

*bezstykowy przekaz energii,
przekształtniki rezonansowe,
indukcyjność sterowana*

Marcin HOŁUB*, Stanisław KALISIAK*,
Marcin MARCINEK*, Ryszard PAŁKA*

METODA AKTYWNEJ KOMPENSACJI ZMIAN INDUKCYJNOŚCI ROZPROSZENIA W TRANSFORMATORZE BEZRZDENIOWYM

W artykule opisano sposób zasilania transformatora bezrdzeniowego, który może być wykorzystany jako element transmisyjny w systemach bezstykowego przekazywania energii. Dostarczanie energii poprzez układ CET (*Contactless Energy Transfer*) wymaga dobrej znajomości zmian parametrów systemu, gdyż zasilanie CET jest zależne od punktu pracy układu. Wykonano badania przy użyciu dwóch modeli przekształtnika energoelektronicznego: polowego i obwodowego. Przedstawiono rozwiązanie, dzięki któremu falownik zasilający może pracować ze stałą częstotliwością niezależną od zmieniających się parametrów systemu.

1. WSTĘP

W artykule zaprezentowano system do kompensacji indukcyjności rozproszenia transformatora bezrdzeniowego. Transformator bezrdzeniowy wykorzystywany jest przykładowo w bezstykowych układach przekazywania energii – CET (*Contactless Energy Transfer*). Systemy CET stosowane są do zasilania różnego rodzaju aplikacji, takich jak urządzenia mobilne, implanty biomedyczne [7], wspomaganie zasilania i ładowanie pojazdów elektrycznych [3, 4].

Zasilanie systemów CET jest zależne od punktu pracy układu, np. od zmian sprzężenia magnetycznego pomiędzy cewką nadawczą i odbiorczą, rezystancji obciążenia [1]. W przypadku urządzeń mobilnych czy implantów biomedycznych zachowanie stałości współczynnika k , wynikającego ze sprzężenia magnetycznego, jest stosunko-

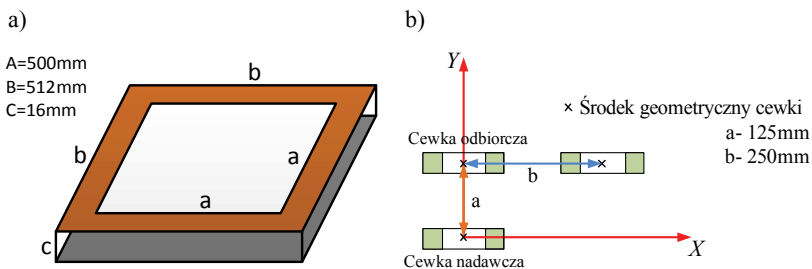
* Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin; mholub@zut.edu.pl, stanislaw.kalisiak@zut.edu.pl, marcinek@zut.edu.pl, rpalka@zut.edu.pl

wo łatwe do osiągnięcia, gdyż zakres możliwych zmian położenia jest nieduży. W przypadku pojazdów elektrycznych w zależności od tego, w jakiej pozycji (względem cewki nadawczej) zostanie zatrzymany pojazd, współczynnik sprzężenia magnetycznego k może ulegać znacznym wahaniom. Rezonansowe układy zasilające mogłyby przystosować się do pracy przy innym niż zaprojektowane sprzężeniu, jednakże wymuszałoby to przestrajanie częstotliwości pracy falownika. Przy transmisji dużych mocy rozwiązanie takie byłoby niedopuszczalne z powodu emitowania zakłóceń elektromagnetycznych w szerokim pasmie częstotliwości.

Rozwiązaniem tego problemu jest dedykowanego falownik, który byłby niewrażliwy na zmianę współczynnika sprzężenia k i pracowałby ze stałą częstotliwością. Do zaprojektowania takiej aplikacji wykonano dwa rodzaje obliczeń symulacyjnych opartych o model polowy i obwodowy przekształtnika energoelektronicznego.

2. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA SPRĘŻENIA MAGNETYCZNEGO

Duża liczba stopni swobody opisywanego układu cewek powoduje szeroki zakres zmian współczynnika sprzężenia magnetycznego, co z kolei wymusza opracowanie dedykowanych topologii zasilających system. W tym celu zastosować można różnego rodzaju biernie (z użyciem kondensatorów) [3, 4] lub aktywne układy kompensacyjne [1, 6, 7]. W artykule przedstawiona jest koncepcja kompensatora aktywnego. Na wstępie przeprowadzono analizę możliwych zmian współczynnika k wynikających ze zmiany położenia cewki odbiorczej.

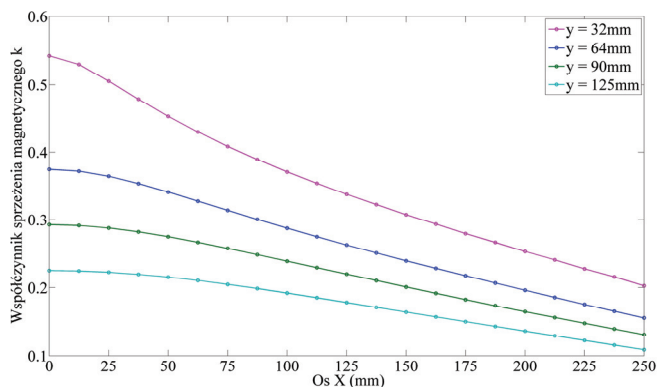


Rys. 1. Geometra systemu: a) wymiary pojedynczej cewki,
b) zmiany w pozycjonowaniu badanej cewki

Fig. 1. Geometry of the system: a) dimensions of a single coil,
b) changes in the positioning of the examined coil

Do wykonania obliczeń przyjęto następujące założenia: zwojność cewki nadawczej i odbiorczej oraz ich wymiary geometryczne są sobie równe, uzwojenia mają kształt kwadratów. Wymiary pojedynczej cewki oraz zakres zmian położenia są przedstawione na rysunkach 1a i 1b. Zasyulowano ruch cewki odbiorczej względem nadawczej

dla różnych wysokości w zakresie od 32 mm do 125 mm liczonych od środka geometrycznego cewki nadawczej. Dla wybranych wysokości strona wtórna przesuwana jest w osi x w zakresie od 0 do 250 mm.

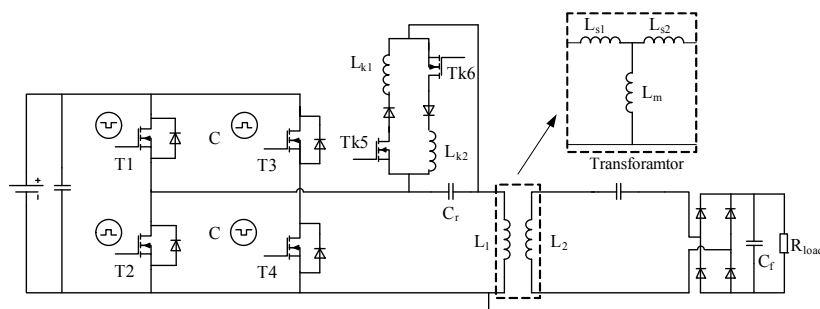


Rys. 2. Zależność współczynnika sprzężenia magnetycznego k od położenia względem osi x i y
Fig. 2. Dependence of the magnetic coupling factor k from the position x and y axis

3. ZASTOSOWANIE UKŁADU AKTYWNEJ KOMPENSACJI

3.1. ENERGOELEKTRONICZY MODEL SYMULACYJNY

W [1] zaproponowano model systemu do kompensacji zmian paramentów systemu bezstykowego przekazywania energii. Na podstawie schematu ideowego (rysunek 3) stworzono model symulacyjny w programie PLECS 3.2. Model symulacyjny zasilany jest przez czterotranzystorowy falownik w konfiguracji pełnego mostka typu H. Wartość napięcia stałego zasilającego falownik ustalono na 70 V.



