

**Tomasz Lerch**  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## WSPÓLPRACA ELEKTROWNI WIATROWEJ Z MASZYNĄ DWUSTRONNIE ZASILANĄ Z SYSTEMEM ENERGETYCZNYM W WARUNKACH NIESYMETRII NAPIĘĆ

### WIND TURBINE WITH DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR OPERATION IN UNBALANCED ELECTRIC POWER SYSTEM

**Abstract:** This paper shows results of simulation investigations of wind turbine with doubly-fed induction generator operation in unbalanced electric power system. The aim of presented research was analysis of impact of network events on the wind power plant mechanical system. In order to realize the investigations a dynamic mathematical model of wind power plant has been created. The model allows for mechanical system of power plant, rotor-side electronic power converter, slip-ring machine and control system. The transmission and the turbine have been modeled as a six mass oscillator reduced to the generator shaft. The study results show that voltage unbalance and short-term voltage dips cause torque surge on the shaft and transmission of the wind power plant. A modification of method of active power control has been proposed in order to reduce the impact load of the mechanical system. The results of simulations of wind power plant transients with modified control system are quite promising: a reduction of impact load of mechanical system up to 72% has been reached.

#### 1. Wstęp

Współpraca elektrowni wiatrowej z systemem energetycznym to problem często poruszany w literaturze dotyczącej odnawialnych źródeł energii. Najczęściej jednak analizowany jest wpływ przyłączenia elektrowni wiatrowych na system elektroenergetyczny. Biorąc pod uwagę wysokie wymagania odnośnie bezawaryjności stawiane elektrowniom wiatrowym ważny jest także problem wpływu zaburzeń w systemie energetycznym na elementy układu elektro-mechanicznego elektrowni. Problem jest tym bardziej istotny, że elektrownie wiatrowe są zazwyczaj przyłączone do systemu energetycznego w punktach oddalonych od dużych źródeł energii, gdzie znacznie częściej występują różnego rodzaju zaburzenia. Celem badań, których wyniki przedstawia niniejszy artykuł, była analiza współpracy elektrowni wiatrowej z systemem elektroenergetycznym w warunkach niesymetrii napięć. Zaproponowano także metodę redukcji obciążeń układu mechanicznego będących skutkiem pracy przy niesymetrii napięć.

#### 2. Model matematyczny elektrowni wiatrowej

W modelu elektrowni wiatrowej uwzględniono turbinę wiatrową, przekładnię mechaniczną oraz układ generatora składający się z maszyny pierścieniowej, przekształtnika wirnikowego

i układu sterowania. Pozostałe elementy elektrowni takie jak transformator dopasowujący czy układ sterowania łopatom wirnika zostały pominięte ponieważ nie miały znaczenia dla badanego zjawiska.

##### 2.1 Model turbiny wiatrowej

Model turbiny wiatrowej [1] został uproszczony do układu statycznego przetwarzającego moc kinetyczną strumienia wiatru na moment mechaniczny na wale turbiny. Model turbiny zakłada stały kąt nachylenia łopat wirnika, a parametry turbiny zostały tak dobrane aby model oddawał działanie trójłopatowego silnika wiatrowego o mocy znamionowej 1,5MW osiąganą przy prędkości wiatru 12m/s. Moment na wale turbiny obliczany jest zgodnie ze wzorem (1).

$$T_T = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho \Pi R_T^2 \frac{V_w^3}{\omega_T} \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza;  $R_T$  – długość łopaty turbiny;  $V_w$  – prędkość wiatru;  $\omega_T$  – prędkość kątowna turbiny;  $C_p(\lambda)$  – współczynnik mocy turbiny;  $\lambda$  – współczynnik szybkoobrotowości turbiny.

