

Metody stabilizacji napięcia wyjściowego w prądnicach z magnesami trwałymi

Streszczenie. Prądnice wzbudzone magnesami trwałymi mają prostą budowę i najwyższą sprawność ze wszystkich maszyn elektrycznych. Zalety te zadecydowały o szerokim ich zastosowaniu w szeregu aplikacjach, głównie w odnawialnych źródłach energii, np. elektrownie wiatrowe. Wadą tych prądnic jest brak regulacji napięcia, co dyskredytuje je do zastosowań na szeroką skalę energetyczną, gdyż nie ma możliwości regulacji współczynnika mocy $\cos\phi$. W artykule przedstawiono syntetyczny przegląd konstrukcji prądnic z magnesami trwałymi oraz podstawowe zagadnienia teoretyczne prądnic z magnesami trwałymi. W dalszej części publikacji zaprezentowano szereg sposobów umożliwiających regulację napięcia wyjściowego w prądnicy. Wg autora, najkorzystniejszym rozwiązaniem stabilizacji napięcia wyjściowego w tego typu maszynach jest rozwiązanie prądnicy hybrydowej. Ponieważ już na etapie projektowym można tak konstruować prądnicę, aby jej zakres regulacji wzbudzenia ograniczyć do potrzeb danej aplikacji.

Abstract. Generators excited with permanent magnets are characterized by simple construction and highest efficiency of all electric machines. These features have determined their wide use in different appliances such as renewable energy sources, e.g. wind power plants. The drawback of these generators is due to the fact that it is not possible to control the output voltage; this prevents their extensive use in power engineering, since power coefficient $\cos\phi$ is unmanageable. A summarised review of PM generators' designs is presented in the paper as well as basic theoretical issues of these generators. Next, different ways of making it possible to control the output voltage in these machines have been shown. In author's opinion, the most advantageous method of stabilising output voltage in such machines is to use a hybrid-type generator. At the design stage, the PM generator may be constructed so that the excitation control range should be limited in accordance with the demands set by a given application.

Methods for stabilizing the output voltage of permanent magnet synchronous generators

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi, prądnice ze wzbudzeniem hybrydowym, wzbudzenie magnetomotoryczne, regulacja wzbudzenia.

Keywords: the synchronous generator is excited by permanent magnets, alternator, hybrid synchronous generator.

doi:10.12915/pe.2014.12.76

Wstęp

Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi charakteryzują się najlepszymi właściwościami elektromechanicznymi wśród wszystkich typów przetworników energii mechanicznej na elektryczną [3, 6, 7, 13, 14]:

- mają najwyższą sprawność energetyczną,
- generują energię elektryczną w całym zakresie prędkości obrotowej,
- mają największą gęstość mocy,
- nie mają mechanicznych styków wirujących.

Rozwój maszyn elektrycznych wzbudzonych magnesami trwałymi umożliwiły powstałe warunki, które stworzyła inżynieria materiałowa magnesów trwałych z pierwiastków ziem rzadkich (NdFeB i SmCo), a następnie ich masowa produkcja. Prądnice wzbudzone magnesami trwałymi bardzo dobrze sprawdzają się przy pracy samotnej, w szczególności przy obciążeniu rezystancyjnym, to znaczy zasilając odbiorniki energii, w których dopuszcza się znaczne zmiany napięcia (np. do grzania wody) [12]. Dlatego prądnice wzbudzone magnesami trwałymi znalazły szerokie zastosowanie w elektrowniach wodnych i wiatrowych małych i średnich mocy, gdzie się sprawdziły i są coraz powszechniej stosowane. Jednakże duża zmienność napięcia ogranicza obszar stosowania prądnic wzbudzonych magnesami trwałymi [8, 17, 19, 23], w szczególności w energetyce, gdzie prądnica musi pracować stabilnie przy zmianach mocy czynnej i mocy biernej. Obecnie problem ten zazwyczaj rozwiązuje się, załączając prądnicę do sieci poprzez falownik AC/DC/AC [5]. Jednak rozwiązanie to jest ograniczone do prądnic o niskich mocach, a ponadto wymaga energoelektronicznego przetwarzania energii elektrycznej, co powoduje, że kształt generowanego napięcia wyjściowego odbiega od kształtu napięcia generowanego przez "klasyczną" maszynę synchroniczną. Dodatkowo, kaskadowe przetwarzanie energii obniża sprawność całego układu.

W artykule przedstawiono przegląd możliwości stabilizacji napięcia wyjściowego prądnic synchronicznych wzbudzonych magnesami trwałymi z wykorzystaniem zmian konstrukcji maszyny.

1. Przegląd konstrukcji prądnic z magnesami trwałymi

Obwody magnetyczne prądnic cylindrycznych wzbudzone magnesami trwałymi, których zmienność napięcia wyjściowego jest najwyższa, w literaturze dzieli się na: prądnice z magnesami trwałymi umieszczonymi na obwodzie wirnika, SPM (Surface Permanent Magnet), prądnice z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz jarzma wirnika, IPM (Interior Permanent Magnet).

