

SZEREGOWY FAŁOWNIK REZONANSOWY W APLIKACJI AKTYWATORA FOLII POLIETYLENOWEJ

Jan Mućko

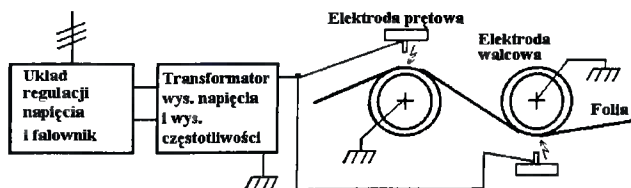
Akademia Techniczno-Rolnicza, Instytut Elektrotechniki
ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

W artykule przedstawione zostały podstawy teoretyczne opisujące szeregowy falownik rezonansowy wraz z obciążeniem nieliniowym w aplikacji aktywatora folii polietylenowej oraz metody i układy sterowania tym falownikiem. Metody te (modulacja szerokości impulsów, zmiana częstotliwości wyjściowej, zmiana wartości napięcia na wejściu falownika, modulacja PDM) scharakteryzowane zostaną pod kątem przydatności w aplikacji aktywatora. Wynikiem pracy było wykonanie układów przemysłowych, w których tranzystory falownika pracują z miękką komutacją, z łącznikami typu ZVS.

Słowa kluczowe: szeregowy falownik rezonansowy, miękka komutacja, aktywator folii, ZVS, ZCS

1. WSTĘP – OBWÓD GŁÓWNY, PODSTAWY TEORETYCZNE

Konstrukcja aktywatora [1, 2, 5, 7-15] folii polietylenowej przedstawiona została na rysunku 1.



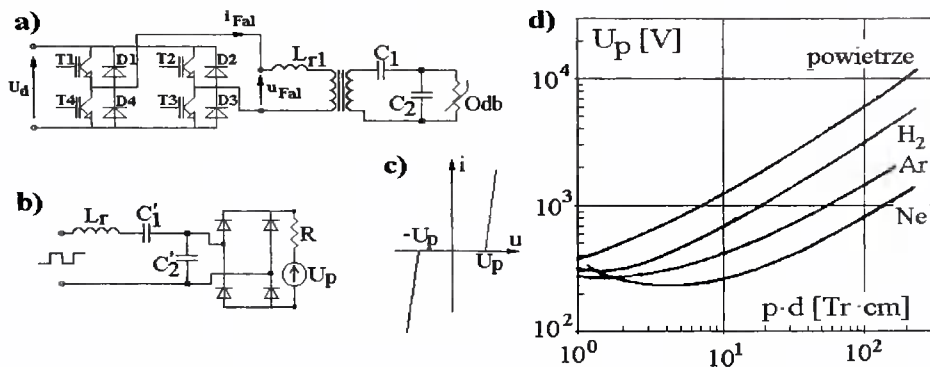
Rys. 1. Budowa aktywatora folii polietylenowej

Główne elementy aktywatora to: generator wysokiej częstotliwości, transformator wysokiego napięcia oraz zespół elektrod wyładowczych. Wyładowania występują między elektrodą walcową (obrotową) i prętową (nieruchomą). Parametry aktywatorów mieszczą się ma ogół w przedziale: moc - 0.5...10 kVA, częstotliwość - 5...50 kHz, napięcie na elektrodach - 4...20 kV. Elektrody wyładowcze wraz z dwiema warstwami dielektryka (silikon oraz powietrze) tworzą zespół kondensatorów C1 (silikon) i C2 (powietrze).

Pojemności elektrod wyładowczych oraz indukcyjność rozproszenia transformatora stanowią obwód rezonansowy. Celowym staje się wykorzystanie już istniejącego

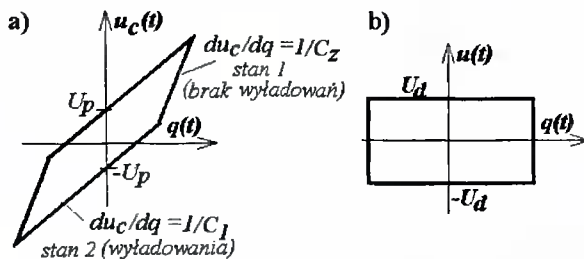
obwodu rezonansowego do wspomagania procesów komutacyjnych w układzie falownika zrealizowanego w technice IGBT.

Rysunek 2 przedstawia schemat układu z modelem wyładowania snopiącego. Przyjęto przy tym oznaczenia: L_{r1} , L_r - indukcyjność dławika oraz indukcyjność zastępcza, C_1 , C_2 - pojemności kondensatorów obwodu rezonansowego, Odb - odbiornik nieliniowy, R - rezystancja dynamiczna, U_p - napięcie progowe wyładowania.