Rys. 3. Schemat ideowy przekształtnika zasilającego system bezstykowego przekazywania energii
Fig. 3. Schematic diagram of the power converter system for contactless energy transfer

Zasilanie strony pierwotnej systemu bezstykowego przekazywania energii odbywa się poprzez szeregowy obwód rezonansowy, w skład którego wchodzi kondensator C_r (153 nH) oraz indukcyjność rozproszenia strony pierwotnej transformatora L_{s1} . Wartość tej indukcyjności zależy od współczynnika sprzężenia magnetycznego k . Do wyjścia systemu podłączony jest mostek prostowniczy z kondensatorem filtrującym i rezystorem obciążającym o wartości 10 Ω . Częstotliwość pracy falownika ustalono na 40 kHz. Sprzężone magnetycznie cewki L_1 i L_2 tworzą bezrdzeniowy transformator powietrzny [2, 5], którego schemat zastępczy znajduje się na rysunku 3. Zadaniem układu kompensacyjnego jest dostrajanie częstotliwości pracy falownika do częstotliwości drgań własnych obwodu rezonansowego.

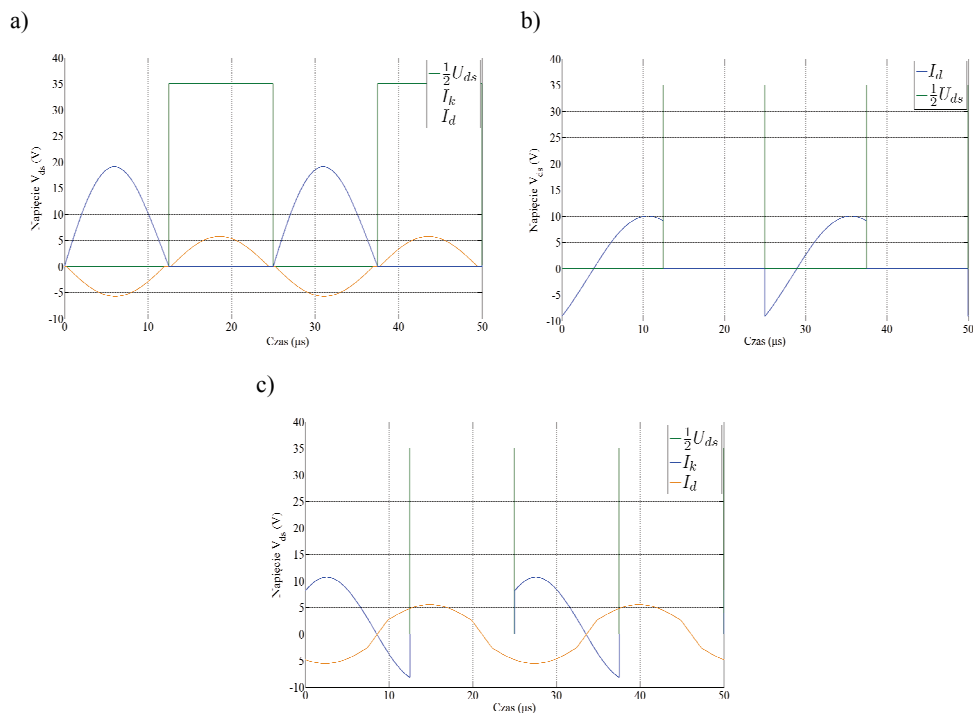
Zasada sterowania kompensatora oparta jest na odliczaniu czasu opóźnienia załączania tranzystorów kompensatora – oznaczonego przez α – od momentu przejścia przez zero napięcia na kondensatorze C_r , dokładny opis działania układu znajduje się w [1].