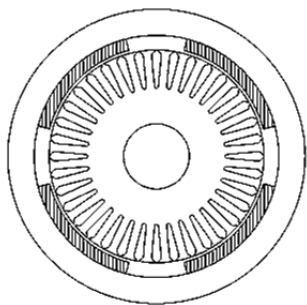
Wirnik, w każdej maszynie elektrycznej, może być wewnętrzny lub zewnętrzny. Rozwiązanie stojana (twornika) jest identyczne jak w maszynach indukcyjnych i maszynach synchronicznych ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe rozwiązania wirników wewnętrznych maszyn synchronicznych SPM, a na rysunku 2 obwód magnetyczny maszyny z wirnikiem zewnętrznym i magnesami trwałymi umieszczonymi na powierzchni.



Rys.1. Wirniki wewnętrzne prądnic SPM ($2p=4$) z magnesami przyklejonymi na powierzchni wirnika (a) oraz z magnesami trwałymi umieszczonymi w wyciętych „korytkach” (b, c)

Prądnice z magnesami trwałymi umieszczonymi na powierzchni wirnika SPM charakteryzują się zbliżonymi przewodnościami magnetycznymi w osiach „d” i „q”, gdyż względna przenikalność magnetyczna magnesów trwałych jest tylko o 5% większa od przewodności względnej powietrza. Oś „d” jest osią wzbudzenia a oś „q” jest do niej ortogonalną. Kąt geometryczny między osiami „d” i „q” wynosi $\pi/2p$, gdzie p oznacza liczbę par biegunów. Właściwość ta powoduje, że prądnice tej konstrukcji wykazują stosunkowo wysoką zmienność napięcia w funkcji prądu obciążenia i $\cos\phi$, sięgającą $30 \div 40\%$. Prądnic tych nie można zastosować do bezpośredniego zasilania odbiorników wrażliwych na zmiany napięcia wyjściowego w

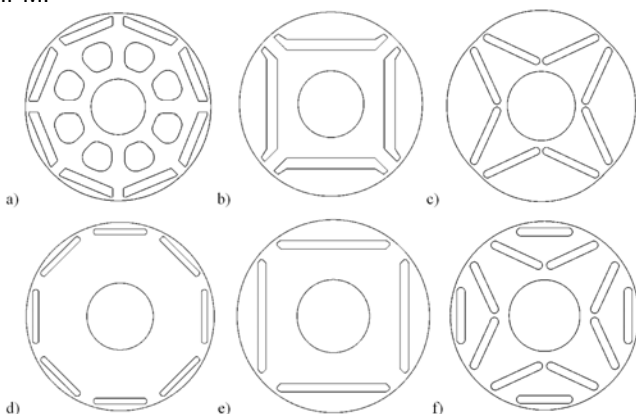
tak dużych granicach. Nie można ich synchronizować z siecią elektroenergetyczną, gdyż nie mają regulacji napięcia.



Rys.2. Obwód magnetyczny prądnicy cylindrycznej z wirnikiem zewnętrznym i magnesami trwałymi umieszczonymi na powierzchni wirnika (2p=4)

Druga grupa prądnic ma magnesy trwałe umieszczone wewnątrz jarzma wirnika, są to prądnice IPM. Cechą charakterystyczną prądnic IPM są różne wartości przewodności magnetycznej w osiach „d” i „q”, zatem reaktancje wewnętrzne prądnic w tych osiach są różne ($X_d < X_q$). Ta cecha ma wpływ na kształt charakterystyk zewnętrznych prądnicy $U = f(I)$ przy $\cos\phi = \text{constans}$ i to powoduje, że ich zmienność napięcia jest mniejsza. Jednak prądnice IPM, przy symetrycznym (walcowym) wirniku charakteryzują się wyższą zawartością harmonicznych w indukowanym napięciu wyjściowym. Współczynnik zniekształcenia napięcia THD_U może przekraczać wartości podawane w obowiązujących przepisach [22], a technologia wykonania takiego wirnika w jednostkowym wykonaniu jest droższa, gdyż wymaga opracowania specjalnego oprzyrządowania.

Na rysunkach 3 przedstawiono sześć przykładowych rozwiązań konstrukcyjnych wirników prądnic cylindrycznych IPM.



