

DOI: 10.5604/20830157.1194283

DYNAMICZNA REGULACJA MOCĄ PRZEKSZTAŁNIKÓW SIECIOWYCH

Dariusz Zieliński

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

Streszczenie. Dynamicznie rozwijający się sektor źródeł odnawialnych zmusza urząd regulacji energetycznej do wprowadzania coraz bardziej rygorystycznych norm odnośnie jakości dostarczonej energii i dynamiki samych źródeł. W przyszłości przepisy będą wymagały by źródło energii odnawialnej własnościami dynamicznymi przypominało generator synchroniczny o równoważnej mocy. Ponadto źródło powinno własności tłumienia oscylacji mocy w systemie elektroenergetycznym i powinno wspomagać sieć w odbudowie napięcia. Powyższe przyczyny implikują sterowanie nieliniowe wysokiej dynamiki układów pośredniczących pomiędzy źródłem a siecią jakim są przekształtniki. Artykuł prezentuje regulator nieliniowy poprawiający dynamikę sterowania mocą w układach przekształtników wektorowych. Analizę dokonano za pomocą oprogramowania Matlab/SIMULINK.

Słowa kluczowe: Przekształtnik, VOC, LVRT, Simulink

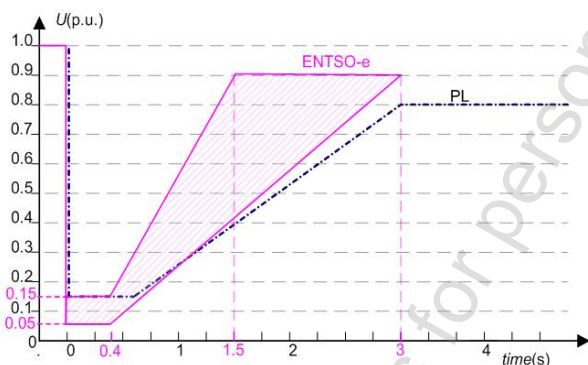
DYNAMIC POWER CONTROL OF THE GRID CONVERTERS

Abstract. The dynamic growth of the renewable energy sources sector causes that the Energy Regulatory Office introduces stricter and stricter grid codes about quality of the energy and dynamics of the sources. In the future, grid codes will require that the dynamic properties of the renewable source of energy is similar to the synchronous generator with the same power. Moreover, the renewable source of energy should damp power oscillation in power grid, and support it to stabilize the voltage. These causes lead us to use a high dynamic nonlinear control system – converters, installed between a source and a power grid. The paper presents a nonlinear controller improves the dynamic power control of the vector inverters' systems. The analysis was made by using the MATLAB/Simulink software.

Keywords: Inverter, VOC, PI algorithm, LVRT, Simulink

Wstęp

W ostatnich latach znacząco zwiększono produkcję energii elektrycznej pochodzącej z niewyczerpalnego źródła jakim jest wiatr. Trend ten nie przemija, gdyż Europa walczy z niestabilną sytuacją na rynku paliw ciekłych oraz koniecznością zwiększenia udziału energii wytwarzanej przez źródła odnawialne. Dlatego rozwój energetyki wiatrowej jest szczególnie ważny dla krajów członkowskich UE. Dotychczasowa zainstalowana moc polskiej energetyki wiatrowej jest szczególnie ważny dla krajów członkowskich UE. Dotychczasowa zainstalowana moc polskiej energetyki wiatrowej jest szczególnie ważny dla krajów członkowskich UE. Dotychczasowa zainstalowana moc polskiej energetyki wiatrowej jest szczególnie ważny dla krajów członkowskich UE. Wzrost mocy zainstalowanej skutkuje wprowadzeniem coraz bardziej restrykcyjnych przepisów i norm dla operatorów sieci. Przepisy te idą w kierunku zwiększenia wymagań w zakresie regulacji napięcia, częstotliwości mocy czynnej i biernej, jak i przetrwania krótkotrwałych zapadów napięcia.