3.2. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Wykorzystanie energoelektronicznego modelu układu pozwoliło na przeprowadzenie obszernego programu badań, w tym badanie wpływu proponowanego układu aktywnego kompensatora na pracę falownika. Analiza otrzymanych wyników wskazuje trzy możliwe stany pracy falownika: w nominalnych warunkach (naturalny rezonans układu bez konieczności stosowania kompensatora lub układ w pełni skompensowany), przy niedokompensowaniu zmian indukcyjności rozproszenia (w konsekwencji przy przerywanym prądzie drenu), przy zbyt mocnym wysterowaniu kompensatora (przekompensowaniu zmian w układzie przekazywania energii). Praca systemu w warunkach nominalnych lub przy skompensowaniu występuje wtedy, gdy tranzystory falownika (oznaczone jako $T1...T4$) przełączają się przy zerowej wartości przewodzonego prądu drenu – ZCS (*zero current switching* – przełączenie przy zerowej wartości prądu). Praca przy przerywanym prądzie występuje, gdy tranzystor jest przełączany pomimo tego, iż wartość prądu drenu jest większa od zera.

Jednym z niepożądanych efektów pracy w trybie przerywanego prądu jest znaczny wzrost strat dynamicznych tranzystorów, na skutek których półprzewodnik może ulec termicznemu uszkodzeniu. Przebiegi ukazujące kształty prądów i napięć dla pojedynczego tranzystora pracującego w opisanych powyżej trybach zaprezentowane są na rysunkach 4 a, b, c.

Trzeci stan pracy może wystąpić wtedy, gdy częstotliwość obwodu rezonansowego na skutek zmiany współczynnika sprzężenia lub działania kompensatora wzrośnie powyżej częstotliwości falownika.



Rys. 4. Wyniki obliczeń przebiegów prądu i napięcia dla tranzystora T1:

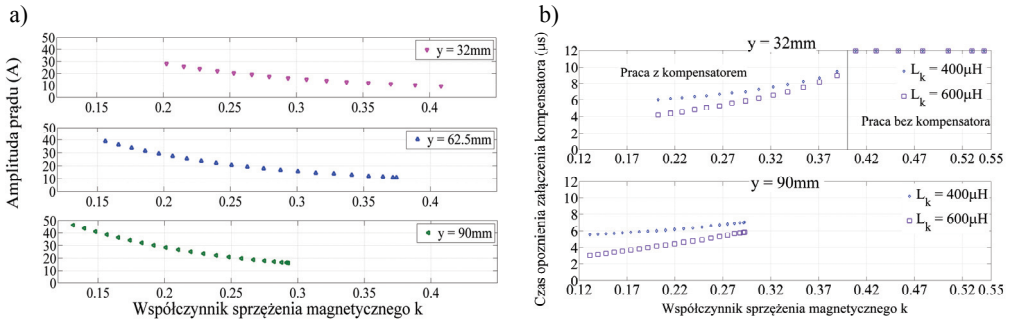
- a) praca w nominalnych warunkach, b) praca przy nienominalnych warunkach,
c) praca podczas przekompensowania

Fig. 4. Calculation results of current and voltage waveforms for the transistor T1:

- a) work in nominal terms, b) work with abnormal conditions, c) work in overcompensation

Warto zaobserwować, że gdy system CET pracuje z uruchomionym kompensatorem zapewniającym przełączanie tranzystorów w trybie ZCS, wraz ze spadkiem wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego, amplituda prądu płynącego przez tranzystory rośnie (Rysunek 5a). Występowanie tego efektu wymusza zastosowanie w algorytmie sterującym dodatkowego elementu kontrolującego moc pobieraną z szyny DC zasilającej falownik.