Rys.3. Rozwiązania wirników prądnic IPM

2. Praca prądnicy z magnesami trwałymi

2.1. Bieg jałowy

Bieg jałowy prądnicy jest to stan w którym w uzwojeniach twornika prąd nie płynie, dlatego też nie występują spadki napięcia na rezystancjach i reaktancjach wewnętrznych maszyny. Napięcie biegu jałowego, mierzone na zaciskach prądnicy jest równe sumie sił elektromotorycznych (SEM) indukowanych w poszczególnych zewojach uzwojenia twornika. Napięcie to zawiera harmoniczną podstawową i szereg nieparzystych harmonicznych. Wartość skuteczną napięcia fazowego E_{f0} indukowanego w uzwojeniu wyraża równanie:

$$(1) \quad E_{f0} = \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} E_v^2}$$

przy czym wartość skuteczną napięcia E_v harmonicznej v

$$(2) \quad E_v = 4.44 \cdot z_t \xi_v f_v \phi_v$$

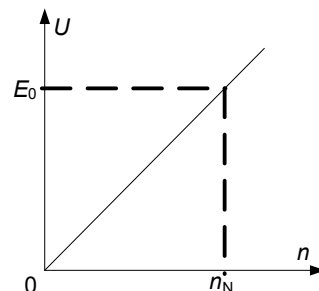
W prądnicach 3-fazowych napięcie międzyfazowe

$$(3) \quad E_0 = \sqrt{3} E_{f0}$$

gdzie: z_t – liczba zwojów szeregowych w jednej fazie, ξ_v – współczynnik uzwojenia dla v -tej harmonicznej, f_v – częstotliwość generowanego napięcia v -tej harmonicznej, ϕ_v – strumień wzbudzenia v -tej harmonicznej.

Harmoniczne $v = 3n$ występują tylko w napięciu fazowym (2), w prądnicach 3-fazowych w napięciu międzyprzewodowym (3) harmoniczne $v = 3n$ są równe zero, n jest liczbą naturalną.

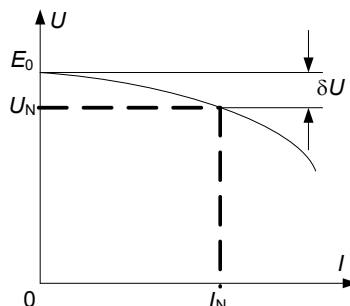
Dla prądnic synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym, charakterystyka biegu jałowego, przy stałej prędkości obrotowej, jest funkcją prądu wzbudzenia i ma kształt krzywej magnesowania. W przypadku prądnic z magnesami trwałymi, siła magnetomotoryczna (SMM) wzbudzenia ma wartość stałą, to przy stałej prędkości obrotowej, uzyskuje się jedną wartość napięcia. Prądnica może pracować ze zmienną prędkością obrotową, co pozwala lepiej wykorzystać moc turbiny wiatrowej bądź wodnej. Napięcie biegu jałowego prądnicy jest wprost proporcjonalne do prędkości wirowania wirnika, jak to pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyka biegu jałowego prądnicy z magnesami trwałymi

2.2. Charakterystyki obciążenia

Charakterystyki obciążenia prądnic z magnesami trwałymi zależne są od budowy wirnika, to jest od usytuowania magnesów trwałych, determinującego reaktancje X_d i X_q , oraz od prędkości obrotowej n i charakteru obciążenia (I , $\cos\phi$). Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę napięcia w funkcji prądu obciążenia prądnicy z magnesami trwałymi w której reaktancje $X_d \approx X_q$.



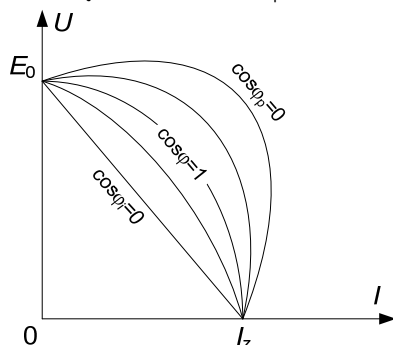
Rys. 5. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy przy $n = \text{constans}$, $\cos\phi = \text{constans}$

Zmienność napięcia prądnic synchronicznych, zgodnie z rysunkiem 5, definiuje równanie:

$$(4) \quad \delta U_{\%} = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \cdot 100\%$$

przy czym, U_N jest napięciem znamionowym w warunkach pracy: znamionowej prędkości obrotowej n_N , znamionowym prądzie I_N i znamionowym $\cos\varphi_N$ obciążenia, a E_0 jest mierzone przy znamionowej prędkości obrotowej n_N .

Zmienność napięcia prądnic zależy od charakteru obciążenia. Dla obciążenia czynnego ($\cos\varphi = 1$) zmienność napięcia jest stosunkowo niewielka. Dla obciążenia indukcyjnego ($\cos\varphi_i < 1$) zmienność napięcia jest znacznie większa, co ogranicza moc znamionową prądnicy. Przy obciążeniu pojemnościowym ($\cos\varphi_p < 1$), dla małych wartości prądu obciążenia występuje wzrost napięcia, a przy większych wartościach prądu spadek napięcia. Na rysunku 6 przedstawiono rodzinę charakterystyk zewnętrznych prądnicy z magnesami trwałymi w zależności od charakteru obciążenia dla $X_d \approx X_q$.



Rys. 6. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy z magnesami trwałymi

Rodzaj magnesów trwałych i ich wymiary, wielkość szczeliny powietrznej oraz wartość SMM oddziaływania twornika i kąt położenia wektora SMM względem osi „d” magnesów trwałych determinują strumień wypadkowy wzbudzenia, a to bezpośrednio przekłada się na wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu maszyny.

