

Oponentní posudek

disertační práce na téma Bezdrátový přenos elektrické energie velkých výkonů

autora Ing. Martin Zavřela, ZČU Plzeň 2022

Téma práce je zvoleno zcela v souladu s výhledem, kam by se mohla ubírat elektromobilita, pokud bude nutno nenásilně zlepšit její přijetí širokou veřejností cestou zvyšování uživatelského komfortu. Toto je ostatně zmíněno hned v úvodu v kapitole 1.1.

První část disertační práce definuje jednoznačně oblast, na kterou se práce zaměří a vymezí se oproti podobným aplikacím. Dále je poměrně detailně proveden rozbor současných požadavků na systém bezdrátového přenosu výkonu. Co nehlubší znalost technického rámce, který je nutno dodržet, je výrazným faktorem úspěchu projektu. Tímto rozбором předložená práce připomíná kapitoly definičního dokumentu komerčního vývojového projektu, zvláště pak na začátku kapitoly 3.

Následuje rozbor principů přenosu výkonu v několika alternativách jako přehled současného stavu poznání s tím, že je jedna s možností je vybrána a podrobněji popsána včetně topologie. Zde se musím pozastavit nad schématickým znázorněním některých prvků na obr. 9, kde není na první pohled jasné, o co se jedná. Mám například na mysli označení napěťových čidel jako reaktance.

Analýza, jednotlivých konfigurací rezonančních obvodů je udělána důkladně a srozumitelně s použitím symbolicko-komplexního popisu. Analýza činnosti vazebního transformátoru touto metodou dává zajímavé výsledky, které jsou nesporným přínosem této práce. Tady musím kriticky hodnotit grafické zobrazení dosažitelných těchto výsledků, např. výkonů, účinností a pod. Na obrázcích 20 až 23 jsou na barevné Z-ose různá měřítka a srovnání metod mezi sebou je proto obtížné. Důvody pro zvolení koncepce s transformátorem s volnou vazbou a sladěnými rezonančními obvody na obou stranách jsou ovšem v práci dobře objasněny a přehledně odprezentovány.

V této části by mohlo být více rozvedeno, jakým způsobem se projeví rozladění soustavy na dosažené parametry výkonu a účinnosti. Rozladěním myslím neshodné rezonanční kmitočty primární a sekundární strany způsobené tolerancemi prvků, případně stárnutím kondenzátorů. Toto téma by bylo vhodné v průběhu obhajoby blíže osvětlit. Na straně 52 v rovnici 40 je definován impedanční přenos usměrňovače a přepočten odpor zátěže ze střídavé strany na stejnosměrnou. V zápisu této rovnice je pravděpodobně překlep.

Návrh vazebních prvků pro demonstrační prototyp je proveden velice kvalitně a popis návrhu v práci je srozumitelný. Funkce vazebních prvků je experimentálně ověřena. Na tomto místě bych si uměl představit zamyšlení se nad přítomností feromagnetických elementů v blízkosti vazebních indukčností a jejich vlivu na přenosové vlastnosti, zejména účinnost. Domnívám se, že se tomu při zástavbě do vozidla nepůjde vyhnout a tato komplikace by mohla degradovat slibné parametry, uvedené zde v práci.

Regulační strategie uvažované nabíjecí stanice je zvolena vhodně s ohledem na požadované parametry a je srozumitelně popsána. Postup, kterým byla strategie implementována a ověřena odpovídá způsobu, který se standardně osvědčuje v praxi.

Jazyková úroveň práce je pouze na podprůměrné úrovni, text je ovšem bez potíží srozumitelný. Na tomto místě musím autorovi vytknout spoustu neopravených překlepů a i jiných gramatických a interpunkčních chyb. Místy text připomíná nářečí. Grafické zobrazení schémat a principů funkce je stylizováno velice pestře, připomíná spíše nějaký katalog než vědeckou práci.

Ze seznamu publikací autora je zřejmé, že se problematice bezdrátového přenosu elektrické energie věnuje delší dobu a předložená práce je tedy logicky pokračováním této cesty. Práce byla vytvořena jako součást většího celku, jak je uvedeno ostatně v kapitole 7.1 a je zřejmé i podle složení autorských týmů prezentovaných publikací. Vlastní podíl autora se ovšem dá odtušit. Rozsah publikování výsledků přesahuje běžný standard a lze jej pouze pochválit.

