

Wyznaczanie zakresu regulacji mocy biernej silnika z biegunami jawnymi na podstawie pomiarów stanu pracy synchronicznej

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania reaktancji synchronicznych w osi d i q dla silnika synchronicznego z biegunami jawnymi na podstawie pomiarów podstawowych wielkości elektrycznych w stanie pracy synchronicznej. Omówiono dopuszczalny zakres pracy maszyny. Zaprezentowano opis silnika z biegunami jawnymi za pomocą wykresu wskazowego. Przedstawiono zależności umożliwiające wyznaczenie poszukiwanego rozwiązania. Zaprezentowano graficzną ilustrację metody. Omówiono możliwość ograniczenia zakresu poszukiwań dostępnych rozwiązań.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, napęd elektryczny, kompensacja mocy biernej

1. WSTĘP

Wolnoobrotowe silniki synchroniczne dużej mocy wykonuje się zwykle, jako maszyny jawnobiegunowe. W silnikach z biegunami jawnymi uzwojenie wzbudzenia nawinięte jest na biegunach wirnika (magneśnicy). Rdzeń wirnika jest symetryczny względem osi biegunów jawnych oznaczanej, jako oś d oraz względem osi podłużnej oznaczanej, jako oś q prostopadłej do osi d . Reaktancja synchroniczna w obu osiach ma różne wartości, co pozwala na uzyskanie momentu rozruchowego, zwanego momentem reluktancyjnym, przy rozruchu bezpośrednim z sieci zasilającej [1, 5, 8]. Niesymetria reaktancji w osiach d i q komplikuje jednak znacznie opis matematyczny i analizę pracy silnika, szczególnie w stanach dynamicznych [6, 7].

W stanie pracy synchronicznej, przy obciążeniu silnika momentem hamującym (mocą czynną) oś wirnika nie pokrywa się z osią pola wirującego wytwarzanego przez uzwojenia stojana (twornika), lecz jest przesunięta o kąt ϑ zwany kątem mocy lub kątem obciążenia. Praca synchroniczna możliwa jest w ograniczonym zakresie kąta mocy.

Niedociążone silniki synchroniczne można wykorzystać, jako regulowane kompensatory mocy biernej. Regulacja mocy biernej realizowana jest poprzez zmianę prądu płynącego w uzwojeniu wzbudzenia

[3, 4]. Ocena zakresu regulacji mocy biernej wymaga jednak znajomości reaktancji synchronicznych w osiach d i q . Niewłaściwie dobrany prąd wzbudzenia może spowodować przekroczenie dopuszczalnej wartości kąta mocy i wypadnięcie silnika z synchronizmu.

Istnieją metody wyznaczania parametrów elektromagnetycznych maszyny synchronicznej za pomocą pomiarów zanikania prądu w uzwojeniach twornika przy nieruchomym wirniku [6]. Wymaga to jednak dokładnego ustawienia osi magneśnicy względem przepływu twornika zasilanego ze źródła napięcia stałego.

Wirniki maszyn dużej mocy osiągają masy rzędu kilku do kilkunastu ton i zazwyczaj sprzęgnięte są na stałe z napędzanymi urządzeniami o porównywalnych lub większych masach. Ustawienie wału silnika w odpowiedniej pozycji w celu wyznaczenia reaktancji powyższą metodą jest w takich przypadkach praktycznie niemożliwe.

Inną metodą wyznaczania reaktancji synchronicznych jest metoda małego poślizgu bazująca na pomiarze pulsacji obwiedni prądu stojana przy rozwartym obwodzie wzbudzenia. Napięcia indukowane w rozwartym obwodzie wzbudzenia podczas pracy podsynchronicznej wymagają w takim przypadku obniżenia napięcia zasilania do wartości około 10% napięcia znamionowego. Uzyskanie takich napięć jest niemożliwe w przemysłowych sieciach zasilających i wymaga specjalnego stanowiska badawczego.

Wyznaczanie reaktancji za pomocą próby zwarcia symetrycznego wymaga napędzenia silnika inną maszyną, co w przemysłowych układach napędowych jest trudne lub wręcz niemożliwe do zrealizowania.

