

Paweł MŁODZIKOWSKI
Adam MILCZAREK
Mariusz MALINOWSKI

ANALIZA PRACY MAŁEJ ELEKTROWNI WIATROWEJ – PRACA AUTONOMICZNA ORAZ PRZY PODŁĄCZENIU DO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

STRESZCZENIE *W artykule omówiono dwa tryby pracy małej elektrowni wiatrowej: pracę autonomiczną i przy podłączeniu do sieci elektroenergetycznej oraz problemy zachodzące przy przełączaniu się pomiędzy trybami. Przedstawiono także podstawowe topologie przekształtników używane z różnymi rodzajami generatorów i przydatność dla celów przydomowych elektrowni wiatrowych.*

Słowa kluczowe: *mała elektrownia wiatrowa, synchronizacja z siecią, praca autonomiczna, PMSG*

1. WSTĘP

Małe elektrownie wiatrowe na przestrzeni ostatnich lat zyskują coraz szersze grono odbiorców, głównie w związku z rosnącymi cenami energii ze źródeł

mgr inż. Paweł MŁODZIKOWSKI, Adam MILCZAREK
e-mail: mlodzikp@isep.pw.edu.pl, e-mail: amilczarek86@gmail.com

dr inż. Mariusz MALINOWSKI
e-mail: mlodzikp@isep.pw.edu.pl

Institut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Warszawska

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 249, 2011

konwencjonalnych oraz z malejącymi cenami elementów energoelektronicznych. To jednak często nie jest wystarczającym impulsem do decyzji o inwestycji ze względu na niską rentowność. Hiszpania jako jeden z pierwszych krajów podjęła odpowiednie kroki w celu wsparciu rozwoju małych elektrowni wiatrowych. W wyniku hiszpańskiego programu na rzecz odnawialnych źródeł energii na lata 2005-2010 (RES) planowany udział energii produkowanej z odnawialnych źródeł do końca 2010 roku ma wynosić minimum 12% (przy czym 29,4% ogółu energii elektrycznej ma pochodzić ze źródeł odnawialnych).

W celu promocji małych elektrowni wiatrowych (turbin do mocy 100 kW) powstał w tym kraju projekt *Minieolica* [5] który obejmuje trzy obszary :

- Wsparcie dla producentów opracowujących nowe elektrownie o mocy od 1 kW do 5 kW dla obszarów miejskich i zurbanizowanych (innowacyjne typy turbin o poziomych i pionowych osiach obrotu) oraz elektrowni o mocach od 20 kW do 100 kW (niezawodne, wysokosprawne i wytrzymałe turbiny produkujące energię na skalę przemysłową dla obszarów wiejskich).
- Projekty obejmujące badania przełomowych technologii kluczowych dla rozwoju małych elektrowni wiatrowych.
- Rozwój infrastruktury i wsparcie elektrowni wiatrowych (promocja, rozpowszechnianie idei i uczulanie na problemy energetyki odnawialnej).

Precyzyjną definicję określa norma IEC 61400-02 [1] w połączeniu z lokalnymi regulacjami [5] według niej małą elektrownią wiatrową możemy nazwać elektrownię, która spełnia następujące warunki:

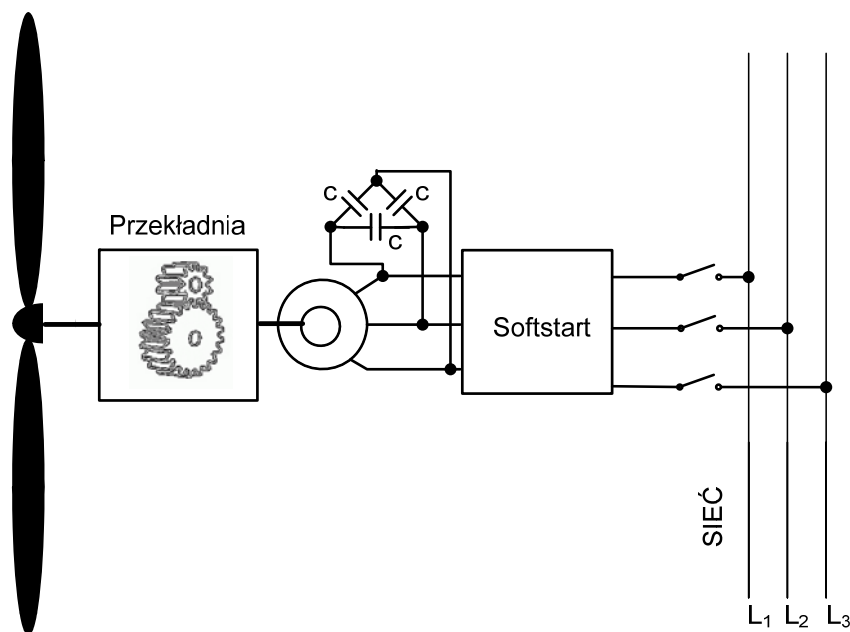
- Powierzchnia zakreślana przez łopaty turbiny $<200 \text{ m}^2$, ale większa niż 2 m^2 [1].
- Moc znamionowa $<65 \text{ kW}$ [5].
- Napięcie generowane mniejsze niż 1000 V a. c. lub 1500 V d. c. [5].

Powyższa norma wymaga aby w przypadku powierzchni zakreślanej przez wirnik powyżej 14 m^2 zainstalować dodatkowy hamulec postojowy, ponieważ samo zwarcie uzwojeń może nie wystarczyć do zatrzymania wirnika na czas konserwacji.

