

Vlivy usměrňovače na bezdrátový přenos elektrické energie

Pracoviště: FEL/RICE
Číslo dokumentu: 22190-010-2022
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: M. Zavřel, V. Kindl, P. Drábek, M. Tyrpekl
Vedoucí projektu: Z. Peroutka
Počet stran: 17
Datum vydání: 12.4.2022
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:
Interní výzkum

Zpracovatel / dodavatel:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň
Kontaktní osoba:
Ing. Martin Zavřel
zavrelm@fel.zcu.cz

Tento příspěvek vznikl s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu OP VVV Elektrotechnické technologie s vysokým podílem vestavěné inteligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0009855 a za podpory projektu SGS-2021-021 Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích IV.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá definováním vzájemného vlivu mezi diodovým můstkovým usměrňovačem a vazebnými elementy bezdrátového přenosu elektrické energie. Předně pak impedančním převodem mezi střídavou a stejnosměrnou stranou zmíněného usměrňovače.

Klíčová slova

Bezdrátová nabíjecí stanice, Bezdrátový přenos elektrické energie, usměrňovač, impedanční přizpůsobení

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Rectifier Influences on Wireless Power Transfer

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with mutual influence of diode H-bridge rectifier and wireless power transfer coupling elements. Generally, by impedance transfer between DC and AC rectifier side.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Wireless power charging station, Wireless power transfer, rectifier, impedance matching

Seznam symbolů a zkratk

WPT	wireless power charging
WPCS	wireless charging station
USM	usměřovač

Obsah

1	ÚVOD	4
2	TEORETICKÉ POZNATKY	5
2.1	ZÁKLADNÍ TOPOLOGIE VAZEBNÝCH ELEMENTŮ WPT	5
2.2	ODVOZENÉ TOPOLOGIE VAZEBNÝCH ELEMENTŮ.....	6
2.3	SHRNUTÍ TOPOLOGIÍ VAZEBNÝCH ELEMENTŮ – SLEDOVANÉ PARAMETRY.....	7
3	VERIFIKAČNÍ VAZEBNÉ ELEMENTY.....	7
4	IMPEDANČNÍ PŘEVOD DIODOVÉHO USMĚRŇOVAČE	8
5	SPOJENÍ USMĚRŇOVAČE VAZEBNÝCH ELEMENTŮ WPT	11
6	ZÁVĚR	16

Úvod

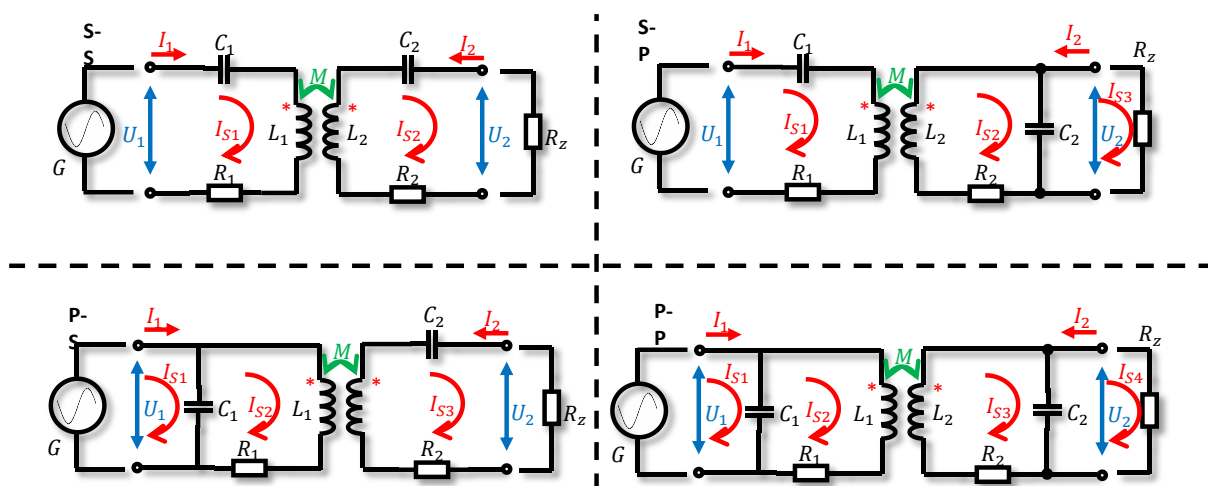
Systémy bezdrátového přenosu elektrické energie využívají střídavou induktivní rezonanční vazbu [1-3]. Pro potřeby běžných aplikací je však zapotřebí stejnosměrný výstup, aby výstup zdroje či nabíjecí stanice [1-3]. Jako mezičlánek je tedy zapotřebí použít usměrňovač [1-3], který do systému zanáší, mimo jiného, impedanční převod mezi střídavou a stejnosměrnou stranou, čímž dochází ke změně optimálního nastavení pracovního bodu bezdrátového přenosu elektrické energie.

Tato výzkumná zpráva se zabývá stanovením impedančního převodu diodového můstkového usměrňovače ve spojení s bezdrátovým přenosem elektrické energie a vzájemným vlivem přenosu a usměrňovače.

1 Teoretické poznatky

1.1 Základní topologie vazebných elementů WPT

Budeme-li uvažovat induktivní rezonanční vazbu, coby fyzikálně nejvhodnější princip bezdrátového přenosu elektrické energie [1-3], pak máme k dispozici čtyři základní topologie (Obr. 1): sérově-sériovou (S-S), sériově-paralelní (S-P), paralelně-sériovou (P-S) a paralelně-paralelní (P-P).



Obr. 1 Základní topologie induktivní rezonanční vazby

Na základě matematického popisu [1-3] a obvodového uspořádání jednotlivých prvků (L , C , R a M) v obvodech z Obr. 1 lze definovat základní charakterové rysy uvedené v Tab. I, z nichž lze zúžit jejich výběr dle jejich aplikační vhodnosti takto: konfigurace sériové na vstupu (S-S a S-P), které jsou vhodné pro výkonové aplikace, přičemž konfigurace sériově-sériová je tou nejvhodnější.

