

Układy dopasowania L-C oraz L-LC w falownikach klasy D do nagrzewania indukcyjnego – teoria i praktyka

Streszczenie. W artykule opisano dwa układy dopasowania wzбудnika do nagrzewnicy indukcyjnej z falownikiem klasy D - szeregowy L-C oraz szeregowo-równoległy L-LC. Zaproponowano niespotykane przekształcenie układu L-C na L-LC z wykorzystaniem tego samego kondensatora obwodu rezonansowego. Porównano falowniki 1,5kW/300 kHz z takimi obwodami wykazując zarówno korzyści zastosowania obwodu L-LC jak i jego wady.

Abstract. Two load matching circuits of Class D inverter for induction heating applications are presented in the paper: serial resonant L-C and series-parallel L-LC. The new reconfiguration of L-C into L-LC based on the same resonant capacitor is proposed. Two 1,5kW/300kHz inverters are compared to emphasize advantages as well disadvantages of L-LC circuit. (L-C and L-LC matching circuits in Class D inverters for induction heating – the theory and practice).

Słowa kluczowe: falownik klasy D, MOSFET, L-LC, nagrzewanie indukcyjne.

Keywords: Class D inverter, MOSFET, L-LC, induction heating.

Wstęp

Artykuł dotyczy tranzystorowego falownika napięciowego klasy D-ZVS [1]-[5] z tranzystorami MOSFET oraz układów typu L-C i L-LC dopasowania odbiornika, w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego. Na rysunku 1 pokazano schemat takiego falownika o strukturze półmostka z pojemnościowym dzielnikiem napięcia zasilania, zbudowanego w oparciu o tranzystory MOSFET. Wzбудnik ze wsadem reprezentowany jest dwójnikiem RL, który do wyjścia falownika (zaciski A₁, B₁) przyłączony jest za pośrednictwem układu dopasowania, składającego się z transformatora dopasowującego T_d i elementów biernych C, L_S. Na rysunku 1 pokazano dwa układy dopasowania: szeregowy L-C oraz szeregowo-równoległy L-LC.

Szeregowy układ dopasowania L-C jest prosty i najczęściej stosowany. Ma jednak wady, jak ta, że prąd wzбудnika i_2 przepływa w całości przez stronę wtórną transformatora T_d1. Falownik z takim układem obciążenia w literaturze klasyfikowany jest jako SL-SRI (Series Loaded Series Resonant Inverter) [6], [7], [8].

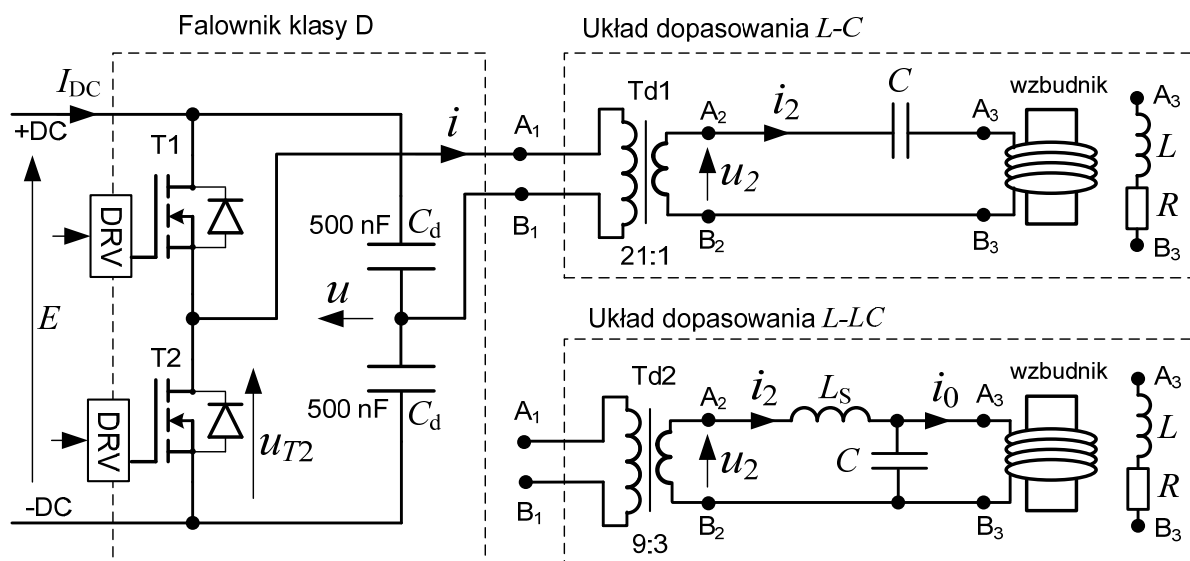
Szeregowo-równoległy układ dopasowania L-LC ma dodatkowy dławik L_S, a prąd i_2 strony wtórnej transformatora T_d2 może mieć kilkakrotnie mniejszą wartość niż prąd i_0

