

WITOLD KOBOS⁽¹⁾, JERZY ZGRAJA⁽²⁾

¹Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA

²Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej

PASYWNE UKŁADY DOPASOWANIA IMPEDANCJI OBCIĄŻENIA INDUKCYJNIE NAGRZEWANEGO WSADU

W celu efektywnego przekazywania energii z generatora do indukcyjnie nagrzewanego wsadu stosuje się pasywne układy dopasowujące impedancje obciążenia. Powszechnie stosowanym w tym celu jest transformator dopasowujący. W artykule zostały przeanalizowane inne rozwiązania zawierające elementy pasywne L oraz C.

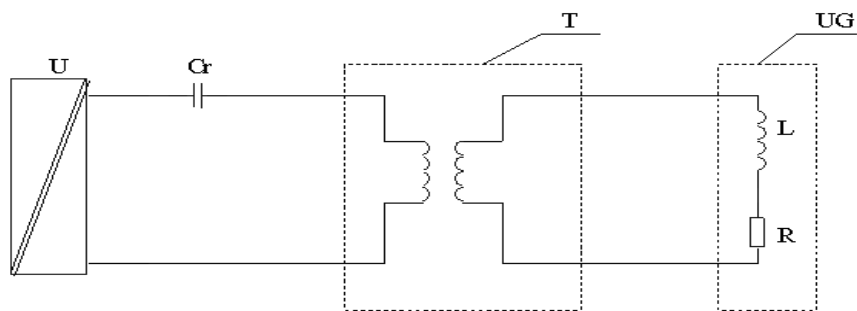
WPROWADZENIE

W procesie indukcyjnego nagrzewania generator zasila układ grzejny, przy czym ważnym jest, aby osiągnąć możliwie wysoką efektywność przekazywania mocy. Zwykle użytkownik dysponuje generatorem o ustalonych parametrach wyjściowych natomiast obciążenie w postaci układu grzejnego charakteryzuje się zmienną impedancją wynikającą z bieżących potrzeb technologicznych. Zatem koniecznym staje się użycie elementu dopasowującego złożony i kosztowny generator do różnych impedancji obciążenia. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest transformator dopasowujący, Rys. 1, który dzięki możliwości zmiany przekładni pozwala na dostosowanie impedancji obciążenia do parametrów wyjściowych generatora.

Rozważania teoretyczne wskazują, że w miejsce transformatora dopasowującego można wykorzystać układy pasywne złożone z indukcyjności oraz pojemności [1], [2], [3]. Jednakże nie są to rozwiązania tożsame. Różnią się pewnymi cechami funkcjonalnymi i konstrukcyjnymi, które zostaną przedstawione poniżej w artykule.

Transformator dopasowujący, charakteryzuje się między innymi, stałością przekładni, praktycznie niezależnie od częstotliwości (w zakresie jego pracy) oraz możliwością zapewnienia separacji galwanicznej – co stanowi o jego zaletach. Natomiast pod względem konstrukcyjnym jest dość złożonym podzespołem, co z kolei może czynić go kosztownym. Ponadto, niezależnie od

transformatora dopasowującego, do zapewnienia prawidłowej pracy generatora, konieczne jest użycie oddzielnych kondensatorów rezonansowych, jak to przykładowo (dla rezonansu szeregowego) pokazano na Rys. 1.



U – generator, Cr – kondensator rezonansowy, T – transformator dopasowujący
UG – układ grzejny, L, R – zastępcza indukcyjność i rezystancja

Rys. 1. Transformator jako element dopasowujący

Układy dopasowujące typu LLC [1], LCC [3], czy też bardziej złożone LCCL [2] stanowią pod względem konstrukcyjnym zespół oddzielnych łatwo konfigurowalnych elementów, którymi są dławiki oraz kondensatory rezonansowe. Tak więc, układy te zawierają konieczne kondensatory rezonansowe niezbędne do zapewnienia prawidłowej pracy generatora.

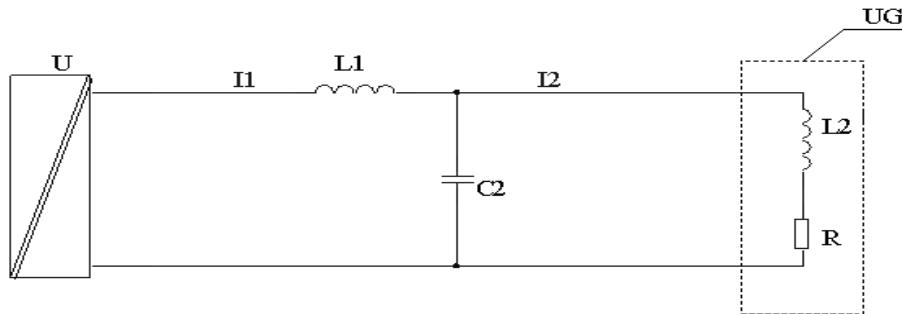
Tego typu układy mogą jednak rodzić problemy nie występujące przy stosowaniu transformatora, co wymaga szczegółowego przeanalizowania.