2. PODSTAWOWE TOPOLOGIE

Konstruktorzy elektrowni wiatrowych do zastosowań przydomowych zwykle biorą po uwagę cenę i dostępność generatora jako główne kryterium. Najtańszym

rodzajem generatora wykorzystywanym w małych elektrowniach jest generator indukcyjny, który połączony z turbiną przez przekładnię obraca się z prędkością wyższą niż prędkość synchroniczna.



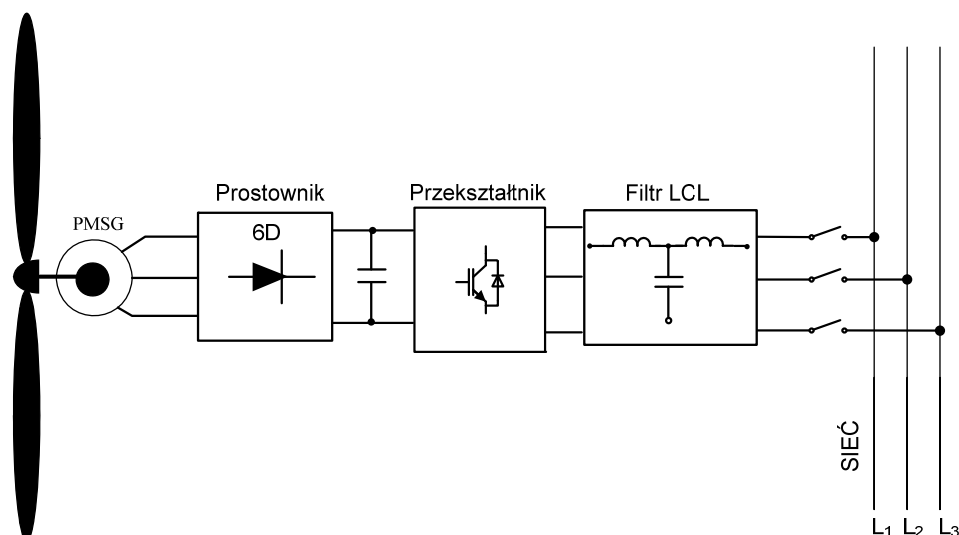
Rys. 1. Generator indukcyjny w układzie z przekładnią [6]

Takie rozwiązanie charakteryzuje się niską sprawnością (ze względu na za niską sprawność generatora – zwykle jest to silnik indukcyjny z demontażu, oraz dodatkowe straty mechaniczne w przekładni). Ma za to wiele zalet takich jak: niska cena, niezawodność, brak potrzeby stosowania falownika.

Należy wspomnieć iż dla pracy generatorowej konieczne jest wstępne wzbudzenie generatora, zalecana jest także kompensacja mocy biernej (taką rolę pełnią kondensatory połączone w trójkąt na rys. 1). Elektrownia wykorzystująca generator indukcyjny nie może rozpocząć pracy w trybie autonomicznym bez pomocniczego źródła do początkowego wzbudzenia. Zwykle aby ograniczyć prąd rozruchowy używa się układu miękkiego załączania (soft start).

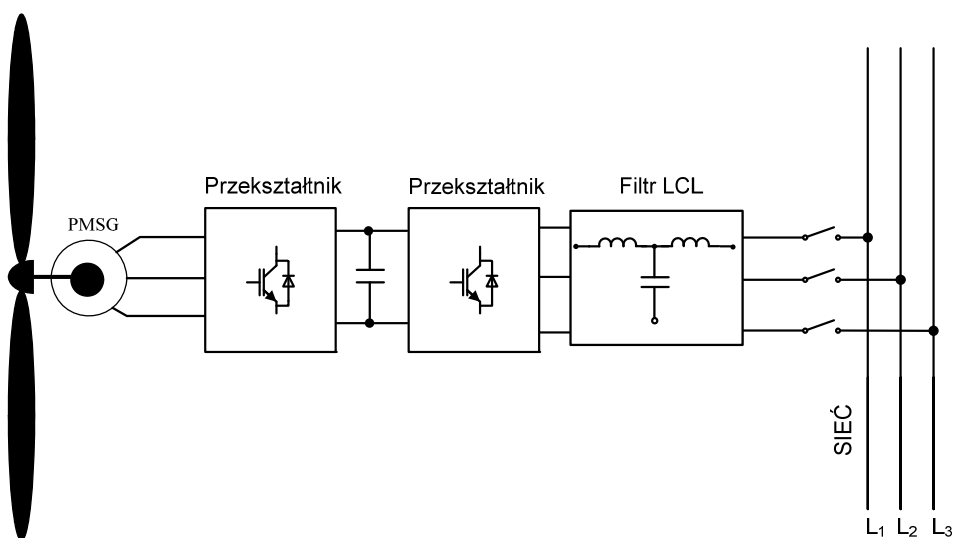
Stosunkowo niskie ceny magnesów produkowanych ze stopu NdFeB w ostatnich dziesięciu latach przyczyniły się do wzrostu popularności generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSG). Generatory te w odróżnieniu od generatorów indukcyjnych nie potrzebują wstępnego wzbudzenia, mają wysoką sprawność (do 97%). Mogą pracować przy niskich prędkościach obrotowych i dzięki temu nie trzeba stosować w tym przypadku przekładni. Jest wiele układów przekształtników pośredniczących pomiędzy PMSG a siecią. Najtańszym

rozwiązaniem jest prostownik pasywny diodowy za nim stałoprądowy obwód pośredniczący który zasila falownik przesyłający energię do sieci.



