

Barbara Kulesz, Andrzej Sikora, Adam Zielonka
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE ALGORYTMU POPULACYJNEGO DO POPRAWY ODDZIAŁYWANIA NA SIEĆ UKŁADÓW PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH STOSOWANYCH W TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ

APPLICATION OF POPULATION BASED ALGORITHM FOR IMPROVING THE IMPACT OF CONVERTER DEVICES USED IN ELECTRIC TRACTION ON POWER NETWORK

Streszczenie: Procedury optymalizacyjne są obecnie standardowo wykorzystywane w projektowaniu transformatorów, jak również do pewnych szczegółowych zagadnień związanych z konstrukcją i eksploatacją transformatorów. W artykule podano krótki przegląd najczęściej używanych procedur wraz z możliwościami ich zastosowania. Zaprezentowano również konkretny przykład zastosowania algorytmu z grupy populacyjnych (ACO-Ant Colony Optimization). Rozważano układ przetwarzania energii z transformatorem wielofazowym i prostownikami diodowymi, stosowany często w trakcji elektrycznej tramwajowej w Polsce. W układzie takim, przy zasilaniu transformatora napięciem odkształconym, rośnie pulsacja napięcia wyprostowanego i pojawiają się dodatkowe harmoniczne tego napięcia. Idea poprawy pulsacji bazuje na zastosowaniu podobciążeniowego przełącznika zaczepów na jednym z wtórnych uzwojeń transformatora dla ustawienia pewnego balansu napięć obu uzwojeń wtórnych. Do obliczenia nastawy przełącznika w konkretnych warunkach zasilania użyto algorytmu mrówkowego. Zaprezentowano porównanie spektrum harmonicznych w napięciu wyprostowanym i prądzie zasilania transformatora dla kilku różnych kształtów napięcia zasilania.

Abstract: Optimization procedures are nowadays a standard approach in overall transformer design, they also may be utilized for some detailed issues related to construction and operation of transformers. An overview of most useful procedures together with examples of their use is given in the paper. Example of application of particle swarm optimization algorithm, namely Ant Colony Optimization is presented. We have discussed energy transformation circuit containing multi-phase transformer and diode rectifiers; this circuit is often used in tram traction substation in Poland. In this circuit, when supply voltage is distorted, pulsation of dc (rectified) voltage is increased and additional voltage higher harmonics start to appear. The concept of improving (i.e. lessening) pulsation in dc voltage is based upon used of on-load tap changer applied to one of transformer's secondary windings in order to adjust voltage unbalance of secondary delta and wye windings. To calculate settings of tap changer under specified supply conditions we used ACO algorithm. Comparison of harmonic spectra in dc voltage and supply current for several different supply voltage waveforms is given.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, transformator prostownikowy, nierównowaga napięć, optymalizacja, algorytmy populacyjne, napięcie odkształcone

Keywords: electric traction, rectifier transformer, voltage unbalance, optimization, population-based algorithms, distorted voltage

1. Metody optymalizacyjne w inżynierii elektrycznej

Transformatory są urządzeniami elektrycznymi, bez których nie może się obejść cały system wytwarzania i dystrybucji energii. Na świecie odnotowuje się stały wzrost popytu na transformatory dużych mocy, wartość światowego rynku określa się w zależności od źródła danych na od 17 do 31 mld dolarów. Roczny wzrost szacuje się na ok. 8% rocznie w regionie Azji i Pacyfiku.

Konkurencja między wytwórcami jest ogromna i m.in. dlatego jednym z podstawowych zagadnień jest koszt wytworzenia transformatora.

Dawniej projekt transformatora był problemem, którego rozwiązanie z jednej strony opierało się o pewne zależności matematyczne (wynikające z teorii obwodów i pola oraz zależności poznane empirycznie), a z drugiej o doświadczenie projektanta. Tego typu metodologia nie była w stanie w znakomitej większości przy-

padków dać rozwiązania globalnie optymalnego. Dzięki niesamowitemu postępowi w mocach obliczeniowych komputerów, pracochłonne analityczne ręczne obliczenia należą już do przeszłości. W tej chwili komputer jest w stanie w ciągu dosłownie sekund wygenerować wiele różnych propozycji projektowych – różniących się wartościami parametrów, takich jak np. wymiary rdzenia, wartość indukcji w rdzeniu, gęstość prądu w uzwojeniach, materiał blach elektrotechnicznych itd.