3. Metody stabilizacji napięcia w prądnicach synchronicznych z magnesami trwałymi

3.1. Metoda stabilizacji samoistnej

Stabilizacja samoistna sprowadza się głównie do odpowiedniego polepszenia charakterystyki zewnętrznej $U=f(I)$ tak, aby zmniejszyć spadek napięcia ΔU na impedancji uzwojenia prądnicy przez prąd obciążenia. Realizuje się to na etapie projektowym prądnicy, poprzez odpowiednią konstrukcję obwodu elektromagnetycznego. Głównym celem jest zmniejszenie spadków napięcia na rezystancji R i reaktancji X_L prądnicy oraz minimalizacji oddziaływania SMM twornika na strumień wypadkowy.

Zmniejszanie spadków napięć na rezystancji uzyskuje się przez zmniejszenie gęstości prądu w uzwojeniu, a to wymaga zastosowania żłobków o większych przekrojach i skutkuje zwiększonym zużyciem materiałów czynnych. W konsekwencji daje to niewielki wpływ na charakterystykę zewnętrzną. Rezystancja uzwojenia jest dobierana ze względów ekonomicznych uwzględniając: straty mocy, temperaturę pracy i warunki chłodzenia oraz koszt materiałów.

Zmniejszenie reaktancji można uzyskać poprzez zastosowanie niskich (płytkich) żłobków o stosunkowo dużej szerokości (taki żłobek charakteryzuje się niewielkim strumieniem rozproszenia) i przy możliwie małej liczbie zwojów uzwojenia.

Zmniejszenie wpływu SMM twornika na strumień wypadkowy wzbudzenia powoduje konieczność powiększenia szczeliny powietrznej, co skutkuje zwiększeniem objętości i masy magnesów trwałych, a w konsekwencji wzrostem ceny maszyny.

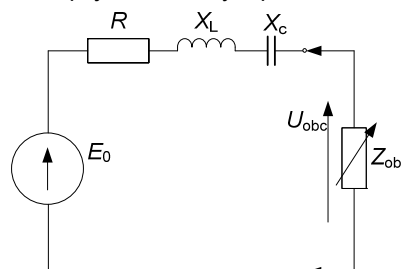
Stabilizacja samoistna prądnic poprzez odpowiednie kształtowanie parametrów wewnętrznych maszyny jest nieekonomiczna, ze względu na niski współczynnik wykorzystania mocy w stosunku do masy i objętości prądnicy. Metoda stabilizacji napięcia, poprzez odpowiedni dobór parametrów wewnętrznych, może być stosowana w wykonaniach jednostkowych prądnic małych mocy pracujących przy zmianach obciążenia w granicach od 0.5÷1 mocy znamionowej i $\cos\varphi_i > 0.9$.

3.2. Metoda stabilizacji napięcia poprzez podłączenie dodatkowych pojemności

Metoda stabilizacji napięcia wyjściowego poprzez odpowiednie konfiguracyjne podłączenie pojemności (szeregowe lub równoległe) została opracowana po raz pierwszy w 1939 roku [4].

a) Szeregowy stabilizator pojemnościowy

Zasada działania szeregowo włączonej pojemności do obwodu twornika z odbiornikiem polega na kompensacji reaktancji synchronicznej twornika prądnicy. Uproszczony schemat elektryczny prądnicy z połączonym szeregowo kompensatorem pojemnościowym przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Schemat zastępczy prądnicy z kompensacją szeregową: E_0 , R , X_L – napięcie biegu jałowego, rezystancja i reaktancja prądnicy, X_C – reaktancja kompensatora.

Wartość reaktancji pojemnościowej kompensatora regulującego napięcie wyjściowe prądnicy można wyznaczyć z poniższej zależności:

$$(5) \quad X_C = \frac{U_c}{I}$$

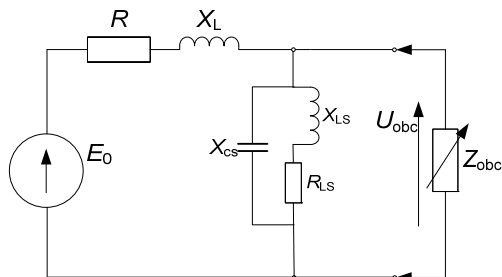
Pojemność kondensatora $C = \frac{1}{\omega X_C}$ można dobrać w taki sposób, by reaktancja X_C kompensatora była równa reaktancji X_L prądnicy. W takim przypadku w prądnicę będą występowały spadki napięcia jedynie na rezystancji. Kompensacja szeregową ma charakter rezonansowy, silnie zależy od częstotliwości (prędkości obrotowej) i może wzbudzać drgania napięcia w odbiornikach energii, ponadto ich masa kondensatora jest duża, wynosi około 30% masy prądnicy.

b) Stabilizator pojemnościowy równoległy

Stabilizator pojemnościowy równoległy jest powszechnie stosowany w elektroenergetyce i służy do kompensacji mocy biernej odbiorców energii elektrycznej. Układ kompensacji jest złożony z dławika nasycanego i kondensatora połączonych równoległe. Kompensację uzyskuje się poprzez zmianę nasycenia dławika. Kompensator umożliwia regulację mocy biernej w takt zmiany mocy biernej odbiorników. Na rysunku 8 przedstawiono uproszczony schemat elektryczny połączenia prądnicy i stabilizatora pojemnościowego równoległego.

