

Wielobiegunowa prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

1. Wstęp

Wzbudzenie hybrydowe prądnic synchronicznych jest połączeniem wzbudzenia magnesami trwałymi i wzbudzenia elektromagnetycznego. Prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem hybrydowym mają kilka rozwiązań obwodu magnetycznego. Są rozwiązania, w których siła magnetomotoryczna magnesów trwałych i siła magnetomotoryczna uzwojenia wzbudzenia (SMM) działają szeregowo, i są rozwiązania, w których wymienione SMM działają równolegle. Rozwiązanie szeregowo wzbudzenia nie jest ekonomiczne, gdyż przenikalność względna magnesów trwałych wynosi w przybliżeniu 1,06 i magnesy trwałe o grubości kilku milimetrów dla wzbudzenia elektromagnetycznego mają dużą reluktancję i aby efektywnie dowzбудzać obwód magnetyczny lub go odwzbudzać, konieczna jest duża wartość siły magnetomotorycznej.

W literaturze spotyka się propozycje szeregowo-równoległego wzbudzenia hybrydowego. Na przykład magnesy trwałe są umieszczone na części każdego z biegunów wirnika, a uzwojenie wzbudzenia obejmuje cały biegun. W rozwiązaniu tym uzwojenie wzbudzenia ma objętość i masę taką, jak w maszynie synchronicznej bez magnesów trwałych, a strumień magnetyczny generowany przez to uzwojenie jest proporcjonalny do powierzchni nabiegunka nieobjętego działaniem magnesu trwałego. W uzwojeniu wzbudzenia wydzielają się większe straty mocy i istnieją problemy ciepłno-wentylacyjne maszyny.

Innym rozwiązaniem wzbudzenia szeregowo-równoległego jest maszyna synchroniczna jawnobiegunowa o parzystej liczbie par biegunów [6]. Magnesy trwałe umieszczone są na co drugim biegunie i są jednakowo zorientowane względem szczeliny, a uzwojenie wzbudzenia jest cewką okrągłą umieszczoną koncentrycznie na wale tuż przy jarzmie. Mogą to być także dwie cewki umieszczone z dwóch stron wału. Siła magnetomotoryczna wzbudzenia elektromagnetycznego działa unipolarnie w obwodzie magnetycznym maszyny. Jego zaletą jest nieruchome uzwojenie wzbudzenia. Jednak rozwiązanie to nie jest magnetycznie korzystne, gdyż magnesuje wał i jarzmo stojąca stałym strumieniem magnetycznym oraz wzbudza niesymetryczny rozkład pola magnetycznego pod biegunami N i S. Jak dotychczas to rozwiązanie nie wzbudziło zainteresowania producentów maszyn elektrycznych. Wzbudzenie hybrydowe równoległe generatorów synchronicznych jest przedstawione między innymi w pracach [1, 2]. Wirnik jest podzielony wzdłużnie na dwie części: część dłuższą z zabudowanymi magnesami trwałymi i część krótszą z umieszczonym uzwojeniem wzbudzenia. Podobne rozwiązanie wzbudzenia hybrydowego przedstawiono w publikacji [4], wirnik podzielono na trzy części. Części skrajne, dłuższe, są z magnesami trwałymi, na części

Streszczenie: Wielobiegunowa prądnica synchroniczna ma liczbę par biegunów $p = p_{PM} + p_{EM}$. Bieguny ($2p_{PM}$) są wzbudzone magnesami trwałymi, a na biegunach ($2p_{EI}$) jest umieszczone uzwojenie wzbudzenia. W artykule przedstawiono prądnice synchroniczną o liczbie par biegunów $p=6$, przy czym cztery pary biegunów są wzbudzone magnesami trwałymi przyklejonymi na powierzchni nabiegunków, a dwie pary biegunów są wzbudzone elektromagnetycznie. W ten sposób straty mocy wzbudzenia zmniejszają się o 66%. Sześciofazowe uzwojenie twornika (2×3 fazy) umożliwia zwiększenie mocy znamionowej prądnicy o 3,4% i o taką samą wartość zmniejszają się straty mocy w uzwojeniu twornika. Prądnica przy pracy samostabilizacji napięcia, a przy pracy na sieć elektroenergetyczną umożliwia regulację, w sposób ciągły, mocy biernej. Uzwojenie wzbudzenia ma małą masę miedzi, tym samym straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia są małe.

