

MODEL MATEMATYCZNY SAMOWZBUDNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO – ANALIZA SAMOWZBUDZENIA, STANY PRZEJŚCIOWE, STAN USTALONY

W artykule przedstawiono model matematyczny samowzbudnego generatora indukcyjnego (ang. SEIG) opracowany na podstawie wektorowych równań różniczkowych silnika indukcyjnego. Przeanalizowano proces samowzbudzenia generatora. Model poddano badaniom symulacyjnym w stanach statycznych i dynamicznych. Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie modelu dla przypadków skokowej zmiany obciążenia generatora oraz zmiany prędkości kątowej w ustalonych granicach. Badania symulacyjne modelu zestawiono porównawczo z badaniami eksperymentalnymi modelu laboratoryjnego o mocy 5,5 kW.

1. WSTĘP

W chwili obecnej na całym świecie obserwuje się coraz większe zainteresowanie źródłami energii odnawialnej. Do tej grupy źródeł można zaliczyć przepływającą wodę wytwarzającą energię w elektrowniach wodnych, słońce dostarczające bezpośrednio energię w elektrowniach słonecznych oraz wiatr wytwarzający energię elektryczną w elektrowniach wiatrowych. Wiatry jako ruchy mas powietrza występują we wszystkich szerokościach geograficznych. Duże nadzieje wiąże się z wykorzystaniem energii kinetycznej tych mas. Buduje się już elektrownie wiatrowe o mocach jednostkowych do 5 MW. Równie często powstają małe elektrownie autonomiczne, na potrzeby indywidualne pojedynczych gospodarstw, jak też małej społeczności lokalnej. Elektrownie autonomiczne są izolowane od dużych systemów energetycznych i pracują w małym obrębie terytorialnym. Mogą być wyposażane w generatory synchroniczne z magnesami trwałymi oraz w samowzbudne generatory indukcyjne. Te ostatnie należą do układów o zmiennej prędkości kątowej i zmiennej częstotliwości napięcia wyjściowego. Zmiana prędkości źródła napędowego uniemożliwia współpracę z generatorem synchronicznym (sieć o stałej częstotliwości). Zmianom prędkości wiatru odpowiadają zmiany prędkości generatora. Z tego też powodu generatory te stosowane są w izolowanych (autonomicznych) systemach ze stabilizacją napięcia do: grzania, oświetlenia, zasilania urządzeń elektronicznych z przetwornicą AC/DC na wejściu (urządzenia TV, systemy audio, ładowanie akumulatorów, urządzenia

komputerowe) [9]. Dla tego typu generatorów występuje również możliwość (w pewnym zakresie) stabilizacji częstotliwości [3].

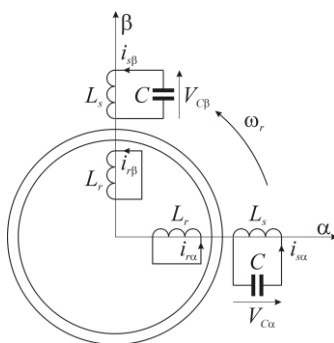
W artykule przedstawiono opracowany model samowzbudnego generatora indukcyjnego, w literaturze anglosaskiej określanego mianem SEIG (*Self-Excited Induction Generator*). Model poddano wszechstronnym badaniom symulacyjnym w różnych stanach pracy. Wiele miejsca poświęcono problemowi samowzbudzenia. Opracowany model generatora ma stanowić podstawę do stworzenia układu sterowania autonomiczną elektrownią wiatrową opartą na SEIG. W końcowym etapie prac ma zostać wykonany (w niewielkiej skali – około 5,5 kW) model eksperymentalny do badań weryfikacyjnych układu sterowania autonomiczną elektrownią wiatrową SEIG.

2. MODEL MATEMATYCZNY SEIG

Model matematyczny SEIG opiera się na opisie wektorowym maszyny indukcyjnej w układzie stacjonarnym α - β . Na potrzeby tworzenia modelu matematycznego wprowadzono następujące założenia:

