

Mariusz KLYTTA
Tadeusz RODACKI

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

PROCESY ELEKTROMAGNETYCZNE W OBWODACH GŁÓWNYCH FALOWNIKA PRĄDU POŚREDNIEGO PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe związki analityczne między parametrami elektrycznymi, cechującymi pracę falownika prądu w czasie komutacji. Rozważono komutację dla przypadku zasilenia silnika asynchronicznego oraz 3-fazowego odbioru o charakterze R-L. Szczególną uwagę zwrócono na precyzyjne określenie czasów trwania poszczególnych etapów komutacji.

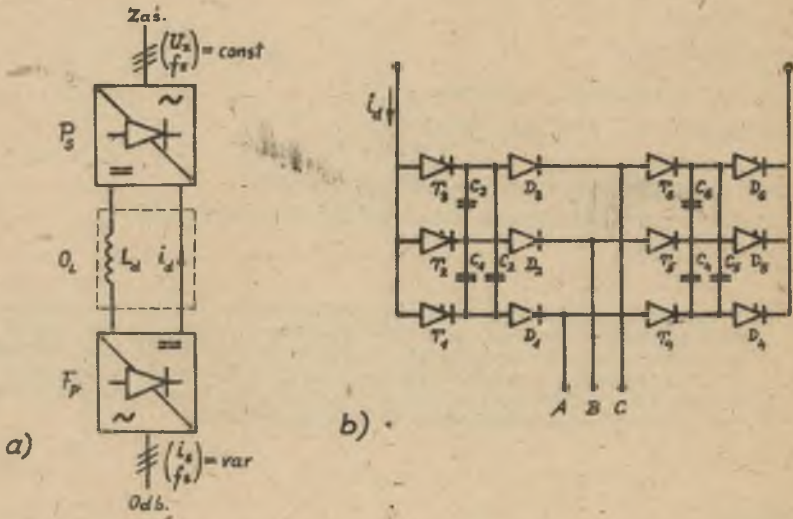
1. Wstęp

Wśród znanych rozwiązań pośrednich przemienników częstotliwości o szerokim zakresie zmian częstotliwości wyjściowej, wieloma korzystnymi właściwościami wyróżnia się rozwiązanie wykorzystujące w II stopniu przetwarzania mocy falownik prądu [2], [3], [5]; (rys. 1a).

Prąd I_d wysuszany jest przez zespół: prostownik starowany - dławik obwodu pośredniczącego L_d . Wartość prądu I_d ustalana jest poprzez zmianęysterowania prostownika. Drugi z przekształtników, falownik, pozwala na uzyskanie pożądanej częstotliwości przebiegów na wyjściu przemiennika, spełniając rolę komutatora elektronicznego wybierającego kolejne pary gałęzi 3-fazowego obciążenia [1], [5]. Podstawą poprawnej pracy falownika oraz w konsekwencji całego przemiennika, są komutacje zachodzące w obrębie zespołu: falownik prądu - obciążenie. Celem artykułu jest podanie związków analitycznych między wielkościami elektrycznymi, opisujących proces komutacji w falowniku prądu. Założono:

- że zawory są idealne w sensie ich statyki (pominięcie spadków napięć na zaworach w stanie przewodzenia oraz prądów tyrystorów w stanach blokowania i zaworowym),
- idealne wygładzenie prądu obwodu pośredniczącego (tzn. $i_d(t) = I_d = \text{const} \pm L_d = \infty$),
- zakres komutacji prostej (całkowity czas komutacji $t_k < \frac{1}{6f_{\text{max}}}$).

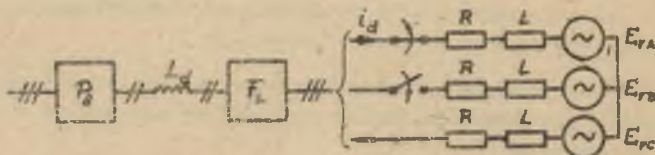
- strukturę falownika prądu zgodnie z rys. 1b,
- obciążenie w postaci klatkowego silnika asynchronicznego oraz 3-fazowego symetrycznego odbioru typu R-L.



