

Wacław Orlewski
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

BADANIE PRACY GENERATOROWEJ MASZYNY ASYNCHRONICZNEJ WZBUDZANEJ KONDENSATORAMI

INVESTIGATIONS OF GENERATOR OPERATION OF INDUCTION MACHINE EXCITED BY CAPACITORS

Abstract: The problems pertaining to capacitor-excited asynchronous machines, working as generators, are described. With the new experimental method, excitation characteristics were estimated for the machine working at a constant frequency. Based on the equivalent circuit diagram, the external characteristics were also obtained and compared to the experimental ones. As a result, the conditions to stabilize the voltage by capacitors for different loads were formulated.

1. Wstęp

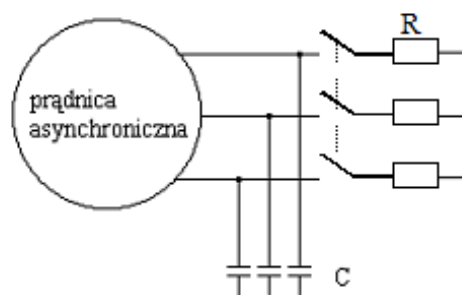
Trójfazowa maszyna indukcyjna - przetwornik elektromechaniczny, mogący pracować zarówno jako silnik jak też i prądnica - już od wielu lat znajduje wszechstronne zastosowania techniczne. Ze względu na swe zalety: prosta i niezawodna konstrukcja, możliwość pracy z dużą prędkością obrotową i niski koszt, prądnice tego typu są coraz częściej wykorzystywane, np. w małej energetyce wodnej [1]. Stosowane są również w agregatach prądotwórczych, w których ta sama maszyna może być rozrusznikiem. W przeciwieństwie do generatorów synchronicznych mogą one pracować z różnymi prędkościami obrotowymi przy pracy równoległej.

Przy współpracy z siecią sztywną, zmianę stanu pracy maszyny (z silnika na generator lub odwrotnie) uzyskuje się poprzez zmianę jej prędkości obrotowej. W przypadku współpracy maszyny indukcyjnej-generatora z siecią wydzieloną wzbudzenie maszyny wymaga zastosowania równoległej baterii kondensatorów, a także pojawiają się trudności z utrzymaniem stabilności amplitudy i częstotliwości wytwarzanego napięcia [2]. W artykule zaproponowano dobór optymalnej pojemności kondensatora w celu stabilizacji generowanego napięcia na podstawie obliczonych charakterystyk zewnętrznych.

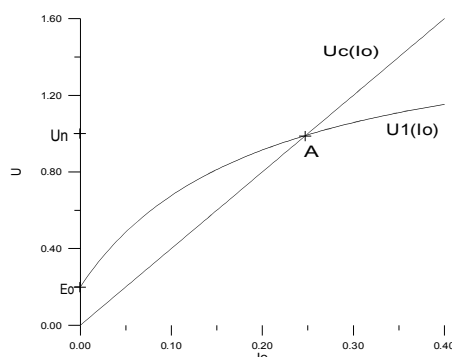
2. Wzbudzenie generatora

Podstawowym warunkiem wykorzystania maszyny asynchronicznej w roli generatora w sieci wydzielonej jest jej wzbudzenie. Źródłem pola magnetycznego może być bateria kondensatorów włączonych równoległe do trzech faz tej maszyny będącej w ruchu. Układ ten (rys. 1)

nie jest zasilany z sieci energetycznej lecz może stać się układem generującym energię elektryczną po spełnieniu odpowiednich warunków samowzbudzenia [3].



Rys. 1. Schemat podłączenia prądnicy asynchronicznej zapewniający możliwość samowzbudzenia

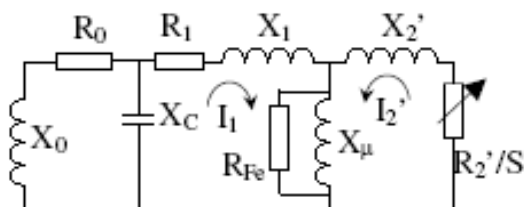


Rys. 2. Charakterystyka napięciowo-prądowa maszyny $U_1(I_0)$ w warunkach biegu jałowego i charakterystyka baterii kondensatorów $U_c(I_0)$, w jednostkach względnych

Dla zapoczątkowania tego procesu muszą zaistnieć warunki inicjujące w postaci siły elektromotorycznej E_0 , powstałej w wyniku istnienia pozostałości magnetycznej obwodu maszyny. Koniecznym jest również, aby początkowa część charakterystyki napięciowo-prądowej maszyny $U_1(I_0)$ dla biegu jałowego, przebiegała ponad prostą charakterystyki baterii kondensatorów $U_c(I_0)$, aż do punktu „A”, przecięcia się tych dwóch wykresów (rys. 2). W niniejszej pracy analiza działania generatora asynchronicznego przedstawiona w [2, 4] została wykorzystana do określenia wymaganych warunków stabilizacji częstotliwości i amplitudy wytwarzanego napięcia.