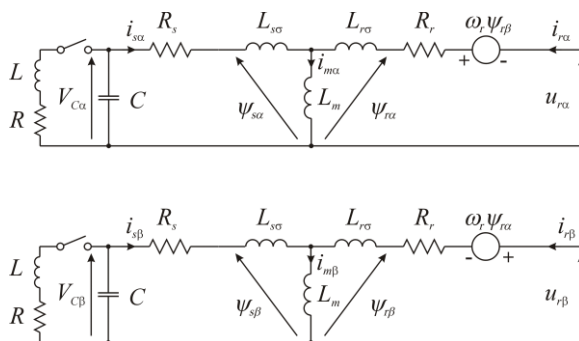
- prędkość kątowna wirnika jest wielkością wejściową,
- indukcyjności skojarzone stojana i wirnika składają się z indukcyjności rozproszenia odpowiednio stojana i wirnika oraz indukcyjności głównej,
- indukcyjności rozproszenia stojana i wirnika są stałe i niezależne od prądu maszyny,
- indukcyjność główna (magnesująca) jest funkcją prądu i osiąga nasycenie dla określonej jego wartości,
- w maszynie występuje strumień magnetyczny związany z pozostałością magnetyczną w wirniku,
- do zacisków maszyny są podłączone kondensatory.

Na rysunku 1 przedstawiono dwuosiowy model maszyny indukcyjnej w układzie stacjonarnym α - β z kondensatorami wzbudzającymi.



Rys. 1. Dwuosiowy model maszyny indukcyjnej w układzie stacjonarnym α - β

Opierając się na wyżej wymienionych założeniach i dwuosowym modelu maszyny indukcyjnej, stworzono model matematyczny generatora SEIG. Pokazano go na rysunku 2 wraz z kondensatorami wzbudzającymi i obciążeniem typu RL. W modelu uwzględniono nieliniową indukcyjność główną maszyny oraz strumień magnetyczny związany z pozostałością magnetyczną w wirniku.



Rys. 2. Model matematyczny samowzbudnego generatora indukcyjnego

W modelu tym skojarzony strumień magnetyczny obwodu stojana opisany jest znaną zależnością:

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r, \quad (1)$$

przy czym:

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}, \quad \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}, \quad L_s = L_{s\sigma} + L_m, \quad L_m = f(\bar{I}_m).$$

Zależnością rozszerzoną (2) opisany jest natomiast skojarzony strumień magnetyczny obwodu wirnika. Rozszerzenie opisu dotyczy pozostałości magnetycznej w wirniku:

$$\vec{\psi}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s + \vec{\psi}_{r0}, \quad (2)$$

przy czym: $\psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} + \psi_{r\alpha 0},$

$$\psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} + \psi_{r\beta 0},$$

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m, \quad L_m = f(\bar{I}_m)$$

Wirnik maszyny indukcyjnej jest napędzany i obraca się z prędkością kątową ω_r . Przy prędkości kątowej synchronicznej indukuje się w nim siła elektromotoryczna szczytkowa o wartości 7 V. Proces ten opisuje poniższa zależność [8]:

$$\vec{E}_r = \omega_r \vec{\psi}_{r0}, \quad (3)$$

przy czym: $E_{r\alpha} = \omega_r \psi_{r\beta 0}, \quad E_{r\beta} = \omega_r \psi_{r\alpha 0}.$

Do zacisków wyjściowych maszyny indukcyjnej podłączone są kondensatory. W trakcie wzbudzenia się generatora indukcyjnego napięcie na kondensatorach zmienia się zgodnie z zależnością:

$$\vec{V}_C = \frac{1}{C} \int \vec{i}_C dt + \vec{V}_{C0}, \quad (4)$$

przy czym: $V_{C\alpha} = \frac{1}{C} \int i_{C\alpha} dt + V_{C\alpha 0},$

$$V_{C\beta} = \frac{1}{C} \int i_{C\beta} dt + V_{C\beta 0}.$$

Po wstawieniu zależności (1), (2), (3), (4) do wektorowych równań napięciowo-prądowych obwodu stojana i wirnika otrzymuje się zależności:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} (L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r) + \vec{V}_C, \quad (5a)$$

$$\vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} (L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s) - j(\omega_r (L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s) + \vec{E}_r). \quad (5b)$$

Ostatecznie po uporządkowaniu zapis równań różniczkowych modelu samowzbudnego generatora indukcyjnego SEIG można przedstawić w postaci macierzowej:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_r L_m \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_r L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_r L_s L_r \\ \omega_r L_s L_m & R_s L_m & \omega_r L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -L_r V_{C\alpha} + L_m E_{r\alpha} \\ -L_r V_{C\beta} - L_m E_{r\beta} \\ L_m V_{C\alpha} - L_s E_{r\alpha} \\ L_m V_{C\beta} + L_s E_{r\beta} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

przy czym: $L = L_s L_r - L_m^2.$

W zależnościach (6) występuje indukcyjność główna M_l maszyny. Jest ona funkcją prądu magnesującego I_m . Wartość skuteczna prądu magnesującego maszyny indukcyjnej wyraża się zależnością:

$$\bar{I}_m = \sqrt{(i_{s\alpha} + i_{r\alpha})^2 + (i_{s\beta} + i_{r\beta})^2} / \sqrt{2}. \quad (7)$$

