

Transferência capacitiva de potência sem contato elétrico

Wireless capacitive power transfer

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de transferência de potência sem contato elétrico utilizando o princípio de acoplamento capacitivo. A principal limitação desta tecnologia é a reduzida capacitância de acoplamento entre o circuito transmissor e receptor, limitando a capacidade de potência transferida. O sistema normalmente utilizado para compensar a elevada impedância apresentada pela reduzida capacitância de acoplamento é a inclusão de um indutor em série. Com isto, forma-se um circuito série ressonante sintonizado na frequência de comutação, minimizando a impedância de acoplamento. Entretanto, variações nas capacitâncias de acoplamento podem ocorrer devido ao posicionamento variável das suas placas. Neste trabalho foi proposto um sistema de compensação da impedância de acoplamento com a utilização de autotransformadores. O sistema proposto é imune as variações paramétricas e se mostrou mais eficiente do que o sistema convencional. As análises por simulação e experimental mostraram que o sistema proposto transfere uma potência dez vezes maior que o sistema convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de potência capacitiva. Circuitos ressonantes. Compensação de impedância.

ABSTRACT

A wireless capacitive Power transfer system is proposed in this work. The main limitation in this technology is the reduced coupled capacitance between the transmitter and the receiver, limiting the power transference. The usual solution for this problem is the inclusion of a series inductor tuned in the switching frequency, reducing the coupling inductance. However, parametric variations can occur due to the variable position of the capacitor plates. A new impedance matching system is proposed in this work using autotransformers. This system is immune to parametric variations and is more efficient than the conventional system. The simulation and experimental analysis show that the proposed system transfer ten times more power than the conventional system.

KEYWORDS: Capacitive power transfer. Resonant circuits. Impedance matching.

Daniel Bruce Lane
daniellane@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Roger Gules
rgules@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de transferência de potência sem contato elétrico (WPT – *Wireless Power Transfer*) permite desenvolver soluções para carga de baterias de dispositivos móveis de forma prática, flexível e segura (HUANG; HU; SWAIN; DAI, 2014). Também pode ser utilizada em aplicações onde não é possível o contato físico para a transferência de potência de forma convencional através de condutores elétricos. Com a crescente utilização de dispositivos móveis alimentados por baterias, a demanda pela utilização de sistemas de transferência de potência sem contato elétrico tem crescido em diferentes aplicações tais como em veículos elétricos, aplicações de robótica, veículos aéreos não tripulados, implantes biomédicos, sensores, dispositivos de comunicação e diversos dispositivos eletrônicos portáteis como celulares (LU; WANG; NIYATO; KIM; HAN, 2016; MOSTAFA; MUHARAM; HATTORI, 2017). As duas tecnologias mais utilizadas para a transferência de potência sem contato elétrico são a que utiliza o princípio indutivo de acoplamento (IPT – *Inductive Power Transfer*) e a que utiliza o princípio capacitivo de acoplamento (CPT – *Capacitive Power Transfer*). O sistema IPT vem sendo desenvolvido a mais tempo do que o CPT e têm a sua tecnologia já mais estabelecida. Entretanto, o sistema CPT tem se mostrado promissor em diversas aplicações devido a algumas características tais como permitir a transferência de energia através de barreiras metálicas e por não ser afetado ao operar na proximidade de peças metálicas como pode ocorrer no sistema indutivo (HUANG; HU; SWAIN; DAI, 2014).

O sistema CPT utiliza campos elétricos de alta frequência para transferir potência (LU; ZHANG; MI, 2017). Um sistema típico utiliza dois pares de placas de metal, compondo os denominados capacitores de acoplamento, permitindo o acoplamento do campo elétrico e a transferência de potência sem contato elétrico. A tensão contínua de alimentação é convertida por um estágio inversor em uma tensão alternada de alta frequência, a qual é aplicada às placas no lado transmissor. Quando as duas placas do lado receptor são colocadas na proximidade das placas transmissoras, o campo elétrico alternado entre o conjunto de placas é formado permitindo a circulação de corrente entre os circuitos sem o contato elétrico.