Rys. 2. Falownik rezonansowy w układzie aktywatora folii: a) obwód główny, b) schemat zastępczy, c) charakterystyka obciążenia nieliniowego, d) napięcie zapłonu w funkcji ciśnienia i odległości elektrod [16]

Na rysunku 2c przedstawiona została charakterystyka prądowo-napięciowa wyładowania snopiącego w powietrzu [12]. Rysunek 2d przedstawia zależność wartości napięcia, przy którym rozpoczyna się wyładowanie snopiące w funkcji iloczynu ciśnienia i odległości między elektrodami (krzywa Paschena) [4, 16]. Przy pominięciu indukcyjności głównej transformatora i uwzględnieniu indukcyjności rozproszeń ($L_{o1} + L_{o2}$) indukcyjność obwodu rezonansowego wynosi $L_r = L_{r1} + L_{o1} + L_{o2}$ (przy sprowadzeniu wartości indukcyjności L_{o2} na stronę pierwotną transformatora).



Rys. 3. Przebiegi napięć: a) $u_c(t)$ w funkcji ładunku $q(t)$, b) $u_{Fal}(t)$ w funkcji ładunku $q(t)$ przy synchronizacji napięcia i prądu wyjściowego falownika

Stosowanie dodatkowego dławika L_{r1} spowodowane jest koniecznością dopasowania częstotliwości drgań własnych oraz impedancji obwodu rezonansowego do założonego zakresu częstotliwości pracy i założonej mocy wyjściowej.

$$W = \int_0^T u_{Fal}(t) i_{Fal}(t) dt = \int_0^T u_C(t) i_{Fal}(t) dt = \int_0^T u_{Fal}(t) dq = \int_0^T u_C(t) dq, \quad (1)$$

$$P = W / T = Wf, \quad (2)$$

$$\frac{du_C}{dq} = \frac{1}{C_z} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}, \quad (3a)$$

$$\frac{du_C}{dq} = \frac{1}{C_1}, \quad (3b)$$

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_z}}, \quad (4a)$$

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_1}}. \quad (4b)$$

W okresie pracy energia przekazana do obciążenia opisana jest zależnością (1), przy czym: $u_{Fal}(t)$ - napięcie wyjściowe falownika, $u_C(t)$ - napięcie na zespole kondensatorów (C_1 szeregowo z C_2). Moc dostarczoną do obciążenia wyznaczyć można z zależności (2). Podczas pracy układu wyróżnić można dwa stany pracy: stan 1, w którym nie ma wyładowania snopiącego (prostownik w układzie z rysunku 2b nie przewodzi); stan 2, w którym jest wyładowanie snopiące (prostownik w układzie z rysunku 2b przewodzi). W stanie 1 stromość narastania napięcia $u_C(t)$ określa pojemność zastępcza C_z szeregowo połączonych kondensatorów C_1 i C_2 (zależność 3a). Natomiast w stanie 2 stromość narastania napięcia $u_C(t)$ określa pojemność kondensatora C_1 (zależność 3b). Na rysunku 3a przedstawiono przebieg napięcia na zespole kondensatorów $u_C(t)$ w funkcji ładunku $q(t)$.

2. CZĘSTOTLIWOŚĆ PRACY FALOWNIKA

W zależności od częstotliwości przełączeń f_s w układzie falownika w stosunku do częstotliwości drgań własnych f_0 w obwodzie obciążenia, przy których występuje synchronizacja prądu i napięcia wyjściowego falownika, wyróżnić można następujące rodzaje pracy:

- $f_s < f_0$ - sposób ten nie jest zalecany z uwagi na stropy prądowe w tranzystorach spowodowane prądami wstecznymi diod zwrotnych i występujące straty komutacyjne. Istnieje możliwość nasycenia transformatora przy niskich częstotliwościach pracy. Sposób ten był stosowany uprzednio w szeregowych falownikach rezonansowych wykonanych w technice tyrystorowej,
- $f_s = f_0$ - w praktyce trudno zrealizować, nawet najmniejsze odchyłki przy pomiarze chwili przejścia fali prądu przez zero lub opóźnienia w układzie sterowania itp. powodują, że układ pracuje z częstotliwością mniejszą lub większą od założonej, przy czym praca z częstotliwością większą jest korzystniejsza,
- $f_s > f_0$ i $f_s \approx f_0$ - jest to najbardziej korzystny sposób sterowania tranzystorów falownika z szeregowym obwodem rezonansowym, bowiem istnieje możliwość pracy tranzystorów jako łączników ZVS przy jednoczesnej pracy jako "prawie ZCS", praktycznie brak strat komutacyjnych, stromości narastania (opadania) napięć i prądów są ograniczone, najmniejsza amplituda prądu w tranzystorach przy danej mocy wyjściowej,

- $f_s > f_0$ - zapewnia możliwość pracy tranzystorów jako łączników ZVS oraz umożliwia regulację napięcia i mocy wyjściowej falownika.