Použitá a citovaná literatura odpovídá množstvím a zaměřením tématu disertační práce. Zde se musím pozastavit nad výsledky převzatými v rámci autorských týmů, zvláště nad analýzou vazebních elementů v kapitole 4, tak jak je to uvedeno v kapitole 7.1. Stálo by za zvážení, zda není na tomto místě vhodné tyto převzaté výsledky formálně citovat, i když se zřejmě nejedná o doslovné převzetí, nýbrž spíše o jejich parafráze. Nejedná se podle mého názoru o nějaké hrubé porušení pravidel přebírání cizích výsledků, nicméně v budoucnosti by mohly podobné formální nedostatky poskytovat příležitost k zpochybnování této práce.

Práce se díky svému obsahu řadí mezi špičková díla v oboru výkonové elektroniky a pokrývá oblast, kterou se výkonová elektronika bude pravděpodobně mimo jiné ubírat. Ucelený popis problematiky včetně experimentálního ověření shrnuje cenné informace a nové poznatky pro další vývoj podobných zařízení.

Vzhledem k množství kvalitních výsledků, uvedených v disertační práci Ing. Zavřela, tuto práci jednoznačně doporučuji k obhajobě a žádám v průběhu obhajoby o zodpovězení otázek a mírných pochybností uvedených v tomto posudku.

V Ostravě dne 20.5.2022
Ing. Vladislav Damec, Ph.D.

Siemens Mobility GmbH
Components, Traction Drives, R&D Austria, Power Electronics and Mechanical Design
Siemensstrasse 90
A-1210 Austria

VŠB-TU Ostrava
FEI, Katedra aplikované elektroniky
17. listopadu 15
CZ-70800 Ostrava



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Martin Zavřel

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Bezdrátový přenos elektrické energie
velkých výkonů

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Doktorská disertační práce Ing. Martina Zavřela se zabývá v současné době teoreticky zajímavou a prakticky významnou problematikou bezdrátového přenosu elektrické energie, jež nachází uplatnění při nasazení nabíjecích stanic větších výkonů pro dopravní prostředky, jako jsou například elektromobily a elektrické autobusy. Téma doktorské disertační práce odpovídá doktorskému studijnímu oboru Elektronika. Námět práce je vysoce aktuální, odpovídá současným trendům i společenským požadavkům a má praktický význam pro řešení specifických problémů spojených s návrhem a realizací jak výkonové části, tak řídicích algoritmů bezdrátové nabíjecí stanice pro elektromobilitu s parametry optimalizovanými zejména z hlediska maximalizace účinnosti a praktičnosti pro střední přenosovou vzdálenost a to ve shodě s již zavedenými a platnými regulativními předpisy a normami.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Stanovené cíle jsou přehledně shrnuty v pěti bodech písemně uvedených v kapitole 1.4 na str. 22 disertační práce. Zahrnují sestavení přehledu a výběr nejvhodnější topologie vazebních elementů a jejich aplikace v systému bezdrátové nabíjecí stanice, definování požadovaných vlastností, vytvoření simulačního modelu, volbu nejvhodnější varianty výkonového a řídicího řetězce, ověření zvoleného přístupu k řešení jak simulací, tak experimentálními měřeními na realizovaném prototypu 65 kW bezdrátové nabíjecí stanice pro elektromobily.

Vlastní disertace sestává z celkového počtu 149 stránek textu, z toho cca 44 % (65 stránek) tvoří nezbytné úvodní pasáže včetně obsahu, přehledových seznamů, úvodu (kap. 1) s velmi dobře provedenou analýzou současného stavu poznání a příloh s užitečnými výtahy z norem SAE TIR J2954 a SAE TIR J2847/6. Následují převážně popisné a shrnující, avšak pro uvedení do problematiky nezbytné kapitoly 2 až 3, zabývající se možnými topologiemi a normalizací v oblasti WPT a WPCS pro elektromobilitu, a dále kapitola 4, která uvádí popis a návrh možných vazebních elementů WPT, porovnání základních konfigurací kompenzace induktivní rezonanční vazby, možnosti implementace WPT v elektromobilitě včetně nutných měničů a možných způsobů řízení. Tato část činí cca 31 % (47 stránek). Za vlastní jádro práce lze považovat kapitoly 5 až 7, představující 25 % (37 stránek) textu, které jsou věnovány návrhu a realizaci celého výkonového a řídicího řetězce bezdrátové nabíjecí stanice (kap. 5), verifikaci simulací a měřeními na experimentálním prototypu (kap. 6) a zhodnocení dosažených výsledků (kap. 7).

