

Návrh a realizace kompenzačního kondenzátoru bezdrátového přenosu energie s rezonanční vazbou

Martin Zavřel

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta Elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

zavreln@kev.zcu.cz

Design and Realization of Compensating Capacitor of Wireless Power Transfer with Resonant Couple

Abstract – In this paper is described compensating capacitor for series-series wireless power transfer system. Description is focused on important capacitors parameters and on precision design of capacitor. The design is done in plate-capacitor topology with emphasis on high capacity density, high applicable voltage and low parasites. The mechanical construction and capacitor fabrication is also involved in this paper.

Keywords – Capacitor; Design; Fabrication; Plate; Wireless Power Transfer

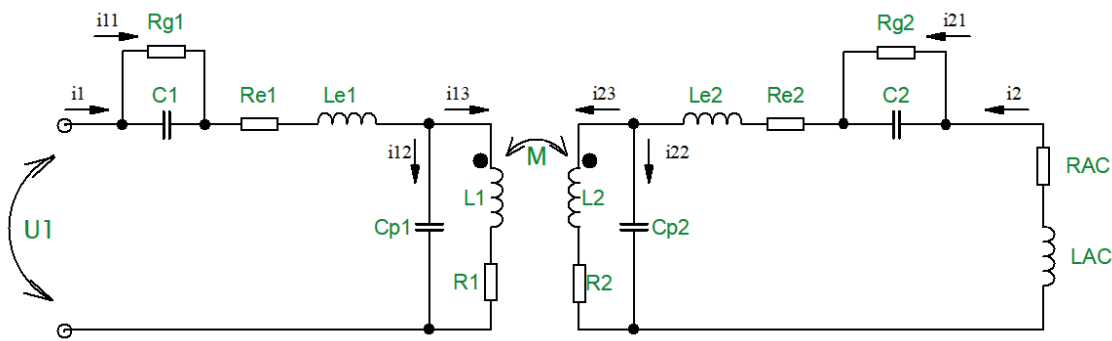
I. ÚVOD

Během posledních několika let se mezi odbornou i laickou společností rozšiřuje povědomí o bezdrátovém přenosu energie [1-2]. Tato technologie tak v posledních letech zaznamenává značný rozkvět a to nejen v oblasti spotřební elektroniky ale i v oblasti výkonové elektrotechniky. Přenášené výkony jsou tedy od jednotek watt do desítek kilowatt. Pokud se zaměříme na aplikaci bezdrátového přenosu výkonu v elektro-mobilitě, získáme velmi úzce vymezenou topologii: sério-sériovou induktivně rezonanční vazbu [2-3], která je používána mnohými vývojáři a komerčně dostupnými bezdrátovými nabíječkami elektromobilů.

Výhody bezdrátového přenosu výkonu jsou vcelku jasné a nesporné. Oproti tomu je však nutné se také zabývat nevýhodami. Se sério-sériovou konfigurací úzce souvisí problematika vysokého napětí na kompenzačních kondenzátorech induktivní rezonanční vazby [2-3]. Vysokonapěťový kondenzátor se tak stává velkou překážkou, kterou je nutné řešit. Jedna z možností je využití dostupných kondenzátorů například od společnosti Vishay. Další možnost spočívá ve vlastní konstrukci kondenzátoru požadovaných parametrů.

II. STANOVENÍ PARAMETRŮ KONDENZÁTORU

Požadované parametry kompenzačního kondenzátoru vychází z přenášeného výkonu a obvodových parametrů bezdrátového přenosu výkonu. Obrázek I. uvádí obvodové schéma bezdrátového přenosu výkonu s přenášeným výkonem 5 kW, pro který je dále popisovaný kondenzátor navrhován. Zde je ještě nutné uvést, že systém je navrhován symetricky, což znamená, že vysílací (primární) a přijímací (sekundární) element je zcela shodný (geometricky i parametry el. součástí).



Obrázek I. Úplné obvodové schéma sério-sériové induktivně rezonanční vazby

Primární kompenzační kondenzátor je respektován prvky C_1 (hlavní kapacita), R_{g1} (paralelní svod-G), R_{e1} (sériová odpor - ESR) (1), L_{e1} (sériová indukčnost ESL) (2). Sekundární kondenzátor je pak analogicky tvořen prvky C_2 , R_{g2} , R_{e2} , L_{e2} . Parametry R_g , R_e , L_e jsou parazitní a jejich velikosti je tedy třeba minimalizovat. Parametry C jsou pak těmi hlavní. Jejich velikost je dána Thomsonovým vztahem (3). Hlavní vazební indukčnosti představuje L_1 a L_2 se svým parazitním sériovým odporem R_1, R_2 a paralelní kapacitou C_{p1} , C_{p2} . prvky R_{AC} a L_{AC} představují zátěž bezdrátového přenosu (R_Z).

$$R_e = D \cdot X_C = \frac{X_C}{Q}, \quad (1)$$

kde D je měřitelná elektrická indukce, Q je měřitelný náboj na kondenzátoru.

$$L_e = \frac{X_L}{\omega} = \frac{\sqrt{Z^2 - R_e^2} + X_C}{\omega}, \quad (2)$$

kde Z je měřitelná impedance kondenzátoru a X_C jeho kapacitance.

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}, \quad (3)$$

kde f_0 představuje hlavní rezonanční kmitočet sério-sériové kompenzace bezdrátového přenosu výkonu. Tento kmitočet je stanoven předpisem SAE TIR J2954 na 85 kHz. Poslední nutný parametr pro stanovení C je hlavní vazební indukčnost L . Velikost L je dána složitým procesem elektro-mechanického návrhu, který zohledňuje zástavbové rozměry, přenosovou vzdálenost, přenášený výkon, studii E-M pole, účinnost atd. V našem případě je $L=145 \mu\text{H}$. Jednovrstvá indukčnost je tvořena 22 čtvercovými závitů o rozměrech 50·50 cm. Dosazením uvedených parametrů do (3) dostáváme $C=24,18 \text{ nF}$.

Jak bylo řečeno, velmi kritickým parametrem kompenzačního kondenzátoru je napětí. Na základě Ohmova zákona je (například pro primární stranu) možné stanovit minimální potřebné konstrukční napětí kompenzačního kondenzátoru (4)

$$\bar{U}_{c1} = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{h=\infty} \left(\bar{I}_{1h} \frac{-j}{\omega_h C_1} \right), \quad (4)$$

kde k_{Uc} představuje bezpečnostní koeficient ($k_{Uc}>1$) a I_1 představuje primární proud. Jelikož je systém napájen z napěťového střídače s obdélníkovým výstupním napětím, je žádoucí řešit kritické parametry pro celé spektrum harmonických složek h . Stanovení primárního proudu také vychází z Ohmova zákona. Na základě řešení obvodu z Obrázku I. metodou smyčkových proudů je možné vyjádřit proudy (5), kde vzájemná indukčnost M respektuje induktivní vazbu, kterou je také možné popsat činitelem vazby K (6). Díky

tomu je možné řešit napětí na kompenzačním kondenzátoru pro různé přenosové vzdálenosti či vyosení vazebných cívek.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s1h} \\ \bar{I}_{s2h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega_h L_1 - \frac{j}{\omega_h C_1} & -j\omega_h M \\ -j\omega_h M & R_1 + R_z + j\omega_h L_2 - \frac{j}{\omega_h C_2} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \bar{U}_{1h} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L} \quad (6)$$

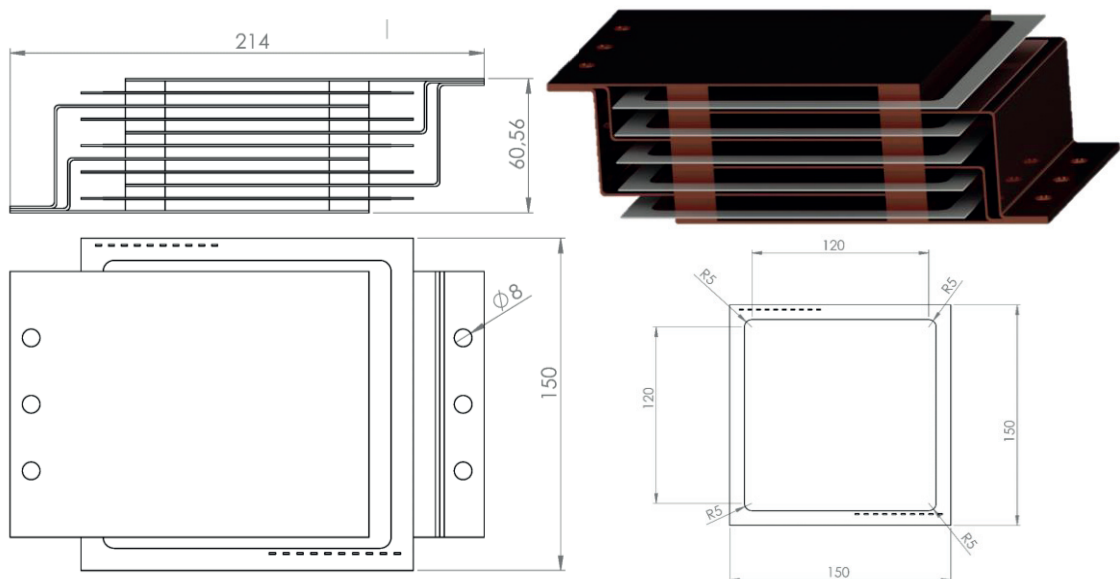
III. NÁVRH KOMPENZAČNÍHO KONDENZÁTORU

Na základě stanovených parametrů kompenzačního kondenzátoru jako je C , U_c a I_1 je možné přistoupit k vlastnímu návrhu. Zcela základní je volba deskové topologie kondenzátoru (7), která byla volena především s ohledem na realizovatelnost v dostupných podmínkách. Abychom dosáhli co nejvyšší kapacity při minimálních rozměrech S (plocha elektrody) a d (tloušťka dielektrika) je nutné zvolit kvalitní dielektrikum o co nevyšší ϵ_r (relativní permitivitě). Z pohledu minimalizace d a vysokého napětí U_c (až 10 kV) je třeba volit dielektrikum s co nejvyšší dielektrickou pevností (U_p).

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (7)$$

Po vhodné volbě dielektrika vyvstává další technologicky kritická záležitost a to spojení elektrod s dielektrikem. Abychom se této komplikaci vyhnuly, byl zvolen plošný spoj s keramicko-teflonovým dielektrikem s oboustranně nanesenou Cu fólií o parametrech: $d=600 \mu\text{m}$, $\epsilon_r=8,5$ a tloušťce měděné fólie $200 \mu\text{m}$, která splňuje požadavky plynoucí z proudu I_1 (až 40 A).

S ohledem na zástavbové rozměry, kompaktnost a kapacitu kompenzačního kondenzátoru byla snaha jej realizovat v podobě kvádru o půdorysných rozměrech $150 \cdot 214 \text{ mm}$ a výšce $60,56 \text{ mm}$. Aktivní plocha elektrody činní $130 \cdot 130 \text{ mm}$. Dosazením této plochy do vztahu (7) dostaneme kapacitu jedné vrstvy kondenzátoru $C_{1v}=2,12 \text{ nF}$. Pro sestavení kondenzátoru o potřebné kapacitě $C=24 \text{ nF}$ je tedy zapotřebí 2.5 paralelně řazených vrstev o C_{1v} (jeden kompaktní kondenzátor je sestaven z 5-ti vrstev).



Obrázek II. Výkres a model návrhu kompenzačního kondenzátoru

Obrázek II. zachycuje navrhnoutou a posléze realizovanou podobu kompenzačního kondenzátoru. V levé části Obrázku II. Je uveden ilustrační výkres, v pravé horní části je uveden úplný 3-D model a v pravé dolní části pak výkres jedné elektrody. Jak je z tohoto obrázku patrné, jednotlivé vrstvy kondenzátoru byly paralelně spojeny pomocí ohýbaných, plechových, měděných vývodnic o šířce 120 mm, které jsou s aktivní elektrodou spojené kvalitní měkkou pájkou v celé ploše. Tímto je zaručena minimalizace parazitního odporu a indukčnosti při velkém proudovém zatížení. Propojení je realizováno křížově, čímž je zaručeno symetrické rozdělení procházejícího proudu. Vhodná konstrukce spolu s tvarem motivu aktivní elektrody pak zaručuje vysokou odolnost proti plazivým výbojům. Zvolená mechanická konstrukce kondenzátoru navíc umožňuje proudění vzduchu mezi vrstvami a tím kvalitní a rovnoměrné chlazení.

IV. ZÁVĚR

Článek popisuje důležité aspekty pro výběr či návrh kompenzačního kondenzátoru séro-sériové induktivní rezonanční vazby bezdrátového přenosu výkonu. Především se zaměřuje na vysoké proudové a napěťové zatížení, minimální parazitní parametry a vysokou napěťovou zatížitelnost, což je popsáno jednoduchými rovnicemi.

S ohledem na nákladnost komerčně dostupných vysokonapěťových kondenzátorů je v článku uveden postup návrhu vlastního deskového kondenzátoru o kompaktních rozměrech 150-214-60,56 mm a kapacitě 10,5 nF. Navržený kondenzátor byl realizován popsáním způsobem a byly změřeny jeho parametry. Z porovnání v Tabulce I. Je zřejmý vynikající výsledek a vysoká kvalita návrhu a provedení.

TABULKA I. POROVNÁNÍ KONDENZÁTORŮ

kondenzátor	C [nF]	ESR [Ω]	ESL [mH]	U_p [kV]
Vishay	3,04	2,09	1,66	14
vyrobený	10,52	1,21	0,48	7
Výpčet	10,599			15

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III.

LITERATURA

- [1] D. H. Tran, V. B. Vu and W. Choi, "Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System With Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 175-187, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2662067.
- [2] M. Zavřel, V. Kindl, Comparison of Various Configuration of Wireless Power Transfer System, *Transactions on Electrical Engineering*, Vol. 7(2018), No. 2, ISSN 1805-3386.
- [3] M. Zavřel, P. Drábek, Základní měření na systému WPT, výzkumná zpráva RICE, 1.12.2016, n.o.: 43916484.