Rys. 1. Procedury LVRT dla farm wiatrowych – obowiązująca obecnie w Polsce, ENTSO-e (ang. European Network of Transmission System Operators for Electricity) – procedura, która wkrótce obowiązować będzie w krajach UE dla sieci $\leq 110kV$ [2]

Źródła wytwórcze energii elektrycznej mają obowiązek przetrwania spadków napięć LVRT (ang. Low Voltage Ride Through), jeżeli charakterystyka zapadu w funkcji czasu mieści się wewnątrz klina określonego charakterystykami LVRT (rys. 1). Kłina ten nie jest jednak ściśle określony. Operatorzy Systemów Dystrybucyjnych (OSD) mogą go poszerzyć o zakresowaną część [2]. Kolejnym wymogiem jaki jest stawiany operatorom tych źródeł jest aktywne uczestniczenie w odbudowie napięcia sieciowego, a to nie byłoby możliwe bez bardzo dobrej dynamiki danego źródła.

Kolejnymi aspektami są przyszłe przepisy, które będą wymuszały na operatorze danego źródła:

- lokalną stabilizację napięcia,
- regulację mocy biernej,
- tłumienie oscylacji mocy czynnej,
- dynamikę generatora synchronicznego o równoważnej mocy.

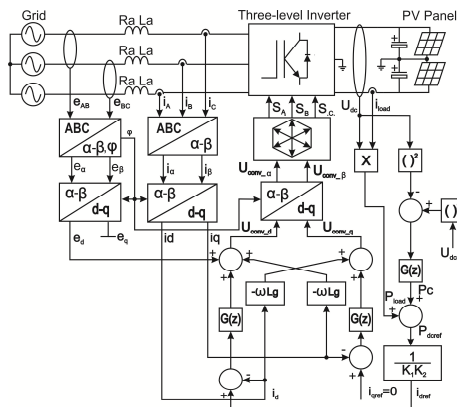
Takie zwiększone wymagania służą możliwości zwiększenia mocy źródeł odnawialnych, poprawie jakości parametrów zasilania, wzrostowi niezawodności oraz budowie podstaw pod przyszłe sieci o strukturze rozproszonej i właściwościach typu smart grid.

1. Sterowanie podczas LVRT

W celu umożliwienia spełnienia powyższych zadań, wymagane jest zastosowanie w pełni sterowanych przekształtników energoelektronicznych, wyposażonych w szybkie jednostki obliczeniowe DSP (ang. Digital Signal Processor) oraz sterowanie bazujące na metodach wektorowych. Jedną z metod, która jest najczęściej wybierana do tego typu zadań to VOC [6, 7]. Zaletami takiego starowania są:

- niezależne sterowanie mocą czynną i bierną,
- stała częstotliwość kluczowania,
- dobra dynamika w trakcie trwania stanów przejściowych.

Sterowanie wektorowe VOC bazuje na sprowadzeniu trójfazowego systemu stacjonarnego do układu wektora przestrzennego, umiejscowionego w wirującym układzie współrzędnych d-q [4]. Schemat kompletnego sterowania wektorowego VOC przedstawiono na rys. 2.



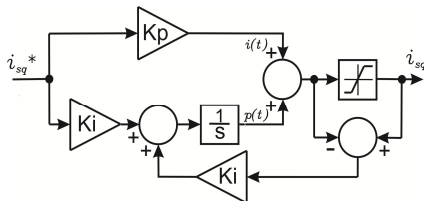
Rys. 2. Układ sterowania wektorowego przekształtnikiem sieciowym

Podstawą zastosowanego systemu odsprężania mocy bierniej i czynnej jest reprezentacja prądów sieci i_g w osiach d-q: i_d – prąd czynny oraz i_q – prąd bierny. Taka reprezentacja zapewnia szybkie i precyzyjne sterowanie mocą przekształtnika. Cały układ sterowania szczegółowo omówiono w [6, 7].

Synchronizacja układu z siecią elektroenergetyczną jest realizowana przy pomocy algorytmu DDSRF_PLL (ang. *Decoupled Double Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop*). Zastosowany algorytm cechuje się bardzo wysoką odpornością na zakłócenia i zapewnia poprawną synchronizację nawet w przypadku zapadu napięcia do wartości 0,1 pu (32V), lub asymetrii napięć fazowych [3, 6].