Podobne problemy stoją zresztą przed wytwórcami innych urządzeń i praktycznie wszędzie wdraża się procedury optymalizacyjne po to, by podwyższyć wolumen produkcji, poprawić jakość i niezawodność procesu produkcyjnego. Dodatkowym czynnikiem jest rosnąca presja na rozsądne wykorzystywanie zasobów naturalnych planety.

Główne zagadnienie w projektowaniu transformatorów to [1] tzw. TDO (Transformer Design Optimization) – optymalizacja konstrukcji mająca na celu: zminimalizowanie kosztu wytwarzania i zminimalizowanie kosztu cyklu życia (eksploatacji – LCC).

W TDO funkcja celu to minimalizacja kosztów. Koszty wytwarzania obejmują m.in. koszty materiałów, pracy i narzuty. Koszty eksploatacyjne (Total Owning Cost – TOC) to koszt inwestycyjny (zakupu urządzenia) i koszty strat energii w ciągu całego okresu eksploatacji. Koszty takie są rzecz jasna uzależnione od wielu zmiennych w czasie czynników. Natomiast narzucone warunki to przykładowo odpowiednie parametry znamionowe transformatora, sprawność, możliwości regulacji napięcia, dopuszczalny wzrost temperatury, prąd jałowy. Liczba zmiennych, które trzeba brać pod uwagę wynosi aż 134 [1], w tym są zmienne ciągłe i dyskretne, wzajemnie uzależnione, zależności są zarówno liniowe i nieliniowe.

Generalnie chodzi o to, by skonstruować model obliczeniowy opisujący zachowanie mniej lub bardziej złożonego systemu fizycznego i znaleźć rozwiązanie optymalne w oparciu o pewne sformułowane kryteria, często rozbieżne lub sprzeczne (mogą dotyczyć pracy urządzenia czy też procesu projektowania). Jest to w gruncie rzeczy optymalizacja multikryterialna, prowadząca do uzyskania zbioru rozwiązań kompromisowych, ale w pewnym sensie optymalnych. Wybór najlepszego rozwiązania należy do konstruktora. Najczęściej poszukuje się pewnego

kompromisu między kosztem transformatora i parametrami eksploatacyjnymi.

Proces projektowania transformatorów różni się w zależności od przeznaczenia urządzenia, konstrukcji, znamionowej mocy i napięcia.

W procesach obliczeniowych używa się rozmaitych technik, które można podzielić z grubsza na 6 grup [2]:

- a) techniki numeryczne w szczególności oparte o FEM,
- b) techniki bazujące na schemacie zastępczym i pewnych zależnościach empirycznych dotyczących uzwojeń i rdzenia,
- c) metody analityczne opisujące pole elektromagnetyczne za pomocą rozbudowanych zależności matematycznych,
- d) metody stochastyczne, w tym sztucznej inteligencji AI (w szczególności GA),
- e) metody doświadczalne (wykorzystujące dane z metod obliczeniowych),
- f) metody hybrydowe.

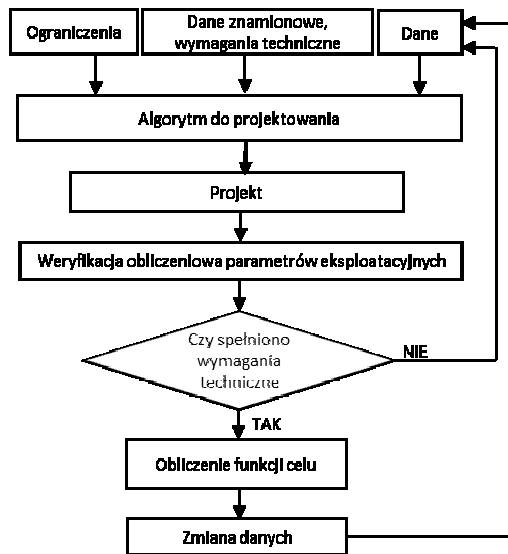
Różne zbiory metod użytecznych przy projektowaniu wraz z ich klasyfikacją można znaleźć w literaturze [1], [16].