Parametry takiego stabilizatora dobiera się w taki sposób, że dla napięcia biegu jałowego prądnicy w obwodzie stabilizatora musi powstać zjawisko rezonansów prądów, tzn. prąd w obwodzie dławika nasycanego musi

być równy prądowi kondensatora. Stabilizacja napięcia prądnicy z takim kompensatorem odbywa się w następujący sposób: przy wzroście prądu obciążenia napięcie prądnicy maleje, zmniejsza się nasycenie dławika, co spowoduje zmniejszenie prądu dławika. Prąd sumaryczny stabilizatora, będący prądem pojemnościowym, zaczyna wzrastać kompensując spadek napięcia na zaciskach prądnicy, co w konsekwencji prowadzi do stabilizacji napięcia wyjściowego. Ze względu na duże nasycenie w dławiku kompensacja napięcia odbywa się w dwie strony, tj. w przypadku gdy charakter obciążenia głównej prądnicy jest pojemnościowy, to stabilizator zachowuje się jako obciążenie indukcyjne i odwrotnie.



Rys. 8. Schemat zastępczy prądnicy ze stabilizatorem pojemnościowym równoległym

Zaletą stabilizatorów równoległych jest ich płynna kompensacja napięcia, która reaguje natychmiast po zmianach obciążenia. Natomiast poważną wadą są wysokie straty mocy czynnej ze względu na konieczność utrzymania rdzenia dławika w stanie nasyconym, możliwość zniekształcania napięcia prądnicy oraz podobnie jak w przypadku stabilizatorów szeregowych, wrażliwość na zmianę prędkości obrotowej i duża masa stabilizatora (ok. 30 % masy prądnicy).

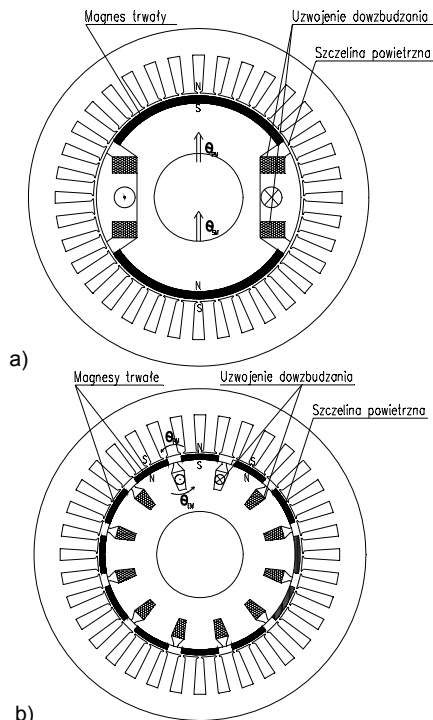
Istnieją również i inne metody stabilizacji napięcia wyjściowego prądnicy z magnesami trwałymi, które mogą być realizowane poprzez podłączenie równoległe do zacisków maszyny:

- regulowanej pojemności (obwód szeregowy złożony z kondensatora i dławika nasycanego)
- pojemności nieliniowej (wartość pojemności zależna jest od wartości przyłożonego napięcia, tzw. warikondy).

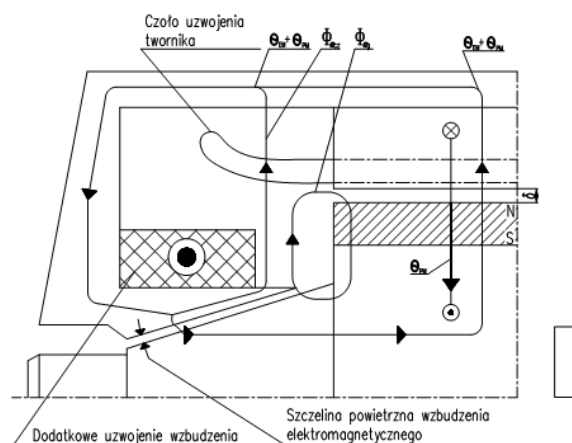
4. Prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem hybrydowym

Problematyka hybrydowego wzbudzenia obwodów elektromagnetycznych, to znaczy połączenia wzbudzenia magnesami trwałymi ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, nie jest w literaturze jednoznacznie rozwiązana. Siły magnetomotoryczne wzbudzenia obwodu magnetycznego od magnesów trwałych i elektromagnetycznego mogą działać szeregowo bądź równoległe. Na rysunku 9 przedstawiono obwód magnetyczny prądnicy ze wzbudzeniem hybrydowym, to jest ze wzbudzeniem magnesami trwałymi i wzbudzeniem elektromagnetycznym działającymi szeregowo [2, 3, 15].