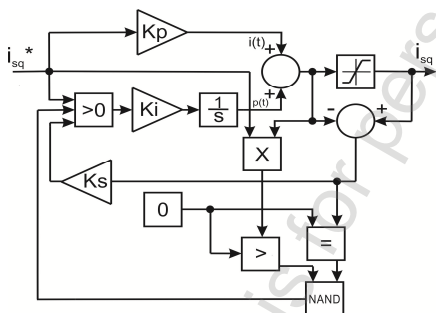
Jednym z warunków uzyskania dobrych własności dynamicznych przekształtnika VOC (ang. *Voltage Oriented Control*) jest regulacja zamknięta ze sprzężeniem od wielkości mierzonych składowych prąd i_d i i_q . Kluczową rolę odgrywają tu algorytmy regulacji, które na rys. 2 reprezentowane są przez algorytmy G(z). Zadaniem tych regulatorów jest szybkie wyeliminowanie błędów, na które składają się niedokładności w zakresie kąta synchronizacji, amplitudy prądu wyjściowego czynnego i_d oraz biernego i_q oraz charakteru mocy wydawanej przez przekształtnik.

Oczywiste jest, że dobór nastaw regulatorów ma dominujący wpływ na charakterystyki dynamiczne przekształtnika. Zazwyczaj z powodu prostoty i efektywności działania do eliminacji błędów regulacji przekształtnika stosuje się algorytmy liniowe PI z funkcją anti-windup rys. 3.



Rys. 3. Klasyczny regulator PI z układem anti-windup [1]

Niestety te algorytmy regulacji nie zawsze spełniają wymagania szybkiej odbudowy napięcia określone procedurą LVRT (rys. 1). Przyczyną niemożliwości spełnienia wymagań jest sama natura regulatora typu „anti-windup”. Regulator skutecznie eliminuje przeregulowania występujące w stanach dynamicznych. Nie zeruje natomiast członu całkującego regulatora w przypadku wystąpienia sytuacji, gdzie regulator nie jest w stanie poradzić sobie z błędem w krótkim okresie czasu. Następnym tego jest kumulacja błędów i brak dynamicznej odpowiedzi na szybkie zmiany obciążenia.

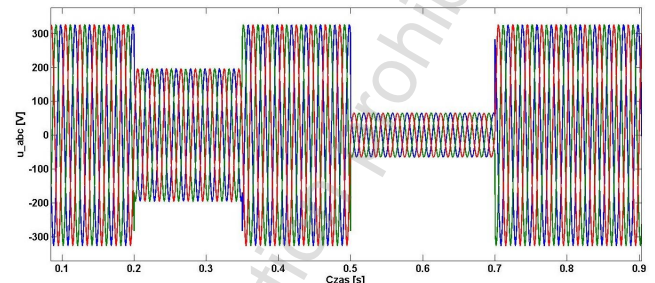


Rys. 4. Nieliniowy regulator PI z warunkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Proponowany przez autora algorytm z warunkowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym Pcl (ang. *PI Case Integration*) rys. 4, zapewnia, że układ sterowania nie wejdzie w stan głębokiej saturacji. Ten rodzaj działań ma zapewnić szybką oraz stabilną pracę przekształtnika w stanach przejściowych. W przypadku wystąpienia dużego przeregulowania układu sterowania następuje nasycenie układu. W celu zapobiegnięcia głębszemu nasyceniu układu, zaproponowano system sterowania logicznego, którego zadaniem jest sprawdzanie warunku saturacji wyjścia algorytmu oraz czy sygnał członu całkującego ma ten sam znak co błąd na wejściu regulatora. W przypadku wystąpienia tego stanu, układ logiczny wprowadza do obwodu regulacji dodatkowe, silnie ujemne sprzężenie zwrotne, co skutkuje szybkim wyprowadzeniem ze stanu saturacji regulatora.

2. Wyniki badań symulacyjnych

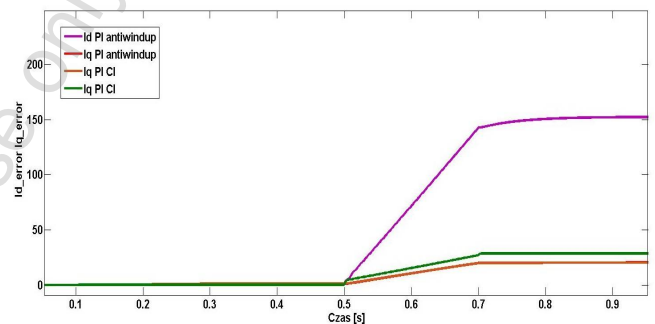
W celu zbadania wpływu topologii regulatora PI na własności dynamiczne przekształtnika sieciowego, przeprowadzono badania symulacyjne polegające na skokowej zmianie amplitudy napięcia sieciowego. Głębokość zapadu napięcia zgodnie z procedurą LVRT (rys. 1) stopniowano, zadając kolejno napięcia o wartościach: 1,0 pu (320V), 0,6 pu (190V), 1,0 pu (320V), 0,2 pu (64V) oraz powrót do napięcia nominalnego (rys. 5).