3. Wyznaczanie warunków stabilizacji

Schemat zastępczy generatora asynchronicznego współpracującego z baterią kondensatorów przedstawiony na rysunku 3 zawiera zarówno parametry schematu maszyny jak i obwodów obciążenia. Odbiornik reprezentowany jest przez szeregową gałąź indukcyjno-rezystancyjną, X_o i R_o , która jest połączona równolegle z baterią kondensatorów X_C i z obwodami generatora (pozostałe elementy na rys. 3).



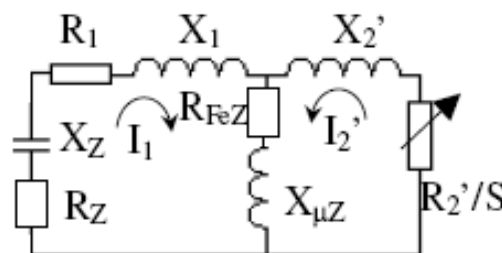
Rys. 3. Schemat zastępczy prądnicy asynchronicznej wraz z obciążeniem

Schemat ten można przekształcić do postaci bardziej dogodnej do obliczeń, gdy zastąpimy obciążenie (R_o i X_o) i kondensator (X_C) jedną gałęzią szeregową (X_Z i R_Z) i założymy rezystancyjny charakter odbiornika ($X_o = 0$). Podobnie, obwód generatora złożony z równoległe połączonych elementów R_{Fe} i X_{μ} został uproszczony do szeregowego połączenia R_{FeZ} i $X_{\mu Z}$. Zmniejsza się w ten sposób liczbę oczek obwodowych, a parametry zastępczej gałęzi szeregowej przelicza według następujących wzorów:

$$X_Z = -\frac{X_c R_0^2}{R_0^2 + X_c^2} \quad R_Z = \frac{R_0 X_c^2}{R_0^2 + X_c^2} \quad (1a)$$

$$X_{\mu Z} = \frac{X_{\mu}}{1 + \left(\frac{X_{\mu}}{R_{Fe}}\right)} \quad R_{FeZ} = \frac{R_{Fe0}}{1 + \left(\frac{R_{Fe}}{X_{\mu}}\right)} \quad (1b)$$

Nowy, zmodyfikowany schemat zastępczy z przeliczonymi wartościami przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zmodyfikowany schemat zastępczy prądnicy z obciążeniem czynnym

Dla przedstawionego schematu można ułożyć układ dwóch równań dla prądów oczkowych I_1 oraz I_2' :

$$\begin{aligned} [R_Z + R_1 + R_{FeZ} + j(X_Z + X_1 + X_{\mu Z})]I_1 + \\ + (R_{FeZ} + jX_{\mu Z})I_2' &= 0 \\ (R_{FeZ} + jX_{\mu Z})I_1 + \left[\frac{R_2'}{s} + R_{FeZ} + \right. \\ \left. + j(X_2' + X_{\mu Z}) \right]I_2' &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Ten jednorodny układ równań posiada niezerowe rozwiązanie względem I_1 i I_2' w przypadku, gdy jego wyznacznik jest równy 0. Po rozdzieleniu części rzeczywistej i urojonej tego wyznacznika otrzymuje się warunek generacji mocy w obciążeniu. Warunek ten przyjmuje formę układu równań:

$$\begin{aligned} \frac{R_2'}{s}(R_Z + R_1 + R_{FeZ}) + R_{FeZ}(R_Z + R_1) + \\ - (X_2' + X_{\mu Z})(X_Z + X_1 + X_{\mu Z}) + X_{\mu Z}^2 &= 0 \\ \frac{R_2'}{s}(X_Z + X_1 + X_{\mu Z}) + R_{FeZ}(X_Z + X_1 + X_2') + \\ + (X_2' + X_{\mu Z})(R_Z + R_1) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

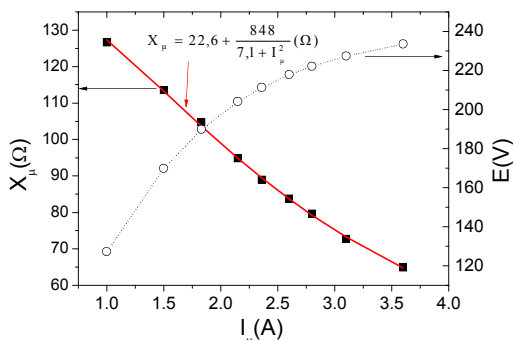
W celu uproszczenia rozwiązania wprowadzono założenie o pomijalności strat w żelazie co oznacza że: $R_{FeZ} = 0$, czego konsekwencją jest $X_{\mu Z} = X_{\mu}$.