Rozwiązanie szeregowe wzbudzenia nie jest ekonomiczne, gdyż przenikalność względna magnesów trwałych wynosi w przybliżeniu 1,05 i kilkumilimetrowy magnes trwały w obwodzie szeregowym, dla wzbudzenia elektromagnetycznego stanowi barierę, której pokonanie wymaga dużej siły magnetomotorycznej.



Rys. 9. Obwody magnetyczne prądnicy SPM dwu- (a) i dwunasto- (b) biegunowej ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowym

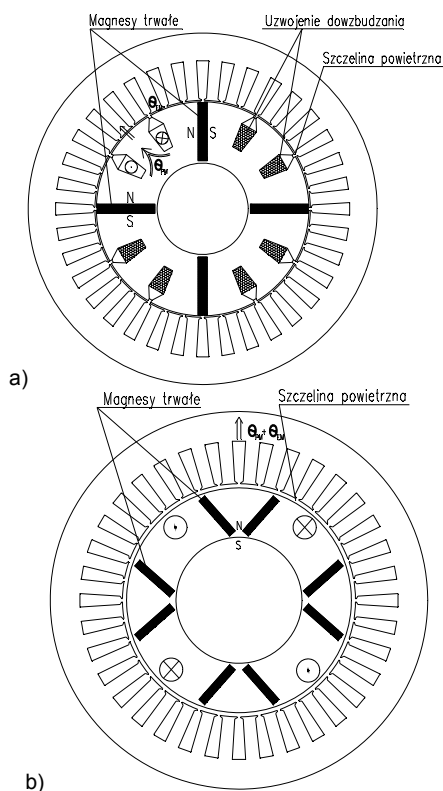


Rys. 10. Rozwiązanie konstrukcyjne generatora 4-biegunowego z unipolarnym uzwojeniem wzbudzenia umieszczonym na stojanie

W literaturze spotyka się także inne propozycje rozwiązań obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych z dowzbudzeniem elektromagnetycznym. Na przykład na

rysunku 10 przedstawiono maszynę o liczbie par biegunów $p=2$, w której magnesy trwałe umieszcza się na dwóch przeciwległych biegunach w taki sposób, że są one jednakowo zorientowane względem szczeliny i obwód magnetyczny dowzbudza się siłą magnetomotoryczną unipolarną generowaną przez uzwojenie nieruchome umieszczone w stojanie [25]. Rozwiązanie to także nie jest korzystne, gdyż podmagnesowuje jarzmo stojana stałym strumieniem magnetycznym i daje niesymetryczny rozkład pola magnetycznego pod biegunem N i S. Rozwiązanie to, jak dotychczas, nie wzbudziło zainteresowania producentów maszyn elektrycznych.

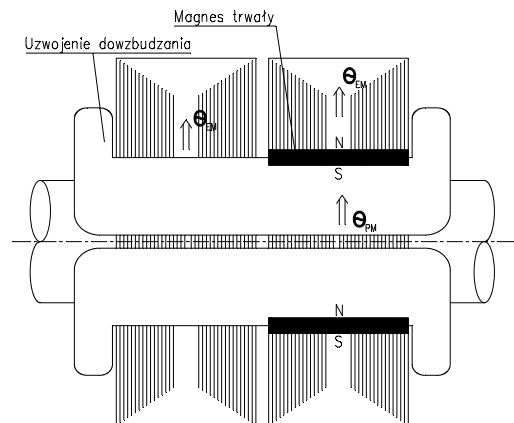
Na rysunku 11a przedstawiono przykład czterobiegunowego rozwiązania uzwojenia obwodu magnetycznego prądnicy IPM z magnesami trwałymi ułożonymi promieniowo z dodatkowym szeregowym hybrydowym wzbudzeniem elektromagnetycznym [1, 2, 15]. Rozwiązanie wirnika z rysunku 11a, ze względu na stabilność mechaniczną konstrukcji, nie jest korzystne. Wał wirnika powinien być niemagnetyczny ($\mu=1$), aby nie zwiernął magnesów trwałych, bądź między wałem a jarzmem magnetycznym powinna być tuleja niemagnetyczna. Zatem także w prądnicach IPM z wirnikiem jak na rysunku 11a składowa strumienia magnetycznego generowana przez SMM uzwojenia wzbudzenia przechodzi przez magnesy trwałe, a więc przez elementy obwodu magnetycznego o dużej reluktancji.