W wielu przypadkach metody optymalizacyjne stosuje się do rozwiązania poszczególnych specyficznych problemów konstrukcji transformatora [3] czy dopasowania się do pewnych narzuconych z góry ograniczeń, takich jak impedancja zwarcia, czy straty jałowe lub czynne [4].

Również projektowanie transformatorów przeznaczonych do współpracy z obwodami prądu stałego (transformatory prostownikowe) poddawane jest w tej chwili procedurom optymalizacyjnym. Przy konstrukcji tego typu transformatorów należy brać pod uwagę dodatkowe czynniki wynikające ze specyfiki ich pracy, choćby dodatkowe straty obciążeniowe generowane przez wyższe harmoniczne prądu uzwojeń. Przykłady optymalizacji całej konstrukcji takiego transformatora lub pewnych jej elementów, z wykorzystaniem technik GA i SA podane są np. w [5], [12-15].

Schemat ogólnej struktury procesu projektowego pokazany jest na rys. 1.

Obok algorytmów genetycznych modne są obecnie również algorytmy typu behawiorystycznego, odtwarzające zachowanie populacji rozmaitych zwierząt (gromad osobników zgrupowanych w stada, roje, klucze, ławice, watahy, kolonie itd.). Algorytmy oparte o inteligencję roju posiłkują się zachowaniem dużej grupy osobników (z ang. particle) jednego gatunku.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu projektowania

Technika Particle Swarm Optimization (PSO), opisana pierwszy raz w 1995r. [18], jest techniką optymalizacyjną: metodą prób i błędów parametry niepotrzebne w optymalizacji są eliminowane, co prowadzi do uproszczenia procedury i znaczącego zredukowania liczby zmienianych parametrów. Obszerny przegląd literatury poświęconej wykorzystaniu algorytmów populacyjnych w różnych dziedzinach nauki i techniki można znaleźć w [6]. Algorytmy takie są stosunkowo proste i łatwo można je zaadaptować do rozwiązywania różnych problemów; mogą być również dość łatwo kombinowane z innymi metodami obliczeniowymi. Jednym z takich algorytmów jest algorytm mrówkowy.

2. Ogólne przedstawienie algorytmu mrówkowego

Po raz pierwszy zachowanie kolonii mrówek jako społeczności zbiorowej użyte zostało w procesie optymalizacyjnym przez Dorigo [7].



Rys. 2. Mrówki znoszące żywność do mrowiska (zdjęcie G.Fiedorowicz)

Dorigo zauważył kilka bardzo istotnych zachowań mrówek, które przełożył na algorytm służący do rozwiązania zagadnienia komiwojażera. Podejście to stało się inspiracją do innych zastosowań kolonii mrówek między innymi w procesie minimalizacji funkcjonału. Zastosowany tutaj algorytm mrówkowy został oparty na podejściu zaproponowanym przez Toksari'ego [8]. Zadanie polega na wyznaczeniu minimum funkcji, w przypadku której nie posiadamy żadnych informacji o jej własnościach, a jedynie potrafimy wyznaczyć jej wartości w wybranych punktach dziedziny:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) \rightarrow \min, \quad (1)$$

gdzie $(x_1, x_2, \dots, x_m) \in D \subset \mathbb{R}^m$

Początkowy etap, czyli inicjalizacja algorytmu polega na ustaleniu jego parametrów:

- liczebności populacji N ,
- maksymalna ilość iteracji I
- parametru sąsiedztwa α ; początkowo powinien być on "dosyć duży", około 60% długości zakresu zmiennych.

Przed rozpoczęciem procesu iteracyjnego należy:

- wygenerować w sposób losowy początkową populację N mrówek x^i , $i = 1, 2, \dots, N$, które rozmieszczone są w obszarze rozważanego zagadnienia $D \subset \mathbb{R}^m$
- określić wartość funkcji celu (intensywność śladu feromonowego) dla wszystkich N mrówek: $f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$, dla $i = 1, 2, \dots, N$.
- spośród całej populacji mrówek należy wybrać tę najlepiej położoną - o najmniejszej wartości funkcji celu x^{best} .

