

Jarosław Tępiński

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy

AKTYWNY KOMPENSATOR MOCY BIERNEJ DLA ELEKTROWNI WODNEJ Z GENERATOREM INDUKCYJNYM

ACTIVE COMPENSATOR OF REACTIVE POWER FOR HYDROPOWER PLANT WITH AN INDUCTION GENERATOR

Streszczenie: Artykuł przedstawia zagadnienia kompensacji mocy biernej w małych elektrowniach wodnych z generatorem indukcyjnym (asynchronicznym). Omówiono kompensację kondensatorową oraz zaproponowano zastąpienie jej przekształtnikowym układem kompensacji mocy biernej przyłączonym równolegle do generatora indukcyjnego. Sterowanie aktywnym kompensatorem bazuje na metodzie zorientowanej napięciowo. W artykule przedstawiono i omówiono strukturę sterowania aktywnym kompensatorem oraz pokazano wyniki badań komputerowych. Badania laboratoryjne przeprowadzono na generatorze indukcyjnym o mocy 7,5kW. Przekształtnikowa kompensacja mocy biernej zapewnia utrzymanie współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ na zadanej wartości równej zero, co odpowiada całkowitej kompensacji mocy biernej.

Abstract: The paper presents a reactive power compensation for small hydropower plants with an induction (asynchronous) generator. Conventional compensation, related to capacitor bank application, is discussed. Instead capacitors, a three level power electronic converter connected in parallel to the induction generator can be used to provide reactive power compensation. A control of the power converter bases on voltage oriented method. In the paper, the control structure has been shown and described. Moreover, the simulation and laboratory results has been presented. The laboratory tests has been done on 7.5kW induction generator. The advantage of active compensation is that power factor $\text{tg}\varphi$ can be keep equals zero, it means that entire reactive power has been compensated by active compensator.

Słowa kluczowe: generator indukcyjny, kompensator aktywny, kompensacja mocy biernej

Keywords: induction generator, active compensator, reactive power compensation

1. Wstęp

Maszyny indukcyjne klatkowe ze względu na prostą konstrukcję, brak konieczności synchronizacji przy załączeniu do sieci elektroenergetycznej (SEE) oraz niską cenę znalazły szerokie zastosowanie, jako generatory w małych elektrowniach wodnych. Wzrost momentu napędowego, którego źródłem jest turbina wodna, na wale generatora powoduje zwiększenie bezwzględnej wartości poślizgu, czego konsekwencją jest wzrost mocy czynnej oddawanej do sieci elektroenergetycznej. Warunkiem pojawienia się siły elektromotorycznej na zaciskach generatora indukcyjnego jest wytworzenie w jego rdzeniu pola magnetycznego, którego głównym źródłem jest moc bierna pobierana z sieci.

Operatorzy sieci elektroenergetycznej stawiają przed elektrowniami wodnymi warunki gospodarowania energią bierną [1, 2, 3]. W tym celu określa się współczynnik mocy $\text{tg}\varphi$ (1) rozumiany jako stosunek mocy biernej Q pobieranej przez generator do mocy czynnej P przez niego oddawanej.

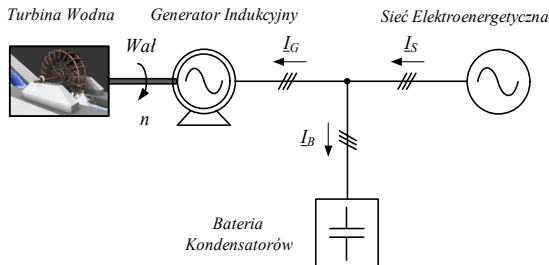
$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

Operatorzy sieci elektroenergetycznej wymagają kompensacji mocy biernej w małych elektrowniach wodnych do poziomu współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ mniejszego bądź równego 0,4.