wzбудnika. Falownik z takim układem obciążenia, w literaturze klasyfikowany jest jako Hybrid SPL-SRI (Series-Parallel Loaded Series Resonant Inverter) [6], [7], [8].

Celem artykułu jest porównanie dwóch układów dopasowania L-C oraz L-LC (rys.1) współpracujących z falownikiem 300 kHz/1,5 kW. Porównanie odbędzie się w oparciu o zależności teoretyczne oraz wyniki pomiarowe. Przyjęto następujące założenia [9], [12]:

- oba układy zasilane są z falownika (rys.1) pracującego w klasie DE [10] z częstotliwością ok. (280-320) kHz,
- moc wejściowa falownika ($P_{DC}=E \cdot I_{DC}=1500$ W) oraz napięcie zasilania szyny DC ($E=300$ V) są jednakowe dla obu układów dopasowania,
- wzбудnik oraz umieszczony w nim wsad są takie same i mają jednakowe parametry RL,
- w obu przypadkach zastosowany jest ten sam kondensator C o pojemności znamionowej $C_N=660$ nF.

W literaturze znajdują się opisy układu dopasowania L-LC. Przykładowo w [8], [12] porównano obwody L-C oraz L-LC, podając zależności projektowe i przeliczeniowe, przy założeniu idealnego transformatora dopasowującego i takiej samej częstotliwości rezonansowej obu układów dopasowania



Rys.1. Falownik klasy D-ZVS z dwoma alternatywnymi obwodami dopasowania odbiornika: układ dopasowania szeregowy L-C, układ dopasowania szeregowo-równoległy L-LC

Takie podejście może być niepraktyczne, ponieważ projektant przy doborze kondensatora ograniczony jest ich typoszeregiem. W szczególnym przypadku projektant może zastosować tylko jeden kondensator C z typoszeregu.

W artykule opisano podejście bardziej praktyczne i niespotykane w literaturze. Projektując oba układy dopasowania, zastosowano ten sam kondensator C o pojemności znamionowej $C_N=660$ nF. Dopuszczono nieco inne częstotliwości rezonansowe dla układów $L-C$ i $L-LC$ (odpowiednio 280 kHz i 320 kHz). Taka różnica częstotliwości (40 kHz) stanowi 13% w odniesieniu do częstotliwości środkowej (300 kHz) i zwykle jest dopuszczalna dla procesu technologicznego. Motywacją do porównania obwodów dopasowania, a szczególnie do badania obwodu $L-LC$, są opisywane w literaturze [8] jego zalety w porównaniu do obwodu $L-C$:

- mniejszy prąd strony wtórnej transformatora Td2,
- większa odporność na zwarcia wzbudnika,
- mniejsza przekładnia transformatora dopasowującego Td2 w stosunku do przekładni transformatora Td1,
- mniejsza ilość zwojów po stronie pierwotnej transformatora Td2 (np. $n_1=9$ w układzie $L-LC$ w porównaniu do transformatora Td1 układu $L-C$, gdzie $n_1=21$). Tak duża liczba zwojów po stronie pierwotnej stwarza problemy konstrukcyjne lub uniemożliwia wykonanie transformatora dopasowującego Td1.

Właściwości obwodu dopasowania $L-LC$

Szeregowo-równoległy układ $L-LC$ (rys.1) charakteryzuje się dwiema częstotliwościami rezonansowymi. Częstotliwość rezonansu równoległego wynosi:

$$(1) \quad f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

natomiast częstotliwość rezonansu szeregowego, przy dużej wartości Q , wynosi:

$$(2) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_Z C}},$$

gdzie: L_Z to indukcyjność zastępcza wynikająca z równoległego połączenia ($L_S||L$) indukcyjności szeregowej L_S i indukcyjności zastępczej L wzbudnika ze wsadem.

Przy częstotliwości rezonansowej f_0 i maksymalnej mocy, przełączanie tranzystorów odbywa się z niewielkim wyprzedzeniem w stosunku do przejścia prądu i przez zero [8]. Jest to korzystne, ponieważ umożliwia przełączanie tranzystorów falownika w warunkach komutacji optymalnej lub suboptymalnej, podobnie jak w falowniku klasy DE [10]. Najważniejszą zaletą układu $L-LC$ jest mniejszy prąd strony wtórnej transformatora dopasowującego Td2 w porównaniu do prądu strony wtórnej transformatora Td1 w układzie $L-C$. W układzie $L-LC$ wartość skuteczna prądu wzbudnika I_0 jest większa niż wartość skuteczna prądu I_2 strony wtórnej transformatora Td2. Stosunek tych prądów, określany też wzmocnieniem prądowym H_i , opisany jest zależnością [8]:

$$(3) \quad H_i = \frac{I_0}{I_2} = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta+1}{Q}\right)^2}} = \beta \cos \varphi.$$

gdzie: $\beta=L_S/L$, $Q=\omega_0 L/R$ - dobroć układu wzbudnik-wsad. Zależność ta, dla małych wartości kąta φ (duża wartość dobroci Q), upraszcza się do postaci:

$$(4) \quad H_i \approx \beta = \frac{L_S}{L}$$

Na podstawie zależności (3), (4) można wysnuć wniosek, iż w przypadku falownika klasy D z układem dopasowania $L-LC$, prąd wtórny I_2 transformatora Td2 jest H_i razy mniejszy, niż w przypadku dopasowania szeregowego $L-C$. Ta korzystna właściwość układu $L-LC$ wykorzystywana jest w przypadku nagrzewania wsadów niemagnetycznych (Cu, Al, brąz) o małej wartości rezystancji zastępczej R , gdy dobroć układu wzbudnik-wsad jest duża, np. $Q > 20$.

Falownik i układy dopasowania

Uproszczony schemat falownika klasy D-ZVS pokazano na rysunku 1. Jest to układ półmostkowy z pojemnościowym dzielnikiem napięcia zasilania. Obwód DC zasilono stabilizowanym napięciem 300 V DC.

Dane falownika

Napięcie i prąd obwodu DC: $E=300$ V, $I_{DC}=5$ A
Moc wejściowa falownika: $P_{DC}=E \cdot I_{DC}=1500$ W
Moc wyjściowa falownika: $P=1,2$ kW
Częstotliwość pracy: $f_s=(200-500)$ kHz
Tranzystory Mosfet: APT5010JFLL, 41A/500V

Podzespoły układów dopasowania $L-C$ i $L-LC$

Kondensator C : $C_N=660$ nF, $C=667$ nF (wartość zmierzona), $U_{RMS}=700$ V, $I_{RMS}=500$ A, typ CSP180/300, prod. Celem, Wzbudnik Wz: średnica $d_{wew}=20$ mm, długość $l_{wzb}=50$ mm, N=6 zwojów, nawinięty rurką Cu o średnicy 4 mm, Wsad Ws: pręt stalowy gatunek 316L, niemagnetyczny, $\varnothing=6$ mm, $l=300$ mm, chłodzony wodą.

Parametry zastępcze wzbudnika ze wsadem:

- dla układu $L-LC$: $L=420$ nH, $R=18$ m Ω , $Q \approx 40$

- dla układu $L-C$: $L=447$ nH, $R=23$ m Ω , $Q \approx 40$.

Cewka L_S : $L_S=2$ μ H, helikalna, N=8, $l=35$ mm, $\varnothing=45$ mm

Transformator Td1 [10]: przekładnia $\varphi=n_1/n_2=21/1$, konstrukcja kubkowa współosiowa: $\varnothing=65$ mm, $l=95$ mm, 4 rdzenie toroidalne, uzwojenie pierwotne nawinięte przewodem typu lica, kubek chłodzony wodą. Przekładnie transformatora $\varphi=n_1/n_2=21/1$ dobrano tak, aby uzyskać moc $P_{DC}=1,5$ kW.

