

Optymizacja sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji

Krzysztof Pieńkowski

1. Wstęp

Silniki indukcyjne klatkowe są powszechnie stosowane w przemysłowych układach napędowych. Jest to spowodowane prostotą ich konstrukcji, wysoką niezawodnością działania, niskimi kosztami produkcji i wieloma innymi czynnikami. Szeroki zakres zastosowań silników indukcyjnych klatkowych powoduje, że zużycie energii elektrycznej przez silniki tego typu jest szacowane na około 60–70% całkowitej wytwarzanej energii elektrycznej. Z tych względów od wielu lat podejmowane są działania mające na celu zapewnienie pracy tych silników przy wysokich wartościach sprawności, a przez to zmniejszenie kosztów eksploatacji silników.

Stąd ważnym zagadnieniem eksploatacyjnym przemysłowych układów napędowych z silnikami indukcyjnymi jest dążenie do zapewnienia minimalizacji strat mocy silnika w szerokim zakresie zmian obciążenia mechanicznego silników. Takiego rodzaju optymalizacja jest w szczególności możliwa w stosowanych obecnie przekształtnikowych układach regulacji prędkości kątowej silników indukcyjnych z zastosowaniem mikroprocesorowych układów sterowania.

Sprawność układu napędowego jest złożoną funkcją zależną od parametrów i wielkości elektromagnetycznych silnika napędowego, układu i parametrów przekształtnika energoelektronicznego oraz zastosowanego algorytmu sterowania i modulacji przekształtnika.

W typowych stanach pracy silnika indukcyjnego w I strefie regulacji prędkości kątowej silnik jest sterowany przy utrzymywaniu stałej znamionowej wartości modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika lub stojana silnika. Takie sterowanie zapewnia dobre właściwości

Streszczenie: W artykule przedstawiono algorytmy optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego, czyli minimalizacji strat mocy silnika indukcyjnego. Rozpatrywane algorytmy optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego należą do nowoczesnych algorytmów sztucznej inteligencji. Zagadnienia optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego mają duże znaczenie w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, które pracują często przy zmiennych obciążeniach, mniejszych od znamionowych. Jest to powodem nieoptymalnej pracy silnika przy wartości sprawności mniejszych od znamionowej. W artykule omówiono ogólne strategie sterowania silnika indukcyjnego klatkowego zapewniające optymalizację sprawności silnika indukcyjnego: sterowanie z optymalizacją wartości wybranej wielkości elektromagnetycznej, sterowanie oparte na modelu strat mocy silnika, sterowanie poszukiwawcze oraz sterowanie hybrydowe, stano-

wiące połączenie kilku strategii sterowania. Dla realizacji tych strategii optymalizacji sprawności silnika zastosowano metody sztucznej inteligencji. W artykule przedstawiono następujące metody sztucznej inteligencji: metody sterowania rozmytego, metody sztucznych sieci neuronowych, algorytmy genetyczne i metodę roju cząstek. Omówiono zasady działania i właściwości poszczególnych algorytmów sztucznej inteligencji w zastosowaniach do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego. Dla poszczególnych opisywanych algorytmów sztucznej inteligencji przedstawiono przekształtnikowe układy sterowania polowo zorientowanego silnika indukcyjnego, zapewniające realizację optymalizacji sprawności silnika podczas eksploatacji układu napędowego.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny klatkowy, optymalizacja sprawności silnika, metody sztucznej inteligencji

EFFICIENCY OPTIMIZATION OF INDUCTION MOTOR WITH APPLICATION OF ALGORITHMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract: In the paper, the optimization algorithms of induction motor efficiency, that is the minimization of power losses of induction motor is presented. The considered optimization algorithms of induction motor efficiency can be classified as the modern algorithms from the group of artificial intelligence. The problems of improvement of induction motor efficiency is very important in electrical drive systems, that are often operated with the mechanical loads lower than nominal load. This is the reason of non-optimal operation of induction motor with the efficiencies considerably lower than rated efficiency. In the article, the general control strategies used for optimization of induction motor efficiency are presented and discussed: the Simple State Control, the Loss Model Control, the Search Control and the methods of

hybrid control, that are combinations of several basic strategies. For the realization of these control strategies for efficiency optimization, the control methods of artificial intelligence have been implemented: the Fuzzy Control, the Artificial Neural Network, the Genetic Algorithms and the Particle Swarm Optimization. The principles of operation and the properties of individual methods of artificial intelligence, applied for induction motor efficiency, have been discussed. The field-oriented control systems of induction motor, with control blocks used for realization of individual control methods of artificial intelligence are presented.

