

Zmienność topologii LCL i mała dobroć Q w układzie VSI-LCL

Streszczenie. Artykuł przedstawia niekorzystne warunki i zjawiska przy których występują ograniczenia mocy wyjściowej i zakresu sterowania układów VSI-LC(C)L. Analizie poddano przypadek pracy z małą dobrocią Q układu oraz zjawisko zmiany topologii obwodu rezonansowego.
Słowa kluczowe: falownik napięcia, grzejnictwo indukcyjne, topologia, obwód rezonansowy LC(C)L, ograniczenie pracy.

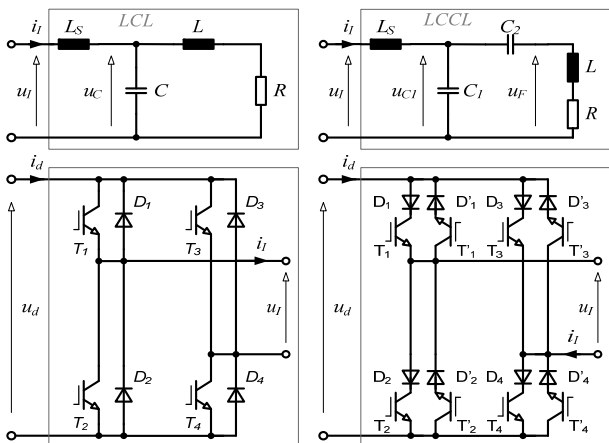
Abstract. The paper presents conditions and phenomena resulting in power and control limitations of induction heating VSI-LC(C)L system. The case of resonant load low quality factor Q has been considered. Also the resonant load topology changes phenomena is shown and investigated. (LCL topology variability and a low quality factor Q issue in the VSI-LCL system).

Słowa kluczowe: falownik napięcia, grzejnictwo indukcyjne, topologia, obwód rezonansowy LC(C)L, ograniczenie pracy.
Keywords: voltage source inverter, induction heating, topology, LC(C)L resonant circuit, operation limitation.

doi:10.12915/pe.2014.02.61

Wstęp

Doskonałe cechy aplikacyjne przekształtników z obwodami LC(C)L decydują o ich coraz szerszym stosowaniu. Obejmowany zakres mocy wyjściowych wynosi od 200W w zastosowaniach domowych do 8MW w układach przemysłowych grzejnictwa indukcyjnego, a sterowanie i konstrukcja są ciągle rozwijane [1,2,3]. Do podstawowych czynników determinujących ich popularność należy zaliczyć strukturę obwodu rezonansowego predestynowaną do budowy systemów modułowych oraz łatwość dopasowania napięciowego wyjścia falownika typu H do obciążenia. Układy falowników napięcia (VSI) z obciążeniem LC(C)L mają jednak pewne ograniczenia wynikające z topologii i przyjętego sposobu sterowania.



Rys.1. Schematy zastępcze układów rezonansowych LC(C)L oraz wariantowe schematy ideowe falownika

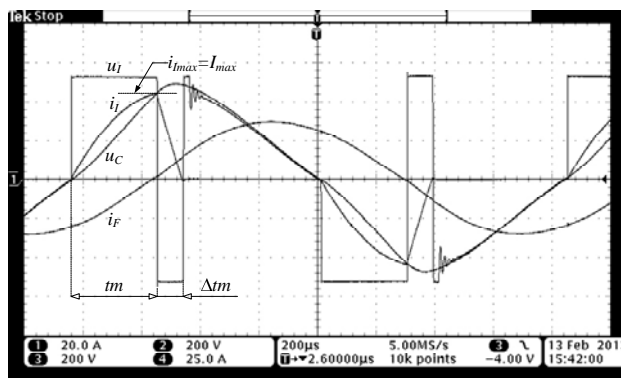
Celem artykułu jest przedstawienie niekorzystnych warunków i zjawisk, przy których mogą wystąpić ograniczenia mocy wyjściowej i zakresu sterowania układów VSI-LC(C)L. Należą do nich:

- praca w warunkach niskiej dobroci Q
- zmienność topologii obciążenia LC(C)L
- niesymetria przebiegów wyjściowych
- praca w warunkach dużej dobroci Q

Artykuł koncentruje się na dwu pierwszych punktach, a zagadnienie pracy w warunkach dużej dobroci przedstawiono w [4].

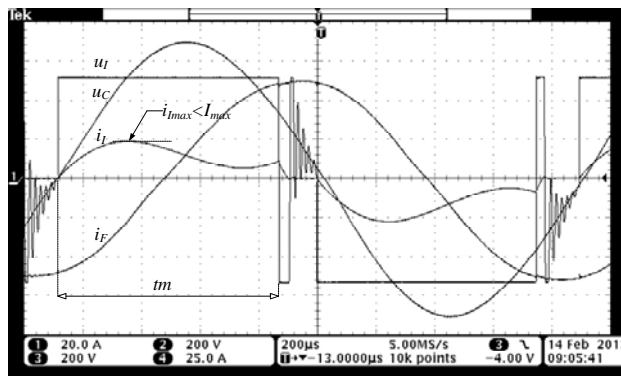
Mała dobroć Q obciążenia LCL

Niska dobroć układu obciążenia jest typowa w warunkach tzw. zimnego startu. Piec wypełniony jest całkowicie zimnym wsadem przeznaczonym do topienia.



Rys.2. Przebiegi napięć i prądów dla niskiej dobroci $Q=Q_{low}$ obciążenia LCL (zimny start)

Chwilowy prąd wyjściowy falownika i_I osiąga wówczas duże wartości. Są one wielokrotnie większe niż w warunkach znamionowych (rys.3), dla których układ VSI-LC(C)L jest projektowany.

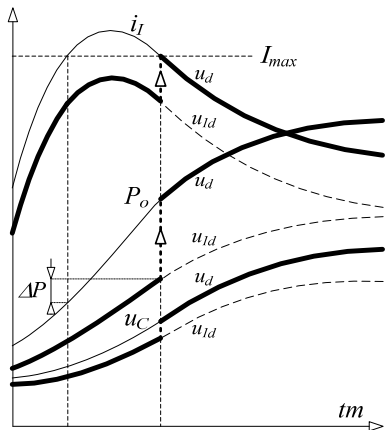


Rys.3. Przebiegi napięć i prądów dla warunków znamionowych obciążenia ($Q > Q_{low}$)

Jeśli w czasie startu prąd wyjściowy i_I osiągnie wartość maksymalną I_{max} , wynikającą z parametrów zaworów falownika, to dalsze zwiększanie czasu przewodzenia tm zaworów staje się niemożliwe, a moc (1) wyjściowa falownika osiąga wartość stałą.

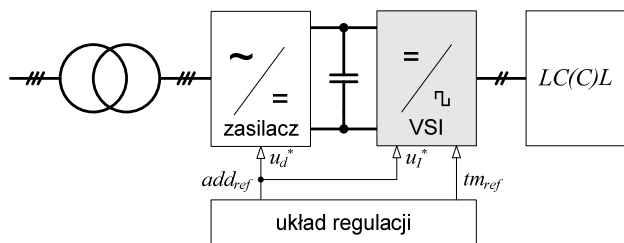
$$\begin{aligned}
 P_o(t) &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_I(\tau) \cdot i_I(\tau) d\tau \\
 (1) \quad &= u_d \frac{2}{T} \left(\int_0^{tm} i_I(\tau) d\tau - \int_{tm}^{\Delta tm} i_I(\tau) d\tau \right)
 \end{aligned}$$

Ograniczenie mocy wyjściowej przekłada się na zmniejszenie bądź brak wzrostu temperatury wsadu, uniemożliwiając jego topienie. Dostarczana do wsadu energia nie jest wystarczająca do zmiany jego parametrów fizyczno-chemicznych, a przekształtnik nie może zwiększyć mocy wyjściowej. Rozwiązaniem problemu jest zmniejszenie chwilowej wartości napięcia wyjściowego u_I falownika, na przykład zgodnie z charakterystykami sterowania $f(tm, u_d)$ pokazanymi na rysunku 4.



Rys.4. Charakterystyki sterowania układu VSI-LC(C)L ($u_d > u_{Id}$)

Zmniejszenie chwilowej wartości napięcia wyjściowego u_I powoduje zmniejszenie chwilowej wartości prądu wyjściowego i_I , a w konsekwencji jest możliwe zwiększenie czasu przewodzenia tm i zgodnie z zależnością (1) wzrost mocy wyjściowej. Dodatkowy tor regulacji napięcia, niezależny od podstawowego układu sterującego zmieniającego tylko czas tm przewodzenia zaworów, może być zrealizowany w dowolny sposób.



Rys.5. Schemat blokowy przekształtnika VSI-LC(C)L

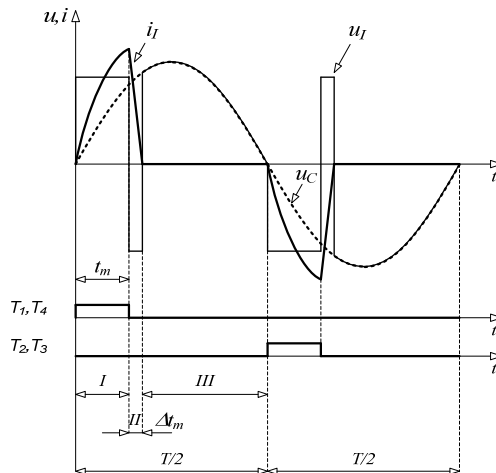
Poniżej przedstawiono tabelę akceptowalnych rozwiązań dotyczących układu zasilacza bądź modyfikacji falownika. Każde z nich zapewnia oddziaływanie na napięcie wyjściowe falownika poza głównym obwodem regulacji czasu przewodzenia tm zaworów falownika.

rodzaj układu	uwagi
prostownik półsterowalny $\Rightarrow u_d^*$	$\cos(\varphi)=1$ z wyjątkiem startu
prostownik PWM AC/DC $\Rightarrow u_d^*$	tylko dla mocy ułamkowych
prostownik + DC/DC $\Rightarrow u_d^*$	podwyższone straty
VSI-PWM $\Rightarrow u_I^*$	podwyższone straty
VSI trójpoziomowy $\Rightarrow u_I^*$	wzrost komplikacji, małe straty

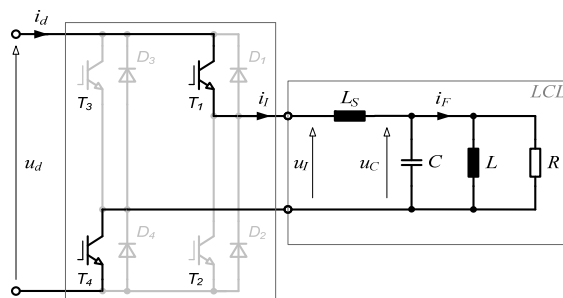
Dodatkowy tor zmian napięcia wyjściowego falownika, bez względu na przyjętą do zmiany wielkość (napięcie obwodu pośredniczącego u_d lub bezpośrednio napięcie wyjściowe u_I) zawsze powoduje komplikację układu przekształtnika lub wzrost strat. Obecnie najczęściej stosowanym zasilaczem układów VSI-LC(C)L dużej mocy jest prostownik półsterowalny, który dodatkowo gwarantuje wymagane, łagodne ładowanie baterii kondensatorów obwodu pośredniczącego przy rozruchu systemu.

Zmienność topologii obciążenia LCL

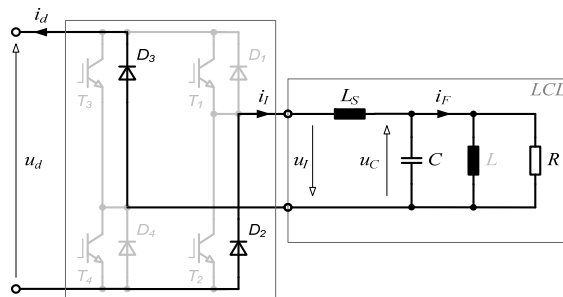
Przedstawione na rysunku 1, powszechnie używane schematy zastępcze układów rezonansowych LC(C)L nie są bezpośrednio adekwatne do opisu mogących wystąpić zjawisk. Jednym z nich jest zmienność topologii układu LCL (LCCL). Zmiana topologii wynika z nieciągłego charakteru prądu wejściowego i_I układu. Poniższe rysunki ilustrują zmienność schematu zastępczego kolejnych fazach przewodzenia prądu i_I falownika z obciążeniem LCL.



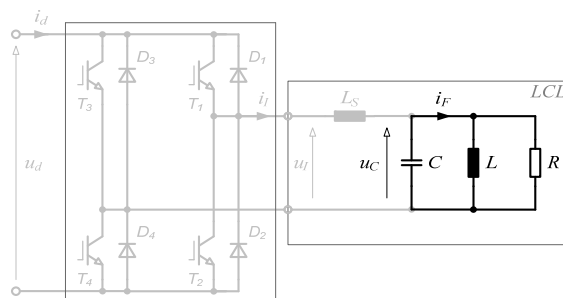
Rys.6. Podstawowe przebiegi napięć i prądów oraz sygnałów sterujących w kolejnych fazach (I,II,III) przewodzenia



Rys.7. Ścieżki przepływu prądów w I-jej fazie przewodzenia

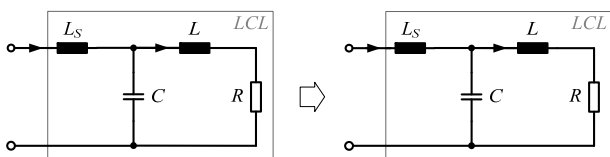


Rys.8. Ścieżki przepływu prądów w II-jej fazie przewodzenia



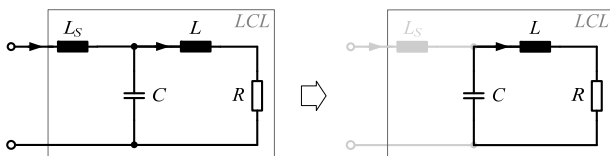
Rys.9. Ścieżki przepływu prądów w III-jej fazie przewodzenia

W rozważanym przypadku, dla układu LCL powstają dwa schematy – pierwszy (rys.10) bez zmian topologicznych oraz drugi (rys.11) ograniczony do elementów C - L - R .



Rys. 10. Schemat podstawowy i wynikowy - faza I+II

$$i_I \neq 0; \quad t \in (0, tm + \Delta tm)$$

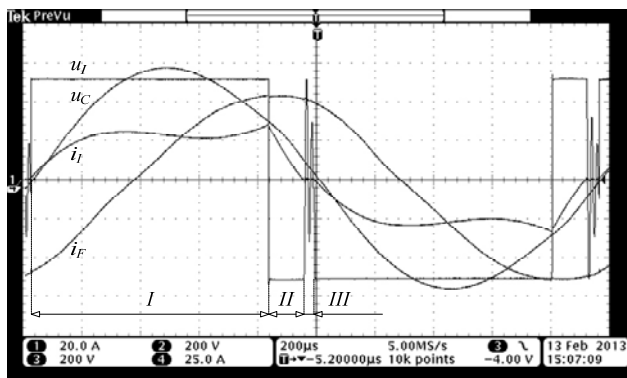


Rys. 11. Schemat podstawowy i wynikowy - faza III

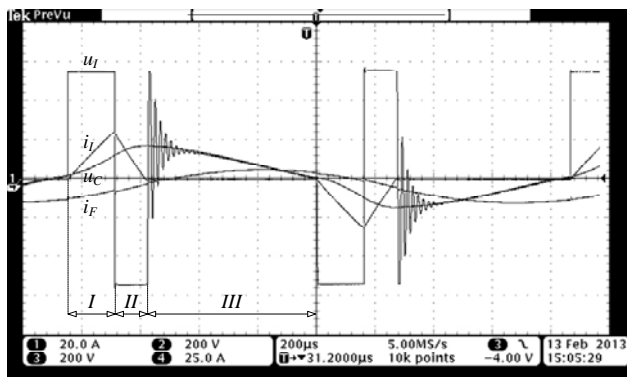
$$i_I = 0; \quad t \in (tm + \Delta tm, T/2)$$

Konsekwencją zmiany topologii jest fluktuacja wszystkich parametrów obwodu rezonansowego – dobroci Q , impedancji Z , pulsacji rezonansowej ω_0 itd – przy niezmiennych wartościach elementów układu. Przy stałej wartości pozostałych zmiennych układu (np. u_d), nowe wynikowe parametry układu rezonansowego będą funkcjami sygnału sterującego tm , gdyż od niego zależy chwila zmiany topologii.

Klarownym obrazem opisanego zjawiska są oscylogramy na rysunkach 12 i 13. Pokazują one przebiegi napięć i prądów w układzie VSI- LCL dla wybranych wartości sygnału sterującego tm przy ustalonych, wszystkich pozostałych parametrach. Wynikowa, rezonansowa częstotliwość f_0^* pracy zależy od sygnału sterującego.



Rys. 12. Stałe wysterowanie ($tm=810\mu s$) i parametry $\Rightarrow f_0^*=518\text{Hz}$



Rys. 13. Stałe wysterowanie ($tm=160\mu s$) i parametry $\Rightarrow f_0^*=585\text{Hz}$

Podstawowa, rezonansowa pulsacja układu LCL przed i po zmianie topologii wynosi odpowiednio:

$$(2) \quad \omega_{0(I,II)} = \frac{1}{\sqrt{2L_s}\sqrt{L_s C}} \sqrt{L^2 + 2L_s L - R^2 L_s C - \sqrt{\beta}}$$

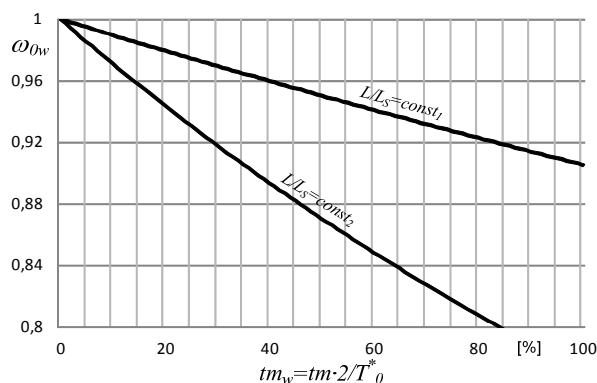
$$\text{gdzie } \beta = L_s^2 C^2 R^4 + (2L_s L^2 C - 4L_s^2 L C) R^2 + L^4$$

$$(3) \quad \omega_{0(III)} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Przyjmując $\omega_{0(III)}$ jako pulsację odniesienia i oznaczając rzeczywistą pulsację pracy układu przekształtnika jako ω_{0w}^* możemy określić jej wartość względną:

$$(4) \quad \omega_{0w} = \omega_{0w}^* \cdot \sqrt{LC} = f(tm)$$

Graficzną reprezentację zależności (4) przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Zależność względnej pulsacji rezonansowej ω_{0w} obwodu obciążenia LCL od sygnału sterującego tm_w falownikiem

Dokonując analizy teoretycznej, bez uwzględnienia wszystkich ograniczeń układu rzeczywistego, można określić przedział pulsacji drgań własnych ω_{0w} układu o zmiennej topologii:

$$(5) \quad \omega_{0w} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2L_s L}} \sqrt{L^2 + 2L_s L - R^2 L_s C - \sqrt{\beta}} \right\}$$

Zależność (5) wykazuje, iż zmienność pulsacji drgań własnych może być bardzo duża. W układach praktycznych, ze względu na ograniczony stosunek L/L_s , zmiany nie przekraczają dwudziestu procent. W przypadku przekształtników stosowanych do nagrzewania indukcyjnego mogą jednak mieć istotny wpływ na sprawność procesu, modyfikując głębokość wnikania pola we wsad.

Wnioski

Rezonansowe obwody obciążenia $LC(C)L$ zasilane z falowników napięcia są coraz szerzej stosowane w grzejnictwie indukcyjnym, cechując się bardzo dobrymi właściwościami aplikacyjnymi. Wybrana struktura falownika i sposób sterowania mogą jednak powodować powstawanie warunków i zjawisk zmieniających charakter układu, ograniczających zakres sterowania oraz moc wyjściową układu.

W artykule przedstawiono problem pracy układu przy małej dobroci Q obciążenia i wskazano techniczne metody rozwiązania tego zagadnienia.

Wprowadzono pojęcie i omówiono zjawisko zmian topologii rezonansowego układu LCL oraz określono zakres wartości wynikowej pulsacji rezonansowej. Warunkiem koniecznym zmian topologii jest nieciągłość prądów wewnątrz obwodu rezonansowego.

Przeprowadzono badania eksperymentalne i pokazano wyniki ściśle obrazujące prezentowane zjawiska.

LITERATURA

- [1] Schönknecht A., De Doncker R.W., Novel Topology for Parallel Connection of Soft Switching, High Power, High Frequency Inverters, *IEEE IAS, 36th Annual Meeting*, Chicago, 2001, pp. 1477-1482

- [2] Saichol Chudjarjeen, Anawach Sangswang, Chayant Koopai, An Improved LLC Resonant Inverter for Induction-Heating Applications With Asymmetrical Control, *IEEE Trans. on IE*, vol. 58, no. 7, (2011), 2915-2925
- [3] Hyoyol Yoo, Eunyong Shim, Jeabong Kang, Gilyong Choi, Changyo Lee, Byeongsu Bang, 6100kHz IGBT Inverter Use of LCL Topology For High Power Induction Heating, *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea, 1572-1575
- [4] Dzieńiakowski M.A., Układ falownika napięcia z obwodem LCL o dużej dobroci Q , *Przegląd Elektrotechniczny*, 12b (2012), 283-286

Autor: dr inż. Maciej A. Dzieńiakowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: mad@isep.pw.edu.pl