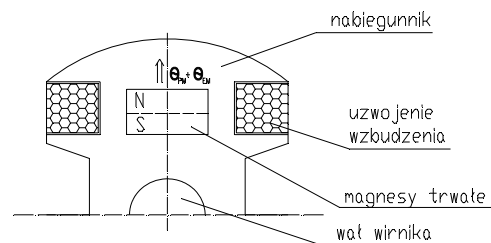
Rys. 11. Obwód magnetyczny prądnicy czterobiegunowej IPM dowzbudzonej z magnesami trwałymi usytuowanymi promieniowo (a) i według litery „V” (b)

Kolejnym rozwiązaniem jest usytuowanie magnesów trwałych w jarzmie wirnika na wzór litery „V”, jak na rysunku 11b, ono też jest rozwiązaniem szeregowym. Szeregowe rozwiązanie wzbudzenia nie jest korzystne, gdyż wymaga dużej elektromagnetycznej SMM, a z tym są związane straty mocy i problemy ciepłno-wentylacyjne wirnika. Układy szeregowe wzbudzenia nie są zatem interesujące dla konstruktorów prądnic synchronicznych.

Interesująca jest konstrukcja wirnika z szeregowo - równoległym układem wzbudzenia przedstawiona na rys. 12 [18]. W rozwiązaniu tym magnesy trwałe są na części wirnika, a uzwojenie wzbudzenia obejmuje cały wirnik. Podobne rozwiązanie przedstawiono na rysunku 13 [24].

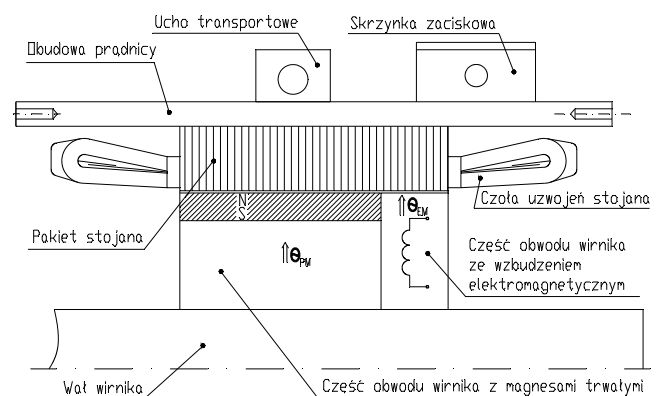


Rys. 12. Wirnik generatora 2-biegunowego IPM ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowo równoległym



Rys. 13. Inne rozwiązanie nabiegunnika wirnika generatora IPM ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowo równoległym

Siła magnetomotoryczna generowana przez uzwojenie wzbudzenia w części, gdzie są umieszczone magnesy trwałe, działa szeregowo z SMM magnesów trwałych, a w pozostałej części obwodu magnetycznego działa samodzielnie [24]. Dowzbudzenie w części szeregowej jest mało efektywne, a nawinięcie uzwojenia obejmującego cały biegun wymaga więcej miedzi, wytwarza większe straty mocy i stwarza problemy ciepłno - wentylacyjne maszyny. Także to rozwiązanie nie wydaje się być korzystne. Istnieje szereg innych rozwiązań konstrukcyjnych dowzbudzenia maszyn z magnesami trwałymi. W opracowaniach teoretycznych przedstawiono koncepcje oraz obliczenia elektromagnetyczne, zwykle połowe. W pracach doświadczalnych, oprócz rozważań teoretycznych, podano także wyniki badań laboratoryjnych oraz analizę uzyskanych wyników.



Rys. 14. Rysunek poglądowy prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi o wzbudzeniu hybrydowym równoległym

Jednym z rozwiązań prądnicy hybrydowej opracowanym w Instytucie Komel jest obwód magnetyczny prądnicy SPM z hybrydowym równoległym obwodem magnetycznym wzbudzenia jak na rysunku 14 [8, 9, 10, 11, 16, 20, 21]. Zaletą takiego rozwiązania jest prosta technologia, obydwie części wirnika wykonuje się niezależnie, a następnie montuje się na wspólnym wale.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Regulacja i stabilizacja napięcia wyjściowego prądnic wzbudzanych magnesami trwałymi jest trudnym zagadnieniem. Ze względu na brak uzwojenia wzbudzenia w maszynach z magnesami trwałymi nie jest możliwe zastosowanie zwykłych regulatorów napięcia. Strumień magnetyczny magnesu ulega małym zmianom wraz z przesunięciem punktu pracy na prostej powrotu magnesu.

Wobec czego bezpośrednio oddziaływanie na strumień główny w takich maszynach jest mało skuteczne. Trudności z regulacją i stabilizacją napięcia wyjściowego prądnic z magnesami trwałymi, pomimo ich zalet związanych np. z wysoką sprawnością, powodują, że w wielu przypadkach zastosowania tych maszyn jest ograniczone.

W pracy przedstawiono szereg wybranych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn z magnesami trwałymi, w tym rozwiązań hybrydowych. Rozwiązania obwodu wzbudzenia, hybrydowe – równoległe, wydaje się być najkorzystniejsze. Już na etapie projektowym można tak konstruować prądnice, aby jej zakres regulacji wzbudzenia ograniczyć do potrzeb danej aplikacji. Takie podejście gwarantuje maksimum sprawności prądnicy.