Rys. 2. Generator z magnesami trwałymi

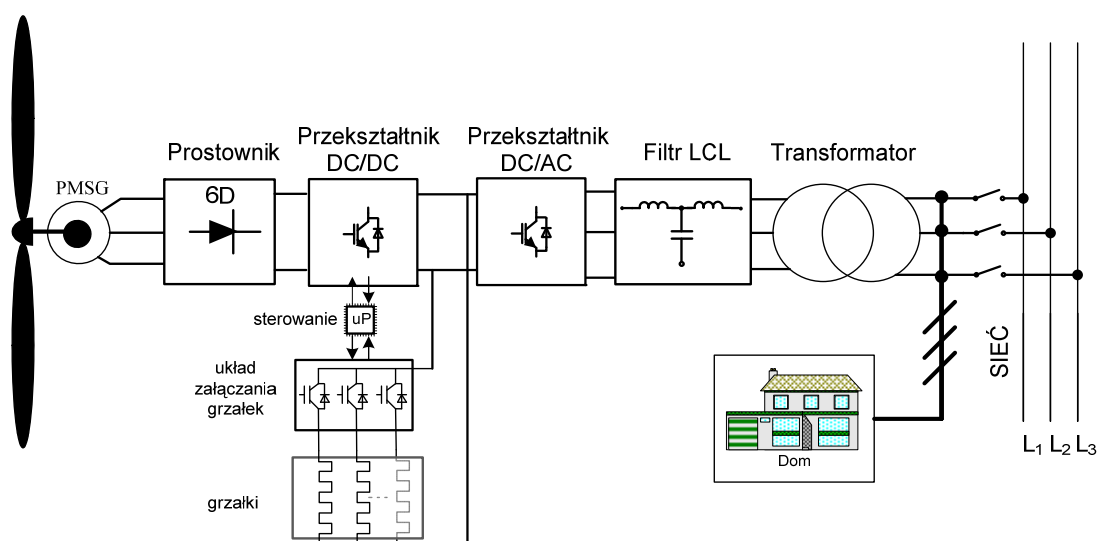
Pomimo zalet jaką jest prostota układ ma jedną poważną wadę – nie ma możliwości podwyższenia napięcia otrzymanego z generatora co znacznie ogranicza zakres pracy generatora. Dodatkowo prąd pobierany z generatora nie jest sinusoidalny. Rozwiązaniem spotykanym w pełnowymiarowych elektrowniach wiatrowych z generatorami z magnesami trwałymi jest połączenie tzw. „back-to-back” dwóch przekształtników trójfazowych.



Rys. 3. Przekształtniki w układzie „back-to-back” [3]

Jest to o tyle korzystne, iż przekształtnik od strony generatora pełni rolę prostownika aktywnego dzięki czemu prądy fazowe pobierane z generatora są sinusoidalne i zgodne w fazie z napięciami generowanymi przez generator.

Efektom czego są mniejsze tętnienia na wale generatora oraz zredukowanie strat w uzwojeniach spowodowane wyższymi harmonicznymi prądu obciążenia. Nie jest to tak istotne w przypadku niewielkich mocy więc stosowanie tego drogiego rozwiązania nie jest zwykle opłacalne. Wybrany przez nas to kaskadowe połączenie prostownika diodowego, układu podwyższającego napięcie typu „boost” oraz trójfazowego falownika napięcia.