Zmienność indukcyjności głównej L_m opisano za pomocą funkcji wielomianowych dla dwóch zakresów zmian prądu magnesującego I_m . Opisują ją zależności:

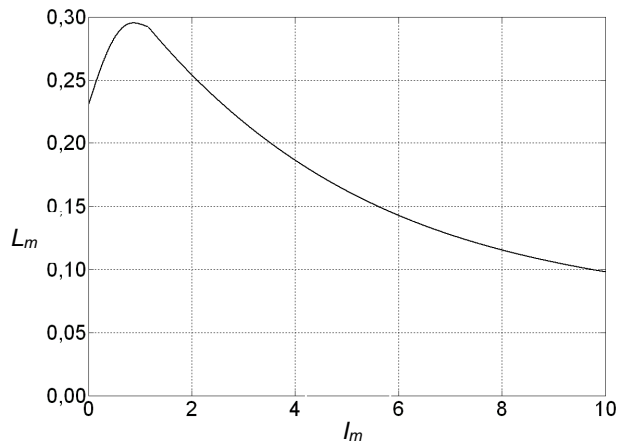
$$L_m = 0,0623I_m^4 - 0,14I_m^3 + 0,017I_m^2 + 0,125I_m + 0,23 \quad (8a)$$

dla $I_m < 1,157$ [A],

$$L_m = (3,98E - 6)I_m^4 - (2,4E - 4)I_m^3 + (5,48E - 3)I_m^2 - 0,0605I_m + 0,3552 \quad (8b)$$

dla $I_m \geq 1,157$ [A]

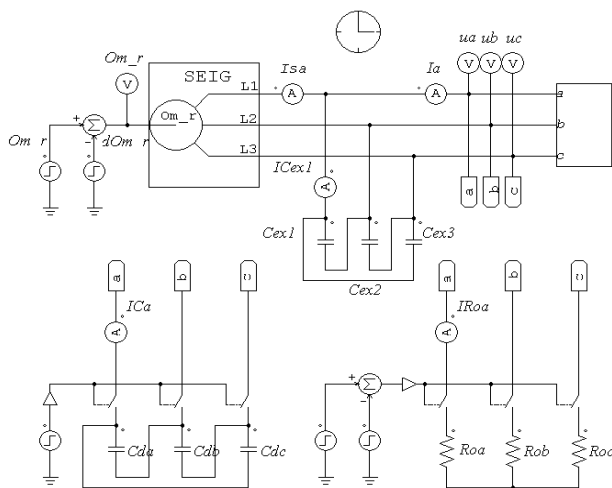
Zależność dla dobrze zidentyfikowanego silnika przedstawiono graficznie na rysunku 3 [5].



Rys. 3. Charakterystyka indukcyjności głównej (magnesującej) silnika L_m w funkcji wartości skutecznej prądu magnesującego I_m

3. SAMOWZBUDZENIE GENERATORA INDUKCYJNEGO

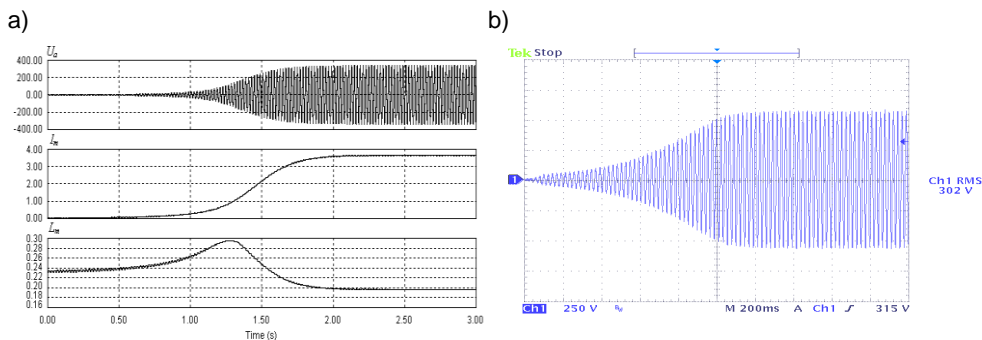
Samowzbudzenie generatora indukcyjnego następuje w wyniku napędzania z określoną prędkością kątową wirnika maszyny przy występującym magnetyzmie szczątkowym w wirniku i dołączonych do uzwojeń stojana kondensatorach. W zależności od aktualnej prędkości kątowej do samowzbudzenia dochodzi przy różnych wartościach pojemności kondensatorów. Dla określonej prędkości kątowej istnieje więc minimalna wartość pojemności, przy której zjawisko to występuje. Układ samowzbudnego generatora indukcyjnego (SEIG) z obciążeniem zaprezentowano na rysunku 4. Kondensatory do samowzbudzenia zostały połączone w trójkąt. Taki układ połączenia wymaga mniejszych wartości pojemności.