Rys. 5. Amplituda napięcia sieci podczas badania przekształtnika

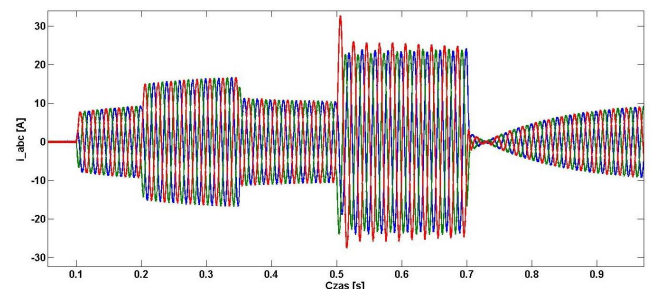
Ten scenariusz jest możliwy w przypadku stopniowego wyłączania się poszczególnych źródeł OZE z powodu ich przeciążenia, pracujących na słabą sieć elektroenergetyczną.

Wyniki badań zaprezentowano dla dwóch omawianych regulatorów rys. 3 i rys. 4. Nastawy wzmocnień regulatorów są takie same dla obydwu omawianych przypadków. Poniższy wykres (rys. 6) przedstawia całki wartości bezwzględnej błędów popełnianego przez zastosowane regulatory dla poszczególnych torów regulacji prądu biernego i_q oraz czynnego i_d .

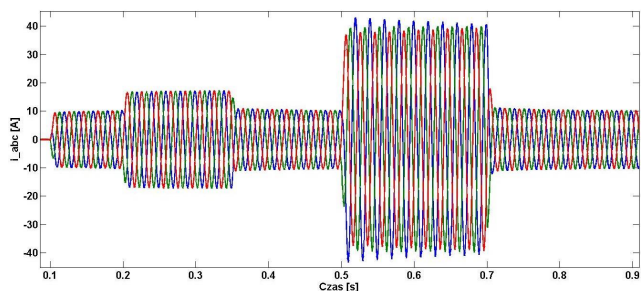


Rys. 6. Błąd całkowity regulacji, zarejestrowany w torach regulacji prądu I_d i I_q : (fioletowy i pomarańczowy – PI anti-windup, zielony i pomarańczowy – Pcl)

Zastosowanie nieliniowego regulatora Pcl o złożonej topologii przyczyniło się do znacznej poprawy dynamiki badanego przekształtnika oraz siedmiokrotnej redukcji błędów prądu w osi d. Bezpośrednią przyczyną poprawy własności regulacyjnych przekształtnika jest fakt iż drugi regulator nie posiada efektu saturacji. Efekt nasycenia się regulatora z algorytmem anti-windup można zaobserwować na rys. 7.

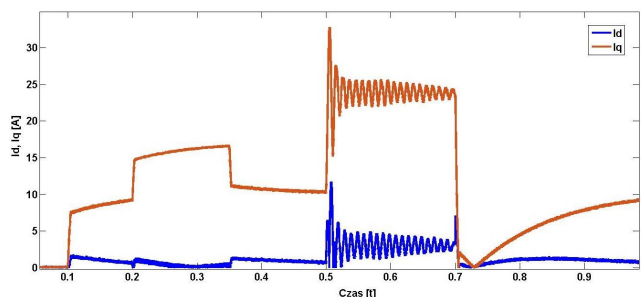


Rys. 7. Prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika z regulatorem PI anti-windup przy zmianach amplitudy napięcia sieci odpowiadających zmianom napięcia na rys. 5

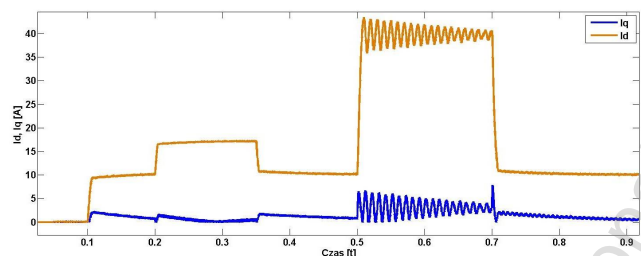


Rys. 8. Prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika z regulatorem Pcl przy zmianach amplitudy napięcia sieci odpowiadających zmianom napięcia na rys. 5

Dokonując analizy porównawczej rys. 7 i rys. 8 można zauważyć, że regulacja prądu za pomocą klasycznej struktury PI anti-windup wprowadza negatywne skutki uboczne. Podczas badań zaobserwowano, że regulator o prostej strukturze ma niższą dynamikę w trakcie trwania zakłócenia, a powstały błąd kumuluje się w członach całkujących regulatorów i nie pozwala na szybką odpowiedź w przypadku zaniku zakłócenia w 0,7 s.