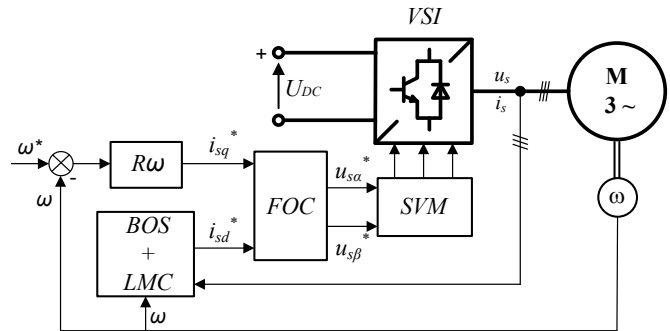
Keywords: squirrel-cage induction motor, optimization of motor efficiency, methods of artificial intelligence

dynamiczne układu napędowego, ale nie jest korzystne pod względem energetycznym w stanach pracy silnika przy zmiennych wartościach obciążenia mechanicznego. W literaturze wykazano, że warunkiem pracy silnika przy maksymalnej wartości sprawności jest zachowanie równości wartości stałych i zmiennych strat mocy silnika [1, 2]. Do strat stałych zaliczane są straty w żelazie i straty mechaniczne, do strat zmiennych należą straty obciążeniowe. Utrzymywanie znamionowej wartości strumienia magnetycznego przy obciążeniach mechanicznych silnika mniejszych od znamionowego powoduje niekorzystne warunki pracy silnika, w których straty magnetyczne silnika mogą być znacznie większe od strat w miedzi silnika. Jest to przyczyną niepożądanego zmniejszenia sprawności silnika indukcyjnego. Utrzymywanie wysokiej sprawności silnika indukcyjnego przy obciążeniach mechanicznych mniejszych od znamionowego można uzyskać przez odpowiednie zmniejszanie strumienia magnetycznego w funkcji obciążenia mechanicznego silnika, czyli przez odpowiednie sterowanie strumieniem magnetycznym silnika [1–11].

2. Strategie minimalizacji strat mocy silnika indukcyjnego

Strategie minimalizacji strat mocy silnika indukcyjnego są rozwijane od kilkudziesięciu lat. W zależności od rodzaju algorytmu wykorzystywanego w tych strategiach wyróżnia się następujące metody sterowania [1, 2, 8, 10]:

1. Sterowanie z optymalizacją wartości wybranej wielkości elektromagnetycznej silnika – *SSC (Simple State Control)*. W tej metodzie zapewnienie optymalnej sprawności silnika jest realizowane przez sterowanie wartości skutecznej napięcia stojana przy zachowaniu odpowiedniej wartości wielkości elektromagnetycznej: maksymalnej wartości współczynnika mocy silnika, minimalnego poboru mocy elektrycznej lub zadawanego optymalnego poślizgu silnika.
2. Sterowanie oparte na modelu strat mocy silnika – *LMC (Loss Model Control)*. Ta metoda sterowania jest oparta na równaniach modelu matematycznego silnika indukcyjnego, opisujących analitycznie straty mocy silnika. Na podstawie tych równań w blokach obliczeniowych układu sterowania wyznaczone są wartości zadane odpowiednich wielkości elektromagnetycznych zapewniających zminimalizowanie strat mocy silnika.
3. Sterowanie poszukiwawcze – *SC (Search Control)*. Ta metoda sterowania jest oparta na wymuszaniu dyskretnych zmian strumienia magnetycznego silnika aż do uzyskania minimalnej wartości mocy czynnej pobieranej przez silnik lub minimalnej wartości skutecznej prądów stojana silnika.
4. Sterowanie hybrydowe oparte na wykorzystaniu zarówno metody sterowania opartej na modelu strat silnika, jak i metody sterowania poszukiwawczego – *LMC+SC*. Metoda sterowania polega na wstępnym wyznaczeniu metodą modelu strat *LMC* punktu pracy silnika zbliżonego do minimalnych strat mocy, a następnie dochodzenie do dokładnego punktu minimalnych strat mocy z zastosowaniem metody poszukiwawczej *SC*. Zaletą tego rodzaju strategii jest możliwość zwiększenia szybkości wyznaczania i dochodzenia do punktów pracy optymalnej silnika [11].