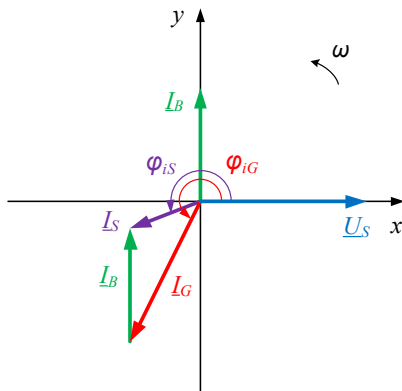
2. Pasywny kondensatorowy kompensator mocy biernej

Głównym sposobem kompensacji mocy biernej w elektrowniach wodnych jest zastosowanie baterii kondensatorów przyłączonych równolegle do generatora indukcyjnego (Rys. 1) [3, 4]. Zasadę kompensacji mocy biernej za pomocą pasywnego kondensatorowego kompensatora pokazano na Rys. 2. Pasywny kompensator jest źródłem mocy biernej pojemnościowej. Wektor przestrzenny \underline{I}_B prądu pobieranego przez baterię kondensatorów przesunięty jest względem wektora przestrzennego \underline{U}_S napięcia sieci o 90° . Wektor przestrzenny \underline{I}_B prądu baterii kondensatorów zmniejsza składową bierną (induk-

cyjną) i_{Sy} prądu pobieranego z sieci. Zastosowanie baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej powoduje zmianę przesunięcia fazowego między wektorem przestrzennym \underline{I}_S prądu sieci i wektorem przestrzennym \underline{U}_S napięcia sieci z φ_{iG} do φ_{iS} (Rys. 2).



Rys. 1. Układ wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym oraz pasywną kompensacją mocy biernej; \underline{I}_S – wektor przestrzenny prądu pobieranego z sieci, \underline{I}_G – wektor przestrzenny prądu pobieranego przez generator indukcyjny, \underline{I}_B – wektor przestrzenny prądu pobieranego przez baterię kondensatorów



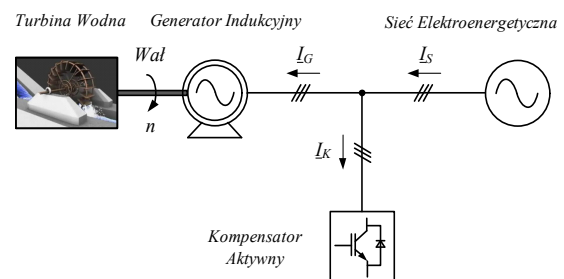
Rys. 2. Wykres wektorowy przedstawiający zasadę kompensacji mocy biernej za pomocą pasywnego kompensatora

Przy doborze kondensatorów do kompensacji mocy biernej należy pamiętać, że są one źródłem mocy biernej dla generatora indukcyjnego. Odłączenie generatora wraz z baterią kondensatorów od sieci elektroenergetycznej może spowodować samowzbudzenie generatora [3, 5], które cechuje się utrzymaniem napięcia na zaciskach generatora, pomimo jego odłączenia od sieci. Przyjmuje się, że bateria kondensatorów powinna posiadać pojemności zapewniające kompensację mocy biernej do poziomu $\text{tg}\varphi$ niewiele mniejszego niż 0,4. Dzięki czemu, spełniony jest warunek narzucony przez operatorów sieci a baterie kondensatorów nie powodują samowzbudzenia generatora dla stosowanych w małych elektrowniach wodnych

zabezpieczeń rozbiegowych i/lub częstotliwościowych. Stosowanie baterii kondensatorów jest tylko częściowym rozwiązaniem problemu kompensacji mocy biernej. Zgrubna kompensacja do poziomu $\text{tg}\varphi$ niewiele mniejszego niż 0,4 jest bardzo niekorzystna gdyż straty od mocy biernej są wydatne.

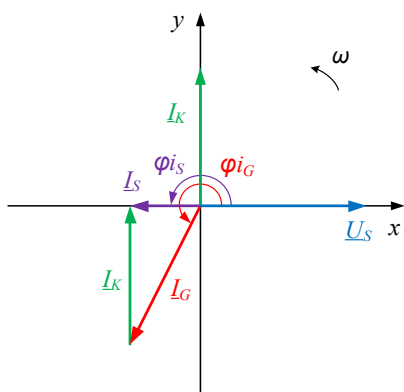
3. Aktywny przekształtnikowy kompensator mocy biernej

Do kompensacji mocy biernej pobieranej z sieci elektroenergetycznej przez generator indukcyjny można wykorzystać kompensator przekształtnikowy [3, 6, 7, 8, 9]. Główny cel stawiany przed kompensatorem przekształtnikowym to zmniejszenie współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ (1) do wartości równej zero oraz przeciwdziałanie zjawisku samowzbudzenia. Aktywną kompensację mocy biernej zrealizowano w topologii równoległej, w której przekształtnik kompensujący przyłączony jest równoległe do generatora indukcyjnego (Rys. 3).