Zasadnicza część algorytmu:

1. W oparciu o najlepiej położoną mrówkę (x^{best}) tworzymy nową populację mrówek, które rozmieszczone są losowo w otoczeniu najlepiej położonej mrówki o najintensywniejszym śladzie feromonowym:

$$x^i = x^{\text{best}} + dx, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

gdzie $-\alpha \leq dx_j \leq \alpha$, $j = 1, 2, \dots, m$ jest wartością wybraną losowo.

2. Wybieramy najlepiej położoną mrówkę w nowej populacji - aktualizujemy x^{best} .
3. Punkty 1-2 powtarzamy I^2 razy.
4. Zawężamy parametr sąsiedztwa $\alpha = 0.1 \cdot \alpha$
5. Punkty 1-4 powtarzamy I -krotnie.

Uzyskany x^{best} traktowany jest jako rozwiązanie zadania. Należy zaznaczyć, że jest to algorytm metaheurystyczny, dlatego należałoby go wy-

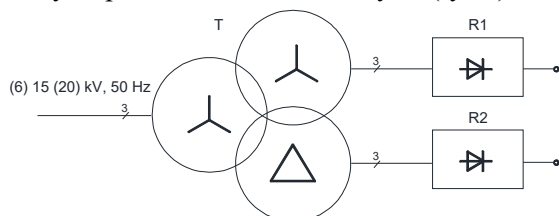
wołać więcej razy dla identycznych danych i jako rozwiązanie wybrać najlepszy uzyskany wynik.

Wykorzystanie ACO w procesie optymalizacji konstrukcji transformatora zaproponowano [9] czy [10]. Popularne jest również zastosowanie takich algorytmów do optymalizacji nastaw przesuwników fazowych [11].

Poniżej przedstawiamy prosty przykład zastosowania algorytmu ACO.

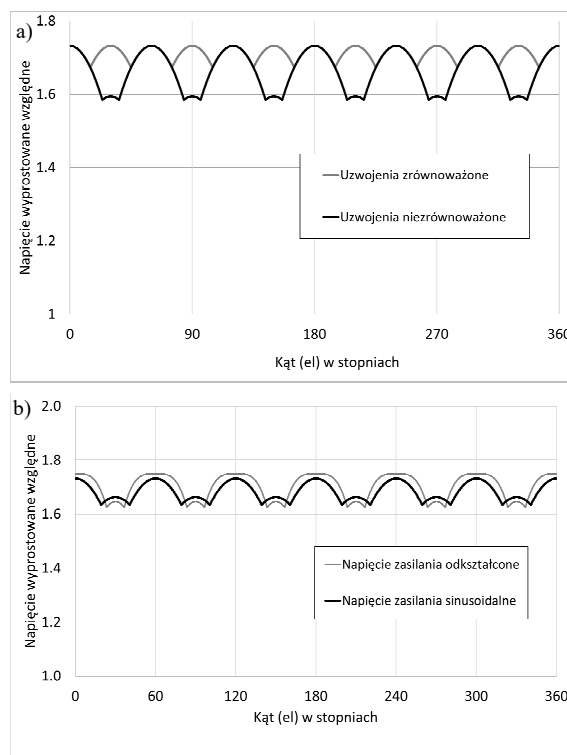
3. Przykład zastosowania algorytmu mrówkowego do poprawy parametrów napięcia wyprostowanego

Znane są choćby z systemów zasilania trakcji elektrycznej tramwajowej układy 6-fazowych, 3-uzwojeniowych transformatorów (układ połączeń uzwojeń Yyd) współpracujące z niesterowanymi prostownikami diodowymi (rys.3).



Rys.3. Transformator prostownikowy (T) o układzie połączeń Yyd zasilany z linii średniego napięcia, współpracujący z dwoma prostownikami diodowymi R1 i R2 [19]

