

Zdzisław KRZEMIEN^{*}

PRACA RÓWNOLEGLA PRĄDNIC SYNCHRONICZNYCH WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI

Praca równoległa prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi możliwa jest w dwóch układach:

– przy zastosowaniu pośredniczącego urządzenia energoelektronicznego, które zamienia energię elektryczną o zmiennej częstotliwości i napięciu na energię o stałej częstotliwości i stałym napięciu. Umożliwia to oddawanie produkowanej przez prądnice energii do sieci.

– bezpośrednia praca równoległa prądnic na odbiory wydzielone.

W referacie przedstawione są wyniki badań eksperymentalnych prądnic z magnesami trwałymi dla dwóch układów pracy równoległej. Omówiono możliwości takiej pracy przy połączeniu prądnic tego samego typu oraz różnych typów.

1. WSTĘP

Praca równoległa prądnic synchronicznych o wykonaniu „klasycznym” czyli o wzbudzeniu elektromagnetycznym nie sprawia wielu problemów, inaczej rzecz ma się w przypadku prądnic wzbudzanych magnesami trwałymi, w których nie jest możliwa regulacja wartości napięcia wyjściowego.

W latach 2009–2010 w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEL w ramach projektu rozwojowego pt. „Nowatorska elektrownia rzeczna o małych nakładach inwestycyjnych z turbiną ślimakową” zaprojektowano i wykonano serię prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi. Przewidywane zastosowanie do współpracy turbinami ślimakowymi i instalacja w ciekach wodnych powoduje, że prądnice te pracujące w różnych miejscach cieku będą miały różne prędkości obrotowe, a więc wytwarzane napięcia będą miały różne wartości i częstotliwości. Wskazane więc było zbadanie możliwości pracy równoległej wykonanych prądnic.

Praca równoległa prądnic z magnesami trwałymi możliwa jest w dwóch układach:

^{*} Instytut Elektrotechniki, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: z.krzemien@iel.waw.pl

– przy zastosowaniu specjalnego urządzenia energoelektronicznego (nazwanego sprzęgiem sieciowym), które zamienia energię elektryczną o zmiennej częstotliwości i napięciu na energię o stałej częstotliwości 50 Hz i napięciu 3×400 V. Umożliwia to oddawanie produkowanej przez prądnice energii do sieci.

– bezpośrednia praca równoległa prądnic bez urządzeń wspomagających. Praca taka jest możliwa tylko na odbiory wydzielone bowiem znamionowe napięcia prądnic mają wartości znacznie mniejsze od 400 V a częstotliwości różnią się od 50 Hz.

Próby przeprowadzono w laboratorium Zakładu Maszyn Elektrycznych IEL na prądnicach synchronicznych z magnesami trwałymi o następujących danych znamionowych:

prądnica typu GM 180M-24: $P = 1$ kW; $U = 52$ V; $I = 11,7$ A; $2p = 24$; $f = 20$ Hz

prądnica typu GM 132L-24: $P = 0,5$ kW; $U = 56,8$ V; $I = 5$ A; $2p = 24$; $f = 20$ Hz

prądnica typu GM 132M-24: $P = 0,2$ kW; $U = 58,5$ V; $I = 2$ A; $2p = 24$; $f = 20$ Hz

2. PRACA RÓWNOLEGŁA PRĄDNIC NA SIEĆ POPRZEZ SPRZĘG SIECIOWY

2.1. PRACA RÓWNOLEGŁA DWÓCH PRĄDNIC TEGO SAMEGO TYPU

Prądnice typu GM132L-24 napędzane były silnikami indukcyjnymi tego samego typu zasilanymi ze wspólnego źródła napięcia o regulowanej częstotliwości (falownika). Częstotliwość napięcia zasilającego nastawiano na początku próby (przy biegu jałowym prądnic) i nie zmieniano jej w trakcie badania.

W tabeli poniżej zamieszczono wyniki próby dla zadanej prędkości obrotowej – 100 obr/min, gdzie: ΣP – suma mocy prądnic, ΔP_{sp} – straty w sprzęgu sieciowym, P_s – moc oddawana do sieci, η – sprawność systemu.

