

SYNTEZA UKŁADU STEROWANIA PROSUMENCKIEGO ŹRÓDŁA NAPIĘCIA W SIECI ROZDZIELCZEJ

Wstęp

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych dotyczących syntezy sterowania prosumenckimi źródłami energii, minimalizującego przesyłowe straty mocy w systemie elektroenergetycznym. Przyczyną podjęcia tej tematyki jest dynamiczny wzrost mocy i ilości OZE zainstalowanych u odbiorców prosumenckich. Prowadzi on do zbliżenia punktów wytwórczych energii elektrycznej do jej odbiorców, co generalnie zmniejsza obciążenie sieci rozdzielczych. Jednakże, w przypadku nieskonsumowania całości wytworzonej energii przez prosumenta, dochodzi do sytuacji, w której jej nadmiar jest wydawany do sieci rozdzielczej, końcowo podłączonej do krajowego systemu elektroenergetycznego przez transformator trójfazowy. Wydawana typowo w jednej fazie przez prosumenta energia na ogół nie trafia do innych odbiorców jednofazowych danej sieci rozdzielczej, lecz *via* transformator jest wydawana do sieci SN, na ogół w tej samej fazie. Jednocześnie odbiorcy jednofazowi podłączeni do innych faz sieci nn pobierają energię z sieci SN przez pozostałe fazy transformatora. Taka sytuacja generuje niepotrzebne straty mocy w linii SN, transformatorze rozdzielczym i sieci nn. Należy też zauważyć, że zainstalowana automatyka zabezpieczeniowa i sterująca transformatorów rozdzielczych często jest niedostosowana do przepływu mocy od strony nn do strony SN transformatora [1, 2].

Przedmiotem badań był układ modelowy, składający się z trójfazowego transformatora rozdzielczego o zmieniających skojarzeniach uzwojeń obu stron, współpracującego ze sterowanym źródłem sinusoidalnego napięcia jednofazowego w jednej fazie strony nn i odbiorami R / RL w dwóch pozostałych fazach, przy znamionowym zasilaniu strony SN. Badania przeprowadzono w celu:

1. określenia właściwego skojarzenia transformatora rozdzielczego, gwarantującego możliwość przepływu mocy czynnej od prosumenta do odbiorów podłączonych do sieci rozdzielczej nn, przy zachowaniu symetrii fazowych i przewodowych napięć transformatora,
2. określenia takiego sterowania amplitudy i fazy napięcia źródła zasilającego jedną fazę strony nn transformatora, aby moc ta nie była wydawana do sieci SN, lecz w całości była konsumowana przez odbiory w pozostałych fazach strony nn.

Spełnienie obu tych warunków minimalizuje straty mocy w transformatorze i straty przesyłowe w sieci SN.

Problem współpracy transformatora trójfazowego z odbiorami niesymetrycznymi i/lub nieliniowymi jest znany w literaturze [3, 4, 5, 6]. Rozpatrywany jest jednak głównie w kontekście niesymetrycznych lub nieliniowych obciążeń transformatora zasilanego symetrycznie lub niesymetrycznie. Na ogół głównym celem tych rozważań jest określenie strat mocy w transformatorze, przepływów mocy czynnej i bierniej oraz przebiegów czasowych prądów transformatora [7].

Problem sterowania inwerterami jednofazowych OZE pojawia się głównie w kontekście ich współpracy z siecią jedno- lub trójfazową [8] lub w kontekście integracji wielu jednofazowych OZE i sterowania przy-

plywem mocy od nich do jednofazowych odbiorów i magazynów energii elektrycznej (baterii akumulatorów) [9]. W takich sytuacjach często znajdują zastosowanie wielouzwojeniowe transformatory jednofazowe, do których uzwojeń podłączone są jednofazowe źródła, odbiory i magazyny energii elektrycznej [10]. Często stosuje się w takich sytuacjach częstotliwości znacznie wyższe od sieciowych 50/60 Hz [8, 9], korzystając z tego, że wszystkie źródła, odbiory i magazyny energii podłączone są do uzwojeń transformatora przez jednofazowe inwertery. Sterowanie inwerterów odbiorów jednofazowych współpracujących z siecią trójfazową pojawia się w literaturze również w kontekście likwidacji niesymetrii prądów i napięć fazowych sieci trójfazowej, powodowanych przez jednofazowość tych odbiorów [11]. W [12] poruszono problem doboru skojarzeń uzwojeń transformatora trójfazowego do pracy na odbiory nieliniowe, pod kątem minimalizacji strat mocy w transformatorze. Cechą wspólną wymienionych powyżej opracowań jest rozważanie transformatorów jednofazowych (dwo- lub wielouzwojeniowych) lub transformatorów trójfazowych złożonych z jednostek jednofazowych.