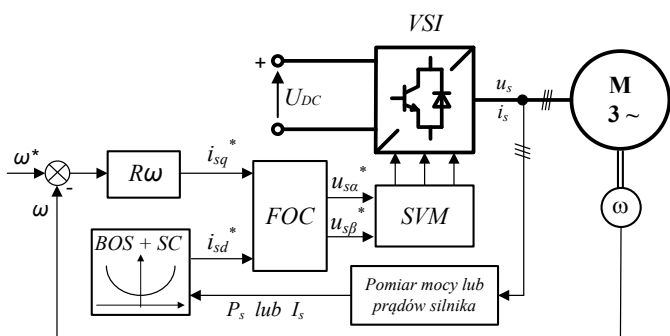
Rys. 1. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody modelu strat mocy LMC

W układach sterowania częstotliwościowego silników indukcyjnych przedstawione metody sterowania mogą być zaimplementowane w układach sterowania skalarnego oraz sterowania wektorowego z zastosowaniem metod sterowania polowo zorientowanego FOC i bezpośredniego sterowania momentem DTC.

Strukturę układu wektorowego sterowania polowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metody LMC przedstawiono na rys. 1.

W porównaniu z konwencjonalnym układem sterowania polowo zorientowanego silnika indukcyjnego, w tym układzie sterowania zastosowano specjalny blok BOS – *Blok Optymalizacji Sprawności Silnika*. W tym bloku zostały zaimplementowane moduły obliczeniowe strat mocy silnika. Blok BOS na podstawie sygnałów pomiarowych prędkości kątowej silnika i elektromagnetycznych zmiennych stanu silnika (napięć i prądów silnika) oraz algorytmu LMC dokonuje obliczeniowego wyznaczenia wartości zadanej składowej i_{sd}^* wektora prądu stojana silnika, odpowiedzialnej za sterowanie modułem wektora strumienia sprzężonego wirnika. Zaletą tej metody jest prostota algorytmu i duża szybkość działania. Istotną wadą metody jest konieczność znajomości wielu parametrów i wielkości elektromagnetycznych silnika oraz znajomość ich zmienności w funkcji obciążenia silnika.

Strukturę układu wektorowego sterowania polowo zorientowanego silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metody poszukiwawczej SC przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody poszukiwawczej SC

W porównaniu z konwencjonalnym układem sterowania połowo zorientowanego silnika indukcyjnego, w tym układzie sterowania zastosowano specjalny *Blok Optymalizacji Sprawności* silnika. Ten blok jest blokiem sterowania typu adaptacyjnego. Działanie tego bloku polega na wymuszaniu dyskretnych zmian wartości zadanej składowej i_{sd} wektora prądu stojana silnika, czyli zmian modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika. Jednocześnie na podstawie pomiarów poszukiwana jest wartość strumienia wirnika, przy której uzyskiwana jest minimalna wartość pobieranej mocy czynnej silnika lub wartość skuteczna prądów fazowych stojana silnika. Osiągnięcie tego stanu oznacza, że układ napędowy został doprowadzony do optymalnego punktu pracy przy minimalnych stratach mocy, czyli przy maksymalnej sprawności.

