ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

Bogusław GRZESIK

Marcin KASPRZAK

FALOWNIKI ŚREDNIEJ I WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI DO NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO - STAN AKTUALNY

Streszczenie. Wstęp zawiera charakterystykę urządzeń falownikowych do nagrzewania indukcyjnego. Pierwsza część zawiera omówienie rozwiązań podstawowych falowników przeznaczonych do nagrzewania indukcyjnego, gdzie podano zasady ich funkcjonowania i właściwości. W drugiej części przedstawiono przegląd urządzeń falownikowych oferowanych przez liczące się europejskie firmy wytwarzające urządzenia do nagrzewania indukcyjnego. Przegląd zawiera główne dane: moc, częstotliwość, typ falownika oraz typ stosowanych zaworów. Trzecia część zawiera krótki przegląd publikacji naukowych poświęconych nagrzewaniu indukcyjnemu.

MEDIUM AND HIGH FREQUENCY INVERTERS FOR INDUCTION HEATNING - A REVIEW

Summary. The characterisation of a systems for induction heating, containing inverter, is given at the begining. Basic topologies of inverters for induction heating are described in the first part of the paper - there are principles of operation and its feautures presented in this part. The review of the offert given by main European firms producing equipment for induction heating is presented in the second part. It gathers such data as rated power, frequency, topology and types of switches. The final part contains the short review of recently published papers devoted to induction heating.

ИНВЕРТОРЫ СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА - СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Резюме. Во введении представлена характеристика систем для индукционного нагрева, содержащих инвертор. Основные топологии инверторов для индукционного нагрева описаны в пиервой части статьи, в частности даются принципы действия и свойства инверторов. Во второй части представлен обзор устройств ведущих европиских фирм, выпускающх оборудование для индукционного нагрева. Она приводит такие данные как номинальная мощность, частота, топология и типы вентилей. Заключительная часть содержит краткий обзор недавно опубликованых статей, посвященных индукционному нагреву.

1. WSTĘP

Przedstawiany materiał stanowi wyniki pierwszego etapu obszerniejszej całości, której celem jest teoretyczne i laboratoryjne porównanie podstawowych struktur falowników rezonansowych przeznaczonych do nagrzewania indukcyjnego w zakresie częstotliwości kilkudziesięciu do kilkuset kHz. Wyniki zaplanowanej analizy porównawczej są przeznaczone zarówno dla konstruktorów, jak i użytkowników tego rodzaju urządzeń.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie stanu aktualnego w zakresie falowników o częstotliwościach do kilkuset kHz przeznaczonych do nagrzewania indukcyjnego. Materiał został opracowany na podstawie najnowszych danych podawanych przez producentów falowników oraz na podstawie danych zawartych w literaturze naukowej. Stan aktualny dostępnych na rynku urządzeń falownikowych dotyczy firm europejskich. Przegląd światowej literatury naukowej pozwala sądzić, że produkowane w Europie urządzenia nie odbiegają od urządzeń światowych.

Stan aktualny omówiono głównie na tle dwóch podstawowych struktur falowników rezonansowych: 1) falownika szeregowego (rys.2.1) oraz falownika równoległego (rys.3.1). Falowniki te stanowią pewien rodzaj odniesienia. Wspomniano również o falowniku E, który jest jedynym falownikiem umożliwiającym uzyskanie częstotliwości pracy rzędu kilku MHz.

Urządzenie falownikowe do nagrzewania indukcyjnego charakteryzowane jest zazwyczaj za pomocą następujących parametrów i czynników [9,22,29]:

- zakres częstotliwości,
- zakres mocy,
- sprawność,
- napięcie zasilające,
- typ obwodu głównego falownika,
- typ zaworów (określony typ tranzystora, tyrystory GTO),
- moc zainstalowana,
- rodzaj sterowania (analogowe, cyfrowe, mikroprocesorowe),
- zabezpieczenia (od zwarć, od przerw, od skutków wahań napięcia zasilającego, od doziemień)
- sposób komunikacji z otoczeniem (np. łacze szeregowe),
- sposób przyłączenia induktora do falownika (bezpośrednio, kablem koncentrycznym),
- typ chłodzenia,

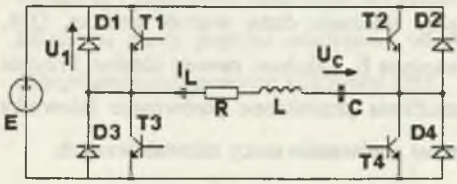
- poziom zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej (prąd odkształcony, moc bierna),
- poziom zakłóceń elektromagnetycznych,
- poziom zakłóceń akustycznych,
- konstrukcja mechaniczna (stacjonarna, przewoźna, przeciwwybuchowa itp.),
- gabaryty,
- masa,
- stopień niezawodności,
- wyposażenie dodatkowe (np. pomiar temperatury),
- cena.

