ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: ELEKTRYKA z. 168 Nr kol. 1418

Tadeusz JANIK, Jan KAPINOS, Roman MIKSIEWICZ

WŁYW USZKODZENIA UKŁADU PROSTOWNICZEGO NA PRACĘ WZBUDNICY BEZSZCZOTKOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy i badań symulacyjnych wpływu uszkodzenia układu prostowniczego na pracę synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej. Przedstawiono metodę doboru klatki tłumiącej wzbudnicy i określono, w jakim stopniu uszkodzenie układu prostowniczego wzbudnicy wpływa na konieczność przewymiarowania jej obwodu elektromagnetycznego.

INFLUENCE OF BRIDGE RECTIFIER DAMAGES ON OPERATION OF BRUSHLESS EXCITER

Summary. Analysis and simulation results of bridge rectifier damages on operation of a brushless exciter have been presented in the paper. A method of choice of the exciter damper winding has been discussed as well. There has been stated how the exciter bridge rectifier damage influences the necessity of redimensioning the exciter electromagnetic circuit.

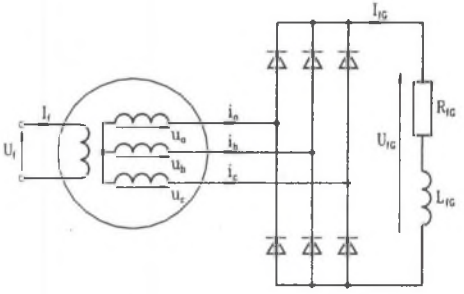
1. WPROWADZENIE

Synchroniczna wzbudnica bezszczotkowa jest jednym z rozwiązań źródła wzbudzenia generatora synchronicznego, które stanowi prądnica synchroniczna o budowie odwróconej wraz z wirującym układem prostowniczym. Uwarunkowania techniczne powodują, że wirujący układ prostowniczy jest wykonany zwykle jako układ diodowy. Napięcie twornika wzbudnicy o podwyższonej częstotliwości ($f = 200 \div 500$ Hz) zasila mostek diodowy, umiejscowiony na wspólnym wale z generatorem. Pozwala to na doprowadzenie wyprostowanego prądu mostka diodowego do uzwojenia wzbudzenia generatora bez pośrednictwa pierścieni ślizgowych, poprzez przewody zasilające umieszczone w wydrążeniach

wału. Uniknięcie stosowania zestyku ślizgowego pierścień - szczotka eliminuje trudności eksploatacyjne związane z doprowadzeniem prądu do uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora. Własności wzbudnicy bezszczotkowej, jako źródła wzbudzenia generatora synchronicznego, zależą od stanu pracy układu prostowniczego oraz parametrów elektromagnetycznych wzbudnicy.

Wymagania stawiane źródłu wzbudzenia generatora powodują, że wzbudnica bezszczotkowa powinna zapewnić prawidłową pracę generatora w każdych warunkach, w tym również w czasie forsowania wzbudzenia. Parametry elektromagnetyczne wzbudnicy powinny ponadto zapewniać pracę mostka diodowego w pierwszym przedziale komutacji, co można uzyskać w wyniku odpowiedniego jej zaprojektowania. Konieczność uzyskania odpowiednio dużej niezawodności pracy generatora powoduje, że również w przypadku wystąpienia niektórych stanów awaryjnych układu prostowniczego, wzbudnica bezszczotkowa powinna umożliwić zachowanie ciągłości pracy generatora. Na rys.1 przedstawiono schemat ideowy trójfazowej wzbudnicy bezszczotkowej. W tego typu rozwiązaniu konstrukcyjnym wzbudnicy rozważono wpływ stanów awaryjnych mostka diodowego na własności eksploatacyjne wzbudnicy. Analizowano następujące przypadki stanów awaryjnych mostka:

- wyłączenie z pracy pojedynczej diody,
- wyłączenie z pracy jednej gałęzi.



Rys.1. Schemat ideowy 3-fazowej wzbudnicy bezszczotkowej
Fig.1. Schematic diagram of the 3-phase brushless exciter

W porównaniu z pracą symetryczną mostka, rozpatrywane stany awaryjne powodują zmniejszenie wartości średniej napięcia wyprostowanego, asymetrię prądów fazowych twornika wzbudnicy oraz powiększenie stopnia odkształcenia tych prądów.

W celu oceny uzyskanych analitycznych zależności na wartość średnią napięcia wyprostowanego i wartości prądów fazowych twornika wzbudnicy w rozważanych stanach awaryjnych mostka diodowego, przeprowadzono badania symulacyjne wzbudnicy obciążonej odbiornikiem *RL*, o parametrach uzwojenia wzbudzenia współpracującego z nią turbogeneratora. Przedstawione w artykule wyniki uzyskano, wykorzystując do badań symulacyjnych program TCAD 6.2.

Spełnienie wymagań stawianych wzbudnicy bezszczotkowej, jako źródłu wzbudzenia generatora synchronicznego, z uwzględnieniem stanów awaryjnych mostka prowadzi do konieczności wykonania wzbudnicy o powiększonych wymiarach obwodu

elektromagnetycznego. Minimalizacja skutków uszkodzenia mostka diodowego na jakość pracy wzbudnicy wymaga wyposażenia jej w odpowiednio dobraną klatkę tłumiącą. Doboru klatki tłumiącej dokonano zakładając, że całkowity przepływ wytworzony przez wyższe harmoniczne prądów fazowych twornika wzbudnicy jest kompensowany przez to uzwojenie. Ekranujące działanie tak dobranej klatki tłumiącej pozwoli na poprawną pracę wzbudnicy przy niesymetrycznym, odkształconym prądzie obciążenia. Obliczenia projektowe wzbudnicy bezszczotkowej do generatora synchronicznego o mocy P_N=63 MW, z uwzględnieniem wymagań stawianych dla pracy symetrycznej i asymetrycznej mostka diodowego, pozwoliły na stwierdzenie, że uzasadnione może być wykonanie wzbudnicy zaprojektowanej jedynie wg wymagań stanu awaryjnego mostka w postaci wyłączenia pojedynczej diody.

2. STANY PRACY MOSTKA DIODOWEGO WZBUDNICY

W celu porównania własności eksploatacyjnych wzbudnicy bezszczotkowej w rozpatrywanych stanach awaryjnych układu prostowniczego, jako punkt wyjścia przyjęto stan pracy symetrycznej mostka. Założono, że prostownik diodowy:

- jest zasilany 3-fazowym, symetrycznym, sinusoidalnym napięciem twornika wzbudnicy,
- pracuje w pierwszym przedziale komutacji ($0<\gamma<\pi/3$),
- zasila uzwojenie wzbudzenia turbogeneratora o stałych parametrach R_{fG}, L_{fG} ($L_{fG}\rightarrow\infty$).

2.1. Praca symetryczna

Przyjmując, że dane są wartości średnie napięcia wyprostowanego U_{fG} oraz prądu wyprostowanego I_{fG} , wartości skuteczne napięć U i prądów fazowych twornika I określają zależności [4]:

$$U=\frac{\pi}{3\sqrt{6}}\left(U_{fG}+\frac{3}{\pi}X_{\gamma}I_{fG}\right),$$

$$I=\sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{1-\frac{3\Psi(\gamma)}{2\pi(1-\cos\gamma)^2}}I_{fG} \tag{1}$$

gdzie:

$\Psi(\gamma)=\sin\gamma(2+\cos\gamma)-\gamma(1+2\cos\gamma)$,

$\gamma=\arccos(1-\frac{2X_{\gamma}I_{fG}}{\sqrt{6}U})$ - kąt komutacji,

$X\gamma=\frac{X_d''+X_2}{2}$ - reaktancja komutacyjna,

X_d'' - reaktancja podprzejściowa wzbudnicy,

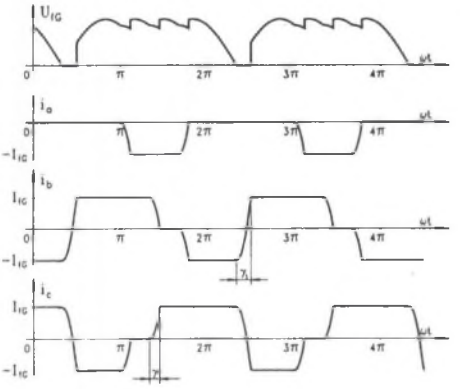
X_2 - reaktancja składowej przeciwnej wzbudnicy.

2.2. Praca awaryjna przy wyłączeniu pojedynczej diody

Rozpatrywany stan awaryjny mostka diodowego wzbudnicy w postaci wyłączenia z pracy pojedynczej diody charakteryzuje się tym, że:

- powoduje niesymetryczne obciążenie twornika wzbudnicy,
- prąd fazy twornika wzbudnicy zasilającej gałąź mostka, w której wystąpiło wyłączenie diody, jest prądem jednokierunkowym,
- wydłuża się czas przewodzenia prądu i czas komutacji dwóch pozostałych diod grupy (anodowej lub katodowej), w której wystąpiło uszkodzenie.

Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego oraz prądów fazowych twornika wzbudnicy w rozpatrywanym stanie awaryjnym mostka, określone na drodze analitycznej, przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego i prądów fazowych twornika wzbudnicy przy wyłączeniu jednej diody mostka

Fig.2. Waveforms of rectified voltage and armature phase currents of the exciter while one diode of the bridge is defected

Przy zadanej wartości średniej napięcia wyprostowanego U_{fG} i prądu I_{fG} wartości skuteczne napięć fazowych U oraz prądów fazowych I_a, I_b , I_c twornika wzbudnicy są określone zależnościami [2]:

$$U = \frac{2\pi}{5\sqrt{6}}\left(U_{fG} + \frac{5}{2\pi} X_\gamma I_{fG}\right),$$

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{3}}\sqrt{1 - \frac{3\Psi(\gamma)}{2\pi(1-\cos\gamma)^2}}\; I_{fG}, \qquad (2)$$

$$I_b = I_c = \sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{1 - \frac{3[\Psi(\gamma) + 0{,}5\Psi(\gamma_1)]}{5\pi(1-\cos\gamma)^2}}\, I_{fG}$$

gdzie:

$$\gamma_1 = \arccos\left(1 - \frac{4X_\gamma I_{fG}}{\sqrt{6}U}\right),$$

$$I_{fG} = \frac{U_{fG}}{R_{fG}}.$$

Porównanie zależności (1) dla pracy symetrycznej mostka i rozpatrywanego stanu awaryjnego opisanego zależnością (2) pozwala stwierdzić, że przy pracy mostka wzbudnicy z wyłączoną pojedynczą diodą występuje:

- zmniejszenie wartości średniej napięcia wyprostowanego wzbudnicy o około 15%; aby uzyskać wartość napięcia U_{fG} jak w stanie pracy symetrycznej mostka, konieczne jest odpowiednie powiększenie przepływu wzbudzenia wzbudnicy,

- asymetria prądów fazowych twornika wzbudnicy, przy czym wartość skuteczna prądów w dwóch fazach ulega powiększeniu o około 12%, jeśli napięcie U_{fG} ma wartość taką samą, jak przy pracy symetrycznej mostka.

2.3. Praca awaryjna przy wyłączeniu jednej gałęzi

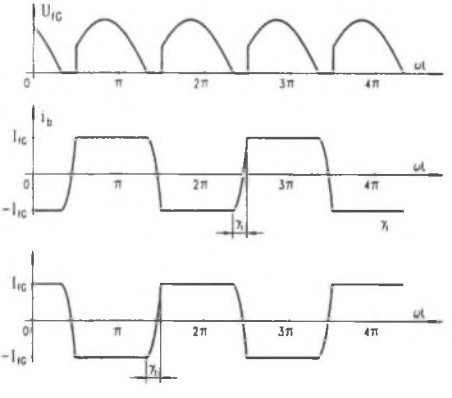
Awaryjny stan pracy mostka diodowego wzbudnicy, polegający na wyłączeniu z pracy jednej jego gałęzi, charakteryzuje się tym, że:

- powoduje niesymetryczne obciążenie wzbudnicy (obciążone są tylko dwie fazy twornika),
- pracująca cześć prostownika stanowi układ jednofazowy, zasilany napięciem międzyprzewodowym wzbudnicy,
- wydłuża się czas przewodzenia prądu i czas komutacji pracujących diod mostka.

Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego oraz prądów fazowych twornika wzbudnicy dla rozpatrywanego stanu awaryjnego mostka, określone na drodze analitycznej, przedstawiono na rys.3.

Wartości skuteczne napięć fazowych U oraz prądów fazowych I_a, I_b, I_c twornika wzbudnicy przy zadanych wartościach napięcia wyprostowanego U_{fG} i prądu I_{fG} można wyznaczyć z zależności [2]:

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{6}}\left(U_{fG} + \frac{2}{\pi}X_\gamma I_{fG}\right),$$
$$I_a = 0, \qquad (3)$$
$$I_b = I_c = \sqrt{1 - \frac{2\Psi(\gamma_1)}{\pi(1-\cos\gamma_1)^2}}\, I_{fG}.$$



Rys.3. Przebiegi czasowe napięcia wyprostowanego i prądów fazowych twornika wzbudnicy przy wyłączeniu jednej gałęzi mostka

Fig.3. Waveforms of rectified voltage and armature phase currents of the exciter while one branch of the bridge is defected

Z porównania zależności (1) dla pracy symetrycznej i zależności (3) wynika, że podczas pracy mostka wzbudnicy z wyłączoną jedną gałęzią występuje:

- zmniejszenie wartości średniej napięcia wyprostowanego wzbudnicy o około 30%,
- asymetria prądów fazowych twornika wzbudnicy, przy czym wartość skuteczna prądów w obciążonych fazach powiększa się o około 22%, jeśli napięcie U_{fG} ma taką samą wartość, jak w stanie pracy symetrycznej mostka.

3. UWARUNKOWANIA DOBORU OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO WZBUDNICY

Obciążenie prądnicy synchronicznej układem prostowniczym, stanowiącym integralny element wzbudnicy bezszczotkowej, powoduje zasadniczą zmianę jej warunków pracy, w porównaniu z pracą przy obciążeniu symetrycznym odbiornikiem trójfazowym. Zmiana ta jest spowodowana odkształceniem prądów fazowych, co jest przyczyną powstawania dodatkowych strat mocy czynnej w uzwojeniu twornika i obwodach magneśnicy. Uszkodzenie układu prostowniczego pociąga za sobą niesymetrię prądów fazowych wzbudnicy i dalszy wzrost strat mocy czynnej.

Przepływ magnetyczny wytworzony przez trójfazowe uzwojenie twornika wzbudnicy od składowej zgodnej $I_{\nu 1}$ i przeciwnej $I_{\nu 2}$, ν-tej harmonicznej prądu twornika określa zależność:

$$F_{\nu 1,2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{N_s k_d}{p} I_{\nu 1,2} \tag{4}$$

gdzie:

N_s – liczba zwojów fazy uzwojenia twornika,

k_d – współczynnik uzwojenia twornika dla podstawowej harmonicznej przestrzennej,

p - liczba par biegunów.

Składowe stałe prądów fazowych twornika wzbudnicy wytwarzają przepływ o prędkości ω_1 (prędkość wirowania pola dla podstawowej harmonicznej prądów twornika) względem magneśnicy. Wartość podstawowej harmonicznej przestrzennej przepływu wytworzonego przez składowe stałe prądów fazowych twornika (I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}) wynosi:

$$F_0 = \frac{2}{\pi} \frac{N_s k_d}{p} I_0 \tag{5}$$

gdzie:

$$I_0 = |I_{a0} + \alpha I_{b0} + \alpha^2 I_{c0}|,$$

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}.$$

Określenie wypadkowego przepływu wytwarzanego przez uzwojenie twornika wzbudnicy wymaga wyznaczenia wartości poszczególnych harmonicznych prądów fazowych oraz ich składowych symetrycznych. W stanie pracy symetrycznej mostka diodowego wzbudnicy prądy twornika wytwarzają tylko przepływy od wyższych harmonicznych czasowych rzędu $\nu = 6k \pm 1$. Praca awaryjna mostka prowadzi do powiększenia stopnia odkształcenia prądów fazowych, a tym samym rośnie zawartość widma harmonicznych oraz pojawiają się składowe przeciwne tych harmonicznych. W przypadku wyłączenia z pracy pojedynczej diody mostka występują ponadto składowe stałe prądów twornika. Celem zapewnienia poprawnych warunków pracy wzbudnicy bezszczotkowej zachodzi więc konieczność skompensowania pasożytniczych przepływów pochodzących od wyższych

harmonicznych prądów twornika. Uzyskuje się to poprzez wyposażenie wzbudnicy w odpowiednio dobraną klatkę tłumiącą.

3.1. Uzwojenie tłumiące

Zastosowana metoda doboru klatki tłumiącej opiera się na założeniu, że przepływy wytworzone przez wyższe harmoniczne odkształconego prądu twornika powinny być całkowicie skompensowane przez przepływ klatki. Zagadnienie projektowe polega więc na określeniu zastępczego prądu uzwojenia tłumiącego a następnie doborze przekroju pręta klatki. Wyznaczona wartość skuteczna tego prądu umożliwia zarazem wyznaczenie strat mocy czynnej w uzwojeniu tłumiącym.

Wartość skuteczna zastępczego prądu pręta klatki wynosi:

$$I_e = \sqrt{I_{e0}^2 + I_{e2}^2 + I_{e\nu}^2} \tag{6}$$

gdzie:

$$I_{e\nu} = \sqrt{\sum_{\nu} I_{e\nu 1,2}^2}$$

I_{e0} - zastępczy prąd klatki tłumiącej, niezbędny do skompensowania przepływu twornika, wytworzonego przez składowe stałe prądów fazowych twornika,

I_{e2} - zastępczy prąd klatki niezbędny do skompensowania przepływu twornika, wytworzonego przez składową przeciwną podstawowej harmonicznej prądu twornika,

$I_{e\nu}$ - zastępczy prąd klatki niezbędny do skompensowania przepływów twornika, wytworzonych przez składowe zgodne $I_{\nu 1}$ i przeciwne $I_{\nu 21}$ wyższych harmonicznych prądu twornika.

Wartości skuteczne zastępczych prądów klatki tłumiącej I_{e0}, I_{e2}, $I_{e\nu}$ można wyznaczyć z porównania przepływów wytworzonych przez daną harmoniczną prądu twornika z przepływem klatki tłumiącej. Przepływ wytworzony przez ν-tą harmoniczną zastępczego prądu klatki tłumiącej, kompensujący odpowiednio przepływy składowej zgodnej i przeciwnej wyższych harmonicznych prądu twornika, jest równy:

$$F_{e\nu 1,2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} Q_{dc} I_{e\nu 1,2} \tag{7}$$

gdzie:

$F_{e\nu 1,2}$ - przepływy składowej zgodnej i przeciwnej dla ν-tej harmonicznej zastępczego prądu klatki tłumiącej,

Q_{dc} - liczba prętów klatki tłumiącej na jednym biegunie.

Przepływ wytworzony przez zastępczy prąd klatki tłumiącej I_{e0} jest równy:

$$F_{e0} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} Q_{dc} I_{e0} . \tag{8}$$

Uwzględniając, że przepływy wyrażone przez równania (4) i (7) oraz (5) i (8) powinny być sobie równe, otrzymuje się zależności:

$$I_{e\nu 1,2} = \frac{3}{p} \frac{N_s}{Q_{dc}} k_d I_{\nu 1,2} , \tag{9}$$

$$I_{e0} = \frac{\sqrt{2}}{p} \frac{N_s}{Q_{dc}} k_d I_0 . \tag{10}$$

Zastępczy prąd klatki tłumiącej I_{e2} określa się z zależności (9), przyjmując $\nu = 1$. Wówczas:

$$I_{e2} = \frac{3}{p} \frac{N_s}{Q_{dc}} k_d I_2 . \tag{11}$$

Uwzględniając, że przy pracy symetrycznej układu prostowniczego wzbudnicy

$I_{e0} = 0,$ $\qquad I_{e2} = 0,$

zastępczy prąd klatki tłumiącej jest równy:

$$I_e = I_{e\nu} .$$

W obliczeniach zastępczego prądu klatki tłumiącej $I_{e\nu}$ należy uwzględnić fakt, że te same wartości bezwzględne prędkości wirowania względem magneśnicy mają przepływy wywołane przez odpowiednie składowe zgodnej i przeciwnej kolejności faz różnych ν-tych harmonicznych prądu twornika, na przykład:

$|\omega| = 3\omega_l \quad \Rightarrow \quad$ zgodna $\nu = 4$ $\quad$ i przeciwna $\nu = 2$,

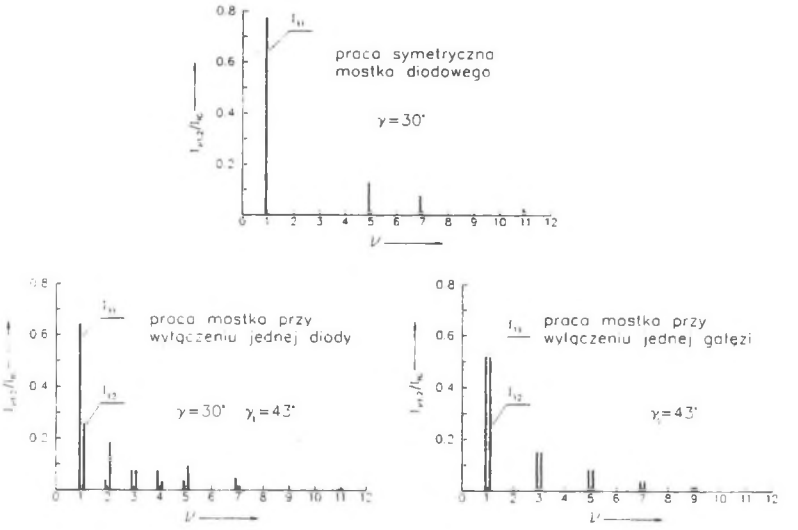
$|\omega| = 5\omega_l \quad \Rightarrow \quad$ zgodna $\nu = 6$ $\quad$ i przeciwna $\nu = 4$,

$|\omega| = 6\omega_l \quad \Rightarrow \quad$ zgodna $\nu = 7$ $\quad$ i przeciwna $\nu = 5$.

Przy projektowaniu klatki tłumiącej można przyjąć sumowanie arytmetyczne przepływów pochodzących od składowych zgodnej i przeciwnej odpowiednich harmonicznych prądu twornika, które mają te same bezwzględne wartości prędkości wirowania względem magneśnicy. W rzeczywistości gęstość prądu w prętach klatki tłumiącej ma nierównomierny rozkład i jest mniejsza od wartości wyznaczonej z zastępczego prądu klatki tłumiącej, zgodnie z zależnością (6). Dobrana w ten sposób klatka jest „przewymiarowana", co zapewnia pracę układu prostowniczego w pierwszym przedziale komutacji.

Wyznaczenie zastępczego prądu klatki tłumiącej wzbudnicy bezszczotkowej wymaga przy danym kącie komutacji zaworów:

- rozwinięcia przebiegów czasowych prądów fazowych wzbudnicy w szereg Fouriera,
- obliczenia wartości składowych symetrycznych dla każdej harmonicznej prądu,
- obliczenia poszczególnych składowych zastępczego prądu klatki.



Rys.4. Widmo harmonicznych składowych symetrycznych prądu twornika wzbudnicy

Fig.4. Spectrum of the harmonic symmetrical components of the exciter armature current

Dla rozpatrywanych w artykule stanów uszkodzeń mostka diodowego wzbudnicy wyznaczono widmo składowych symetrycznych prądów fazowych przy różnych wartościach kąta komutacji. Stwierdzono, że zmiana kąta komutacji wynikające z elektromagnetycznych parametrów wzbudnicy i przewidzianego przedziału prądu obciążenia, nie powodują istotnych zmian widmie harmonicznych. Na rys.4 przedstawiono widmo składowych symetrycznych prądów twornika przy pracy symetrycznej i rozważanych uszkodzeniach mostka, obciążonego uzwojeniem wzbudzenia generatora synchronicznego.

3.2. Obliczenia projektowe wzbudnicy

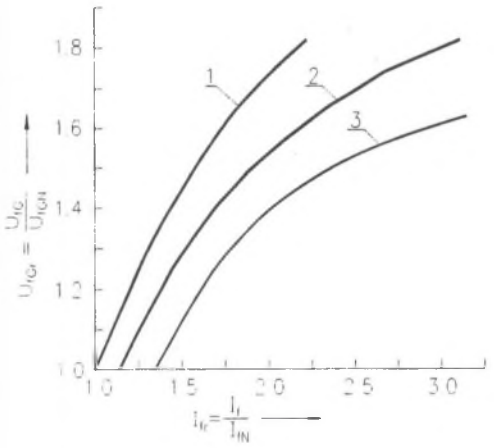
W stanach awaryjnych mostka diodowego wzbudnicy ulega zmniejszeniu wartość średnia napięcia wyprostowanego, w stosunku do wartości napięcia uzyskiwanego przy pracy symetrycznej mostka. Zapewnienie odpowiedniej wartości prądu wzbudzenia generatora synchronicznego, również w stanie awaryjnym mostka, wymaga powiększenia prądu wzbudzenia wzbudnicy. Należy mieć na uwadze również fakt, że wzbudnica w stanie awaryjnym mostka powinna umożliwiać pracę generatora z forsowaniem wzbudzenia. Zachowanie dyspozycyjności generatora w pewnych stanach awaryjnych mostka wzbudnicy wymaga więc odpowiedniego zaprojektowania wzbudnicy, z przewymiarowanym obwodem elektromagnetycznym, w stosunku do wymagań projektowych dla pracy symetrycznej.

Przewymiarowanie obwodu elektromagnetycznego wzbudnicy wynika z konieczności:

- powiększenia liczby zwojów uzwojenia twornika lub jego długości wskutek zmniejszenia napięcia wyprostowanego w stanach awaryjnych mostka wzbudnicy,
- powiększenia przekroju uzwojenia twornika z powodu wzrostu prądów fazowych,
- powiększenia przepływu wzbudzenia wzbudnicy,
- wyposażenia wzbudnicy w klatkę tłumiącą o powiększonych wymiarach, celem skompensowania przepływów od wyższych harmonicznych prądu twornika w stanie awaryjnym mostka.

Przykładowe obliczenia projektowe wykonano dla trójfazowej wzbudnicy bezszczotkowej, przeznaczonej do współpracy z generatorem synchronicznym o mocy znamionowej $P_N = 63$ MW. Doboru klatki tłumiącej w zaprojektowanej wzbudnicy dokonano przy zastosowaniu metody przedstawionej w pkt. 3.1 artykułu.

Powstaje zatem pytanie, czy ze względów ekonomicznych jest uzasadnione wykonanie wzbudnicy, zapewniającej wzbudzenie generatora synchronicznego w rozpatrywanych stanach awaryjnych mostka, pozwalającej na powiększenie niezawodności pracy generatora. Dla przedstawionego rozwiązania konstrukcyjnego wzbudnicy uzasadnione wydaje się wykonanie wzbudnicy, uwzględniając jedynie przy projektowaniu wymagania dla stanu awaryjnego mostka w postaci wyłączenia jednej diody.



Rys.5. Charakterystyki sterowania wzbudnicy:
1 - mostek symetryczny,
2 - wyłączona dioda,
3 - wyłączona gałąź

Fig.5. Control characteristic of the exciter:
1 - symmetrical bridge,
2 - one diode defected,
3 - one branch defected

Na rys.5 przedstawiono charakterystyki sterowania zaprojektowanej wzbudnicy do generatora synchronicznego o mocy znamionowej $P_N = 63$ MW, z uwzględnieniem wymagań stawianych przy pracy symetrycznej i w rozpatrywanych stanach awaryjnych. Wyniki obliczeń projektowych pozwalają stwierdzić, że spełnienie wymagań stawianych wzbudnicy bezszczotkowej, jako źródłu wzbudzenia generatora synchronicznego wymagałoby:

- w przypadku wyłączenia jednej diody mostka - przewymiarowania obwodu elektromagnetycznego wzbudnicy o około 25÷30%, w porównaniu ze wzbudnicą zaprojektowaną do pracy symetrycznej,
- w przypadku wyłączenia jednej gałęzi mostka - przewymiarowania obwodu elektromagnetycznego wzbudnicy o około 45÷50%, w porównaniu ze wzbudnicą zaprojektowaną do pracy symetrycznej.

4. BADANIA SYMULACYJNE

W krajowym systemie elektroenergetycznym zainstalowana jest niewielka ilość generatorów z wzbudnicami bezszczotkowymi. Trudności w dostępie i prowadzeniu badań na obiekcie rzeczywistym, takim jak wzbudnica bezszczotkowa generatora dużej mocy, zmuszają do określenia jaj zachowania w warunkach eksploatacyjnych na podstawie modelu matematycznego, przy wykorzystaniu odpowiednich programów komputerowych. W celu oceny uzyskanych analitycznych zależności na wartość średnią napięcia wyprostowanego i wartości prądów fazowych twornika wzbudnicy w rozpatrywanych stanach awaryjnych mostka diodowego, wykonano badania symulacyjne wzbudnicy przy wykorzystaniu programu TCAD 6.2. Badaniom poddano wzbudnicę bezszczotkową, zaprojektowaną do współpracy z turbogeneratorem o mocy znamionowej $P_N = 63$MW. Badana wzbudnica ma następujące dane znamionowe:

$S_N = 545$ kV·A, $f_N = 300$ Hz,

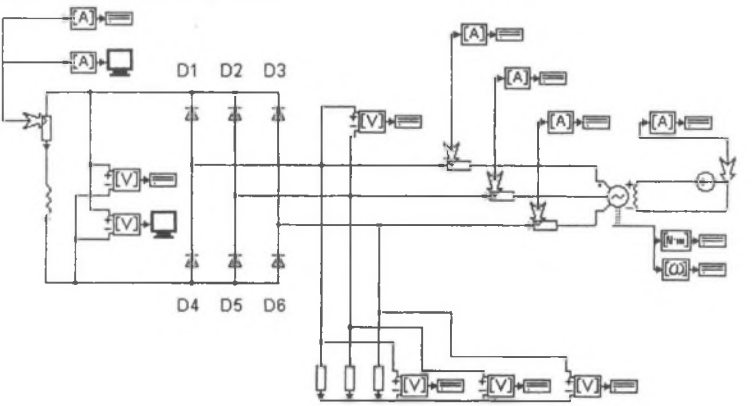
$U_N = 200$ V, $n_N = 3000$ obr/min,

$I_N = 1565$ A, $U_{fN} = 50$ V,

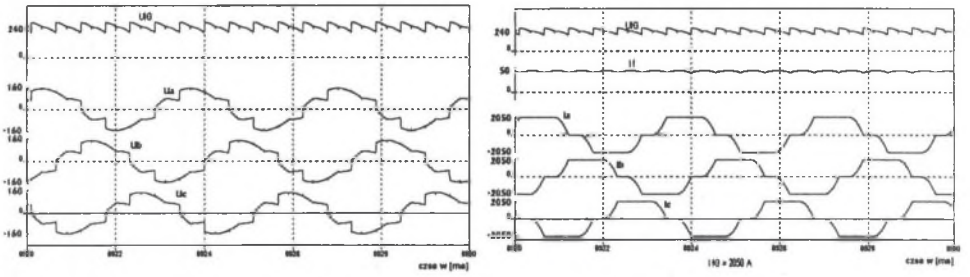
$\cos\varphi_n = 0{,}88$, $I_{fN} = 57$ A.

Badania symulacyjne przeprowadzono przy obciążeniu wzbudnicy odbiornikiem *RL*, o parametrach uzwojenia wzbudzenia współpracującego z nią turbogeneratora. Zbadano wpływ stopnia uszkodzenia mostka diodowego wzbudnicy na możliwość uzyskania wymaganego prądu wzbudzenia turbogeneratora. Schemat symulacyjny układu przedstawiono na rys.6.

Wyniki symulacji pracy wzbudnicy bezszczotkowej w stanie ustalonym, w warunkach znamionowych przy pracy symetrycznej oraz w rozpatrywanych stanach awaryjnych mostka diodowego przedstawiono na rys.7÷9.

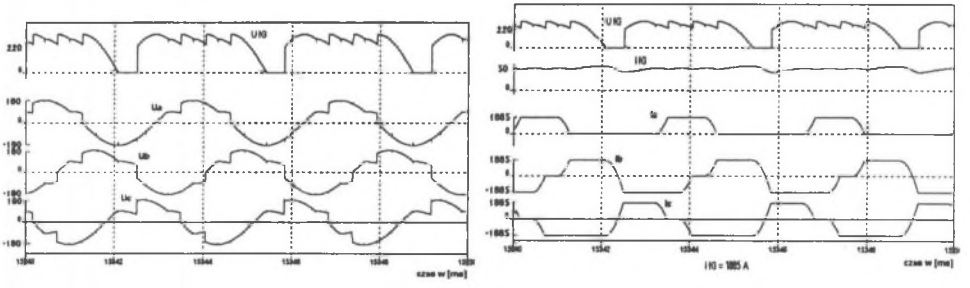


Rys.6. Schemat symulacyjny wzbudnicy bezszczotkowej
Fig.6. Simulation diagram of the brushless exciter



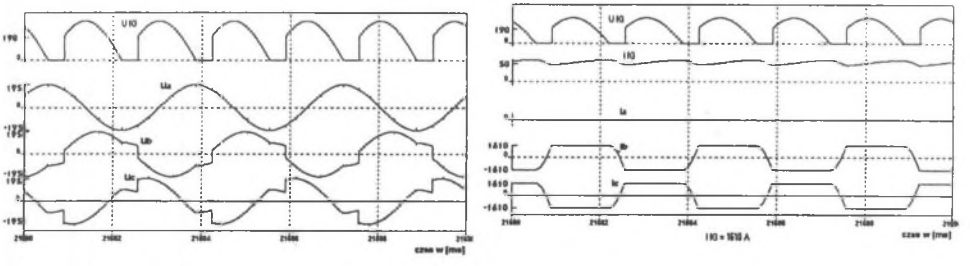
Rys.7. Przebiegi napięć i prądów wzbudnicy przy pracy symetrycznej mostka

Fig.7. Waveforms of voltages and armature currents of the exciter during symmetrical operation of the bridge



Rys.8. Przebiegi napięć i prądów wzbudnicy przy wyłączeniu jednej diody mostka

Fig.8. Waveforms of voltages and armature currents of exciter while one diode of the bridge is defected



Rys.9. Przebiegi napięć i prądów wzbudnicy przy wyłączeniu jednej gałęzi mostka

Fig.9. Waveforms of voltages and armature currents of exciter while one branch of the bridge is defected

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki analizy i badań wpływu uszkodzenia mostka diodowego na pracę wzbudnicy bezszczotkowej pozwalają określić jej własności jako źródła wzbudzenia generatora synchronicznego. Stan awaryjny mostka diodowego powoduje niesymetryczne obciążenie i powiększenie stopnia odkształcenia prądów twornika wzbudnicy. Spełnienie wymagań stawianych wzbudnicy bezszczotkowej jako źródłu wzbudzenia generatora, z uwzględnieniem stanów awaryjnych mostka, prowadzi do konieczności wykonania wzbudnicy o powiększonych wymiarach obwodu elektromagnetycznego i wyposażenia jej w odpowiednio dobraną klatkę tłumiącą. Wykonane obliczenia projektowe wzbudnicy bezszczotkowej do generatora synchronicznego o mocy $P_N = 63$ MW, z dobraną klatką tłumiącą wg metody przedstawionej w pkt. 3.1 artykułu i uwzględnieniu wymagań dla pracy symetrycznej i asymetrycznej mostka diodowego wzbudnicy, pozwalają stwierdzić, że uzasadnione może być jedynie wykonanie wzbudnicy zaprojektowanej dla wymagań stanu awaryjnego mostka w postaci wyłączenia jednej diody.

LITERATURA

1. Kapinos J., Miksiewicz R.: Choice of damper winding for brushless synchronous exciter. International Conference on the Evolution and modern Aspects of Synchronous Machines. Part 3, pp 934-937, Zurich Switzerland 1991.
2. Kapinos J., Miksiewicz R.: Praca wzbudnicy bezszczotkowej w stanie awaryjnym układu prostowniczego. XXIX Sympozjum Maszyn Elektrycznych - "Niesymetrie w maszynach elektrycznych i transformatorach". Wrocław - Szklarska Poręba 1993.
3. Krykowski K.: Energoelektronika, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
4. Tunia H., Winiarski B.: Podstawy energoelektroniki, WNT, Warszawa 1987.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Roman Nadolski

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1999 r.

Abstract

A brushless synchronous exciter is one of the possible solutions of a synchronous generator excitation source. Influence of the diode bridge damage on operating properties of

such an exciter (Fig.1) has been considered. The following cases of the exciter diode bridge damage been analysed:

-one diode of the bridge is defected,

-one branch of the bridge is defected.

The considered damages, in comparison with the bridge symmetrical operation, cause the decrease in mean rectified voltage, asymmetry of exciter armature phase currents and the increase of their deformation. To evaluate the obtained analytical relationships describing influence of the analysed diode bridge damages on the rectified voltage mean value and the exciter armature phase currents values simulations have been made. The computer program TCAD 6.2. has been used for simulations. To minimize influence of the diode bridge damage on quality of the exciter operation one should equipped the exciter with the suitably chosen damper winding. The applied method of the exciter damper winding choice (chapter 3.1) is based on the assumption that the magnetomotive forces produces by higher harmonics of the exciter armature deformed current are fully compensated by the magnetomotive force of the damper winding. Screening operation of the damper winding chosen in such a way allows the correct operation of the exciter in case of asymmetrical, deformed load current. The made design calculations of a brushless exciter for the 63 MW synchronous generator when taking into consideration the requirements for symmetrical and asymmetrical operation of the diode bridge allow the statement that an exciter should be designed in accordance with the requirements applying to the failure of the bridge which consists in the defect of one diode.