Zaletą metody poszukiwawczej SC jest prostota implementacji oraz brak konieczności znajomości parametrów i wielkości elektromagnetycznych silnika. Istotną wadą metody jest bardzo wolne działanie procedury wyznaczania punktów optymalnej pracy silnika i oscylacje wielkości elektromagnetycznych silnika, spowodowane wymuszeniami dyskretnych zmian strumienia magnetycznego silnika.

3. Metody sztucznej inteligencji w zastosowaniach minimalizacji strat mocy silnika indukcyjnego

Obecnie w metodach minimalizacji strat mocy silnika indukcyjnego coraz częściej są stosowane metody sztucznej inteligencji AI (*Artificial Intelligence*).

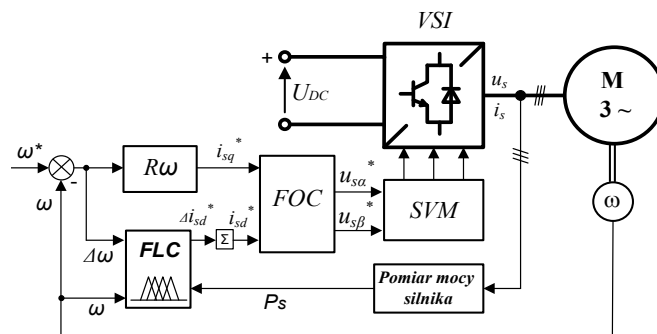
Metody AI są zalecane w tych zastosowaniach, w których podejmowanie decyzji zachodzi w warunkach braku wszystkich danych potrzebnych do przeprowadzenia obliczeń lub gdy liczba kombinacji zmiennych jest na tyle duża, że uzyskanie wymaganych wyników byłoby zbyt czasochłonne. Z wymienionych względów metody AI są wykorzystywane do usprawnienia algorytmów metod minimalizacji strat mocy w silnikach indukcyjnych. Do podstawowych metod sztucznej inteligencji stosowanych do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego należą [3–9]:

- metody sterowania rozmytego;
- metody sztucznych sieci neuronowych;
- algorytmy genetyczne i ewolucyjne;
- metoda roju cząstek;
- metody hybrydowe – odpowiednie kombinacje powyższych metod.

4. Sterowanie rozmyte z optymalizacją sprawności silnika

Systemy sterowania rozmytego FLC (*Fuzzy Logic Control*) są to układy, w których sygnały sterowania są otrzymywane na podstawie przetwarzania informacji zapisanych za pomocą zbioru reguł rozmytych i w oparciu o zasady wnioskowania rozmytego. Algorytmy sterowania rozmytego mają przewagę nad konwencjonalnymi metodami sterowania w przypadku braku dokładnej znajomości modelu matematycznego obiektu sterowania.

Z wymienionych względów algorytmy sterowania rozmytego mogą być stosowane do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody poszukiwawczej SC, w której



Rys. 3. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody sterowania rozmytego FLC

nie jest wymagana znajomość modelu matematycznego układu napędowego. Zastosowanie sterowania rozmytego do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego jest oparte na następujących zasadach [6, 7, 8, 9]. Najpierw dokonuje się fuzyfikacji zmiennych wejściowych na podstawie odpowiednich funkcji przynależności. Następnie dokonuje się oceny rozmytych reguł sterowania na podstawie tablic reguł i określone są wartości wyjść. W procesie defuzyfikacji wyznaczany jest wypadkowy wyjściowy sygnał sterowania.

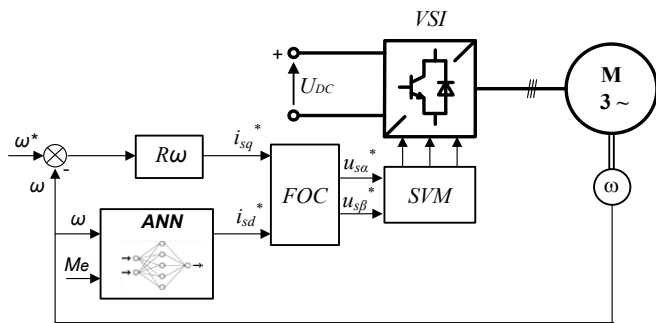
Schemat przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym z blokiem optymalizacji sprawności z zastosowaniem metod sterowania rozmytego przedstawiono na rys. 3.