W przypadku, gdy pomiędzy falownikiem a transformatorem w.n. wprowadzi się czwórnik LC, można uzyskać usztywnienie charakterystyk wyjściowych falownika z tym czwórnikiem [6, 7]. Falownik z czwórnikiem zachowywać się może jak:

- **źródło prądu** - parametryczna stabilizacja prądu zapewnia odporność układu na zwarcia i wyładowanie łukowe, przebieg czasowy prądu falownika opóźnia się w stosunku do napięcia wyjściowego tego falownika i możliwa jest więc praca tranzystorów jako łączników ZVS, przesunięcie między falą prądu i napięcia falownika zależne jest od obciążenia co powoduje nieoptymalne wykorzystanie tranzystorów, falownik wymaga regulowanego napięcia wejściowego,
- **źródło napięcia** - parametryczna stabilizacja napięcia nie jest odpowiednia w aplikacji aktywatora z uwagi na skutki łuku przy stabilizowanym napięciu.

3. REGULACJA NAPIĘCIA (MOCY) NA ELEKTRODACH

Regulacja napięcia na elektrodach (i mocy dostarczonej do elektrod) odbywać się może poprzez:

- modulację szerokości impulsów (przy stałym napięciu zasilającym),
- zmianę częstotliwości wyjściowej (przy stałym napięciu zasilającym),
- zmianę wartości napięcia na wejściu falownika,
- modulację PDM (przy stałym napięciu zasilającym).

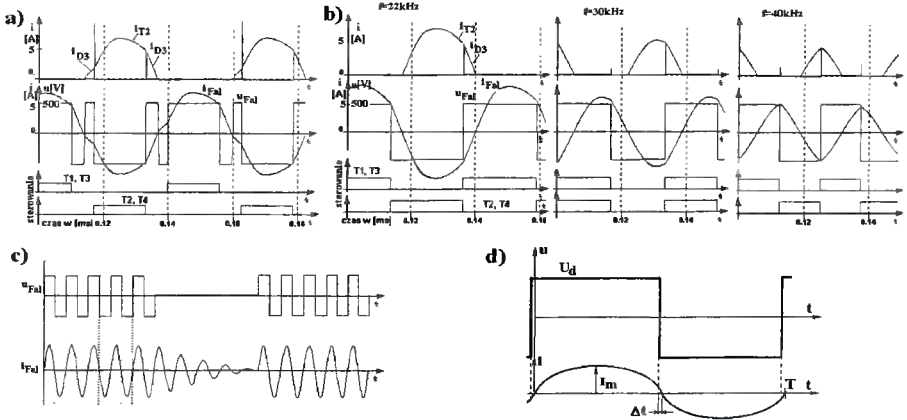
Regulacja poprzez modulację szerokości impulsów (przy stałym napięciu zasilającym)

Wcześniejsze badania oraz wdrożenia prowadzone przez autora dotyczyły regulacji mocy generatora aktywatora poprzez modulację szerokości impulsów [5]. Generator charakteryzuje się wówczas prostą budową obwodu głównego (prostownik diodowy + bateria kondensatorów + falownik). Stosowanie tej metody w zakresie częstotliwości powyżej kilkudziesięciu (a nawet kilkunastu) kHz i mocach powyżej 1 kW jest niewskazane. Każdy z tranzystorów mostka przełącza dwukrotnie w okresie. Wyłączenie każdego z tranzystorów mostka falownika odbywać się może "miętko" (przy odpowiednim sterowaniu tranzystorów) w technice ZVS (Zero Voltage Switching). Załączenie musi odbywać się jednak "twardo". Komutacja twarda, przy wysokiej częstotliwości jest przyczyną znacznych strat oraz tzw. stresów prądowych powstałych jako suma prądu obciążenia oraz prądu wstecznego diod zwrotnych falownika. W każdym półokresie prądu wyjściowego przewodzi dioda zwrotna, następnie tranzystor i ponownie inna dioda zwrotna. W okresie pracy falownika występuje 6 przełączeń (rys. 4a). Powoduje to, że napięcie wyjściowe falownika oscyluje z częstotliwością 3-krotnie większą niż fala prądu. W badanych wcześniej układach tranzystory musiały być wielokrotnie przewymiarowane, a falownik stanowił silne źródło zakłóceń, także dla własnych obwodów sterowania.

Regulacja poprzez zmianę częstotliwości wyjściowej (przy stałym napięciu zasilającym)

Regulacji mocy wyjściowej (i napięcia wyjściowego) układu dokonuje się poprzez zmianę częstotliwości przełączeń (rys. 4b). Przy pracy z częstotliwością synchronizacji prądu i napięcia wyjściowego falownika do obciążenia dociera maksymalna moc. Praca układu (i regulacja mocy) odbywać się powinna przy częstotliwościach wyższych.

