

Błażej Jakubowski, Krzysztof Pieńkowski

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska

ANALIZA STATYCZNA AUTONOMICZNEGO GENERATORA INDUKCYJNEGO Z DWOMA UZWOJENIAMI STOJANA

ANALYSIS OF STEADY-STATE OPERATION OF ISOLATED INDUCTION GENERATOR WITH DUAL STATOR WINDING

Streszczenie: Samowzbudne generatory indukcyjne klatkowe są często stosowane w wybranych układach energii odnawialnej. Obecnie rozwijane są nowe konstrukcje generatorów z zastosowaniem maszyn indukcyjnych klatkowych z dwoma 3-fazowymi uzwojeniami stojana. Artykuł przedstawia zagadnienia dotyczące analizy stanów statycznych, doboru parametrów oraz wyznaczenia charakterystyk elektromagnetycznych i sterowania autonomicznego samowzbudnego generatora indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana. Rozpatrzono układy topologiczne generatora dla symetrycznego i niesymetrycznego przyłączenia obwodów obciążenia do uzwojeń stojana generatora. Przedstawiono obwodowe schematy zastępcze generatora indukcyjnego pozwalające na uwzględnienie w analizie parametrów elektromagnetycznych generatora, pojemności kondensatorów wzbudzenia oraz parametrów odbiorników przyłączonych do zacisków uzwojeń stojana generatora. W analizie uwzględniono zmienność nasycenia głównego obwodu magnetycznego generatora przez wprowadzenie nieliniowej zmienności reaktancji magnesowania generatora. Na podstawie analizy obwodowej sformułowano warunki statyczne wymagane dla pracy ustalonej generatora. Analizowano układy z konwencjonalnym bocznikowym przyłączeniem baterii kondensatorów wzbudzenia do uzwojeń stojana oraz układy z przyłączeniem dodatkowych baterii kondensatorów wzbudzenia szeregowo do obwodów obciążenia generatora. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń charakterystyk generatora.

Abstract: Self-excited cage induction generators are often used in certain renewable energy systems. Now, new designs of generators are developed with application of cage induction machines with two 3-phase stator windings. The article presents some issues concerning the analysis of steady-state operation, the principles of parameter selection and determination of operation and control characteristics of autonomous cage induction generator with two stator windings and excitation capacitors. The operation states for various systems of load circuit connections to the terminals of generator stators were considered. The equivalent circuits of dual stator induction generator for the analysis of steady-state operation have been formulated. The circuits enable taking into account the influence of the electromagnetic generator parameters, the capacitance of capacitor batteries and the parameters of load circuits, connected to the generator stator terminals. The influence of saturation of main magnetic generator circuit was included by nonlinear variation of magnetizing reactance of the generator. The conditions which are necessary for self-excitation and steady-state operation were formulated on the circuit analysis of the generator. The conventional system of parallel connection and new systems of serial connection of excitation capacitors are presented. The chosen calculated characteristics of generator have been described.

Słowa kluczowe: *autonomiczny generator indukcyjny, maszyna indukcyjna z dwoma uzwojeniami stojana, analiza statyczna, charakterystyki*

Keywords: *isolated self-excited induction generator, dual stator induction machine, steady-state operation, characteristics*

1. Wstęp

Generatory indukcyjne klatkowe są powszechnie stosowane w systemach przetwarzania energii odnawialnej. W miejscach odległych od sieci przemysłowej lub narażonych na długie przerwy w zasilaniu stosowane są autonomiczne generatory samowzbudne.

W nowoczesnych układach elektromechanicznych wprowadzane są nowe konstrukcje maszyn indukcyjnych, w tym szczególnie maszyny wielofazowe. Przykładem konstrukcji należącej do grupy maszyn wielofazowych jest maszyna indukcyjna klatkowa z dwoma oddzielnymi 3-fazowymi uzwojeniami stojana. W literaturze analizowane jest zastosowanie tego typu

maszyn do sterowania układami napędowymi maszyn roboczych [3,4].