W tym układzie do optymalizacji sprawności silnika zastosowano metodę sterowania poszukiwawczego z minimalizacją mocy czynnej pobieranej przez silnik indukcyjny. Zadaniem projektanta jest dobór odpowiednich funkcji przynależności dla zbiorów rozmytych, sformułowanie bazy reguł i przyjęcie zasady defuzyfikacji sygnału wyjściowego. Zastosowanie metody sterowania rozmytego FLC w bloku optymalizacji sprawności jest szczególnie korzystne z powodu złożonej zależności sprawności silnika od prędkości kątowej silnika, momentu obciążenia silnika oraz nieliniowych zmian parametrów elektromagnetycznych silnika

5. Optymalizacja sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych

Sztuczna sieć neuronowa ANN (*Artificial Neural Network*) jest to sieć złożona z odpowiednio połączonych z sobą neuronów, której zadaniem jest przetwarzanie sygnałów wejściowych w sygnały wyjściowe z zastosowaniem odpowiednich zależności funkcyjnych. Sieci ANN po odpowiednim wytrenowaniu mogą być wykorzystywane do rozwiązywania złożonych nieliniowych problemów z zastosowaniem zasad wzorowanych na pracy mózgu człowieka.

Schemat blokowy układu sterowania połowo zorientowanego z zastosowaniem sieci ANN do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego przedstawiono na rys. 4. W algorytmie optymalizacji sprawności silnika została wykorzystana metoda poszukiwawcza SC [3].



Rys. 4. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem sieci neuronowej ANN

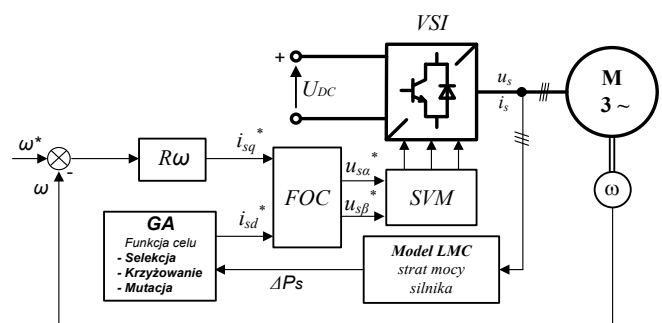
Zadaniem sieci ANN jest generowanie na wyjściu składowej zadanej i_{sd}^* wektora prądu stojana, odpowiedzialnej za wytwarzanie strumienia sprzężonego wirnika. Sygnałami wejściowymi dla sieci ANN są: prędkość kątowna wirnika i moment elektromagnetyczny silnika. Przy pracy silnika w zakresie obciążeń znamionowych sieć ANN generuje stałą wartość zadanej składowej i_{sd}^* , zapewniającą wytwarzanie znamionowej wartości strumienia wirnika. Przy pracy silnika przy obciążeniach mniejszych od znamionowego sieć ANN dokonuje kolejnych dyskretnych predykcji nastawień wartości zadanej składowej prądu stojana i_{sd}^* , aż do uzyskania warunku minimalizacji poboru mocy czynnej stojana lub wartości skutecznej prądów stojana.

6. Optymalizacja sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmów genetycznych

Algorytmy genetyczne – GA (*Genetic Algorithms*) są algorytmami poszukiwawczymi, wzorowanymi na obserwacjach i próbach naśladowania naturalnych procesów ewolucji i związanej z nią selekcji, występującej w populacjach żywych osobników w określonym otoczeniu.

W algorytmie genetycznym kandydaci do rozwiązania rozważanego problemu (osobnicy populacji) są kodowani jako łańcuchy liczb binarnych lub rzeczywistych. Dostosowanie (dobroć osobnika populacji) poszczególnego rozwiązania jest oceniana za pomocą funkcji przystosowania. Najlepiej dostosowane osobniki populacji są reprodukowane z wykorzystaniem operatorów genetycznych, jak krzyżowanie, mutacja – uzyskiwana jest wtedy populacja kandydatów do rozwiązania (nowa populacja osobników) lepiej dostosowanych do wymagań określanych funkcją przystosowania niż populacja poprzednia.