W artykule przeprowadzono taką analizę przy założeniu, że generator posiada strukturę falownika napięciowego, wykorzystującego rezonans szeregowy.

Do obliczeń symulacyjnych użyto programu Portunus.

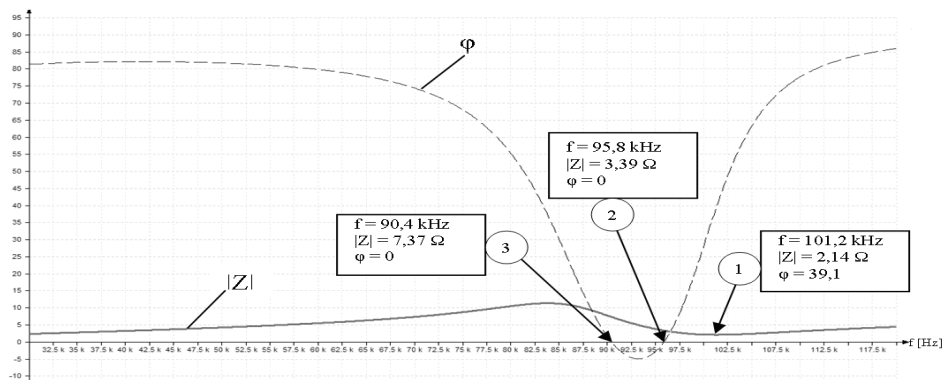
UKŁAD DOPASOWANIA TYPU LLC

Na rysunku Rys. 2. przedstawiono schemat połączenia generatora i obciążenia z wykorzystaniem obwodu typu LLC utworzonego z indukcyjności szeregowej L_1 , indukcyjności L_2 stanowiącej indukcyjność zastępczą układu grzejnego UG oraz kondensatora rezonansowego C_2 . Prezentowany układ jest obwodem 3-go rzędu, który w zależności od wartości użytych elementów może mieć dwie częstotliwości rezonansowe [1].

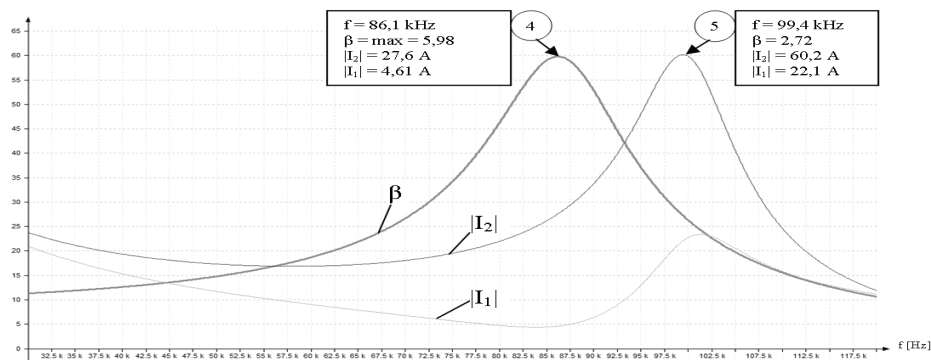


Rys. 2. Topologia układu dopasowania LLC

Jedną, f_1 wynikającą z rezonansu szeregowego indukcyjności L_1 i kondensatora C_2 oraz drugą f_2 wynikającą z rezonansu równoległego połączonych równolegle indukcyjności L_1 , L_2 oraz pojemności C_2 . Ze względu na zapewnienie stabilności całego układu korzystne jest utrzymywanie punktu pracy falownika przy częstotliwości $f \geq f_2$. Do. Na Rys. 3 przedstawiono, w funkcji częstotliwości, wykresy modułu impedancji wejściowej $|Z|$ oraz fazy φ otrzymane z obliczeń symulacyjnych wykonanych dla następujących wartości elementów układu: $L_1 = 9,18 \mu\text{H}$, $L_2 = 3,06 \mu\text{H}$, $C_2 = 1,1 \mu\text{F}$, $R = 0,28 \Omega$. Wykres wartości przekładni dynamicznej β określonej zależnością (1) oraz modułu prądu wejściowego $|I_1|$ i modułu prądu układu grzejnego $|I_2|$ w funkcji częstotliwości przedstawia Rys. 4.