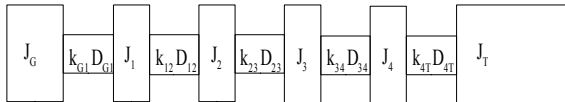
Typową cechą turbin wiatrowych jest występowanie maksimum mocy przy określonej prędkości obrotowej [2]. Strategia sterowania

generatora elektrycznego pracującego w elektrowni wiatrowej polega na zadawaniu mocy maksymalnej rozwijanej przez turbinę przy danej prędkości wiatru. Moc maksymalną wylicza się z równania (2) określającego zależność pomiędzy mocą a prędkością kątową przy maksymalnej wartości współczynnika  $C_p$  dla danej turbiny wiatrowej.

$$P_{Tmax} = C_{pmax} \frac{1}{2} \rho \Pi R_T^2 \left( \frac{\omega_T R_T}{\lambda_{max}} \right)^3 \quad (2)$$

## 2.2 Model układu mechanicznego elektrowni wiatrowej

Układ mechaniczny modelowanej elektrowni wiatrowej został zamodelowany jako oscylator 6 masowy [3]. Model ten uwzględnia moment bezwładności wirnika generatora elektrycznego, turbiny wiatrowej, wszystkich elementów przekładni mechanicznej oraz wszystkie sprężystości i tłumienia elementów łączących poszczególne elementy układu. Wszystkie wielkości zostały sprowadzone na wał generatora elektrycznego. Uwzględnienie wszystkich elementów przekładni mechanicznej wynika z zamierzonego celu badania modelu elektrowni jakim jest analiza obciążeń układu mechanicznego. Model układu mechanicznego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Model układu mechanicznego

Oznaczenie  $J_G$  na rysunku 1 oznacza moment bezwładności wirnika generatora, zaś  $J_T$  to sprowadzony na wał wirnika moment bezwładności turbiny. Pozostałe elementy to momenty bezwładności kół zębatych przekładni mechanicznej oraz współczynniki sprężystości i tłumienia wałów łączących poszczególne elementy przekładni. Model matematyczny układu mechanicznego stawi układ 6 równań różniczkowych (3) opisujących jego dynamikę.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_G}{dt} &= \frac{1}{J_G} (T_e - T_{kG1} - T_{DG1}) \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{J_1} (T_{kG1} + T_{DG1} - T_{k12} - T_{D12}) \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J_2} (T_{k12} + T_{D12} - T_{k23} - T_{D23}) \\ \frac{d\omega_3}{dt} &= \frac{1}{J_3} (T_{k23} + T_{D23} - T_{k34} - T_{D34}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_4}{dt} &= \frac{1}{J_4} (T_{k34} + T_{D34} - T_{k4T} - T_{D4T}) \\ \frac{d\omega_T}{dt} &= \frac{1}{J_T} (T_{k4T} + T_{D4T} + T_m) \end{aligned}$$

## 2.3 Model maszyny indukcyjnej

Model maszyny indukcyjnej został zapisany we współrzędnych ortogonalnych  $xy$  [4], układ odniesienia związany został w wektorem napięcia stojana.

$$\begin{aligned} u_{sx} &= R_s i_{sx} + \frac{d}{dt} \Psi_{sx} - \omega_k \Psi_{sy} \\ u_{sy} &= R_s i_{sy} + \frac{d}{dt} \Psi_{sy} + \omega_k \Psi_{sx} \\ u_{rx} &= R_r i_{rx} + \frac{d}{dt} \Psi_{rx} - (\omega_k - \omega_e) \Psi_{ry} \\ u_{ry} &= R_r i_{ry} + \frac{d}{dt} \Psi_{ry} + (\omega_k - \omega_e) \Psi_{rx} \\ T_e &= p_b (\Psi_{sx} i_{sy} - \Psi_{sy} i_{sx}) \end{aligned} \quad (4)$$

przy czym składowe strumieni stojana i wirnika mają postać:

$$\begin{aligned} \Psi_{sx} &= L_s i_{sx} + L_m i_{rx} \\ \Psi_{sy} &= L_s i_{sy} + L_m i_{ry} \\ \Psi_{rx} &= L_r i_{rx} + L_m i_{sx} \\ \Psi_{ry} &= L_r i_{ry} + L_m i_{sy} \end{aligned} \quad (5)$$

Równanie mechaniczne maszyny indukcyjnej zostało ujęte w modelu matematycznym (3) układu mechanicznego, a więc nie występuje w równaniach (4). W modelu maszyny indukcyjnej dokonuje się sprowadzenia wielkości wirnika na stronę stojana (oznacza się znakiem *prim*), oznaczenia te zostały pominięte dla uproszczenia zapisu.