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna, magnesy trwałe, wzbudzenie elektromagnetyczne

🇬🇧 A MULTIPOLAR SYNCHRONOUS GENERATOR WITH HYBRID EXCITATION

Abstract: A multi-pole synchronous generator has a number of pole pairs $p = p_{PM} + p_{EM}$. The poles ($2p_{PM}$) are excited with permanent magnets, and the field winding is located at the poles ($2p_{EI}$). The article presents a synchronous generator with the number of pole pairs $p = 6$, where four pole pairs are excited with permanent magnets glued on the surface of the pole pieces, and two pole pairs are electromagnetically excited. In this way, the excitation power loss is reduced by 66%. The six-phase armature winding (2×3 phase) allows the generator's rated power to increase by 3,4% and the power loss in the armature winding is reduced by the same amount. The generator in the case of off-grid work and changes of load power has the ability to stabilize the voltage, and when working on-grid it allows continuous regulation of reactive power. The excitation winding has a small copper mass, thus the power losses in the field winding are low.

Keywords: synchronous generator, permanent magnets, electromagnetic excitation

środkowej jest osadzone uzwojenie wzbudzenia. Zaletą tych rozwiązań jest prosta technologia. Fragmenty wirnika wzbudzone magnesami trwałymi i wzbudzone elektromagnetycznie

wykonuje się niezależnie, a następnie montuje się je na wspólnym wale. Rozwiązanie to jest korzystne przede wszystkim w maszynach dwubiegunowych.

W artykule przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne prądnicy synchronicznej jawnobiegunowej, o liczbie par biegunów $p \geq 2$, ze wzbudzeniem hybrydowym równoległym.

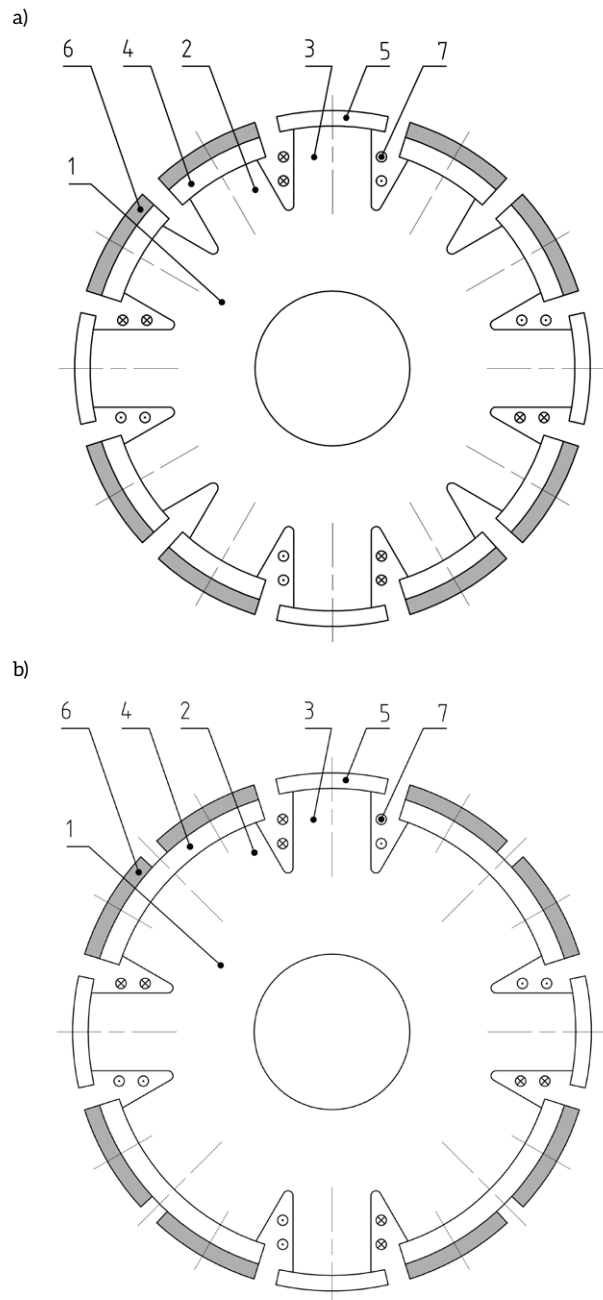
2. Prądnica synchroniczna jawnobiegunowa o wzbudzeniu hybrydowym

Prądnica synchroniczna wielobiegunowa ($p \geq 2$) jest podatna na rozwiązanie wirnika z umieszczeniem źródeł wzbudzenia hybrydowego w układzie równoległym. Wirnik ma $p = p_{PM} + p_{EI}$ par biegunów, przy czym p_{PM} jest liczbą par biegunów z magnesami trwałymi, a p_{EI} liczbą par biegunów ze wzbudzeniem elektromagnetycznym.