Rys. 4. Schemat badawczy samowzbudnego generatora indukcyjnego (SEIG) z obciążeniem

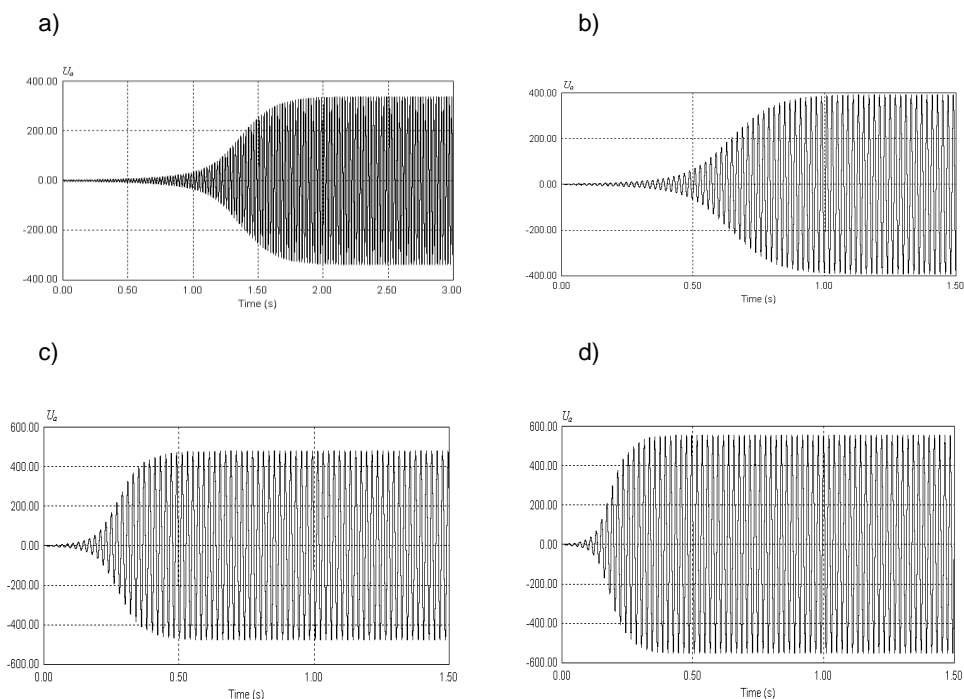
Na rysunku 5 przedstawiono proces samowzbudzenia generatora przy stałej synchronicznej prędkości kątowej wału. Wartość pojemności dla samowzbudzenia została dobrana na drodze symulacyjnej i wynosiła $C_{ex} = 15,9 \mu\text{F}$ dla prędkości synchronicznej. Gwarantuje ona wzbudzenie się nieobciążonego generatora przy prędkości synchronicznej do napięcia znamionowego w czasie nieprzekraczającym 2 s. Dzięki występowaniu zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego napięcie wyjściowe generatora ustala się na skończonej wartości.

Na rysunku 5a pokazano symulacyjne przebiegi napięcia wyjściowego, prądu magnesującego oraz indukcyjności głównej podczas wzbudzania się generatora. Rysunek 5b obrazuje to samo zjawisko w przypadku układu eksperymentalnego. Pomimo że przebiegi symulacyjne uzyskano dla modelu silnika różniącego się od użytego do eksperymentu, przedstawiają one podobny charakter przebiegów przy samowzbudzeniu.