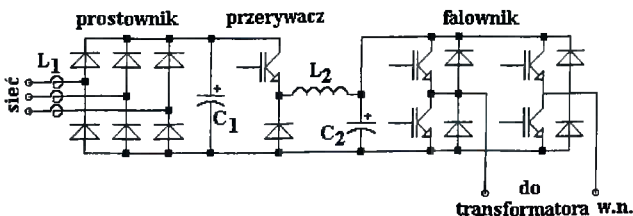
Wówczas stworzone zostają warunki do pracy tranzystorów jako łączników ZVS, a transformator nie nasyci się. Obwód główny generatora aktywatora jest stosunkowo prosty z uwagi na nieregulowane napięcie obwodu DC. Podczas regulacji częstotliwość pracy falownika może wyjść poza zakres częstotliwości przyjętych za technologicznie uzasadniony w danym procesie aktywacji.



Rys. 4. Przebiegi czasowe napięć i prądów falownika przy modulacji: a) PWM, b) częstotliwościowej, c) PDM oraz d) przebieg czasowy synchronizowanego napięcia i prądu wyjściowego falownika z łącznikami ZVS: i_T , i_D - prąd tranzystora, diody; i_{Fal} , u_{Fal} - prąd i napięcie wyjściowe falownika

Regulacja poprzez zmianę wartości napięcia na wejściu falownika

Wcześniejsze badania oraz wdrożenia prowadzone przez autora dotyczyły także regulacji mocy generatora aktywatora poprzez zmianę napięcia zasilającego falownik [7, 8, 9, 11]. Na wejściu falownika znajduje się regulowane źródło napięcia. Źródłem tym może być prostownik tyrystorowy sterowany lub półsterowany (zastosowany np. w generatorach firmy Ahlbrandt [13]) lub prostownik niesterowany i przerywacz tranzystorowy (rys. 5). Rozwiązanie takie, aczkolwiek bardziej złożone ma szereg zalet. Falownik pracuje w najbardziej sprzyjających warunkach, przy częstotliwości nieco wyższych od częstotliwości drgań własnych (rys. 4d). Stworzone są warunki do pracy w technice ZVS przy jednoczesnej możliwości przełączania przy niewielkim prądzie ("prawie ZCS"). Zlikwidowane zostają straty komutacyjne, a stromości napięć i prądów są ograniczone. Wszelkie procesy regulacji mocy odbywają się w przerywaczu. Zapewnione jest niezależne sterowanie falownikiem i przerywaczem.



Rys. 5. Schemat obwodu głównego generatora z przerywaczem i falownikiem

W przypadku synchronizacji napięcia i prądu wyjściowego falownika nie będzie przedziałów czasowych, w których energia powraca do źródła zasilającego. Wówczas amplituda, wartość skuteczna oraz średnia prądu wyjściowego falownika (oraz prądu tranzystorów) będą najmniejsze przy danej mocy wyjściowej. Jednak aby umożliwić pracę tranzystorów jako łączników ZVS, są one wyłączane przed momentem przejścia przez zero wartości prądu wyjściowego (rys. 4d). Zakładając sinusoidalny przebieg prądu i że $\Delta t \ll T$ otrzymujemy zależności na moc wyjściową falownika mostkowego (5a) oraz półmostkowego (5b)

$$P = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} U_d I_m \sin(\omega t) dt = \frac{2U_d I_m}{\pi} \approx 0.9U_d I, \quad (5a)$$

$$P = \frac{U_d I_m}{\pi} \approx 0.45U_d I. \quad (5b)$$

gdzie: U_d - wartość napięcia zasilającego falownik, I_{mFal} , I_{Fal} - wartość maksymalna i skuteczna prądu wyjściowego falownika.

Przy synchronizacji napięcia i prądu wyjściowego falownika, przebieg napięcia wyjściowego falownika $u_{Fal}(t)$ w funkcji ładunku $q(t)$ przedstawiony jest na rysunku 3b. Założono, że falownik ma strukturę pełnego mostka 1-fazowego (dla półmostka należy zmienić $+U_d$ na $+U_d/2$). Energia wyznaczona z zależności (1) odpowiada polom figur z rysunków 3a i 3b.

W zależności od obciążenia układ synchronizuje się przy częstotliwościach z zakresu określonego zależnościami (4a) i (4b). Przy synchronizacji moc traconą w obciążeniu wyznaczyć można w prosty sposób z zależności (5a) lub (5b).

Regulacja poprzez modulację PDM (ang. Pulse Density Modulation) przy stałym napięciu zasilającym

Regulacja mocy za pomocą metody PDM polega na przesyłaniu mocy maksymalnej z regulowanym wypełnieniem [1, 3, 10].

