

Praca optymalna trójfazowego silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań pracy optymalnej trójfazowego silnika synchronicznego czyli pracy z minimalnymi stratami w całym zakresie obciążeń. Taką pracę uzyskuje się przez zasilanie badanego silnika optymalną wartością napięcia i optymalną wartością prądu wzbudzenia dla aktualnego obciążenia. Ponieważ wyznaczanie optymalnych parametrów zasilania jest bardzo czasochłonne ze względu na konieczność wykonania dużej liczby pomiarów zaproponowano metodę, która umożliwia w znaczący sposób ich ograniczenie i uproszczenie.

Abstract. The article presents the results of research on the optimal operation of a three-phase synchronous motor, i.e. operation with minimal losses in the entire load range. Such work is achieved by supplying the tested motor with the optimal voltage value and the optimal value of the excitation current for the current load. Since the determination of optimal power supply parameters is very time-consuming due to the necessity to perform a large number of measurements, a method has been proposed that allows for their significant reduction and simplification. (**The optimal operation of a three-phase wound field synchronous motor**)

Słowa kluczowe: praca optymalna silnika synchronicznego, wyznaczanie optymalnych parametrów zasilania

Keywords: optimal operation of a synchronous motor, determination of optimal power supply parameters

Wstęp

Zagadnienie eksploatacyjnej minimalizacji strat mocy w silnikach elektrycznych jest przedmiotem badań już od wielu dziesiętków lat. Największa liczba badań skierowana była i jest nadal na silniki indukcyjne, gdyż ich udział w napędach elektrycznych przekracza 90 %. Coraz więcej uwagi poświęca się silnikom synchronicznym z magnesami trwałymi typu PMSM oraz MIPMSM [1-6]. Spada natomiast zainteresowanie silnikami synchronicznymi ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Może to wynikać z faktu, że tego rodzaju maszyny budowane są najczęściej jako silniki średniej i dużej mocy. Dotychczas ukazało się niewiele prac związanych z minimalizacją strat mocy w tych silnikach [7-10]. Brak zainteresowania wynika być może również z tego, że w przypadku sterowania umożliwiającemu pracę energooszczędną trzeba zrezygnować z cennej właściwości silnika, jaką jest możliwość generacji mocy biernej indukcyjnej przez przewzbudzoną maszynę. Cała trudność optymalnego sterowania wynika z konieczności doboru odpowiedniej wartości napięcia zasilającego oraz odpowiedniej wartości prądu wzbudzenia dla danego obciążenia. Dla silnika indukcyjnego opracowanie sterowania dla pracy optymalnej sprowadza się do doboru tylko jednego parametru jakim jest napięcie zasilania. W przypadku silnika synchronicznego wyznaczenie optymalnych parametrów zasilania może nastąpić poprzez obliczenia symulacyjne bądź też poprzez pomiary laboratoryjne. W trakcie prowadzenia badań laboratoryjnych należałoby dokonać bardzo wielu żmudnych pomiarów wiążących ze sobą napięcie zasilania, prąd wzbudzenia i moment obciążenia. Byłoby to zadanie trudne w realizacji i zabierające wiele czasu.

Dlatego należało opracować odpowiednią strategię dokonywania pomiarów pozwalającą na uproszczeniu i zmniejszeniu liczby pomiarów prowadzących do wyznaczenia optymalnych parametrów zasilania. Założenia te spełnia opisana poniżej metoda z zastosowaniem miernika parametrów sieci. Inspiracją było wcześniejsze zastosowanie takiego miernika do wyznaczania optymalnych parametrów pracy dla synchronicznego silnika reluktancyjnego, co było zadaniem znacznie łatwiejszym, gdyż w tym przypadku poszukiwano tylko jednego optymalnego parametru jakim było napięcie zasilania [11].

Moment elektromagnetyczny, straty mocy i sprawność silnika synchronicznego

Moment elektromagnetyczny T_e w silniku synchronicznym z wirnikiem cylindrycznym opisuje poniższe równanie

$$(1) \quad T_e = \frac{m}{2\pi n_s} \frac{U_{ph} U_i}{X_d} \sin v$$

gdzie: m – liczba faz, n_s – prędkość synchroniczna, U_{ph} – fazy napięcie zasilania, U_i – napięcie indukowane w uzwojeniu stojana, X_d – reaktancja synchroniczna, v – kąt mocy.