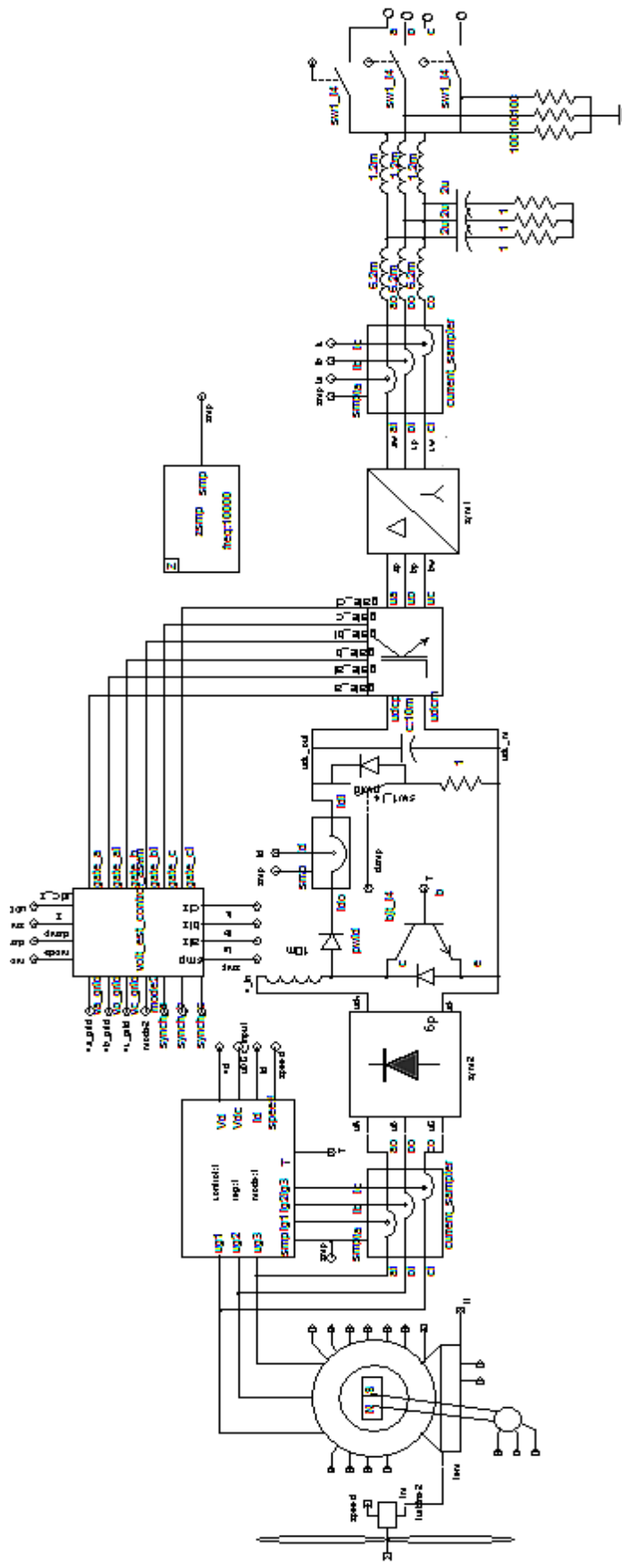


Rys. 4. Pełny schemat elektrowni opartej o generator PMSG

Z punktu widzenia oddawania energii do sieci ważne jest sterowanie przekształtnikiem od strony sieci dlatego w tym artykule autorzy ograniczą się do analizy pracy tylko tej części elektrowni.

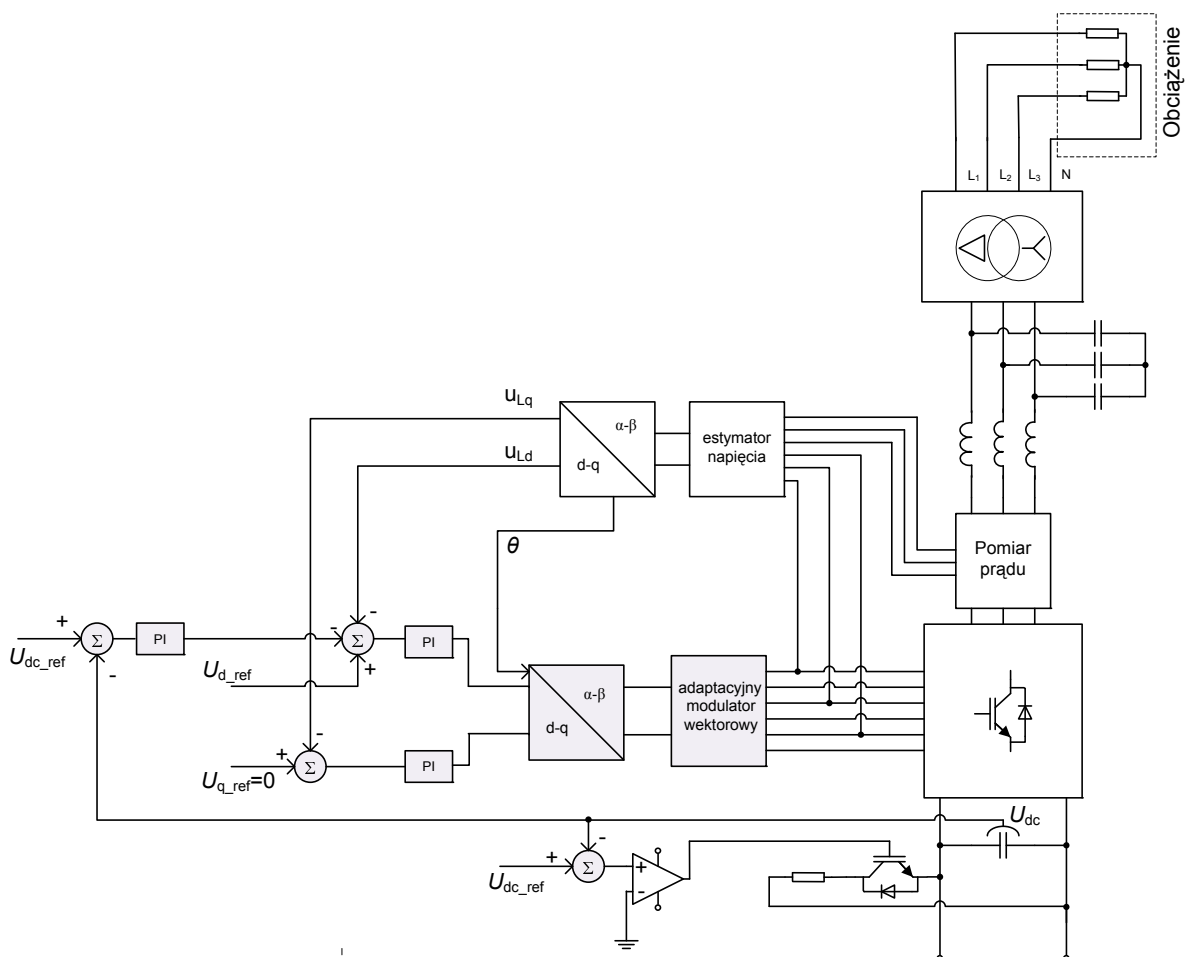
3. PRACA AUTONOMICZNA ELEKTROWNI WIATROWEJ

Symulacje obu trybów prac zostały wykonane w programie Saber firmy Synopsys. W układzie modelowym opartym o schemat blokowy (rys. 5). Występują modele: turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu i średnicy 7 m, generatora PMSG o mocy 5 kW, prostownika diodowego, transformatora separacyjnego, stycznika do pracy na sieć, a także bloki próbkująco-pamiętające napięć oraz prądów i sterowania.