Dla zadanej wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego w zależności od wartości indukcyjności kompensacyjnej można wyznaczyć różne czasy α . Charakterystyki opisujące zakres zmian sprzężenia magnetycznego cewek posłużyły do wykreślenia krzywych, dzięki którym eksperymentalnie wyznaczono czas opóźnienia załączenia tranzystorów kompensatora. Zależność ta jest prawdziwa dla nierówności $f_r < f_{falownika}$ (f_r oznacza częstotliwość rezonansową, która jest pośrednio zależna od współczynnika sprzężenia magnetycznego k). Rysunek 5b przedstawia charakterystyki dla dwóch różnych odległości pomiędzy cewkami i dwóch wartości indukcyjności cewek kompensatora.



Rys. 5. a) Zależność amplitudy prądu tranzystorów od współczynnika sprzężenia magnetycznego k ,
 b) Zależność czasu opóźnienia α od współczynnika k

Fig. 5. a) Current amplitude dependence of transistors of magnetic coupling factor k ,
 b) The dependence of time delay α on the factor k

4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki badań energoelektronicznego systemu bezstykowego przekazywania energii, pracującego w optymalnych warunkach pomimo zmian parametrów obwodu rezonansowego. Zaprezentowane wyniki ukazują teoretyczny możliwy zakres zmian współczynnika k , który może zostać skompensowany w taki sposób, aby częstotliwość pracy falownika była stała, a tranzystory przełączane były w trybie ZCS. Wykonane symulacje przedstawiają czasy opóźnienia α dla dwóch wartości cewek kompensujących. Nawet w przypadku większej indukcyjności o wartości $600\ \mu\text{H}$ przy minimalnym przebadanym współczynniku k czas opóźnienia załączenia wynosi około $3\ \mu\text{s}$, z czego wynika, że możliwa jest praca przekształtnika z jeszcze większym odstrojeniem od warunków nominalnych.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego) w ramach programu Region Morza Bałtyckiego 2007–2013, projekt „Dissemination and fostering of plasma based technological innovation for environment protection in BSR”, kontrakt #033.

LITERATURA

- [1] KALISIAK S., MARCINEK M., HOLUB M., PALKA R., *Contactless power supply system with resonant circuit parameter change compensation*, Power Electronics and Applications (EPE 2011), Aug. 30. 2011–Sept. 1, 2011.
- [2] BOYS J.T., ELLIOTT G. A.J., COVIC G.A., *An Appropriate Magnetic Coupling Co-Efficient for the Design and Comparison of ICPT Pickups*, Power Electronics, IEEE Transactions on, Jan. 2007, Vol. 22, No. 1, 333–335.

- [3] CHWEI-SEN WANG, STIELAU O.H., COVIC G.A., *Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Oct. 2005, Vol. 52, No. 5, 1308–1314.
- [4] SALLAN J., VILLA J.L., LLOMBART A., SANZ J.F., *Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, June 2009, Vol. 56, No. 6, 2140–2149.
- [5] CHOPRA S., BAUER P., *Analysis and design considerations for a contactless power transfer system*, Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International, 9–13 Oct. 2011, 1–6.
- [6] JAMES J., BOYS J., COVIC G., *A variable inductor based tuning method for ICPT pickups*, Power Engineering Conference, IPEC 2005, The 7th International, Nov. 29. 2005–Dec. 2. 2005, Vol. 2, 1142–1146.
- [7] SI P., HU A.P., BUDGETT D., MALPAS S., YANG J., GAO J., *Stabilizing the operating frequency of a resonant converter for wireless power transfer to implantable biomedical sensors*, 1st Int. Conf. Sensing Technol., Palmerston North, New Zealand, 2005, 477–482.

METHOD OF ACTIVE PARASITIC INDUCTANCE CHANGE COMPENSATION FOR CORELESS TRANSFORMERS

Presented paper discusses a power electronic supply system topology for coreless transformers used in contactless energy transfer systems. Two models of such systems are presented based on circuit time domain analysis and FEM. An active compensator operation is discussed allowing for constant resonant frequency operation during transformer parameter change. Calculation results are presented and discussed.