## 2.4 Model przekształtnika energoelektronicznego

Przekształtnik energoelektroniczny zasilający wirnik maszyny dwustronnie zasilanej składa się z falownika sieciowego, układu pośredniczącego z kondensatorem oraz falownika wirnikowego. Układ przekształtnika typu AC/DC/AC umożliwia dwukierunkowy przepływ energii, a dzięki zastosowaniu sterowania wektorowego obu falowników pozwala na realizować niezależne sterowanie przetwarzaną mocą czynną i bierną. Falownik sieciowy z układem regulacji ma za zadanie utrzymywać stałą zadaną wartość napięcia na kondensatorze w obwodzie pośredniczącym sterując w ten sposób przepływem mocy czynnej przez przekształtnik [5]. Z tego względu celem uproszczenia w modelu przekształtnika założono stałą

wartość napięcia w obwodzie pośredniczącym pomijając elementy falownika sieciowego. Sterowanie falownika wirnikowego zostało zrealizowane w oparciu o metodę modulacji szerokości impulsów polegającą na modulacji przebiegu trójkątnego o częstotliwości 1500Hz sygnałem referencyjnym napięcia wypracowanemu w układzie sterowania mocą.

## 2.5 Układ sterowania mocą generatora

Sterowanie mocą czynną i bierną wydawaną przez maszynę dwustronnie zasilaną do sieci oparte jest o teorię mocy chwilowych Akagiego [6]. Dla stojana maszyny indukcyjnej moc chwilowa ma postać:

$$\begin{aligned} p_s &= u_{sx}i_{sx} + u_{sy}i_{sy} \\ q_s &= u_{sy}i_{sx} - u_{sx}i_{sy} \end{aligned} \quad (6)$$

Podstawiając w miejsce składowych prądu stojana wartości wynikające z równań (5) oraz uwzględniając prądowe zasilanie wirnika dla układu sterowania wektorowego związanego z wektorem napięcia stojana dostaje się następujące równania:

$$\begin{aligned} p_s &= \frac{1}{L_s} \left( \frac{d}{dt} \psi_{sx} \psi_{sx} + \frac{R_s}{L_s} \psi_{sx}^2 - \frac{R_s L_m}{L_s} i_{rx} \psi_{sx} - \omega_k \psi_{sy} \psi_{sx} \right) - \\ &\quad - \frac{L_m}{L_s} \left( \frac{d}{dt} \psi_{sx} i_{rx} + \frac{R_s}{L_s} \psi_{sx} i_{rx} - \frac{R_s L_m}{L_s} i_{rx}^2 - \omega_k \psi_{sy} i_{rx} \right) \\ q_s &= -\frac{1}{L_s} \left( \frac{d}{dt} \psi_{sx} \psi_{sy} + \frac{R_s}{L_s} \psi_{sx} \psi_{sy} - \frac{R_s L_m}{L_s} \psi_{sy} i_{rx} - \omega_k \psi_{sy}^2 \right) + \\ &\quad + \frac{L_m}{L_s} \left( \frac{d}{dt} \psi_{sx} i_{ry} + \frac{R_s}{L_s} \psi_{sx} i_{ry} - \frac{R_s L_m}{L_s} i_{rx} i_{ry} - \omega_k \psi_{sy} i_{ry} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

W stanie ustalonym przy pominięciu rezystancji stojana ( $R_s=0$ ) równania mocy mają postać:

$$\begin{aligned} p_s &= -\frac{L_m}{L_s} u_{sx} i_{rx} \\ q_s &= -\frac{1}{L_s} \frac{u_{sx}^2}{\omega_k} + \frac{L_m}{L_s} u_{sx} i_{ry} \end{aligned} \quad (8)$$

Z powyższych równań wynika, że moc czynna w układzie sterowania związanym z wektorem napięcia stojana zależy od składowej  $x$  wektora prądu wirnika zaś moc bierna zależy od składowej  $y$ .