Rozwiązanie układu równań (3) ze względu na X_{μ} ma postać:

$$X_{\mu} = \frac{-2(X_Z + X_1)X_2' + (X_Z + X_1)^2 + (R_Z + R_1)^2}{2(X_Z + X_1 + X_2')} + \frac{\sqrt{[(X_Z + X_1)^2 + (R_Z + R_1)^2]^2 - 4[X_2'(R_Z + R_1)]^2}}{2(X_Z + X_1 + X_2')} \quad (4)$$

4. Stabilizacja napięcia i częstotliwości

Zagadnienie stabilizacji parametrów energii wytwarzanej w omawianym typie generatora jest istotnym elementem projektowania źródeł tego rodzaju. W celu wyznaczenia warunków stabilizacji napięcia generatora wymagana jest znajomość charakterystyki magnesowania maszyny, $X_{\mu}(I_{\mu})$, którą przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Eksperymentalne punktowe charakterystyki siły elektromotorycznej (otwarte symbole, prawa strona) i reaktancji wzbudzającej generatora (pełne symbole) w funkcji prądu magnesującego. Ciągła krzywa przedstawia aproksymację, $X_{\mu}(I_{\mu})$ funkcją: $X_{\mu} = 22,6 + \frac{848}{7,1 + I_{\mu}^2}$ (Ω)

Charakterystyka ta dla silnika o parametrach znamionowych:

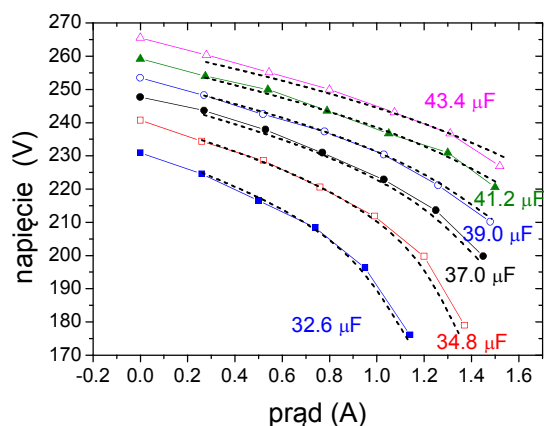
$$\begin{aligned} P_n &= 1,1 \text{ kW}, & n_n &= 925 \text{ obr/min}, \\ U_n &= 230/400 \text{ V}, & I_n &= 5,1/2,9 \text{ A}, \\ \cos \varphi_n &= 0,74 & f_n &= 50 \text{ Hz} \end{aligned}$$

została wyznaczona eksperymentalnie poprzez pomiar napięcia E_1 i prądu I_{μ} generatora wzbudzonego różnymi pojemnościami, przy braku obciążenia i pominięciu rezystancji uzwojeń stojana. Wartości X_{μ} przy tych założeniach zostały wyznaczone z zależności (1) i (4):

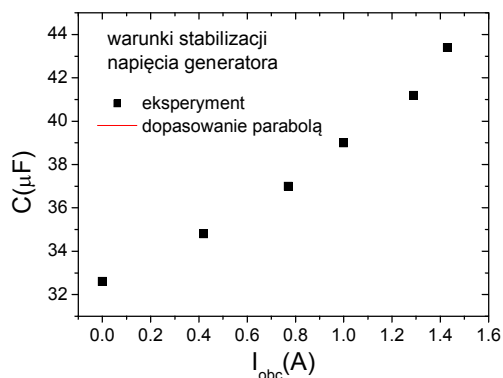
$$X_{\mu} = X_C - X_1 = \frac{E}{I_{\mu}} - X_1 \quad (5)$$

W celu aproksymacji charakterystyki $X_{\mu}(I_{\mu})$

zastosowana została funkcja typu $(\arctg x)'$ (podana w opisie rysunku 5), która pozwala na wyznaczenie prądu magnesującego I_{μ} i odpowiadającej mu siły elektromotorycznej E . Napięcie na generatorze w stanie obciążenia zostało określone na podstawie schematu zastępczego (rys. 4) generatora. Dla kolejnych wartości obciążenia R i różnych wartości pojemności wzbudzających obliczono charakterystyki zewnętrzne generatora w funkcji prądu obciążenia (rys. 6). Obliczenia porównano z odpowiednimi wartościami eksperymentalnymi. Pracę generatora sprawdzono w układzie napędowym [5] z utrzymywaniem stałej częstotliwości generowanego napięcia. Uzyskano to poprzez odpowiednią zmianę prędkości obrotowej generatora. Na podstawie wykresu określono wymagane wartości pojemności kondensatorów wzbudzających w zależności od prądu obciążenia (rys. 7). Może ona posłużyć do realizacji układu automatycznej regulacji napięcia w celu jego stabilizacji w sposób skokowy lub ciągły [6]. Zaprezentowane wyniki obliczeń wykazują dobrą zgodność z eksperymentem (rys. 6), co potwierdza poprawność przyjętych metod i założeń. Przedstawione obliczenia można rozszerzyć również na odbiorniki o charakterze indukcyjno-rezystancyjnym. Wymaga to wprowadzenia zmian w schematach zastępczych obciążenia generatora oraz uwzględnienia wymaganej mocy biernej do skompensowania odbiorników.



Rys. 6. Charakterystyki zewnętrzne generatora wzbudzonego kondensatorami przy stałej częstotliwości 50 Hz i dla różnej pojemności kondensatorów (pomiar i wyniki obliczeń)



Rys. 7. Warunki uzyskiwania stabilności napięcia $U = 230V$ i $f = 50 Hz$ dla różnych prądów przy obciążeniu rezystancyjnym

5. Podsumowanie

Przedstawione badania i analiza potwierdziły konieczność stosowania dokładnej aproksymacji charakterystyki magnesowania rdzenia maszyny indukcyjnej mającej pracować jako generator. Charakterystyka ta, której metoda opracowania została przedstawiona, ma zasadniczy wpływ na poprawne wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej generatora. Mimo istnienia bardziej rozbudowanych sposobów opisu charakterystyki magnesowania, zastosowana funkcja oraz metoda wyznaczania dobrze odwzorowuje jej charakter i wartości, co pozwala stosować ją do celów praktycznych w projektowaniu zespołów prądowców z generatorem indukcyjnym wzbudzonym kondensatorami, pracującym przy różnych częstotliwościach napięcia. Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły przydatność przedstawionego modelu wyjściowego.

Przeprowadzone pomiary prądnicy asynchronicznej w sieci wydzielonej pokazały czynniki decydujące o stabilności pracy układu. Są nimi:

- niezbędna do wzbudzenia moc bierna pobierana z baterii kondensatorów współpracujących z maszyną,
- wymagana prędkość obrotowa konieczna do utrzymania stałości częstotliwości i amplitudy wytwarzanego napięcia,
- wielkość obciążenia decydująca o napięciu i częstotliwości napięcia prądnicy,
- nieliniowość charakterystyki magnesowania mająca wpływ na amplitudę generowanego napięcia.

Odpowiedni dobór pojemności baterii kondensatorów pozwala na wzbudzenie układu oraz stabilizację napięcia. Regulacja prędkości obrotowej zapewnia stabilizację częstotliwości, a pośrednio, również amplitudy napięcia. Stosując przykładowo jako silnik napędzający generator spalinową maszynę zasilaną biogazem, należy wprowadzić możliwość regulacji prędkości obrotowej poprzez zmianę ilości dopływającego biogazu, w zależności od obciążenia generatora. Sygnałem kontrolnym układu automatycznej regulacji prędkości dla silnika powinna być częstotliwość napięcia wyjściowego opisanego generatora. W związku ze znaczną bezwładnością maszyn, zmiany obciążenia elektrycznego generatora powinny odbywać się stopniowo, tak aby układ regulacji miał możliwość nadążania z korekcją prędkości obrotowej.

6. Literatura

- [1] Orlewski W., Siwek A.: *Samodzielna praca generatora asynchronicznego w małych elektrowniach wodnych*. VI Konferencja Naukowo – Techniczna. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii – Serock-Jadwisin 1999
- [2] Orlewski W.: *Stabilizacja napięcia i częstotliwości w generatorze asynchronicznym pracującym na wydzieloną sieć*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna, Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii – 2000, Łódź 2000
- [3] Boldea I.: *Variable Speed Generators*. CRC Press, 2005
- [4] But D.A.: *Bieskontaktnyje elektriczeskije masziny*. Wyższa Szkoła Moskwa 1990
- [5] Dybowski P., Orlewski W.: *Badanie generatora indukcyjnego wzbudzanego kondensatorami*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 77, 2007, wyd. BOBRME Komel
- [6] Tarek A., Noro O., Matsuo K., Shindo Y., Nakaoka M.: *Wind Turbine Coupled Three-Phase Self-Excited Induction Generator Voltage Regulation Scheme with Static VAR Compensator Controlled by PI Controller*. Konf. Electrical Machines and Systems, ICEMS 2003, Chiny

Autor

Dr inż. Waław Orlewski,
e-mail: orlewski@agh.edu.pl
Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Elektroniki,
Katedra Maszyn Elektrycznych,
Al. A.Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,