Na rysunku 1 przedstawiono wirnik jawnobiegunowy prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym, w przekroju poprzecznym do wału, o liczbie par biegunów $p = 6$, w tym $p_{PM} = 4$ i $p_{EI} = 2$. W wariantach rozwiązania rys. 1 a pieńki biegunów pod magnesami trwałymi są rozdzielone, a na rys. 1 b pieńki biegunów pod magnesami N i S są połączone. Wykonanie wirnika jak na rys. 1 b pozwala uzyskać więcej miejsca na umieszczenie uzwojenia wzbudzenia.

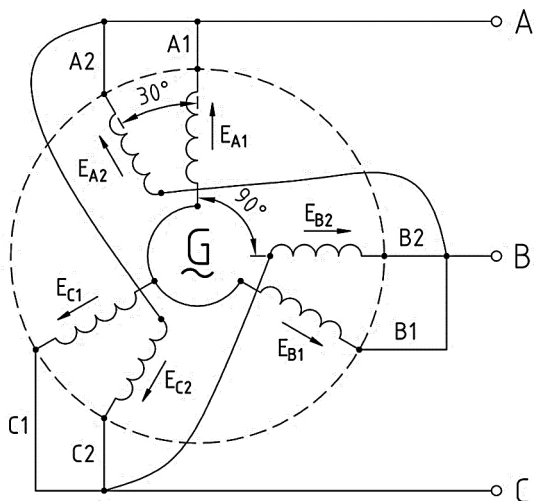
Korzystne jest, ze względu na równomierne rozłożenie na obwodzie sił naciągu magnetycznego, symetryczne rozłożenie biegunów ($2p_{EI}$) ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Przy liczbie par biegunów $p_{EI} = 2$ kąt między osiami biegunów wzbudzanych elektromagnetycznie wynosi 90° .

Uzwojenie twornika ma oczywiście także p par biegunów równą liczbie par biegunów wirnika. W prezentowanym przykładzie ($p = 6$). Korzystne jest, aby uzwojenie twornika nie miało gałęzi równoległych, gdyż przy regulacji strumienia magnetycznego uzwojeniem wzbudzenia strumień magnetyczny w szczeliny pod biegunami wzbudzanych elektromagnetycznie i magnesami trwałymi może mieć różną wartość. Jeśli uzwojenie ma gałęzie równoległe, to w każdej gałęzi powinno indukować się to samo napięcie, a w tym rozwiązaniu wirnika nie byłoby to możliwe. Równocześnie korzystne jest, aby uzwojenie twornika było sześciofazowe, przy czym jedno uzwojenie jest trójfazowe połączone w gwiazdę, a drugie uzwojenie trójfazowe jest połączone w trójkąt. Końcówki wyjściowe uzwojeń gwiazdowego A1, B1, C1 i trójkątnego A2, B2, C2 są odpowiednio połączone A1A2, B1B2, C1C2 i na wyjściu prądnicy tworzą układ trójfazowy. Takie połączenie uzwojeń można zrealizować tylko wówczas, gdy osie uzwojenia połączonego w gwiazdę A1, B1, C1 tworzą z osiami uzwojenia połączonego w trójkąt A2B2, B2C2, C2A2 kąt 30° . Przy tym kącie przesunięcia osi uzwojeń napięcie międzyfazowe uzwojenia połączonego w gwiazdę nie ma przesunięcia fazowego względem napięcia międzyprzewodowego uzwojenia połączonego w trójkąt. Te dwa uzwojenia można połączyć równoległe. Układ taki jest przedstawiony na rysunku 2, a wykres wskazowy na rysunku 3. Efektem tego jest zwiększenie współczynnika rozłożenia uzwojenia w żłobkach o 3,4% w stosunku do uzwojenia jednorodnego w układzie gwiazdy lub trójkąta.