Przedmiotem artykułu jest analiza statyczna maszyny indukcyjnej z dwoma uzwojeniami stojana jako samowzbudnego autonomicznego generatora indukcyjnego. W artykule przedstawiono metodę analizy stanów statycznych, warunki pracy statycznej oraz metodę obliczeń charakterystyk elektromagnetycznych i elektromechanicznych rozpatrywanego generatora.

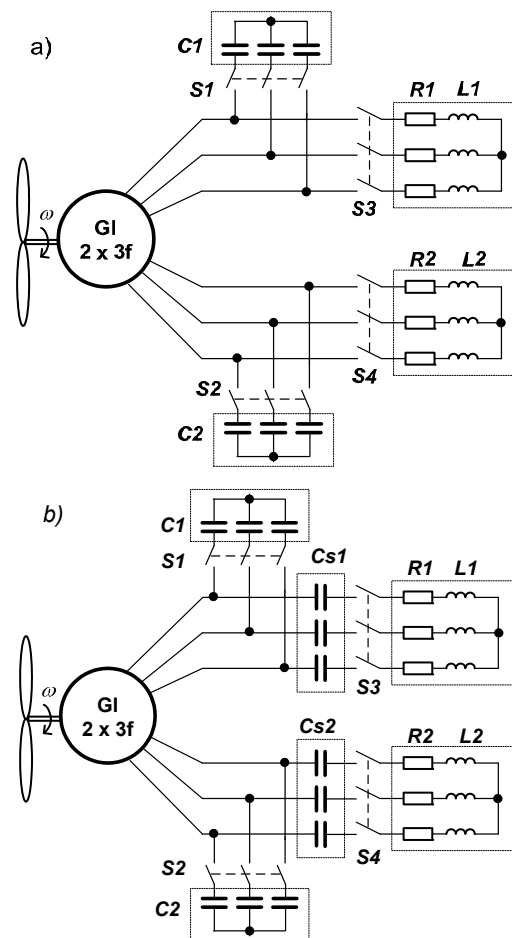
2. Układy autonomicznych generatorów indukcyjnych z dwoma uzwojeniami stojana

Podstawowe układy topologiczne autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana przedstawiono na rys.1. Rozpatrywana jest tu konstrukcja maszyny indukcyjnej w której w jarzmie stojana umieszczone są dwa 3-fazowe uzwojenia stojana wykonane na taką samą liczbę par biegunów. Osie uzwojeń fazowych poszczególnych stojanów są przesunięte względem siebie o zadany kąt elektryczny, który jest zwykle równy $\pi/6$. Łączniki S1-S4 występujące na schematach z rys.1 ilustrują możliwe kombinacje przyłączeń obwodów wzbudzenia i obwodów obciążenia generatora. W układzie konwencjonalnym z rys.1a stosowane jest tylko bocznikowe przyłączenie 3-fazowej baterii kondensatorów wzbudzających do 3-fazowego uzwojenia stojana. Możliwe jest zastosowanie układu symetrycznego wzbudzenia z dwiema bateriami kondensatorów C1, C2 przyłączonych do poszczególnych uzwojeń stojana lub układu niesymetrycznego wzbudzenia z jedną baterią kondensatorów przyłączoną do wybranego uzwojenia stojana.

Na rys.1b przedstawiono układ topologiczny w którym oprócz baterii kondensatorów przyłączanych bocznikowo zastosowano dodatkowe 3-fazowe baterie kondensatorów połączone szeregowo z gałęziami obwodów zasilających 3-fazowe odbiorniki. Istnieje też możliwość zastosowania innej odmiany tego układu topologicznego, w której dodatkowe 3-fazowe baterie kondensatorów połączone są szeregowo z gałęziami obwodów uzwojeń stojanów, a nie gałęzi obwodów odbiorników.

Autonomiczny generator indukcyjny z dwoma uzwojeniami stojana może zasiląć jednocześnie dwa niezależne 3-fazowe odbiorniki energii

elektrycznej przyłączone do oddzielnych 3-fazowych uzwojeń stojanów generatora. W szczególności jednym z odbiorników może być silnik elektryczny prądu zmiennego, a drugim odbiornik statyczny. Możliwe jest również zasilanie odbiornika 3-fazowego przyłączonego przez transformator trójuzwojeniowy jednocześnie do obu uzwojeń stojana. Przy zastosowaniu układów przekształtnikowych możliwych jest wiele innych układów topologicznych.