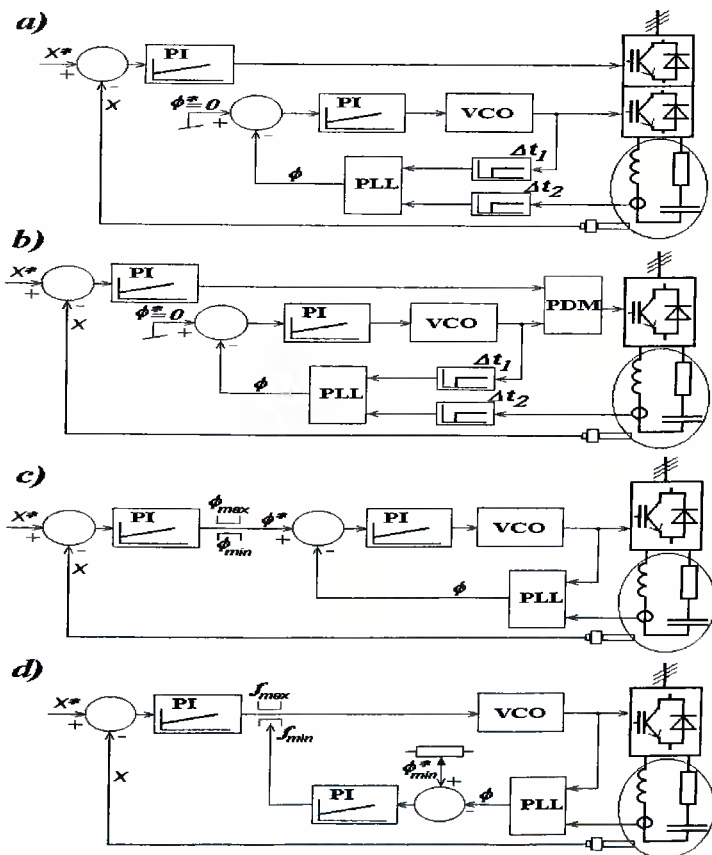
Ponadto układ może pracować z miękką komutacją z łącznikami typu ZVS (załączanie przy zerowym napięciu). Dla maksymalnego wykorzystania elementów (minimalny prąd tranzystorów w stosunku do przenoszonej mocy) układ powinien pracować z częstotliwością drgań własnych. Technika ZVS wymusza jednak pracę z częstotliwością nieco wyższą (rys. 4d). Ogólną zasadę działania przedstawia rysunek 4c. Odcięcie dopływu mocy realizowane jest poprzez załączenie dwóch tranzystorów T1, T2 (rys. 2a).

Wówczas drgania wygasają samoczynnie. Obwód główny generatora aktywatora jest stosunkowo prosty z uwagi na nieregulowane napięcie obwodu DC. Układ sterowania [10] powinien zapewnić ponadto nie nasycanie się transformatora niezależnie od długości "paczki" impulsów mocy. W szczególności powinna być zachowana parzysta liczba półfal napięcia wyjściowego falownika. W czasie przerwy w przepływie mocy powinna zostać zapamiętana częstotliwość pracy układu, do której układ się dostroił podczas przepływu mocy [10]. Moc w układzie określa się z zależności (6), przy czym moc maksymalną układu P_{max} (dla wypełnienia $D = 1$) wyznaczyć można z zależności (5a) lub (5b).

$$P = D \cdot P_{max} \quad (6)$$

4. UKŁADY REGULACJI NAPIĘCIA (MOCY) NA ELEKTRODACH

Na rysunku 6 przedstawione zostały schematy blokowe układów sterowania, które wykorzystane były przez autora do sterowania procesem aktywacji. Każdy z tych układów umożliwia sterowanie procesem (stabilizacja zmiennej X , np. mocy) przy zachowaniu warunków niezbędnych do pracy łączników jako ZVS lub ZCS. Poprzez dobór wartości Δt_1 (lub Δt_2 , rys. 6a,b) można uzyskać stałe opóźnienie (lub wyprzedzenie) pomiędzy falą prądu a falą napięcia wyjściowego falownika. Podobnie, poprzez wybór dodatniej lub ujemnej wartości ϕ^* (ϕ_{\max} , ϕ_{\min} , ϕ^*_{\min} , rys. 6c,d) można uzyskać stałe przesunięcie fazowe (dodatnie lub ujemne) pomiędzy falą prądu a falą napięcia.



Rys. 6. Schematy blokowe układów sterowania szeregowym falownikiem rezonansowym

Układ z rysunku 6a umożliwia regulację mocy poprzez zmianę napięcia wejściowego falownika. Dla łączników typu ZVS $\Delta t_2 = 0$ a $\Delta t_1 > 0$ przyjmuje się tak, aby zachować założone wyprzedzenie fali napięcia falownika w stosunku do fali prądu. Falownik natomiast pracuje z częstotliwością nieco większą od częstotliwości drgań własnych, zapewniając minimalne obciążenie tranzystorów w stosunku do przenoszony mocy. W przypadku zastosowania łączników ZCS (nie zalecane) należy przyjąć $\Delta t_1 = 0$

a $\Delta t_2 > 0$. Falownik pracować będzie wówczas z częstotliwością mniejszą od częstotliwości drgań własnych obwodu wyjściowego.

Podobnie, w układzie z rysunku 6b, dla łączników ZVS $\Delta t_2 = 0$ a $\Delta t_1 > 0$ przyjmuje się tak, aby zachować założone wyprzedzenie fali napięcia falownika w stosunku do fali prądu. W tym przypadku nieregulowane jest napięcie wejściowe falownika, obwód główny generatora jest stosunkowo prosty, a zmiany mocy dokonuje się poprzez modulację PDM [10].

Rysunek 6c przedstawia układ, w którym moc na wyjściu falownika regulowana jest poprzez zmianę kąta wyprzedzenia fali napięcia falownika w stosunku do fali prądu (dla łączników ZVS). Powoduje to w sposób pośredni zmianę częstotliwości pracy falownika. Kąt wyprzedzenia jest ograniczony tak, aby zapewnić minimalne wyprzedzenie napięcia, gwarantujące pracę tranzystorów jako łączników ZVS. Maksymalna wartość kąta wyprzedzenia nie powinna przekraczać 90° el.

Układ z rysunku 6d działa podobnie do układu z rysunku 6c, przy czym ograniczona jest maksymalna i minimalna częstotliwość pracy falownika. Ograniczenie na częstotliwość minimalną kontrolowane jest poprzez układ regulacji kąta wyprzedzenia fali napięcia falownika w stosunku do fali prądu falownika.

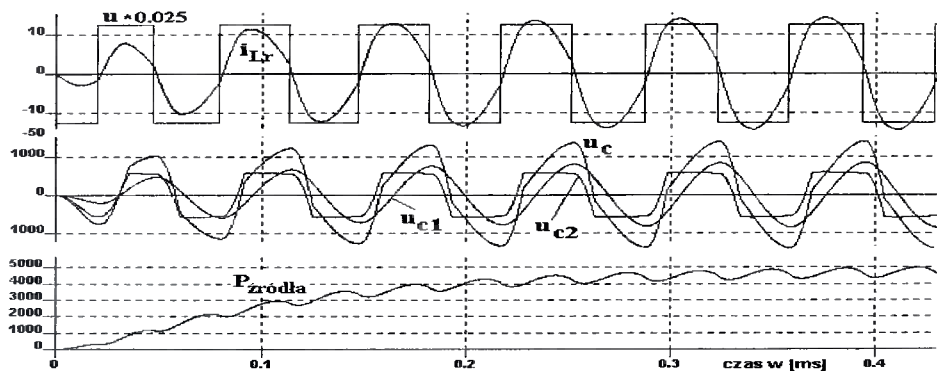
W układach z rysunku 6c i 6d regulacji mocy wyjściowej układu dokonuje się poprzez zmianę częstotliwości przełączeń. Przy synchronizacji napięcia i prądu wyjściowego falownika do obciążenia dociera maksymalna moc. Praca układu (i regulacja mocy) odbywać się powinna przy częstotliwościach większych od częstotliwości drgań własnych. Wówczas stworzone zostają warunki dla pracy tranzystorów jako łączników ZVS, a transformator nie nasyci się.

Wszystkie z wymienionych wyżej układów zostały zbadane symulacyjnie i eksperymentalnie przez autora, przy czym:

- układ z rysunku 6a produkowany jest jako układ przemysłowy o mocy do 4 kW,
- układy z rysunków 6b,c to prototypy laboratoryjne o mocy do 1 kW,
- układ z rysunku 6d zrealizowano jako prototyp przemysłowy o mocy do 8 kW.

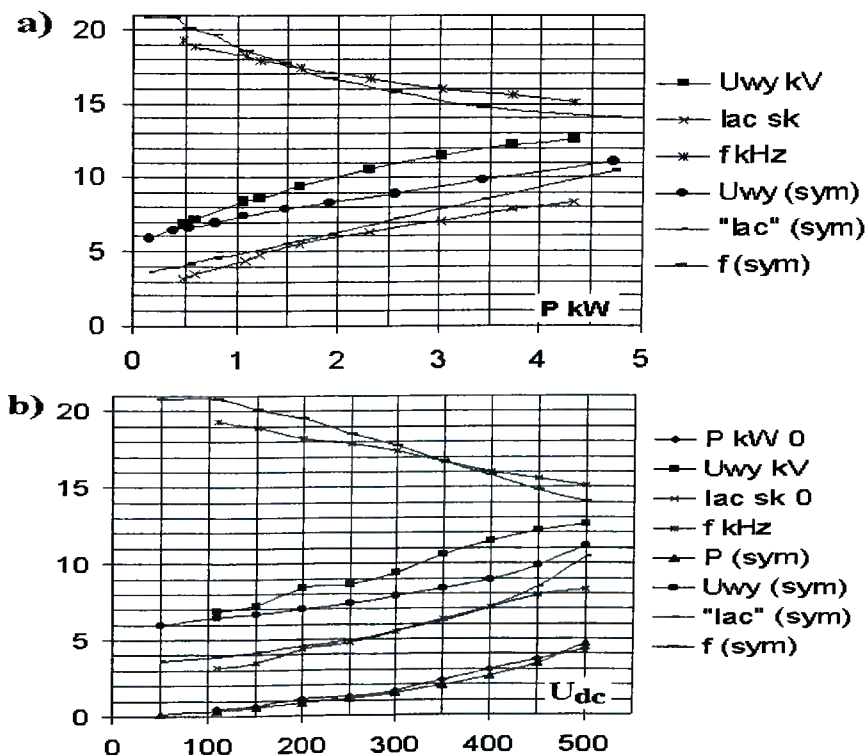
5. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