Porovnáme-li uvedené charakterové rysy, pak lze oddělit aplikační oblast S-S a S-P konfigurace takto: S-S konfigurace je pro malé zátěžné odpory vhodná pro přímé nabíjení baterií či bateriových systémů a S-P konfigurace je pro velké zátěžné odpory vhodná pro napájení ostatních aplikací s přímým odběrem. Hlavní rozdíl z pohledu zátěže zde tvoří charakter výstupu patřičné konfigurace, tedy napěťový (S-P) či proudový (S-S).

Tab. I Základní vlastnosti základních topologií induktivní rezonanční vazby.

	S-S	S-P	P-S	P-P
R_z pro velké výkony	malé	velké	malé	velké
R_z pro vysokou účinnost	malé	velké	malé	velké
vysoká účinnost	ano	střední	ne	ne
velký přenášený výkon	velký	střední	malý	malý
překryv P_{max} a η_{max}	ne	ne	částečný	částečný
typ zdroje	proudový	napěťový	napěťový	proudový

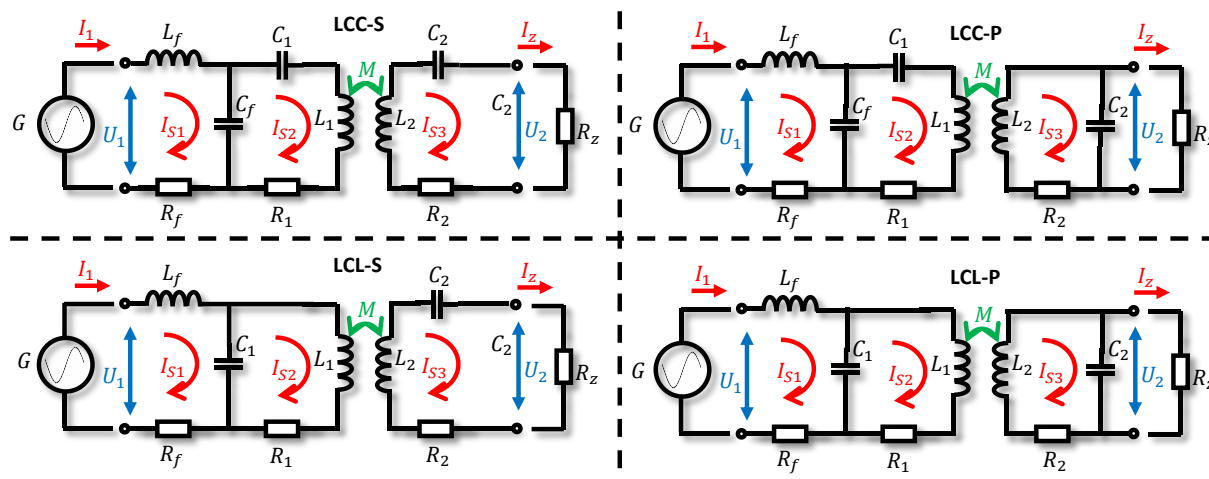
Hlavním sledovaným parametrem je v tomto případě optimální zátěžný odpor, který se pro S-S konfiguraci stanoví rov. 1 a pro S-P konfiguraci rov. 2. Současně je na základě údajů z Tab. I možné vyloučit konfigurace paralelní na vstupu z vhodných pro výkonové aplikace.

$$R_{Z-opt}|_{S-S} = M \omega \quad \text{rov. 1}$$

$$R_{Z-opt}|_{S-P} = \frac{\sqrt{R_1 R_2^2 + \omega^2 (L_2^2 R_1 + M^2 R_2)}}{\sqrt{R_2 (R_1 R_2 + M^2 \omega^2)}} \quad \text{rov. 2}$$

1.2 Odvozené topologie vazebných elementů

Krom základních topologií existují také odvozené topologie v podobě Obr. 2 jako LCC-S [4], LCC-P [5], LCL-S [6] a LCL-P [7]. Hlavní výhodou odvozených topologií je především odolnost před náhlým odvazbením [1-6]. Vlastnosti odvozených topologií lze do značné míry ztotožnit s vlastnostmi topologií základních pomocí [1-3, 4-7] Tab. II. Současně je na základě údajů z Tab. II možné vyloučit konfigurace LCL-X z vhodných pro výkonové aplikace.



Obr. 2 Odvozené topologie induktivní rezonanční vazby WPT

Tab. II Základní vlastnosti odvozených topologií induktivní rezonanční vazby.

	LCC-P	LCL-P	LCC-S	LCL-S
R_z pro velké výkony	malý	malý	velký	velký
R_z pro vysokou účinnost	malý	malý	velký	velký
Vysoká účinnost	ano	ne	ano	ne
Velký přenášený výkon	ano	ne	ano	ne
překryv P_{max} a η_{max}	ne	částečný	ne	částečný
typ zdroje	proudový	proudový	napěťový	napěťový

Z následujících rov. 3-4 je možné stanovit velikost optimálního zátěžného odporu uvažovaných odvozených topologií LCC-X.

$$R_{Z-opt}|_{XXX-P} = \omega L_2 \quad \text{rov. 3} \quad R_{Z-opt}|_{R_F=0}|_{XXX-S} = R_2 \sqrt{1 + \frac{k^2 L_1 L_2 \omega^2}{R_1 R_2}} \quad \text{rov. 4}$$

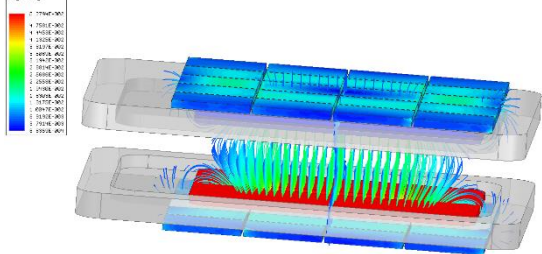
1.3 Shrnutí topologií vazebných elementů – sledované parametry

Shrneme-li charakter výstupu jednotlivých konfigurací vazebných elementů a jejich optimální zátěžný odpor, pak dospějeme k Tab. III, jejíž rozšíření tvoří Tab. IV vpravo coby verifikační příklad.