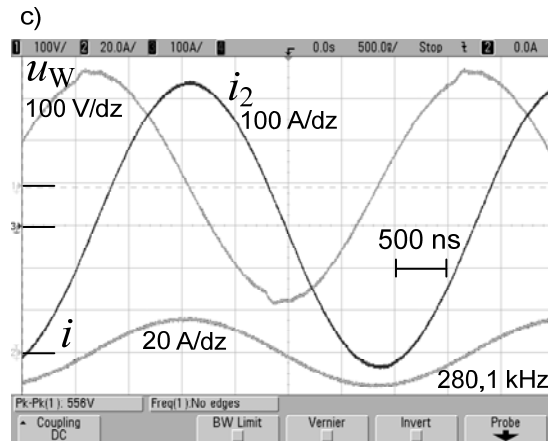
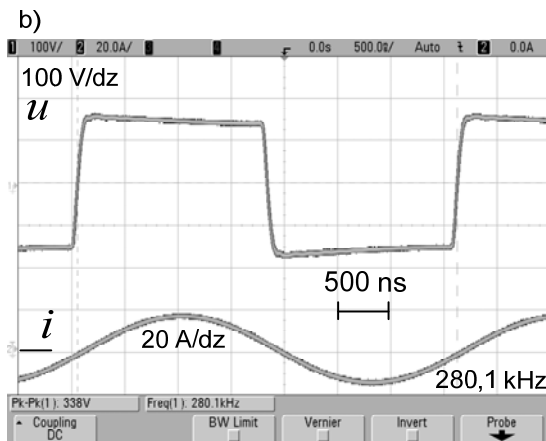
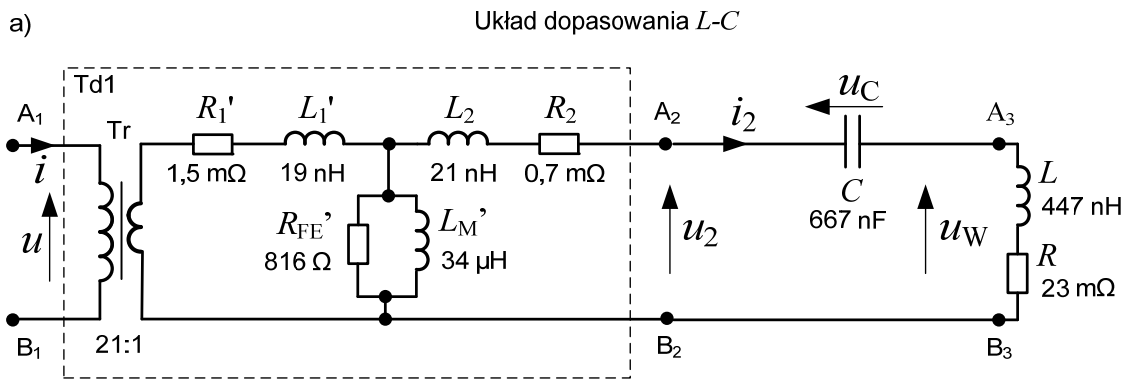
Transformator Td2: przekładnia $\varphi=n_1/n_2=9/3$, konstrukcja kubkowa o danych i wymiarach jak transformator Td1, po stronie wtórnej dwinięto dwa dodatkowe zwoje.

Pomiary układów dopasowania

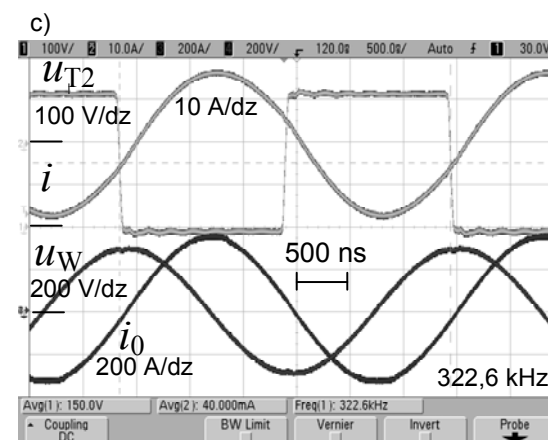
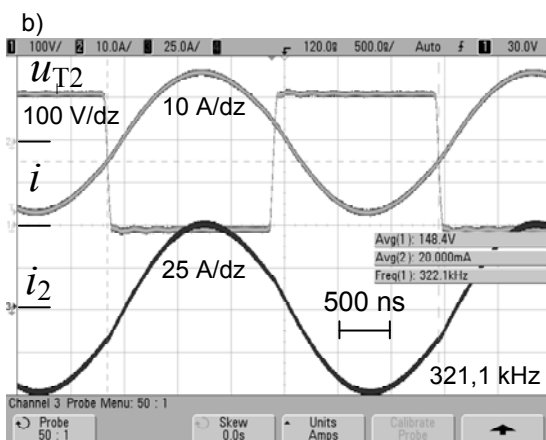
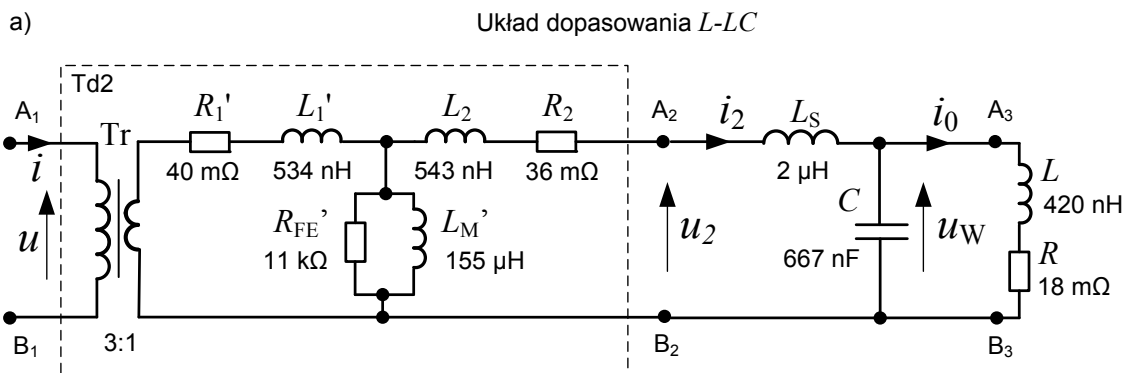
Badania falownika z układami dopasowania prowadzono w oparciu o analizę teoretyczną, symulacje komputerową oraz pomiary laboratoryjne. Na podstawie zależności analitycznych i wstępnych symulacji układów z transformatorem idealnym dobrano parametry obwodów dopasowania (przekładnie Td1 i Td2 oraz L_S). Następnie w układzie laboratoryjnym nieco skorygowano L_S aż do uzyskania jednakowych mocy P_{DC} dla obu układów dopasowania oraz przeprowadzono pomiary (rys.2 i rys.3). W kolejnym kroku zmierzono parametry wszystkich podzespołów oraz wyznaczono parametry schematów zastępczych transformatorów Td1 i Td2, wykorzystując znane procedury [9], [11]. W pomiarach wykorzystano analizator impedancji Agilent 4294A. Uzyskane schematy zastępcze układów dopasowania (rys.2a, rys.3a) pozwoliły na obliczenie charakterystycznych wielkości (częstotliwości rezonansowe, wzmocnienie prądowe H_i) oraz ich porównanie z wynikami pomiarów. Ponadto opracowano modele symulacyjne w programie Matlab-Simulink, uzyskując dobrą zgodność z wynikami pomiarów (różnice <5%). Porównanie wyników symulacji i pomiarów zamieszczono [9].

Pomiary układu $L-C$

Na rysunku 2a pokazano układ dopasowania $L-C$ z znanym schematem zastępczym transformatora Td1. Parametry schematu zastępczego Td1 sprowadzono na stronę wtórną oraz wprowadzono idealny transformator Tr o przekładni napięciowej 21:1.



Rys.2. Układ dopasowania $L-C$: a) schemat układu wraz ze schematem zastępczym transformatora dopasowującego Td1, b,c) oscylogramy napięć/prądów falownika przy mocy $P_{Dc}=1500$ W i częstotliwości rezonansowej $f_s \approx 280$ kHz



Rys.3. Układ dopasowania $L-LC$: a) schemat układu wraz ze schematem zastępczym transformatora dopasowującego Td2, b,c) oscylogramy napięć/prądów falownika przy mocy $P_{Dc} = 1500$ W i częstotliwości rezonansowej $f_s \approx 322$ kHz

Na rysunkach 2b i 2c zamieszczono oscylogramy napięć/prądów falownika przy mocy $P_{DC}=1500$ W i częstotliwości rezonansowej $f_s=280,1$ kHz. Odniesieniem dla przebiegów jest prąd wyjściowy i falownika, który pokazano na obu oscylogramach. Prąd wzbudnika i_2 jest jednocześnie prądem strony wtórnej transformatora, a jego wartość maksymalna $I_{2m}=340$ A (rys.2c). Obliczona częstotliwość rezonansowa wynosi:

$$(5) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_Z C}} = 279,3 \text{ kHz}$$

gdzie: $L_Z=L+L_1'+L_2=847$ nH oznacza całkowitą indukcyjność obwodu szeregowego z uwzględnieniem indukcyjności wzdłużnej transformatora dopasowującego, wzbudnika oraz doprowadzeń. Uzyskany wynik (279,3 kHz) jest zgodny wynikami pomiarów w rezonansie, przy którym częstotliwość przełączania wynosi $f_s=280,1$ kHz (rys.2b). Jest to zgodne z teorią przełączania przy komutacji maksymalnie miękkiej (klasa DE [10]), która jest możliwa, gdy częstotliwość przełączania f_s jest nieco większa niż częstotliwość rezonansowa f_0 .

Pomiary układu L-LC

Na rysunku 3a pokazano układ dopasowania L-LC z zaznaczonym schematem zastępczym transformatora Td2. Parametry schematu zastępczego Td2 sprowadzono na stronę wtórną oraz wprowadzono idealny transformator Tr o przekładni napięciowej 3:1. Na rysunkach 3b i 3c zamieszczono oscylogramy napięć/prądów falownika przy mocy $P_{DC}=1500$ W i częstotliwości rezonansowej $f_s=322$ kHz. Odniesieniem dla przebiegów jest prąd wyjściowy i falownika, który pokazano na obu oscylogramach. Amplituda tego prądu, $I_m=18$ A, jest taka sama jak w przypadku układu L-C, co jest zgodne z przyjętym założeniem, że oba układy pracują przy tej samej mocy P_{DC} i napięciu zasilania E .

W tym przypadku amplituda prądu i_2 strony wtórnej transformatora wynosi tylko $I_{2m}=50$ A, natomiast amplituda prądu i_0 wzbudnika wynosi $I_{0m}=350$ A (rys. 3c). Wzmocnienie prądowe wynosi $H_i=I_{0m}/I_{2m}=350\text{A}/50\text{A}=7$, co potwierdza główną zaletę układu dopasowania L-LC. Ponieważ dobroć odbiornika jest duża ($Q=40$), to uzyskano potwierdzenie zależności (4) według której:

$$\beta=(L_1'+L_2+L_S)/L=7,3\approx H_i.$$

Obliczona częstotliwość rezonansowa wynosi:

$$(6) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_Z C}} = 320,4 \text{ kHz}$$

gdzie: $L_Z=(L_1'+L_2+L_S)/L=370$ nH oznacza wypadkową indukcyjność obwodu szeregowo-równoległego. Uzyskany wynik (320,4 kHz) jest zgodny z wynikami pomiarów w rezonansie, przy którym częstotliwość przełączania wynosi $f_s=322$ kHz (rys.3b,c).

Wnioski

W artykule opisano wyniki badań dwóch układów dopasowania, tj. szeregowego L-C oraz szeregowo-równoległego L-LC. Wnioski z tych badań są następujące:

- Możliwe jest przekonfigurowanie układu dopasowania L-C na L-LC przy zastosowaniu tego samego kondensatora w obwodzie rezonansowym i zachowaniu takiej samej mocy wyjściowej. Zabieg taki wymaga zastosowania dodatkowego dławika oraz obniżenia przekładni transformatora dopasowującego.
- Zastosowanie tego samego kondensatora i wzbudnika ze wsadem powoduje, że w układzie L-LC częstotliwość

rezonansowa jest ok. (10-15)% wyższa niż w układzie L-C. W ogólnym przypadku, wartość ta zależy od stosunku indukcyjności dławika i wzbudnika ($\beta=L_S/L$) oraz dobroci Q odbiornika.

- Zastąpienie układu L-C układem L-LC skutkuje zmniejszeniem wartości prądu w uzwojeniu wtórnym transformatora, gdy $L_S>L$. W badanym układzie prąd zmniejszył się ok. 7-krotnie. Wynik ten jest zgodny z teorią, ponieważ wzmocnienie prądowe jest bliskie co do wartości stosunkowi indukcyjności dławika i wzbudnika ($\beta=L_S/L$).
- Obwód L-LC wymaga znacznie mniejszej przekładni napięciowej transformatora niż obwód L-C przy tej samej mocy, w szczególności gdy odbiornik ma dużą dobroć, np. $Q>10$. W badanych układach przekładnia zwojowa transformatora dopasowującego dla obwodu L-LC wynosiła 9:3 natomiast dla obwodu L-C wynosiła 21:1.
- Zidentyfikowanie parametrów zastępczych układów dopasowania (w tym transformatorów) pozwoliło na przeprowadzenie dokładnych obliczeń teoretycznych oraz symulacji komputerowych. Wyniki teoretyczne wykazują bardzo dobrą zgodność z pomiarami.

Autorzy: dr hab. inż. Marcin Kasprzak, mgr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul.B.Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marcin.kasprzak@polsl.pl, piotr.legutko@polsl.pl, inż.Kamil Kierepka, student, Wydz. Elektryczny, Politechnika Śląska

LITERATURA

- [1] Kasprzak M., Falownik klasy D-ZVS 300 kHz / 1,5 kW do nagrzewania indukcyjnego – możliwości pracy w klasie D i DE, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 4, 29-32
- [2] Citko T., Tunia H., Winiarski B., Układy rezonansowe w energoelektronice, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2001
- [3] Fujita H., Akagi H., Shinohara S.: A 2-MHz 6-kVA Voltage-Source Inverter Using Low-Profile MOSFET Module for Low-Temperature Plasma Generators. *IEEE Transactions of Power Electronics*, 14 (1999), n.6, 1014-1020
- [4] Kamli M., Yamamoto S., Abe M.: Applications A 50-150 kHz Half-Bridge Inverter for Induction Heating Applications, *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, 43 (1996), n.1, 163-171
- [5] Mućko J., Metody sterowania szeregowego falownika rezonansowego zapewniające jednoczesną komutację ZVS i „prawie ZCS”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 6, 137-142
- [6] Mućko J., Tranzystorowe falowniki napięcia z szeregowymi obwodami rezonansowymi. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Rozprawy nr 148, ISSN 0209-0597, Bydgoszcz 2011
- [7] Steigerwald R.L., A comparison of half-bridge resonant converter topologies. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 3 (1988), n.2, 174-182
- [8] Espf J.M., Dede E.J., Nawarro E., Sanchis E., Ferreres A.: Features and Deign of the Voltage-Fed L-LC Resonant Inverter for Induction Heating. Department of Electrical Engineering. University of Valencia, 1999 IEEE, 1126-1131
- [9] Kierepka K. Sz., Obwody dopasowania odbiornika nagrzewniczy indukcyjnej 1,5 kW/ 300 kHz, projekt inżynierski, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Gliwice, 2014 r.
- [10] Kasprzak M., Falowniki rezonansowe klasy D i DE o częstotliwościach pracy do 13,56 MHz, monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-037-8, Gliwice 2013
- [11] Grzesik B., Junak J., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M.: Identyfikacja parametrów modelu transformatora systemu nagrzewania indukcyjnego (0.5 MHz, 2kW), *Konferencja EPN*, 1998r.
- [12] Kasprzak M., Legutko P., Kierepka K., Porównanie układów dopasowania L-C oraz L-LC dla falownika klasy D 1,5 kW/300 kHz, *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1853, seria Elektryka*, (2014)., n.2-3, 83-94