Problem odpowiedniego sterowania inwertera OZE koresponduje z publikacjami [13, 14, 15], poświęconymi tematowi stabilności pracy sieci nn i odpowiedniego w tym kontekście sterowania inwerterów OZE. Rozwiązania tych problemów są silnie uzależnione od impedancji sieci nn, a więc również od impedancji zwarciowej transformatora łączącego sieć nn z siecią SN. W [13] zaproponowano takie sterowanie inwerterów, które minimalizuje oscylacje prądu, napięcia i mocy w sieci nn z jednofazowymi OZE.

Wyznaczenie skojarzenia uzwojeń transformatora

Obliczenia symulacyjne wykonywano przez rozwiązywanie równań symbolicznych stanu ustalonego liniowego modelu transformatora trójfazowego z trójkolumnowym rdzeniem, dla różnych skojarzeń obu stron transformatora. Przyjęto model magnetycznie liniowy, tj. ze stałymi indukcyjnościami, ponieważ nieliniowość magnesowania rdzenia nie wpływa na rozptył prądów i mocy w transformatorze trójfazowym zasilanym napięciem znamionowym [16, 17]. Pominięto straty mocy w rdzeniu transformatora, jako relatywnie niewielkie i praktycznie stałe we wszystkich badanych sytuacjach, z uwagi na znamionowe napięcie zasilające transformator. Do numerycznego rozwiązywania równań wykorzystano pakiet MATLAB. Użyto danych transformatora rozdzielczego suchego: $S_N = 630$ kVA, $U_{1N} = 15$ kV, $U_{2N} = 400$ V, Dyn5, $I_{1N} = 24,5$ A, $I_{2N} = 910$ A, $f_N = 50$ Hz. Znamionowe straty mocy w uzwojeniach, tj. znamionowe straty obciążeniowe wynoszą $\Delta P_{CuN} = 7600$ W.

Wyniki obliczeń zawiera tabela 1. Wyniki te dotyczą sytuacji pracy ustalonej transformatora na odbiory rezystancyjne o wartości równej znamionowej impedancji transformatora ($R_L = U_{2Nphase} / I_{2Nphase}$) w fazach B, C strony nn transformatora i zasilaniu fazy A strony nn napięciem sinusoidalnym o amplitudzie zapewniającej znamionowy prąd i moc tej fazy: $U_{2A} = 1,04 \cdot U_{2Nphase}$. Strona SN jest zasilona napięciem znamionowym. Regulowany kąt fazowy napięcia U_{2A} odmierzany jest względem napięcia fazy A strony SN. Przez moc ujemną w tabeli 1 rozumie się moc wydawaną przez transformator do sieci zasilającej stronę SN lub dostarczaną do transformatora ze źródła napięcia podłączonego do fazy A strony nn. Przez moc dodatnią rozumie się moc pobieraną przez transformator od strony SN lub pobieraną z transformatora przez odbiory podłączone do faz B, C strony nn.

Tabela 1. Wyniki obliczeń transformatora SN/nn dla różnych skojarzeń uzwojeń. Wartości w nawiasach dotyczą tylko sytuacji połączenia strony SN w trójkąt i oznaczają fazowe moce czynne efektywnie wymieniane z siecią zasilającą, tj. obliczone z pominięciem składowej symetrycznej 0 prądów fazowych trójkąta.

Skojarzenie uzwojeń	I_{20} / I_{2N}	P_{2A} / S_N	P_{2B} / S_N	P_{2C} / S_N	P_2 / S_N	I_{10} / I_{1N}	P_{1A} / S_N	P_{1B} / S_N	P_{1C} / S_N	P_1 / S_N	$\Delta P_{Cu} / S_N$
Y_0Y_0	0,60	-0,28	0,30	0,30	0,32	0,60	-0,27	0,32	0,32	0,37	0,05
Yy_0	0,06	0,28	0,28	0,28	0,84	0	0,27	0,32	0,29	0,88	0,04
$Yy_0, U_{2A} = 1,2 \cdot U_{2Nphase}$ $\varphi_{2A} = -20^\circ$	0,30	-0,12	0,12	0,51	0,51	0	0,05	0,17	0,33	0,55	0,04
Dy_0	0,60	-0,28	0,30	0,30	0,32	0,60	-0,27 (-0,07)	0,32 (0,24)	0,32 (0,20)	0,37 (0,37)	0,05
Y_0z_0	0,68	-0,35	0,30	0,30	0,25	0	-0,04	0,02	0,32	0,30	0,05
Yz_0	0,68	-0,35	0,30	0,30	0,25	0	-0,04	0,02	0,32	0,30	0,05
Dz_0	0,68	-0,35	0,30	0,30	0,25	0	-0,04 (-0,04)	0,02 (0,02)	0,32 (0,32)	0,30 (0,30)	0,05

Wnioski z analizy wyników zaprezentowanych w tabeli 1 są następujące:

1. Transformator skojarzony Y_0Y_0 wydaje do sieci zasilającej moc czynną w fazie A strony SN, a pobiera w dwóch pozostałych. Praktycznie pracuje jak trzy oddzielne transformatory jednofazowe.
2. Transformator skojarzony Yy_0 pobiera mniej więcej taką samą moc czynną we wszystkich trzech fazach strony SN, co oznacza, że źródło napięcia podłączone do fazy A strony nn odbiera moc czynną. Po zmianie wartości amplitudy i fazy napięcia tego źródła na $U_{2A} = 1,2 \cdot U_{2Nphase}$, $\varphi_{2A} = -20^\circ$, transformator pracuje w sposób pożądaný, tj. moc czynna jest dostarczana do fazy A strony nn transformatora i odbierana przez odbiory podłączone do dwóch pozostałych faz. Jednakże odbywa się to kosztem istotnej dysymetryzacji napięć fazowych – napięcia fazowe transformatora wynoszą, kolejno dla faz A, B, C: 1,05, 0,73, 1,29 UNphase. Dlatego pojawia się istotna różnica pomiędzy mocą odbiorów fazy B (0,12) i fazy C (0,51), mimo ich identycznych impedancji.
3. W transformatorze skojarzonym Dy_0 większa część mocy dostarczanej do fazy A strony nn trafia do obciążeń w dwóch pozostałych fazach tej strony. Moc wydawana do sieci SN w fazie A jest w przybliżeniu zerowa (-0,07), a efektywny pobór mocy w fazach B, C jest obniżony (0,24 i 0,20 zamiast spodziewanych ok. 0,31 w każdej fazie). Jest to skutkiem pojawienia się prądu składowej zerowej wewnątrz trójkąta strony SN. Prąd ten przenosi moc czynną z fazy A do faz B i C, po czym moc ta jest transformowana z powrotem do odpowiednich faz strony nn. Całkowita moc pobierana z sieci SN wynosi dokładnie tyle samo, co przy skojarzeniu Y_0Y_0 (0,32), ale moce poszczególnych faz są mniejsze.
4. Dla transformatorów skojarzonych Y_0z_0 , Yz_0 , Dz_0 uzyskane wyniki są identyczne. Większa część mocy czynnej dostarczanej do fazy A strony nn trafia bezpośrednio do obciążeń w dwóch pozostałych fazach strony nn. Do sieci SN wydawana jest (w tej samej fazie strony SN) moc 0,04, a pobór mocy w fazie B wynosi tylko 0,02. Jest to skutkiem pojawienia się prądu składowej zerowej płynącego po stronie nn – transportuje on moc z zasilonej fazy A strony nn do faz obciążonych (praktycznie tylko do fazy B). Składowa 0 prądów nie pojawia się po stronie SN transformatorów Y_0z_0 , Dz_0 . Napięcia transformatora pozostają symetryczne, zarówno fazowe, jak i przewodowe. Straty mocy są takie, jak w innych połączeniach, mimo podwyższonej (w stosunku $2/\sqrt{3}$, tj. o 15,5%) rezystancji faz strony nn, z powodu większej liczby zwojów uzwojenia zygzakowego.

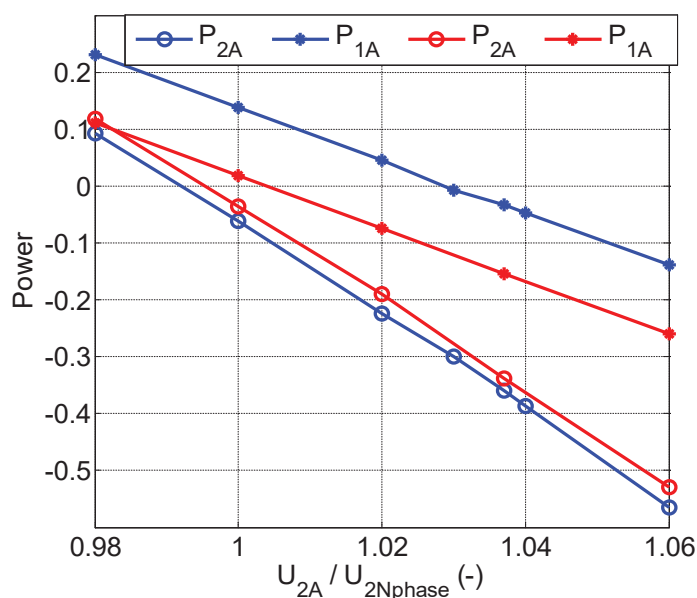
Podsumowując można stwierdzić, że za transport mocy czynnej z fazy zasilonej strony nn do faz obciążonych odpowiada składowa 0 prądów. Jednakże, przy połączeniu Y_0y_0 może ona wypłynąć do sieci zasilającej i dlatego moc czynna nie jest transportowana w pożądanym sposób, lecz wydawana do sieci SN. Przy połączeniu Yy_0 składowa 0 strony nn przenosi moc czynną pomiędzy fazami strony nn, ale kosztem istotnej desymetryzacji napięć fazowych transformatora. Przy połączeniu Dy_0 składowa zerowa prądów płynie po obu stronach transformatora, przy czym transport mocy czynnej zapewnia prąd składowej 0 płynący w trójkącie strony SN. Przy połączeniach Y_0z_0 , Yz_0 , Dz_0 składowa zerowa prądów zamyka się wyłącznie po stronie nn, co oznacza, że skojarzenie strony SN jest obojętne dla analizowanego przenoszenia mocy. Wnioski te są analogiczne do uzyskanych w [18].

Z analizowanych połączeń za najlepsze należy uznać połączenia Yz_0 i Dz_0 , ponieważ zapewniają one transport największej części mocy czynnej dostarczanej do fazy A strony nn transformatora, do odbiorów podłączonych do pozostałych faz strony nn. Jednocześnie połączenia te lepiej niż Dy_0 i znacznie lepiej niż Yy_0 utrzymują symetrię napięć fazowych i przewodowych transformatora.

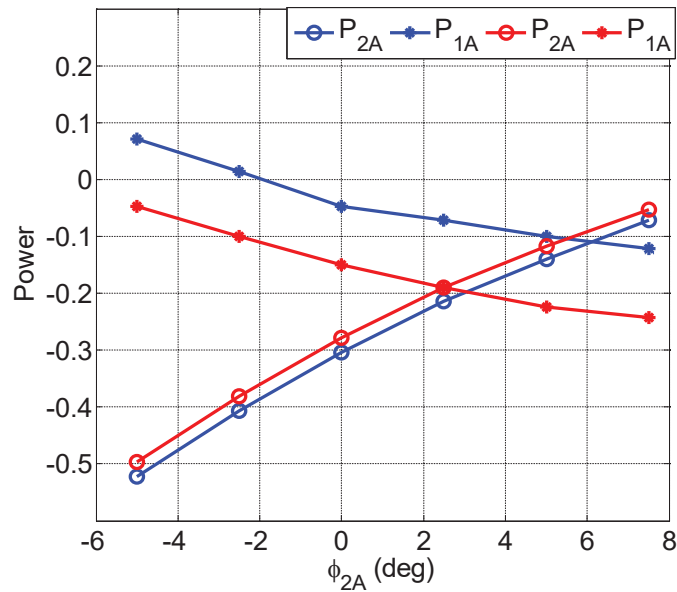
Sterowanie przepływem mocy w transformatorze

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń do dalszych symulacji przyjęto transformator skojarzony Yz_0 . Wielkościami sterującymi przepływem mocy są: wartość skuteczna oraz faza sinusoidalnego napięcia zasilającego fazę A strony nn. Wielkościami sterowanymi są: moc czynna P_{2A} dostarczana do fazy A strony nn (regulacja ma na celu utrzymanie zadanej stałej wartości tej mocy) i moc czynna P_{1A} fazy A strony SN (regulacja ma na celu utrzymanie nieujemnej jej wartości, czyli zablokowanie możliwości wydawania mocy czynnej do sieci SN przez fazę A transformatora).

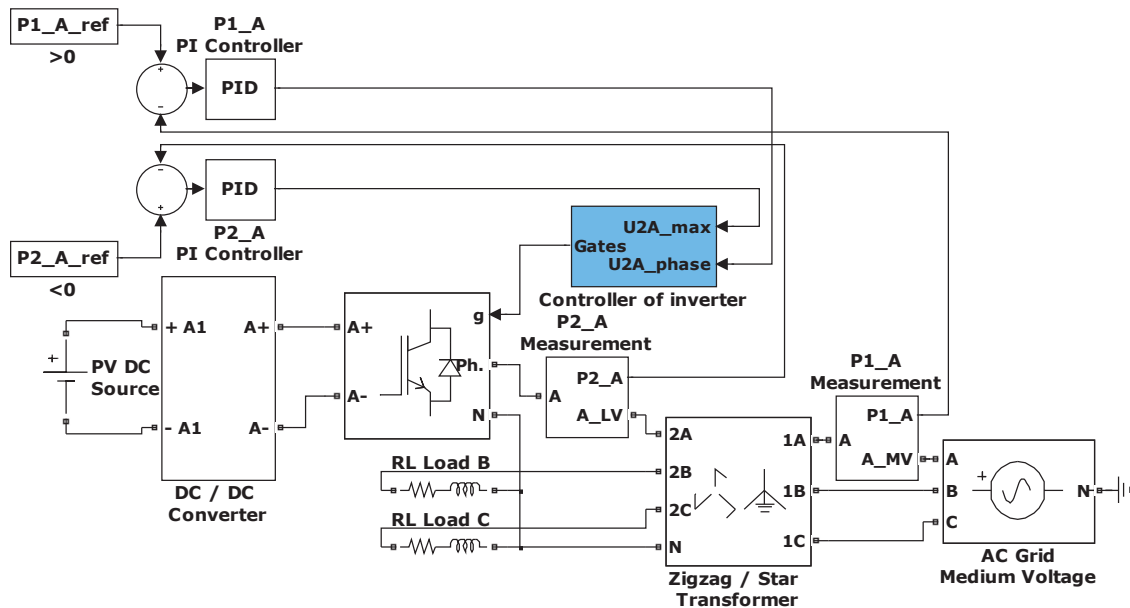
Zmienność obu tych mocy w funkcji wartości skutecznej sinusoidalnego napięcia zasilającego fazę A strony nn przedstawia rys. 1. Wynika z niego, że sterowanie obu mocy wartością skuteczną napięcia U_{2A} jest liniowe. Sterowanie fazowe tych mocy można uznać za w przybliżeniu liniowe – rys. 2. Na tej podstawie zdecydowano się na syntezę liniowego układu sterowania, opartego o dwa regulatory PI. Pierwszy z nich reguluje moc czynną P_{2A} za pomocą wartości skutecznej napięcia U_{2A} , drugi reguluje moc czynną P_{1A} za pomocą fazy tego napięcia – rys. 3.



Rys. 1. Sterowanie amplitudowe mocy P_{1A} i P_{2A} przy $\varphi_{2A} = 0$ (linia niebieska – obciążenie R, linia czerwona – obciążenie RL z $\cos\varphi = 0,8$)



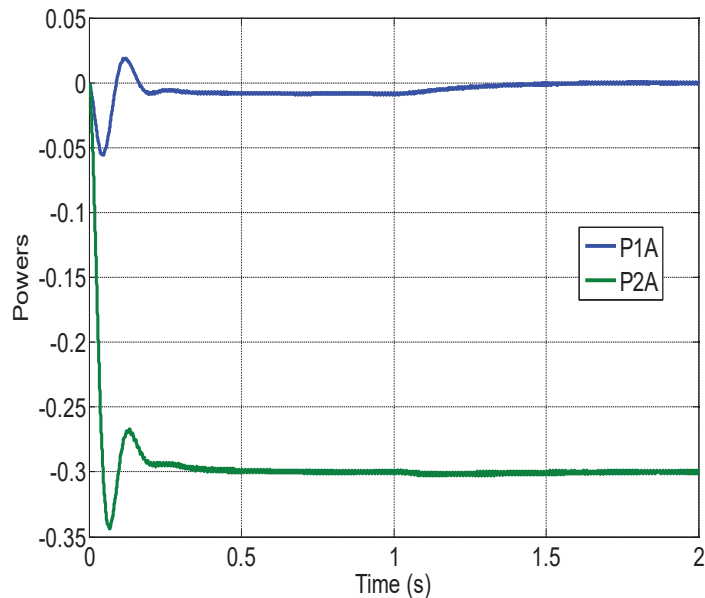
Rys. 2. Sterowanie fazowe mocy P_{1A} i P_{2A} przy $U_{2A} = 1,04 \cdot U_{2Nphase}$ (linia niebieska – obciążenie R, linia czerwona – RL z $\cos\varphi = 0,8$)



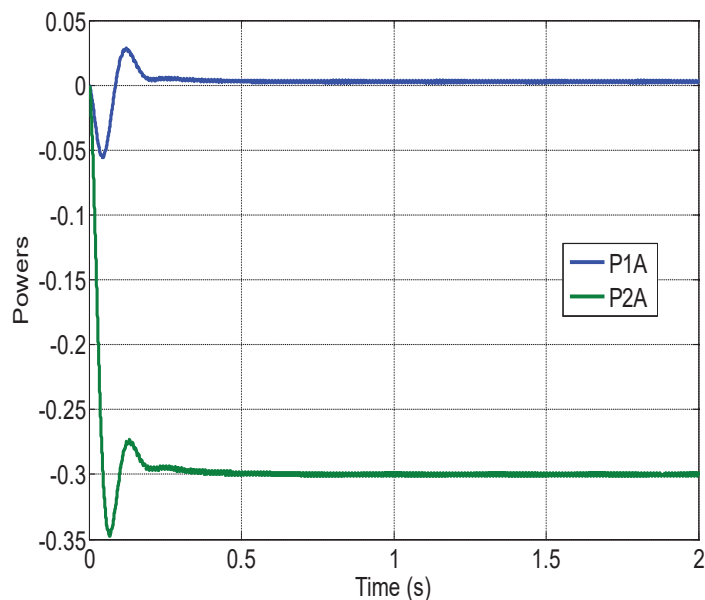
Rys. 3. Schemat układu automatycznej regulacji mocy P_{1A} i P_{2A} transformatora Yz_0

Przykładowe przebiegi dynamiczne procesu regulacji mocy P_{1A} i P_{2A} przedstawiają rys. 4 i 5, dla nastaw regulatora mocy P_{2A} : wzmacnienie $Kr = 0,0012 \text{ V}_{\text{max}}/\text{W}$, czas zdwojenia $Ti = 75 \text{ ms}$, oraz regulatora mocy P_{1A} : $Kr = 0,001 \text{ deg}/\text{W}$, $Ti = 75 \text{ ms}$. Przebiegi zaprezentowane na rys. 4 stanowią odpowiedź badanego układu na skok jednostkowy mocy referencyjnej $P_{2A} = 0,3 S_N$ w chwili czasowej $t = 0$ i skok mocy referencyjnej $P_{1A} = 0$ w chwili czasowej $t = 1 \text{ s}$. Jednoczesna regulacja obu mocy (skoki jednostkowe wartości referencyjnych

obu mocy j.w. w chwili czasowej $t = 0$) pokazana jest na rys. 5. Na obu rys. widoczna jest interakcja pomiędzy regulowanymi mocami. W praktyce eksploatacyjnej transformatora można ją uznać za akceptowalną, z uwagi na termiczną dopuszczalność widocznych wahań mocy i eksploatacyjnie akceptowalny czas ich trwania.



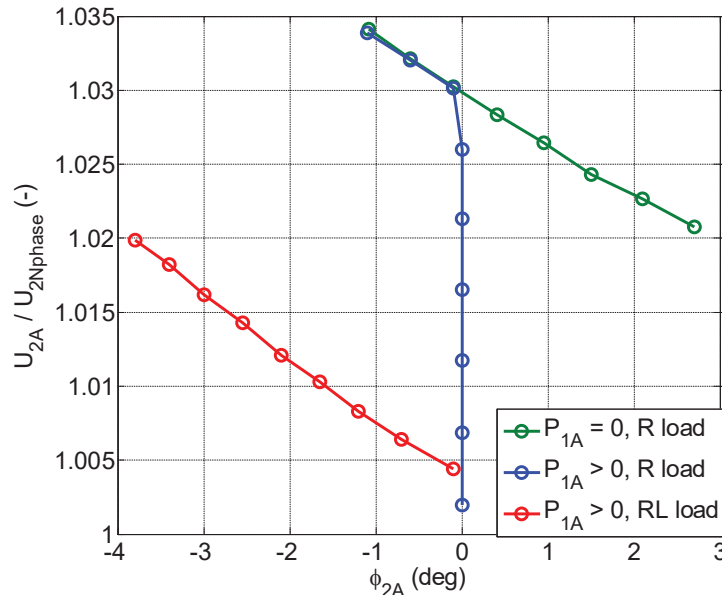
Rys. 4. Przebiegi czasowe obu regulowanych mocy, przy obciążeniu RL z $\cos\varphi = 0,8$



Rys. 5. Przebiegi obu regulowanych mocy w funkcji czasu, przy obciążeniu RL z $\cos\varphi = 0,8$

Rys. 6 przedstawia statyczne zależności wartości skutecznej napięcia U_{2A} od jego fazy, pochodzące z działania układu sterowania. Widoczne jest, że układ sterowania realizuje sterowanie po liniach prostych, ze zmianami wynikającymi z charakteru obciążeń (R vs. RL) i z dopuszczenia do poboru mocy czynnej przez fazę A strony SN ($P_{1A} > 0$). Negatywnie zwraca uwagę bardzo niewielka zmienność wartości napięcia steru-

jącego U_{2A} i również jego fazy. W praktyce może to spowodować konieczność szeregowego dołączenia do fazy A strony nn dodatkowego dławika, umożliwiającego zastosowanie większej wartościowo sterowania zarówno amplitudowego, jak i fazowego, łatwiejszego w realizacji.



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-fazowa sterowania (linia zielona: $P_{1A} = 0$, obciążenie R; linia niebieska: $P_{1A} \geq 0$, obciążenie R; linia czerwona: $P_{1A} \geq 0$, obciążenie RL z $\cos\varphi = 0,8$)

Wnioski końcowe

W pierwszej części artykułu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu skojarzenia uzwojeń trójfazowego transformatora rozdzielczego na przepływ mocy czynnej pomiędzy jego fazami, w sytuacji sinusoidalnego zasilania napięciowego jednej fazy strony nn, przy stronie SN zasilonej znamionowo. Podobnie jak w małym transformatorze trójfazowym, analizowanym w [18], ustalono, że moc czynna przenoszona jest pomiędzy fazami transformatora przez składową zerową prądów strony nn i strony SN. Za najlepsze skojarzenie strony nn transformatora uznano skojarzenie w zygzak, z uwagi na pojawiające się ograniczenie mocy czynnej wydawanej do sieci zasilającej stronę SN transformatora i utrzymywanie praktycznie stałych wartości skutecznych napięć fazowych transformatora. Przy tym skojarzeniu moc czynna przenoszona jest z zasilonej fazy strony nn do faz obciążonych przez składową zerową prądów strony nn. Ponieważ składowa ta nie transformuje się do strony SN transformatora, skojarzenie strony SN transformatora jest wówczas właściwie obojętne. Na podstawie tych wyników do dalszych badań przyjęto transformator skojarzony Yz_0 .

Podstawowym celem drugiej części badań było opracowanie układu sterowania, minimalizującego moc czynną wydawaną przez transformator do sieci zasilającej. Przy syntezie układu sterowania skupiono się na minimalizacji mocy wydawanej do sieci przez tę fazę strony SN transformatora, która odpowiada zasilonej fazie strony nn. Takie podejście przyjęto na podstawie obliczeń pilotażowych, które wykazały, że w przypadku wydawania mocy przez stronę SN transformatora Yz_0 , jej zdecydowana większość przypada na tę fazę, która jest fazą zasiloną od strony nn. Liniowy układ sterowania o pożądanych własnościach został opracowany i poddany badaniom symulacyjnym. Wykazały one jego poprawne działanie, zarówno w sensie statycznym, jak i dynamicznym. Układ sterowania minimalizuje moc czynną wydawaną do sieci przez fazę A strony SN, minimalizując w ten sposób straty mocy w transformatorze i straty przesyłowe

po stronie SN transformatora. Jednakże, stwierdzono jednocześnie pojawienie się w pewnych sytuacjach mocy czynnej wydawanej do sieci SN przez fazę B strony SN transformatora, niekontrolowaną przez układ sterowania. Nie jest również realizowana kontrola przepływu mocy biernych faz transformatora.

Dalsze badania powinny być ukierunkowane na opracowanie układu sterowania realizującego również kontrolę mocy czynnych wydawanych do sieci SN przez pozostałe fazy transformatora. Układ taki musi wykorzystywać trajektorie sterowania nieobecne na rys. 6. Należy zaznaczyć, że nie zostały przebadane żadne inne trajektorie niż te przedstawione na rys. 6. Na podstawie dotychczasowych badań nie można powiedzieć, jakim mocom czynnym i biernym faz transformatora odpowiadają punkty ćwierćpłaszczyzny przedstawionej na rys. 6, znajdujące się poza narysowanymi trajektoriami. Ustalenie tego wymaga dalszych badań. Możliwe jest, że wykorzystanie tych punktów pozwoli również na kontrolę mocy biernych faz.

Perspektywnym kierunkiem badań jest sterowanie wielu źródeł napięcia, podłączonych do różnych faz strony nn transformatora rozdzielczego, przez różnych prosumentów. Sterowanie takie musiałoby uwzględniać również rezultaty pracy [13]. Celem takiego sterowania byłoby również ograniczenie/wyeliminowanie wydawania mocy czynnej do sieci SN przez transformator rozdzielczy. Energia produkowana przez poszczególnych prosumentów niewątpliwie powinna być konsumowana w pierwszym rzędzie przez nich samych, a dodatkowo przez innych odbiorców włączonych do tej samej sieci nn, natomiast nie powinna być wydawana do sieci SN.