## 2.6 Realizacja układu sterowania mocą generatora

Z równań (8) wynika, że układ sterowania mocą sprowadza się to regulacji składowych  $xy$  prądu wirnika. Do zrealizowania układu wymagana jest informacja o kącie  $\varphi$  określonym jako:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_e \quad (9)$$

przy czym  $\varphi_u$  jest kątem położenia wektora przestrzennego napięcia stojana wyliczanym zgodnie ze wzorem:

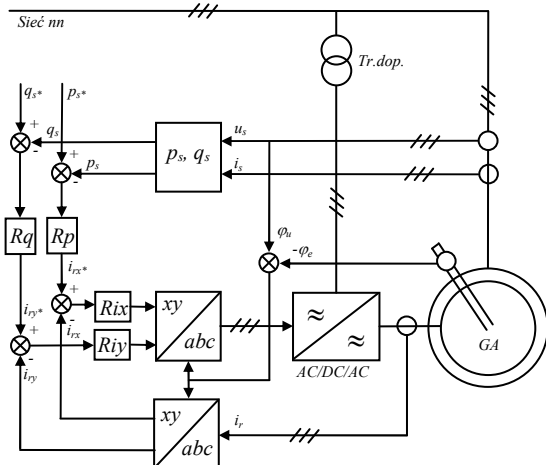
$$\varphi_u = a \tan \left( \frac{u_\beta}{u_\alpha} \right) \quad (10)$$

zaś  $\varphi_e$  jest kątem położenia wirnika liczonym w stopniach elektrycznych zgodnie ze wzorem:

$$\varphi_e = p \int \omega_r dt + \varphi_0 \quad (11)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów;  $\varphi_r$  – prędkość kątowna wirnika maszyny;  $\varphi_0$  – położenie początkowe wirnika maszyny.

Układ sterowania wektorowego mocą czynną i bierną maszyny dwustronnie zasilanej przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat układu sterowania mocą generatora

Sygnały wartości zadanej mocy czynnej i biernej stojana  $p_s^*$   $q_s^*$ , pochodzą z nadarzędziowego układu sterowania mocą elektrowni. Moc czynna zadawana jest zgodnie z zależnością (2), natomiast zadana wartość mocy biernej zależy od aktualnego zapotrzebowania systemu elektroenergetycznego. Należy przy tym uwzględnić, że maszyna dwustronnie zasilana przetwarza moc czynną w torze stojana i wirnika. Zatem całkowita przetwarzana moc czynna wynosi:

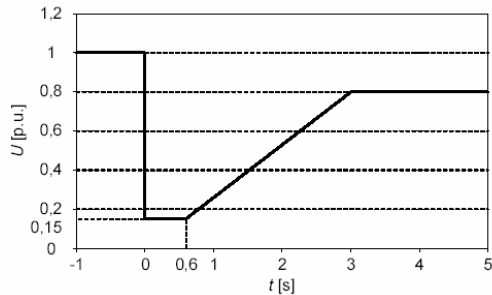
$$p = p_s - s \cdot p_s \quad (12)$$

gdzie  $s$  to poślizg maszyny dodatni dla prędkości podsynchronicznej, a ujemny dla nadsynchronicznej.

## 3. Badania symulacyjne elektrowni wiatrowej

Elektrownie wiatrowe zazwyczaj dołączone są do systemu elektroenergetycznego do linii

średniego i wysokiego napięcia. W liniach tych zgodnie z normą składowa symetryczna przeciwna napięcie może wynosić do 2% napięcia znamionowego. Oprócz tego zabezpieczenia nie powinny wyłączać elektrowni wiatrowych w przypadku zapadu napięcia którego głębokość długość trwania określa wykres przedstawiony na rysunku 3.

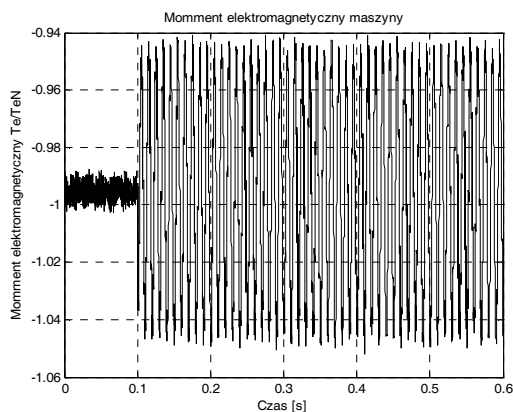


Rys. 3. Dopuszczalna głębokość i długość trwania zapadu napięcia

Podobnie jak w maszynach indukcyjnych pojawienie się niesymetrii napięć zasilających stojan maszyny dwustronnie zasilanej wywołuje składową zmienną momentu elektromagnetycznego o częstotliwości 100Hz, która wywołuje dodatkowe obciążenie układu mechanicznego.