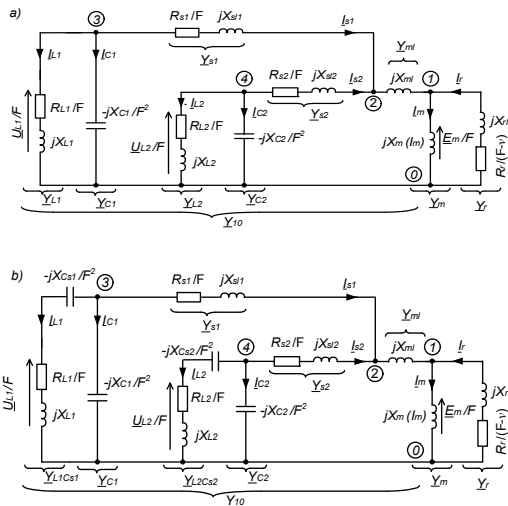


Rys.1. Układy topologiczne autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana: a) z kondensatorami wzbudzenia przyłączonymi bocznikowo; b) z kondensatorami wzbudzenia przyłączonymi bocznikowo i szeregowo

3. Schematy zastępcze autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana

Na podstawie równań ogólnych modelu matematycznego maszyny indukcyjnej z dwoma uzwojeniami stojana [3,4] można otrzymać po przekształceniach odpowiednie

równania dla warunków autonomicznej pracy generatorowej maszyny. Przy założeniu warunków odpowiadających stanom statycznym dla pracy generatorowej otrzymuje się schemat zastępczy autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana. Na rys.2a przedstawiono schemat zastępczy dla przyłączenia bocznikowego baterii kondensatorów wzbudzenia, a na rys.2b dla przyłączenia bocznikowego i szeregowego.



Rys.2. Schemat zastępczy autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana a) z kondensatorami wzbudzenia przyłączonymi bocznikowo; b) z kondensatorami wzbudzenia przyłączonymi bocznikowo i szeregowo

W schematach tych wielkości i parametry elektromagnetyczne uzwojeń stojana oznaczono indeksem s , wirnika - indeksem r , obwodów magnesowania generatora - indeksem m , a obwodów obciążenia - indeksem L . Dodatkowymi indeksami 1 i 2 oznaczono wielkości i parametry elektromagnetyczne poszczególnych uzwojeń stojana oraz przyłączonych do nich obwodów, a dodatkowym indeksem l reaktancje lub admittance rozproszenia generatora. Przyjęto, że obwody uzwojeń stojana, uzwojenia wirnika, kondensatorów wzbudzenia i obciążenia spełniają warunki symetrii 3-fazowej. Założono, że obwody obciążenia mają charakter rezystancyjno-indukcyjny. Rzeczywista częstotliwość f_l wielkości elektromagnetycznych wzbudzanych w uzwojeniach stojana i w przyłączonych do nich obwodach została odniesiona do częstotliwości znamionowej maszyny f_{IN} i wyrażona w

postaci względnej $F=f_l/f_{IN}$. Prędkość mechaniczna wirnika generatora ω została odniesiona do znamionowej prędkości synchronicznej generatora ω_{SN} i wyrażona w postaci względnej, równej $v=\omega/\omega_{SN}$. W schematach z rys.2 wszystkie reaktancje indukcyjne zostały określone dla częstotliwości znamionowej generatora. Dla zapewnienia równowagi energetycznej wprowadzono odpowiednie uzależnienie innych wielkości i parametrów elektromagnetycznych schematu zastępczego od częstotliwości względnej F .

Istotnym warunkiem pracy statycznej autonomicznego generatora indukcyjnego jest występowanie stanu nasycenia głównego obwodu magnetycznego generatora. Zjawisko to jest uwzględniane w schemacie zastępczym przez przyjęcie odpowiednio nieliniowej zmienności reaktancji magnesowania generatora X_m w funkcji prądu magnesowania.