Tabela. 1. Praca równoległa dwóch prądnic tego samego typu przy obciążeniu na sieć poprzez sprzęg
Table 1. Parallel operation of two synchronous generators the same type on load to the net

GM132L-24 nr1					GM132L-24 nr2					ΣP	ΔP_{sp}	P_s	η
U	I	$\cos\varphi$	P	n	U	I	$\cos\varphi$	P	n				
V	A	–	W	1/min	V	A	–	W	1/min	W	W	W	%
73,6	–	–	–	101,0	72,4	–	–	–	100,5				–
68,9	1,42	0,908	155	98,3	69,1	1,37	0,981	146	99,9	301	146	155	51,50
67,1	2,07	0,933	224	98,0	67,1	2,08	0,922	222	99,9	446	157	289	64,80
66,8	2,44	0,932	263	98,0	67,0	2,46	0,918	261	99,8	524	172	352	67,17

Przy pracy równoległej prądnic tego samego typu obciążają się one praktycznie tak samo, przy biegu jałowym nie występuje prąd wyrównawczy.

2.2. PRACA RÓWNOLEGLA TRZECH PRĄDNIC

Prądnice GM180M-24, GM132 L-24 i GM132 M-24 napędzane były silnikami indukcyjnymi o tej samej liczbie par biegunów zasilanymi ze wspólnego falownika. Próby przeprowadzono dla zadanej prędkości obrotowej 100 obr/min. Prędkości obrotowe obciążonych prądnic pracujących równolegle na sieć poprzez sprzęg różnią się znacznie. Wynika to z różnych charakterystyk mechanicznych silników napędowych przy zasilaniu falownikowym oraz z różnych charakterystyk obciążeniowych prądnic. Występujące różnice nie wpływają jednak na pracę układu prądnice – sprzęg sieciowy i wytwarzana energia oddawana jest do sieci. Wyniki próby przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela. 2. Praca równoległa trzech prądnic różnego typu przy obciążeniu na sieć poprzez sprzęg
Table 2. Parallel operation of three synchronous generators different type on load to the net

GM180 M-24				GM132 L-24				GM132 M-24				ΣP	ΔP_{sp}	P_s	η
U	I	P	n	U	I	P	n	U	I	P	n				
V	A	W	1/min	V	A	W	1/min	V	A	W	1/min	W	W	W	%
63,4	–	–	103,1	65,0	–	–	94,2	70,3	–	–	97,4	–	–	–	–
56,2	8,10	728	99,5	55,3	2,13	190	78,8	55,7	1,33	121	82,3	1039	223	816	78,54
55,6	9,11	814	98,7	54,7	2,41	212	77,4	55,1	1,72	154	81,8	1180	244	936	79,32

3. BEZPOŚREDNIA PRACA RÓWNOLEGLA PRĄDNIC
Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

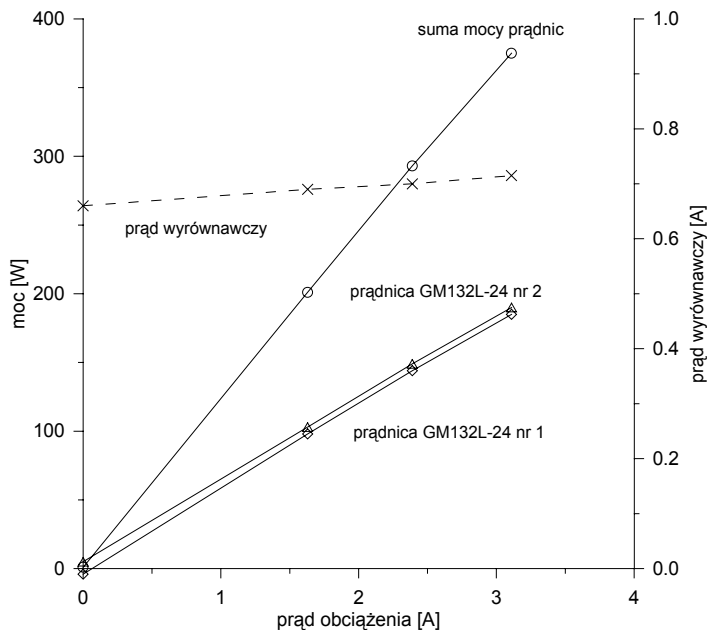
Jeśli w obwodzie pracują dwie prądnice synchroniczne, z których jedna wiruje z prędkością obrotową większą niż prądnica druga wówczas SEM E_1 prądnicy pierwszej wyprzedza SEM E_2 prądnicy drugiej i w rezultacie powstaje różnica faz powodująca powstanie wypadkowej SEM, która wywołuje powstanie prądu wyrównawczego I_w w obwodzie obu tworników. Maszyna pierwsza pracuje jako prądnica i wytwarza moc $P_s \approx E_1 I_w$ zasilając maszynę drugą, która pracuje jako silnik synchroniczny. Moc synchronizująca P_s będzie powodować hamowanie maszyny pierwszej i przyspieszanie maszyny drugiej.

W ramach wykonywanej pracy przebadano możliwość bezpośredniej pracy równoległej prądnic na wspólne obciążenie rezystancyjne bez stosowania pośredniczących układów energoelektronicznych. Wykonano badania na prądnicach pracujących równolegle tego samego typu oraz różnych typów. Napędowe silniki zasilane były z tego samego falownika. Badania wykonywano przy zadanej znamionowej prędkości obrotowej prądnic – 100 obr/min, w trakcie prób utrzymywano stałą prędkość obrotową prądnic zmieniając odpowiednio nastawienia falownika.

3.1. PRACA RÓWNOLEGLA DWÓCH PRĄDNIC TEGO SAMEGO TYPU

Dwie prądnice typu GM132L-24 nr 1 i 2 połączono równolegle a następnie obciążono regulowaną rezystancją. Prądnice napędzane były silnikami indukcyjnymi tego samego typu zasilanymi ze wspólnego falownika. W obwodzie pomiędzy prądnicami występował prąd wyrównawczy wywołany różnicami parametrów prądnic.

Na rysunku poniżej przedstawiono zależności mocy i prądu wyrównawczego przy bezpośredniej pracy równoległej dwóch prądnic typu GM132L-24.

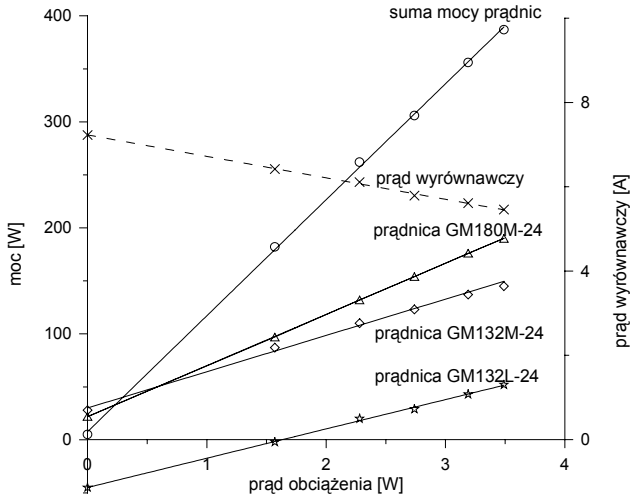


Rys. 1. Charakterystyki dwóch prądnic tego samego typu przy bezpośredniej pracy równoległej
 Fig. 1. Measured load characteristics of two generators the same type on the direct parallel operation

Przy braku obciążenia (bieg jałowy zespołu) prądnica nr 1 pracuje jako silnik pobierając moc czynną równą 4 W, prądnica nr 2 pracuje jako prądnica wytwarzając moc 5 W, w obwodzie występuje prąd wyrównawczy 0.66 A współczynniki mocy wynoszą odpowiednio -0.047 i 0.061 .

3.2. PRACA RÓWNOLEGLA TRZECH PRĄDNIC RÓŻNYCH TYPÓW

Trzy prądnice typu GM180M-24, GM132L-24 i GM132M-24 połączono równolegle, a następnie obciążano regulowaną rezystancją. Prądnice napędzane były silnikami indukcyjnymi tego samego typu zasilanymi ze wspólnego falownika.