2. PODSTAWOWE RODZAJE FALOWNIKÓW

Opisywane falowniki są podstawowymi układami, które mogą być stosowane do nagrzewania indukcyjnego w zakresie od 1 kHz do około 1 MHz. Wartość możliwej do uzyskania częstotliwości przy danym typie falownika oraz danych parametrach znamionowych i określonym typie zaworu jest wyznaczona przez wartość strat komutacyjnych. Omówienie zasad funkcjonowania poszczególnych falowników służy wskazaniu przyczyn powstawania strat komutacyjnych i możliwości ich zmniejszenia.

2.1. Falownik rezonansowy szeregowy napięciowy [17,2,1,11]

Falownik rezonansowy szeregowy napięciowy pokazano na rys. 1. Zasilany jest on ze źródła napięciowego E. Zbudowany jest z czterech zaworów sterowanych, prądowo jednokierunkowych, T1-T4. Równolegle do nich włączone są diody D1-D4. Pomiędzy punkty środkowe obydwu półmostków T1,T3 - T2,T4 włączony jest szeregowy obwód rezonansowy RLC (ω_0 jest jego częstotliwością drgań nietłumionych). Odbiornik RLC



Rys. 1. Schemat falownika rezonansowego szeregowego napięciowego
Fig. 1. Voltage fed series resonant inverter

(wzbudnik wraz ze wsadem) jest reprezentowany przez rezystancję R i pewną część indukcyjności L. Zawory falownika przełączane są z częstotliwością ω_i. Wyróżnia się trzy zakresy częstotliwości przełączania ω_i/ω_o, które wyznaczają trzy sposoby pracy:

I - $0<\omega_i<0.5\omega_o$

II - $0.5\omega_o<\omega_i<\omega_o$

III - $\omega_o<\omega_i$

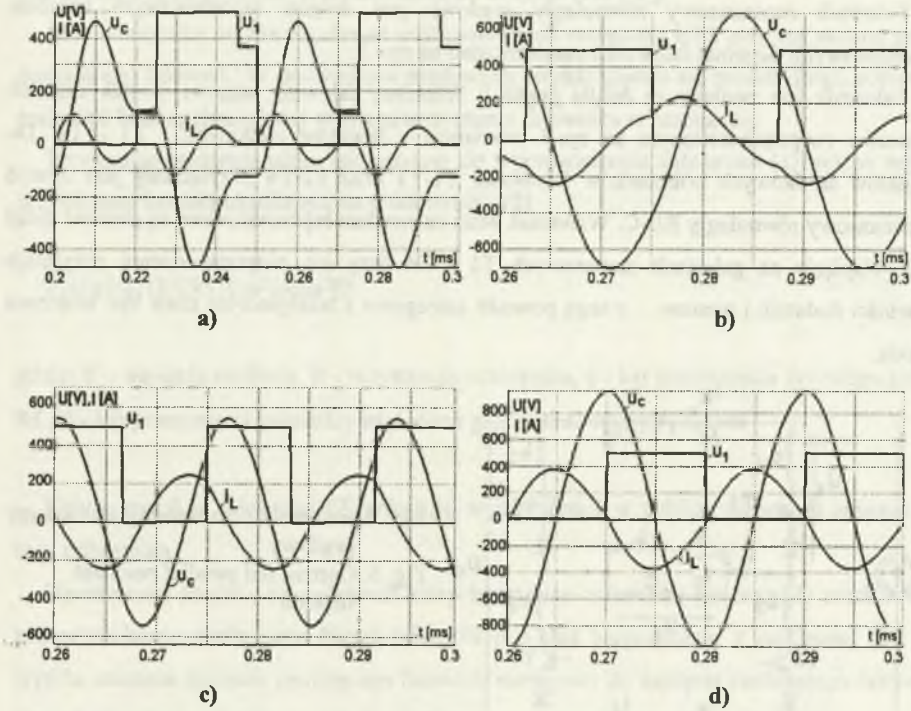
Przebiegi czasowe napięcia kondensatora u_C , napięcia u_1 zaworu T1 pokazano odpowiednio na rys. 2. a, b, c. Minimalne względne straty uzyskuje się, gdy $\omega_i/\omega_o=1$ - układ jest w rezonansie - rys. 2.d. Zachodzi to na granicy II i III sposobu pracy. Załączanie i wyłączanie zaworów zachodzi przy zerowym prądzie. Niekorzystnym zjawiskiem jest to, że załączanie zaworów sterowanych zachodzi przy dużej wartości napięcia. Należy zwrócić uwagę na III sposób pracy, w którym załączanie zaworów sterowanych T* zachodzi w bardzo korzystnych warunkach - przy zerowym prądzie i zerowym napięciu. Przy wyłączaniu panują warunki niekorzystne - zachodzi ono przy niezerowym prądzie i niezerowym napięciu na zaworach. Zerowe napięcie na załączanych zaworach T* umożliwia zastosowanie obwodów odciążających (przyłączonych równolegle do zaworów T*) w postaci kondensatorów - daje to radykalne zmniejszenie strat komutacyjnych. Potwierdzeniem tego jest praca [N1], w której zaprezentowano falownik na tranzystorach bipolarnych pracujący zgodnie z III sposobem, zawierający kondensatory odciążające, przy czym osiągnięto częstotliwość 100 kHz, co jest znacznym osiągnięciem.