Wyjściowe wyprostowane napięcie zawiera składowe zmienne, zależne od specyfiki układu przetwarzania. Zakładając, że napięcie zasilania transformatora jest symetryczne i sinusoidalne, pomijając komutację diod oraz zakładając równość napięć wtórnych obu uzwojeń transformatora, w napięciu wyprostowanym zaznacza się składowa o częstotliwości równej $12f$, gdzie f – częstotliwość sieci zasilającej transformator. Jeśli jednak napięcia uzwojeń wtórnych nie są zbalansowane (co wynika choćby z faktu, że liczby zwojów muszą być liczbami całkowitymi, a jednocześnie liczba zwojów uzwojenia połączonego w trójkąt powinna wynosić $\sqrt{3}$ liczby zwojów uzwojenia połączonego w gwiazdę), to w napięciu wyprostowanym wystąpią dodatkowe harmoniczne poza $v = 12$. Efekt ten będzie wzmocniony, jeżeli napięcie zasilania transformatora zostanie odkształcone. Przykład przebiegu napięcia wyprostowanego dla takich warunków zasilania pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Napięcie wyprostowane: a) uzwojenia wtórne zrównoważone (szara linia) i niezrównoważone (czarna linia), zasilanie sinusoidalne, b) uzwojenia wtórne niezrównoważone, zasilanie napięciem sinusoidalnym (czarna linia) i odkształconym (szara linia)

Występowanie harmonicznych w napięciu wyprostowanym przekłada się na obecność harmonicznych w prądzie zasilania transformatora zgodnie z zasadą $v \pm 1$, gdzie v – numer harmonicznej napięcia. Do poprawy zawartości harmonicznych w prądzie sieciowym prostownika 12-pulsowego można zastosować np. autotransformator połączony w zygzak, z dodatkowym obwodem prądowym po stronie dc (dławik z odczepami i przekształtnikiem energoelektronicznym), który wpływa na kształt prądu wyprostowanego, to z kolei poprawia kształt prądu zasilania [17].

Rozwiązanie proponowane przez nas to podobciążeniowy przełącznik odczepów dołączony do dowolnego z uzwojeń wtórnych transformatora. Doregulowanie napięcia jednego z uzwojeń, jeżeli napięcie zasilania transformatora jest odkształcone, powoduje poprawę pulsacji w napięciu wyprostowanym. Zagadnienie optymalizacyjne jest sformułowane następująco:

- funkcja celu to pulsacja napięcia dc p

$$p(k_a, k_b, k_c) = \frac{\max_{t \in [0, T]} U_0(t) - \min_{t \in [0, T]} U_0(t)}{U_{0AV}} \quad (3)$$

$$U_{0AV} = \frac{\max_{t \in [0, T]} U_0(t) + \min_{t \in [0, T]} U_0(t)}{2}$$

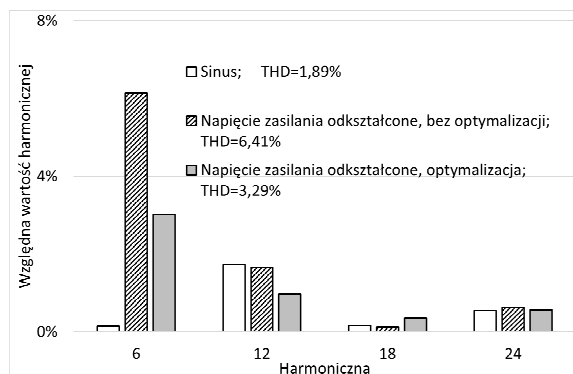
przy czym $U_0(t)$ to wartość napięcia dc w czasie, U_{0AV} to średnia wartość napięcia dc, $T=20$ ms,

– funkcja celu jest zależna od współczynników wzmocnienia k_a, k_b, k_c , które należało tak dobrać, aby uzyskać jak najmniejszą pulsację.

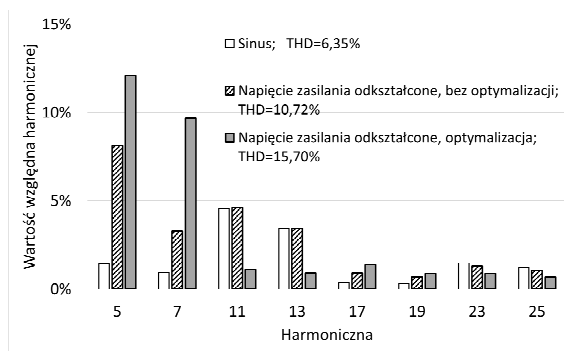
Optymalna wartość współczynnika wzmocnienia napięcia (odpowiadająca nastawie przełącznika zaczepów) pokrywa się z najlepszą pozycją mrówki w algorytmie. Znając współczynniki wzmocnienia można obliczyć nowy przebieg napięcia wyprostowanego i jego spektrum harmonicznym, podobnie jak spektrum harmonicznym w prądzie zasilania i tym samym zwerfikować działanie algorytmu.

4. Wyniki obliczeń

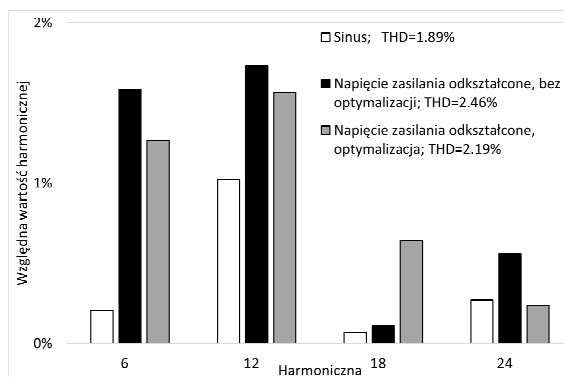
Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów napięcia zasilającego transformator prostownikowy i przy znamionowym obciążeniu transformatora. Wyniki obliczeń przed i po optymalizacji przedstawiono na rys. 5-8. Do obliczeń dobrano napięcie zasilania zawierające 5 i 7 harmoniczną, amplitudy podano w opisach rysunków, kąty fazowe na potrzeby obliczeń dobrano jako $\varphi_5=5^\circ, \varphi_7=110^\circ$. Dla innych wartości kątów wyniki będą inne, chodziło o pokazanie metodyki optymalizacji.



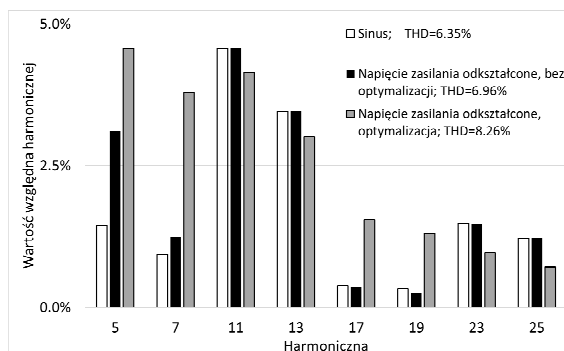
Rys.5. Fragment spektrum harmonicznym w napięciu dc dla dwóch opcji napięcia zasilania (sinusoidalne i odkształcone, $u_{5\%}=6\%, u_{7\%}=5\%, THD=7,81\%$) i po przeprowadzonej optymalizacji dla napięcia zasilającego odkształconego



Rys. 6. Fragment spektrum harmonicznym w prądzie zasilania dla dwóch opcji napięcia zasilania (sinusoidalne i odkształcone, $u_{5\%}=6\%, u_{7\%}=5\%, THD=7,81\%$) i po przeprowadzonej optymalizacji dla napięcia zasilającego odkształconego.



Rys. 7. Fragment spektrum harmonicznym w napięciu dc dla dwóch opcji napięcia zasilania (sinusoidalne i odkształcone, $u_{5\%}=1,5\%, u_{7\%}=1,25\%, THD=1,95\%$) i po przeprowadzonej optymalizacji dla napięcia zasilającego odkształconego



Rys. 8. Zawartość harmonicznym w prądzie zasilania dla dwóch opcji napięcia zasilania (sinusoidalne i odkształcone, $u_{5\%}=1,5\%, u_{7\%}=1,25\%, THD=1,95\%$) i po przeprowadzonej optymalizacji dla napięcia zasilającego odkształconego

5. Podsumowanie

Odształcone napięcie zasilania transformatora prostownikowego pracującego w układzie jak na rys. C powoduje pojawienie się dodatkowych harmonicznych składowej przemiennego napięcia wyprostowanego, przy czym zjawisko to jest dodatkowo pogłębione poprzez istniejącą nierównowagę napięć wtórnych transformatora. Zaproponowane doregulowywanie napięcia jednego z uzwojeń wtórnych za pomocą podobciążeniowego przełącznika zaczepów powoduje poprawę „jakości” napięcia wyprostowanego (zmniejszone THD i wartości względne poszczególnych istotnych harmonicznych). O ile zastosowana procedura wykorzystująca ACO i optymalizująca pulsację napięcia wyprostowanego daje pozytywne wyniki, o tyle w prądzie zasilania następuje pogorszenie THD. Jednocześnie optymalizacja przebiegów napięcia wyprostowanego i prądu zasilania wymagałaby zastosowania optymalizacji wielokryterialnej, gdzie funkcjami celu mogłyby być np. THD napięcia wyprostowanego i THD prądu zasilania. Będzie to przedmiotem dalszych badań.