Tab. III Základní vlastnosti uvažovaných topologií

konfigurace	R_{Z-opt}	typ zdroje
S-S	malý	proudový
LCC-P	malý	proudový
S-P	velký	napěťový
LCC-S	velký	napěťový

2 Verifikační vazebné elementy

	
Obr. 3 vazebné elementy WPT - fotografie	Obr. 4 vazebné elementy WPT – model magnetické indukce

Tab. IV Verifikační vazebné elementy – vlevo: parametry, vpravo: R_{Z-opt}

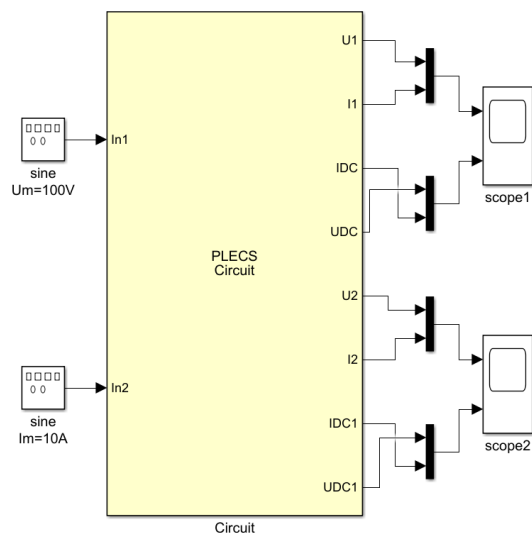
parametr	velikost	konfigurace	$R_{Z-opt} [\Omega]$
k	0.2	S-S	16,58
R_1, R_2	0.2 Ω	S-P	82,93
L_1, L_2	22 μH	LCX-S	82,94
f	600 kHz	LCX-P	16,59
ω	3,77 Mrads ⁻¹		

3 Impedanční převod diodového usměrňovače

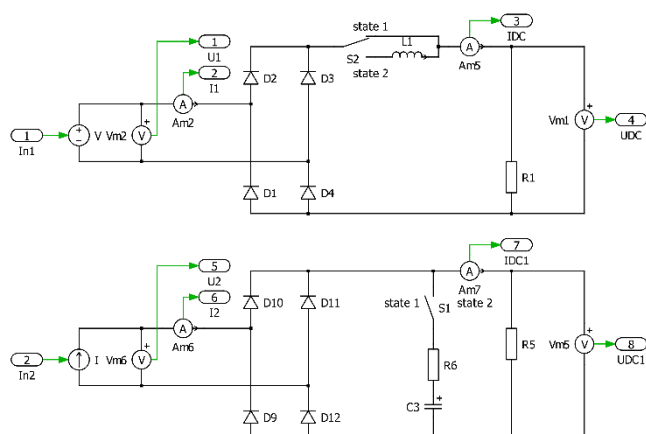
Diodový usměrňovač v jednofázovém můstkovém provedení, z principu své činnosti, vykazuje prostřednictvím svého přenosu (rov. 5) impedanční převod. Proměnná U_0 reprezentuje napětí na stejnosměrné zátěži usměrňovače.

$$F_{usm} = \frac{v_{\text{výstup}}}{v_{\text{vstup}}} = \frac{U_0}{v_{\text{vstup}}}; v_{\text{vstup}} = \begin{cases} U_2 \Leftrightarrow \text{typ zdroje} - \text{napěťový} \\ I_2 \Leftrightarrow \text{typ zdroje} - \text{proudový} \end{cases} \quad \text{rov. 5}$$

Model systému z rov. 5 je sestaven v prostředí Simulink (Obr. 5) a PLECS (Obr. 6) ve dvou možných modifikacích (spínač S_1 a S_2) – s a bez výstupního filtru. Oba obrázky ve své horní polovině zachycují simulaci při napěťovém charakteru zdroje (rov. 6) při $U_m = 100$ V a ve své spodní polovině pak pro proudový charakter zdroje (rov. 7) při $I_m = 10$ A. Průběh u_2 či i_2 je uvažován sinusový o frekvenci 85 kHz.



Obr. 5 Model v Simulinku



Obr. 6 Model v PLECU

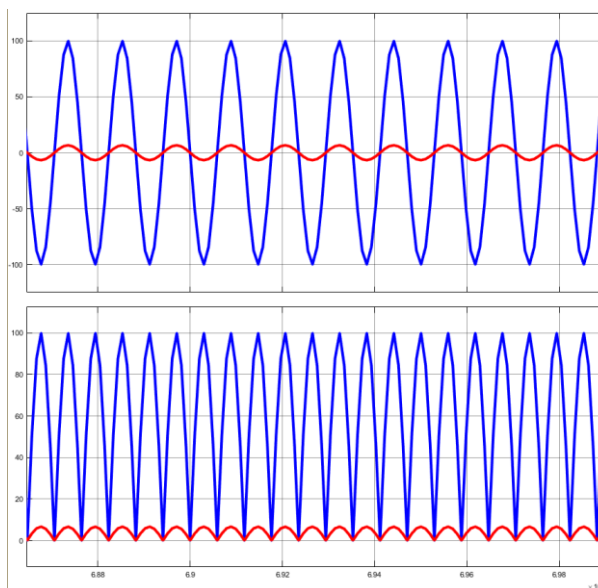
V případě vyřazení příslušných filtrů (S_1 a S_2 v poloze dle Obr. 6) jsou typické průběhy na usměrňovači dány Obr. 7 pro případ napěťového zdroje a Obr. 8 pro případ proudového zdroje. Stejnosměrný zátěžný odpor R_0 byl vždy nastaven na 15Ω .

Průběhy na vstupu usměrňovače odpovídají plně vykompenzovanému střídavému systému při nepřerušovaném stejnosměrném proudu. Výstupní průběhy jsou pak nefiltrované a s impedančním převodem korespondují se vstupními průběhy. Pro případ napěťového zdroje vstupuje v platnost rov. 8 a pro případ proudového zdroje rov. 9, čímž je možné stanovit střední hodnotu dominantní veličiny na výstupu usměrňovače.

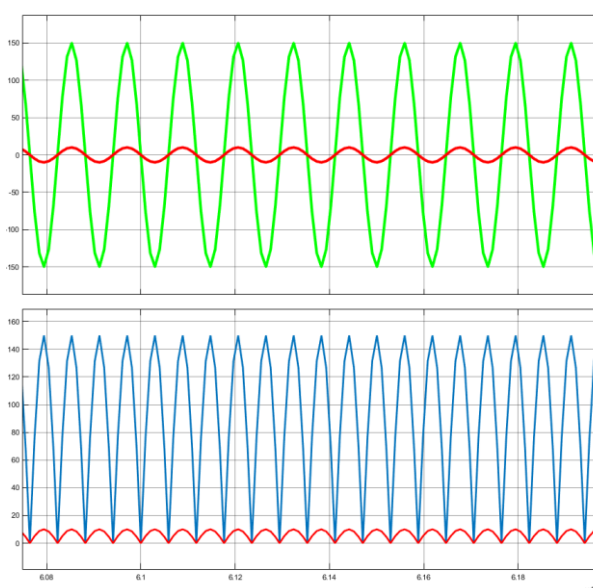
Úplnou situaci a platnost rov. 8 a rov. 9 dokazuje simulace s použitím filtrů, jejíž výsledky zachycuje Obr. 9 a Obr. 10. Aplikací filtrů dojde ke změně průběhu nedominantní vstupní veličiny na obdélníkový tvar (stále pro nepřerušovaný stejnosměrný proud) o amplitudě dané převodem usměrňovače a zátěží. Výstupní veličiny jsou pak ideálně nezvlněné, přičemž

hodnota dominantní veličiny je dána rov. 8, 10, 12 pro napěťový zdroj a rov. 9, 11, 13 pro proudový zdroj. Hodnota druhé veličiny je dána ohmovým zákonem.

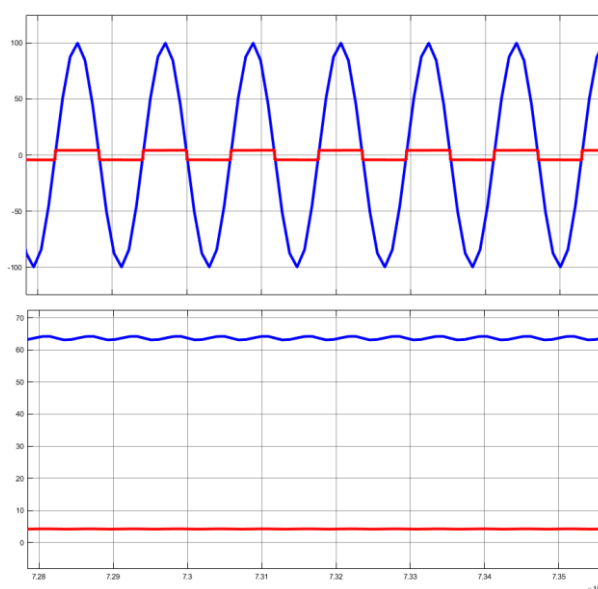
Do uvedených výpočtů jsou dosazovány uvedené parametry simulace...



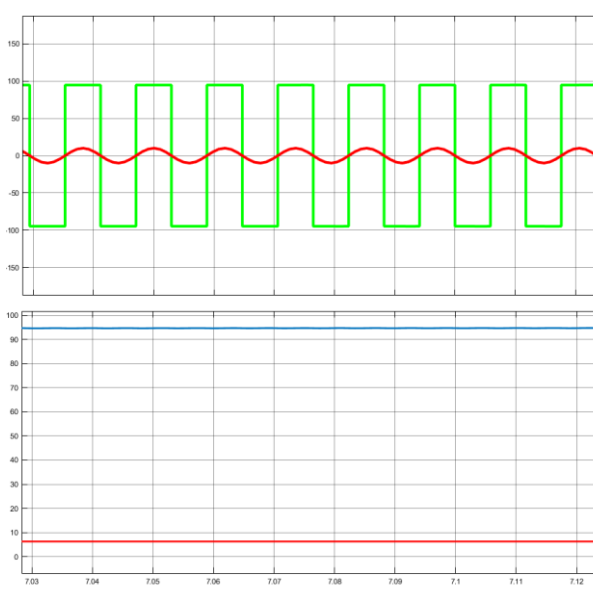
Obr. 7 Simulované průběhy usměrňovače bez filtru při napěťovém zdroji. Nahoře - vstup, dole - výstup ; modrá – napětí, červená – proud



Obr. 8 Simulované průběhy usměrňovače bez filtru při proudovém zdroji. Nahoře - vstup, dole - výstup ; modrá – napětí, červená – proud



Obr. 9 Simulované průběhy usměrňovače s filtrem při napěťovém zdroji. Nahoře - vstup, dole - výstup ; modrá – napětí, červená – proud



Obr. 10 Simulované průběhy usměrňovače s filtrem při proudovém zdroji. Nahoře - vstup, dole - výstup ; modrá – napětí, červená – proud

$$U_{2(t)} = U_m \sin(\omega t); U_m = 100 \text{ V} \quad \text{rov. 6} \quad I_{2(t)} = I_m \sin(\omega t); I_m = 10 \text{ A} \quad \text{rov. 7}$$

$$U_{0 \text{ stř}} = \frac{U_m}{T} \int_0^T \sin(\omega t) dt \quad \text{rov. 8} \quad I_{0 \text{ stř}} = \frac{I_m}{T} \int_0^T \sin(\omega t) dt \quad \text{rov. 9}$$

$$U_{0 \text{ stř}} = 2f U_m \int_0^{\frac{1}{2f}} \sin(\omega t) dt \quad \text{rov. 10} \quad I_{0 \text{ stř}} = 2f I_m \int_0^{\frac{1}{2f}} \sin(\omega t) dt \quad \text{rov. 11}$$

$$U_{0 \text{ stř}} = U_m \frac{2}{\pi}; U_{0 \text{ stř}} = 63,7 \quad \text{rov. 12} \quad I_{0 \text{ stř}} = I_m \frac{2}{\pi}; I_{0 \text{ stř}} = 6,37 \quad \text{rov. 13}$$

Alternativní, více názorný, přístup ke stanovení impedančního převodu usměrňovače vychází z ekvivalence vstupního a výstupního výkonu při zanedbaných ztrátách. Do příslušně upravené rovnosti (rov. 14 pro napěťový a rov. 15 pro proudový zdroj) je možné dosadit stanovené střední hodnoty dominantní veličiny (rov. 16, 17) a postupnou úpravou vyjádřit samotný impedanční převod usměrňovače při napájení z napěťového (rov. 18, 20) či proudového (rov. 19, 21) zdroje.

$$\frac{U_{2 \text{ eff}}^2}{R_{AC}} = \frac{U_{0 \text{ stř}}^2}{R_0} \quad \text{rov. 14} \quad R_{AC} I_{2 \text{ eff}}^2 = R_0 I_{0 \text{ stř}}^2 \quad \text{rov. 15}$$

$$\frac{U_{2 \text{ eff}}^2}{R_{AC}} = \frac{\left(\frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_{2 \text{ eff}}\right)^2}{R_0} \quad \text{rov. 16} \quad R_{AC} I_{2 \text{ eff}}^2 = R_0 \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_{2 \text{ eff}}\right)^2 \quad \text{rov. 17}$$

$$\frac{U_{2 \text{ eff}}^2}{R_{AC}} = \frac{8}{R_0 \pi^2} U_{2 \text{ eff}}^2 \quad \text{rov. 18} \quad R_{AC} I_{2 \text{ eff}}^2 = R_0 \frac{8}{\pi^2} I_{2 \text{ eff}}^2 \quad \text{rov. 19}$$

$$R_{AC} = \frac{\pi^2}{8} R_0 = 1,2337 R_0 \quad \text{rov. 20} \quad R_{AC} = \frac{8}{\pi^2} R_0 = 0,8106 R_0 \quad \text{rov. 21}$$

Je tedy dáno, že diodový můstkový usměrňovač při napájení ze zdroje napětí stejnosměrný odpor na stranu střídavou 1,23 krát zvětšuje a při napájení z proudového typu zdroje naopak 0,81 krát zmenšuje. Toto je velmi důležitý závěr pro dimenzování a práci se systémy WPT a WPCS, jak je dále popisováno.

4 Spojení usměrňovače vazebných elementů WPT

Spojením usměrňovače a vazebných elementů, respektive usměrňovače a přijímacího vazebného elementu, vznikne systém bezdrátového přenosu elektrické energie se stejnosměrným výstupem. To je téměř vždy vyžadováno [1-3], avšak současně doprovázeno vzájemným ovlivňováním se usměrňovače a přenosu.

Zaměříme-li se na základní topologie s odlišným typem výstupu, tedy například na SS a SP konfiguraci, tak můžeme vcelku názorně popsat vzájemné ovlivňování se přenosu a usměrňovače. Vztah pro výpočet kompenzačních kapacity SS konfigurace s parametry dle Tab. IV uvádí rov. 22. Rov. 23-24 pak definují kompenzační kapacity SP konfigurace. Zde je současně patrný vztah mezi velikostí zátěžného odporu R_z a kompenzační kapacitou C_1 . Tato závislost však znemožňuje jednoduché porovnání konfigurace na výstupu proudové (SS) a napěťové (SP). Z tohoto důvodu je dále uvažována zjednodušující náhrada SP konfigurace.

$$C_1 = C_2 = C = \frac{1}{\omega^2 L} ; L = L_1 = L_2 \quad \text{rov. 22} \qquad C_2 = \frac{1}{\omega^2 L} ; L = L_1 = L_2 \quad \text{rov. 23}$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L} - \frac{k^2 \omega^4 L^4}{\omega^2 L [\omega^4 L (k^2 - 1) - \omega^2 L^2 R (R + 2R_z) - R^2 R_z^2]} \quad \text{rov. 24}$$

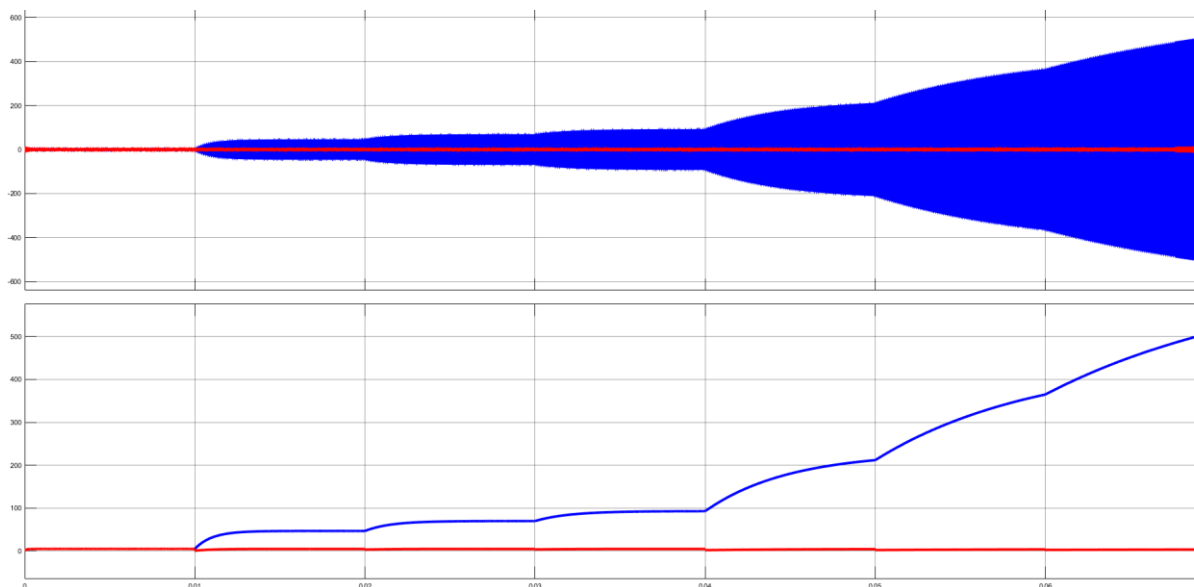
Náhradu SP konfigurace může představovat libovonný induktivně vázaný obvod pracující v rezonanci, který na výstupu vykazuje napěťový charakter [2-3] a současně je nezávislý na R_z . Jedna z možností je úprava kompenzace SS konfigurace, kdy je kompenzována čistě rozptylová indukčnost (rov. 26). Rozptylová indukčnost (rov. 27) je pak závislá pouze na činiteli vazby, který je, pro účely tohoto srovnání, konstantní. Pro daný systém s parametry dle Tab. IV platí pro napěťový výstup rov. 26-27 s hodnotou kompenzačních kapacit dle rov. 29. Pro proudový výstup pak platí rov. 25 s hodnotou kompenzačních kapacit dle rov. 28.

$$C_1 = C_2 = C = \frac{1}{\omega^2 L} ; L = L_1 = L_2 \quad \text{rov. 25} \qquad C_1 = C_2 = C = \frac{1}{\omega^2 L_r} \quad \text{rov. 26}$$

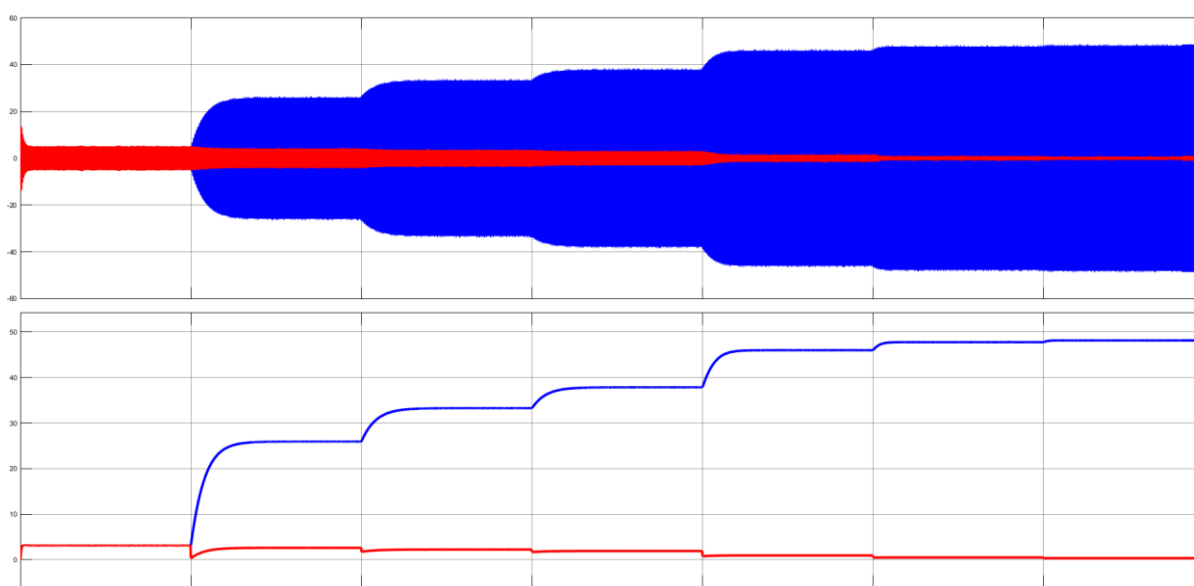
$$L_r = L - M = L(1 - k); L = L_1 = L_2 \quad \text{rov. 27}$$

$$C = 3,0592 \text{ nF} \quad \text{rov. 28} \qquad C = 3,8240 \text{ nF} \quad \text{rov. 29}$$

Vzniklé obvody jsou ilustrovány v podobě simulačních schémat na Obr. 11. Simulace jsou prováděny v prostředí Simulink a Plecs. Na Obr. 11 je zřejmé vykreslení simulovaných průběhů, propojení s Plecs silovým obvodem a zadávání R_{zDC} (1, 10, 15, 20, 50, 100, 150 Ω). Nastavení napájecího napětí vysílacího vazebného elementu je patrné z Obr. 12 (obdélníkové napětí o amplitudě 100 V a frekvenci 600 kHz).

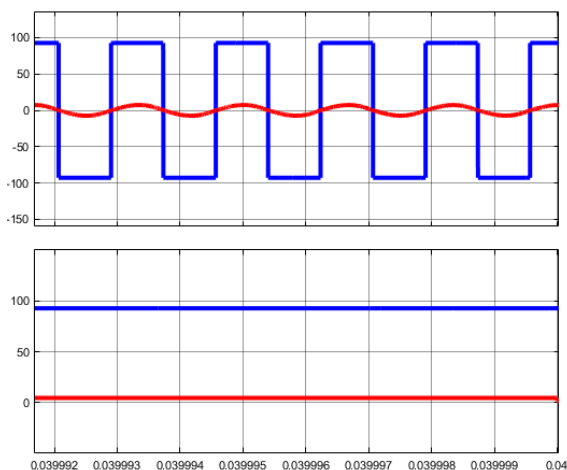


Obr. 13 Výsledky simulace WPT s usměrňovačem - proudový výstup

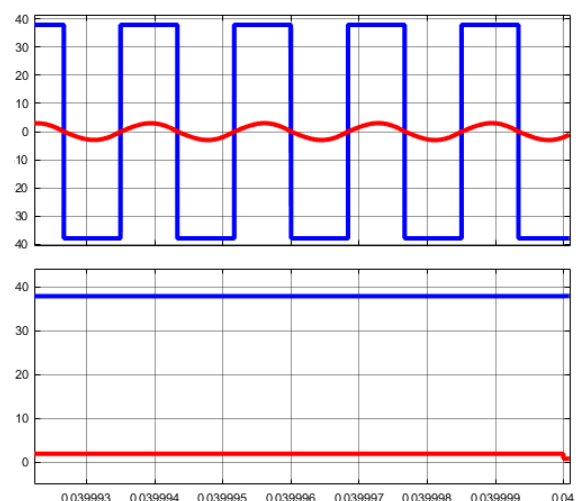


Obr. 14 Výsledky simulace WPT s usměrňovačem - napěťový výstup

Dalším zkoumáním obvodových veličin je možné objasnit samotný vliv usměrňovače. Na Obr. 15 – 16 jsou vyobrazeny detaily proudového a napěťového výstupu při $R_{z\ DC}=20\ \Omega$, odkud je v obou případech patrný sinusový proud $i_{2(t)}$, coby vstupní veličina usměrňovače. Rov. 21 je tak platná pro proudový i napěťový výstup bezdrátového přenosu elektrické energie, jelikož vstupní veličinou je vždy „indukovaný“ sinusový proud vysokojakostního rezonančního obvodu vazebných elementů [1-7].

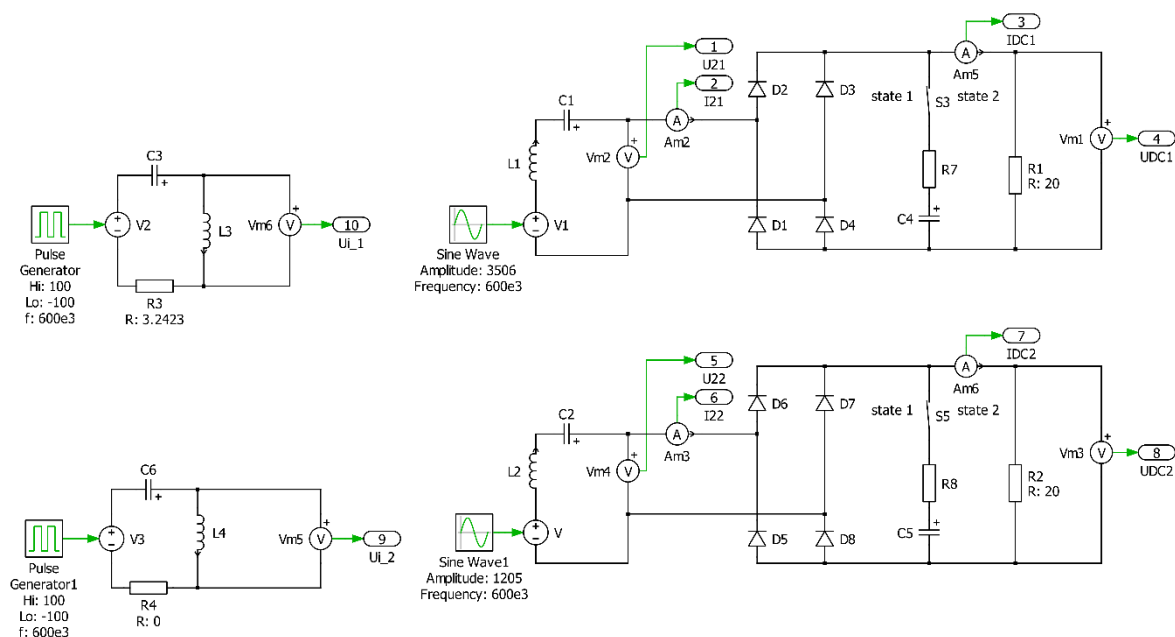


Obr. 15 Výsledky simulace WPT
s usměrňovačem – proudový výstup, detail



Obr. 16 Výsledky simulace WPT
s usměrňovačem – napěťový výstup, detail

Obvodem z Obr. 17 lze blíže popsat chování přijímacího vazebného elementu, kdy jde o rezonanční obvod buzený indukovaným napětím (uprostřed) přes magnetickou vazbu z vysílacího vazebného elementu (vlevo). Další část obvodu – usměrňovač a zátěž, je totožná s Obr. 12 při zátěži $20\ \Omega$ (vpravo).



Obr. 17 Simulační schéma WPT s usměrňovačem - náhrada

Nastavení odporu sériové rezonance LRC je pro proudový výstup dáno rov. 30 a pro napěťový výstup rov. 31. Výstupem simulace odděleného vysílacího obvodu je napětí na indukčnosti, které je s transformačním poměrem $p=1$ indukované do přijímací indukčnosti. Indukované napětí je sinusové, neboť vysílacím obvodem může, díky frekvenční selektivitě, procházet výhradně první harmonická proudu.

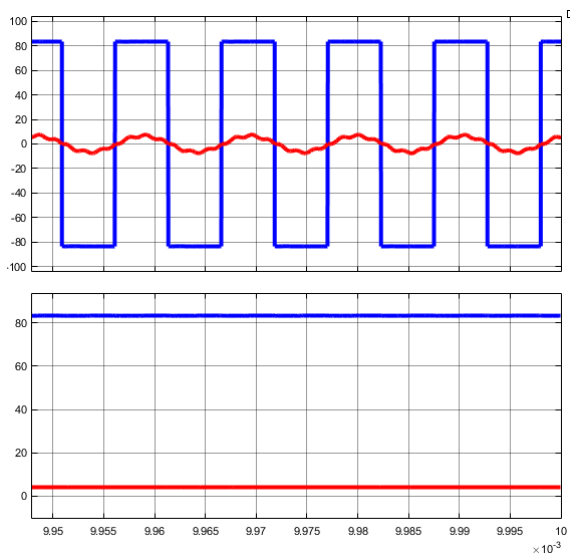
$$R_s = \frac{8}{\pi^2} k R_{zDC}$$

rov. 30

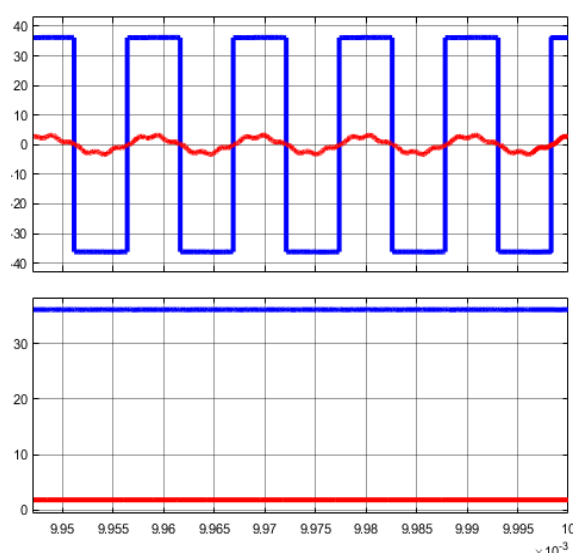
$$R_s \rightarrow 0$$

rov. 31

Z Obr. 18 -19 je patrná výborná shoda simulovaných průběhů u_2 , i_2 a U_0 , I_0 se stejnými průběhy získanými simulací s magneticky vázaným obvodem dle Obr. 12.

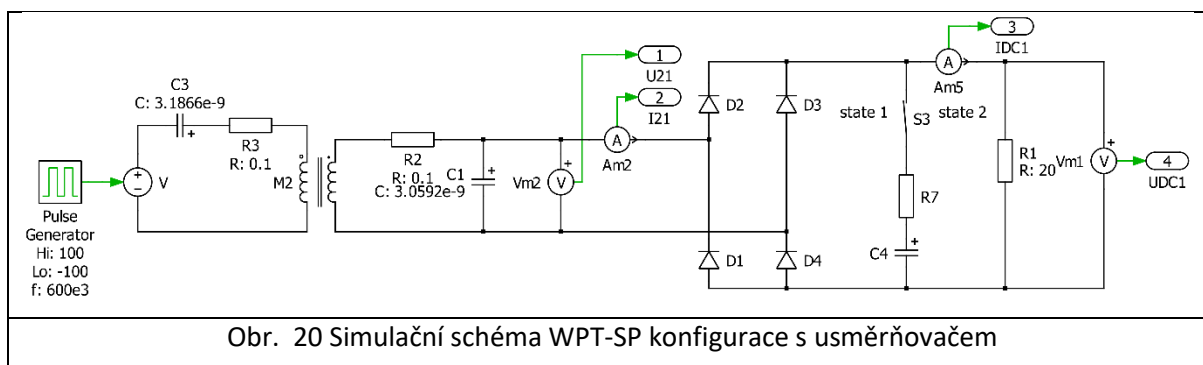


Obr. 18 Výsledky simulace dle Obr. 17 – proudový výstup

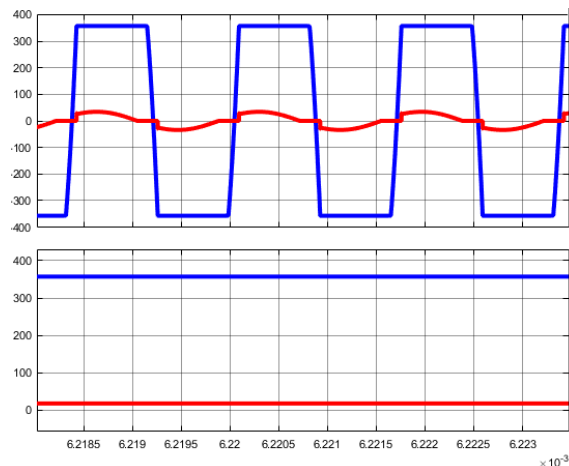


Obr. 19 Výsledky simulace dle Obr. 17 – napěťový výstup

Poslední část rozboru chování WPT s usměrňovačem uvádí již jen simulaci SP konfigurace (Obr. 20) pro $R_{zDC} = 20 \Omega$ s dopočtenými kompenzačními kondenzátory dle rov. 23-24. Pro prezentovaný příklad se $C_2 = 3,0592 \text{ nF}$ a $C_1 = 3,1866 \text{ nF}$. Výsledky simulace zachybuje Obr. 21, okut je patrný shodný charakter zdroje pro usměrňovač, jako v případě SS konfigurace v podobě napěťového i proudového zdroje na výstupu.



Obr. 20 Simulační schéma WPT-SP konfigurace s usměrňovačem



Obr. 21 Výsledky simulace WPT-SP konfigurace s usměrňovačem

5 Závěr

Impedanční převod usměrňovače je dán charakterem zdroje elektrické energie na jeho vstupních svorkách, tedy, je-li zdroj napěťový, nebo proudový tvrdý. Omezíme-li se na sinusové zdroje, pak můžeme předchozí tvrzení opsat tak, že záleží, je-li usměrňovač na vstupních svorkách vnucen sinusový proběh napětí nebo proudu. Druhá veličina je pak dána stejnosměrným filtrem usměrňovače (LC filtr) a nabývá tak obdélníkového charakteru. Pro hlavní veličinu je pak impedanční převod dán jako $Z_{AC} = \frac{8}{\pi^2} Z_{DC}$.

V teorii bezdrátového přenosu elektrické energie, respektive v teorii vazebných elementů, je však definice napěťového a proudového zdroje odlišná. Vazebnými elementy napěťovými na výstupu nazýváme takové, jenž při změně zátěžného odporu nemění velikost amplitudy napětí na svorkách přijímacího vazebného elementu. Současně musejí být splněny podmínky dané topologie vazebných elementů, jako je optimální zátěžný odpor apod.

Pro úplnost je nutné definovat také vazebné elementy proudové na výstupu a to tak, že jde o vazebné elementy, které při změně zátěžného odporu nemění proud na výstupních svorkách.

Cílem této studie je vymezit vztah mezi vazebnými elementy, usměrňovačem a stejnosměrnou zátěží.

Z rozboru vazebných elementů, které se používají v induktivní rezonanční vazbě, vychází díky frekvenční selektivitě vysílacího vazebného elementu, k indukování sinusového napětí do přijímací vazebné indukčnosti, čímž je v přijímacím vazebném elementu generován sinusový proud tak, aby byl velikostně stejný s budícím proudem (pro $p = 1$). Induktivní rezonanční vazba v libovolné topologii, či odvozené topologii je tak zdrojem tvrdého sinusového proudu.

Z uvedeného vyplývá, že charakter výstupu bezdrátového přenosu elektrické energie nikterak neovlivňuje charakter zdroje pro usměrňovač a impedanční převod je ve všech případech $Z_{AC} = \frac{8}{\pi^2} Z_{DC}$. Aby toto tvrzení bylo zcela korektní, je nutné poznamenat jistá obvodová zjednodušení, jako například použití ideálních diod či prvků vazebných elementů.

Literatura

- [1] V. Kindl a spol., Alternativní topologie usměrňovače pro systémy WPT s nízkou ekvivalentní zátěží, Výzkumná zpráva ZČU/FEL – 22190-xxx-2021, ZČU v Plzni, 2021,
- [2] V. Kindl, Problematika systémů bezdrátového přenosu energie – Habilitační práce, ZČU/FEL, ZČU v Plzni 2017
- [3] KINDL, V. ., FRIVALDSKÝ, M. ., ZAVŘEL, M. ., PAVELEK, M. . Generalized design approach on industrial wireless chargers. Energies, 2020, roč. 13, č. 11, s. 1-16. ISSN: 1996-1073
- [4] V. Kindl s spol., Návrh vazebných prvků pro bezdrátové napájení senzoriky rotačních strojů v kompenzační topologii LCC-S, Výzkumná zpráva ZČU/FEL – 22190-039-2021, ZČU v Plzni 2021.
- [5] V. Kindl s spol., Návrh vazebných prvků pro bezdrátové napájení senzoriky rotačních strojů v kompenzační topologii LCC-P, Výzkumná zpráva ZČU/FEL – 22190-xxx-2021, ZČU v Plzni 2021.
- [6] Xxx- LCL-S-xxx
- [7] V. Kindl s spol., Návrh vazebných prvků pro bezdrátové nabíjení ručního nářadí v kompenzační topologii LCL-P, Výzkumná zpráva ZČU/FEL – 2210-xxx-2022, ZČU v Plzni.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	12.4.2022	M. Zavřel