Bibliografia:

- [1] E.T. Jauch, *Maximizing Automatic Reverse Power Operations with LTC Transformers and Regulators*, IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa 2005, Durban 2005, s. 449–454.
- [2] A. Al-Riyami, K. Burt, G. Manhangwe, P. Pretlove, S. Georgiopoulos, *An Investigation into Alternatives to Directional Overcurrent Protection on Grid Transformers to Improve the Network Capacity to Accommodate Reverse Power Flow*, 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection, Copenhagen 2014, s. 1–6.
- [3] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, M. Ghofrani, *Mixed Derating of Distribution Transformers Under Unbalanced Supply Voltage and Nonlinear Load Conditions Using TSFEM*, "IEEE Transactions on Power Delivery" 2010, nr 25 (2), s. 780–789.
- [4] A.W. Kelley, S.W. Edwards, J.P. Rhode, M.E. Baran, *Transformer Derating for Harmonic Currents: A Wide-Band Measurement Approach for Energized Transformers*, "IEEE Transactions on Industry Applications" 1995, nr 35 (6), s. 1450–1457.
- [5] M.A.S. Masoum, P.S. Moses, A.S. Masoum, *Derating of Asymmetric Three-Phase Transformers Serving Unbalanced Nonlinear Loads*, "Transactions on Power Delivery" 2008, nr 23 (4), s. 2033–2041.
- [6] F. Aboura, S.A. Touhami, A.I. Zama, R. Tahmi, O. Touhami, K. Boughrara, *Dynamical Modeling and Analysis of Asymmetric Unbalanced Three-Phase Transformers*, 2015 Intl. Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl. Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl. Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION) 2015, s. 623–629.
- [7] A. Zecchino, M. Marinelli, Junjie Hu, M. Coppo, R. Turri, *Voltage Control for Unbalanced Low Voltage Grids Using a Decoupled-Phase On-Load Tap-Changer Transformer and Photovoltaic Inverters*, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Staffordshire 2015, s. 1–6.

- [8] M. Razmkhah, M. Reza Azizian, H.M. Kojabadi, *Photovoltaic Systems Based on Power Electronic Transformer with Maximum Power Tracking Capability*, 22nd Electrical Power Distribution Conference, Semnan 2017, s. 74–79.
- [9] R. Chattopadhyay, S. Bhattacharya, *Modular Isolated DC-DC Converter with Multi-Limb Transformer for Interfacing of Renewable Energy Sources*, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte 2015, s. 3039–3046.
- [10] S. Hazra, S. Bhattacharya, Ch. Chakraborty, *A Novel Control Principle for a High Frequency Transformer Based Multiport Converter for Integration of Renewable Energy Sources*, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna 2013, s. 7984–7989.
- [11] S. Ouyang, J. Liu, X. Wang, S. Song, X. Hou, *Comparison of Four Power Electronic Transformer Topologies on Unbalanced Load Correction Capacity*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal 2015, s. 3702–3709.
- [12] M.V. Athul, P.K. Preetha, P.S. Chandramohanan Nair, *Analysis of Star-Star Delta Utilized Transformer under Balanced and Unbalanced Load Conditions*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Dallas 2015, s. 1–6.
- [13] Z.-X. Zou, G. Buticchi, M. Liserre, *Analysis and Stabilization of a Smart Transformer-Fed Grid*, “IEEE Transactions on Industrial Electronics” 2017, nr PP (99), s. 1–1.
- [14] N. Bottrell, M. Prodanovic, T.C. Green, *Dynamic Stability of a Microgrid with an Active Load*, “IEEE Transactions on Power Electronics” 2013, nr 28 (11), s. 5107–5119.
- [15] A.A. Rockhill, M. Liserre, R. Teodorescu, P. Rodriguez, *Grid-Filter Design for a Multimegawatt Medium-Voltage Voltage-Source Inverter*, “IEEE Transactions on Industrial Electronics” 2011, nr 58 (4), s. 1205–1217.
- [16] Ch. Zhang, Y. Li, J. Li, Q. Yang, J. Zhu, *Measurement of Three-Dimensional Magnetic Properties with Feedback Control and Harmonic Compensation*, “IEEE Transactions on Industrial Electronics” 2017, nr 64 (3), s. 2476–2485.
- [17] Q. Tang, Z. Wang, P.I. Anderson, P. Jarman, A.J. Moses, *Approximation and Prediction of AC Magnetization Curves for Power Transformer Core Analysis*, “IEEE Transactions on Magnetics” 2015, nr 51 (5), s. 1–8.
- [18] T. Drabek, P. Dybowski, *Control of Prosumer Energy Sources in Power Grid Fed by Three-Phase Distribution Transformer*, 15th Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Zakopane 2019.