Regulacja mocy odbiornika $(I_{L(rms)})^2R$ jest realizowana najczęściej poprzez regulację napięcia E. Moc odbiornika (R) falownika można obliczyć według przybliżonej zależności:

$$P_s=(\pi^2/8)\,(E^2/R)\cos\beta \qquad (1)$$

gdzie: E - napięcie zasilania, R - rezystancja odbiornika oraz β - kąt przesunięcia pomiędzy napieciem gałęzi RLC oraz jej prądem.

Zależność ta została wyprowadzona przy przy założeniu dużej wartość dobroci, $Q\geq 8$, pracy w pobliżu rezonansu, zasilaniu ze źródła napięcia E. Założono zawory idealne. Przyjęte założenia oraz bezpośrednio zależność (1) umożliwia przybliżone porównanie falownika szeregowego z falownikiem równoległym, np. przez porównanie mocy zainstalowanych.



Rys. 2. Przebiegi czasowe prądu odbiornika - i_L, napięcia na zaworze T1 - u_1 oraz napięcia na kondensatorze C - u_c falownika z rys.1; a) I sposób pracy: $0<\omega_i<0.5\omega_o$, b) II sposób pracy: $0.5\omega_o<\omega_i<\omega_o$, c) III sposób pracy: $\omega_o<\omega_i$, d) praca przy rezonansie $\omega_i/\omega_o=1$

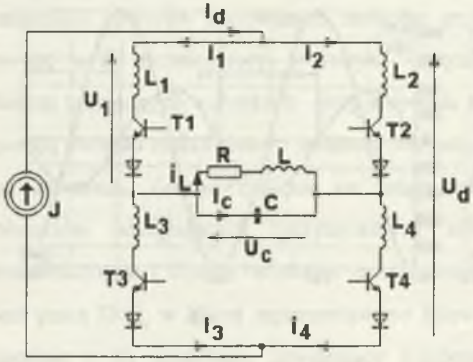
Fig. 2. Waveforms of load current - i_L, T1 switch voltage - u_1 and capacitor C voltage - u_c of inverter shown in Fig. 2.1.1; a) I-rst mode of operation: $0<\omega_i<0.5\omega_o$, b) II-nd mode of operation: $0.5\omega_o<\omega_i<\omega_o$, c) III-rd mode of operation: $\omega_o<\omega_i$, d) operation in resonance $\omega_i/\omega_o=1$

Możliwa jest regulacja mocy odbiornika poprzez odstrojenie od częstotliwości rezonansowej - niewielkie odstrojenie od rezonansu odpowiada w przybliżeniu zmianie kąta β. Regulacja mocy poprzez odstrojenie od rezonansu nie jest stosowana w falownikach o częstotliwościach powyżej kilkunastu kHz.

2.2. Falownik rezonansowy równoległy prądowy [10,2,4,1]

Falownik rezonansowy równoległy prądowy jest drugim rezonansowym układem podstawowym. Schemat falownika zamieszczono na rys. 3.

Falownik jest zasilany ze źródła prądu J. Właściwy falownik stanowi mostek czterech zaworów (w przedstawionym na rys.3. wariancie - zaworów złożonych) T1 - T4. Do punktów środkowych półmostków falownika T1-T3 oraz T2-T4 przyłączony jest obwód rezonansowy równoległy RL-C. Wzbudnik wraz ze wsadem reprezentowane są poprzez gałąź RL. Napięcie na gałęziach zaworowych T1 - T4 przy ich nieprzewodzeniu przyjmuje wartości dodatnie i ujemne - z tego powodu szeregowo z tranzystorem musi być włączona dioda.