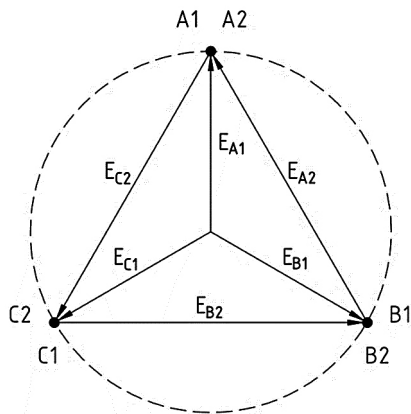


Rys. 1. Przekrój poprzeczny wirnika prądnicy o liczbie par biegunów $p = 6$ w wariantach rozwiązania pieńków biegunów a i b: 1 - jarzmo; 2 i 3 - bieguny wzbudzające; 4 i 5 - nabiegunniki; 6 - magnesy trwałe; 7 - uzwojenie wzbudzenia

Drugim równie korzystnym wariantem rozwiązania uzwojenia twornika jest uzwojenie sześciofazowe, utworzone przez dwa układy uzwojeń trójfazowych połączonych w gwiazdy bądź w trójkąty z przesunięciem fazowym między napięciami dwóch sąsiednich faz kolejno o kąty: 90° , 30° , 90° , 30° , 90° , 30° . W prądnicach synchronicznych pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej, np. w elektrowniach wiatrowych lub wodnych, napięcie sześciofazowe jest zamieniane w falownikach AC/DC/AC na napięcie trójfazowe o stałej częstotliwości i stałej wartości napięcia. Natomiast w prądnicach pracujących



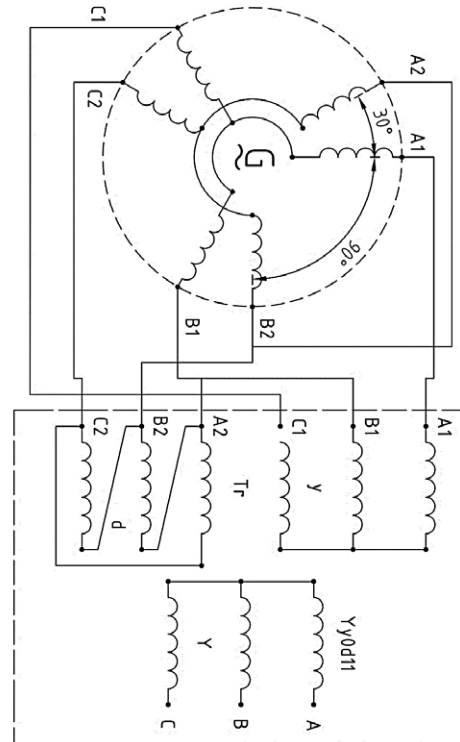
Rys. 2. Schemat elektryczny uzwojenia twornika o liczbie faz 2x3, przy czym uzwojenie A1, B1, C1 jest połączone w gwiazdę, a uzwojenie A2, B2, C2 jest połączone trójkąt



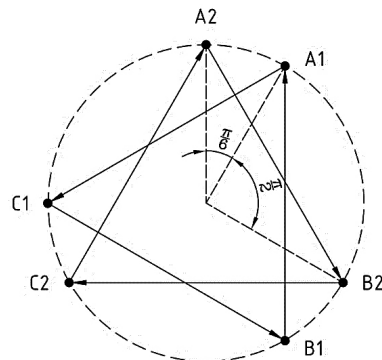
Rys. 3. Wykres wskazowy napięć indukowanych w uzwojeniach połączonych w gwiazdę i w trójkąt

przy stałej prędkości obrotowej, np. w spalinowych agregatach prądotwórczych, napięcie sześciofazowe może być zamienione na napięcie trójfazowe przez transformator trójzwojeniowy, który ma dwa uzwojenia pierwotne i jedno uzwojenie wtórne. Uzwojenia pierwotne transformatora, z którymi są połączone uzwojenia prądnicy, jedno jest połączone w gwiazdę, a drugie w trójkąt. Kąt godzinowy między napięciami na wymienionych uzwojeniach transformatora powinien być równy jednej godzinie, to jest 30° . Uzwojenie wtórne transformatora (uzwojenie wyjściowe) może być połączone w gwiazdę bądź w trójkąt. Układ taki jest przedstawiony na rysunku 4, a wykres wskazowy napięć na rysunku 5.