Uma das principais limitações do sistema CPT é que os capacitores de acoplamento apresentam valores muito reduzidos de capacitância, tipicamente na ordem de 10^{-12} F. Isto reduz a capacidade de transferência de potência dos dispositivos CPT. Para melhorar a transferência de potência normalmente utilizam-se indutores de compensação em série com os capacitores de acoplamento para formar um circuito série ressonante, reduzindo a reatância do acoplamento (HUANG; HU; SWAIN; DAI, 2014). Entretanto, variações paramétricas e a variação da capacitância de acoplamento devido ao posicionamento variável, podem afetar o desempenho deste tipo de compensação.

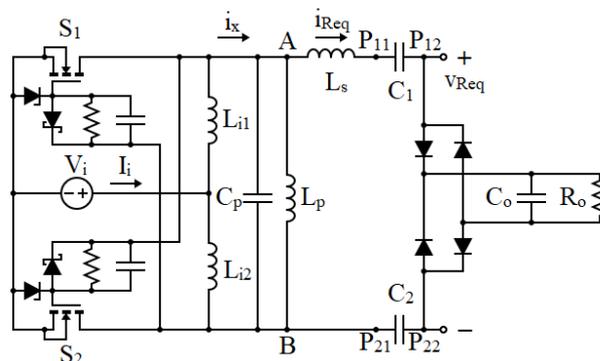
Neste trabalho é proposta uma nova configuração de sistema CPT utilizando autotransformadores ressonantes para a compensação da impedância de acoplamento e compensação da carga, apresentando uma capacidade de transferência de potência seis vezes superior ao sistema convencional

considerando o mesmo valor de capacitância de acoplamento. O sistema proposto é comparado com o sistema convencional com o desenvolvimento de protótipos e verificação experimental das características de operação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Um dos circuitos inversores de alta frequência mais utilizados nos sistemas CPT é a topologia push-pull auto-oscilante em função da sua simplicidade, elevado desempenho e baixo custo. Este conversor opera com comutação suave eliminando as perdas por comutação. Esta característica é fundamental na aplicação CPT em função da frequência de operação normalmente utilizada ser na faixa de MHz para compensar os valores reduzidos dos capacitores de acoplamento. Também apresenta uma simplicidade de comando, pois apenas a adição de alguns componentes passivos permite a operação auto-oscilante, sem o emprego de circuitos integrados. O circuito CPT convencional é apresentado na Figura 1, sendo denominado Conversor (A) neste trabalho, o qual será posteriormente comparado com o sistema proposto. Os indutores de entrada (L_{i1} - L_{i2}) atuam como fontes de corrente com valor igual à metade da corrente de entrada (i_i). Os interruptores (S_1 - S_2) operam de forma complementar, compondo um inversor de corrente de alta frequência. Esta corrente alternada de alta frequência é aplicada a um circuito paralelo ressonante (L_p - C_p). A tensão alternada deste circuito ressonante é aplicada aos capacitores de acoplamento (C_1 - C_2) em conjunto o indutor série de compensação (L_s). No lado receptor, há um retificador ponte completa para a conversão da tensão alternada de alta frequência em tensão contínua associado a um capacitor de filtro de saída (C_o).

Figura 1 – Circuito do Conversor (A)



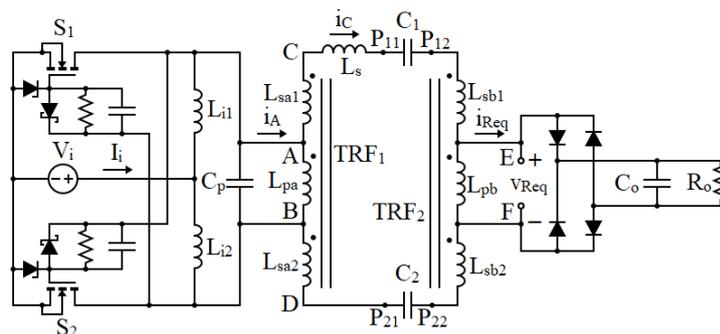
Fonte: Autoria própria (2020).