W takiej maszynie synchronicznej moment elektromagnetyczny jest proporcjonalny do napięcia zasilania i napięcia indukowanego generowanego przez strumień wzbudzenia, którego wartość zależy od prądu wzbudzenia. Dobór parametrów zasilania w postaci napięcia zasilającego i prądu wzbudzenia ma istotne znaczenie dla procesu minimalizacji strat mocy w maszynie.

Moc doprowadzona do silnika synchronicznego P_{in} składa się z mocy doprowadzonej do obwodu stojana P_{ins} danej równaniem

$$(2) \quad P_{ins} = 3U_{ph} I_{ph} \cos \varphi$$

oraz mocy doprowadzonej do obwodu wzbudzenia P_{inf}

$$(3) \quad P_{inf} = U_f I_f$$

gdzie: U_f – napięcie zasilania obwodu wzbudzenia, I_f – prąd wzbudzenia.

Moc całkowita doprowadzona do silnika synchronicznego P_{in} będzie równa

$$(4) \quad P_{in} = P_{ins} + P_{inf}$$

Sprawność silnika η wyraża zależność

$$(5) \quad \eta = \frac{(P_{ins} + P_{inf}) - P_t}{P_{ins} + P_{inf}}$$

gdzie P_t – straty całkowite równe:

$$(6) \quad P_t = P_m + P_{Fe} + P_w + P_{wa}$$

gdzie: P_m – straty mechaniczne, P_{Fe} – straty w rdzeniu, P_w – straty w uzwojeniach stojana, P_{wa} – straty dodatkowe obciążeniowe.

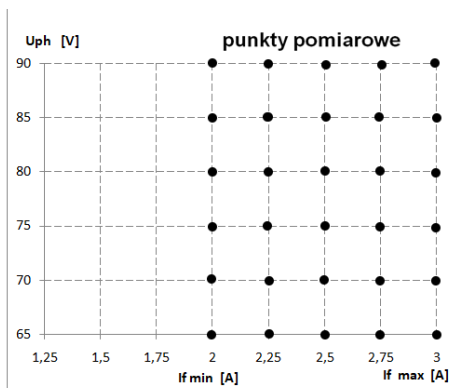
W przypadku zastosowanej metody sprawność była wyznaczana metodą bezpośrednią wg poniższej zależności

$$(7) \quad \eta = \frac{P}{P_{in}}$$

gdzie: P – moc na wale silnika.

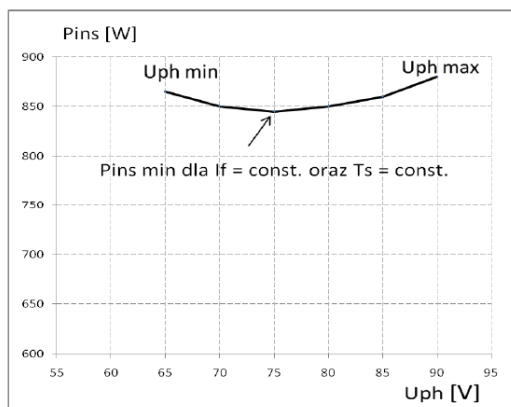
Opis metody

Aby uwidocznic zalety zaproponowanej metody wyznaczania optymalnych parametrów zasilania należy odwołać się do rys.1.



Rys.1. Obszar do przeszukania z zaznaczonymi punktami pomiarowymi dla założonej wartości momentu obciążenia $T_s = \text{const.}$ w celu znalezienia $P_{ins \min}$

Dla każdej założonej wartości prądu wzbudzenia należałoby dokonać sześciu pomiarów w przyjętym obszarze zmian napięcia U_{ph} (65 V, 90 V) i wyszukać minimum mocy pobieranej przez uzwojenia stojana P_{ins} .