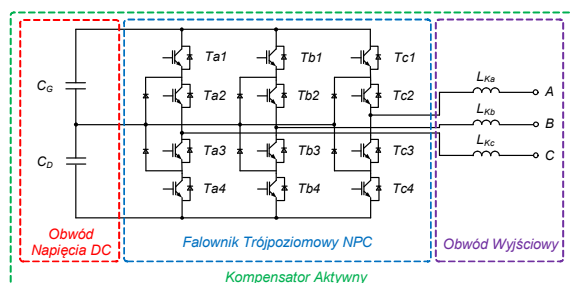
Rys. 3. Układ wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym oraz aktywną kompensacją mocy biernej; \underline{I}_K – wektor przestrzenny prądu pobieranego przez kompensator aktywny

Aktywny kompensator ma za zadanie wytworzyć i regulować moc tak, by była to moc bierna pojemnościowa. Wektor przestrzenny \underline{I}_K prądu kompensatora zmniejsza składową bierną (indukcyjną) i_{Sy} prądu pobieranego z sieci do wartości równej zero. Zasadę kompensacji mocy biernej za pomocą równoległego kompensatora aktywnego przedstawiono na Rys. 4. Zastosowanie kompensacji aktywnej, powoduje zmniejszenie przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem przestrzennym \underline{I}_S prądu sieci a wektorem przestrzennym \underline{U}_S napięcia sieci z wartości φ_{iG} do φ_{iS} równej 180° (Rys. 4). Wektor przestrzenny \underline{I}_S prądu sieci posiada jedynie składową czynną oddawaną do sieci elektroenergetycznej, co odpowiada całkowitej kompensacji mocy biernej.



Rys. 4. Wykres wektorowy przedstawiający zasadę kompensacji mocy biernej za pomocą aktywnego kompensatora

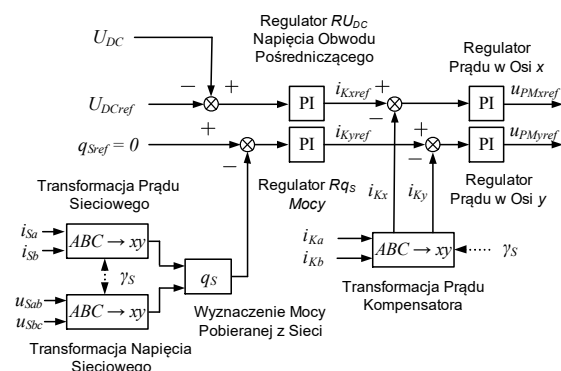
Aktywny kompensator mocy biernej (Rys. 5) składa się z przekształtnika energo-elektronicznego wykonanego w topologii trójpoziomowej z diodami poziomującymi połączonymi z punktem neutralnym (ang. Neutral Point Clamped - NPC), indukcyjnego obwodu wyjściowego oraz obwodu napięcia stałego. Trójpoziomowy przekształtnik NPC [9, 10, 11] w porównaniu z przekształtnikiem dwupoziomowym cechuje się niższą zawartością harmonicznych w napięciu wyjściowym, przy zastosowaniu takich samych obwodów wyjściowych.



Rys. 5. Trójpoziomowy przekształtnik NPC z obwodem napięcia stałego oraz indukcyjnym obwodem wyjściowym

Sterowanie aktywnym kompensatorem bazuje na metodzie zorientowanej napięciowo (ang. Voltage Oriented Control - VOC) [7, 8, 9, 12, 13]. W odróżnieniu od klasycznej metody zorientowanej napięciowo VOC wprowadzono w torze osi y, dodatkowy regulator R_{qs} . Na Rys. 6 przedstawiono układ sterowania aktywnym kompensatorem mocy biernej. Zadaniem pierwszego toru regulacji związanego z osią x jest regulacja mocy czynnej kompensatora. Regulator prądu w osi x utrzymuje składową czynną i_{Kx} prądu kompensatora na poziomie wartości zadanej przez nadrzędny regulator RU_{DC} napięcia

stałego obwodu pośredniczącego. Napięcie U_{DC} na dwóch kondensatorach obwodu pośredniczącego jest utrzymywane przez nadrzędny regulator RU_{DC} na zadanym poziomie (U_{DCref}). Za regulację mocy biernej pojemnościowej wytwarzanej przez przekształtnik odpowiada drugi tor sterowania związany z osią y. Regulator prądu w osi y utrzymuje składową bierną i_{Ky} prądu kompensatora na poziomie wartości wyjściowej nadrzędnego regulatora mocy. Regulator mocy R_{qs} ma za zadanie utrzymać moc bierną pobieraną z sieci (SEE) przez układ wytwarzania energii na poziomie zera. W układzie sterowania aktywnego kompensatora wykorzystano modulację zrealizowaną za pomocą wektora przestrzennego (ang. Space Vector Modulation - SVM) [9, 10, 11, 12].



Rys. 6. Układ sterowania aktywnego kompensatora

4. Badania komputerowego modelu symulacyjnego aktywnego kompensatora

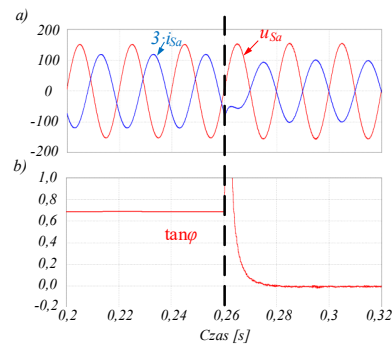
Badania symulacyjne przekształtnikowego kompensatora mocy przeprowadzono w oparciu o komputerowy model zbudowany z wykorzystaniem oprogramowania Powersim [14]. Układ sterowania aktywnego kompensatora oparty na metodzie zorientowanej napięciowo (VOC) został zrealizowany jako element biblioteki DLL. Główne parametry obwodu mocy i algorytmu sterowania przedstawiono w Tabeli 1. Wartości parametrów modelu generatora indukcyjnego dobrane zostały na podstawie parametrów maszyny indukcyjnej klatkowej o mocy 7,5kW zaprojektowanej na obniżone napięcie 3x220V. Generator indukcyjny o mocy pozornej 9,2kVA produkuje moc czynną na poziomie 7,5kW i pobiera 5,3kVar mocy biernej.

W komputerowym modelu symulacyjnym przebadano pracę kompensatora aktywnego, który kompensuje całą moc bierną pobieraną przez generator indukcyjny (5,3kVar).

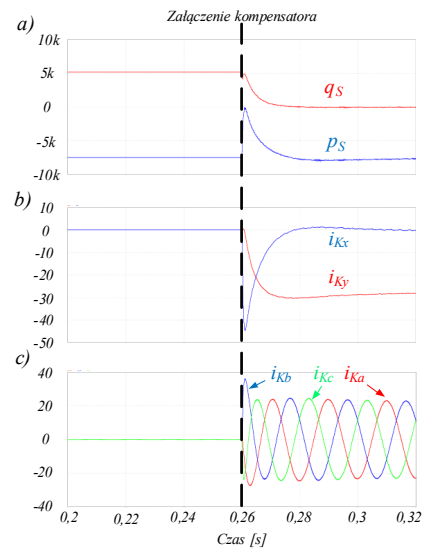
Tabela 1. Parametry modelu komputerowego

Symbol	Wartość	Opis
f_s	10kHz	częstotliwość łączy tranzystorów
U_{Sp}	3x185V	napięcie przewodowe sieci elektroenergetycznej
f	50Hz	częstotliwość sieci elektroenergetycznej
L_K	3mH	indukcyjność dławika obwodu wyjściowego
C_G, C_D	2200 μ F	pojemność każdego z kondensatorów obwodu pośredniczącego

Na Rys. 7 przedstawiono przejście układu z pracy bez kompensacji mocy biernej na pracę z układem przekształtnikowego kompensatora i kompensacją do $\text{tg}\varphi$ równego zero. Po przyłączeniu kompensatora w czasie $t = 0,26\text{s}$ następuje podniesienie wartości napięcia obwodu pośredniczącego z 260V (wstępne ładowanie za pomocą prostownika diodowego) do 350V oraz zmniejszenie mocy biernej pobieranej z sieci z 5,3kVar do wartości równej zero. Współczynnik mocy $\text{tg}\varphi$ zmniejsza się z 0,71 do zera, co odpowiada całkowitej kompensacji mocy biernej. Na Rys. 8.a przedstawiono uzyskane w trakcie badań symulacyjnych przebiegi chwilowe mocy czynnej p_S oddawanej do sieci (SEE) oraz mocy biernej q_S pobieranej z sieci. W czasie $t = 0,26\text{s}$ następuje włączenie aktywnego kompensatora. Rys. 8.b przedstawia chwilowe wartości składowej czynnej i_{Kx} oraz składowej biernej i_{Ky} prądu aktywnego kompensatora. Na Rys. 8.c pokazano chwilowe wartości prądów fazowych i_{Ka} , i_{Kb} , i_{Kc} kompensatora aktywnego. Prąd kompensatora i_{Ka} posiadający współczynnik zawartości harmonicznych $\text{THD}_{i_{Ka}}$ równy 1,1% powoduje odkształcenie prądu sieci i_{Sa} do wartości współczynnika $\text{THD}_{i_{Sa}}$ równego 0,7%. Pozytywne wyniki badań komputerowych pozwoliły na przeprowadzenie weryfikacji pracy układu wytwarzania energii z kompensatorem energoelektronicznym za pomocą badań laboratoryjnych.



Rys. 7. Wyniki badań symulacyjnych. Przebiegi czasowe: a). napięcia sieci u_{Sa} i prądu sieci i_{Sa} ; b). współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ podczas pracy generatora indukcyjnego przyłączonego do sieci. W czasie $t = 0,26\text{s}$ następuje załączenie aktywnego kompensatora mocy biernej



Rys. 8. Wyniki badań symulacyjnych. Przebiegi czasowe: a). mocy czynnej p_S oddawanej do sieci i mocy biernej q_S pobieranej z sieci; b). składowej czynnej i_{Kx} i biernej i_{Ky} prądu kompensatora; c). prądów fazowych i_{Ka} , i_{Kb} , i_{Kc} kompensatora podczas pracy generatora indukcyjnego przyłączonego do sieci. W czasie $t = 0,26\text{s}$ następuje załączenie aktywnego kompensatora mocy biernej

5. Badania laboratoryjne przekształtnikowego kompensatora mocy biernej

Stanowisko badawcze z przekształtnikowym kompensatorem mocy biernej wykonanym w topologii trójpoziomowej NPC przygotowane do badań laboratoryjnych przedstawiono na Rys. 9. Wykaz podstawowych elementów, wchodzących w skład stanowiska, zamieszczono w Tabeli 1. Do badań wykorzystano zespół wirujący składający się z dwóch maszyn

indukcyjnych klatkowych. Rolę turbiny wodnej pełni maszyna zaprojektowana na napięcie 3x400V zasilana z przemiennika częstotliwości, natomiast maszyna zaprojektowana na obniżone napięcie 3x220V pełni rolę generatora.

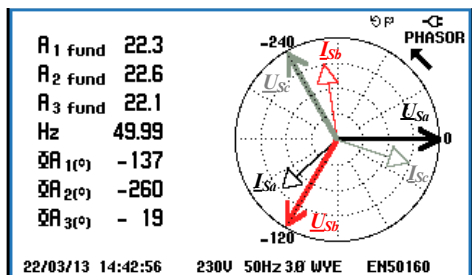


Rys. 9. Stanowisko badawcze z przekształtnikowym kompensatorem mocy biernej przygotowane do badań

Za pomocą analizatora jakości energii wykonane zostały pomiary układu laboratoryjnego dla przypadku pracy bez kompensacji mocy biernej (Rys. 10 i Rys. 11). Generator indukcyjny o mocy pozornej 7,3kVA pracujący w ustalonym stanie pracy produkuje moc czynną na poziomie 5,5kW i pobiera 4,8kVar mocy biernej (Rys. 10).

Moc i energia				
FUND				
	L1	L2	L3	Total
kW	- 1.79	- 1.88	- 1.83	- 5.50
kVA	2.44	2.47	2.42	7.32
kVAR	1.65	1.59	1.59	4.83
PF	-0.73	-0.76	-0.75	-0.75
cosφ	-0.73	-0.76	-0.75	-0.75
A rms	22.3	22.7	22.2	
	L1	L2	L3	
U rms	109.2	108.6	108.9	
22/03/13 14:42:24 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				

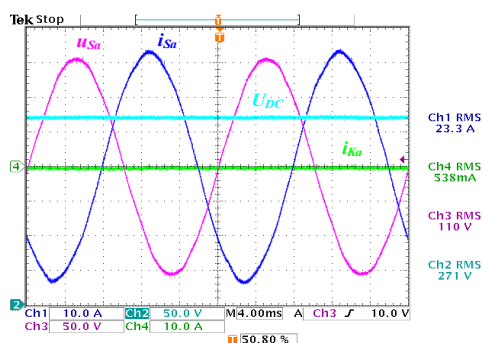
Rys. 10. Badania laboratoryjne mocy – układ bez kompensacji



Rys. 11. Badania laboratoryjne: wektorowe napięcia i prądy sieci – układ bez kompensacji

Na Rys. 12 pokazano przebiegi napięcia U_{DC} obwodu pośredniczącego, napięcia sieci u_{Sa} i prądu sieci i_{Sa} dla przypadku pracy generatora na sieć bez kompensacji mocy biernej. Praca

przekształtnikowego kompensatora ogranicza się jedynie do wstępnego ładowania napięcia obwodu pośredniczącego przez diody zwrotne.

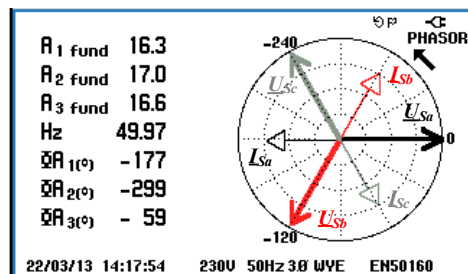


Rys. 12. Badania laboratoryjne układu bez kompensacji; u_s – napięcie sieci, i_s – prąd sieci, U_{DC} – napięcie obwodu pośredniczącego

Dla układu wytwarzania energii z włączonym aktywnym kompensatorem mocy biernej wykonano pomiary analizatorem jakości energii, które przedstawiono na Rys. 13 i Rys. 14. Układ z włączonym kompensatorem aktywnym oddawał do sieci moc czynną równą 5,5kW natomiast moc bierna została skompensowana i wynosiła 0,12kVar o charakterze indukcyjnym (Rys. 14).

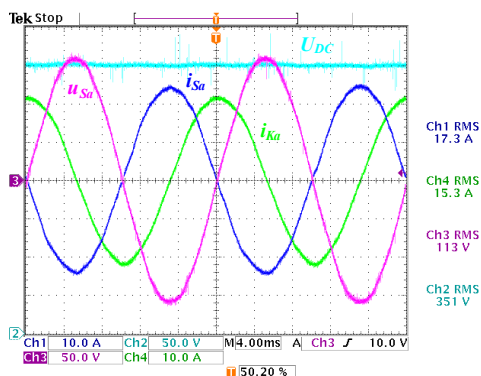
Moc i energia				
FUND				
	L1	L2	L3	Total
kW	- 1.81	- 1.88	- 1.85	- 5.54
kVA	1.82	1.88	1.85	5.54
kVAR	0.08	0.02	0.01	0.12
PF	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
cosφ	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
A rms	16.3	17.0	16.6	
	L1	L2	L3	
U rms	111.6	111.1	111.3	
22/03/13 14:17:22 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				

Rys. 13. Badania laboratoryjne mocy – układ z włączoną aktywną kompensacją mocy biernej



Rys. 14. Badania laboratoryjne: wektorowe napięcia i prądy sieci – układ z włączoną aktywną kompensacją mocy biernej

Za pomocą oscyloskopu wykonano pomiary napięcia i prądów w układzie z włączoną aktywną kompensacją mocy, co pokazano na Rys. 15.