O conversor desenvolvido neste trabalho, apresentado na Figura 2 e denominado de conversor (B), tem como base o conversor push-pull auto-oscilante, apresentando o mesmo princípio de funcionamento. Entretanto, o indutor do circuito paralelo ressonante (L_p) do circuito original é substituído por um autotransformador (T_{RF1}), sendo que o enrolamento primário (L_{p_a}) faz parte do circuito paralelo ressonante em conjunto com o capacitor C_p . Os enrolamentos secundários do autotransformador ($L_{s_{a1}}$ - $L_{s_{a2}}$) promovem uma elevação da tensão de saída do inversor. A finalidade desta elevação é obter uma operação similar a

uma linha de transmissão. Para melhorar a transferência de potência através de uma linha de alta impedância, faz-se a elevação da tensão de operação e a proporcional redução de corrente. Desta forma, a queda de tensão na linha de transmissão torna-se menor, permitindo a transferência maior de potência. Com isto, a compensação da elevada impedância envolvida na transmissão de potência não fica dependente da sintonia do indutor série L_s , a qual pode não ocorrer quando há uma variação na capacitância de acoplamento devido ao posicionamento variável. Para compatibilizar os níveis de tensão e corrente para os níveis necessários para a carga, pode-se incluir um autotransformador abaixador (T_{RF2}) no lado receptor. Assim, tem-se flexibilidade tanto na compensação da impedância dos capacitores de acoplamento, quanto para a adaptação da impedância do circuito receptor à demanda da carga.

Também se pode utilizar um indutor em série L_s no conversor proposto, porém as próprias indutâncias de dispersão dos autotransformadores podem fazer o papel desta indutância. Desta forma, número de elementos magnéticos empregados no conversor (A) e conversor (B) é o mesmo. No conversor (A) tem-se o indutor paralelo (L_p) e o indutor série (L_s) e no conversor (B) têm-se os dois autotransformadores.

Figura 2 – Diagrama do Conversor B



Fonte: Autoria própria (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

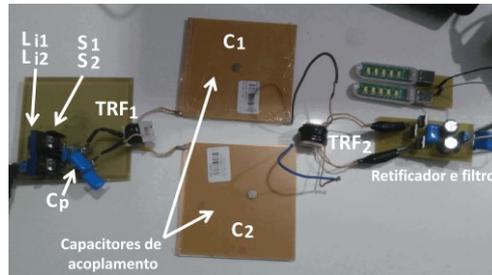
Inicialmente, realizou-se o projeto do conversor (A) seguindo a metodologia apresentada em (HUANG; HU; SWAIN; DAI, 2014) e realizaram-se as adaptações necessárias para o desenvolvimento do conversor (B). Para a comparação entre as topologias realizaram-se algumas análises por simulação, posteriormente procedeu-se a análise experimental com o desenvolvimento de protótipos e aquisição de formas de onda. Para estes desenvolvimentos seguiram-se as especificações dos circuitos e de componentes apresentados no Quadro 1. A foto do protótipo desenvolvido é apresentada na Figura 3.

3.1 ANÁLISE DO INDUTOR SÉRIE POR SIMULAÇÃO

Primeiramente, os conversores são analisados quanto ao comportamento da potência de saída (P_o) com relação à variação do valor do indutor série L_s , considerando a resistência de carga nominal. Esta simulação mostra tanto a

capacidade de transferência de potência de cada circuito, quanto a sensibilidade à variação dos parâmetros do circuito série ressonante do acoplamento capacitivo.

Figura 3 – Protótipo desenvolvido



Fonte: Autoria própria (2020).