Rys.2. Poszukiwania minimum mocy P_{ins} przez zmianę napięcia zasilającego od $U_{ph \max}$ do $U_{ph \min}$ dla przyjętej wartości prądu wzbudzenia I_f i stałej wartości momentu obciążenia $T_s = \text{const}$

Tę procedurę można uprościć poprzez użycie do pomiarów miernika parametrów sieci oraz indukcyjnego regulatora napięcia przyłączonego do obwodu stojana.

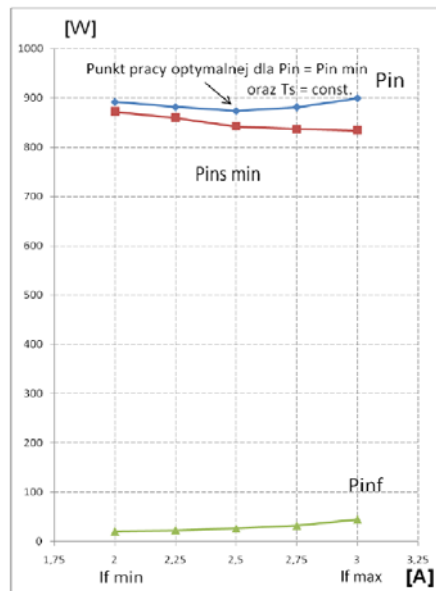
Zamiast dokonywania pojedynczych pomiarów będziemy zmieniać napięcie regulatorem w założonym obszarze aż miernik parametrów sieci pokaże minimum mocy $P_{ins \min}$ zgodnie z rys.2.

W rezultacie badanie sprowadzi się do jednego punktu pomiarowego zamiast sześciu. Dla wskazanego obszaru, który należałoby przeszukać, nastąpi ograniczenie liczby pomiarów z 30 do 5 czyli o 83 %.

Dla każdej przyjętej wartości prądu wzbudzenia sumujemy wyznaczoną moc $P_{ins \min}$ oraz moc pobieraną przez obwód wzbudzenia P_{inf} zgodnie z poniższą zależnością

$$(8) \quad P_{in} = P_{ins \min} + P_{inf}$$

Zmiany poszczególnych składników mocy pobieranej przedstawiono przykładowo na rys.3. Rysunek celowo powiększono aby oddać lepiej proporcje pomiędzy poszczególnymi mocami.



Rys.3. Pomiary poszczególnych mocy $P_{ins \min}$ oraz P_{inf} dla wybranych wartości prądu wzbudzenia silnika synchronicznego i przyjętej wartości momentu obciążenia $T_s = \text{const}$

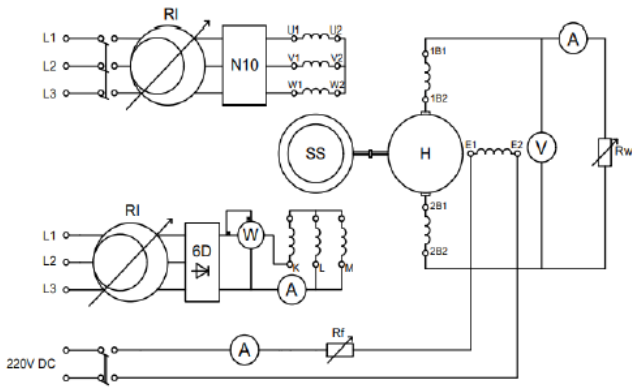
Dla pewnej przyjętej wartości prądu wzbudzenia z wybranego przedziału, moc pobierana przez silnik P_{in} osiągnie minimum (rys.3). Oznacza to, że silnik znalazł się w punkcie pracy optymalnej. Dla tego minimum mocy wartość prądu wzbudzenia oraz wartość napięcia przy której moc P_{ins} też osiąga minimum będą stanowiły parametry optymalne dla założonej wartości obciążenia.

Procedurę poszukiwań powtarzamy dla kolejnych wartości obciążenia dobierając obszary zmian prądu wzbudzenia oraz zmian napięcia zasilającego. W ten sposób będziemy w stanie skonstruować charakterystyki optymalnych parametrów sterowania $U_{opt} = f(T_s)$ oraz $I_{fopt} = f(T_s)$ z zależności od momentu obciążenia silnika synchronicznego.