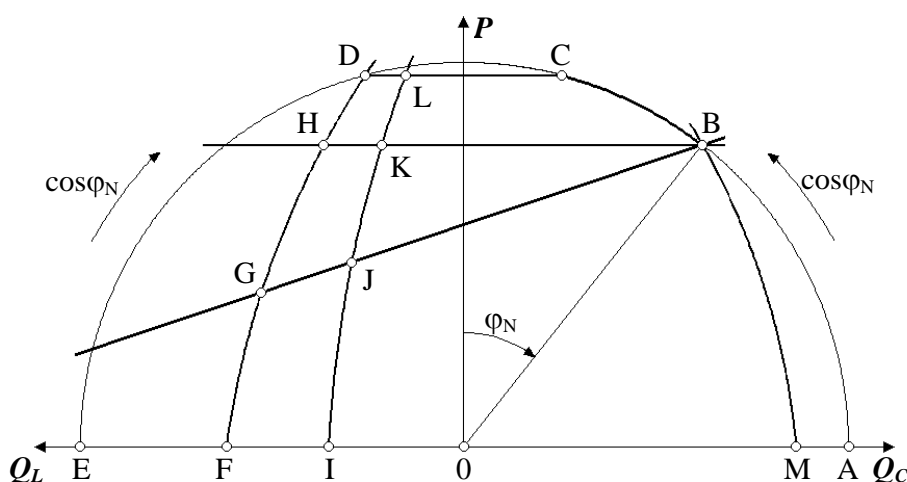
Istnieje możliwość wyznaczenia reaktancji X_d oraz X_q na podstawie pomiarów mocy czynnej, biernej oraz prądu wzbudzenia podczas pracy synchronicznej maszyny.

W artykule przyjęto pracę silnikową maszyny synchronicznej oraz dodatni znak mocy biernej w przypadku pobierania przez silnik mocy biernej indukcyj-

nej i ujemny znak przy jej zwrocie do sieci (pobieraniu z sieci mocy biernej pojemnościowej).

2. STAN SYNCHRONICZNY MASZYNY Z BIEGUNAMI JAWNYMI

Wykorzystanie maszyny synchronicznej, jako kompensatora mocy biernej wymaga wyznaczenia dopuszczalnego obszaru pracy. Na rys. 1 przedstawiono wykres granicznych obciążeń maszyny synchronicznej [2].



Rys. 1. Wykres granicznych obciążeń maszyny synchronicznej przy pracy silnikowej

Punkt B jest znamionowym punktem pracy silnika. Krzywa ABCDE stanowi ograniczenie związane ze znamionowym prądem stojana (mocą pozorną), krzywa BM ograniczenie związane ze znamionowym prądem wzbudzenia, odcinek BH ograniczenie związane ze znamionową mocą czynną, krzywa BCDH określa granicę przeciążenia chwilowego.

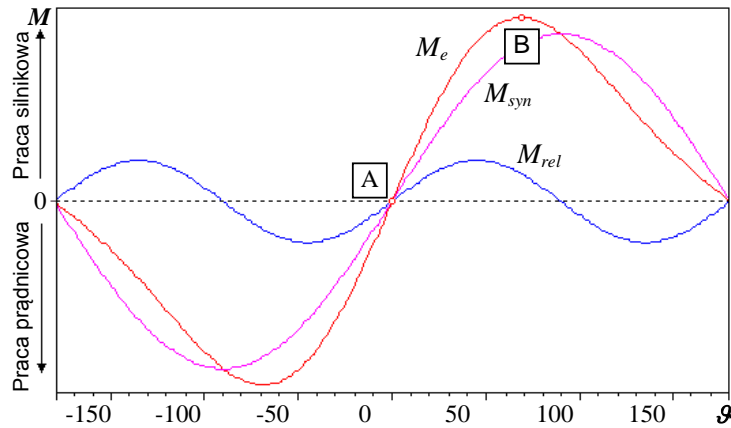
Krzywa FGHD jest ograniczeniem związanym z maksymalnym statycznym kątem mocy nie powodującym wypadnięcia z synchronizmu. W rzeczywistości należy uwzględnić także granicę stabilności dynamicznej wyznaczonej przez krzywą IJKL. W praktyce, jako granicę stabilności dynamicznej przyjmuje się granicę stabilności statycznej z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa. Producenci silników zalecają, aby nie pracowały one z kątem mocy większym od znamionowego, wyznaczonym prostą BJG. Z licznych doświadczeń przemysłowych wynika, że praca z kątem mocy większym od znamionowego (w odpowiednim zakresie) nie niesie za sobą negatywnych skutków.

Obszar ograniczony odcinkiem BJ można więc powiększyć do granicy krzywej BKJ.

Na rys. 2 przedstawiono wykres momentu elektromagnetycznego silnika jawnobiegunowego w zależności od kąta mocy. Moment rozwijany przez silnik w trakcie pracy synchronicznej jest sumą momentu reluktancyjnego związanego z niesymetrią obwodu magnetycznego wirnika i momentu synchronicznego pochodzącego od prądu wzbudzenia. Stabilna praca synchroniczna silnika możliwa jest dla punktu pracy pomiędzy punktami A i B przedstawionymi na rys. 2.

Maksymalny kąt mocy dla danego obciążenia mocą czynną (punkt A na rys. 2) będący granicą stabilności statycznej można wyznaczyć na podstawie zależności opartych o wykres wskazowy maszyny synchronicznej.

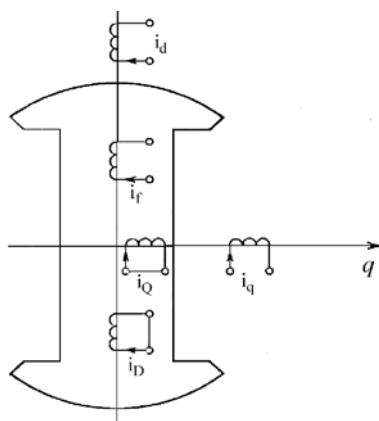
Aby wyznaczyć koordynaty dopuszczalnego obszaru pracy silnika synchronicznego, jako kompensatora mocy biernej, oprócz danych dostępnych na tabliczce znamionowej maszyny, konieczna jest znajomość reaktancji synchronicznych.



Rys. 2. Moment elektromagnetyczny silnika z biegunami jawnymi: M_{rel} – moment reluktancyjny, M_{syn} – moment synchroniczny, M_e – moment wypadkowy

Równaniami wyjściowymi do opisu maszyny synchronicznej są równania wektorowe opisujące 3-fazową maszynę prądu przemiennego zapisane we wspólnym wirującym układzie współrzędnych [1, 4, 5, 6, 7, 8]. Najwygodniej jednak jest opisać ją w układzie współrzędnych $d, q, 0$ wirujących współbieżnie z wirnikiem. W takim układzie uzwojenia stojana i wirnika leżące odpowiednio w osiach d oraz q pozostają względem siebie nieruchome, można zatem traktować je jak uzwojenia transformatora o stałych indukcyjnościach.

Na rys. 3 przedstawiono schemat uzwojeń maszyny synchronicznej z biegunami jawnymi w osiach d i q . Symbolami d, q oznaczono wielkości związane z uzwojeniami stojana, symbolem f wielkości związane z uzwojeniem wzbudzenia, a symbolami D, Q wielkości związane z uzwojeniami tłumiącymi.



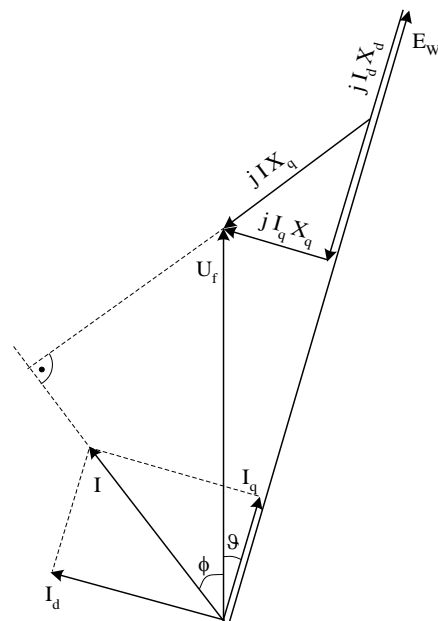
Rys. 3. Schemat uzwojeń maszyny synchronicznej jawnobiegunowej w układzie współrzędnych dq

Równania opisujące stan pracy maszyny synchronicznej [1, 4, 5, 6, 7, 8] ulegają znacznemu uproszczeniu przy założeniu pracy w stanie synchronicznym. Zakładając, że przebiegi napięć, prądów i stru-

mieni skojarzonych mają symetryczny kształt sinusoidalny, to w stanie ustalonym pochodne czasowe strumieni oraz prądy w obwodach tłumiących można przyrównać do zera, co pozwala na pominięcie wpływu uzwojeń tłumiących.

Wygodnym sposobem ilustracji stanu pracy silnika jest przedstawienie wzajemnych zależności za pomocą wykresu wskazowego. Dla silników dużej mocy przy wyznaczaniu wykresu wskazowego pomija się rezystancje uzwojeń stojana, gdyż mają znikomy wpływ na pracę silnika w porównaniu z wpływem reaktancji synchronicznych w osi podłużnej i poprzecznej.

Na rys. 4 przedstawiono wykres wskazowy silnika synchronicznego z biegunami jawnymi w układzie współrzędnych dq z pominięciem strat w uzwojeniu stojana.



Rys. 4. Wykres wskazowy silnika synchronicznego z biegunami jawnymi

Na podstawie wykresu wskazowego z rys. 4 można zapisać 3 niezależne równania:

$$\begin{cases} P = mU_f \frac{E_w}{X_d} \sin \vartheta + \frac{mU_f^2}{2} \sin 2\vartheta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \\ Q = -\frac{mU_f^2}{X_q} + m \frac{U_f E_w}{X_d} \cos \vartheta + mU_f^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos^2 \vartheta \\ E_w = \frac{I_w}{k_w} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- m – liczba faz,
- P – moc czynna,
- Q – moc bierna,
- U_f – napięcie fazowe,
- E_w – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika,
- I_w – prąd wzbudzenia
- X_d – reaktancja synchroniczna w osi d (reaktancja podłużna),
- X_q – reaktancja synchroniczna w osi q (reaktancja poprzeczna),
- ϑ – kąt mocy,
- k_w – stała konstrukcyjna silnika.

Uwzględniając zależność na E_w można zapisać:

$$\begin{cases} P = mU_f \frac{I_w}{k_w X_d} \sin \vartheta + \frac{mU_f^2}{2} \sin 2\vartheta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \\ Q = -\frac{mU_f^2}{X_q} + m \frac{U_f I_w}{k_w X_d} \cos \vartheta + mU_f^2 \cos^2 \vartheta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Kąt mocy ϑ , można wyrazić w postaci:

$$\frac{\cos \vartheta}{\sin \vartheta} = \frac{mU_f^2}{X_q P} - \frac{Q}{P} \quad (3)$$

Przyjmując, że znane są wartości P , Q , U_f , I_w (np. wartości znamionowe) oznacza to, że dwa niezależne równania (2) są funkcją trzech nieznanymi zmiennymi:

$$\begin{cases} P = f(k_w, X_d, X_q) \\ Q = f(k_w, X_d, X_q) \end{cases} \quad (4)$$

Niemożliwe jest więc wyznaczenie szukanych zmiennych za pomocą obliczeń analitycznych.

Wyznaczenie reaktancji X_d , X_q oraz współczynnika k_w wymaga znajomości co najmniej 3 punktów pracy silnika opisanych poprzez P , Q , I_w . Wartości P , Q , I_w są możliwe do odczytania z przyrządów pomiarowych podczas pracy synchronicznej silnika. Zakładając, że jeden z koniecznych punktów pracy wyzna-

czony jest przez parametry znamionowe podane na tabliczce znamionowej silnika konieczne jest wykonanie pomiarów dla dwóch różnych, innych niż znamionowy punktów pracy.

Znając wartości P , Q , I_w dla trzech różnych punktów pracy silnika można wyprowadzić równania na wartość X_d , X_q oraz k_w . Stopień skomplikowania równań uniemożliwia jednak rozwiązanie ich na drodze analitycznej.

Uzyskanie rozwiązania może być zrealizowane poprzez iteracyjny algorytm badający wzajemne zależności parametrów X_d , X_q oraz k_w dla znanych punktów pracy maszyny.

Dla zadanych zmian X_q na podstawie (3) można wyznaczyć wartość kąta ϑ , a następnie dla zadanych zmian X_d wyznaczyć wartość współczynnika k_w zgodnie z zależnością:

$$k_w = \frac{I_w}{\frac{PX_d}{mU_f \sin \vartheta} - U_f \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \cos \vartheta} \quad (5)$$

Poszukiwanym rozwiązaniem są takie wartości reaktancji X_d i X_q , dla których wartość współczynnika k_w jest taka sama w każdym z uwzględnionych punktów pracy.

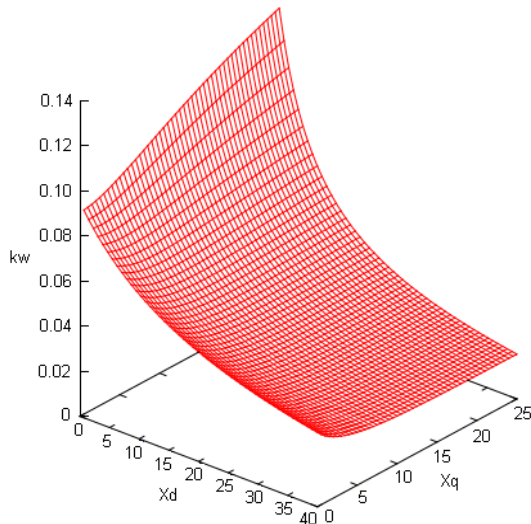
W celu ilustracji metody posłużono się silnikiem synchronicznym typu silnika GAe-1716t/01 o danych znamionowych przedstawionych w Tab. 1.

Tabela 1.
Dane znamionowe silnika GAe-1716t/01

Moc znamionowa (mechaniczna)	P_{mN} [kW]	3150
Moc czynna	P_N [kW]	3274
Napięcie stojana	$U_{N(Y)}$ [V]	6000
Prąd stojana	I_N [A]	350
Napięcie wzbudzenia	U_{wN} [V]	90
Prąd wzbudzenia	I_{wN} [A]	313
Współczynnik mocy	$\cos \varphi_N$	0,9 poj.
Prędkość obrotowa	n_N [obr/min]	375
Częstotliwość	f_N [Hz]	50

3. WYZNACZANIE REAKTANCJI SYNCHRONICZNYCH

Wpływ reaktancji X_d i X_q na wartość współczynnika k_w zilustrowano dla znamionowego punktu pracy silnika określonego przez wartości P_N , Q_N , U_{fN} , I_{wN} . Na rys. 5 przedstawiono wykres funkcji $k_w=f(X_d, X_q)$ dla znamionowego punktu pracy silnika GAe-1716t/01.



Rys. 5. Wpływ parametrów X_d , X_q na wartość współczynnika k_w przy znamionowych wartościach parametrów dla silnika GAe-1716t/01

Należy zaznaczyć, że parametr k_w jest stałą konstrukcyjną silnika, co oznacza, że jest niezmienny niezależnie od stanu pracy układu napędowego dla stałych wartości X_d i X_q . Zmienna wartość współczynnika k_w na rys. 5 wynika ze zmian wartości reaktancji X_d oraz X_q w procesie tworzenia wykresu.

Figura przedstawiona na rys. 5 opisana jest w przestrzeni trójwymiarowej, co oznacza, że dla wyznaczenia wartości współczynnika k_w niezbędne jest zbadanie jego zmienności, dla co najmniej 3 różnych punktów pracy silnika. W Tab. 2 przedstawiono wartości pomiarowe dla 2 pozostałych stanów pracy przy znamionowym napięciu zasilania U_{fN} .

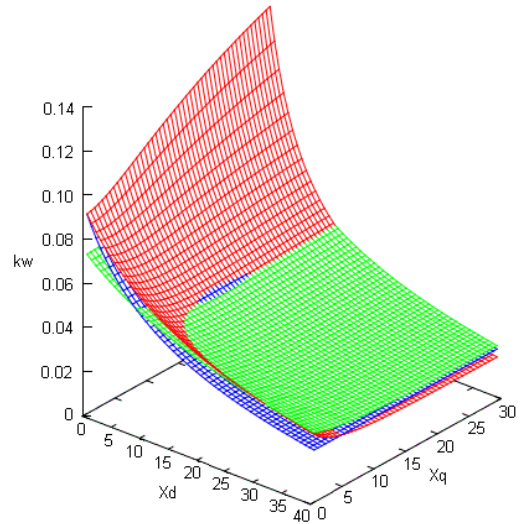
Tabela 2.
Wartości pomiarowe dla silnika GAe-1716t/01