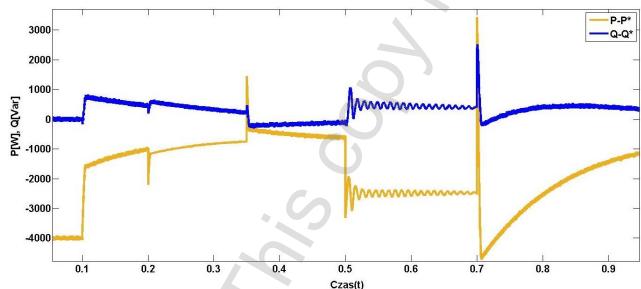


Rys. 9. Prądy I_d i I_q przekształtnika przedstawione w układzie wirującym dla regulatora PI anti-windup przy zmianach amplitudy napięcia sieci

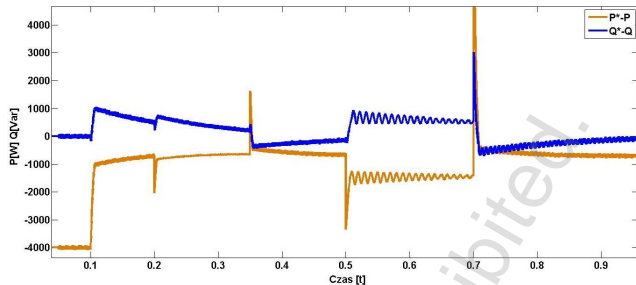


Rys. 10. Prądy I_d i I_q przekształtnika przedstawione w układzie wirującym dla regulatora Pcl przy zmianach amplitudy napięcia sieci

Analizując prądy czynny I_d oraz bierny I_q , które przedstawiono w układzie współrzędnych wirujących rys. 9 i rys. 10 można zaobserwować znacznie lepszą dynamikę w przypadku regulatora o złożonej strukturze Pcl. Dodatkowe zmniejszenie oscylacji wpływa pozytywnie na poziom harmonicznych prądu wprowadzanych w trakcie zakłócenia do sieci. Kolejne analizy przedstawiają błędy wydawanej mocy czynnej oraz bierniej przez przekształtnik na rys. 11 i rys. 12.

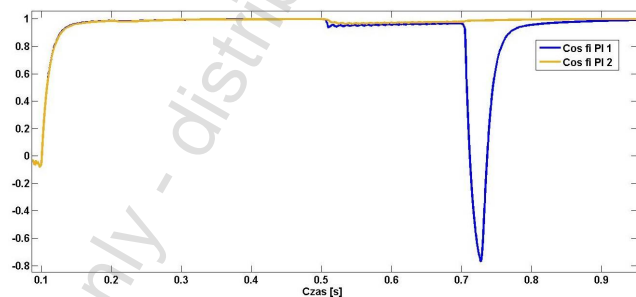


Rys. 11. Błąd wydawanej mocy czynnej i bierniej poprzez przekształtnik w trakcie zakłócenia (zmianach amplitudy napięcia sieci). Regulator PI anti-windup



Rys. 12. Błąd wydawanej mocy czynnej i bierniej poprzez przekształtnik w trakcie zakłócenia (zmianach amplitudy napięcia sieci). Regulator Pcl

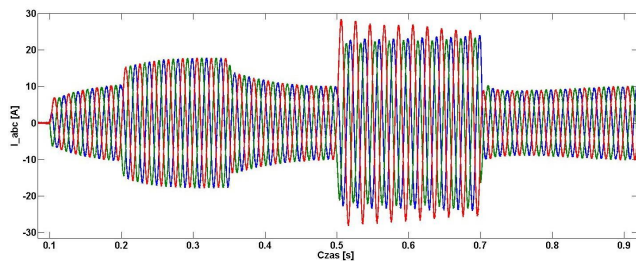
Podczas badań moc czynna wydawana do sieci wynosiła $P = 4$ kW, natomiast bierna $Q = 0$ Var. Dołączenie przekształtnika do sieci wystąpiło natychmiast po zsynchronizowaniu się z systemem, chwila 0,1 s. Dokonując analizy porównawczej obydwu wykresów szczególnie interesująca jest chwila powrotu napięcia znamionowego 0,7 s. Regulator PI z anti-windup doprowadził do sytuacji, w której źródło nie wydaje mocy czynnej natomiast pobiera moc bierną. Potwierdza tę sytuację rys. 13 przedstawiający charakter wydawanej mocy dla rozpatrywanych przypadków.



Rys. 13. Charakter wydawanej mocy poprzez przekształtnik w trakcie trwania zakłócenia: (granatowy - PI anti-windup, żółty - PI_CI)

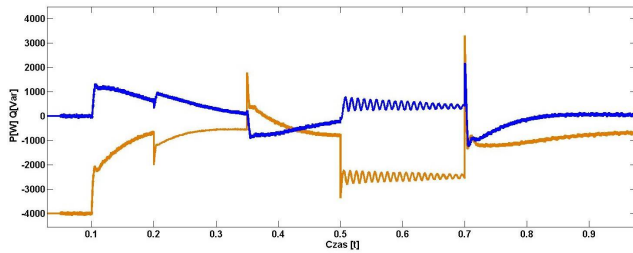
Regulator o złożonej strukturze spowodował, że źródło utrzymywało $\cos\phi$ bliskie jedności nawet w przypadku silnych zapałów napięcia 0,2 pu (64 V). Natomiast regulator o strukturze prostej nie wspomagał systemu elektroenergetycznego w odbudowie napięcia sieciowego. Ponadto regulator PI z anti-windup doprowadził do sytuacji, w której źródło zmieniło charakter mocy bierniej, dodatkowo odciążając system elektroenergetyczny.

W celach głębszej analizy problemu podjęto szereg badań mających na celu wyjaśnienie, czy zmiany nastaw wzmocnień regulatorów mogą zniwelować problem przedstawiony na rys. 5. W tym celu obniżono dwukrotnie wzmocnienie k_p dla regulatora PI anti-windup i porównano z wynikami dla nastaw optymalnych.



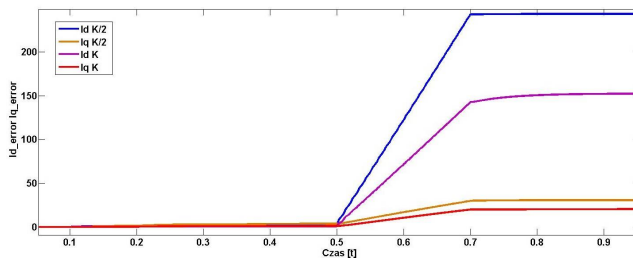
Rys. 14. Prąd zmierzony na zaciskach przekształtnika z regulatorem PI anti-windup przy zmianach amplitudy napięcia sieci odpowiadających zmianom napięcia na rys. 5 i współczynnika wzmocnienia $k_p/2$.

Analizując kształt prądu przedstawiony na rys. 14 można wnioskować, że obniżanie parametrów nastaw k_p regulatora redukuje błąd skumulowany, natomiast wprowadza to wydłużające się w czasie stany przejściowe. Dodatkowo obniżenie nastaw regulatora wpływa niekorzystnie na symetrię prądów fazowych przekształtnika w trakcie trwania zakłócenia czas 0,5–0,7 s.



Rys. 15. Błąd wydawanej mocy czynnej i biernej poprzez przekształtnik w trakcie zakłócenia (zmianach amplitudy napięcia sieci). Regulator PI anti-windup, zredukowane wzmocnienie $k_p/2$.

Dokonując analiz porównawczych rys. 11 i rys. 15 zauważono również zwiększone błędy regulacji mocy. Stała czasowa regulatorów wydłużyła się przy zmienionych warunkach panujących w sieci. Natomiast rys. 16 przedstawia porównanie błędów całkowitych regulacji prądu dla regulatora PI anti-windup dla nastaw wzmocnień w sposób optymalny i zredukowany $k_p/2$. Obniżenie wzmocnienia k_p dwukrotnie skutkuje wzrostem błędów regulacji o współczynnik 1.3.