Pomiary parametrów pracy optymalnej dla częstotliwości 50,40,30,20 Hz

Obiektem badań był silnik synchroniczny z wirnikiem cylindrycznym powstałym na bazie silnika indukcyjnego pierścieniowego. Wykonano nowe uzwojenie stojana i wirnika oraz powiększono szczelinę powietrzną w celu zwiększenia przeciążalności silnika. Poniżej przedstawiono znamionowe parametry maszyny:

- $P_N = 1,5 \text{ kW}$
 - $U_N = 200 \text{ V}$
 - $I_{SN} = 5,5 \text{ A}$
 - $I_{fN} = 4,0 \text{ A}$
 - $\cos\varphi_N = 0,9$
 - $n_s = 1500 \text{ obr/min.}$
 - $R_{phs} = 0,88 \Omega$
 - $R_f = 5,01 \Omega$ (zastępcza rezystancja obwodu wzbudzenia)
- Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania optymalnych parametrów zasilania dla częstotliwości 50 Hz

Stojan badanego silnika synchronicznego SS zasilany był z sieci trójfazowej poprzez indukcyjny regulator napięcia RI umożliwiający zmianę amplitudy napięcia zasilającego. Pomiaru uśrednionych wartości napięcia zasilania, prądu fazowego, współczynnika mocy oraz mocy czynnej pobieranej z sieci dokonywane były przez miernik parametrów sieci N10 o danych:

$$U_N = 400 \text{ V}, I_N = 5 \text{ A}$$

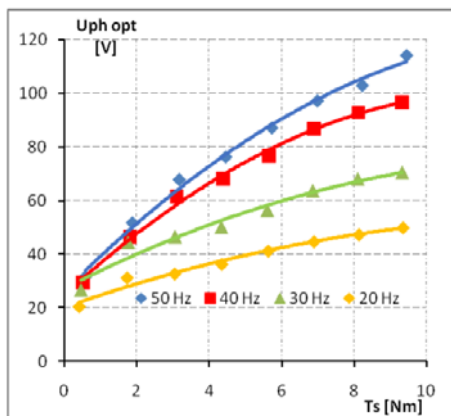
Obwód wzbudzenia zasilany był z prostownika 6D, a regulację wartości prądu wzbudzenia zapewniał indukcyjny regulator napięcia zasilany z sieci trójfazowej. Moc doprowadzona do obwodu wzbudzenia silnika była mierzona watomierzem W. Obciążeniem silnika synchronicznego była hamownica H, którą była wycechowana obcowzbudna prądnica prądu stałego dla znamionowej wartości prądu wzbudzenia o parametrach podanych poniżej:

$$\begin{aligned} \text{Typ PZMb 44b} \\ P_N &= 1,5 \text{ kW} \\ U_N &= 220 \text{ V} \\ I_N &= 6,5 \text{ A} \\ I_{fN} &= 0,42 \text{ A} \\ n_N &= 1450 \text{ obr/min.} \end{aligned}$$

Obciążeniem hamownicy był rezystor R_W , o regulowanych wartościach rezystancji.

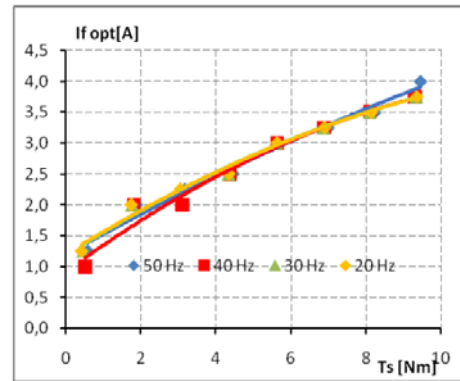
Badania dla częstotliwości niższych 40,30,20 Hz przeprowadzono z udziałem prądnicy synchronicznej napędzanej przez silnik indukcyjny zasilany z przetwornika częstotliwości.

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na opracowanie charakterystyk optymalnych parametrów zasilania $U_{ph\ opt}$ i $I_{f\ opt}$ w funkcji momentu T_S na wale maszyny dla wybranych częstotliwości, rys.5 i rys.6.



