aspektů konstrukce desek plošných spojů pro vysokofrekvenční měniče,
- návrh a aplikace metody měření odporu GaN součástek v zapnutém stavu a odměření jeho dynamických závislostí (viz např. obr. 39 - 42 na str. 42 - 43),
- návrh a realizace optimalizovaného měniče na bázi GaN součástek, ověření jeho funkčnosti, odměření časových průběhů veličin, stanovení závislosti účinnosti na výstupním výkonu simulací a měření pomocí analyzátoru výkonu (viz např. obr. 86 – 87 na str. 81),
- odměření a porovnání závislosti ztrát na spínacím kmitočtu pro různé drivery (viz obr. 97 na str. 88, bohužel není osa y náležitě popsána).

Za přínos disertace považuji komplexní pohled na specifika návrhu a realizace výkonových polovodičových měničů na bázi GaN technologie. Původní přínos práce lze spatřovat v návrhu a praktickém ověření metody měření odporu GaN součástek v zapnutém stavu (viz kapitola 6) a zejména ve využití získaných výsledků pro návrh a realizaci výkonového GaN měniče, ověření jeho funkčnosti proměření časových průběhů veličin a dosažení vysoké účinnosti realizovaného prototypu v celém provozním rozsahu (viz kapitola 7). Škoda jen, že některé závěry a získané závislosti nejsou prezentovány pečlivěji a s ohledem na potenciální čtenáře, což však nesnižuje jejich význam odborný.

Disertant by měl blíže uvést, vysvětlit či zhodnotit:

- podmínky redukce kapacitance C_{oss} u E-mode GaN tranzistoru (viz str. 10) umožňující dosažení vyšších kmitočtů s nižšími spínacími ztrátami a to v porovnání s GaN cascode tranzistorem (viz str. 19), kde je tato kapacitance při nižším napětí vyšší a nelineární;
- průběh výstupní V-A charakteristiky u GaN cascode tranzistoru (viz str. 12);
- rozdíl mezi výstupní V-A charakteristikou GIT tranzistoru (viz obr. 9 na str. 13) a výstupní V-A charakteristikou E-mode GaN tranzistoru (viz obr. 4 na str. 11);
- obr. 30, na str. 32 ukazuje hodnoty tepelného odporu samotné desky plošných spojů, avšak jaký je potom celkový tepelný odpor mezi pouzdem součástky a chladičem při chlazení spodní strany součástky a při chlazení horní strany součástky;
- snížení ztrát při zmenšení průřezu aktivní měděné vrstvy (viz porovnání obr. 33 a obr. 34 na str. 36), a to dokonce o 20 %;
- míru splnění předpokladů (viz str. 38) pro úspěšné měření odporu GaN součástky v zapnutém stavu;
- jaké ztráty jsou respektovány při výpočtech závislostí dle obr. 48 na str. 52, která veličina udaná ve W je parametrem závislostí;
- od jaké nenulové hodnoty kmitočtu je čidlo proudu dle obr. 67 na str. 71 plně funkční s dostatečnou přesností;
- jaká je přesnost použitého analyzátoru výkonu Yokogawa WT 3000 (viz str. 80) a jaká hodnota účinnosti byla naměřena u celého systému (tj. PFC+LLC+výstupní usměrňovač) dle obr. 55 na str. 61;
- jaká hodnota objemové hustoty výkonu byla u realizovaného zařízení zjištěna a jakým způsobem byla určena.

4. Systematická, přehlednost, jazyková, terminologická, formální a grafická úroveň

Doktorská disertační práce je psána v anglickém jazyce. Je zpracována přehledně, má dobrou úroveň formální i grafickou. U řady obrázků jsou ale nečitelné popisky, např. obr. 33 a 34 na str. 36, obr. 37 na str. 40, obr. 38 na str. 41, obr. 57 na str. 62, obr. 92 na str. 84 a další, v některých případech chybí popis os (např. obr. 91 na str. 83), jinde nejsou v obrázcích vyznačeny parametry popisované v odpovídajícím textu (např. indukčnosti L1, L2 a kapacity X, Y v obr. 90 na str. 83) atd. Text práce je kromě obvyklých pasáží logicky rozdělen celkem do devíti kapitol, které jsou dále členěny do jedné až dvou úrovní podkapitol. Jednotlivé části práce vytvářejí vhodnou návaznost řešených problémů a umožňují čtenáři sledovat postup řešení. Ke srozumitelnosti práce přispívají zařazené seznamy obrázků, tabulek, použité literatury, symbolů a zkratk, příloh, jakož i publikací autora. V celé disertaci jsem nenalezl žádné odkazy na použitou literaturu. Drobné chyby formální, stylistické, gramatické (např. Fig. 70 show místo Fig. 70 shows na str. 73, 10. řádek zdola) nebo překlepy (např. They way místo The way na str. 50, 7. řádek shora) nemají zásadní charakter. Disertant však často uvádí jako známá, fakta, která dosud nezmínil (např. ztráty v synchronním usměrňovači $\Delta P_{T,R}$ ve vztahu 16 na str. 50, přičemž synchronní usměrňovač popisuje poprvé až na str. 59), používá v práci nezavedená označení (např. indexy H, L ve vztazích 38, 39 na str. 54), nebo veličiny (např. T_{in} ve vztahu 46 na str. 56).

5. Úroveň publikování jádra disertační práce

Seznam autorových publikací uvedený na str. 98 disertační práce obsahuje 4 položky. Jedná se o 2 články v časopise *Przeglad Elektrotechniczny*, 1 příspěvek na mezinárodní konferenci a 1 příspěvek na studentské konferenci. U všech publikací je Ing. Michal Šír uveden jako první autor. Tři publikace, v seznamu uvedené jako první, jsem našel jak v citační databázi Web of Science, tak v citační databázi Scopus. Seznam prací dále zahrnuje 1 patent. Publikační aktivitu doktoranda lze v daném oboru považovat za postačující, jádro disertační práce bylo publikováno.

6. Závěr

Disertant splnil stanovené cíle doktorské disertační práce. Disertace obsahuje původní vědecké poznatky vhodné pro praktické využití v průmyslových aplikacích. Práce splňuje obecně uznávané požadavky na úroveň doktorských disertačních prací, formální i odborná úroveň zpracování je odpovídající, jádro práce bylo na potřebné úrovni publikováno. Z výsledků vědecké činnosti uchazeče vyplývá jeho schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce a je zřejmé, že se jedná o pracovníka s vědeckou erudicí. Z výše uvedených důvodů doktorskou disertační práci Ing. Michala Šíra s názvem *Comparison and Optimization of DC/DC Power Conversion Topologies using GaN FET Technology for High Efficiency and Power Density Power Converters*

d o p o r u č u j i k o b h a j o b ě

a v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách, doporučuji po úspěšné obhajobě udělení titulu Ph.D.

V Praze dne 27. 12. 2021



Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.