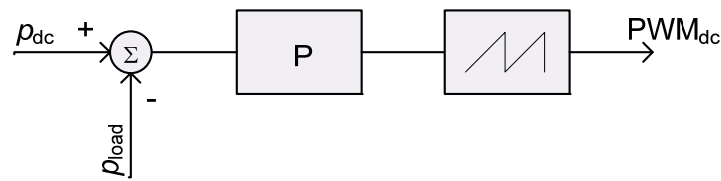
Rys. 5. Model symulacyjny w programie Saber firmy Synopsys

W pracy autonomicznej zastosowaliśmy zobrazowany na rysunku poniżej algorytm Direct Voltage Control (bezpośrednie sterowanie napięciem).



Rys. 6. Blokowy schemat algorytmu sterowania elektrowni przy pracy autonomicznej [8]

Uśredniony dobowo pobór mocy przez gospodarstwo domowe oscyluje zazwyczaj około (1 – 3) kW w przeciwieństwie do sieci elektroenergetycznej, która może przyjąć praktycznie dowolną ilość wyprodukowanej przez MEW energii (ograniczeniem jest moc znamionowa generatora). Napięcie w obwodzie pośredniczącym utrzymywane jest na stałym poziomie w okresie gdy moc generowana jest większa niż moc dostarczana do obciążenia przez załączenie rezystora (grzałki podgrzewającej wodę) zwierającego obwód DC, na którym ten nadbytek się wytraca (rys. 7).



Rys. 7. Schemat blokowy sterowania

gdzie:

$$p_{dc} = i_{dc} \cdot u_{dc}$$

$$p_{load} = i_{L_1} \cdot u_{L_1} + i_{L_2} \cdot u_{L_2} + i_{L_3} \cdot u_{L_3}$$

$$K_P = \frac{1}{f_{sw}} = \frac{1}{5000}$$

$u_{L_1}, u_{L_2}, u_{L_3}$ – wartości estymowane napięć fazowych,

u_{dc} – wartość mierzona napięcia w obwodzie pośredniczącym,

i_{dc} – wartość mierzona prądu w obwodzie pośredniczącym,

i_a, i_b, i_c – wartości mierzone prądu w obwodzie pośredniczącym,

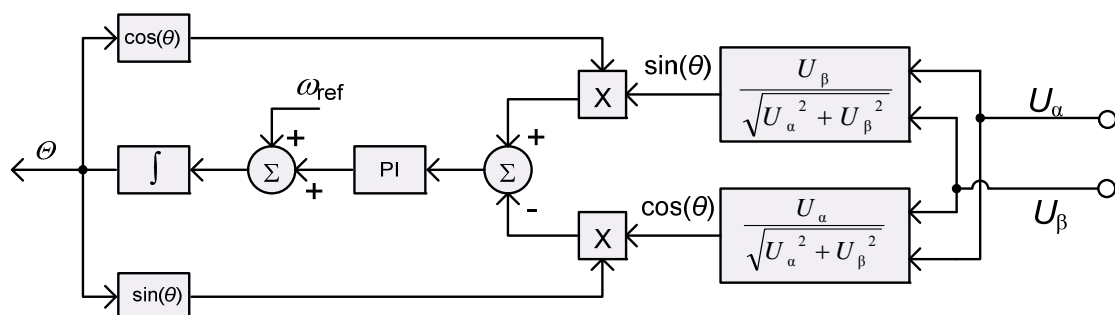
K_P – wzmacnienie regulatora proporcjonalnego (P),

f_{sw} – częstotliwość łączeń,

PWM_{dc} – sygnał sterujący tranzystorem w obwodzie pośredniczącym.