Moc czynna P [kW]	Moc bierna Q [kVAr]	Prąd wzbudzenia I_w [A]
1636,8	-1127,5	250
327,4	-2556,0	313

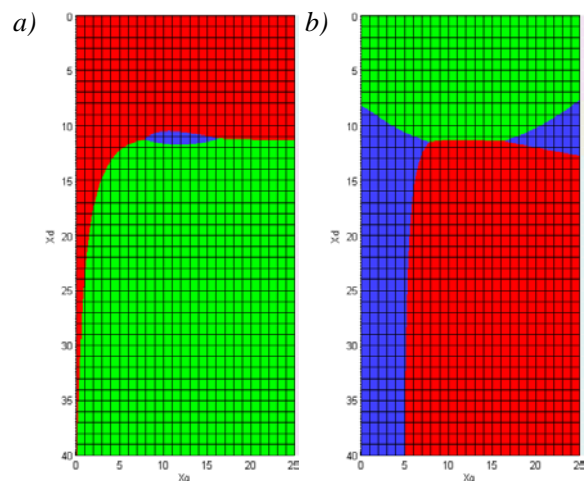
Dla przedstawionych wartości pomiarowych wykreślono zmienność współczynnika k_w w zależności od parametrów X_d i X_q i umieszczono na wspólnym wykresie z przebiegiem wyznaczonym dla parametrów znamionowych. Wyniki przedstawiono na rys. 6.

Wykreślone figury przecinają się w miejscach równej wartości współczynnika k_w , a punkty przecięcia się wszystkich 3 figur są punktami potencjalnych wartości reaktancji X_q i X_d .

Na rys. 7 przedstawiono rzuty wykreślonych figur na płaszczyznę $X_d X_q$. Potencjalne wartości reaktancji X_d i X_q znajdują się w punktach styku 3 kolorów.



Rys. 6. Wpływ parametrów X_d , X_q na wartość współczynnika k_w dla wybranych punktów pracy silnika GAe-1716t/01

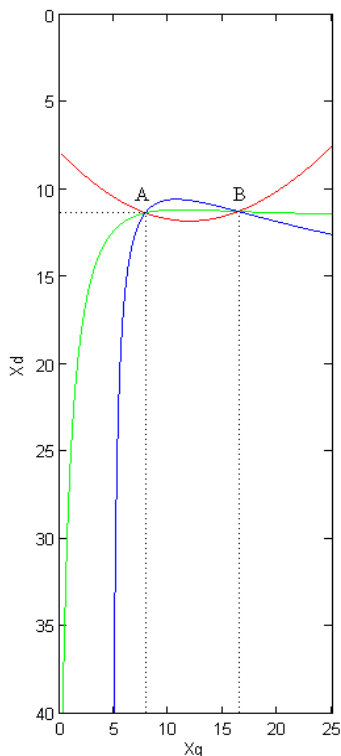


Rys. 7. Rzut wykresu wpływu parametrów X_d , X_q na wartość współczynnika k_w dla wybranych punktów pracy silnika GAe-1716t/01 na płaszczyznę $X_d X_q$:
a) widok z góry, b) widok z dołu

Na rys. 8 przedstawiono rzut na płaszczyznę $X_q X_d$ wspólnych krawędzi poszczególnych figur z rys. 6.

Wyznaczając punkty wspólne 3 krzywych w przestrzeni dwuwymiarowej można wyznaczyć potencjalne wartości reaktancji X_q oraz X_d .

Jak można zauważyć na rys. 8 istnieją dwa punkty $A(X_{q1}, X_d)$ oraz $B(X_{q2}, X_d)$ spełniające warunek niezmienności współczynnika k_w . Ze względu na niesymetryczną budowę wirnika silnika z biegunami jawnymi reaktancja w osi d jest zawsze większa od reaktancji w osi q . Z tego powodu należy odrzucić punkt B , a poszukiwanym rozwiązaniem są współrzędne punktu A z rys. 8. Dla przedstawionego przykładu wyznaczone reaktancje mają wartości $X_q=7,82 \Omega$ oraz $X_d=11,38 \Omega$.



Rys. 8. Rzut wspólnych krawędzi figur zależności współczynnika k_w na płaszczyznę $X_q X_d$ dla różnych punktów pracy silnika GAe-1716t/01

Stosując analogiczną metodę, możliwe jest wyznaczenie wartości reaktancji X_q i X_d przy założeniu stałości siły elektromotorycznej E_w , jednak pomiary stanów pracy powinny być w takim przypadku wykonane przy tym samym prądzie wzbudzenia oraz zmianie obciążenia mocą czynną.

Metoda poszukiwania wspólnej wartości współczynnika k_w w celu wyznaczenia reaktancji synchronicznych zakłada liniowość obwodu magnetycznego. Aby zminimalizować wpływ nasycenia należy dobrać punkty pomiarowe przy możliwie małych wartościach prądu wzbudzenia.

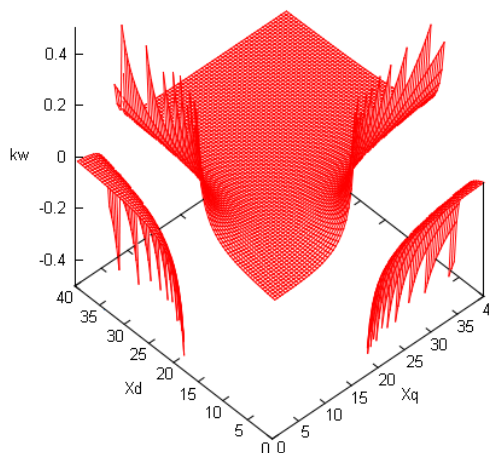
4. OGRANICZENIE ZAKRESU POSZUKIWAŃ

Wykres funkcji $k_w=f(X_d, X_q)$ nie zawsze ma tak regularne kształty jak dla przypadków przedstawionych na rys. 6.

Na rys. 9 przedstawiono wykres funkcji $k_w=f(X_q, X_d)$ dla punktu pracy $P=0,6P_N$, $Q=2159001$ kVA, $I_w=110$ A będącego stabilnym punktem pracy synchronicznej dla rozpatrywanego silnika przy przyjętym obciążeniu.

„Postrzępione” brzegi figury wynikają z przyjętego kroku obliczeniowego względem osi X_q oraz X_d podczas wykreślania wykresu. W rzeczywistości

w tych miejscach występuje pełna wstęga, bez widocznego na rys. 9 „postrzępienia”. Przyjęcie zbyt dużego kroku obliczeniowego może prowadzić do zwiększonych błędów lub nawet niemożności wyznaczenia wspólnych wartości współczynnika k_w , a tym samym braku możliwości wyznaczenia, nawet zgrubnego, reaktancji X_d oraz X_q .



Rys. 9. Wykres funkcji $k_w=f(X_q, X_d)$ dla silnika GAe-1716t/01 przy $P=0,6P_N$, $I_w=110$ A, $Q=2159001$ kVA

Jak można zauważyć na rys. 9 uzyskana figura składa się z kilku segmentów. Segmentacja ta spowodowana jest nieciągłością funkcji ctg , a wyznaczenie kąta ϑ z zależności (3) nie jest możliwe dla niektórych kombinacji wartości X_d i X_q . Taki kształt przebiegu funkcji powoduje powstanie dodatkowych miejsc przecięcia krawędzi wszystkich rozpatrywanych obszarów dla różnych punktów pracy silnika, dając dodatkowe, nieprawidłowe z punktu widzenia pracy silnika rozwiązania.

Dla pracy silnikowej minimalny kąt mocy ϑ wynosi 0. Uwzględniając warunek $\vartheta \geq 0$ w (3) otrzymuje się:

$$X_q \leq \frac{mU_f^2}{Q} \tag{6}$$

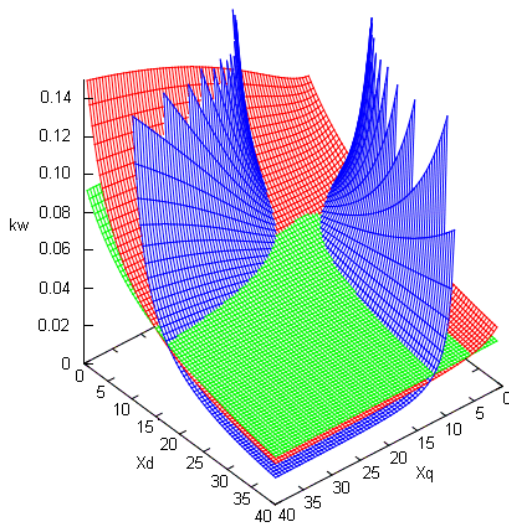
Dla rozpatrywanego przykładu obszar poszukiwań rozwiązania można ograniczyć do wartości $X_{q\max}=16,6744 \Omega$ wyznaczonej na podstawie zależności (6).

Współczynnik k_w będący stałą konstrukcyjną silnika musi być większy od 0. Uwzględniając oba powyższe założenia można ograniczyć zakres szukanego rozwiązania.

Na rys. 10 przedstawiono reprezentację graficzną wpływu parametrów X_d, X_q na wartość współczynnika k_w dla wybranych punktów pracy silnika z uwzględnieniem ograniczenia zakresu poszukiwanych rozwiązań.

Przedstawione rysunki są graficzną ilustracją iteracyjnej metody wyznaczania parametrów umożliwiającą odczytanie parametrów reaktancji synchronicznych w obu osiach.

Zastosowanie iteracyjnej metody obliczeniowej wyznaczania wartości reaktancji X_d oraz X_q umożliwia uzyskanie wyniku z założoną dokładnością. Iteracyjna metoda obliczeniowa powinna zawężać krok poszukiwań w okolicach zbliżonych wartości współczynnika k_w aż do osiągnięcia błędu mniejszego od wymaganej dokładności. Ważny jest dobór odpowiednio małego kroku początkowego, aby uniknąć sytuacji przedstawionych na rys. 9 i 10 w formie „postrzępionych” wstęg dla wykreślonych funkcji $k_w=f(X_q, X_d)$.



Rys. 10. Wpływ parametrów X_d , X_q na wartość współczynnika k_w dla wybranych punktów pracy silnika GAe-1716t/01 z ograniczeniem zakresu poszukiwań dla $P=0,6P_N$, $I_w=110$ A, $Q=2159001$ kVA

5. PODSUMOWANIE

Znajomość reaktancji synchronicznych w osi podłużnej i poprzecznej dla maszyny jawnobiegunowej jest niezbędna w celu wyznaczenia zakresu regulacji mocy biernej zapewniającej bezpieczną pracę silnika w stanie synchronicznym [3]. Parametry X_d oraz X_q można wyznaczyć na podstawie pomiarów podstawowych wielkości elektrycznych (moc czynna, moc bierna, prąd wzbudzenia) w stanie pracy synchronicznej. Konieczne jest jednak uwzględnienie niezbędnego marginesu bezpieczeństwa związanego z dopuszczalnym kątem mocy w stanach dynamicznych.

Złożoność zależności wiążących różne punkty pracy silnika w stanie synchronicznym uniemożliwia uzyskanie wyniku na drodze analitycznej. Rozwiązaniem jest metoda iteracyjna poszukująca rozwiązania wg kryterium jednakowej wartości współczynnika k_w . Ograniczenie zakresu poszukiwań do wartości związanych z możliwymi stanami maszyny w stanie pracy silnikowej eliminuje potencjalnie nieprawidłowe wartości wyznaczanych reaktancji synchronicznych i pozwala na uzyskanie rozwiązania z dowolną, założoną dokładnością.

Literatura

1. Bajorek Z.: *Teoria maszyn elektrycznych*, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.
2. Glinka T.: *Maszyny synchroniczne jako kompensatory mocy biernej i filtry wyższych harmonicznych*. Wiadomości Elektrotechniczne, R.81, nr 8 2013.
3. Hyla M.: *Power supply unit for the excitation of a synchronous motor with a reactive power regulator*. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, nr 1(521), s. 57-61
4. Kaczmarek T., Zawirski K.: *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
5. Latek W.: *Teoria maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1987
6. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Helion, Gliwice 1998
7. Paszek W.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa, 1986.
8. Plamitzer A.: *Maszyny elektryczne*. WNT, Warszawa 1986.

dr inż. MARIAN HYLA
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
marian.hyla@polsl.pl