Badanie symulacyjne falownika rezonansowego (rys. 7) o strukturze sterowania jak na rysunku 6a, przeprowadzono dla wartości elementów zgodnych z wartościami rzeczywistymi prototypowego, opracowanego przez autora, aktywatora folii polietylenowej o mocy 4 kW. Wszystkie wartości parametrów elementów sprowadzone zostały w programie symulacyjnym na stronę pierwotną transformatora w.n. Nieliniową charakterystykę wyładowania snopiącego zamodelowano za pomocą prostownika mostkowego, źródła napięcia U_p oraz rezystancji dynamicznej. Przy symulacji pominięto indukcyjność główną transformatora, a indukcyjności rozproszenia uwzględniono w wypadkowej indukcyjności rezonansowej (jak na rys. 2). Wyprzedzenie wyłączenia tranzystorów w stosunku do przejścia przez zero fali prądu wynosiło 2...4 μ s. Gwarantowało to pracę tranzystorów jako łączników ZVS, a układ sterowania sam dostrajał się do warunków "prawie rezonansowych" (rys. 4d).



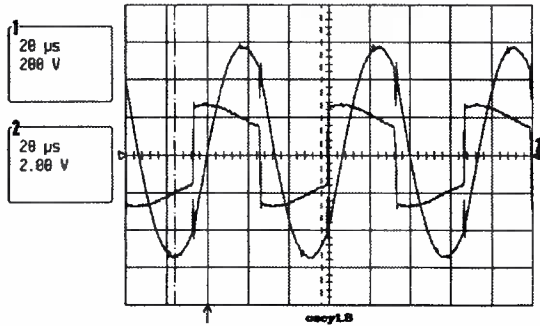
Rys. 7. Przebiegi czasowe napięć, prądów i mocy uzyskane na drodze symulacji komputerowej rzeczywistego układu aktywatora ($U_{dc} = 500$ V)

Rysunki 8a i 8b przedstawiają charakterystyki układu rzeczywistego oraz charakterystyki uzyskane na drodze symulacji komputerowej. Widać dużą zbieżność wyników.



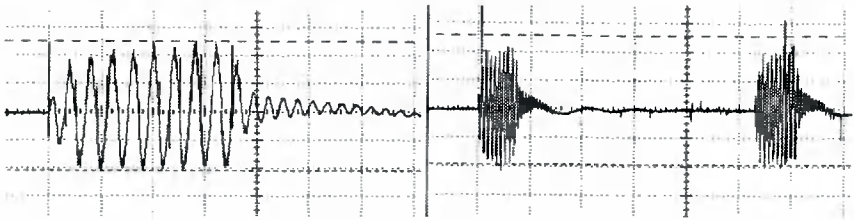
Rys. 8. Charakterystyki układu rzeczywistego oraz charakterystyki uzyskane na drodze symulacji komputerowej: a) w funkcji mocy, b) w funkcji napięcia zasilającego falownik

Na rysunku 9 przedstawiono oscylogram napięcia i prądu na wyjściu mostka falownika przy napięciu U_{dc} równym ok. 200 V, częstotliwości pracy ok. 14,9 kHz i wyprzedzeniu napięcia względem prądu falownika Δt_1 ok. 7 μs . Układ pracował z mocą ok. 0,7 kW. Napięcie wyjściowe falownika nie było prostokątne z powodu obecności dodatkowych kondensatorów w obwodzie głównym likwidujących składową stałą.



Rys. 9. Przebieg napięcia i prądu wyjściowego falownika

Rysunek 10 przedstawia przykładowe przebiegi czasowe prądu falownika przy modulacji PDM uzyskane w układzie z rysunku 6b. Istotną zaletą tego układu jest możliwość regulacji mocy wyjściowej w bardzo szerokich granicach. W prototypie osiągnięto zakres regulacji ok. 1:100 przy mocy maksymalnej ok. 1 kW.



Rys. 10. Oscylogramy prądu wyjściowego falownika o modulacji PDM: i [2A/dz], $f = 24$ kHz, $f_{PDM} = 100$ Hz

6. WNIOSKI

Zidentyfikowano i opisano zjawiska elektryczne w układzie aktywatora.

Opracowano szereg układów sterowania falownikiem rezonansowym w aplikacji aktywatora folii PE. Układy te umożliwiały regulację mocy dostarczonej do elektrod przy jednoczesnym stworzeniu warunków do miękkiej komutacji w całym zakresie pracy.