LITERATURA

- [1] Amara Y., Lucidarme J., Gabsi M., Hamid Ben Ahmed A., Lecrivain M., Akemakou A. C.: „A New Topology of Hybrid Synchronous Machines”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, September/October 2001.
- [2] Amara Y., Vido L., Gabsi M., Hoang E., Hamid Ben Ahmed A., Lecrivain M.: “Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 5, June 2009.
- [3] Bałagurow W. A., Gałtiejew F. F., Łarionow A. N.: „Maszyny Elektryczne o Magnesach Trwałych”, WNT Warszawa 1967 r.
- [4] Krauza S.W., Sadowskiego W.D., Sorokiera T. G.: "Stabilizacja Naprężenia w synchronnych maszynach s postojannymi magnitami", Wiestnik Elektropromynnosti, 1940 no. 2.
- [5] Cardenas R., Pena R., Asher G., Clare J., "Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, pp. 625-635, June 2001.
- [6] Ciurys M., Bańka M., Dudzikowski I., "Analiza pracy prądnicy trójfazowej z magnesami trwałymi w elektrowni wiatrowej małej mocy", Przegląd Elektrotechniczny 02b/2013, str. 120.
- [7] Gawron S., Bernatt J., Król E.: „Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi”, Przegląd Elektrotechniczny 12/2009, str. 20-23.
- [8] Gawron S.: „Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi o niskiej zmienności napięcia wyjściowego”, SME 2009, Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL nr 84/2009 str. 137-141.

- [9] Gawron S.: „Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi z możliwością dowzbudzenia”, Przegląd Elektrotechniczny 01/2008, str. 50-53.
- [10] Gawron S., Bernatt J.: “The synchronous generator with permanent magnets and with by excitation Winding”. Proceeding ICEM, Roma 2010, IEEE Xplore Digital Library.
- [11] Gawron S., Bernatt J., Glinka M.: „Experimental Validation of Hybrid Excited Permanent Magnet Synchronous Generator”, Przegląd Elektrotechniczny 12a/2012.
- [12] Gawron S., Bernatt J. Król E.: “Małe przydomowe elektrownie wiatrowe – doświadczenia z budowy i eksploatacji”, Czysta Energia 01/2005.
- [13] Gieras J.F., Wing M.: „Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications”, second edition, Marcel Dekker INC, New York 2002.
- [14] Glinka T.: „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”, wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2002 r.
- [15] Henneberger G. Hadji-Minaglou J. R. Ciorba R. C.: "Design and test of permanent magnet synchronous motor with auxiliary excitation winding for electric vehicle application", in Proc. European Power Electronics Chapter Symp., Lausanne, Switzerland, Oct. 1994, pp. 645-649.
- [16] Kapinos J.: „Synchronous generator with hybrid excitation”. XV International Symposium on Electric Machinery in Prague, ISEM'2007, 5-6 Sep 2007, Prague, pp.72-79.
- [17] Lin H., Liu X., Zhu Z. Q., Fang S.: "Analysis and control of a dual-stator hybrid excitation synchronous wind generator", Electric Power Applications, IET Volume: 5, Publication Year: 2011, Page(s): 628 – 635.
- [18] Matsuuchi K., Fukami T., Naoe N., Hanaoka R., Takata S., Miyamoto T.: "Performance prediction of a hybrid-excitation synchronous machine with axially arranged excitation poles and permanent-magnet poles", Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi) 150 (2), pp. 43-49, 2005.
- [19] Munteanu A., Simion Al., Livadaru L., Hanganu R.: “On the possibility of voltage variation of a hybrid synchronous generator”, Bul. Inst. Polit. Iași, LII (LVI), 5, pp. 371–376, 2006.
- [20] Naoe N.: “Self-Excitation Characteristics of a Hybrid Excitation Single-Phase Synchronous Generator”, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines ICEM, pp1-4, 2008.
- [21] Naoe N., Fukami T.: "Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine", Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001.IEEE International, pp. 545-547, 2001.
- [22] Rozporządzenie ministra gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. nr 93 poz. 623 z 04.05.2007r.).
- [23] Simion Al., Munteanu A., Livadaru L.: “On the possibility of using hybrid synchronous generators for the electromechanical conversion of the wind energy”, Bul. Inst. Polit. Iași, LI (LV), 5, pp. 125–131, 2005.
- [24] Spooner E., Khatab S.A.W., Nicolau N.G.: „Hybrid Excitation of AC and DC Machines” Proc. IEE EMD 1989 Conf., pp. 48–52.
- [25] Xinghe F., Jibin Z.: “Numerical Analysis on the Magnetic Field of Hybrid Exciting Synchronous Generator”, IEEE Transactions on Magnetics Volume: 45, Issue: 10, publication year: 2009, pages: 4590 – 4593.

Autor:

dr inż. Stanisław Albert Gawron, s.gawron@komel.katowice.pl;
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,
Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice