

XV Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2005
Oddział Gdański PTETiS

**WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWY FAŁOWNIK NAPIĘCIA –
BADANIA SYMULACYJNE**

**Sławomir JUDEK¹, Krzysztof KARWOWSKI²,
Krzysztof KORYCKI³, Daniel SOCZYŃSKI⁴**

- | | | | |
|----|---|------------------|--------------------------------|
| 1. | Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk | | |
| | tel. (058)3472053 | fax (058)3410880 | e-mail: sjudek@ely.pg.gda.pl |
| 2. | tel. (058)3471158 | fax (058)3410880 | e-mail: kkarwow@ely.pg.gda.pl |
| 3. | tel. (058)3472053 | fax (058)3410880 | e-mail: kkorycki@ely.pg.gda.pl |
| 4. | tel. (058)3472053 | fax (058)3410880 | e-mail: dsoczyn@ely.pg.gda.pl |

W opracowaniu przeprowadzono analizę układu bezstykowego przesyłania energii elektrycznej dla stanu ustalonego przy wymuszeniu sinusoidalnym. Obliczenia te oparto na transformatorowym schemacie zastępczym układu cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie. Analiza ta umożliwiła określenie struktury i obszaru pracy układu charakteryzującej się maksymalną sprawnością. Następnie przedstawiono wyniki symulacji układu przy zasilaniu przekształtnikowym, z uwzględnieniem modeli rzeczywistych elementów energoelektronicznych. Przedstawione rezultaty wskazują na to, że układ jest w stanie przekazywać energię elektryczną o określonych parametrach również w przypadku dynamicznie zmieniających się jego parametrach, w szczególności współczynnika sprzężenia magnetycznego.

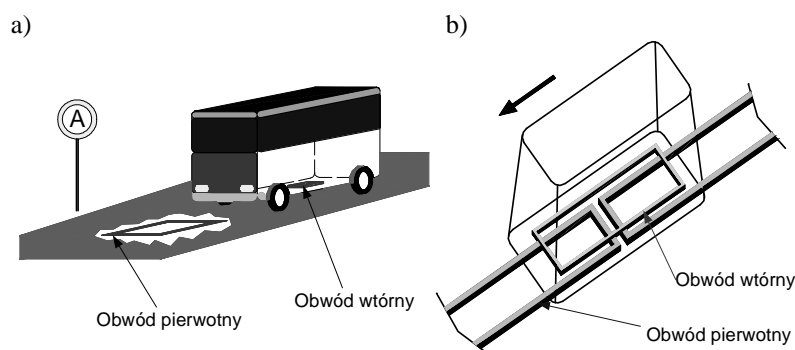
1. WSTĘP

Większość ruchomych odbiorników energii elektrycznej jest połączona ze źródłem energii poprzez: giętke przewody, komutatory, pierścienie ślizgowe lub pantografy. Taki sposób zasilania w energię elektryczną jest powszechnie akceptowany w łagodnym środowisku pracy, ale może być ograniczony w środowisku zagrożonym pod względem wybuchu lub wilgotnym. W wielu przypadkach zastosowań trakcyjnych warunki eksploatacyjne nie pozwalają na wykorzystywanie tradycyjnej sieci trakcyjnej do zasilania pojazdów (np. hale przemysłowe, kopalnie, historyczne miasta, parki przyrodnicze).

Dzięki wykorzystaniu przekształtników energoelektronicznych możliwa jest budowa systemu przekazywania energii elektrycznej z jednego obwodu do drugiego bez połączenia między nimi. Przesył energii elektrycznej następuje na drodze indukcyjnej za pośrednictwem cewek sprzężonych poprzez niemagnetyczne środowisko. Układ bezstykowego przekazu energii elektrycznej, określane skrótem CEETS (ang. Contactless Electrical Energy Transfer System), związany jest z ruchomymi

odbiornikami energii elektrycznej, a separacja odbiornika – z dużą szczeliną powietrzną ($\delta > 100$ mm) – wynika ze specyficznych warunków jego eksploatacji. Zastosowania układów bezstykowego przesyłania energii są różnorodne [1, 3, 4, 5]. Można zaliczyć tu zasilanie pojazdów, wind, dźwigów, suwnic, robotów, przedmiotów codziennego użytku, oraz w zastosowaniach medycznych – sztucznych organów wewnętrznych. W trakcji elektrycznej układy CEETS o dużej mocy wyjściowej zasilają obwód główny pojazdu a małej mocy – urządzenia pomocnicze, np. silniki elektryczne lub reflektory w samochodach.

Obecnie znane są pracujące układy służące do doładowywania zasobników energii (baterii akumulatorowych) zainstalowanych w pojeździe w trakcie jego postoju np. na przystanku (rys. 1). W takim przypadku energia jest przekazywana poprzez bezrdzeniowy transformator złożony z układu dwóch cewek słabo sprzężonych magnetycznie. Wstępna analiza takiego układu wykazała, że możliwe jest przesyłanie energii wystarczającej do zasilenia pojedynczego pojazdu [3]. Zapewnienie odpowiedniej wydajności energetycznej przy najlepszej sprawności wymaga, aby pracował on w stanie rezonansu przy częstotliwości rzędu setek kiloherców. Takie warunki zasilania zapewnić może tylko zastosowanie odpowiedniej struktury i elementów energoelektronicznych przekształtnika, właściwy dobór wartości i konfiguracji pojemności kompensujących, sygnałów sprzężeń zwrotnych oraz metody ich przesyłania do układu sterowania [2, 3, 4].

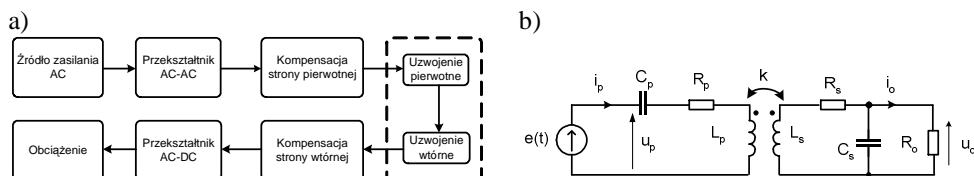


Rys. 1. System bezstykowego zasilania pojazdów trakcyjnych: a) impulsowe ładowanie baterii akumulatorowych w trakcie postoju na przystanku; b) zasilanie ciągłe

2. STRUKTURA SYSTEMU

Główną część układu CEETS stanowią cewki sprzężone magnetycznie. Analiza działania układu jest możliwa po zastąpieniu układu sprzężonego magnetycznie analogiem obwodowym [3]. Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy oraz przykładowy schemat ideowy systemu CEETS przy zasilaniu sinusoidalnym. W skład układu wchodzi: źródło zasilania $e(t)$, analog obwodowy układu cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie i kondensatorów kompensujących w układzie szeregowo-równoległym. Elementy z indeksem p odnoszą się do strony pierwotnej, zaś opatrzone indeksem s do strony wtórnej transformatora. Schemat ten jest podstawą do analizy stanu ustalonego układu, w celu zdefiniowania dopuszczalnego obszaru pracy.

Dla przesyłu energii z dużą sprawnością konieczne jest, prócz zasilania układu cewek sprzężonych za pomocą wysokoczęstotliwościowego falownika napięcia, skompensowanie spadków napięcia na indukcyjnościach rozproszenia [3, 5].



Rys. 2. Układ CEETS: a) schemat blokowy; b) schemat zastępczy dla analizy AC

Z tego względu na podstawie analizy energetycznej dla wymuszeń sinusoidalnych wybrano układ z kompensacją szeregowo-równoległą [4]. Przypadek ten oznacza sytuację, w której pojemności kompensujące strony pierwotnej C_p oraz wtórnej C_s zostały tak dobrane, aby napięcie u_p i prąd i_p zasilające układ były ze sobą w fazie dla pewnej częstotliwości f_o napięcia zasilającego. Warunek powyższy jest spełniony, gdy:

$$C_p = \frac{L_s}{\omega_o^2 (L_p L_s - M^2)}, \quad C_s = \frac{1}{\omega_o^2 L_s} \quad (1)$$

gdzie: L_p jest indukcyjnością własną uzwojenia pierwotnego, zaś L_s jest indukcyjnością własną uzwojenia wtórnego transformatora powietrznego.

Przy tak dobranych pojemnościach kompensujących sprawność przesyłu jako stosunek mocy P_o/P_p wyraża się zależnością:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_p L_s^2}{M^2 R_o} + 2 \frac{R_p R_s}{\omega_o^2 M^2} + \frac{R_s}{R_o} + \frac{R_s R_o}{\omega_o^2 L_s^2} + \frac{R_p R_s^2}{\omega_o^2 M^2 R_o} + \frac{R_p R_s^2 R_o}{\omega_o^4 L_s M^2}} \quad (2)$$

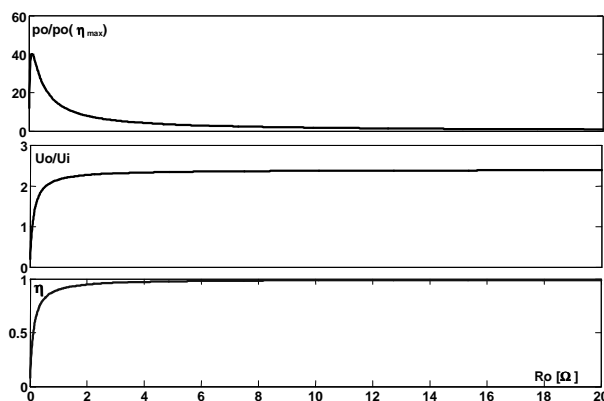
gdzie: η – sprawność, ω_o – pulsacja rezonansowa, M – indukcyjność wzajemna cewek sprzężonych magnetycznie, R_p – rezystancja uzwojenia pierwotnego, R_s – rezystancja uzwojenia wtórnego, R_o – rezystancja obciążenia.

Sprawność zdefiniowana przez (2) osiąga wartość maksymalną dla rezystancji obciążenia równej (rys. 3):

$$R_o = \omega_o L_s \sqrt{\frac{\omega_o^2 R_p L_s^2 + \omega_o^2 M^2 R_s + R_p R_s^2}{R_p R_s^2 + R_s \omega_o^2 M^2}} = 17,8 [\Omega] \quad (3)$$

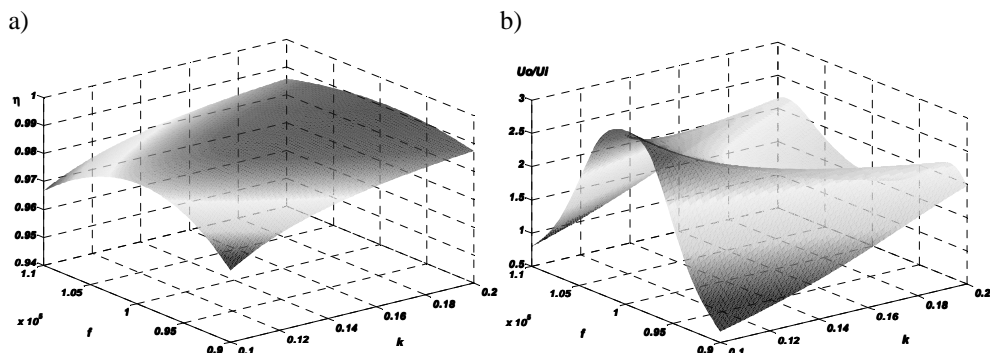
Rysunek 3 przedstawia moc czynną odbiornika P_o , stosunek napięć wyjściowego do wejściowego U_o/U_p oraz sprawność η w funkcji zmian rezystancji obciążenia. Określenie parametru R_o , dla którego sprawność jest największa umożliwiło dalszą analizę układu pod kątem oceny wpływu zmian współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz zmian częstotliwości napięcia zasilającego na sprawność oraz zmienność napięcia wyjściowego (rys. 4a, rys. 4b).

Z punktu widzenia zmienności obciążenia istotna jest niewielka zależność sprawności w funkcji zmian R_o . Cechą charakterystyczną dla tego rodzaju kompensacji jest również duża zmiana napięcia wtórnego U_o/U_p (rys. 4b).



Rys. 3. Sprawność η , moc wyjściowa $P_o/P_o(\eta_{max})$ i napięcie wyjściowe U_o układu z kompensacją szeregowo-równoległą z rezonans globalnym w funkcji rezystancji obciążenia R_o

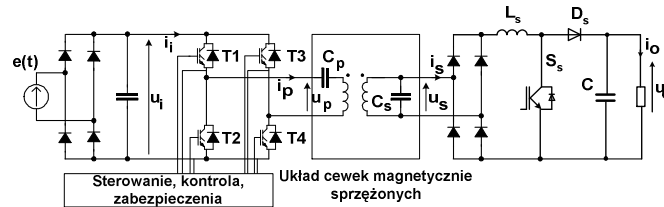
Na uwagę zasługuje fakt, iż dla wyznaczonego punktu pracy opisanego zależnością (3), oznaczającego przesył mocy z największą sprawnością, nie przypada maksimum mocy przesyłanej do odbiornika. Punkt pracy, dla którego $P_o = P_{omax}$, związany jest bowiem z dopasowaniem źródła, dla którego to sprawność wynosi 50%.



Rys. 4. Parametry układu z kompensacją szeregowo-równoległą z rezonans globalnym w funkcji zmiany częstotliwości napięcia zasilającego f i współczynnika sprzężenia k : a) sprawność η ; b) stosunek napięć U_o/U_p ;

3. WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWY FALOWNIK NAPIĘCIA

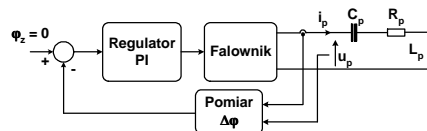
Przedstawione dotychczas rozważania obejmowały pracę systemu w stanie ustalonym przy wymuszeniu sinusoidalnym. Na rys. 5 przedstawiono schemat ideowy systemu CE-ETS z zasilaniem przekształtnikowym. Po stronie pierwotnej znajduje się prostownik diodowy oraz falownik dostarczający napięcia o regulowanej, wysokiej częstotliwości, zapewniającej w układzie punkt pracy rezonansowej [3, 4]. Wyjście układu stanowi prostownik oraz przetwornica DC-DC zapewniająca stabilizację napięcia wyjściowego zasilającego odbiornik. W niektórych układach dużej mocy stosuje się zamiast czterotranzystorowego falownika napięcia układ wielopoziomowy [1].



Rys. 5. Schemat przekształtnika układu CEETS

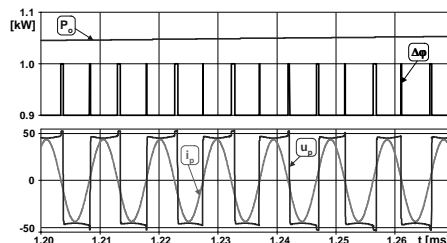
Jako bazowy do dalszej analizy wybrano układ bez przetwornicy stabilizującej napięcie odbiornika. Wielkości parametrów do symulacji przyjęto na podstawie analizy układu przy zasilaniu sinusoidalnym. Symulacje, dla układu modelowego małej mocy rzędu jednego kilowata, przeprowadzono w programie PSpice. Zastosowano modele rzeczywistych ultraszybkich diod i tranzystorów IGBT.

Wytrącenie układu z punktu rezonansowego może być efektem zmian parametrów elementów, np. pojemności jak również następstwem normalnej pracy – zmiana odległości pomiędzy uzwojeniami ($k = f(\delta)$) będąca konsekwencją ruchu pojazdu. W oparciu o pomiar wartości kąta przesunięcia fazowego pomiędzy i_i a u_i można wpływać tak na częstotliwość napięcia generowanego przez falownik, aby doprowadzić, przy zmianie warunków pracy układu, do rezonansu globalnego związanego z maksymalną sprawnością. Po wyprowadzeniu układu z punktu pracy rezonansowej układ regulacji wyznacza powstały w tej sytuacji kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem wejściowym (rys. 6). Wielkość ta jest przetwarzana na sygnał sterujący w postaci zmiany czasu załączania poszczególnych tranzystorów falownika, co przekłada się na zmianę częstotliwości napięcia generowanego przez przekształtnik.



Rys. 6. Blokowy schemat układu regulacji

W ten sposób cały układ przechodzi do nowego punktu pracy rezonansowej w czasie rzędu $500\mu s$. Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi mocy odbiornika, względnego przesunięcia czasowego oraz prądu i napięcia w układzie regulacji zaprezentowanym na powyższym rysunku.



Rys. 7. Przebiegi mocy odbiornika p_o , sygnału względnego przesunięcia czasowego $\Delta\varphi$ oraz napięcia u_p i prądu i_p wejściowego w układzie z regulatorem

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W opracowaniu przeprowadzono analizę teoretyczną i symulacyjną układu bezstykowego przesyłania energii elektrycznej (CEETS). Przedstawiono analizę stanu ustalonego dla wymuszeń sinusoidalnych oraz wyniki symulacji układu przy zasilaniu przekształtnikowym, z uwzględnieniem modeli rzeczywistych elementów energoelektronicznych. Wyniki obejmują pracę układu w stanie quasi-ustalonym bez oraz z regulatorem. Zestawienie to wskazuje na to, że układ jest w stanie przekazywać energię elektryczną o określonych poziomach również w przypadku dynamicznie zmieniających się jego parametrach. Sprawność układu jest wysoka w przypadku pracy układu poza punktem rezonansu, jednakże moc wyjściowa jest mała, co wymaga stosowania dodatkowego zasobnika energii w pojeździe elektrycznym.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Byeong-Mun Song, Kratz R., Gurol S.: Contactless Inductive Power Pickup System for Maglev Applications. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting.
2. Citko T., Tunia H., Winiarski B.: Układy rezonansowe w energoelektronice. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2001, ISBN 83-88229-28-1.
3. Judek S., Karwowski K.: Bezstykowe zasilanie pojazdów trakcyjnych XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa SEMTRAK 2004 i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Kraków – Zakopane 2004, ISBN 83-86219-47-5.
4. Judek S., Karwowski K.: Analiza układów przekształtnikowych w systemach bezstykowego przesyłania energii elektrycznej do pojazdu trakcyjnego, Seventh International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe, Warszawa 2005.
5. Stielau O. H., Covic G. A.: Design coupled inductive power transfer systems. International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000.

HIGH FREQUENCY INVERTER – SIMULATION RESEARCH

This paper describes a technique, the contactless electrical energy transfer system (CEETS), by which electrical energy may be transmitted, without electrical connection or physical contact, through the large air gap.

CEETS is becoming more and more attractive especially for automatic battery charging stations and for energy supply of inductively powered electric vehicles and other movable consumers.

Authors presented theoretical and simulation analysis of transformer equivalent circuit with capacitors series and parallel connected to windings. The analysis includes supply via AC voltage source and power electronics converter with invariable and with variable frequency. The calculations are oriented in order to show compensation topology which is characterized greatest efficiency.