Schemat blokowy układu sterowania połowo zorientowanego z zastosowaniem algorytmu genetycznego GA do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem algorytmu genetycznego GA

W algorytmie optymalizacji sprawności silnika została wykorzystana metoda LMC – modelu strat mocy silnika. Procedura optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego GA polega na poszukiwaniu optymalnej wartości prądu magnesującego lub modułu wektora strumienia magnetycznego wirnika. Mechanizm genetyczny obejmuje procesy selekcji, krzyżowania i mutacji [4, 5].

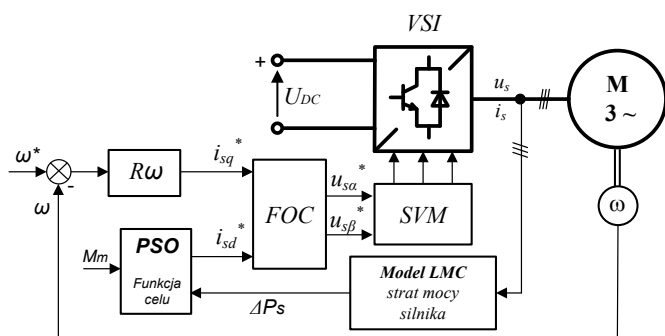
7. Optymalizacja sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody roju cząstek

Algorytm optymalizacji roju cząstek PSO (*Particle Swarm Optimization*) jest metodą optymalizacji wzorowanej na pracach natury oraz opartej na inteligencji zbiorowej, wzorowanej na przykładzie zachowania się stad ptaków lub ławic ryb.

Dla algorytmu PSO formułowana jest funkcja celu, dla której poszukiwane jest minimum funkcji celu. W algorytmie PSO przyjmuje się, że optymalizowany system charakteryzuje się zbiorem rozwiązań, z których każde jest nazywane cząstką roju. Cząstki roju mogą być interpretowane jako punkty poruszające się w wielowymiarowej przestrzeni. Współrzędnymi cząstek roju są aktualne wartości zmiennych rozpatrywanego procesu optymalizacji. W trakcie kolejnych kroków procedury optymalizacyjnej cząstki przemieszczają się, poszukując lepszego położenia, czyli takiego rozwiązania, dla którego wartość funkcji celu będzie mniejsza. W każdej iteracji algorytmu każda cząstka roju stara się dopasować swoje zachowanie do zachowania całego roju i do swojego zachowania w poprzednim kroku analizy. W każdej iteracji algorytmu ruch danej cząstki roju następuje w kierunku wektora będącego sumą dwóch wektorów kierunkowych z odpowiednimi wagami. Pierwszy z tych wektorów kierunkowych jest skierowany od aktualnego położenia cząstki do poprzedniego najlepszego położenia, nazywanego położeniem *pbest*. Drugi z tych wektorów kierunkowych jest

reklama

reklama



Rys. 6. Układ optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody roju cząstek PSO

skierowany od aktualnego położenia cząstki do najlepszego położenia określonego dla całego roju i nazywanego położeniem *gbest*.

Algorytm PSO jest szczególnie dogodny do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody modelu strat silnika LMC. W algorytmie PSO jako funkcja celu, która jest minimalizowana, przyjmowana jest funkcja całkowitych strat mocy silnika indukcyjnego [4, 5, 8].

Schemat blokowy układu sterowania połowo zorientowanego silnika indukcyjnego z zastosowaniem strategii PSO do optymalizacji sprawności silnika przedstawiono na rys. 6.