### 3.1 Praca elektrowni przy składowej przeciwnej napięć 2%U<sub>N</sub>

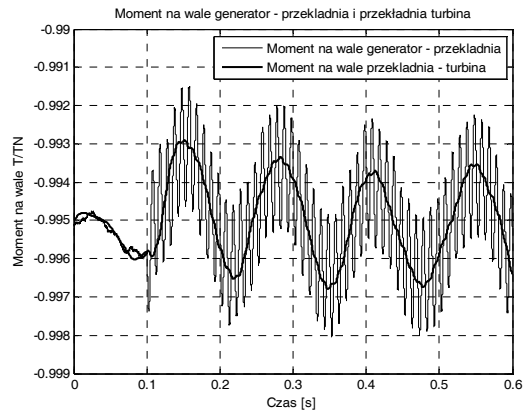
Zasymulowana sytuacja przedstawia pojawienie się 2% składowej przeciwnej napięć w chwili czasowej 0,1s. Elektrownia wiatrowa pracuje w stanie ustalonym z mocą znamionową 1,5MW.



Rys. 4. Moment elektromagnetyczny generowany przez maszynę

Rysunki 4 i 5 przedstawiają odpowiednio moment elektromagnetyczny generowany przez maszynę oraz moment na wale łączącym generator z przekładnią mechaniczną oraz przekład-

nię z turbiną wiatrową. W chwili wystąpienia niesymetrii napięć w przebiegu momentu elektromagnetycznego generowanego przez maszynę pojawia się składowa zmienna o amplitudzie około 5%T<sub>N</sub> i częstotliwości 100Hz.

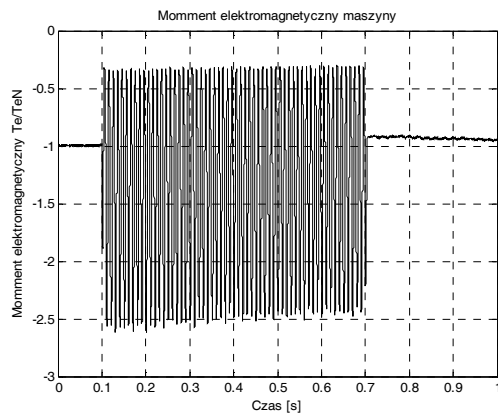


Rys. 5. Momenty w poszczególnych punktach przekładni mechanicznej

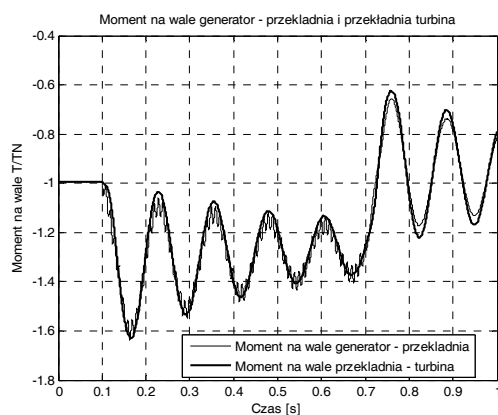
Składowa zmienna momentu elektromagnetycznego wywołana niesymetrią napięć na poziomie 2%U<sub>N</sub> w bardzo małym stopniu przenosi się na układ mechaniczny co widać na rys. 5. Składowa zmienna momentu na wale łączącym generator z przekładnią ma amplitudę około 0,1%T<sub>N</sub>. Oscylacje w układzie mechanicznym będące skutkiem tego pobudzenia, uwiadcniają się jako składowa zmienna momentu na wale przekładnia – turbina i mają amplitudę nie przekraczającą 0,2%T<sub>N</sub>. Wielkości te są znacznie mniejsze niż obciążenia układu mechanicznego wynikające ze zmian prędkości wiatru i nie mają większego wpływu na pracę elektrowni wiatrowej.

### 3.2 Praca elektrowni przy zapadzie napięcia w jednej fazie do 0,15U<sub>N</sub>

Zgodnie z wymaganiami operatora systemu elektroenergetycznego elektrownia wiatrowa nie może być odłączona od sieci w przypadku wystąpienia zapadu napięcia do 0,15U<sub>N</sub> przy czasie trwania nie dłuższym niż 0,6s (rys. 3). Przebiegi poszczególnych wielkości mechanicznych w takim stanie pracy zostały przedstawione na rysunkach 6 i 7. W chwili wystąpienia zapadu napięcia do 0,15U<sub>N</sub> w przebiegu momentu elektromagnetycznego pojawia się składowa zmienna o amplitudzie około 110%T<sub>N</sub> i częstotliwości 100Hz.



Rys. 6. Moment elektromagnetyczny generowany przez maszynę



Rys. 7. Momenty w poszczególnych punktach przekładni mechanicznej

Jak widać na rysunku 7 składowa zmienna momentu elektromagnetycznego wywołuje oscylacje w układzie mechanicznym o początkowej amplitudzie około  $60\%T_N$ . W przypadku, gdy elektrownia pracuje z mocą znamionową oznacza to przekroczenie wartości znamionowych momentu przenieszonego przez układ mechaniczny o 60%. Przeciążenie tego rzędu nie jest z pewnością niszczące dla układu mechanicznego, ale powoduje szybsze jego zużycie i wpływa na zwiększenie awaryjności elektrowni wiatrowej.

#### 4. Badania symulacyjne elektrowni wiatrowej ze zmodyfikowanym układem sterowania mocą

Modyfikacja układu sterowania ma na celu redukcję obciążeń układu mechanicznego a więc powinna zapewniać lepszą kontrolę momentu elektromechanicznego. Proponowana zmiana polega na zastąpieniu sterowania mocą czynną elektryczną na zaciskach stojana i wirnika generatora mocą mechaniczną na wale

maszyny. Moce elektryczna (na wyjściu) i mechaniczna (na wejściu) różnią się co do wielkości ze względu na straty w generatorze, przy czym generatory stosowane w elektrowniach dużej mocy osiągają bardzo wysokie sprawności. Z przeprowadzonych badań wynika, że proponowana zmiana sposobu sterowania mocą czynnej generatora nieznacznie wpływa na zmianę punktu pracy elektrowni wiatrowej i nie ma wpływu na efektywność przetwarzania energii wiatru. Moc mechaniczna na wale maszyny określona jest zależnością:

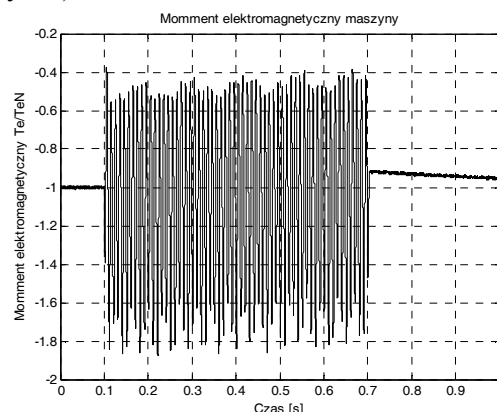
$$P_m = T_e \cdot \omega \quad (12)$$

Zatem do sterowania mocą mechaniczną konieczny jest pomiar prędkości kątowej wału maszyny oraz momentu elektromechanicznego generowanego przez maszynę. W przypadku maszyny pierścieniowej wyznaczanie momentu elektromechanicznego jest stosunkowo proste ze względu na możliwość pomiaru prądów stojana i wirnika. Przekształcając równanie momentu (równania 4) dostaje się postać:

$$T_e = p_b L_m (i_{rx} i_{sy} - i_{ry} i_{sx}) \quad (13)$$

#### 4.1 Praca elektrowni przy zapadzie napięcia w jednej fazie do 0,15UN

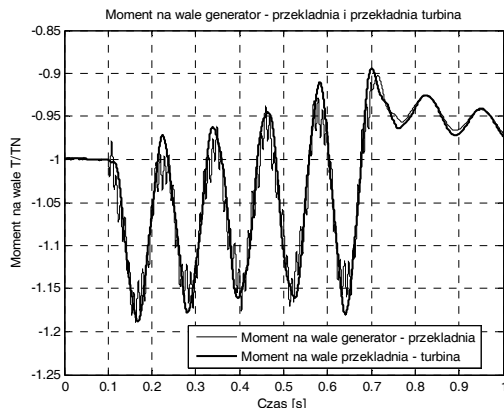
Jak zostało przedstawione w punkcie 3.1 składowa przeciwna napięcia do  $2\%U_N$  dopuszczalna w sieciach do których przyłączone są elektrownie wiatrowe nie powoduje znaczących obciążeń układu mechanicznego. Dlatego też pod uwagę wzięto prace elektrowni ze zmodyfikowanym układem sterowania przy maksymalnym zapadzie napięcia dopuszczalnym normą (rys. 3).