Rys. 16. Błąd całkowity regulacji, zarejestrowany w torach regulacji prądu I_d i I_q regulatora anti-windup: (fioletowy i niebieski – prąd I_d , żółty i czerwony – prąd I_q)

Podjęto również próby przebadania układu z nastawami k_p większymi niż optymalne. Niestety zgodnie z przewidywaniami powstawały oscylacje w obwodach regulacji, których następstwem była utrata stabilności i wypadnięcie z synchronizmu układu przekształtnikowego. Z wyżej wymienionych powodów zaniechano dalszych badań.

3. Wnioski

W artykule zaprezentowano porównanie dwóch regulatorów nieliniowych o różnym stopniu złożoności. Badania przeprowadzono dla nastaw wzmocnienia optymalnych i zredukowanych. Zasadność stosowania złożonego regulatora zaprezentowano na przykładzie sterowania wektorowego przekształtnika sieciowego, pracującego w stanach zakłócenia zgodnego z procedurami LVRT. Poprzez zastosowanie regulatora o złożonej strukturze udało się poprawić dynamikę źródeł odnawialnych współpracujących z siecią za pośrednictwem przekształtnika. Eliminacja zjawia-

ska kumulacji błędów daje pozytywne rezultaty tj. redukuje oscylacje mocy i poprawia współczynnik $\cos\phi$ podnosząc go do wartości bliskiej jedności.

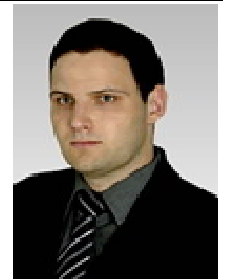
Zastosowana modyfikacja regulatora polegająca na tym, że człon regulatora P odpowiada za redukcję błędów w stanach przejściowych, a człon I odpowiada za sprowadzenie błędów do wartości bliskiej zerowej w stanach ustalonych, dało wymierne korzyści w postaci braku stanów saturacji regulatora. Konsekwencją tego jest utrzymanie współczynnika mocy nawet w przypadku głębokich zapadów. Takie podejście może stać się dobrym rozwiązaniem dla układów regulacji mocy biernej w układach elektrowni wiatrowych dużej mocy. Przedstawione rozwiązanie będzie w przyszłości badane na układzie rzeczywistym elektrowni wiatrowej.

Literatura

- [1] Bohn C., Atherton D. P.: An analysis package comparing PID anti-windup strategies, IEEE Control Systems, Volume: 15, Issue: 2, 1995, 34–40 [DOI: 10.1109/37.375281].
- [2] Jarzyna W., Lipnicki P.: The Comparison of Polish Grid Codes to Certain European Standards and resultant Differences for WPP Requirements. 15th European Conference Power Electronics and Applications, 2013, 1–6 [DOI: 10.1109/EPE.2013.6634748].
- [3] Jarzyna W., Lipnicki P., Zieliński D.: Synchronization of voltage frequency converters with the grid in the presence of notching. COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, nr 3, vol. 34, 2015, 657–673.
- [4] Kazmierkowski P., Jasinski M., and Wrona G.: DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Volume: 7, Issue: 2, 2011, 204–211 [DOI: 10.1109/TII.2011.2134856].
- [5] Leśniewski L., Sołtysiak D., Skolimowski M., Sztuba W. Raport: Energetyka Wiatrowa w Polsce. Konferencja prasowa, Warszawa, 19 listopada 2015. www.tpa-horwath.pl
- [6] Teodorescu R., Lissere M., Rodriguez P.: Grid Converter for Photovoltaic and Wind Power Systems. IEEE-Wiley, New York 2011.
- [7] Zieliński D.: Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas zapadów napięcia. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2, 2014, 77–80 [DOI: 10.5604/20830157.1109384].

Mgr inż. Dariusz Zieliński
e-mail: d.zielinski@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2013). Asystent w Katedrze napędów i maszyn elektrycznych. Zainteresowania naukowe obejmują energoelektroniczne przekształtniki o wysokich parametrach dynamicznych. Stosowane techniki badawcze to m.in. prototypowanie z wykorzystaniem środowiska dSpace, MATLAB/Simulink oraz szeregu innych narzędzi informatyczno-sprzętowych.



otrzymano/received: 08.12.2015

przyjęto do druku/accepted: 20.01.2016