6. Literatura

- [1]. P.S.Georgilakis, “Spotlight on Modern Transformer Design”, Springer-Verlag London, DOI 10.1007/978-1-84882-667-0, str. 219-261.
- [2]. E.I.Amoiralis, M.A.Tsili, A.G.Kladas, “Transformer Design and Optimization: A Literature Survey”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, Issue 4, Oct. 2009, p.1999-2024.
- [3]. J.Smolka, A. J. Nowak, “Shape Optimization of Coils and Cooling Ducts in Dry-Type Transformers Using Computational Fluid Dynamics and Genetic Algorithm”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.47, Issue 6, June 2011, p. 1726-1731.
- [4]. B.Baodong, X.Dexin, C. Jiefan, O.A.Mohammed, “Optimal Transposition Design of Transformer Windings by Genetic Algorithms”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, Issue 6, Nov.1995, p..3572-3574.
- [5]. A.Khatri, H. Malik, O.P. Rahi, “Optimal Design of Power Transformer Using Genetic Algorithm”, 2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, p.830-833.
- [6]. R.Poli, “Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation”, Journal of Artificial Evolution and Applications, Vol.2008, doi:10.1155/2008/685175.
- [7]. M.Dorigo “Optimization, Learning and Natural Algorithms” (w jęz. włoskim), rozprawa doktorska, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Milan (1992)
- [8]. M.D. Toksari, “Ant Colony Optimization for finding the global minimum”, Applied Mathematics and Computation, Vol. 176, Issue 1, May 2006, p. 308–316.
- [9]. E.I. Amoiralis, M.A. Tsili, P.S. Georgilakis, A. G. Kladas, “Ant Colony Solution to Optimal Transformer Sizing”, 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, p. 1-6.
- [10]. M. Fouzaï, T. Zouaghi, “Ant Colony Algorithm Applied to Power Transformer Optimization”, 2013 International Conference on Electrical Engineering and Software Applications, p. 1-5.
- [11]. R.Korab, R.Owczarek, M.Połomski, “Optymalizacja nastaw przesuwników fazowych z wykorzystaniem algorytmu roju cząstek”, Przegląd Elektrotechniczny, R.93, nr 3/2017, str.60-64.
- [12]. J.Du, Y.Feng, G.Wu, P.Li, Z.Mo, Optimal design for rectifier transformer using improved PSO algorithm”, 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), p. 828–831.
- [13]. J.Du, P.Li, G.Wu, H.Bai, J.Shen, “Improved PSO algorithm and its application in optimal design for rectifier transformer”, 2010 International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS), p. 605–608.
- [14]. W.Shurong, C.Duwu, Z.Hongfang, Y.Gang, “Optimization Design of Rectifier Transformer Coil Based on Genetic Algorithm”, The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference IPEMC 2004, p.549-552.
- [15]. X.Tao, S.H.Wang, Y.P.H.Fu, D.S.Yuan, S. Wang, “Optimal Design of Rectifier Transformer”, 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), p.376-377.
- [16]. E.I.Amoiralis, M.A.Tsili, A.G.Kladas, “Global transformer design optimization using deterministic and non-deterministic algorithms”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.50, Issue 1, 2014, p.383-394.
- [17]. V.Sheelvant, R.Kalpana, B.Singh, P.P.Saravana, “Improvement in Harmonic Reduction of a Zigzag Autoconnected Transformer Based 12-Pulse Diode Bridge Rectifier by Current Injection at DC Side”, IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 53, Issue: 6, Nov.-Dec. 2017), p.5634-5644
- [18]. R.Eberhart, J.Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory”. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995.
- [19]. A.Sikora, B.Kulesz, „Racjonalne przetwarzanie napięcia - czy budować układy 24-pulsowe?”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Komel BOBRME Nr 2/2014, Katowice 2014, str. 29-34.