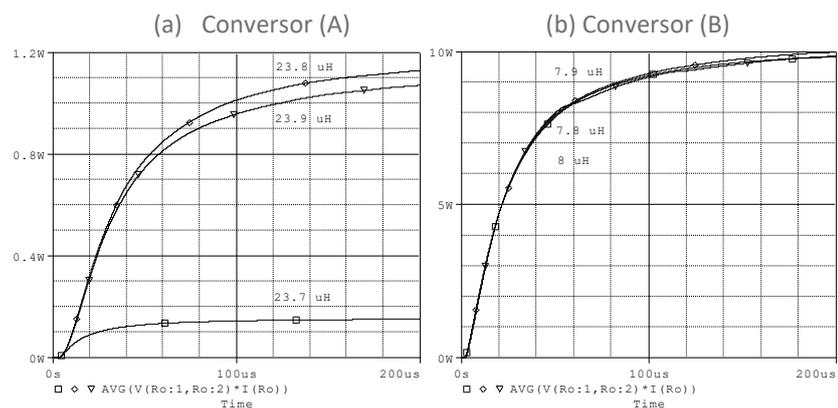
Quadro 1 – Especificações e componentes

Parâmetro	Especificação	Conversor
Tensão de entrada	$V_i = 5 \text{ V}$	A e B
Frequência de comutação	$f = 4 \text{ MHz}$	A e B
Resistência de carga nominal	$R_o = 20 \ \Omega$	A e B
Interruptores	$S_1 = S_2 = \text{IRFZ48}$	A e B
Indutores de entrada	$L_{i1} = L_{i2} = 30 \ \mu\text{H}$	A e B
Capacitores de acoplamento	$C_1 = C_2 = 150 \ \text{pF}$	A e B
Capacitor paralelo ressonante	$C_p = 5,5 \ \text{nF}$	A e B
Indutor paralelo ressonante	$L_p = 0,29 \ \mu\text{H}$ (conv. A) $L_{pa} = 0,29 \ \mu\text{H}$ (conv. B)	A e B
Relação de transformação TRF ₁	$n_1 = 2,6$	B
Relação de transformação TRF ₂	$n_2 = 2,9$	B
Diodos retificadores de saída	$D_1 - D_4 = \text{MBR20100}$	A e B
Capacitor de filtro de saída	$C_o = 100 \ \mu\text{H}$	A e B

Fonte: Autoria própria (2020).

Foi realizada uma variação no valor do indutor série em torno do valor ótimo que garante a menor impedância do acoplamento capacitivo para cada circuito. Os resultados destas simulações são apresentados na Figura 4, a qual mostra a potência de saída para diferentes valores de indutor série.

Figura 4 – Potência para diferentes valores de indutância série L_s



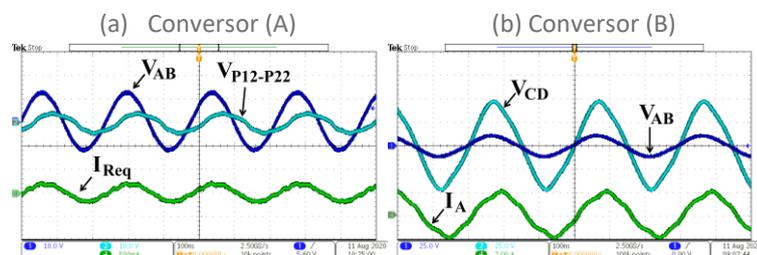
Fonte: Autoria própria (2020).

Como se pode observar, a potência máxima transferida para a carga é em torno de dez vezes maior no conversor (B) em comparação ao conversor (A), considerando a mesma tensão de alimentação e a mesma capacitância de acoplamento. Além disso, o conversor (A) mostrou-se bem mais sensível à variação paramétrica do circuito série do que o conversor (B). Houve uma grande variação de potência com uma pequena variação no indutor série no conversor (A) enquanto o conversor (B) mostrou-se pouco sensível a esta variação. Isto confirma o melhor desempenho do sistema de compensação série proposto.

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

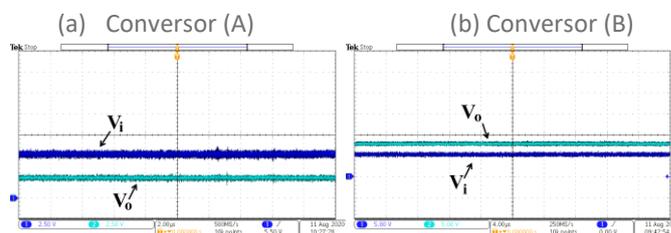
A seguir são apresentadas algumas das principais formas de onda experimentais dos conversores operando com a carga nominal. A Figura 5 apresenta a tensão e a corrente no circuito ressonante. A tensão aplicada aos capacitores de acoplamento (V_{AB}) no conversor (A) apresenta valor de pico igual a 14 V enquanto a tensão aplicada aos capacitores de acoplamento (V_{CD}) no conversor (B) apresenta tensão de pico igual a 90 V. A corrente de pico no circuito ressonante do conversor (A) é igual a $I_{Req}=0,5$ A enquanto a mesma corrente no conversor (B) tem valor igual a $I_A=2$ A, em função da maior potência processada no conversor (B).