Rys. 15. Badania laboratoryjne układu z włączoną aktywną kompensacją mocy biernej; u_S – napięcie sieci, i_S – prąd sieci, U_{DC} – napięcie obwodu pośredniczącego

Kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem sieci i napięciem sieci dla pracy układu bez kompensacji wynosił 223° (Rys. 11). Przy włączonym przekształtnikowym kompensatorze, przesunięcie fazowe pomiędzy prądem sieci, a napięciem sieci wynosiło 183° (Rys. 14).

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienie kompensacji mocy biernej w małych elektrowniach wodnych z generatorem indukcyjnym. Omówiono kompensację kondensatorową oraz zaproponowano zastąpienie jej przekształtnikowym układem kompensacji mocy biernej. Opracowana metoda sterowania kompensatorem aktywnym została zweryfikowana za pomocą modelu komputerowego oraz stanowiska laboratoryjnego. Uzyskane wyniki laboratoryjne i symulacyjne potwierdziły słuszność stosowania równoległego energoelektronicznego kompensatora mocy biernej. Największą zaletą proponowanego przekształtnikowego kompensatora jest całkowita eliminacja mocy biernej pobieranej z sieci elektroenergetycznej przez generator indukcyjny.

7. Literatura

- [1]. "Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu eksploatacji i planowania rozwoju sieci", Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., wersja 1.2.
- [2]. W. Rozłucki: "Kompensacja mocy biernej w małych elektrowniach wodnych (MEW)", ELMA ENERGIA.

[3]. J. Tępiński, J. Wiśniewski, W. Koczara: "Kompensacja mocy biernej dla elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym", Przegląd Elektrotechniczny, nr 4b, str. 259 – 264, 2012.

[4]. Z. Nartowski: "Baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej", WNT, Warszawa, 1967

[5]. E. Mściwójewski: "Problemy kompensacji mocy biernej pobieranej przez generatory asynchroniczne w małych elektrowniach wodnych", Instytut Energetyki O/Gdańsk, 1996.

[6]. W. Koczara, D. Górski, G. Iwański, J. Tępiński, J. Wiśniewski: "Kompensacja mocy biernej generatorów indukcyjnych w małych elektrowniach wodnych", Napędy i Sterowanie, nr 9, str. 142 - 147, 2011.

[7]. J. Tępiński, J. Wiśniewski, W. Koczara: "Reactive power compensator of hydro induction generator", EVER, Monte Carlo, Monaco, 2012.

[8]. J. Wiśniewski, J. Tępiński, W. Koczara: "Kompensacja mocy biernej generatora indukcyjnego pracującego w elektrowni wodnej, bazująca na metodzie orientacji według wektora napięcia sieci", Przegląd Elektrotechniczny, nr 3a, 2013.

[9]. J. Tępiński: "Układ generator indukcyjnego z aktywnym kompensatorem przekształtnikowym", rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Warszawa, 2015.

[10]. R. Strzelecki, G. Benysek: "Power electronics in smart electrical energy network", Springer 2008.

[11]. W. Kołomyjski, M. Malinowski, M. P. Kaźmierkowski: "Adaptive space vector modulator for three-level NPC PWM inverter-fed induction motor", 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, p. 523 – 528, 2006.

[12]. M. P. Kaźmierkowski, F. Blaabjerg, R. Krishnan: "Control in power electronics, selected problem", Elsevier Science, USA 2002, 518p. ISBN:0-12-402772-5.

[13]. M. Malinowski, M. P. Kaźmierkowski, A. M. Trzynadłowski: "A Comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drivers", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 2, p. 832 – 838, Feb. 2000.

[14]. "PSIM User's guide", Powersim Inc. <http://powersimtech.com>, 2001 – 2006.

Autorzy

dr inż. Jarosław Tępiński, Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowarowej, ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów, e-mail: jtepinski@cnbop.pl