Schemat zastępczy autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana wykazuje duże podobieństwo do schematu zastępczego konwencjonalnego autonomicznego generatora indukcyjnego [1,2].

Odmiennością jest obecność w schemacie reaktancji X_{m1} , która pozwala na uwzględnienie możliwości występowania dodatkowego sprzężenia magnetycznego między uzwojeniem 1 i 2 stojana generatora, które jest wywoływane przez strumień rozproszenia żłobkowego. Wartość tej reaktancji jest różna od zera w maszynie indukcyjnej z dwoma uzwojeniami stojana o podziałce skróconej, dla innych wykonań uzwojeń wartość tej reaktancji jest równa zero.

3. Analiza i obliczanie stanów statycznych i charakterystyk autonomicznego generatora

Analiza statyczna generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana jest oparta na równaniach sformułowanych na podstawie analizy obwodowej schematu zastępczego generatora [1,2,5]. W analizie obwodowej stosowane są dwie równoważne metody: metoda równań oczkowych (metoda impedancyjna) i metoda równań węzłowych (metoda admittancejny). W metodzie równań węzłowych schemat zastępczy generatora może być rozpatrywany jako obwód wielowęzłowy lub jako obwód jednowęzłowy z węzłem odniesienia. W schematach zastępczych na rys.2 węzeł odniesienia oznaczono numerem 0,

a pozostałe węzły obwodów numerami 1,2,3 i 4. Na schematach tych zaznaczono również wykorzystywane w obliczeniach admitancje odpowiednich gałęzi między węzłami obwodów.

Przy analizie schematu zastępczego generatora jako obwodu wielowęzłowego równania dla stanów pracy statycznej autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana są równaniami macierzowymi:

$$[\underline{Y}] \cdot [\underline{V}] = [0] \quad (1)$$

gdzie: $[\underline{Y}]$ - macierz admitancji węzłowych; $[\underline{V}]$ - macierz potencjałów węzłowych.

Dla schematu zastępczego generatora przedstawionego na rys.2a macierz admitancji węzłowych ma następującą szczegółową postać:

$$[\underline{Y}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_m + \underline{Y}_r + \underline{Y}_{m1} & -\underline{Y}_{m1} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{m1} & \underline{Y}_{s1} + \underline{Y}_{s2} + \underline{Y}_{m1} & -\underline{Y}_{s1} & -\underline{Y}_{s2} \\ 0 & -\underline{Y}_{s1} & \underline{Y}_{s1} + \underline{Y}_{s2} + \underline{Y}_{c1} & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_{s2} & 0 & \underline{Y}_{s1} + \underline{Y}_{s2} + \underline{Y}_{c2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Z równań (1)-(2) otrzymuje się warunek statyczny, który powinien być spełniony w stanach pracy ustalonej autonomicznego generatora:

$$\det[\underline{Y}] = [0] \Rightarrow \text{Re}(\det[\underline{Y}]) = 0 \quad \text{Im}(\det[\underline{Y}]) = 0 \quad (3)$$

Przy analizie schematu zastępczego generatora jako obwodu jednowęzłowego równanie dla pracy statycznej autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana ma następującą postać:

$$(\underline{Y}_m + \underline{Y}_r + \underline{Y}_{10}) \cdot \underline{E}_m / F = 0 \quad (4)$$

Z równania (4) otrzymuje się warunek statyczny, który powinien być spełniony w stanach pracy ustalonej generatora:

$$\underline{Y}_t = \underline{Y}_m + \underline{Y}_r + \underline{Y}_{s12} = 0 \Rightarrow \text{Re}(\underline{Y}_t) = 0 \quad \text{Im}(\underline{Y}_t) = 0 \quad (5)$$

Warunki (3) lub (5) mogą być w podobny sposób sformułowane dla generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana z zastosowaniem baterii kondensatorów przyłączanych bocznikowo i szeregowo przy sformułowaniu dla tego układu odpowiedniej macierzy admitancji $[\underline{Y}]$ lub całkowitej admitancji obwodu \underline{Y} .