W uzwojeniach połączonych w gwiazdy w napięciach międzyprzewodowych nie występują napięcia harmonicznych $v = 3n$, nie płyną także prądy wymienionych harmonicznych, z tego względu układ taki jest korzystny. Transformator



Rys. 4. Schemat połączenia uzwojenia 2x3-fazowego generatora z uzwojeniami transformatora trójzwojeniowego



Rys. 5. Wykres wskazowy napięć międzyprzewodowych indukowanych w uzwojeniu 2x3-fazowym generatora

trójzwojeniowy, zamieniając napięcie sześciofazowe na trójfazowe, eliminuje harmoniczne napięcia $v = 5$ i $v = 7$. Tym samym uzyskuje się pożądany sinusoidalny przebieg napięcia wyjściowego. Ponadto uzwojenie sześciofazowe ma o 3,4% większy współczynnik rozłożenia w stosunku do uzwojenia trójfazowego. W tym samym procencie zwiększa się moce znamionowe prądnicy i transformatora przy niezmiennych stratach mocy.

Uzwojenie wzbudzenia o liczbie par biegunów (p_{EI}) jest uzwojeniem wirującym i może być zasilane ze wzbudnicy wirującej umieszczonej na wale prądnicy bądź poprzez pierścienie ślizgowe i szczotki ze wzbudnicy statycznej. Zasilanie uzwojenia wzbudzenia, o liczbie par biegunów (p_{EI}), z przetwornicy

wirującej w generatorze jest korzystne, gdyż nie ma pierścieni ślizgowych i szczotek. Tym samym zmniejszają się koszty eksploatacji i obsługi o koszty związane z wymianą szczotek. Dodatkowo zwiększa się niezawodność pracy prądnicy.

3. Podsumowanie

Prądnice synchroniczne wielobiegunowe są wykorzystywane w elektrowniach wodnych, w elektrowniach wiatrowych i agregatach prądotwórczych. Straty mocy w prądnicach można zmniejszyć, a tym samym zwiększyć sprawność energetyczną prądnicy, poprzez zastosowanie wzbudzenia hybrydowego.


Przedstawiono prądnicę synchroniczną o liczbie par biegunów $p = 6$, przy czym cztery pary biegunów są wzbudzane magnesami trwałymi przymocowanymi do powierzchni zewnętrznych nabiegunników, a dwie pary biegunów są wzbudzane elektromagnetycznie. W ten sposób straty mocy wzbudzenia zmniejszają się o 66%.

Sześciofazowe uzwojenie twornika (2 x 3 fazy) umożliwia dodatkowo zwiększenie mocy znamionowej prądnicy o 3,4% i o taką samą wartość zmniejszają się straty mocy w uzwojeniu twornika. Każde z uzwojeń trójfazowych eliminuje w napięciu międzyprzewodowym trzecią harmoniczną. Układ trójfazowy powstały z przekształcenia układu 2 x 3-fazowego eliminuje z napięcia piątą i siódmą harmoniczną napięcia.

Prądnica ze wzbudzeniem hybrydowym przy pracy samotnej ma możliwość płynnej stabilizacji napięcia przy zmianach mocy obciążenia. Prądnica przy pracy na sieć elektroenergetyczną może być synchronizowana z siecią, jak każda maszyna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, a w czasie pracy ustalonej umożliwia regulację, w sposób ciągły, mocy biernej przekazywanej do sieci. Moc czynną reguluje się turbiną: parową, wodną lub wiatrową. Uzwojenie wzbudzenia ma małą masę miedzi, tym samym straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia są małe.

Literatura

- [1] GAWRON S.: *Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym*. Praca doktorska. Politechnika Śląska 2013.
- [2] GAWRON S.: *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi z możliwością dowzbudzenia*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2008.
- [3] KAMIEV K., NERG J., PYRHONEN J., ZABOIN V., HRABOVCOVÁ V., RAFAJIDUS P.: *Hybrid excitation synchronous generators for island operation*. *Electric Power Applications*. IET Volume: 6, Issue: 1, Digital Object Identifier: 10.1049/iet-epa.2010.0226, Publication Year: 2012.
- [4] POPENDA A., CHWALBA S.: *Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym o zwiększonym zakresie nastawiania napięcia*. „Przegląd Elektrotechniczny” 7/2019.
- [5] ROSSA R., KRÓL E.: *Modern electric machines with permanent magnet*. „Przegląd Elektrotechniczny” 12/2008.
- [6] WRÓBLEWSKI J., WRÓBLEWSKA-SWARCEWICZ K.: *Bezsztotkowa maszyna synchroniczna*. Patent RP Nr. 189591 z 2005 r.
- [7] 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.
- [8] www.komel.katowice.pl.

 dr inż. Stanisław Gawron,
prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka
e-mail: info@komel.com.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn
Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany