Tadeusz Glinka
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

Dynamika silnika synchronicznego po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia

The dynamics of a synchronous motor after turning off and on again the supply voltage

Zabezpieczenie silników elektrycznych

Silniki elektryczne dużej mocy standardowo są zabezpieczone przed przeciążeniem długotrwałym (termicznym), przeciążeniem maksymalnym (chwilowym) i różnego rodzaju zaburzeniami napięcia zasilającego, które mogą doprowadzić do ich uszkodzenia lub uszkodzenia układu napędowego. Wymagane zabezpieczenia oraz zakresy ustawienia parametrów zadziałania powinny być podawane w dokumentacji dostarczonej przez producenta wraz z silnikiem. Zabezpieczenie powinno obejmować ochronę maszyny przed:

- przeciążeniami prądowymi i przekroczeniem dopuszczalnej temperatury pracy,
- samoczynnym załączeniem po chwilowym zaniku i powrocie napięcia zasilającego,
- niesymetrycznym napięciem, np. po zaniku fazy,
- spadkiem rezystancji układu izolacji uzwojeń poniżej poziomu dopuszczalnego.

Widać z powyższego, że zabezpieczeniu silników elektrycznych stawiane jest wiele wymagań. Zabezpieczenia te w warunkach eksploatacyjnych często nie są sprawne, gdyż zbyt często za mało uwagi poświęca się diagnostyce, konserwacji i okresowemu sprawdzaniu poprawności działania układu zabezpieczenia.

Autor zna awarie maszyn elektrycznych i transformatorów, poprawnie zabezpieczonych, których zabezpieczenie w stanie krytycznym zawiodło. Zabezpieczenie takie może nie działać, gdy styki przekaźnika w układzie zabezpieczającym są utlenione bądź zabrudzone i zwierając się nie przekazują sygnału do otwarcia wyłącznika. W jednej z hut silnik walcowniczy prądu stałego o mocy 1 MW, 1000 obr/min rozbiegł się i wszystkie działki komutatora zastały wyrzucone na zewnątrz. Silnik do chwili awarii pracował 10 lat. Silnik ten miał zainstalowane trzy zabezpieczenia:

- przy wzroście prędkości obrotowej $n \geq 1{,}2\ n_{\max}$,
- przy przekroczeniu wartości prądu twornika $I \geq 2{,}5 I_{\mathrm{N}}$,
- przy zaniku prądu wzbudzenia $I_w \leq I_{\mathrm{w\,min}}$.

Silnik rozleciał się, gdyż nastąpiła awaryjna przerwa prądu wzbudzenia. Gdyby choć jedno z wymienionych zabezpieczeń zadziałało, to silnik zostałby wyłączony. Znany jest także przypadek nowego transformatora piecowego 40 MVA, 110 kV/(514-304) V, opisany w literaturze [4], który po trzech miesiąca pracy uległ totalnej awarii. Awaria była spowodowana przez załączenie wyłącznika uzwojenia regulacyjnego, który spowodował zwarcie wewnętrzne uzwojenia. Przekaźnik, który miał blokować możliwość załączenia wyłącznika w tym stanie pracy transformatora, miał styki zabrudzone pyłem szamotowym stosowanym na linii ciągłego odlewania stali. Przekaźnik blokujący był, lecz nie spełnił swojej funkcji.

W układach napędowych silniki elektryczne pracują zarówno w stanach ustalonych jak i w stanach elektromechanicznych nieustalonych. Charakterystycznymi stanami nieustalonymi są rozruchy asynchroniczne silników prądu zmiennego. Każdy silnik elektryczny jest konstrukcyjne przystosowany do stanów elektromagnetycznie nieustalonych występujących w stanach rozruchowych. W warunkach pracy ustalonej zdarzają się także zaburzenia napięcia sieci zasilającej, np. od piorunów, wyzwalające działanie SPZów bądź SZRów. Są to wyjątkowo groźnie zaburzenia dla silników elektrycznych, gdyż czas przerwy w zasilaniu jest rzędu jednej sekundy. Wyłączenie napięcia i jego ponowne załączenie generuje w silnikach stany elekromagnetycznie nieustalone znacznie groźniejsze niż przy rozruchu.

W artykule przeanalizowano kolejno: rozruch silnika, stan pracy ustalonej, wyłączenie napięcia i ponowne załączenie napięcia. Wzory matematyczne i równania są podawane tylko w zakresie koniecznym do ilustracji omawianego problemu.

Rozruch silnika synchronicznego

Schemat zastępczy

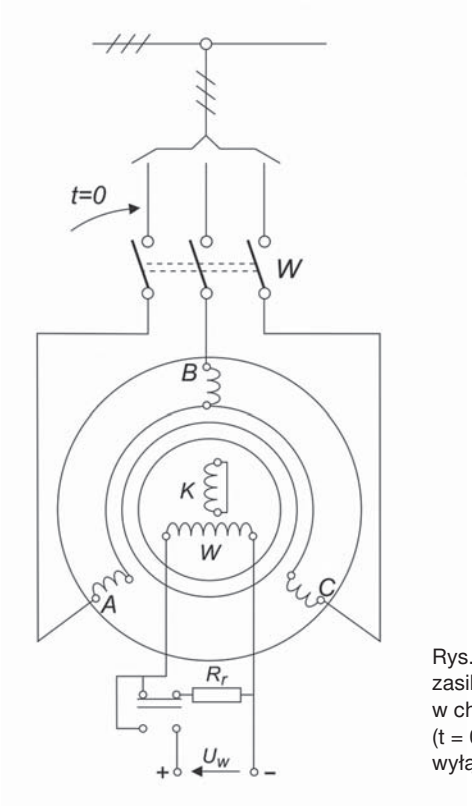
Rdzeń magnetyczny wirnika jest jawnobiegunowy i ma dwie osie magnetyczne: „d" – oś biegunów wzbudzenia i „q" – oś do niej prostopadłą, przy czym kąt geometryczny między tymi osiami $\alpha_{dq}=\frac{\pi}{2p_b}$. Na biegunach jest umieszczone uzwojenie wzbudzenia. W nabiegunnikach jest umieszczone uzwojenie rozruchowe, najczęściej klatkowe. W niektórych silnikach synchronicznych funkcję uzwojenia rozruchowego pełnią lite stalowe nabiegunniki, czasem zwarte pierścieniami miedzianymi, lecz zwarcia te

nie są konieczne i nie zawsze są stosowane, gdyż nabiegunniki są zwarte poprzez pieńki biegunów i wał silnika. Rozruch silników synchronicznych zwykle jest asynchroniczny, przy zwartym przez rezystancję uzwojeniu wzbudzenia. Rozruch kończy się samosynchronizacją, która następuje samoczynnie po włączeniu prądu wzbudzenia. Rozruch asynchroniczny silnika synchronicznego przebiega zatem identycznie jak rozruch silnika indukcyjnego klatkowego. Silnik synchroniczny jest konstrukcyjnie przystosowany do takiego rozruchu. Moment rozruchowy zapewniają dwa obwody elektryczne wirnika wzajemnie do siebie prostopadłe: uzwojenie wzbudzenia zwarte przez rezystor R_r i uzwojenie klatkowe (rys.1).

Rozruch silnika analizujemy przy następujących założeniach:

- uzwojenie stojana jest 3-fazowe symetryczne połączone w gwiazdę, jeśli uzwojenie jest połączone w trójkąt, to transformuje się na układ gwiazdy, jest to realizowane przez obliczenie parametrów schematu zastępczego z równań obowiązujących dla układu gwiazdy;
- uzwojenie wirnika jest 2-fazowe symetryczne, to znaczy siła magnetomotoryczna (smm) uzwojenia wzbudzenia Θ_{wd} leży w osi „d", a smm uzwojenia klatkowego Θ_{kq} leży w osi „q";
- przebiegi smm $\Theta_{wd}(t)$ i $\Theta_{kq(t)}$ są przesunięte w czasie o kąt $\pi/2$, a rezystancja rozruchowa R_r jest tak dobrana, aby amplitudy smm Θ_{wd} i Θ_{kq} były równe;
- uzwojenie 2-fazowe wirnika zastępujemy uzwojeniem 3-fazowym połączonym w gwiazdę, generującym identyczne smm $\Theta_{wd}(t)$ i $\Theta_{kq(t)}$;
- silnik stoi, $n = 0$, rozruch rozpoczyna się w chwili ($t = 0$) poprzez załączenie napięcia wyłącznikiem W (rys. 1).

Analizę rozruchu, z pewnym przybliżeniem, przeprowadzimy na podstawie schematu zastępczego silnika (rys. 2). Reaktancja silnika synchronicznego dla stanu rozruchowego zmienia się w czasie, bezpośrednio po załączeniu napięcia jest mała (reaktancja podprzejściowa), następnie wzrasta do wartości przejściowej, a przy pracy synchronicznej w stanie ustalonym jest największa (reaktancja synchroniczna). Dla pracy asynchronicznej, to jest w czasie rozruchu, dwuosiowa symetria wirnika „d,q" powoduje, że reaktancja jest ponadto pulsująca. Zmiany wartości i pulsacji reaktancji nie uwzględniamy; założymy, że reaktancja rozruchowa $X_r \approx \omega_1(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})$ ma wartość stałą. Zakładamy także, że rezystancja uzwojenia wirnika R'_2 jest stała. W rzeczywistości, przy litych nabiegunnikach, R'_2 jest funkcją częstotliwości i zmienia się wraz ze zmianą prędkości obrotowej.



Rys. 1. Schemat zasilania silnika, w chwili (t = 0) załącza się wyłącznik W

Przy wymienionych założeniach schemat zastępczy, dla rozruchu asynchronicznego silnika synchronicznego, obejmujący jedną fazę układu połączenia uzwojeń Yy, przedstawiono na rysunku 2. Każda z faz A, B i C ma identyczny schemat zastępczy.

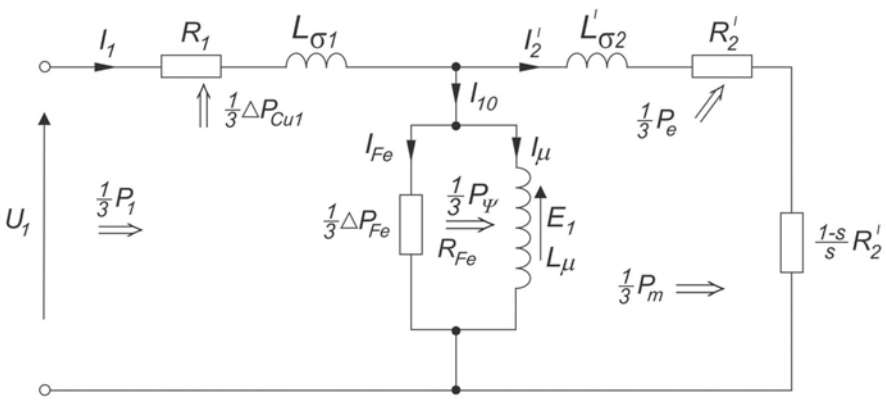
Strumień magnetyczny Φ jest wzbudzony przez wszystkie uzwojenia stojana (A, B, C) i uzwojenia wirnika (W, K).

Przebieg rozruchu silnika po włączeniu napięcia

Analiza rozruchu silnika zostanie przeprowadzona przy pominięciu gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym, to znaczy przy założeniu $I_{10} = 0$. Rozruch silnika następuje po załączeniu, w czasie $t = 0$, wyłącznika W. Przyjmujemy, że napięcie na uzwojenie A, B, C jest podawane w sposób skokowy jednocześnie:

$$U_A(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 t + \beta)$$

$$U_B(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 + \beta - \frac{2}{3}\pi)$$



Rys. 2. Schemat zastępczy 1-fazy silnika synchronicznego 3-fazowego w układzie połączenia Yy dla stanu rozruchowego

R_1 – rezystancja uzwojenia stojana,
U_1 – napięcie fazowe (wartość skuteczna),
I_1, I'_2 – prąd płynący z sieci i prąd w uzwojeniu wirnika sprowadzony na stronę stojana,
ΔP_{Cu1} – straty mocy w uzwojeniu stojana,
ΔP_{Fe} – straty mocy w żelazie stojana,
P_ψ – moc pola wirującego (moc w szczelinie),
P_e – straty mocy w wirniku (w uzwojeniu W i rezystorze R_r, klatce K i żelazie),
P_m – moc mechaniczna,
$\omega_1 = 2\pi f_1$ – pulsacja i częstotliwość napięcia,
s – poślizg.

$$U_C(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 t + \beta + \frac{2}{3}\pi)$$

gdzie:

U_{1m} – oznacza amplitudę napięcia fazowego,

β – kąt przesunięcie chwilowej wartości napięcia $U_{A(t=0)}$ w stosunku do jego amplitudy U_{Am}.

Przebiegi prądu silnika, przy pominięciu gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym [5]:

$$I_{1A}(t) = \frac{U_{1m}}{z_z}\left[\sin(\omega_1 t + \beta - \varphi_z) - [\sin(\beta - \varphi_z)]e^{-t/\tau_z}\right]$$

$$I_{1B}(t) = \frac{U_{1m}}{z_z}\left[\sin\left(\omega_1 t + \beta - \frac{2}{3}\pi - \varphi_z\right) - [\sin\left(\beta - \varphi_z - \frac{2}{3}\pi\right)]e^{-t/\tau_z}\right]$$

$$I_{1C}(t) = \frac{U_{1m}}{z_z}\left[\sin\left(\omega_1 t + \beta - \varphi_z + \frac{2}{3}\pi\right) - [\sin(\beta + \varphi_z + \frac{2}{3}\pi)]e^{-t/\tau_z}\right]$$

Suma prądów

$$I_{1A}(t) + I_{1B}(t) + I_{1C}(t) = 0$$

Impedancja obwodu zwarcia

$$z_z \approx \sqrt{[\omega_1(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})]^2 + (R_1 + R'_2)^2}$$

Elektromagnetyczna stała czasowa obwodu zwarcia

$$\tau_z = \frac{L_z}{R_z} \approx \frac{L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}}{R_1 + R'_2}$$

Kąt opóźnienia przebiegu składowej periodycznej prądu w stosunku do przebiegu napięcia

$$\varphi_z \approx \operatorname{arc\,tg}\frac{\omega_1(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})}{R_1 + R'_2}$$

Moc czynna

$$P_1(t) = U_A(t)I_A(t) + U_B(t)I_B(t) + U_C(t)I_C(t)$$

Moc pola wirującego

$$P_\psi(t) = \frac{R'_2}{s}[I_A^2(t) + I_B^2(t) + I_C^2(t)]$$

Moment elektromagnetyczny

$$T_{em}(t) = \frac{P_\psi(t)}{\omega_{m1}}$$

Równanie momentów

$$J\frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_{em}(t) - T_{ob}$$

Oznaczenia:

$\omega_{m1} = \frac{1}{p_b}\omega_1$ – prędkość kątowa pola wirującego,

$\omega_m = \pi\frac{n}{30}$ – prędkość kątowa wirnika,

p_b – liczba par biegunów uzwojenia,

n – prędkość obrotowa wirnika, obr/min,

J – moment bezwładności wszystkich mas sprzęgniętych z wałem silnika,

T_{em} i T_{ob} – moment elektromagnetyczny i moment obciążenia.

Przybliżenia we wzorach: z_z, φ_z i τ_z dotyczą wymienionych założeń i pominięcia gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym.

Przebiegi prądu rozruchowego, w poszczególnych fazach, mają składową periodyczną, np. w fazie A

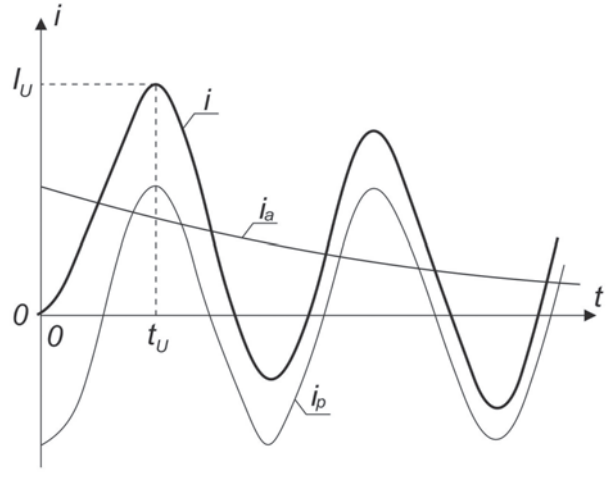
$$i_{pA} = \frac{U_{1m}}{z_z}\sin(\omega_1 t + \beta - \varphi_z)$$

i składową aperiodyczną

$$i_{aA} = \frac{U_{1m}}{z_z}[-\sin(\beta - \varphi_z)]e^{-t/\tau_z}$$

która zanika ze stałą czasową τ_z. Wynika to z właściwości obwodów zawierających indukcyjności. Prąd w elementach indukcyjnych nie zmienia się skokowo. Jeśli w chwili załączenia napięcia składowa periodyczna $i_{p(t=0)} \neq 0$, to wzbudzana jest składowa aperiodyczna $[i_{a(t=0)} + i_{p(t=0)} = 0]$, jak to pokazano na rysunku 3.

Elektromagnetyczna stała czasowa rozruchowa τ_z dotyczy obwodu zwarcia, jest zatem mała, co powoduje, że składowa aperiodyczna szybko zanika do zera.



Rys. 3. Przebieg początkowy prądu rozruchowego silnika po skokowym załączeniu napięcia

Składowa periodyczna i_p sumuje się ze składową aperiodyczną i_a, co determinuje prąd udarowy I_u. Składowa periodyczna i_p wzbudza w uzwojeniu twornika smm $\Theta_{tp}(\alpha, t)$ wirującą z prędkością kątową ω_{1m} i indukującą w uzwojeniu wirnika prąd o częstotliwości $f_2 = sf_1$, który wzbudza w uzwojeniu wirnika smm $\Theta_{wp}(\alpha, t)$. Obydwie smm wirują względem osi faz uzwojenia twornika z prędkością kątową ω_{1m}, a względem siebie są nieruchome. Składowa aperiodyczna prądu i_a wzbudza w uzwojeniu twornika smm aperiodyczną $\Theta_{ta}(\alpha, t)$, której położenie względem osi faz uzwojenia twornika jest stałe. Indukuje ona w uzwojeniu wirnika prąd o częstotliwości obrotów $f_m = n/60$, który wzbudza składową aperiodyczną smm $\Theta_{wa}(\alpha, t)$ nieruchomą względem osi uzwojenia stojana.

Wartości udarowe prądu I_u, momentu T_u występują z opóźnieniem czasowym t_u. Czas t_u pokrywa się z czasem pierwszej amplitudy prądu składowej periodycznej i_p o znaku (+ lub -) identycznym jak znak składowej aperiodycznej i_a. Wartości udarowe I_u, T_u raz mogą być mniejsze, innym razem większe; jest to przypadek, zależny od chwilowej wartości napięcia sieci $U_{A(t=0)}$, determinowanej przez kąt β, w chwili załączenia. Z równań prądów

$I_{1A}(t)$, $I_{1B}(t)$ i $I_{1C}(t)$ widać, że nie można uzyskać takiego stanu załączenia silnika, aby nie wzbudzić składowej aperiodycznej prądu i_a równocześnie we wszystkich trzech fazach. Z punku widzenia składowych udarowych I_u, T_u i F_u można wydzielić dwa skrajne przypadki załączenia napięcia: załączenie łagodne i załączenie ekstremalnie niekorzystne.

Załączenie łagodne $(\beta - \varphi_z) = 0$

Składowa periodyczna prądu w fazie A rozpoczyna się od zera $i_{pA(t=0)} = 0$, a w pozostałych fazach wynosi:

$$i_{pB(t=0)} = -\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z} \text{ i } i_{pC(t=0)} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z}.$$

Składowa aperiodyczna prądu w poszczególnych fazach

$$i_{aA(t=0)} = 0, \quad i_{aB(t=0)} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z}, \quad i_{aC(t=0)} = -\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z}.$$

Składowa udarowa prądu w poszczególnych fazach wystąpi z opóźnieniem czasowym: t_{uA}, t_{uB}, t_{uC} – są to czasy wystąpienia pierwszej amplitudy składowej periodycznej i_p o znaku zgodnym ze znakiem składowej aperiodycznej (rys. 3). Czasy te wynoszą:

$$t_{uA} = \frac{1}{4f_1}, \; t_{uB} = \frac{7}{12f_1}, \; t_{uC} = \frac{5}{12f_1}.$$

W czasie opóźnienia t_u składowa aperiodyczna zmniejszy się, gdyż elektromagnetyczna stała czasowa zwarcia τ_z jest mała. Można w przybliżeniu przyjąć, że składowa aperiodyczna prądu obniży się dla fazy B o 20% i dla fazy C o 15%.

Prądy udarowe w poszczególnych fazach wynoszą:

$$I_{uA(t=t_{uA})} = \frac{U_{1m}}{z_z} = \sqrt{2}I_R,$$

$$I_{uB(t=t_{uB})} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z}\left[1 + 0{,}8e^{-t_{uB}/\tau_z}\right] \approx 2.1I_R \approx 12{,}6\,I_N,$$

$$I_{uC(t=t_{uC})} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{U_{1m}}{z_z}\left[1 - 0{,}85e^{-t_{uC}/\tau_z}\right] \approx 2{,}2I_R,$$

przy czym prąd rozruchowy I_R (wartość skuteczna składowej periodycznej) $I_R = (6 \div 7)I_N$, gdzie I_N jest prądem znamionowym.

Moment udarowy T_u w czasie rozruchu pojawia się w tej samej chwili, co prądy udarowe w fazach B i C, a jego wartość $T_u \approx 2T_R$. W silnikach synchronicznych moment rozruchowy $T_R = (1 \div 1{,}5)T_N$, gdzie T_N jest momentem znamionowym.

Załączenie ekstremalnie niekorzystne $(\beta - \varphi_z) = \frac{\pi}{2}$

Załączenie ekstremalnie niekorzystne wystąpi, gdy składowa periodyczna prądu w jednej z faz (np. w fazie A) rozpoczyna się od amplitudy

$$i_{pA(t=0)} = \frac{U_{1m}}{z_z},$$

a w pozostałych fazach wynosi:

$$i_{pB(t=0)} = -\frac{U_{1m}}{2 \cdot z_z}$$

$$i_{pC(t=0)} = -\frac{U_{1m}}{2 \cdot z_z}.$$

W tym przypadku składowa aperiodyczna prądu w poszczególnych fazach, w chwili załączenia napięcia ($t = 0$):

$$i_{aA(t=0)} = -\frac{U_{1m}}{z_z}, \; i_{aB(t=0)} = \frac{U_{1m}}{2 \cdot z_z}, \quad i_{aC(t=0)} = \frac{U_{1m}}{2 \cdot z_z}.$$

Składowa udarowa prądu w poszczególnych fazach wystąpi z opóźnieniem czasowym:

$$t_{uA} = \frac{1}{2f}, \; t_{uB} = \frac{1}{3f}, \; t_{uC}\frac{2}{3f}$$

– są to czasy wystąpienia pierwszej amplitudy składowej periodycznej i_p o znaku zgodnym ze składową aperiodyczną i_a. Można w przybliżeniu przyjąć, że składowa aperiodyczna w tym czasie zmniejszy się: w fazie A o 20%, w fazie B o 15% i w fazie C o 25%.

Zatem składowe udarowe prądu:

$$I_{uA(t=uA)} = \frac{U_{1m}}{z_z}\left(1 + 0{,}8e^{-t_{uA}/\tau_z}\right) \approx 2{,}5I_R \approx 15I_N,$$

$$I_{uB(t=t_{uB})} = \frac{U_{mf}}{2z_z}\left[1 + 0{,}85e^{-t_{uB}/\tau_z}\right] \approx 1{,}3I_R,$$

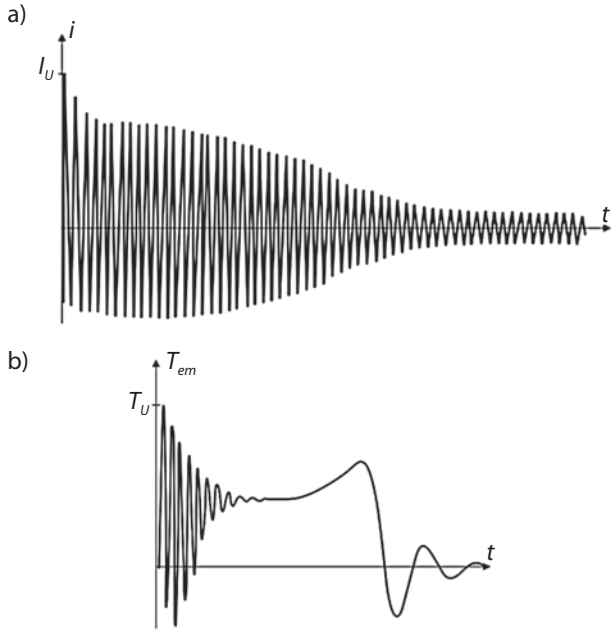
$$I_{uC(t=t_{uC})} = \frac{U_{mf}}{z_z}\left[1 - 0{,}75e^{-t_{uC}/\tau_z}\right] \approx 1.2I_R.$$

Składowa udarowa prądu I_u w tym wypadku jest około 1,2 razy większa niż przy załączeniu łagodnym. Zawsze największa składowa udarowa prądu występuje w jednej fazie, w pozostałych fazach jest mniejsza. Składowe udarowe prądu w poszczególnych fazach są, względem siebie, przesunięte w czasie.

Składowa udarowa momentu T_u wzrasta w przybliżeniu proporcjonalnie do prądu udarowego. Przy najbardziej niekorzystnego przypadku załączenia

$$T_u \approx 2{,}4T_R \approx 3{,}6T_N$$

Charakterystyczny przebieg prądu i momentu rozruchowego silnika przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Przykładowy przebieg prądu i momentu rozruchowego silnika nieobciążonego

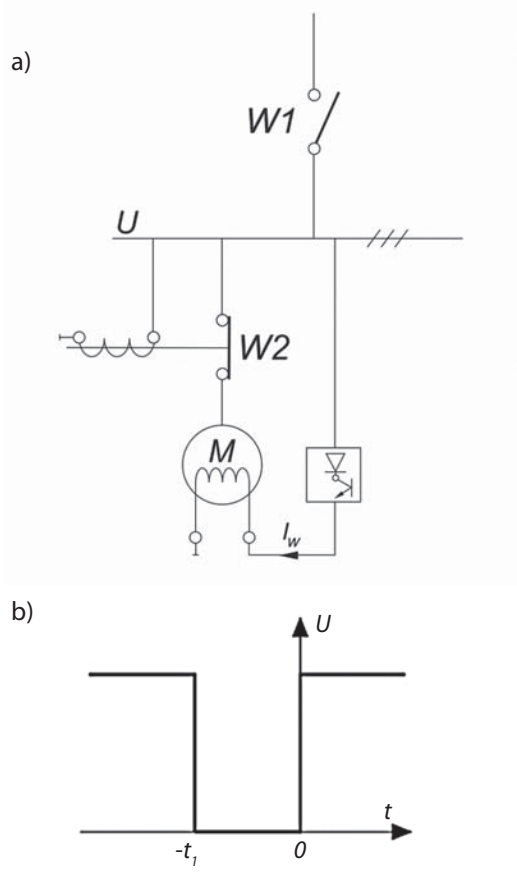
Dynamiki silnika synchronicznego po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia

Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu zasilania silnika. Chwilowe wyłączenie i ponowne załączenie napięcia sieci zasilającej reprezentuje wyłącznik W1. Wyłączenie napięcia w sieci zasilającej nie jest równoważne ze spadkiem napięcia do zera w rozdzielni, z której jest zasilany silnik. Napięcie w rozdzielni podtrzymuje sam silnik lub kilka silników zasilanych z tej rozdzielni. Silniki wirują, mają energię $(0{,}5J\omega_m^2)$ i są wzbudzone, gdyż strumień magnetyczny wzbudzenia nie zmienia się skokowo. Dlatego elektromagnes wyłącznika W2 w dalszym ciągu podtrzymuje stan załączenia wyłącznika W2, to znaczy nie reaguje na chwilowe (np.1 s) przerwy napięcia zasilającego. Silnik M jest załączany i wyłączany wyłącznikiem W2, dlatego silnik jest w dalszym ciągu połączony z rozdzielnią.

Rozpatrzymy trzy stany pracy silnika synchronicznego: ustalony, wyłączenie napięcia twornika i ponowne załączenie napięcia, jak to pokazano na rysunku 5.

Analizując stan dynamiczny silnika po wyłączeniu i ponownym załączeniu napięcia załóżmy, że wyłączenie napięcia U następuje w chwili $(t = -t_1)$, a załączenie napięcia U w chwili $(t = 0)$. Przedziały czasu, w którym analizujemy stan dynamiczny silnika dzielimy na:

- stan pracy ustalonej $(t < -t_1)$, przed wyłączeniem napięcia,
- stan beznapięciowy $(-t_1 \le t < 0)$,
- ponowne załączenie napięcia $t \ge 0$.



Rys. 5. Schemat układu zasilania i przebieg wartości skutecznej napięcia zasilającego

Stan pracy ustalonej

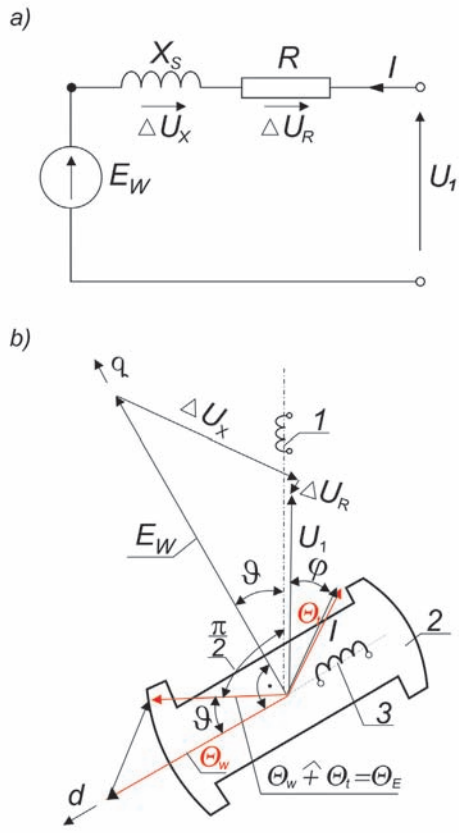
W teorii maszyny synchronicznej stan pracy ustalonej przedstawia się w formie wykresu wskazowo – wektorowego, jak na rysunku 6 [3]. Z wykresu tego wynikają zależności i charakterystyki elektromechaniczne maszyny. Zależności tych nie podajemy, ograniczamy się tylko do strumienia magnetycznego Φ i momentu elektromagnetycznego T_{em}. W stanie pracy ustalonej, to jest w czasie $t < -t_1$, strumień magnetyczny Φ jest wzbudzany przez wypadkową smm uzwojenia wzbudzenia Θ_w i smm twornika Θ_t:

$$\Phi = \frac{\Theta_w \hat{+} \Theta_t}{R_\mu(\vartheta)} = \frac{\Theta_E}{R_\mu(\vartheta)}$$

gdzie: $\hat{+}$ oznacza sumę geometryczną, a R_μ reluktancję obwodu magnetycznego, która jest funkcją kąta skręcenia ϑ wypadkowej smm $(\Theta_w \hat{+} \Theta_t)$ względem osi „d", jak to pokazano na rysunku 6a. Reaktancja synchroniczna X_s jest odwrotnie proporcjonalna do reluktancji R_μ

$$X_S = \frac{(k_u N_1)^2}{R_\mu}$$

gdzie: k_u – współczynnik uzwojenia, N_1 – liczba zwojów.



Rys. 6. a) schemat zastępczy, b) wykres wskazowo-wektorowy
1 – oś fazy uzwojenia, 2 – wirnik, 3 – uzwojenie wzbudzenia

Dla stanu ustalonego reaktancja synchroniczna X_s ma dwie charakterystyczne wartości: X_d – maksymalną, gdy Θ_t leży w osi „d" $(\vartheta = 0)$ i X_q – minimalną, gdy $(\Theta_w \hat{+} \Theta_t)$ leży w osi „q" $(\vartheta = \pi/2p_b)$. Siła magnetomotoryczna wzbudzenia Θ_w leży w

osi „d" i jest generowana przez niezależne uzwojenie wzbudzenia zasilane ze źródła napięcia stałego. Wirnik wiruje z prędkością synchroniczną, to znaczy smm uzwojenia twornika Θ_t jest nieruchoma względem wirnika:

$$\omega_m = \omega_{m1} = 2\frac{\pi f_1}{p_b} = \frac{\pi n_1}{30 p_b}.$$

Równanie momentów

$$J\frac{\mathrm{d}\omega_{m1}}{\mathrm{d}t} = T_{em} - T_{ob} = 0$$

$$T_{em} = \frac{3U_1}{\omega_{m1}}\left\{\frac{E_w}{X_d}\sin\vartheta + U_1\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\vartheta\right\}$$

W katalogach i publikacjach maszyn synchronicznych [4] podawana jest wartość reaktancji synchronicznej względnej w osi „d" – X_{dr} i osi „q" – X_{qr}, z których oblicza się reaktancje synchroniczną dla stanu ustalonego.

$$X_d = X_{dr}\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \qquad X_q = X_{qr}\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}$$

przy czym $X_d > X_q$.

Oznaczenie E_w jak na rysunku 6.

Praca silnika po wyłączeniu napięcia

W czasie $(t = -t_1)$ następuje wyłączenie napięcia, prąd twornika $I_{(t=-t_1+\mathrm{d}t)} = 0$. Siła magnetomotoryczna twornika $\Theta_{t(t=-t_1+\mathrm{d}t)} = 0$. Strumień magnetyczny Φ nie zmienia się w sposób skokowy,

$$\Phi_{(t=-t_1-\mathrm{d}t)} = \frac{\Theta_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)} \hat{+} \Theta_{t(t=-t_1-\mathrm{d}t)}}{R_\mu} =$$

$$= \frac{\Theta_{w(t=-t_1+\mathrm{d}t)}}{R_\mu} = \phi_{(t=-t_1+\mathrm{d}t)}$$

Zatem w sposób skokowy zmieni się (zmniejszy się) smm wzbudzenia z wartości

$$\Theta_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)}$$

do wartości

$$\Theta_{w(t=-t_1+\mathrm{d}t)} = \Theta_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)} \hat{+} \Theta_{t(t=-t_1-\mathrm{d}t)}.$$

Chwila $(t = -t_1 - \mathrm{d}t)$ oznacza wartość przed wyłączeniem napięcia, a chwila $(t = -t_1 + \mathrm{d}t)$ po wyłączeniu napięcia. Siły magnetomotoryczne Θ_w i Θ_t z indeksem czasowym $(t = -t_1 - \mathrm{d}t)$ oznaczają wartość przed wyłączeniem napięcia, a indeksem czasu $(t = -t_1 + \mathrm{d}t)$ po wyłączeniu napięcia. Proporcjonalnie do skokowego zmniejszenia się smm Θ_w zmniejszy się skokowo prąd wzbudzenia z wartości $I_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)}$ do wartości $I_{w(t=-t_1+\mathrm{d}t)}$ i będzie narastał wykładniczo, ze stałą czasową τ_w, do wartości $I_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)}$, gdyż napięcie wzbudzenia jest stałe. Proporcjonalnie do prądu wzbudzenia będzie narastać smm wzbudzenia:

$$\Theta_w(t) = \Theta_{w(t=-t_1-\mathrm{d}t)}\left(1 - e^{-t/\tau_w}\right) + \Theta_{w(t=-t_1+\mathrm{d}t)} \cdot e^{-t/\tau_w}$$

Elektromagnetyczna stała czasowa uzwojenia wzbudzenia τ_w jest długa (kilka sekund), gdyż uzwojenie twornika jest otwarte.

Strumień $\Phi(t)$ zmieni swoje położenie na oś wzdłużną „d". Jeśli obwód magnetyczny byłby nienasycony, to strumień $\Phi(t)$ narastałby proporcjonalnie do smm $\Theta_w(t)$. W maszynach synchronicznych obwód magnetyczny nasyca się, dlatego wzrost strumienia $\Phi(t)$ nie jest proporcjonalny do wzrostu smm $\Theta_w(t)$. Jeśli w chwili $(t = -t_1 - \mathrm{d}t)$ strumień $\Phi_{(t=-t_1-\mathrm{d}t)} = \Phi_{(t=-t_1+\mathrm{d}t)}$, to po załączeniu napięcia (chwila $t = 0$) strumień $\Phi_{(t=0)} > \Phi_{(t=-t_1-\mathrm{d}t)}$.

Moment elektromagnetyczny silnika, w przedziale czasu $-t_1 < t < 0$,

$$T_{em}(t) = 0.$$

Prędkość kątowa wirnika będzie zmniejszać się zgodnie z równaniem:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega_m(t)}{\mathrm{d}t} = -T_{ob}$$

i dla czasu $(t = 0)$ osiągnie wartość

$$\omega_{m(t=0)} = \omega_{1m} - \frac{1}{J}\int_{-t_1}^{0} T_{ob}\,\mathrm{d}t$$

Napięcie fazowe rotacji indukowane w uzwojeniu twornika

$$E_1(t) \approx \frac{U_1}{\sqrt{3}}\frac{\Phi(t)}{\Phi_{(t=-t_1-\mathrm{d}t)}}\frac{\omega_m(t)}{\omega_{m1}}$$

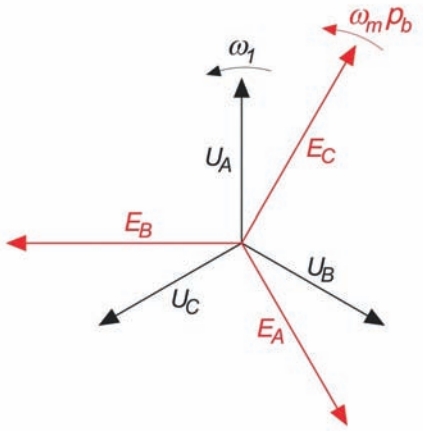
i w czasie $t = 0$ może osiągnąć wartość skuteczną

$$E_{1(t=0)} \approx \frac{U_1}{\sqrt{3}}\frac{\Phi_{(t=0)}}{\Phi_{(t=-t_1-\mathrm{d}t)}}\frac{\omega_{m(t=0)}}{\omega_{1m}} > U_1$$

o częstotliwości

$$f_m = \frac{\omega_{m(t=0)}}{2\pi}p_b < f_1.$$

U_1 oznacza napięcie fazowe sieci elektroenergetycznej. Stan ten ilustruje rysunek 7.

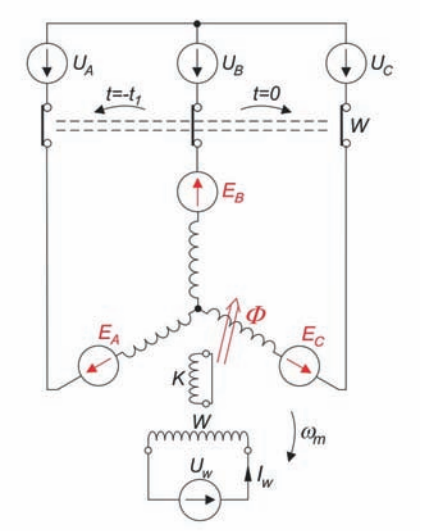


Rys. 7. Wskazy napięć w chwili ponownego załączenia napięcia (t=0)

Praca silnika po załączeniu napięcia

W czasie $(t = 0)$ napięcie zostaje załączone. Stan magnetyczny i mechaniczny maszyny synchronicznej w chwili załączenia napięcia jest następujący:

- strumień wzbudzenia $\Phi_{(t=0)} > \Phi_{(t=-t-\mathrm{d}t)}$,
- prędkość kątowa wirnika jest mniejsza od prędkości strumienia magnetycznego $\omega_{m(t=0)} < \omega_{1m} = \frac{1}{p_b}\omega_1$.



Rys. 8. Schemat silnika w chwili załączenia napięcia (t = 0)

Analizę prowadzimy z punktu widzenia prądu udarowego I_u i elektromagnetycznego momentu udarowego T_u. Zarówno prąd udarowy I_u jak i moment udarowy T_u występują w pierwszym okresie zmiany napięcia, czyli w czasie $0 < t < 20$ ms. Dla tego przedziału czasu przebiegi prądu $I(t)$ i momentu T_{em} można obliczyć z równań napięcia:

$$U_A(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 t + \beta)$$

$$U_B(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 t + \beta - \frac{2}{3}\pi)$$

$$U_C(t) = U_{1m}\sin(\omega_1 t + \beta + \frac{2}{3}\pi)$$

i równań napięcia rotacji:

$$E_A(t) = E_{1m}\sin(\omega_m p_b t + \gamma)$$

$$E_B(t) = E_{1m}\sin\left(\omega_m p_b t + \gamma - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$E_C(t) = E_{1m}\sin(\omega_m p_b t + \gamma + \frac{2}{3}\pi)$$

$$\omega_m = \pi\frac{n(t)}{30}.$$

Gwiazdy wskazów napięć $U_{A,B,C}$ i $E_{A,B,C}$ przedstawiono na rysunku 7. Wartość skuteczna napięcia rotacji $E_{1(t=0)} > U_1$. Napięcie na uzwojenia A, B, C jest załączane w sposób skokowy.

γ – kąt przesunięcie chwilowej wartości napięcia rotacji $E_{A(t=0)}$ w stosunku do jego amplitudy E_{Am} w chwili ($t = 0$).

Przebiegi prądów silnika: $I_{1A}(t)$, $I_{1B}(t)$, $I_{1C}(t)$ analizujemy przy następujących założeniach:

- obwód magnetyczny jest liniowy,
- prędkość obrotowa n = constans.

Założenia te nie wnoszą do obliczeń błędów, gdyż wartości udarowe prądu i momentu wystąpią w pierwszym okresie zmiany napięcia ($0 < t < 20$ ms). W tym czasie stan odwodu magnetycznego znacząco nie zmieni nasycenia, a obroty będą praktycznie stałe, gdyż mechaniczna stała czasowa $\tau_m = J/P_N$ jest znacznie większa od elektromagnetycznej stałej czasowej τ_z dla stanu zwarcia uzwojenia.

Przy tych założeniach przebieg prądu można obliczyć metodą superpozycji [5].

$$I_{1A}(t) = \frac{U_{1m}}{z_{s(t=0)}}[sin\ \ 〖(\omega_1\, t + \beta - \varphi_s) - sin(\beta - \varphi_s)e\hat{}(t\ /\ \tau_z)〗]$$
$$- \frac{E_{1m}}{z_{sx(t=0)}}\left[\sin(\omega_m t + \gamma - \psi_s) - \sin(\gamma - \psi_s)e^{t/\tau_z}\right]$$

$$I_{1B}(t) = \frac{U_{1m}}{z_{s(t=0)}}\left[\sin\left(\omega_1 t + \beta - \frac{2}{3}\pi - \varphi_s\right) - \sin(\beta - \frac{2}{3}\pi - \varphi_s)e^{t/\tau_z}\right]$$
$$- \frac{E_{1m}}{z_{sx(t=0)}}\left[\sin\left(\omega_m t + \gamma - \frac{2}{3}\pi - \psi_s\right) - \sin(\gamma - \frac{2}{3}\pi - \psi_s)e^{t/\tau_z}\right]$$

$$I_{1C}(t) = \frac{U_{1m}}{z_{s(t=0)}}\left[\sin\left(\omega_1 t + \beta + \frac{2}{3}\pi - \varphi_s\right) - \sin(\beta + \frac{2}{3}\pi - \varphi_s)e^{t/\tau_z}\right]$$
$$- \frac{E_{1m}}{z_{sx(t=0)}}\left[\sin\left(\omega_m t + \gamma + \frac{2}{3}\pi - \psi_s\right) - \sin(\gamma + \frac{2}{3}\pi - \psi_s)e^{t/\tau_z}\right]$$

Suma prądów

$$I_{1A}(t) + I_{1B}(t) + I_{1C}(t) = 0$$

Moment elektromagnetyczny

$$T_{em}(t) = \frac{P_\psi(t)}{\omega_m} \approx \frac{1}{\omega_m}[I_{1A}(t)U(t) + I_{1B}(t)U_{1B}(t) + I_{1C}(t)U_{1C}(t)]$$

Przybliżenie dotyczy włączenia strat mocy w stojanie (ΔP_{Cu1} i ΔP_{Fe}) do mocy w szczelinie $P_\psi(t)$.

Impedancja zwarcia dla chwili ($t = 0$) – (rys. 6a)

$$Z_{s(t=0)} = \sqrt{X_s''^2 + R^2}$$
$$Z_{sx(t=0)} = \sqrt{X_{sx}''^2 + R^2}$$
$$X_{sx}'' = X_s''\frac{\omega_m}{\omega_1}p_b$$

Kąty φ_s i ψ_s określają przesunięcia składowych periodycznych prądu w stosunku do napięcia:

$$\mathrm{tg}\varphi_s = \frac{X_s''}{R}$$
$$\mathrm{tg}\psi_s = \frac{X_{sx}''}{R}$$

Przebieg prądu rozruchowego (w pierwszej chwili po załączeniu napięcia) jest determinowany przez reaktancję synchroniczną podprzejściową X_s''. Wynika to z właściwości maszyn synchronicznych. W maszynach synchronicznych reaktancja synchroniczna X_s jest funkcją: kąta ϑ położenia strumienia Φ względem osi „d" i funkcją pochodnej smm twornika $\left[\frac{\mathrm{d}\Theta_t(t)}{\mathrm{d}t}\right]$. W stanach elektromagnetycznie nieustalonych, gdy pochodna smm $\left[\frac{\mathrm{d}\Theta_t(t)}{\mathrm{d}t}\right] \neq 0$, to reaktancja synchroniczna ma znacznie mniejszą wartość niż w stanie pracy ustalonej [3]. Najmniejsza wartość reaktancji synchronicznej jest przy superszybkich stanach nieustalonych, np. przy zwarciach. Najmniejsza wartość reaktancji nosi nazwę reaktancji podprzejściowej X_s''. Reaktancja podprzejściowa w osi „q" jest większa od reaktancji podprzejściowej w osi „d": $X_d'' < X_q''$, [5]. Zakładamy jednak, że $X_d'' = X_q'' = X_s''$.

Reaktancja podprzejściowa :

$$X_s'' \approx X_d'' \approx X_{dr}'' \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}$$

X_{dr}'' – oznacza reaktancję podprzejściową względną, jej wartość (0,2 < X_{dr}'' < 0,3) zależy od długości szczeliny powietrznej. X_{dr}'' jest mniejsza od reaktancji X_{dr}' przejściowej 0,6 < X_{dr}' < 0,8 i reaktancji X_{dr} w stanie ustalonym (1,6 < X_{dr} < 1,8).

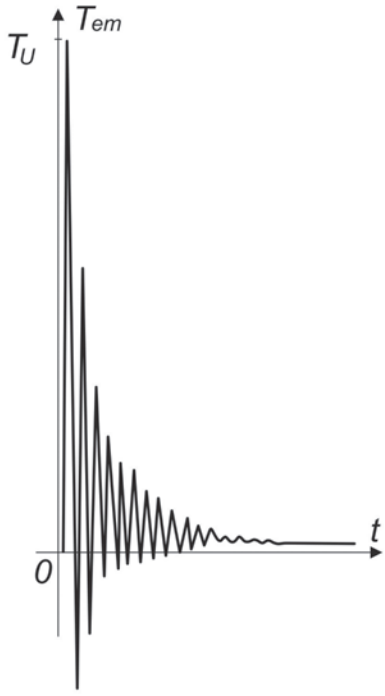
Prąd udarowy jest funkcją wartości chwilowych napięcia fazowego sieci $U_{1(t=0)}$ i napięcia rotacji indukowanego w uzwojeniu twornika $E_{1(t=0)}$, aktualnego przesunięcia fazowego między tymi napięciami $(\beta - \gamma)$, prędkości kątowej wirnika $\omega_{m(t=0)}$ i reaktancji synchronicznej podprzejściowej X_s''.

W niekorzystnym przypadku prąd udarowy

$$I_u \leq \left[\frac{U_{1m(t=0)}}{X_s''}(1+0{,}8) + \frac{E_{1m(t=0)}}{X_s''}\frac{\omega_1}{p_b \omega_m}(1+0{,}8)\right].$$

W równaniu powyższym „1" – dotyczy amplitudy składowej periodycznej, a „0,8" – składowej aperiodycznej przy założeniu, że składowa aperiodyczna zmniejszy się o 20%. U_{1m}, E_{1m} – oznaczają amplitudy napięć fazowych.

W najbardziej niekorzystnym stanie załączenia prąd udarowy może uzyskać wartość $3{,}6I_R = 21{,}6I_N$. Prąd udarowy determinuje moment udarowy T_u, który może osiągnąć wartość $T_u \approx 5{,}2(1 \div 1{,}5)T_N \leqslant 8T_N$, jak to pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Przebieg momentu elektromagnetycznego silnika synchronicznego wzbudzonego i załączanego po chwilowym zaniku napięcia

Stan dynamiczny silnika synchronicznego zilustrujmy przykładem silnika synchronicznego 2,4 MW, 6 kV, 288 A, 1500 obr/min.

Załóżmy, że:

- reaktancja podprzejściowa w jednostkach względnych [5]

$$X_{dr}'' \approx 0{,}25$$

$$X_d'' \approx X_{dr}'' \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = 0{,}25 \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 288} = 3\ \Omega$$

- napięcia U_1 i E_1 są równe i są w opozycji faz

$$U_{1m(t=0)} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_N}{\sqrt{3}} = E_{1m(t=0)}$$

- prędkość kątowa jest równa prędkości synchronicznej

$$\omega_m = \omega_{1m}$$

to prąd udarowy

$$I_u \approx \frac{U_m}{\sqrt{3} X_s''}(1+0{,}8) + \frac{U_m}{\sqrt{3} X_s''}(1+0{,}8) = 3{,}6 \frac{\sqrt{2} \cdot 6000}{\sqrt{3} \cdot 3} = 5878\ \text{A},$$

a jego względna wartość

$$I_{ur} = \frac{I_u}{I_N} \approx \frac{5878}{288} = 20{,}4.$$

Przyjęte założenia są łagodne, gdyż zwykle $E_{1m(t=0)} > U_{1m(t=0)}$ i $\omega_{m(t=0)} < \omega_{1m}$.

Jak widać z powyższego wywodu, w maszynach synchronicznych prądy udarowe, przy wyłączeniu napięcia i ponownym załączeniu, mogą być znacznie większe od prądów udarowych występujących w stanach rozruchowych, przy rozruchu asynchronicznym. Dzieje się tak dlatego, że strumień wzbudzenia Φ nie maleje, a może nawet zwiększać się, gdyż prąd wzbudzenia $I_w(t)$ wzrasta. Duża wartość prądu udarowego I_u silnika synchronicznego generuje także duży moment udarowy T_u. Maksymalna wartość momentu udarowego może wynosić $T_u \approx 8 \cdot T_N$. Moment udarowy o wartości maksymalnej nie zawsze wystąpi. Lecz jeśli wystąpi, to może spowodować zniszczenia w układzie napędowym, gdyż silnik synchroniczny, układ mechaniczny przeniesienia napędu i maszyna robocza nie są mechanicznie przystosowane do tak dużych uderzeń momentu dynamicznego. W silniku synchronicznym najczęściej ulegają uszkodzeniu uzwojenia oraz sprzęgła, a czasem wał. Siły dynamiczne działające na czoła uzwojenia silnika, które są proporcjonalne do kwadratu prądu udarowego, generują naprężenia gnące, które kumulują się przy wyjściu cewek z pakietu, co powoduje ich łamanie i pękanie izolacji.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono stany dynamiczne silnika synchronicznego, który pracował w stanie ustalonym, po czym napięcie sieci zasilającej zostało wyłączone, a następnie załączone i porównano go ze stanem dynamicznym przy rozruchu asynchronicznym. Przy chwilowym zaniku napięcia silnik może nie zostać odłączony od sieci. Prąd wzbudzenia silnika, z uwagi na dużą elektromagnetyczną stałą czasową uzwojenia wirnika (przy otwartym uzwojeniu stojana), powoduje wzrost strumienia magnetycznego i wzrost napięcia rotacji indukowanego w uzwojeniu stojana. Przy powrocie napięcia sieci wartość udarowa prądu I_u, w najbardziej niekorzystnym przypadku, może wynosić $21{,}6I_N$, a moment udarowy może być równy $8T_N$, podczas gdy przy rozruchu asynchronicznym wartości te wynoszą $15I_N$ i $3{,}6T_N$.

Stany elektromechaniczne nieustalone, wywołane zaburzeniami napięcia, nie zawsze powodują awarię, gdyż wartość prądu udarowego I_u zależy nie tylko od wartości napięć, lecz także od różnicy faz napięcia rotacji twornika silnika $E_{1(t=0)}$ i napięcia sieci $U_{1(t=0)}$ w chwili załączenia napięcia $(t = 0)$. Jeśli fazy napięć

są zgodne, to składowa aperiodyczna prądu jest minimalna, a jeśli napięcia są w opozycji faz, to składowa aperiodyczna prądu jest maksymalna i jest to przypadek, o którym decyduje chwila załączenia napięcia $U_{1(t=0)}$.

Przed chwilowymi zanikami napięcia zasilającego silniki elektryczne, w szczególności dużej mocy, chronią układy zabezpieczeń. Przy chwilowym zaniku napięcia bezpiecznie jest zatrzymać silnik, a następnie przeprowadzić jego rozruch. Jednak nie zawsze tak się dzieje, a winne jest zabezpieczenie silnika, które albo nie ma zaprogramowanej takiej funkcji działania, albo niesprawny jest przekaźnik przekazujący sygnał do wyłączenia silnika.

W literaturze [3] opisany jest przypadek silnika synchronicznego 2400 kW, 6 kV, 1500 obr/min, który napędzał dwie turbossawy, z przekładniami mechanicznymi podwyższającymi prędkość obrotową do 6000 obr/min. Silnik w krótkim okresie eksploatacji (w okresie gwarancyjnym) ulegał kilkakrotnej awarii: sprzęgieł, a także awarii obydwu przekładni, w których ścięte zostały wszystkie zęby. Zdarzenia takie zachodzą, gdy brak jest zabezpieczenia bądź zabezpieczenie jest niesprawne. Zabezpieczenie takie może nie zadziałać, gdy styki przekaźnika zabezpieczającego są utlenione bądź zabrudzone i zwierając się nie przekazują sygnału do otwarcia wyłącznika silnika.

W eksploatacji występują chwilowe zaniki napięcia związane z działaniem SPZów i SZRów. Brak zabezpieczenia silnika synchronicznego przed chwilowym zanikiem napięcia bądź gdy zabezpieczenie jest niesprawne, stwarza zagrożenie uszkodzenia silnika.

PIŚMIENNICTWO

[1] Drak B., Glinka T., Kapinos J., Miksiewicz R., Zientek P.: Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. ISBN 978-83-931909-4-2. Katowice 2013.

[2] Gawron S.: Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*. 2016 (109), nr 1, s. 1-10, ISSN 0239-3646.

[3] Glinka T. Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, ISBN 978-83-931909-1-1. Katowice 2015, ss. 287.

[4] Казовский Е. Я.: Переходые процессы в электрических машинах пременнго тока. Издательство Акаемий Наук С.С.С.Р. 1962.

[5] Węgrzyn S.: Rachunek operatorowy. W zastosowaniu do obliczania przebiegów nieustalonych w obwodach elektrycznych o stałych skupionych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1955, s. 119-128.