Rys. 3. Falownik rezonansowy równoległy prądowy
Fig. 3. Current fed parallel resonant inverter

Przy zastosowaniu symetrycznych napięciowo tyrystorów GTO nie jest konieczne stosowanie szeregowej diody. Indukcyjności L1 - L4 reprezentują indukcyjności montażowe lub indukcyjności włączone celowo dla ograniczenia di/dt. Falownik ten jest dualny w stosunku do falownika szeregowego. Charakterystyczne stany pracy falownika można zilustrować za pomocą przebiegów czasowych napięć i prądów z rys. 4. Indukcyjności L1 - L4 mają wartości równe zero. Przebiegi na rys. 4.a sporządzono dla II sposobu pracy:$\omega_o<\omega_i$ - w taki sposób pracują falowniki tyrystorowe. Na rys. 4.c. zamieszczone są przebiegi przy III sposobie pracy: $\omega_o>\omega_i$. III sposób pracy można zrealizować tylko za pomocą zaworów sterowalnych (tranzystory, tyrystory GTO). Warunki komutacji zaworów zarówno przy II, jak i przy III sposobie pracy są niekorzystne. Najniższą wartość strat komutacji uzyskuje się w rezonansie, tzn. przy $\omega_i=\omega_o$ - stan taki przedstawiono na rys. 4.b. W przypadku gdy indukcyjności L1 - L4 mają wartości różne od zera, to w celu zminimalizowania strat sterownie realizowane musi być tak, jak pokazuje rys. 4.d - osiąga się tu mniejsze straty od

strat powstających przy $\omega_i=\omega_o$, gdy $L_1=L_2=L_3=L_4=0$. Częstotliwości osiągane w tego typu falownikach są na poziomie kilkudziesięciu do kilkuset kHz [2].

Moc odbiornika można regulować odstrojeniem od rezonansu lub/i poprzez zmianę prądu zasilającego falownik. W falownikach prądowych zwykle stosuje się sposób drugi, ponieważ realizacja komutacji miękkiej wymaga utrzymania falownika w rezonansie.

Przyjmując założenia takie, jak przyjęto do wyprowadzenia zależności (1) można ustalić przybliżoną formułę określającą moc odbiornika (2).

$$P_r=(\pi^2/8)\,(E^2/R)\,(\cos^2\phi/\cos^2\beta) \qquad (2)$$

gdzie: E - napięcie zasilania, R - rezystancja odbiornika, ϕ - kąt przesunięcia fazowego gałęzi RL, β - kąt przesunięcia pomiędzy napięciem gałęzi RLC oraz jej prądem.

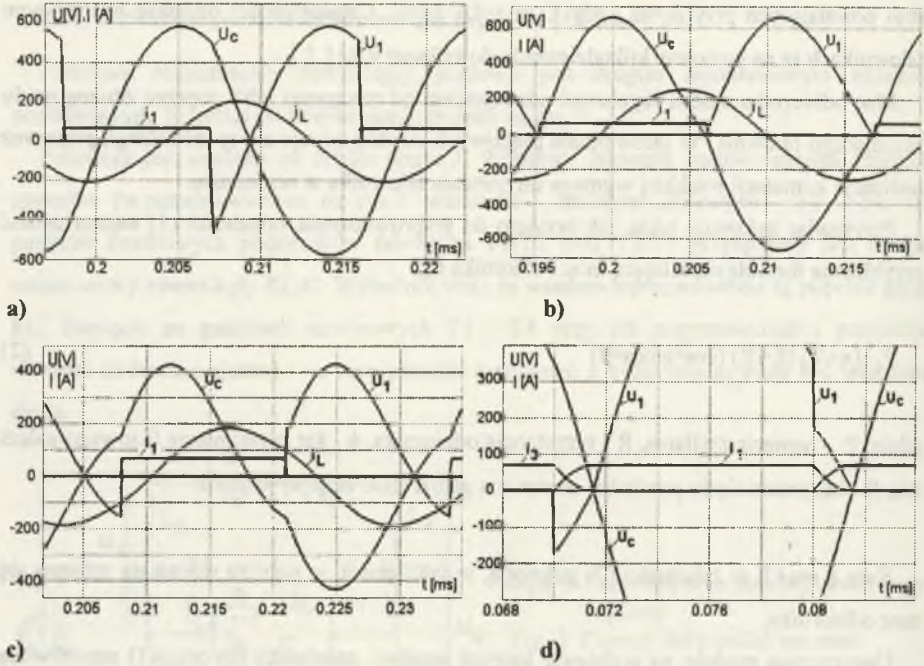
Katy ϕ oraz β w zależności (2) pokazują, w jaki sposób w pobliżu rezonansu zmienia się moc odbiornika.

Uproszczone modele, na podstawie których ustalono zależności (2) oraz (1) umożliwiają przeprowadzenie porównania falowników. Na przykład bezpośrednio z zależności (2), (1) wynika stosunek napięcia zasilającego falownik szeregowy do napięcia zasilającego falownik równoległy, E_s/E_r, określony związkiem (3).

$$E_s/E_r=(\pi^2/8)\,((1/(1+(\omega L/R)^2)^{1/2} \qquad (3)$$

gdzie: $\omega= 1/(LC)^{1/2}$.

Zależność (3) została wyprowadzona przy następujących założeniach: 1) falownik równoległy zasilany jest ze źródła E poprzez dławik, 2) wzbudnik wraz ze wsadem jest taki sam dla obydwu typów falowników. Dla przykładu wzbudnika wraz ze wsadem o następujących parametrach: R=0.795, L=8.1 μH (połączenie szeregowe), P=30 kW, fi=50 kHz stosunek ten, gdy obydwa falowniki są w rezonansie, jest równy $E_s/E_r\approx 0.4$. W podobny sposób uzyskać można zależności na moce zainstalowane falowników.

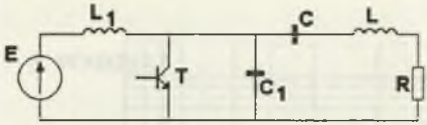


Rys.4. Przebiegi czasowe napięcia kondensatora u_C, prądu odbiornika i_L oraz napięcia zaworu T1 u_1 w falowniku rezonansowym równoległym prądowym z rys. 3. L1=L2=L3=L4=0: a) II sposób pracy $\omega_0<\omega_i$, b) praca w rezonansie $\omega_0=\omega_i$ c)III sposób pracy $\omega_0>\omega_i$, L1=L2=L3=L4≠0: d) sterowanie minimalizujące straty komutacyjne

Fig. 4. Waveforms of capacitor C voltage u_C, load current - i_L, and T1 switch voltage - u_1 of the current fed resonant inverter shown in Fig. 3; L1=L2=L3=L4=0: a) II-nd mode of operation $\omega_0<\omega_i$, b) operation in rezonance $\omega_0=\omega_i$ c) III-rd mode of operation $\omega_0>\omega_i$; L1=L2=L3=L4≠0: d) minimizing switching loss of energy control

2.3. Falownik klasy E

Schemat podstawowy falownika klasy E pokazano na rys. 5. Falownik klasy E jest wynikiem poszukiwań możliwości uzyskania częstotliwości napięcia/prądu odbiornika rzędu kilku Mhz [19,5]. Falownik ten umożliwia pracę z takimi częstotliwościami ze względu na zastosowaną komutację miękką. Jest ona realizowana tak, że załączanie odbywa się przy zerowym napięciu oraz zerowym prądzie, a wyłączanie przy zerowym napięciu tranzystora. Tak realizowana komutacja minimalizuje straty komutacji. Opisane warunki komutacji uzyskuje się poprzez odpowiednią syntezę parametrów elementów falownika.

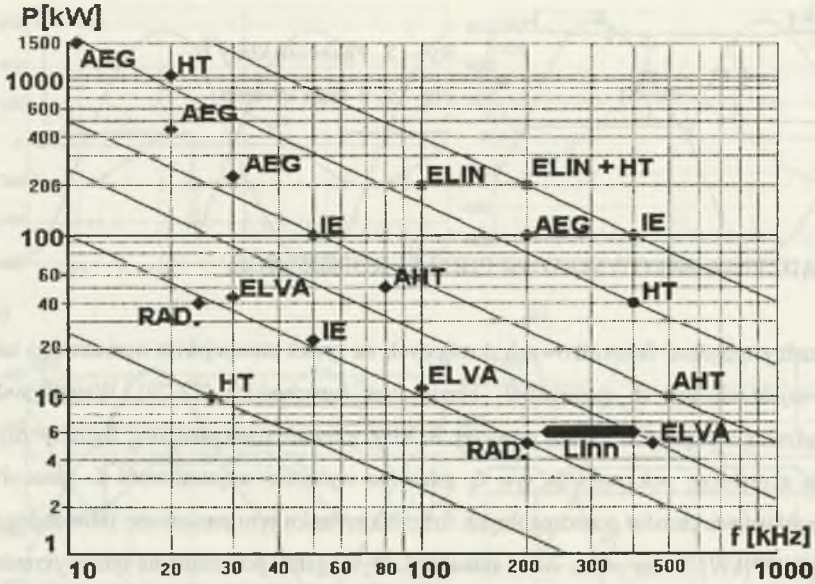


Rys. 5. Falownik klasy E

Fig. 5. E-class inverter

3. URZĄDZENIA FALOWNIKOWE FIRM EUROPEJSKICH

Stan aktualny urządzeń falownikowych dostępnych na rynku europejskim opracowano na podstawie najaktualniejszych materiałów ośmiu firm europejskich [22-29]. Wzięto pod uwagę urządzenia o częstotliwościach powyżej 10 kHz, głównie tranzystorowe. Syntetyczny obraz stanu aktualnego pokazano na rys. 6. gdzie na wykresie: częstotliwość f - moc P pokazano położenie wyrobów poszczególnych firm. Na rysunku tym naniesiono linie stałego iloczynu f[Hz]*P[kW]. Pełny obraz stanu aktualnego wymagałby pokazania na tym wykresie dodatkowo typu falownika oraz użytych zaworów. Spośród analizowanych firm tylko ELIN INTERNATIONAL SA ujawnia typ falownika i jest to falownik rezonansowy prądowy. Żadna z firm nie produkuje urządzeń półprzewodnikowych o częstotliwości pracy powyżej 500 kHz. Oferowane urządzenia wyposażone są w sterowanie mikroprocesorowe umożliwiające cyfrową komunikację z otoczeniem. Wraz z zasilaczem DC oraz falownikiem, firmy oferują sprzęt dodatkowy, np.: bezpośredni i pośredni pomiar temperatury, osprzęt umożliwiający nagrzewanie w próżni czy też w osłonie gazów obojętnych. Oferowany sprzęt może być wykonany jako przewoźny lub stacjonarny. Chłodzenie urządzeń realizowane jest jako wymuszone powietrzne lub cieczowe w obiegu zamkniętym. Zakłócenia wprowadzane do sieci (moc bierna i wyższe harmoniczne prądu) i zakłócenia elektromagnetyczne oferowanych urządzeń utrzymywane są poniżej wartości wyznaczanych przez odpowiednie normy. Urządzenia wyposażone są w szereg zabezpieczeń przed skutkami awarii, np.: zwarcia, przerwy, zwiększanie/zmniejszanie się napięcia zasilającego. Wiele firm zapewnia o takich zaletach swych wyrobów, jak przejrzystość konstrukcji, łatwa diagnostyka, rozbieralność i naprawialność. Jedna z firm oferuje nawet urządzenie w obudowie przeciwwybuchowej.



Rys. 6. Stan urządzeń falownikowych firm europejskich [FF1] - [FF8]

Fig. 6. State of inverter systems made by european firms [FF1] - [FF8]

4. PRACE BADAWCZE W ZAKRESIE URZĄDZEŃ FALOWNIKOWYCH

Tematyka prac badawczych z zakresu urządzeń falownikowych skoncentrowana jest na:

- falownikach rezonansowych o dwóch podstawowych strukturach: na falowniku szeregowym i falowniku równoległym (takich jak opisano powyżej),
- falownikach o komutacji miękkiej (np. szeregowy z kondensatorami odciążającymi),
- sterowaniu mocy odbiornika realizowanym w falowniku na zasadzie podobnej do sterowania fazowego w klasycznych falownikach napięciowych [6],
- sterowaniu mikroprocesorowym,
- wprowadzaniu nowych typów zaworów,
- syntezowaniu nowych struktur obowodów głównych i sterowania,
- symulacji i projektowaniu [7],

Prace te mają na celu uzyskanie maksymalnie wysokiej częstotliwości przy możliwie wysokiej mocy [13,18].

5. WNIOSKI

Z pracy wynikają następujące wnioski:

1. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi falowniki są moc i częstotliwość.
2. Podstawowymi typami falowników sa następujące układy:
   - falownik rezonansowy szeregowy napięciowy,
   - falownik rezonansowy równoległy prądowy oraz
   - falownik klasy E.
3. Pierwsze dwa rodzaje falowników najszerzej stosowane są w praktyce. Trzeci przy częstotliwościach rzędu kilku MHz oraz mocach rzędu kilkuset W. Przeprowadzona bardzo uproszczona ocena porównawcza tych falowników nie wskazuje na bardzo wyraźną przewagę jednego z nich. Dokładna ocena techniczno-ekonomiczna musi uwzględnić wymienione we wstępie parametry i czynniki. W ocenie tej musiałyby być uwzględniona geometria wzbudnika z wsadem oraz materiał wsadu. W szeroko prowadzonej analizie porównawczej należałoby falownik napięciowy oraz prądowy porównać z innymi rodzajami falowników.
4. W przypadku konieczności uzyskania częstotliwości pracy w zakresie kilkunastu (ok. 10) MHz do kilkudziesięciu (ok. 50) MHz najbardziej przydatnym jest falownik sekwencyjny klasy E.
5. Typ stosowanych zaworów zależy od częstotliwości pracy oraz od typu falownika,:

   do 10 kHz - GTO,

   do 50 kHz - IGBT,

   powyżej 50 kHz - MOSFET.
6. Dany proces nagrzewania indukcyjnego może być realizowany za pomocą różnych typów falowników.
7. Stan aktualny urządzeń falownikowych przeznaczonych do grzejnictwa indukcyjnego w zakresie 10 kHz do 500 kHz i mocach 1 kW do 1500 kW oferowanych przez znane firmy europejskie pokazuje rys. 6. Wynika z niego, że oferta ta umożliwia realizację prawie wszystkich procesów wymagających nagrzewania indukcyjnego.
8. Wiele firm zapewnia, iż sterowanie w oferowanych urządzeniach jest realizowane z pomocą techniki μP - jest to istotny czynnik ze względu na współczesne wymogi co do komunikacji z otoczeniem

9. Oprócz zasadniczych urządzeń (zasilacza DC i falownika) oferta analizowanych firm obejmuje wszelkiego rodzaju sprzęt pomocniczy ułatwiający organizację procesu technologicznego; np. systemy bezpośredniego lub pośredniego pomiaru temperatury, komory umożliwiające nagrzewanie w próżni czy też w osłonie gazowej.
10. Oferta krajowa obejmuje przeważnie urządzenia do nagrzewania indukcyjnego w zakresie do 10 kHz [4,8,11,12,15,16,20],
11. Prowadzone prace naukowe i konstrukcyjne mają na celu osiągnięcie znacznych częstotliwości przy odpowiednio dużych mocach. W pracach tych uwzględniane są systematycznie najnowsze rodzaje zaworów (np. JFET, FCT, MCT) [5].

LITERATURA

1. Casella P., Pham Huu Phut, Berthon A.: High frequency current inverter with parallel load for induction heating, 2nd European Conference on Power Electronics and Appllications, Grenoble, France 22-24 Sept. 1987, Proceedings, Vol. 1, pp.277-280.
2. Dede E. J., et all: Transistors are replacing electronic tubes and thyristors in induction heating generators, Elektrowärme international, 50 Jahrgang, Heft B 1/1992, S. B 26 - B32.
3. Ferrieux J.-P., Forest F.: Alimentations á découpage convertisseurs á résonance, Masson, Paris, New York 1987.
4. Gawecka H., Nasiłowski J.: Generator z tranzystorami MOSFET do grzania indukcyjnego, Wiadomości Elektrotechniczne Rok LX, 1992 nr 11.
5. Hobson L., Hinchliffe S., Hartman M. T.: High frequency power inverters for electric process heating applications, Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, London 13-15 July 1988 Conference Publications No 291, pp. 210-213.
6. HAMADA Satoshi, FUJIWARA Emilio, OGINO Yasumasa, NAKAOKA Mutsuo: New Zero-Voltage Switching PWM Full-Bridge DC-DC Converters Utilizing Saturable Reactors, Proc. of 6th Conf. on Power Electronic and Motion Control, Vol.1, pp. 69-73, Budapest 1990.

7. Jain P.K., Dewan S.B.: Designing a complete inverter system for a series tuned induction heating/melting load, Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, Conference Publications No 291, pp. 456-461.
8. Kołodziej H., Grzesik B., Myrcik C.: Małogabarytowy zasilacz do pieca indukcyjnmego Materiały konferencji: Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, organizowowane przez Polski Komitet Elektrotermii, SEP, SITHP, Szczyrk 1987, s. 184-193.
9. Landis J.P.: A static power supply for induction heating, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, June 1970, Vol. IECI-17 No 4, pp. 313-320.
10. Malesani L., Tenti P.: Medium-frequency GTO inverter for induction heating applications, 2nd European Conference on Power Electronics and Appllications, Grenoble, France 22-24 Sept. 1987, Proceedings, Vol. 1, pp.257-262.
11. Mazany D.: Smolarz J.: Induction heating of steel bars in progressive heaters supplied from transistor voltage inverters. XII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Poznań, Technical University of Poznań - Institute of Electrical Engineering, 16-18 October 1991, pp. 99-105.
12. Michalski A., Serafin S.: Zastosowanie tranzystorów mocy w przemiennikach częstotliwości dla grzejnictwa indukcyjnego, Materiały konferencji Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Gliwice - Ustroń 15-18 marzec 1993, s. 393-401.
13. Mućko J.: Tranzystorowy konwerter rezonansowy o podwyższonej częstotliwości pracy i niskich stratach komutacyjnych, IV Krajowa Konferencja Energoelektroniki, PAN i Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, Mat. konf., t. 1, s. 270-279.
14. Nuns J.: Transistors are replacing valves in induction heating, 2nd European Conf. on Power Electronics and Appllic., Grenoble, France 22-24 Sept. 1987, Proceedings, Vol. 1, pp.257-262.
15. Ogos J., Kołodziej. H., Nowak J., Myrcik C., Grzesik B.,: Prototypowe urządzenie do indukcyjnego nagrzewania rur, Materiały konferencji:Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, Polski Kom. Elektrotermii, SEP, SITHP, Szczyrk 1987, s.164-172.
16. Posłuszny M.: Design of resonant converters for power supply, XII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, Poznań, Technical University of Poznań - Institute of Electrical Engineering, 16-18 October 1991, pp.159-164.