W algorytmie optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody PSO przyjęto, że położenia cząstek roju są reprezentowane przez kolejne wartości zadane modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika ψ_r . Przy zastosowaniu przyjętej funkcji celu (funkcja całkowitych strat mocy silnika) prowadzone są kolejne iteracje algorytmu aż do uzyskania najlepszego położenia *pbest* każdej i-tej cząstki ψ_{ri} oraz najlepszego położenia *gbest* całego roju ψ_r .

8. Podsumowanie


Optymalizacja sprawności silnika indukcyjnego, czyli minimalizacja strat mocy silnika, jest ważnym zagadnieniem, ponieważ zapewnia możliwość zmniejszenia kosztów eksploatacji układu napędowego. Celowe jest rozwijanie nowoczesnych metod optymalizacji sprawności silnika, opartych na metodach sztucznej inteligencji. Metody sztucznej inteligencji charakteryzują się dużą dokładnością działania, brakiem wrażliwości na nieliniowe zmiany parametrów elektromagnetycznych silnika oraz poprawnym działaniem przy braku znajomości wybranych parametrów i wielkości elektromagnetycznych silnika. Metody sztucznej inteligencji do optymalizacji sprawności silnika indukcyjnego mogą być powiązane z nowoczesnymi przekształtnikowymi metodami sterowania częstotliwościowego prędkości kątowej układów napędowych z silnikami indukcyjnymi.

Literatura

- [1] ABRAHAMSEN F.: *Energy Optimal Control of Induction Motor Drives*. Ph.D. Thesis, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, 2000.
- [2] BANACH H.: *Minimalizacja strat mocy w indukcyjnych silnikach trójfazowych pracujących ze zmiennym obciążeniem*. Monografie, Politechnika Lubelska, 2013.
- [3] MINO-AGUILAR G., MORENO-EGUILAZ J.M., PRYMAKT B., PERACAULA J.: *A Neural Network Based Optimal Rotor Flux Estimator for Efficiency Optimization of an Induction Motor Drive*. Proc. of ISIE'2006, Montreal, Quebec, Canada 2006.
- [4] WAHEEDA BEEVI M., SUKESH KUMAR A., SIBIN H.S.: *Optimal operation of induction motors using artificial neural network based on particle swarm optimization (PSO)*. Proc. of Int. Conf. Green Technologies (ICGT), Trivandrum, India 2012.
- [5] HAMID H.A., AMIN M.A., ADEL S.A., EL-GAMMAL A.A.: *New technique for maximum efficiency of induction motors based on Particle Swarm Optimization (PSO)*. Proc. of ISIE'2006, Montreal, Quebec, Canada 2006.
- [6] SPIEGELA R.J., TURNER M.W., MCCORMICK V.E.: *Fuzzy-logic-based controllers for efficiency optimization of inverter-fed induction motor drives*. „Fuzzy Sets and Systems” 137/2003.
- [7] GILBERTO C.D. SOUSA, BIMAL K. BOSE, JOHN G. CLELAND: *Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drive*. IEEE Trans. on Ind. Electron., V. 42, No. 2, 1995.
- [8] RANJITH KUMAR K., SAKTHIBALA D., PALANISWAMI S.: *Efficiency Optimization of Induction Motor Drive using Soft Computing Techniques*. „Int. Journal of Computer Applications” 1/2010.
- [9] ARCHANA D., KALYANI K., PRASAD B.S.: *Efficiency Optimization Control of Induction Motor Using Fuzzy Logic*. Int. Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), V. 2, Iss. 3, 2012.
- [10] BAZZI A.M., KREIN P.T.: *Review of Methods for Real-Time Loss Minimization in Induction Machines*. IEEE Trans. on Ind. Appl., V. 46, No. 6, 2010.
- [11] TA C.-M., HORI Y.: *Convergence Improvement of Efficiency-Optimization Control of Induction Motor Drives*. IEEE Trans. on Ind. Appl., V. 37, No. 6, 2001.

Informacje dodatkowe

Praca została zrealizowana w ramach badań statutowych – Projekt nr 0401/0097/17.

 Krzysztof Pieńkowski, dr hab. inż., prof. PWR, Politechnika

Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,
e-mail: krzysztof.pienkowski@pwr.edu.pl

artykuł recenzowany