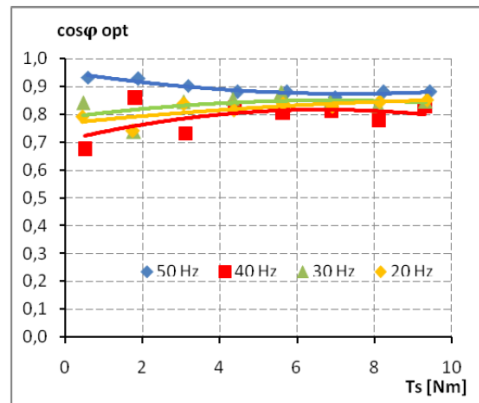
Rys.5. Charakterystyki napięć optymalnych $U_{ph\ opt}$ w funkcji momentu obciążenia T_S

Charakterystyki napięć optymalnych układają się w sposób typowy dla maszyn prądu przemiennego czyli dla zmniejszających się częstotliwości maleją wartości napięć zasilających

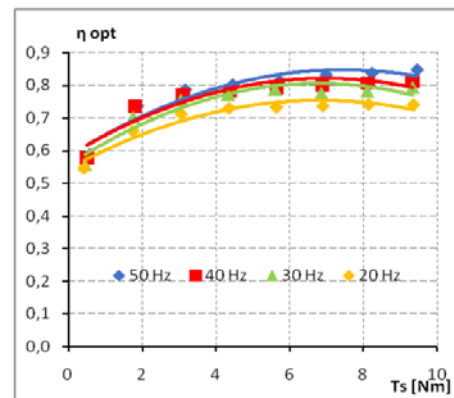


Rys.6. Charakterystyki optymalnych prądów wzbudzenia w funkcji momentu obciążenia

Bardzo interesująco przedstawiają się charakterystyki optymalnych prądów wzbudzenia, które praktycznie nakładają się na siebie. Stwarza to możliwość zastąpienia ich jedną wspólną charakterystyką dla szerokiego zakresu zmian częstotliwości. Ta właściwość może okazać się bardzo przydatną przy konstruowaniu sterowania silnikiem synchronicznym przystosowanym do pracy optymalnej. Byłby to silnik pracujący w szerokim zakresie zmian obciążenia.



Rys.7. Charakterystyki współczynników mocy w warunkach pracy optymalnej



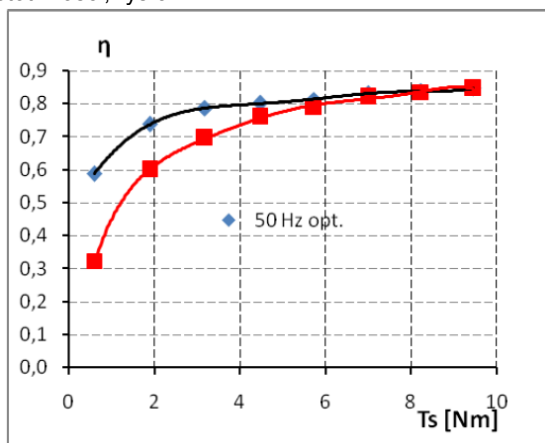
Rys.8. Charakterystyki sprawności w warunkach pracy optymalnej

Kolejnym parametrem jest współczynnik mocy, którego wartość dla poszczególnych częstotliwości jest praktycznie

stała dla większych obciążeń i zmienia się raczej niewiele w zakresie obciążeń mniejszych, rys.7.

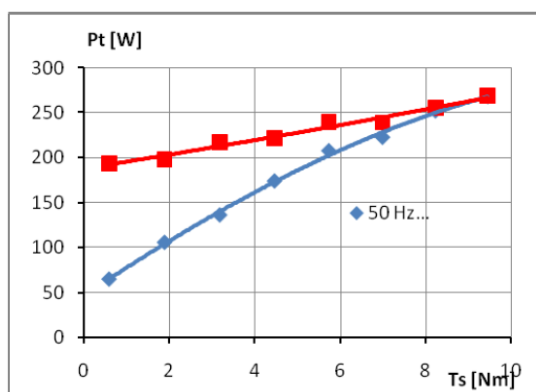
Charakterystyki sprawności położone są coraz wyżej w miarę wzrostu częstotliwości w związku ze zwiększeniem prędkości obrotowej silnika i zmniejszeniem relacji strat do mocy wydawanej na wale, rys.8. Przy pracy optymalnej następuje spłaszczenie charakterystyk w zakresie malejących obciążeń w związku z procesem minimalizacji strat.