Opracowano modele symulacyjne falownika rezonansowego pracującego w tej aplikacji, uwzględniające różne obwody główne i obwody sterowania oraz model elektrod z wyładowaniem snopiącym.

Przeprowadzono badania laboratoryjne, analizę porównawczą układów oraz metod sterowania przedstawionych powyżej. Niektóre wymienione powyżej układy (opracowane przez autora) były już wcześniej eksploatowane w warunkach przemysłowych przez okres wielu lat. Badania oraz wdrożenia opisanych powyżej rozwiązań są reali-

zowane przez autora w chwili obecnej. Przewiduje się budowę układów przemysłowych o mocy do ok. 10 kW, w szczególności o sterowaniu częstotliwościowym oraz PDM.

LITERATURA

- [1] Fujita H., Akagi H., 1996. Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW 450 kHz Voltage-Source Inverter for induction melting applications. *IEEE Trans. Ind. Applic.* Vol. IA-32, No. 2, pp. 279-286.
- [2] Fujita H., Ogasawara S., Akagi H., 1997. An Approach to Broad Range of Power Control in Voltage-Source Series-Resonant Inverters for Corona Discharge Treatment - Pulse - Density - Modulation. *IEEE*, pp. 1000-1006.
- [3] Matsysik J., 2001. Metody sterowania integracyjnego tranzystorowych falowników napięcia klasy D z szeregowym obwodem rezonansowym. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska.
- [4] Meek J., Craggs J., 1978. *Electrical breakdown of gases*. John Wiley & Son, New York.
- [5] Mućko J., Strzelecki R., Lutomirski S., 1993. Falownik z tranzystorami IGBT do aktywacji folii polietylenowej. V Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki, T.U. of Gliwice, 15-18 march, Proceedings, ss. 418-425.
- [6] Mućko J., Greczko E., 1996. Resonant Inverters with Improved Output Characteristics. International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE'96, 1-3 October, the High Tatras, Slovakia, pp. 623-627.
- [7] Mućko J., Strzelecki R., Kozakiewicz J., Lutomirski S., 1999. Resonant Inverters with Improved Output Characteristics in Application for Corona Discharge Treatment". *EPE'99, Lausanne, 7-9 IX, CD-ROM*, paper number 857.
- [8] Mućko J., 2000. Aktywator folii polietylenowej – wybrane problemy sterowania i modelowania. Konferencja Modelowanie i Symulacja 2000, Zakopane - Kościelisko, 19-23 czerwca, ss. 63-71.
- [9] Mućko J., 2000. Raport z realizacji I etapu Projektu Celowego KBN "Typoszereg tranzystorowych generatorów wraz z transformatorami WN" do aktywacji folii polietylenowej dla Instytutu Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych „METALCHEM”, zakres opracowania: "Wybór koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego i opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej typoszeregu generatorów. Toruń (opracowanie wewnętrzne).
- [10] Mućko J., 2001. Sterowanie falownika rezonansowego poprzez modulację PDM w aplikacji aktywatora folii polietylenowej. *PES-3 2001, Zakopane - Kościelisko*, 18-22 czerwca.
- [11] Mućko J., 2001. Raport z realizacji III etapu Projektu Celowego KBN "Typoszereg tranzystorowych generatorów wraz z transformatorami WN" do aktywacji folii polietylenowej dla Instytutu Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych „METALCHEM” Toruń, zakres opracowania: "Próby i badania układu prototypowego" (opracowanie wewnętrzne).
- [12] Rosenthal L.A., Davis D.A., 1975. Electric Characterization of a Corona Discharge for Surface Treatment. *IEEE Trans. Ind. Applic.*, Vol. IA-11, No. 3, pp. 328-335.
- [13] Karty katalogowe: Corona Ahlbrandt System, Generatoren, Plasma-Treater, Ahlbrandt System GmbH, Lauterbach, Deutschland.
- [14] Karty katalogowe: Sherman Treaters - Sold State Corona Treaters. Sherman Treaters Ltd., Oxon, United Kingdom.

- [15] Karty katalogowe: Urządzenia do aktywowania folii polietylenowej. IPTS METALCHEM, Toruń.
- [16] Encyklopedia Fizyki, 1974. T. 3, PWN Warszawa.

Badania dotyczące szeregowego falownika rezonansowego z regulowanym napięciem obwodu pośredniczącego w aplikacji aktywatora folii finansowane były przez KBN: **grant celowy Nr 8T10A 1422000C/4915**.

SERIES RESONANT INVERTER IN CORONA TREATMENT APPLICATION

Summary

In article one described control methods and regulation circuits of exit – power of series resonant inverter used in application for activator of polyethylene foil (corona treatment). Higher mentioned control circuits with main circuits became examined on way of digital simulation and experiment. Result of work was realisation of industrial arrangements, in which inverter transistors works with soft switching (ZVS).

Keywords: series resonant inverter, soft switching, corona treatment, ZVS, ZCS, simulation