Zvolené metody zpracování jsou dle mého názoru plně v souladu s obecnými zvyklostmi i se stanovenými cíli, zahrnují provedení vynikající rešerše, analýzu možných řešení včetně potřebných simulací, návrh a realizaci prototypu nabíjecí stanice 65 kW i experimentální ověření funkčnosti měřeními. Výsledky měření na prototypu zařízení i shoda s výsledky simulací svědčí o oprávněnosti zvolených postupů a prokazují, že stanovené cíle byly splněny v plném rozsahu.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Za nejpodstatnější konkrétní přínos disertace považuji vývoj, optimalizovaný návrh a praktickou realizaci bezdrátové nabíjecí stanice pro elektromobilitu i úspěšnou verifikaci její funkce měřením na experimentálním prototypu zařízení o výkonu 65 kW. Za významný vedlejší přínos lze rovněž považovat komplexní shrnutí dosavadních poznatků o problematice bezdrátového přenosu elektrické energie využitelné pro výukové účely.

Nejdůležitější výsledky předložené disertace jsou:

- komplexní shrnutí problematiky bezdrátového přenosu elektrické energie většího výkonu
- detailní analýza systému z hlediska účinnosti, hospodárnosti a dosažitelných výkonů
- porovnání čtyř základních konfigurací induktivního přenosu v plně kompenzované variantě
- sestavení simulačního modelu v časové oblasti
- nalezení optimálních podmínek pro bezdrátový přenos elektrické energie z hlediska účinnosti
- elektrický a magnetický návrh vazebních elementů
- návrh vhodné výkonové a řídicí struktury pro zajištění obousměrného přenosu
- porovnání tří způsobů řízení nabíjecího výkonu
- návrh, realizace a verifikace systému bezdrátové nabíjecí stanice o výkonu 65 kW
- získání výsledků měření na experimentálním prototypu pro další výzkum

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Doktorská práce je psána v českém jazyce, k jejímu zpracování doktorand přistoupil s velkou pečlivostí, formální i vědecká úroveň práce je vysoká. Kromě obvyklých pasáží je práce rozdělena do sedmi kapitol, které jsou logicky členěny do dvou úrovní podkapitol. Práce je přehledně uspořádána, jednotlivé kapitoly poskytují návaznost řešených problémů, takže se čtenář v práci dobře orientuje. Práce má jasnou skladbu, ucelený charakter, autor vhodně cituje použitou literaturu. K ještě větší srozumitelnosti práce by jistě přispělo zařazení seznamu obrázků a tabulek, u seznamu symbolů a zkratk uvedeného na str. 7 až 10 jsem nenalezl vhodný klíč k vyhledávání položek, způsob jejich řazení mi připadá nelogický. Za velice užitečné považuji zařazení příloh s výtahem z použitých norem. Svědomitý přístup k realizaci úkolu dokumentuje rovněž vysoká grafická úroveň zpracování práce. Kromě několika drobností jsem v práci nenalezl žádné chyby odborné či formální. Drobným chybám stylistickým (např. na str. 43 dole: „Dosahované výkony jsou ... velikostně negativně nesrovnatelné“, gramatické (např. na str. 105, 6-tý řádek zdola: „Z výsledků ... vyplívá potvrzení“) nebo překlepy (např. na str. 106, 16-tý řádek zdola: “Odvozená ... topologie ... je tek ověřená“) nemají zásadní charakter a bylo možno se jim vyhnout pečlivější korekturou čistopisu.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Seznam autorových publikací a výstupů vztahujících se k předložené práci uvedený na str. 113 a 114 disertační práce obsahuje 29 položek. Z toho 8 publikací jsem našel v citační databázi Web of Science. Jedná se o 4 články v impaktovaných časopisech (2 x Archiv für Elektrotechnik, 2 x Energies) a 4 příspěvky ve sbornících zahraničních konferencí (2 x International Conference Elektro, 2 x Mechatronics). Další publikace zahrnují 1 článek v tuzemském časopise, několik příspěvků na tuzemských konferencích a výzkumné zprávy. Navíc je na str. 115 a 116 disertační práce uvedeno 21 ostatních publikací a výstupů studenta. V daném oboru lze publikační aktivitu doktoranda považovat za vysokou a konstatuji, že jádro disertační práce bylo publikováno na odpovídající úrovni.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Disertant Ing. Martin Zavřel splnil stanovené cíle doktorské disertační práce v plném rozsahu, přičemž bylo dosaženo vynikajících výsledků. Disertace obsahuje nejen původní vědecké poznatky vhodné pro praktické využití, ale i komplexní teoretické a praktické shrnutí problematiky bezdrátového přenosu elektrické energie využitelné například pro výukové účely. Práce dle mého názoru splňuje obecně uznávané požadavky na úroveň doktorských disertačních prací, má vysokou formální i odbornou úroveň zpracování, jádro práce bylo publikováno na potřebné úrovni. Z výsledků vědecké činnosti uchazeče vyplývá jeho schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce a je zřejmé, že se jedná o pracovníka s vynikající vědeckou erudicí. Z výše uvedených důvodů doporučuji předloženou doktorskou disertační práci k obhajobě a v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách doporučuji po úspěšné obhajobě udělení titulu Ph.D.