Rys. 1. Schemat blokowy pośredniego przemiennika częstotliwości z falownikiem prądu (a) (P_s - prostownik sterowany, O_L - obwód pośredniczący prądu stałego, F_p - falownik prądu) oraz schemat ideowy falownika prądu z diodami odcinającymi (b)

2. Analiza procesu komutacji w falowniku prądu zasilającym silnik asynchroniczny

Dla silnika asynchronicznego zasilanego z falownika prądowego można przyjąć, w całym niemal zakresie częstotliwości, schemat zastępczy typu R-L-E [2] (rys. 2).



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika asynchronicznego przy zasilaniu z falownika prądu

Przy założeniu pracy za stabilizacją strumienia skojarzonego wirnika ($\psi_r = \text{const}$) wartości sił elektromotorycznych rotacji E_r są proporcjonalne do częstotliwości zasilania silnika

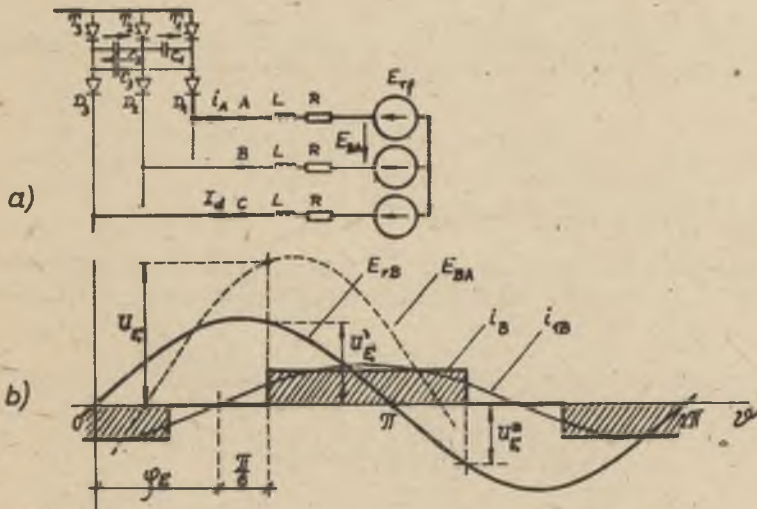
$$E_r = E_{rn} \frac{f}{f_n} \tag{1}$$

gdzie E_{rn} jest, określoną parametrami maszyny, wartością amplitudy E_r dla warunków znamionowych.

Zależność wartości E_{rn} od parametrów zwarciovych oraz znamionowego współczynnika mocy $\cos \varphi_n$ maszyny, sprawia, iż spotykane w opracowaniach tematu oszacowanie przybliżone: $E_{rn} = U_{mn}$ prowadzić może do określonych błędów obliczeniowych, zwłaszcza dla niezbyt dużych mocy napędów.

Przykładowo już dla silników o mocach znamionowych $P_n \approx 20-25$ kW, typowe wartości E_{rn} nie przekraczają 95% U_{mn} .

Najistotniejsze z punktu widzenia projektowania i doboru elementów falownika, są zależności wartości maksymalnych napięć na kondensatorach komutacyjnych oraz czasów poszczególnych etapów komutacji od parametrów (częstotliwości f_s oraz obciążenia) pracy napędu. Opisowi procesu komutacji w omawianym falowniku poświęcono wiele prac. Poniżej, przy podawaniu określonych związków, ograniczono się jedynie do niezbędnych uwag.



Rys. 3. Schemat fragmentu zespołu falownik prądu-silnik asynchroniczny; stan przed komutacją tyristora T_1 ($u_{c1} = -u_{c3} = u_c(0)$, $u_{c2} = 0$) (a) oraz uproszczone przebiegi czasowe wybranych wielkości układu ($u_E = u'_E - u''_E$) (b)

Jak wynika z rys. 3b, międzyprzewodowa sem rotacji komutujących faz

$$U_E = \frac{f}{T_n} E_{rn} \left[\sin\left(\frac{\alpha}{6} + \varphi_E\right) - \sin\left(\frac{\alpha}{6} + \varphi_E + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \sqrt{3} E_{rn} \sin \varphi_E \quad (2)$$

gdzie

$$\varphi_E = \chi(E_r, \frac{1}{\omega}) = \varphi(\beta) \quad (3)$$

jest kątem między wskazami sem E_r oraz 1-harmonicznej prądu stojana oraz:

α, β - są względnymi wartościami częstotliwości harmonicznych podstawowych, odpowiednio w obwodzie stojana i wirnika silnika.

Ponieważ zachodzi: $\varphi_E \in (\varphi_{Emin}, \varphi_{Emax}) \subset (0, \pi)$; napięcie U_E zmienne wraz z częstotliwością oraz z obciążeniem (por. (2), (3)), przyjmuje wyłącznie wartości dodatnie. W konsekwencji, w I etapie komutacji, rozpoczynającym się włączeniem tyrystora fazy mającej przejąć prąd obciążenia, a kończącym się z chwilą dodatniej polaryzacji diody w gałęzi ww. tyrystora (dla przypadku z rys. 3a tyrystor T_2 , faza B oraz dioda D_2), napięcie kondensatora komutacyjnego przeładowywanego stałym prądem I_d

$$U_c(t) = U_c(0) - \frac{I_d}{C} t \quad (4)$$

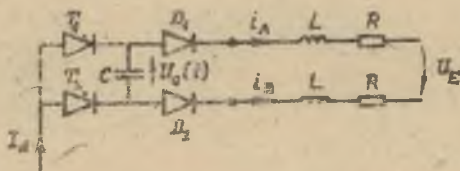
zmienia znak ($U_c(t_1) < 0$).

Przebieg czasowy napięcia na diodzie D_2 ma postać

$$U_{D2}(t) = -U_c(t) - U_E + I_d R, \quad (5)$$

skąd czas trwania I etapu komutacji

$$t_1 = C \left\{ \left[U_c(0) + U_E \right] \frac{1}{I_d} - R \right\}. \quad (6)$$



Rys. 4. Schemat wycinka układu podczas II etapu komutacji w grupie anodowej między fazami A i B

Pojemność $C = \frac{3}{2} C_1$; $1 = 1, 2, 3$

W II etapie komutacji, cechującą się chwilowym przewodzeniem wszystkich 3 faz, struktura tworzącego się obwodu (rys. 4) prowadzi do równania

$$\frac{d^2}{dt^2} U_c(t) + 2\alpha\omega_0 \frac{d}{dt} U_c(t) + \omega_0^2 U_c(t) = -\omega_0^2(RI_d + U_E), \quad (7)$$

z warunkami początkowymi:

$$U_c(0) = RI_d - U_E \quad (7a)$$

$$\left. \frac{d}{dt} U_c(t) \right|_{t=0} = -\frac{I_d}{C},$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{R}{Q} \quad - \text{współczynnik tłumienia obwodu komutacyjnego,}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2L}{C}} \quad - \text{impedancja falowa obwodu komutacyjnego,}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2LC}} \quad - \text{pulsacja własna nietłumioma obwodu komutacyjnego.}$$

Na podstawie równania różniczkowego (7) otrzymuje się

$$\alpha_c^{-1} \{ U_c(p) \} = -I_d Q \omega^{-1} \exp(-\alpha\omega_0 t) \left[\sin w\omega_0 t - 2\alpha \cos(w\omega_0 t - \delta) \right] - (RI_d + U_E), \quad (8)$$

gdzie:

$$w = \sqrt{1 - \alpha^2},$$

$$\delta = \arctg \frac{\alpha}{w}.$$

Znajomość przebiegu czasowego napięcia kondensatora komutacyjnego $U_c(t)$ pozwala na określenie prądów komutujących faz:

$$i_A(t) = -C \frac{dU_c(t)}{dt} = I_d \exp(-\alpha\omega_0 t) (\cos w\omega_0 t + \alpha w^{-1} \sin w\omega_0 t), \quad (9)$$

$$i_B(t) = I_d - i_A(t)$$

oraz czasu trwania II etapu komutacji

$$t_2 = \frac{1}{w\omega_0} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\frac{\alpha}{w} \right) \right]. \quad (10)$$

Napięcie początkowe kondensatora komutacyjnego $U_c(0)$ można obliczyć z warunku cykliczności przebiegów w falowniku

$$U_c(0) = -U_c(\tau_k) \quad (11)$$

(τ_k - całkowity czas komutacji).

Uwzględniając podane wcześniej zależności, w szczególności (9) i (10), napięcie $U_c(0)$, będące jednocześnie maksymalnym napięciem blokowania i wstępnym napięciem tyristorów mostka falowniczego, przyjmuje postać

$$U_c(0) = U_E + I_D \left\{ Q \exp \left[-\frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] + R \right\}. \quad (12)$$

Wstawiając powyższą wartość do wzoru (6), otrzymuje się w odniesieniu do czasu I etapu komutacji

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \frac{2}{Q I_D} U_E' + \exp \left[-\frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \right\}. \quad (13)$$

Od poziomu napięcia $U_c(0)$ zależy także najistotniejsza z punktu widzenia niezawodnej komutacji tyristorów wartość czasu dysponowanego na wyłączenie

$$t_{dw} = \frac{C \cdot U_c(0)}{I_D} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \frac{U_E}{Q I_D} + \exp \left[-\frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] + \alpha \right\}. \quad (14)$$

3. Zależności obowiązujące dla komutacji w falowniku prądu w przypadku 3-fazowego, symetrycznego odbioru typu R-L

Dla rozważanego przypadku (który obejmuje również stan zwarcia silnika) ważność zachowują podane w punkcie 2 zależności, opisujące przebieg prądu w II etapie komutacji oraz czas trwania II etapu (9) oraz (10). Czas trwania I etapu komutacji oraz napięcie na kondensatorze komutacyjnym $U_c(0)$ otrzymać można przyjmując odpowiednio we wzorach (13) oraz (12) $U_E = 0$.

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_0} \exp \left[-\frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\alpha}{\omega} \right) \right]. \quad (15)$$

$$U_c(0) = I_D \left\{ R + Q \exp \left[-\frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \right\}. \quad (16)$$

Ponieważ napięcie końcowe kondensatora komutacyjnego w I etapie komutacji

$$U_c(\tau_1) = R I_D > 0, \quad (17)$$

czas dysponowany na wyłączenie komutowanego tyrystora t_{dw} wykracza poza pierwszy etap komutacji

$$t_{dw} = t_1 + t', \tag{18}$$

gdzie czas t' w formie uwikłanej podaje równanie (otrzymane z $U_c(t)$ wg wzoru (8) dla $U_E = 0$)

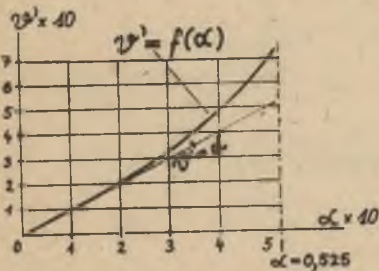
$$I_d \left\{ -R - g \exp(-\alpha \omega_0 t') \left[\frac{1}{W} \sin \omega_0 t' - \frac{2\alpha}{W} \cos(\omega_0 t' - \delta) \right] \right\} = 0. \tag{19}$$

Przekształcając powyższe równanie (przy uwzględnieniu rzędu wartości α oraz t' , skąd $\exp(-\alpha \omega_0 t') \approx 1$), otrzymuje się

$$\omega_0 t' = \operatorname{arctg} \left(\frac{2\alpha W}{W - \alpha^2} \right) - \arcsin \omega \alpha. \tag{20}$$

Wobec spełnienia w realnych układach warunków $\alpha \leq 0,525$ i wynikającej stąd nierówności: $(\omega \alpha)^2 + (2\omega \alpha)^2 \leq 1$, zapisać można ostatecznie

$$\psi' = \omega_0 t' = \frac{1}{W} \arcsin \left[2\omega \alpha \sqrt{1 - (\omega \alpha)^2} - \omega \alpha \sqrt{1 - (2\omega \alpha)^2} \right] \tag{21}$$



Rys. 5. Wykres zależności kąta ψ' od współczynnika tłumienia obwodu komutacyjnego

Charakter zależności $\psi' = f(\alpha)$ (rys. 5), pozwala na przyjęcie w zakresie realnych wartości współczynnika tłumienia, praktycznie bez błędu, oszacowania

$$\psi' = \alpha. \tag{22}$$

W konsekwencji, wzór określający czas dysponowany na wyłączenie dla przypadku obciążenia typu R-L przyjmuje postać

$$t_{dw} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \exp \left[-\frac{R}{W} \left(\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{R}{W} \right) \right] + \alpha \right\}. \tag{23}$$

4. Zakończenie

Przedstawione w artykule zależności są istotne z punktu widzenia analizy przebiegu komutacji i projektowania elementów obwodów głównych falownika. Obowiązują one przy upraszczającym założeniu stanu idealnego wymuszenia prądowego $i_d(t) = I_d = \text{const}$. Związki te, jakkolwiek użyteczne,

szczególnie z inżynierskiego punktu widzenia, prowadzą do wartości odbiegających w ogólności nieco od wartości mierzonych w układach rzeczywistych [3] [4]. Rozbieżności te wynikają z mającego miejsce, a nie uwzględnianego w przyjętym modelu, odkształcenia krzywej prądu i_d w chwili komutacji. Wielkości rozbieżności, osiągające wartości rzędu kilkunastu procent, zależą w konkretnych przypadkach od wartości indukcyjności L_d dławika obwodu pośredniczącego.

LITERATURA

- [1] KRIVICKIJ S.O., EPSZTEJN I.I.: Dinamika czastotno-regulirujemych elektropriwodow s awtonomnymi inwertorami. Energia, Moskwa, 1970.
- [2] KLAUTSCHEK H.: Das Verhalten der Induktionsmaschine bei Speisung über Stromzwischenkreisumrichter. ETZ, Bd. 95, 1974, H. 5.
- [3] GRZESIK B., WOSIŃSKI H.: Projektowanie elementów obwodów głównych przemiennika z falownikiem prądowym zasilającym silnik asynchroniczny. Krajowa Konferencja, AGH, Kraków, 1977.
- [4] WOSIŃSKI H., GRZESIK B., MYRCIK Cz., NOWAK J., KLYTTA M.: Wyniki badań prototypu układu napędowego z silnikiem asynchronicznym klatkowym o mocy 45 kW zasilanym z falownika prądowego. Krajowa Konferencja, AGH Kraków 1977.
- [5] KLYTTA M.: Układy napędowe z asynchronicznymi silnikami klatkowymi zasilanymi z falowników prądu. Materiały konferencyjne, OPT, Katowice 1976.

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1980

Recenzent:

Doc. dr Józef Danczewicz

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ИНВЕРТОРА ТОКА ПОСРЕДНЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Р е з ю м е

В статье представлены основные аналитические соотношения между электрическими параметрами, характеризующими коммутационные процессы в инверторе тока. Проанализированы коммутационные процессы во время питания асинхронного двигателя, а также 3-фазной активно-индуктивной нагрузки. Обращено особое внимание на точное определение времени коммутационных этапов.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE MAIN CIRCUITS
OF THE TRANSIENT CURRENT INVERTOR IN THE FREQUENCY CONVERTOR

S u m m a r y

The paper presents the basic analytical ties among electrical parameters that characterize the current inverter's operation at the time of commutation. The commutation for powering the asynchronous motor and 3-phase reception, type R-L have been analysed. Special attention has been paid to precise determination of the duration time of each particular commutation stage.