Rys. 2. Charakterystyki trzech prądnic różnego typu przy bezpośredniej pracy równoległej
 Fig. 2. Measured load characteristics of three generators different type on the direct parallel operation

Przy bezpośredniej pracy równoległej trzech prądnic różnych typów różnice ich parametrów (wartości napięć i impedancji) powodują, że w stanie nieobciążonym systemu jedna z prądnic pracowała jak silnik synchroniczny zaś pozostałe maszyny pracowały jako prądnice, parametry ich były następujące:

maszyna GM180M-24 pracowała jako prądnica: $U = 65 \text{ V}$; $I = 7.2 \text{ A}$; $P = 21 \text{ W}$;
 $\cos\varphi = 0.026$;

maszyna GM132L-24 pracowała jako silnik: $U = 64.9 \text{ V}$; $I = 5.14 \text{ A}$; $P = -45 \text{ W}$;
 $\cos\varphi = -0.078$;

maszyna GM132M-24 pracowała jako prądnica: $U = 65 \text{ V}$; $I = 1.74 \text{ A}$; $P = 26 \text{ W}$;
 $\cos\varphi = 0.133$;

Suma mocy wytworzonej przez maszyny pracujące jako prądnice równa się w przybliżeniu mocy pobranej przez maszynę pracującą jako silnik. Suma obliczonych prądów czynnych maszyn jest równa praktycznie zero, natomiast suma prądów biernych dwóch mniejszych prądnic jest równa prądowi biernemu prądnicy większej.

Wzrost obciążenia powoduje przejście wszystkich maszyn do pracy prądnicowej, wówczas suma składowych czynnych prądów prądnic jest równa prądowi obciążenia, prąd bierny prądnicy GM180M-24 jest równy prądowi wyrównawczemu. Różnice parametrów prądnic sprawiają, że prądnice nie obciążają się proporcjonalnie do ich mocy. W badanych układach prądnice o mniejszej mocy znamionowej (GM132L-24 i GM132M-24) obciążały się bardziej bowiem ich napięcia przy danej prędkości obrotowej miały większe wartości niż napięcie prądnicy GM180M-24.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie sprzęgu sieciowego umożliwia prace równoległą prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi oraz oddawanie produkowanej energii do sieci. Różne prędkości obrotowe prądnic oraz różne wartości napięć wyjściowych nie pogarszają pracy układu – w systemie nie występują prądy wyrównawcze. Możliwa jest praca równoległa prądnic różnych typów i wielkości, przy czym nie obciążają się one proporcjonalnie do mocy i może wystąpić przeciążenie prądnic o mniejszej mocy znamionowej. Dlatego też zaleca się stosowanie do pracy równoległej z użyciem sprzęgu sieciowego prądnic tego samego typu, wówczas obciążenie rozkłada się praktycznie równomiernie na wszystkie prądnice.

Zastosowanie sprzęgu sieciowego powoduje pogorszenie sprawności systemu – szczególnie przy niewielkich obciążeniach. Układy energoelektroniczne zużywają na „potrzeby własne” znaczne ilości energii i dlatego zaleca się stosowanie sprzęgu w systemach o mocach większych, przynajmniej rzędu kilku kilowatów.

Praca równoległa prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi na wspólne obciążenie bez stosowania pośredniczących układów energoelektronicznych jest możliwa, jednak różnice ich parametrów (wartości napięć, częstotliwości i impedancji) powodują, że w stanie nieobciążonym systemu niektóre z maszyn pracują jako prądnice inne zaś jako silniki synchroniczne pobierając moc wytwarzaną przez prądnice, w obwodzie połączonych tworników prądnic występuje prąd wyrównawczy. Wzrost obciążenia powoduje przejście wszystkich maszyn do pracy generatorowej.

Możliwa jest praca równoległa prądnic różnych typów i wielkości, przy czym różnice parametrów wyjściowych maszyn powodują, że nie obciążają się one proporcjonalnie do mocy i może wystąpić przeciążenie prądnic o mniejszej mocy znamionowej. Dlatego też zaleca się stosowanie do bezpośredniej pracy równoległej prądnic tego samego typu.

PARALLEL OPERATION OF SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS

Parallel operation of synchronous generators with permanent magnets is possible in following systems:

– by use of special power electronics device which changes the electric energy with variable frequency and the voltage to energy with constant frequency and voltage. It makes possible giving back of energy to the net,

– direct parallel operation of generators on separate load.

In the paper the test results of parallel operation of synchronous generators of the same as well as of the different types are presented.