17. Revankar G.N., Karande D.S.: Voltage-Fed High-Frequency Bridge Inverter Circuit, IEEE Trans. on Ind. Electron. and Contr. Instrument., Vol. IECI-21, No 4, Nov. 1974, pp. 226-229.
18. Revankar G. N. Vijay A. Pathwardhan: Time-Sharing High Frequency Inverter Circuit, IEEE Trans. on Ind. Electron. and Contr. Instrument., Vol. IECI-21, No 3, Aug. 1974, pp. 199-203.
19. Sajdak C., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1987.
20. Skoczkowski i inni: Tyrystorowe wyżarzarki indukcyjne, Konf. Nowoczesne urządzenia i technologie elektrotermiczne w metalurgii, Polski Komitet Elektrotermii, SEP,SITHP, Szczyrk 1987.
21. Sokal N., Sokal A.: Class E - A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers, IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. SC, No 3, June 1975, pp.168-176.
22. Materiały firmy AHT, Austria.
23. Materiały firmy AEG-ELOTERM GMBH, Niemcy.
24. Materiały firmy ELVA Induksjon a.s. Boleveien 10, Norwegia
25. Materiały firmy G.H. ELIN INTERNATIONAL S.A. Hiszpania.
26. Materiały firmy HEAT TECH Induction AB, Szwecja.
27. Materiały firmy INDUCTO ELPHIAC Belgia.
28. Materiały firmy Linn High Therm , Niemcy.
29. Materiały firmy RADYNE LIMITED, Anglia.

Recenzent: Dr hab.inż. Maciej Tondos

Wpłynęło do Redakcji 28 marca 1994

Abstract

The review concerns inverters which are designed for induction heating and which frequency is within the range of 10 kHz to 1 MHz. Main European firms and recently published scientific papers constitute a base for the paper. Part 1 - Introduction, characterises systems for induction heating containing inverters. They are: frequency, power, efficiency,

short circuit immunity, reliability, weight, dimensions, electromagnetic compatibility, acoustic compatibility and so on. Basic topologies are described in part 2. Voltage fed with series resonant circuit is the first one - Fig.1. Current fed parallel resonant inverter depicted in Fig.3 is the second basic topology. As the third basic topology inverter of class E was admitted - its schematic diagram is presented in Fig.5. The first and the second structures were investigated by means of computer simulation. Chosen results are given in Fig.2 for series inverter and in Fig.4 for parallel one. Waveforms for series inverter (Fig.2) are calculated for three modes of operation: I) $0<\omega_i<0.5\omega_0$, II $0.5\omega_0$, $<\omega_i<\omega_0$, III) $\omega_0<\omega_i$ where ω_0 is damped frequency of RLC series circuit. There means that it operates with resonance frequency, that power of resistance R reaches its maximum and commutation loss is minimum.

Similar analysis was carried out for current fed parallel inverter (Fig.3). It resulted with waveforms presented in fig.4. For parallel inverter working with resonance frequency $\omega_i=\omega_0$ the power of resistance R is maximum and commutation loss is minimum too. These two invertes were compared assuming that the current in series R-L-C circuit of the series inverter and the capacitor voltage in parallel R-L||C circuit of the parallel inverter are sinusoidal. Series connected R-L are treated as a load (inductor together with heated metal piece) for two invertes that are taken into consideration. Using above assumptions it is possible to derive formulae for power of the load resistance R. For series inverter it is equation (1) in which angle β is the shift between voltage of the whole R-L-C branch and its current. Similar formula is set for parallel inverter - (3). Both formulae can be used for comparison purposes. For instance, supplying DC voltages ratio E_s/E_T is described by equation (4). When $Q=\omega L/R\approx 3$ it has the value of $E_s/E_r\approx 0.4$. The paper describes shortly the third high frequency topology, that is class E inverter. Its schematic diagram is presented in Fig.5. It allows to reach switching frequency of 1 MHz. The third part of the paper is the review of the offert given by main European firms producing equipment for induction heating. Fig.6 summarises this review.