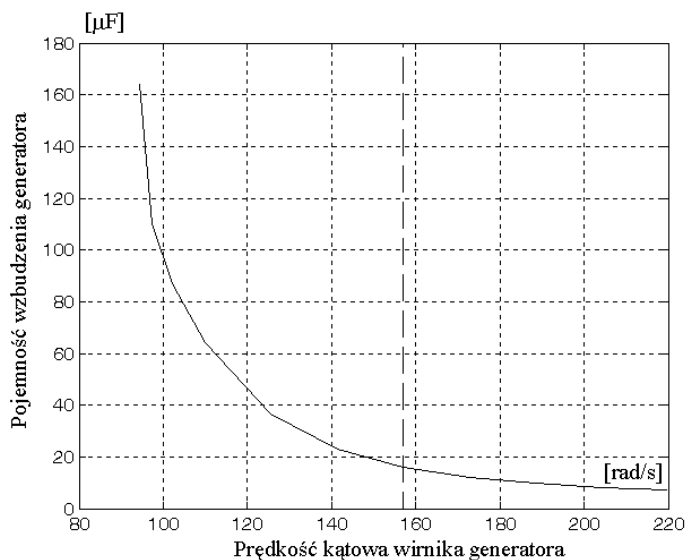
Rys. 5. Samowzbudzenie generatora indukcyjnego a) symulacja, b) eksperyment

Rysunek 6 prezentuje proces wzbudzenia się generatora przy stałej prędkości kątowej wału maszyny i wzrastającej wartości pojemności $C_{ex} = 20, 30, 40 \mu\text{F}$. Wyraźnie widoczne jest przyspieszenie procesu samowzbudzenia przy jednoczesnym wzroście wartości napięcia wyjściowego generatora wraz ze wzrostem wartości pojemności kondensatorów.



Rys. 6. Samowzbudzenie generatora dla różnych wartości pojemności a) $C_{ex} = 15,9 \mu\text{F}$, b) $C_{ex} = 20 \mu\text{F}$, c) $C_{ex} = 30 \mu\text{F}$, d) $C_{ex} = 40 \mu\text{F}$

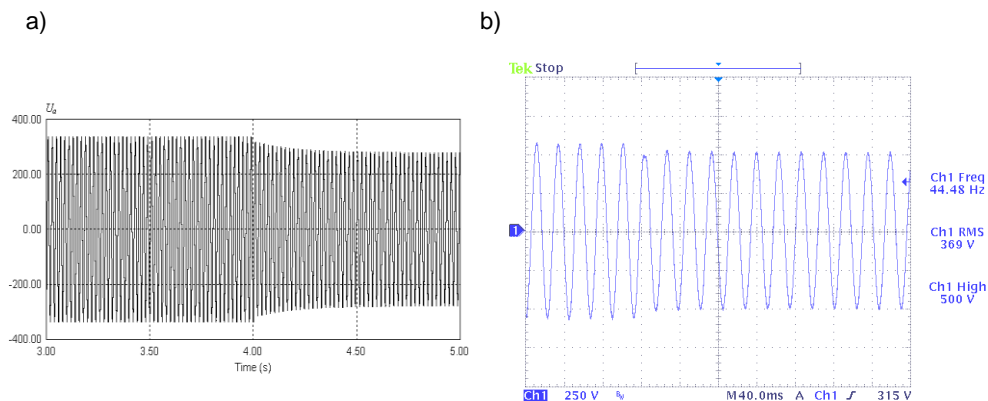
Z pomocą modelu symulacyjnego generatora indukcyjnego wyznaczono zależność wartości pojemności samowzbudzenia od prędkości kątowej wału przy stałej znamionowej wartości napięcia wyjściowego. Zakres zmian prędkości, dla której wyznaczano pojemności wzbudzenia, ograniczono do +10% -15% prędkości synchronicznej maszyny dla częstotliwości znamionowej. Tak wyznaczoną zależność przedstawiono na rysunku 7.



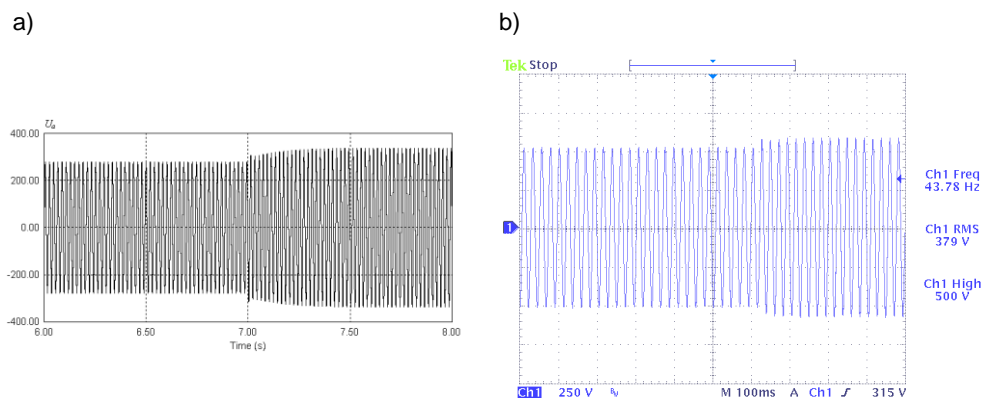
Rys. 7. Zależność pojemności kondensatorów wzbudzących od prędkości wirnika generatora

4. OBCIĄŻENIE GENERATORA SEIG

Samowzbudny generator indukcyjny jest bardzo wrażliwy na wszelkie zmiany obciążenia. I tak wzrost obciążenia powoduje silny spadek wartości generowanego napięcia. Pociąga to za sobą również wzrost poślizgu dla pokrycia zwiększonego zapotrzebowania na moc. Zatem ze wzrostem obciążenia, przy stałej prędkości kątownej wału maszyny, częstotliwość napięcia wyjściowego maleje. Proces odwrotny obserwuje się przy zmniejszaniu obciążenia. Wzrasta wartość generowanego napięcia oraz jego częstotliwość. Reakcję generatora na wzrost i zmniejszenie obciążenia obrazują rysunki 8 i 9. Wykresy 8a i 9a są wynikiem badań symulacyjnych, natomiast 8b i 9b to wynik eksperymentu. Badanie reakcji generatora na obciążenie przeprowadzono przy prędkości synchronicznej. W badaniach zastosowano obciążenie typu R. Obciążenie w obu przypadkach (symulacja, eksperyment) stanowiło 40% mocy znamionowej generatora.



Rys. 8. Zmniejszenie napięcia wyjściowego generatora przy wzroście obciążenia
a) symulacja, b) eksperyment

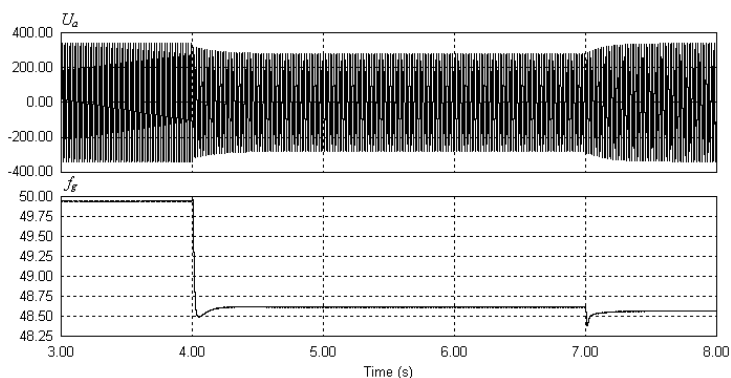


Rys. 9. Wzrost napięcia wyjściowego generatora przy zmniejszeniu obciążenia
a) symulacja, b) eksperyment

5. WZBUDZANIE SEIG ZA POMOCĄ BATERII KONDENSATORÓW

Jak wspomniano wyżej, generator indukcyjny jest bardzo wrażliwy na wszelkie zmiany obciążenia. Odbiorniki energii elektrycznej, które nie są wrażliwe na zmiany częstotliwości napięcia, wymagają jednak stałej jego wartości. W celu więc utrzymania stałej wartości napięcia wyjściowego generatora indukcyjnego ze wzrostem obciążenia należy go dowzbudzać, a przy redukcji obciążenia odwzbudzać. Przy samowzbudzeniu generatora wartość uzyskiwanego napięcia zależała od pojemności dołączanej do zacisków. Mechanizm ten powszechnie wykorzystuje się do stabilizacji napięcia wyjściowego generatora.

Na rysunku 10 pokazano proces odbudowy napięcia generatora po wcześniejszym jego obciążeniu. Proces ten wywołany jest dołączeniem dodatkowych kondensatorów.



Rys. 10. Kompensacja spadku napięcia wyjściowego generatora za pomocą kondensatorów

Istnieje wiele rozwiązań stabilizacji napięcia wyjściowego generatora indukcyjnego, opartych na dołączaniu dodatkowych pojemności dowzbudżających. Powszechnie stosowane są układy tyrystorowe, które współpracują z dodatkowymi bateriami kondensatorów. Układy tyrystorowe pełnią funkcję łączników modulujących średnią wartość pojemności dołączanej do zacisków generatora, stabilizując jego napięcie wyjściowe [1, 4].

6. PODSUMOWANIE

Opracowany model generatora SEIG dobrze odzwierciedla rzeczywisty proces samowzbudzenia. Potwierdzono to porównawczymi badaniami eksperymentalnymi na rzeczywistym obiekcie. Po samowzbudzeniu zarówno model generatora, jak i rzeczywisty generator osiągają ustaloną skończoną wartość napięcia wyjściowego. Zachowanie modelu symulacyjnego pozostaje również w zgodzie z eksperymentalnymi badaniami obciążeniowymi generatora. Model SEIG umożliwia symulacyjne wyznaczenie minimalnych wartości pojemności wzbudzenia dla różnych prędkości kątowych wału generatora. Przedstawiony model ma być wykorzystany do badań symulacyjnych projektowanego układu sterowania samowzbudnym generatorem indukcyjnym. Na obecnym etapie badań model umożliwił poznanie procesu samowzbudzenia maszyny indukcyjnej z magnetyzmu szczątkowego z wykorzystaniem baterii kondensatorów oraz zachowanie w warunkach zmiennego obciążenia.

LITERATURA

1. Al-Saffar M.A., Nho E., Lipo T.A., *Controlled Shunt Capacitor Self-Excited Induction Generator*, Proc. 1998 IEEE Industry Applications Conference, vol. 2, s. 1486–1490.
2. Leidhold R., Garcia G., *Variable Speed Field-Oriented Controlled Induction Generator*, IEEE-Industry Application Society Annual Meeting, 1998 (IAS'98), s. 540–546.
3. Lopes L. A.C., Almeida R. G., *Wind-Driven Self-Excited Induction Generator with Voltage and Frequency Regulated by a Reduced-Rating Voltage Source Inverter*, IEEE Trans. On Energy Conversion, vol. 21, no. 2, JUNE 2006, s. 297–304.
4. Marduchus C., *Switched Capacitor Circuits for Reactive Power Generation*, Ph. D. Thesis, Brunel University, 1983.
5. Seyoum D., *The Dynamic Analysis and Control of a Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine*, Ph. Thesis, The University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications, March 2003, s. 1–324.
6. Seyoum D., Grantham C., Rahman M. F., *The Dynamic Characteristic of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine*, IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 39, no. 4, July/August 2003, s. 936–944.
7. Sousa G.C.D., Martins F.N., Rey J.P., Bruinsma J.A., *An Autonomous Induction Generator System with Voltage Regulation*, Proc 4th IEEE-Inter. Conf., PEDS 2001, vol. 1, s. 94–98.
8. Wang L., Lee C. H., *A Novel Analysis on the Performance of an Isolated Self-Excited Induction Generator*, IEEE Trans. On Energy Conversion., vol. 12, no. 2, JUNE 1997, s. 109–117.
9. Wekhande S., Agarwal V., *A Variable Speed Constant Voltage Controller for Self-Excited Induction Generator with Minimum Control Requirements*, IEEE-Inter. Conf. PEDS 1999, s. 98–103.

ZAŁĄCZNIK

Dane maszyny indukcyjnej:

$$\begin{aligned}
 P_N &= 3,6 \text{ kW}, U_{t-l} = 415 \text{ V}, \\
 I_N &= 7,8 \text{ A}, f_N = 50 \text{ Hz}, 2p = 4 \\
 L_{s\sigma} &= L_{r\sigma} = 12 \text{ mH}, L_m = f(I_m) \\
 R_s &= 1,6 \Omega, R_r = 2,75 \Omega
 \end{aligned}$$

MATHEMATIC MODEL OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR, ANALYSIS OF SELF-EXCITATION, TRANSIENT STATES AND STEADY STATE

Summary

This paper discusses the regulation of a stand-alone wind power plant based on a self-excitation squired-cage induction machine. During self-excitation the variation in the value of magnetizing inductance, due to saturation, is the main factor that stabilizes growing initial transient of generated voltage. The required reactive power for self-excited generator is provided by a local capacitor bank connected to the stator induction machine.