4. SYNCHRONIZACJA Z SIECIĄ ELEKTROWNI WIATROWEJ

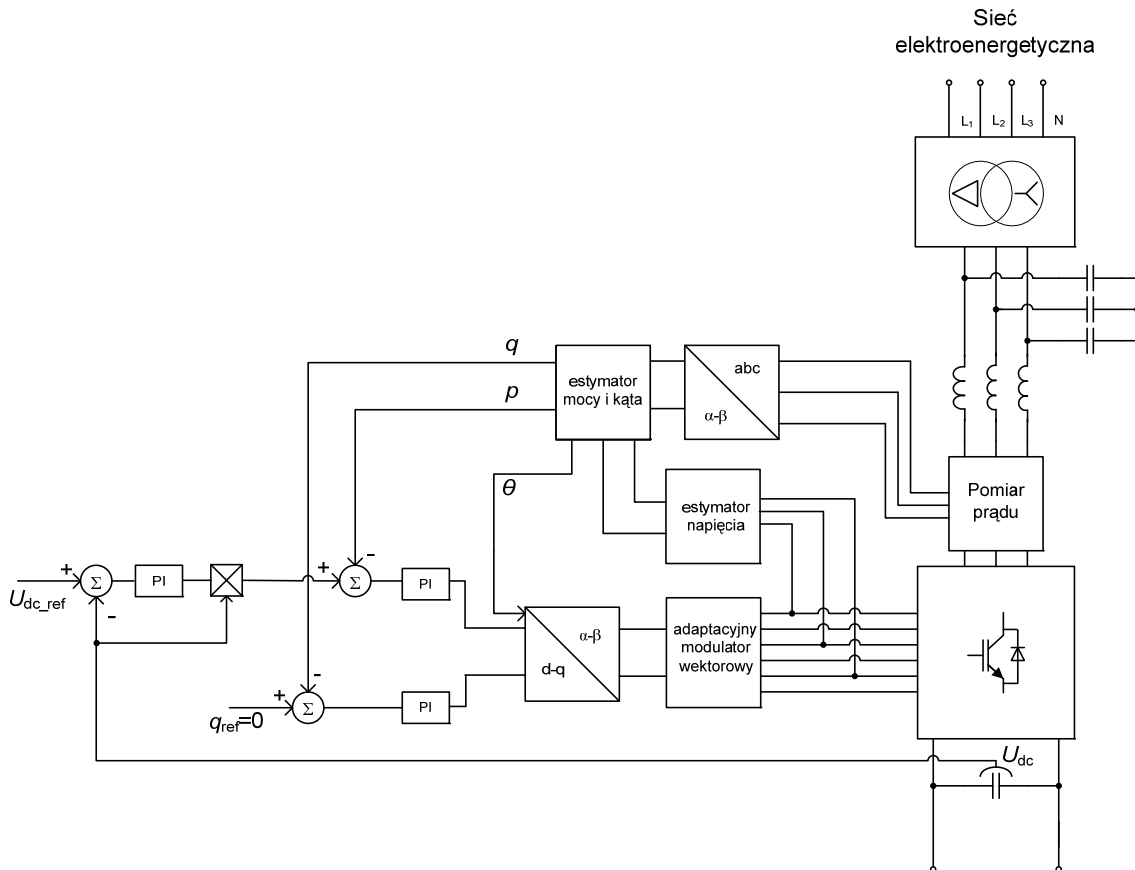
Pętla synchronizacji fazy (phase locked loop - PLL) w energoelektronice zazwyczaj służy do pozyskania informacji o kącie napięcia sieciowego celem synchronizacji z siecią. W opisywanym układzie sterowania PLL zrealizowany jest w stacjonarnym układzie współrzędnych (rys. 8).



Rys. 8. Pętla synchronizacji fazy zrealizowana w stacjonarnym układzie współrzędnych [8]

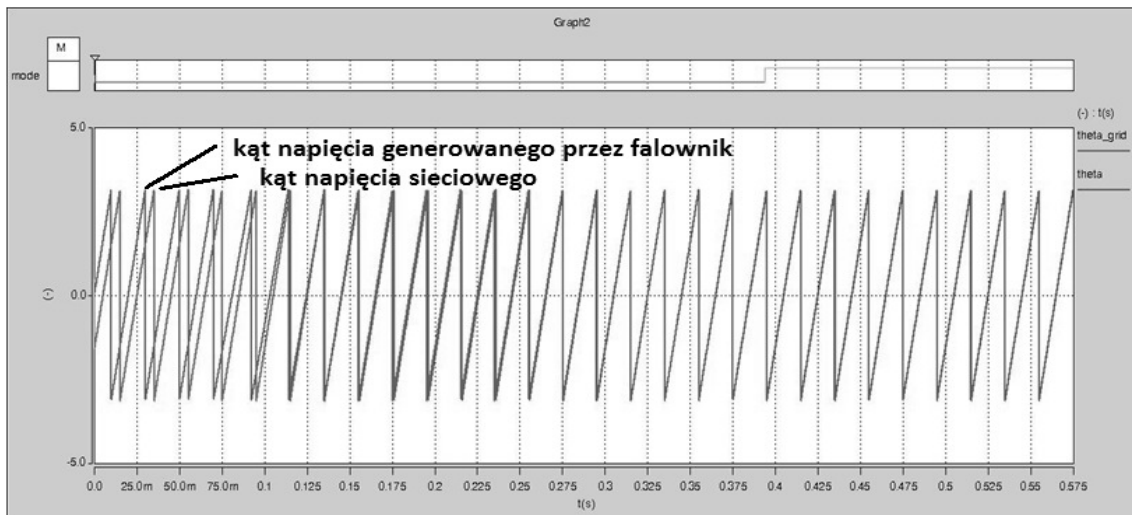
3. PRACA PRZY PODŁĄCZENIU DO SIECI I PRZEJŚCIE DO PRACY AUTONOMICZNEJ

Według norm obowiązujących w Polsce [2] napięcie sieci musi spełniać dwa warunki: wartość skut. napięcia powinna zawierać się w granicach 230 VAC ± 10 VAC oraz częstotliwość powinna mieścić się w przedziale 50 Hz ± 1 Hz. Powyższe wymagania muszą być spełnione inaczej uznaje się, że praca małej elektrowni wiatrowej może prowadzić do dalszego zaburzenia sieci. Dla naszych badań przyjęliśmy, że kiedy energia dostarczana przez sieć nie spełnia tych parametrów następuje przejście elektrowni do pracy autonomicznej. Elektrownia do pracy przy podłączeniu do sieci wykorzystuje wektorową implementację algorytmu bezpośredniego sterowania mocą (DPC-SVM)