Analiza statyczna autonomicznego generatora indukcyjnego jest oparta na rozwiązaniu układu

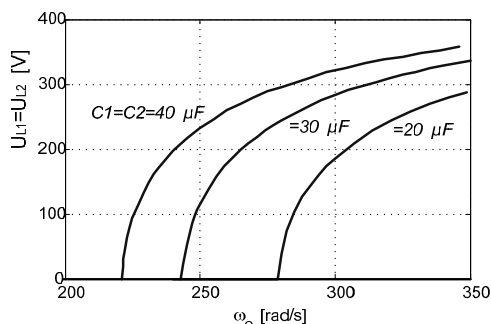
równań algebraicznych, wyznaczonych przez warunki (3) lub (5), przy uwzględnieniu nieliniowej zmienności współczynników równań wymuszonych przez nieliniowość charakterystyki magnesowania głównego obwodu magnetycznego generatora. Jako niewiadome w tych układach równań są przyjmowane najczęściej dwie wielkości: częstotliwość względna F i reaktancja magnesowania X_m [1,5]. Po wyznaczeniu tych wielkości na podstawie równań obwodowych i charakterystyki magnesowania mogą być wyznaczone wartości innych wielkości elektromagnetycznych i charakterystyki generatora. Mimo formalnej prostoty algorytmu obliczeń, obliczenia są dość złożone ze względu na uwikłane zależności opisujące współczynniki występujące w równaniach oraz nieliniową zmienność tych współczynników wywołaną przez nieliniowość charakterystyki magnesowania generatora.

4. Charakterystyki generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana

Przeprowadzono obliczenia wielkości i charakterystyk elektromagnetycznych dla 3-fazowego generatora indukcyjnego klatkowego z dwoma uzwojeniami stojana. Dane znamionowe i wartości parametrów elektromagnetycznych maszyny wynosiły: $P_N=3$ kW, $U_{N1}=U_{N2}=400$ V, $I_{N1}=I_{N2}=6,5$ A, $R_{s1}=R_{s2}=2,0$ Ω , $X_{s11}=X_{s12}=6,2$ Ω , $R_r=2,3$ Ω , $X_{r1}=9,4$ Ω , $p=2$. Przyjęta do obliczeń charakterystyka magnesowania głównego obwodu magnetycznego generatora jest charakterystyką uniwersalną magnesowania, której przebieg wyrażony w postaci wielkości względnych został aproksymowany wyrażeniem $e=a \cdot \arctg(b \cdot i_m)$, gdzie $a=1,12$, $b=1,2$. Na podstawie tego przebiegu wyznaczono nieliniową zmienność reaktancji magnesowania od prądu magnesowania $X_m=f(I_m)$. Wykonane obliczenia charakterystyk dotyczyły autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana z zastosowaniem tylko baterii kondensatorów przyłączonych bocznikowo do uzwojeń stojanów generatora oraz z zastosowaniem dodatkowej baterii kondensatorów przyłączanych szeregowo z obwodami odbiorników.

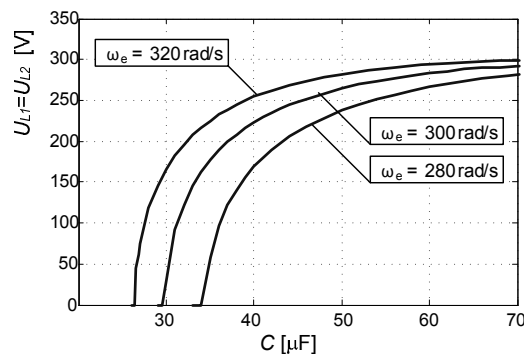
Na rys.3 przedstawiono charakterystyki napięć fazowych uzwojenia 1 i 2 stojana

nieobciążonego autonomicznego generatora indukcyjnego w funkcji prędkości kątowej wirnika $U_{L1}=U_{L2}=f(\omega_e)$. Charakterystyki zostały wyznaczone dla bocznikowego przyłączenia baterii kondensatorów wzbudzenia do obu uzwojeń stojana generatora. Z charakterystyk tych wynika możliwość pracy generatorowej maszyny tylko w ograniczonym przedziale prędkości kątowej wirnika. Przy zmniejszaniu prędkości kątowej wirnika znacznie maleją wartości napięć uzwojeń stojana. Poniżej pewnej wartości prędkości kątowej wirnika generator traci zdolność do pracy autonomicznej i nie wytwarza napięć. Przy zastosowaniu większych wartości pojemności kondensatorów przedział prędkości kątowych wirnika przy którym możliwa jest praca generatorowa ulega korzystnemu rozszerzeniu.



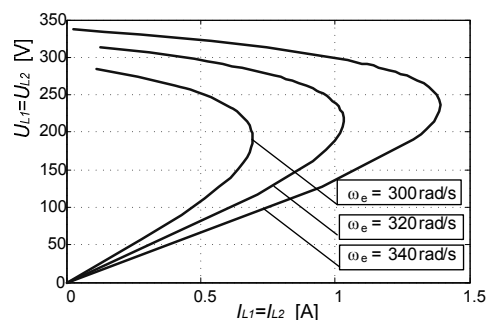
Rys.3. Charakterystyki napięć stojana generatora w funkcji prędkości kątowej wirnika $U_L=f(\omega_e)$ dla nieobciążonego generatora i różnych pojemności baterii kondensatorów przyłączonych bocznikowo $C1=C2$

Na rys.4 przedstawiono charakterystyki napięć fazowych uzwojenia 1 i 2 stojana nieobciążonego autonomicznego generatora indukcyjnego w funkcji pojemności kondensatorów przyłączonych bocznikowo do obu uzwojeń stojana $U_{L1}=U_{L2}=f(C)$. Z charakterystyk tych wynika, że wartości napięć uzwojeń stojana generatora są znacznie zależne od wartości pojemności kondensatorów przyłączanych bocznikowo do uzwojeń stojana generatora. Dla zapewnienia pracy autonomicznego generatora indukcyjnego pojemność baterii kondensatorów powinna być większa od pewnej wartości minimalnej. Charakterystyki wskazują na możliwość prostej stabilizacji napięć stojanów generatora przez odpowiednią zmianę pojemności kondensatorów w funkcji prędkości kątowej wirnika.



Rys.4. Charakterystyki napięć stojana generatora w funkcji pojemności baterii kondensatorów przyłączonych bocznikowo $U_L=f(C)$ dla nieobciążonego generatora i różnych prędkościach kątowych wirnika ω_e

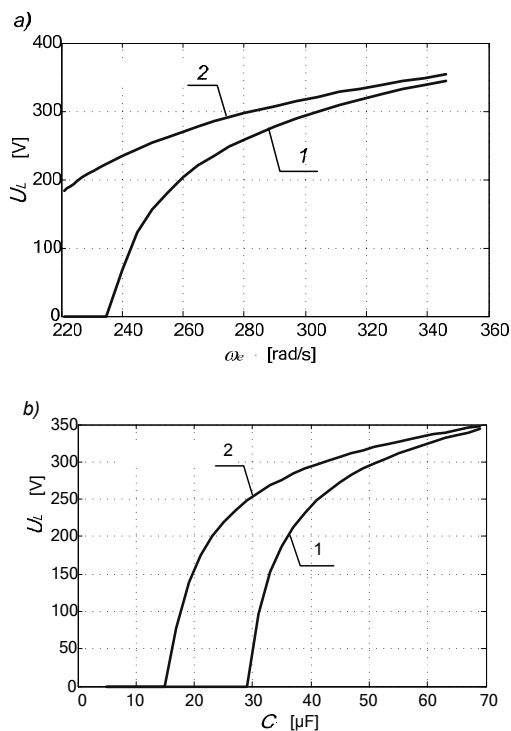
Na rys.5 przedstawiono charakterystyki napięć fazowych uzwojenia 1 i 2 stojana w funkcji prądu obciążenia $U_{L1}=U_{L2}=f(I_L)$, wyznaczone dla pracy autonomicznego generatora obciążonego symetrycznie odbiornikami rezystancyjno-indukcyjnymi. Charakterystyki wyznaczone przy różnych prędkościach kątowych wirnika i stałej pojemności kondensatorów wzbudzenia przyłączonych bocznikowo do uzwojeń stojana. Z charakterystyk wynika, że ze wzrostem obciążenia wartości napięć stojana maleją. Wartość maksymalnego obciążenia prądowego, a przez to maksymalnego obciążenia mocą jest ograniczona. Zakres tych obciążeń ulega rozszerzeniu przy większych wartościach prędkości kątowej wirnika.



Rys.5. Charakterystyki napięć stojana generatora w funkcji prądu odbiornika $U_L=f(I_L)$ dla symetrycznie obciążonego generatora i pracy przy różnych prędkościach kątowych wirnika ω_e i kondensatorach przyłączonych bocznikowo ($C1=C2=30 \mu F$)

Na rys.6 przedstawiono porównanie charakterystyk napięć fazowych uzwojenia 1 i 2 stojana generatora wyznaczone dla pracy symetrycznej generatora z obciążeniem

rezystancyjno-indukcyjnym przy przyłączeniu bocznikowym i bocznikowo-szeregowym baterii kondensatorów wzbudzenia. Z przebiegu tych charakterystyk wynika, że przyłączenie dodatkowej szeregowej baterii kondensatorów zapewnia w pewnym stopniu działanie stabilizujące pozwalające na zwiększenie sztywności charakterystyk obciążenia generatora i rozszerzenie zakresu pracy generatora.



Rys.6. Charakterystyki napięć stojana generatora przy symetrycznym obciążeniu dla przyłączenia bocznikowego i szeregowego kondensatorów wzbudzenia: a) $U_L=f(\omega_e)$ ($C_1=C_2=50 \mu F$); b) $U_L=f(C)$; (1-baterie kondensatorów przyłączone bocznikowo; 2-baterie kondensatorów przyłączone bocznikowo i szeregowo; $C_{s1}=C_{s2}=100 \mu F$)

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono ogólną metodę analizy stanów statycznych autonomicznego generatora indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana. Metoda oparta jest na analizie obwodowej schematu zastępczego generatora z zastosowaniem równań węzłowych. Zaletą metody jest prostota i możliwość stosowania do złożonych układów wzbudzenia i obciążenia generatora. Metoda może być stosowana do analizy i obliczania charakterystyk statycznych, doboru parametrów generatora i

obwodów przyłączanych do generatora oraz zakresów możliwej statycznej pracy generatora. Zastosowania autonomicznych generatorów indukcyjnych z dwoma 3-fazowymi uzwojeniami stojana mają pewne korzystne właściwości, związane z większymi możliwościami sterowania i kształtowania charakterystyk oraz jednoczesnego zasilania różnego rodzaju odbiorników. Z wymienionych względów celowe jest rozwijanie zastosowań tego typu generatorów w układach energii odnawialnej – w elektrowniach wiatrowych, małych hydroelektrowniach i w innych podobnych zastosowaniach.

6. Literatura

- [1] FRAILE-ARDANUY J., FRAILE-MORA J., GARCIA-GUTIERREZ P.: *Voltage Control of Isolated Self-Excited Induction Generator through Series Compensation*. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), R. 88, NR 1a/2012, pp.132-136.
- [2] Jakubowski B., Pieńkowski K.: *Analiza warunków wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2010, nr 30, s. 332-343.
- [3] Pieńkowski K.: *Charakterystyki i sterowanie silnika indukcyjnego z dwoma uzwojeniami stojana*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s.95-100.
- [4] Pienkowski K.: *Analysis and control of dual stator winding induction motor*. Archives of Electrical Engineering, V.63, No.3, 2012, pp.421-438.
- [5] Singh G.K.: *Modeling and experimental analysis of a self-excited six-phase induction generator for stand-alone renewable energy generation*. Renewable Energy, V.33, Iss.7, 2008, pp.1605-1621.

Autorzy

Mgr inż. Błażej Jakubowski - doktorant PWr,
Dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski - prof. nadzw. PWr.

E-mail: blazej.jakubowski@pwr.wroc.pl,
krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl

Informacje dodatkowe

Praca powstała w ramach realizacji badań statutowych (Projekt S2027/I-29/W-5).

Recenzent

Prof. dr hab. Roman Nadolski