Disertant by měl blíže uvést, vysvětlit či zhodnotit:

- možnosti a podmínky zjednodušení úplného topologického schématu WPCS podle obr. 9 na str. 26,
- využití aktivních metod řízení bifurkace pro maximalizaci účinnosti, neboť v případě S-S konfigurace vazebných elementů pravděpodobně obrázky 20a) a 20c) na str. 42 zachycují jeden z projevů bifurkace, a to konkrétně Frequency Splitting (štěpení kmitočtu), v zobecněné teorii bifurkace nazvané Output Amplitude Bifurcation (OAB),
- co znamená bílá barva na obr. 27, str. 49, případně opět souvislost s bifurkací,
- přesnější definici a praktický význam pojmu frekvenční selektivnost vazebného elementu, viz str. 55, 3-tí řádek shora,
- maximalizaci velikosti napájecího napětí U_1 jako hlavní prostředek k maximalizaci přenosové účinnosti vazebných elementů (viz str. 55, vztah 46), limity napájecího napětí, možnosti využití změny rezonanční frekvence,
- výpočtové napětí kompenzačního kondenzátoru 8,5 kV (viz str. 59, uprostřed) pro experimentální prototyp nabíjecí stanice 65 kV, důsledky, tepelné dimenzování, chlazení,
- na jakém principu je založen návrh alternativního vazebného kondenzátoru (viz str. 59 dole),
- konkrétní algoritmus strategie řízení dle obr. 58 na str. 75, způsob on-line zadávání hodnoty R_{ZDC} optimalizované z hlediska maximalizace účinnosti při dynamických změnách,
- způsob přechodu mezi směry toku výkonu v obousměrné variantě topologie WPCS,
- současné požadavky na EMC a EMI nabíjecích stanic, existuje odpovídající norma.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

ANO

Datum

Date

15.08.2022

Podpis oponenta:

Signature of opponent





POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:
Title, name, surname of student

Ing. Martin Zavřel

Doktorský studijní program:
Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:
Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:
Topic of the dissertation

Bezdrátový přenos elektrické energie
velkých výkonů

Školitel:
Supervisor

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Oponent:
Opponent

Doc. Ing. Michal Praženica, PhD.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Predložená dizertační práca sa zaoberá technológiou bezdrôtového prenosu elektrickej energie a aplikáciou takéhoto systému do elektromobility. Konkrétne ide o vysoko výkonnú aplikáciu orientovanú pre potreby vozidiel osobnej a hromadnej dopravy ako alternatíva ku káblovým nabíjacím staniciam.

Téma tejto práce je vzhľadom na súčasné trendy vysoko aktuálna nakoľko sa jej venujú stále väčšia a väčšia pozornosť a nepochybne zaujme svoje miesto v oblasti nabíjania elektrických vozidiel ako alternatíva ku káblovým nabíjacím staniciam. Súčasný trendy, normy, ale predovšetkým svetová politika tlačí na rýchly rozvoj v tejto oblasti.

Výhodou predkladaného riešenia je práve možnosť jeho aplikácie na rôznych miestach (nákupné centrá, parkoviská, ale aj križovatky, a pod.), kde aj bez nutnosti manuálnej obsluhy je možné batériu elektrického vozidla nabiť, čo zvýši dojazd takéhoto vozidla. Veľkou nevýhodou elektrických vozidiel je práve doba nabíjania trakčných batérií (rádovo hodiny), nakoľko predstavuje niekoľko násobok času potrebného na natankovanie kvapalných pohonných hmôt (rádovo minúty). Riešenie v podobe zvýšenia kapacity batérií zvýši nielen dojazd, ale aj hmotnosť a cenu vozidla a v konečnom dôsledku aj čas nabíjania. Použitie rýchlo-nabíjačiek má zase negatívny vplyv na ich životnosť.

Na základe týchto vlastností sa práve predkladané riešenie javí ako najvýhodnejšie, nakoľko aj čiastočným nabíjaním (napríklad pri státi v kolóne, na križovatke, a pod.) je možné buď zvýšiť dojazd vozidla, alebo by bola postačujúca batéria s menšou kapacitou.

Zhrnutím týchto dôvodov možno konštatovať, že téma práce je vysoko aktuálna a zároveň vzhľadom na aktuálne požiadavky spoločnosti je aj potrebná.