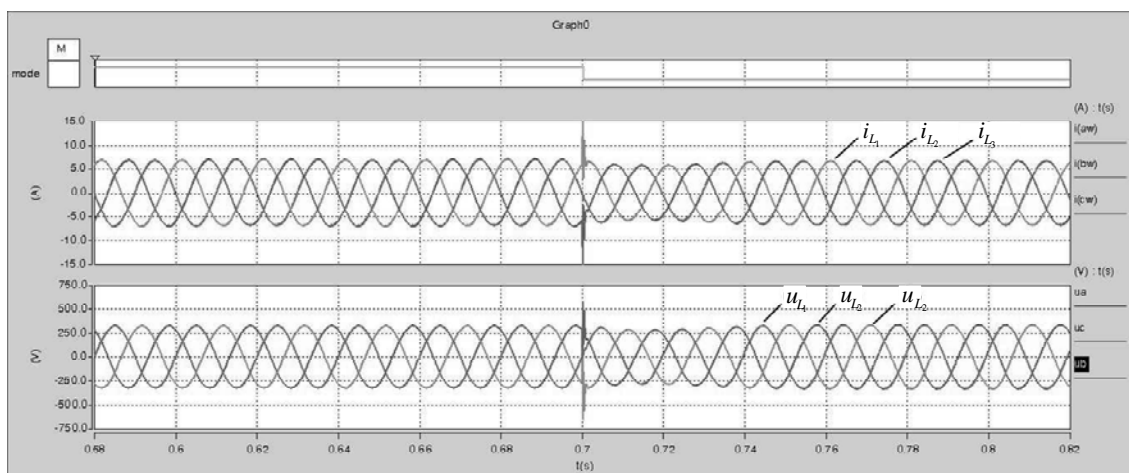


Rys. 9. Schemat blokowy układu sterowania dla pracy przy podłączeniu do sieci [7]

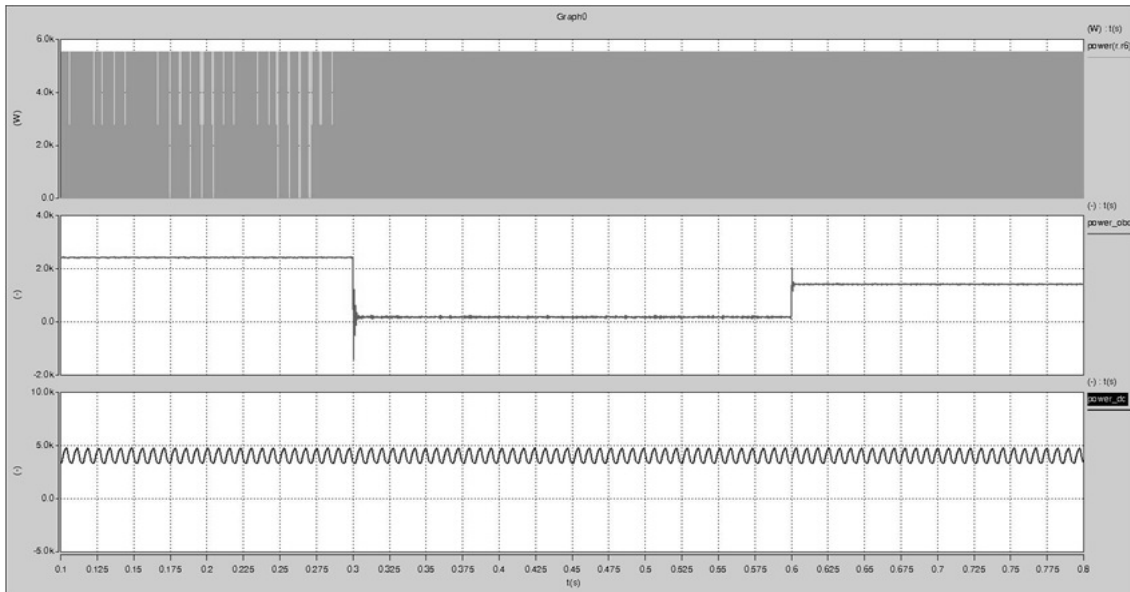
4. WYBRANE WYNIKI SYMULACYJNE



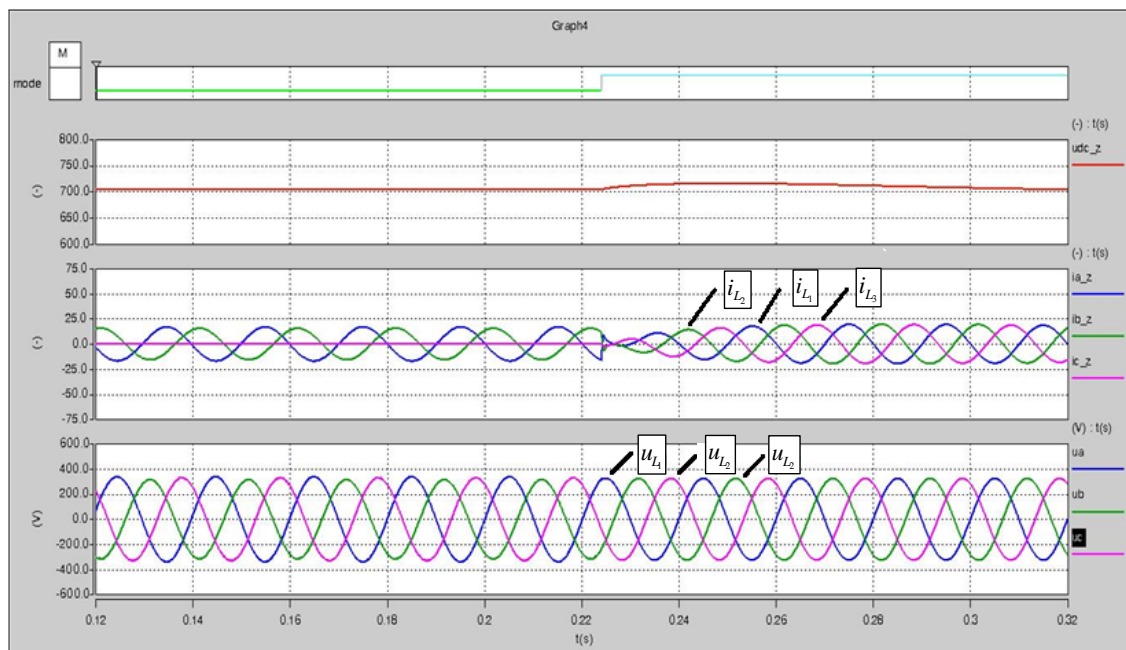
Rys. 10. Od góry: sygnał przejścia do pracy na sieć, synchronizacja z siecią na podstawie PLL (kąt napięcia generowanego przez sieć i zadany kąt napięcia gen. przez falownik)