Zjawisko to będzie można najlepiej zilustrować przez dokonanie porównania sprawności maszyny w warunkach pracy optymalnej η_{opt} oraz pracy przy znamionowych parametrach zasilania, tj. znamionowym napięciu i znamionowym prądzie wzbudzenia właściwym dla danej częstotliwości, rys.9.



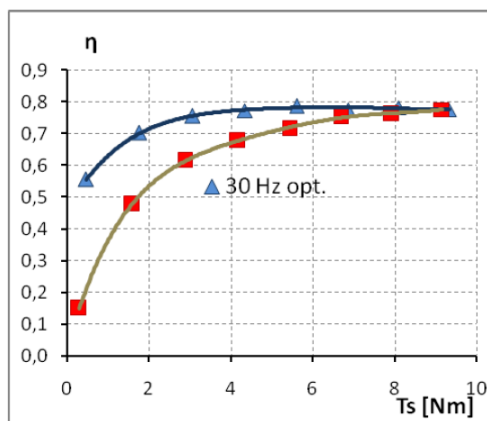
Rys.9. Porównanie sprawności silnika dla 50 Hz w warunkach pracy optymalnej (linia czarna) oraz przy zasilaniu parametrami znamionowymi (linia czerwona)

Jeszcze lepiej zilustrują to wykresy strat całkowitych silnika dla pracy optymalnej i dla zasilania parametrami znamionowymi, rys. 10. Wynika z nich występujące znaczne obniżanie się strat w zakresie zmniejszających się obciążeń co wpływa korzystnie na przebieg charakterystyki sprawności, rys.10.

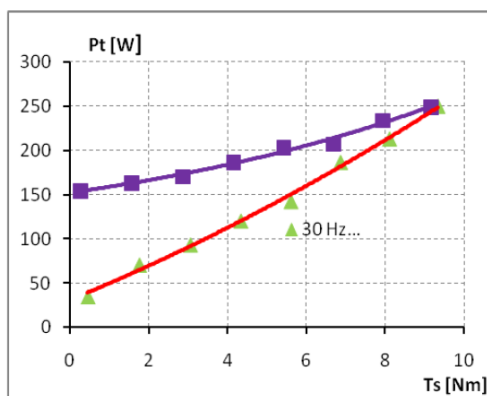


Rys.10. Porównanie strat całkowitych silnika dla 50 Hz w warunkach pracy optymalnej (linia niebieska) oraz przy zasilaniu parametrami znamionowymi (linia czerwona)

Podobnych porównań dokonano dla częstotliwości 30 Hz. Na rys.11 przedstawiono charakterystyki sprawności, a na rys. 12 wykresy strat całkowitych dla obu przypadków pracy. Dla tej częstotliwości obniżenie strat całkowitych następuje w mniejszym stopniu niż dla częstotliwości 50 Hz ze względu na zależność niektórych składników strat od częstotliwości, np. strat w rdzeniu.



Rys.11. Porównanie sprawności silnika dla 30 Hz w warunkach pracy optymalnej (linia czarna) oraz przy zasilaniu parametrami znamionowymi (linia czerwona)



Rys.12. Porównanie strat całkowitych silnika dla 30 Hz w warunkach pracy optymalnej (linia czerwona) oraz przy zasilaniu parametrami znamionowymi (linia niebieska)

Wnioski

Istotnym aspektem pracy jest przedstawienie metody pomiarowej przeznaczonej do wyznaczania optymalnych parametrów zasilania konwencjonalnego silnika synchronicznego z użyciem miernika parametrów sieci, którego użycie radykalnie zmniejsza liczbę niezbędnych i uciążliwych pomiarów. Jej zastosowanie pozwoliło na zbadanie pracy optymalnej silnika dla wybranych częstotliwości i potwierdziło jej przydatność do badania maszyn z wirnikiem cylindryczny oraz z wirnikiem o biegunach wydających. Należy podkreślić, że zaproponowana metoda może znaleźć zastosowanie w laboratoriach dydaktycznych w celu umożliwienia zapoznania studentów z możliwością minimalizacji strat w silniku synchronicznym pracującym przy zmiennych obciążeniach.