Výsledky uvedené v práci navyše obsahujú odporúčania na ďalšie perspektívne oblasti výskumu a ďalšie možnosti optimalizácie pre realizáciu komerčného riešenia systému WPT pre aplikácie v elektromobilitě.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Práca je riešená systematicky a logicky. Je rozdelená do siedmich kapitol.

Prvá kapitola uvádza do problematiky, opisuje súčasný stav v riešenej oblasti a definuje ciele dizertačnej práce. Druhá kapitola opisuje postup návrhu bezdrôtovej nabíjacej stanice, pričom normám a predpisom pre nabíjacie stanice sa venuje tretia kapitola.

Štvrtá kapitola sa zaoberá fyzikálnou a elektromagnetickou stránkou bezdrôtového prenosu energie, pričom výstupom tejto kapitoly sú simulačné modely základných konfigurácií

väzobných elementov. V tejto kapitole je taktiež odôvodnený výber použitého, teda najvýhodnejšieho riešenia.

V piatej kapitole sú znalosti z predchádzajúcich kapitol a znalostí z predchádzajúceho prototypu systému WPT s výkonom 5kW aplikované na systém bezdrôtového prenosu energie doplnený o výkonovú a riadiacu elektroniku a je opísaný výkonový reťazec s vysokým výkonom 65kW doplnený o riadiace postupy implementované v procesore.

Šiesta kapitola rozoberá výsledky meraní experimentálneho prototypu s výkonom 65kW a navrhnutého riadenia použitého výkonového reťazca.

Posledná siedma kapitola predstavuje súhrn dosiahnutých poznatkov.

Za jadro práce považujem kapitoly č. 4-6, v ktorých sú analyzované možnosti realizácia systému s konkrétnym prototypom s výkonom 65kW, navrhnutým a overeným riadením použitého výkonového reťazca.

Výsledky z týchto kapitol poukazujú správnosť návrhov a samotného riešenia a zároveň navrhujú odporúčania na ďalšie perspektívne oblasti výskumu a možnosti optimalizácie pre realizáciu komerčného riešenia systému WPT.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Medzi dosiahnuté výsledky možno zaradiť:

- Zovšeobecnenie postupu návrhu väzobných elementov výkonového systému a ich výkonová bilancia,
- Zovšeobecnenie postupu implementácie systému WPT v elektromobilite,
- Návrh riadenia systému WPT,
- Realizácia funkčných vzoriek systému a implementácia riadiaceho algoritmu do procesora,
- Verifikácia a experimentálne overenie činnosti navrhnutého systému s výkonom 65kW
- Overenie navrhnutého riadenia v troch režimoch so vzájomným porovnaním a vyhodnotením.

Na základe uvedených výsledkov konštatujem, že všetky stanovené ciele práce boli v plnom rozsahu splnené.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práca je napísaná prehľadne, zrozumiteľne a obsahuje len malé množstvo chýb. Riešená problematika sa v celej práci opiera o kvalitnú a prehľadnú grafickú dokumentáciu a veľmi dobre ju dopĺňa.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Zoznam autorových publikácií je veľmi rozsiahly a pokrýva všetky potrebné oblasti - dalo by sa povedať, že až prekračuje. V rámci uvedených publikácií možno nájsť mnoho významných konferenčných, ale aj časopiseckých publikácií v rôznych databázach (aj v CCC).

Na základe tohto možno konštatovať, že jadro práce bolo autorom publikované veľmi dobre.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Predložená práca je z hľadiska súčasného stavu v danej oblasti vysoko aktuálna, zároveň prináša nové poznatky do problematiky bezdrôtového prenosu el. energie a splňa všetky znaky samostatnej tvorivej vedeckej práce.

Na základe predložených výsledkov odporúčam predloženú prácu kuk obhajobe a po úspešnej obhajobe dizertačnej práce navrhujem udelenie akademického titulu philosophiae doctor (Ph.D).

Ku práci mám nasledovné otázky:

- Je možné aplikovať na simulačný model (kap. 4.5, obr. 33 vľavo hore) napríklad softštart, aby boli potlačené nežiadúce javy pri štarte systému? (prípadne je možné uplatniť iný zásah do štartu systému?)
- Ako by sa zmenili vlastnosti riešeného WPT systému, ak by ste použili kompenzačný kondenzátor vlastnej konštrukcie?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

Datum

Date

02.05.2022

Podpis oponenta:

Signature of opponent

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 05.05.2022

ZCU 012545/2022

listy: 4

přílohy:

druh:



zcupes14f fae4