Rys. 11. Przejście z pracy na sieć do pracy autonomicznej (od góry: sygnał sterujący, prądy fazowe, napięcia fazowe)



Rys. 12. Skokowa zmiana obciążenia podczas pracy autonomicznej (moc na rezystorze „chopper”, moc dostarczana do obciążenia, moc dostarczana do obwodu pośredniczącego)



Rys. 13. Przejście do pracy autonomicznej w przypadku braku napięcia w jednej fazie obrazujące działanie transformatora symetryzującego (od góry: sygnał sterujący, napięcie w obwodzie pośredniczącym, prądy fazowe płynące po stronie sieci transformatora sepa-racyjnego)

5. WNIOSKI

Badania symulacyjne algorytmów sterowania wykonano bazując na modelu przekształtnika złożonego z rzeczywistych łączników tranzystorowych, powyższe przebiegi dowodzą poprawności pracy tego układu modelowego. Przepięcia powstające podczas przełączania z trybu pracy przy podłączeniu do sieci do trybu pracy autonomicznej zostały ograniczone do bezpiecznego dla elementów półprzewodnikowych poziomu (rys. 11). W przypadku nadprodukcji energii elektrycznej nadmiar jest rozpraszany w obwodzie chopper'a, dlatego zmniejszenie obciążenia w pracy autonomicznej nie powoduje niekontrolowanego wzrostu napięcia w obwodzie pośredniczącym.

Prace finansowane w ramach projektu rozwojowego nr N R01 0015 06/2009 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. IEC 61400-02 Design requirements for small wind turbines, norma IEC, 2007.
2. PN-EN 50160:2008 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008.
3. Blaabjerg F., Chen Z.: Power electronics for modern wind turbines, Wydawnictwo Morgan&Claypool, New York, 2006.
4. Boczar T.: „Energetyka wiatrowa Aktualne możliwości wykorzystania, Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2008.
5. Cruz I. Soria E.: „Wind Power in Spain, <http://www.evwind.es/>
6. Godoy M. , Chakraborty S., Wood R.: Induction Generators for Small Wind Energy Systems, IEEE Power Electronics Society NEWSLETTER 19, p. 97 – 102, 2006.
7. Malinowski M., Jasiński M., Kaźmierkowski M. P.: Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space-Vector Modulation (DPC-SVM) Three-Phase PWM Rectifiers, IEEE Transaction on Industry Applications, VOL.37, NO.4, p. 447 – 454, July/August 2001.
8. Teodorescu R., Blaabjerg F.: Flexible Control of Small Wind Turbines With Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode, IEEE Transactions on Power Electronics, VOL 19, NO5, p. 1323 – 1332, September 2004.

Rękopis dostarczono dnia 19.10.2010 r.

ANALYSIS OF WORK
OF A SMALL WIND TURBINE IN GRID CONNECTED
AND STAND ALONE MODE

Paweł MŁODZIKOWSKI, Adam MILCZAREK,
Mariusz MALINOWSKI

ABSTRACT *In this article authors wish to shortly introduce basic topologies of converters in small wind turbines and chosen for simulation evaluation. Two strategies of control are described in this paper: one for a wind turbine connected to the grid and one for stand-alone power generation.*

Mgr inż. Paweł MŁODZIKOWSKI – w latach 2003 – 2008 studiował na Wydziale Transportu Politechniki Radomskiej. W roku 2008 obronił pracę magisterską pt.: „Metoda bezczujnikowego sterowania silnika bezszczotkowego prądu stałego”. Od 1 października 2008 doktorant w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej.



Adam MILCZAREK – skończył II L.O. w Końskich, a następnie w 2005 roku rozpoczął studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej na kierunku Elektrotechnika. Aktualnie studiuje na piątym roku na specjalizacji Energoelektronika.

Dr inż. Mariusz MALINOWSKI – w 1997 r. ukończył z wynikiem celującym studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. W latach 2001 – 2002 był Stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Doktorat z wyróżnieniem uzyskał w 2001 roku. Za rozprawę doktorską pt. "Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers" otrzymał w roku 2002 Nagrodę Siemens. Od roku 2002 jest adiunktem w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej PW. Od 2010 associate editor *IEEE Industrial Electronics Magazine*.