Analiza przeprowadzonych badań wykonanych na modelu silnika synchronicznego prowadzi do następujących wniosków:

1. Wyznaczone na podstawie pomiarów charakterystyki optymalnych parametrów zasilania mogą być wykorzystane do opracowania sterowania optymalnego silnikiem synchronicznym.
2. Przedstawione charakterystyki zbiorcze optymalnych prądów wzbudzenia wskazują na możliwość zastąpienia ich jedną wspólną charakterystyką, która pozwoli na uproszczenie opracowania sterowania.
3. Współczynnik mocy w warunkach pracy optymalnej przybiera relatywnie duże wartości i zmienia swoją wartość nieznacznie co pozwala na uznanie jego wartości za stałą. Wartości współczynnika mocy leżą

poniżej $\cos\varphi = 1$ co wskazuje, że silnik w warunkach pracy optymalnej pracuje przy pewnym niedowzbudzeniu.

4. Zaprezentowane wykresy sprawności i strat całkowitych w warunkach pracy optymalnej oraz przy zasilaniu silnika parametrami znamionowymi wskazują na potencjalne możliwości oszczędności na stratach mocy i podniesienia tym samym sprawności przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną.

Autor: dr hab. inż. Henryk Banach, Politechnika Lubelska, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: h.banach@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Guo, Q.; Zhang, Ch.; Li, L.; Wang, M.; Zhang, J.; Wang, T. Loss optimization control of permanent-magnet synchronous machines drive system for electric vehicles. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (2017), Conference Paper Publisher: IEEE
- [2] Jafari, S.H.; Corzine, K.A.; Huang, J. Efficiency optimization of a sensorless V/f control method for PMSM. *3rd IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED 2012)*, (2012) | Conference Paper | Publisher: IEEE
- [3] Betí, L.T.; Schäfer, U. Loss minimization algorithm of an IPMSM based on analytical expressions. *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, (2014) Conference Paper | Publisher: IEEE
- [4] Zhang, Ch.; Guo, Q.; Li, L.; Wang, M.; Wang, T. System Efficiency Improvement for Electric Vehicles Adopting a Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive System. *Energies* (2017), 10(12), 2030
- [5] Mademlis, C.; Kioskeridis, I.; Margaris, N. Optimal efficiency control strategy for interior permanent-magnet synchronous motor drives, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (2004) Volume: 19, Issue: 4 | Journal Article | Publisher: IEEE, 715 – 725
- [6] Chai, W.; Lipo, A.T.; Kwon, B. Design and Optimization of a Novel Wound Field Synchronous Machine for Torque Performance Enhancement, *Energies* (2018), 11(8), 2111
- [7] Mademlis, C.; Xypteras, J.; N. Margaris, N. Loss minimization in wound-field cylindrical rotor synchronous motor drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, (1998) Volume: 13, Issue: 2, 288 – 296
- [8] Mademlis, C.; Xypteras, J.; Margaris, N. Loss minimisation in synchronous motors, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, (1995) Volume: 1
- [9] Mademlis, C.; Xypteras, J.; Margaris, N. Magnetic and thermal performance of a synchronous motor under loss minimization control, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (2000) Volume: 15, Issue: 2
- [10] Tang, J.; Liu, Y.: Comparison of copper loss minimization and field current minimization for Electrically Excited Synchronous Motor in mild hybrid drives, (2017) *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*
- [11] Banach H.: Minimalizacja strat mocy w trójfazowym synchronicznym silniku reluktancyjnym, *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, 94/2012, wyd. BOBRME Komel, 139-143