Rys. 8. Moment elektromagnetyczny generowany przez maszynę

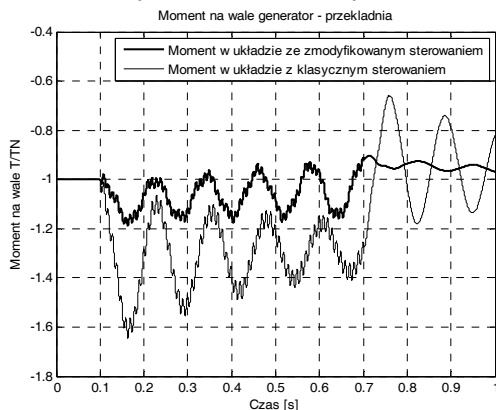
W takich samych warunkach pracy jak przedstawiona w punkcie 3.2 amplituda składowej zmiennej momentu elektromagnetycznego wy-

nosi około  $60\%T_N$ , zatem została zredukowana o około 45%.



Rys. 9. Momenty w poszczególnych punktach przekładni mechanicznej

Jak widać na rysunku 9 znacznej redukcji uległy oscylacje w układzie mechanicznym elektrowni. W chwili wystąpienia zapadu napięcia w jednej fazie składowa zmienna momentu elektromagnetycznego wywołuje oscylacje w układzie mechanicznym o początkowej amplitudzie około  $17\%T_N$ , co stanowi redukcję obciążeń układu mechanicznego o około 72% w stosunku do analogicznego przypadku z klasycznym układem sterowania generatora. Różnice w przebiegach momentów na wale generator – przekładnia najlepiej widać na zestawieniu tych wielkości na rysunku 10.



Rys. 10. Momenty na wale generator –przekładnia w elektrowni z klasycznym i zmodyfikowanym sterowaniem mocą

## 5. Podsumowanie

Długotrwała i bezawaryjna praca elektrowni wiatrowej jest jednym z głównych kryteriów oceny jej konstrukcji. Najsłabszym punktem elektrowni wiatrowych z maszyną dwustronnie zasilaną jest przekładnia mechaniczna. Dlatego też redukcja obciążeń układu mechanicznego

wynikająca z zaburzeń w systemie elektroenergetycznym jest istotna, jako że ma bezpośredni wpływ na czas eksploatacji elektrowni i jej awaryjność. Zaproponowana metoda jest bardzo prosta do zastosowania ze względu na bezpośrednią dostępność pomiarową sygnałów potrzebnych do jej zrealizowania. Rezultaty zastosowania modyfikacji sterowania mocą elektrowni wydają się być obiecujące. W dalszym toku badań zostanie przeprowadzona weryfikacja pomiarowa proponowanej metody w układzie laboratoryjnym.

## 6. Literatura

- [1]. Kulesza K., Witkowski S., Guziński J.: *Elektrownia wiatrowa z maszyną dwustronnie zasilaną - badania symulacyjne*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, r. 2003, Nr 19, s. 61–66
- [2]. Skwarczyński J., Dziadecki A., Zarudzki J., Grzegorski J., Skotniczny J., Lerch T.: *Kaskada zaworowa ( $T=const$ ) jako generator elektryczny siłowni wiatrowej*. Przegląd Elektrotechniczny. 2004 R. 80 nr 3 s. 263-268.
- [3]. Kołek W., Michna J., Noga M.: *Dynamika systemów elektroenergetycznych w hutnictwie*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1981.
- [4]. Skwarczyński J., Zbigniew T.: *Maszyny elektryczne. Cz. 1, Teoria*. Wydawnictwa AGH, Kraków, r. 1991.
- [5]. Lubośny Z.: *Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, r. 2006.
- [6]. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: *Generalized theory of the instantaneous reactive power in the three-phase circuits*. IPEC – Tokyo' 83

## Autor

mgr inż. Tomasz Lerch, lerch@agh.edu.pl  
Katedra Maszyn Elektrycznych AGH, Kraków.