Rys. 3. Charakterystyka modułu i fazy impedancji wejściowej układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości

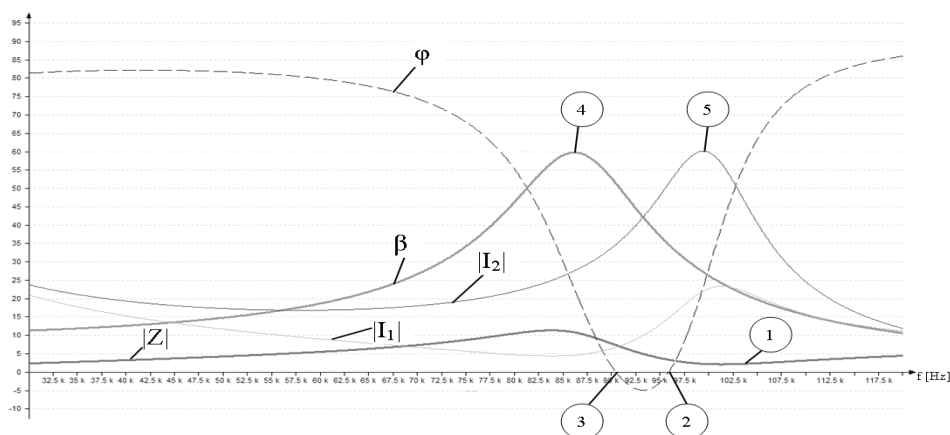


Rys. 4. Charakterystyka przekładni dynamicznej oraz modułów prądów I_1 , I_2 układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości

Przyjęty parametr dynamicznej przekładni β jest stosunkiem modułu prądu układu grzejnego do modułu prądu wejściowego całego układu LLC i wyraża się wzorem:

$$\beta = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (1)$$

Na przebiegach przedstawionych na Rys. 3 oraz Rys. 4 zaznaczono charakterystyczne punkty pracy układu od 1 do 5. Przebiegi te z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi zebrano na Rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyka parametrów układu dopasowania LLC w funkcji częstotliwości

Zaznaczone punkty charakterystyczne to:

- Pkt. 1 – charakteryzuje się najmniejszą wartością modułu impedancji $|Z_{min}| = 2,14 \Omega$ – co występuje dla $f = 101,2 \text{ kHz}$, $\varphi = 39,1^\circ$.
- Pkt. 2 – faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość $\varphi = 0$ – co występuje dla $f = 95,8 \text{ kHz}$, $|Z| = 3,39 \Omega$.
- Pkt. 3 – faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość $\varphi = 0$ – co występuje dla $f = 90,4 \text{ kHz}$, $|Z| = 7,37 \Omega$.
- Pkt. 4- przekładnia dynamiczna osiąga wartość maksymalną $\beta_{MAX} = 5,98$, – co występuje dla $f = 86,1 \text{ kHz}$, $|I_2| = 27,6 \text{ A}$, $|I_1| = 4,6 \text{ A}$.
- Pkt. 5 – prąd układu grzejnego UG osiąga wartość maksymalną $|I_{2MAX}| = 60,2 \text{ A}$ – co występuje dla $f = 99,4 \text{ kHz}$, $\varphi = 23,3^\circ$, $\beta = 2,72$, $|I_1| = 22,1 \text{ A}$.

Analizowany układ dopasowania 3-go rzędu typu LLC dla przyjętych wartości charakteryzuje się właściwościami, które mają szczególne znaczenie praktyczne:

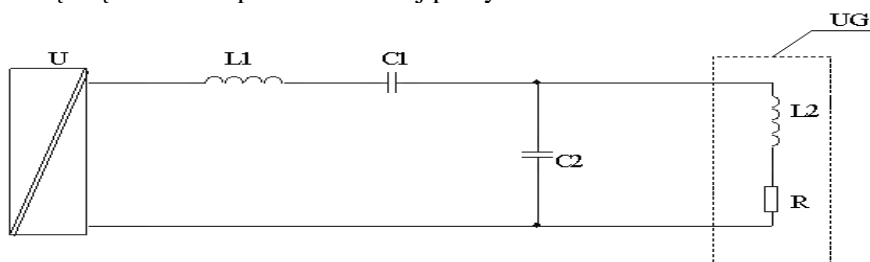
- nawet minimalna wartość modułu impedancji wejściowej jest znaczącą krotnością wartości rezystancji zastępczej UG – patrz Pkt. 1,
- przy danej wartości amplitudy napięcia zasilającego, maksymalna moc czynna jest wydzielana w UG przy częstotliwości dla której impedancja Z układu dopasowującego ma charakter indukcyjny ($\varphi = 23,3^\circ$), a nie czynny i występuje w pobliżu częstotliwości przy której moduł impedancji wejściowej osiąga swoje minimum $|Z_{min}|$. Przekładnia dynamiczna β jest wtedy w przybliżeniu równa $\beta \approx L_1/L_2$...– patrz Pkt. 5.

W praktycznych zastosowaniach w celu dopasowania układu obciążenia do wyjścia generatora należy dla wcześniej zdefiniowanych parametrów UG oraz wymaganej częstotliwości pracy wyznaczyć wartość indukcyjności szeregowej L_1 oraz kondensatora rezonansowego C_2 z zależności przedstawionych między innymi w pracy [1].

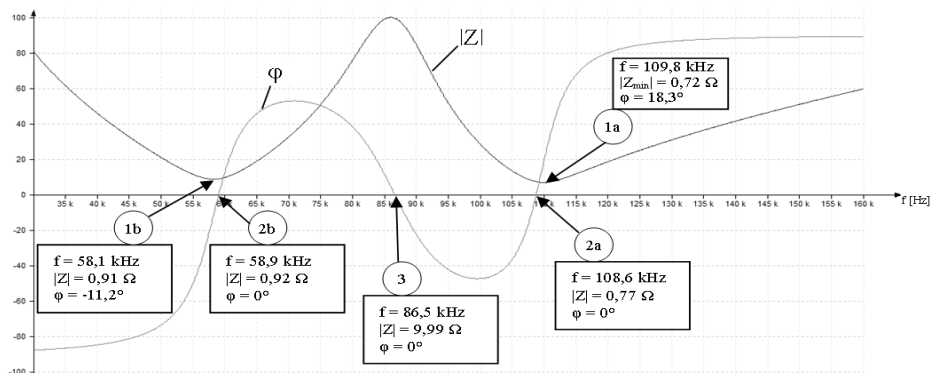
UKŁAD DOPASOWANIA TYPU LCCL

Układ dopasowania 4-go rzędu typu LCCL [2] przedstawiono na rysunku Rys.6. Ten rodzaj układu jest rzadko stosowany i dedykowany do obciążeń charakteryzujących się małą dobrocią. Na rysunkach Rys. 7 oraz Rys. 8. przedstawiono wyniki obliczeń parametrów układu w funkcji częstotliwości. W celu ułatwienia porównania z poprzednio analizowanym układem LLC do

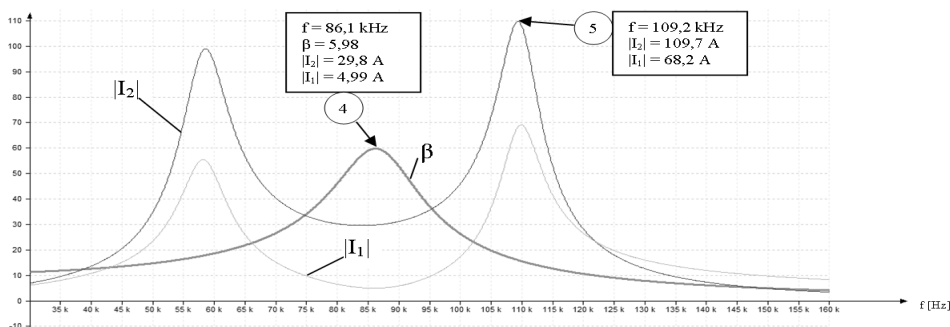
obliczeń przyjęto te same wartości L_1 , L_2 , R , oraz C_2 , natomiast wartość pojemności kondensatora szeregowego przyjęto $C_1 = 0,51 \mu\text{F}$ tak, aby uzyskać zbliżoną częstotliwość punktu stabilnej pracy.



Rys. 6. Topologia układu dopasowania LCCL



Rys. 7. Charakterystyka modułu i fazy impedancji układu dopasowania LCCL w funkcji częstotliwości



Rys. 8. Charakterystyka przekładni dynamicznej oraz modułów prądów I_1 , I_2 układu dopasowania LCCL w funkcji częstotliwości

Analizując parametry układu można wyróżnić 7 charakterystycznych punktów pracy:

- Pkt. 1a – charakteryzuje się najmniejszą wartością impedancji $|Z_{min}| = 0,72 \Omega$ – co występuje dla $f = 109,8 \text{ kHz}$, $\varphi = 18,3^\circ$.
- Pkt. 1b – drugie minimum wartości modułu impedancji przyjmuje wartość $|Z| = 0,91 \Omega$ – co występuje dla $\varphi = 0$, $f = 58,1 \text{ kHz}$.
- Pkt. 2a – faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość $\varphi = 0$ – co występuje dla $f = 108,6 \text{ kHz}$, $|Z| = 0,77 \Omega$.
- Pkt. 2b – faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość $\varphi = 0$ – co występuje dla $f = 58,9 \text{ kHz}$, $|Z| = 0,92 \Omega$.
- Pkt. 3 – faza impedancji wejściowej przyjmuje wartość $\varphi = 0$ – co występuje dla $f = 86,5 \text{ kHz}$, $|Z| = 9,99 \Omega$.
- Pkt. 4 – przekładnia dynamiczna osiąga wartość maksymalną $\beta_{MAX} = 5,98$ – co występuje dla $f = 86,1 \text{ kHz}$, $|I_2| = 29,8 \text{ A}$, $|I_1| = 4,99 \text{ A}$.
- Pkt. 5 – prąd układu grzejnego UG osiąga wartość maksymalną $|I_{2MAX}| = 109,7 \text{ A}$ – co występuje dla $\varphi = 8,7^\circ$, $109,2 \text{ kHz}$, $\beta = 1,60$, $|I_1| = 68,2 \text{ A}$.

W układzie dopasowania typu LCCL podobnie jak w poprzednio rozpatrywanym typu LLC minimalna wartość modułu impedancji wejściowej jest krotnością wartości rezystancji zastępczej UG (patrz Pkt. 1a) także, maksymalna moc czynna przekazywana do UG ma miejsce przy indukcyjnym charakterze impedancji Z układu dopasowującego ($\varphi = 8,7^\circ$) – patrz Pkt. 5.

Dobór wartości elementów układu jest złożony i wymaga większej uwagi [2] lecz uzyskuje się w obciążeniu większą moc czynną przy mniej indukcyjnym charakterze impedancji co pozwala na obniżenie strat łączeniowych i tym samym lepsze wykorzystanie półprzewodników mocy generatora w porównaniu z zastosowaniem układu typu LLC.

PODSUMOWANIE

W artykule przeanalizowano charakterystyki układów dopasowania typu LLC oraz LCCL jako alternatywę do zwykle stosowanego transformatora. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne parametrów, potwierdzają taką możliwość. Jednakże zmienność parametrów w funkcji częstotliwości wymaga przy doborze elementów uwzględnianie nie tylko parametrów UG oraz generatora, ale również zakładanej częstotliwości pracy. Sterownik generatora

wymusza częstotliwość pracy, która wynika z przyjętego algorytmu. Ten zaś jest określany na podstawie charakterystyki częstotliwościowej impedancji układu. Zatem zastosowanie układów dopasowujących typu LLC lub LCCL w miejsce transformatora upraszcza konstrukcję i obniża koszt materiałów, jednakże wymaga opracowania bardziej wyrafinowanego algorytmu sterowania. Z porównania uzyskanych w symulacjach parametrów układów LLC oraz LCCL wynika, iż ten ostatni chociaż bardziej złożony umożliwia lepsze wykorzystanie półprzewodników mocy oraz przekazanie do obciążenia większej mocy czynnej.

LITERATURA

- [1] Zheng Gao, Yueqing Zhou: „Research on Switching Losses for Induction Heating Power Supply with LLC resonant Load”. 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, pp2474-2477.
- [2] Zhang Z.J., Bergman N.W., Li H. M.: “Analysis and Design of LCCL Load matching Circuit for High-Frequency Induction Heating Series Resonant Inverter”, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 7, N. 5, pp. 5392-5399.
- [3] Li Jin-gang, Zhong Yan-ru, Zhao Miao: „Study on a New Method of Voltage-Source Induction Heating Load-Matched”, IPEMC 2006.

Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012.

PASIVE LOAD IMPEDANCY MATCHING CIRCUIT FOR INDUCTION HEATING

SUMMARY

Usually effective energy transfer from generator to the induction heated load need matching circuit. Well known way to achieve it is the matching transformer. In this article was presented another solution containing simple elements like inductances and capacitors.

Keywords: induction heating, matching systems.