Figura 5 – Tensão e corrente no circuito ressonante



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – Tensão de saída

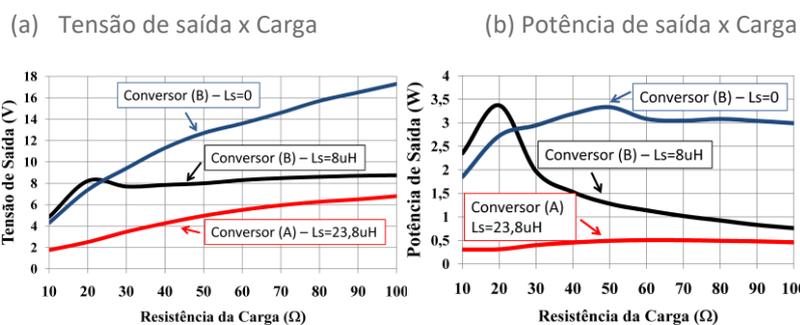


Fonte: Autoria própria (2020).

A tensão de saída operando com carga nominal é apresentada na Figura 6. A tensão de saída no conversor (A) é $V_o=2,5$ V, correspondendo a uma potência de saída $P_o=0,31$ W. No conversor (B) a tensão de saída é $V_o=8,22$ V processando uma potência $P_o=3,37$ W. Assim a potência transferida é em torno de dez vezes maior com o sistema proposto. A seguir, foi realizada a análise da variação da

tensão de saída e da potência transferida frente a uma variação da resistência de carga. Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 7, a qual foi obtida experimentalmente a partir dos protótipos construídos.

Figura 7 – Análise da variação de carga



Fonte: Autoria própria (2020).

Estes resultados mostram que o conversor (B) operando sem o indutor série ($L_s=0$) apresenta um desempenho superior ao conversor (A) transferindo em média uma potência seis vezes maior do que o conversor (A) em toda a faixa de carga. Com a utilização do indutor série no conversor (B), o conversor apresentou uma característica de reduzida variação de tensão com a carga, o que pode ser muito interessante em aplicações que exijam uma pós-regulação na tensão de saída. A potência transferida no conversor (B) com indutor série, também foi elevada na operação com a resistência de carga nominal.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um novo método de compensação da impedância dos capacitores de acoplamento em um sistema CPT. A utilização de autotransformadores ao invés de indutor série permitiu uma transferência de potência dez vezes superior ao sistema convencional, considerando as mesmas condições de operação. Portanto a técnica proposta pode contribuir para a redução das dimensões dos capacitores de acoplamento em diversas aplicações. Estes resultados foram verificados experimentalmente validando o método proposto e as análises realizadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica– PIBIC.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Ao Prof. Dr. Roger Gules, orientador do projeto.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária FA – Paraná/Brasil.

REFERÊNCIAS

- HUANG, L.; HU, A.P.; SWAIN, A.; DAI, X. Comparison of two high frequency converters for capacitive power transfer. *In: 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 6., 2014, Pittsburgh. Anais... Pittsburgh: ECCE, 2014. p. 5437-5443.*
- LU, X.; WANG, P.; NIYATO, D.; KIM, D.I.; HAN, Z. Wireless charging technologies: fundamentals, standards, and network applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 18, n. 2, p. 1413-1452, 2016. DOI: 10.1109/COMST.2015.2499783. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7327131>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- LU, F.; ZHANG, H.; MI, C. A review on the recent development of capacitive wireless power transfer technology. **Energies**, v. 10, n. 11, p. 1752, 2017. DOI: 10.3390/en10111752. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1752>. Acesso em: 5 mai. 2020.
- MOSTAFA, T.M.; MUHARAM, A.; HATTORI, R. Wireless battery charging system for drones via capacitive power transfer. *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer, 3., 2017, Chongqing. Anais... Chongqing: Wow, 2017. p. 1-6.*