

Prądnica wzbudzana magnesami trwałymi z przełącznikiem zaczepów

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

1. Wstęp

Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi mają strumień wzbudzenia o wartości stałej. Maszyny te, stosowane jako prądnice, w standardowym wykonaniu charakteryzują się dużą zmiennością napięcia. Prądnic pracujących przy stałej (znamionowej) prędkości obrotowej nie można bezpośrednio synchronizować z siecią elektroenergetyczną, gdyż nie mają możliwości regulacji napięcia. Dlatego stosowane są maszyny ze wzbudzeniem hybrydowym, to jest połączonym wzbudzeniem magnesami trwałymi i wzbudzeniem elektromagnetycznym. Znane są rozwiązania prądnic ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowym, równoległym i szeregowo-równoległym. Wzbudzenie hybrydowe w standardowym wykonaniu ma wirujące uzwojenie wzbudzenia, a więc wirnik ma pierścienie ślizgowe, na które jest to uzwojenie wyprowadzone, i szczotki. Z tego powodu jest to rozwiązanie mało korzystne, szczególnie dla elektrowni wiatrowych i elektrowni wodnych. Są także rozwiązania maszyn ze wzbudzeniem hybrydowym i nieruchomym uzwojeniem wzbudzenia. Maszyny te charakteryzują się złożoną budową i większym gabarytem. Znane jest także z patentu: EP 1 107 426 A2 [4] rozwiązanie prądnicy prądu zmiennego, w którym uzwojenie stojana jest złożone z grupy cewek z końcówkami wyprowadzonymi na zaciski. Na tych zaciskach cewki są odpowiednio łączone szeregowo i równoległe. Takie rozwiązanie połączenia cewek uzwojenia z obwodem wyjściowym jest realizowane w czasie postoju prądnicy. To rozwiązanie jest realizowane w stanie bezprądowym, nie może być zatem wykorzystane do bieżącej regulacji napięcia w czasie pracy prądnicy. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest połączenie prądnicy z falownikiem AC/DC/AC. Falownik przekształca napięcie prądnicy na napięcie i częstotliwość sieci elektroenergetycznej.

Streszczenie: Artykuł dotyczy prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, które pracują przy znamionowej prędkości obrotowej. Regulacja napięcia prądnicy jest realizowana na zaczepekach uzwojenia twornika. Przełączniki zaczepek są takie, jak w transformatorach. Rozpatrzono kilka wariantów rozwiązania regulacji napięcia poprzez zmianę zaczepek. Są to rozwiązania, które można stosować do przełączania zaczepek uzwojenia, na postoju prądnicy i w czasie pracy prądnicy. Przedstawiono także rozwiązanie połączenia prądnicy z transformatorem trójuzwojeniowym i regulacją napięcia na zaczepekach uzwojeniu transformatora.

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna, magnesy trwałe, regulacja napięcia, przełączniki zaczepek

PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH TAP CHANGER

Abstract: This article applies to synchronous generators excited by permanent magnets, which operate at rated rotational speed. The generator voltage is regulated on the armature winding hooks. The tap-changers are the same as in transformers. Several variants of voltage regulation solutions by changing taps were considered. These are solutions that can be used to switch the winding taps, when the generator is stopped and during generator operation. The solution of connecting the generator with a three-winding transformer and voltage regulation on transformer winding taps was also presented.

Keyword: synchronous generator, permanent magnets, voltage regulation, tap changer

reklama

reklama

Elektrownia wiatrowa bądź elektrownia wodna może być włączona poprzez falownik do sieci elektroenergetycznej. Falownik zwiększa koszt budowy elektrowni. Rozwiązanie to jest stosowane tylko w elektrowniach małej i średniej mocy o napięciu prądnic nieprzekraczającym 1000 V. Falowniki na wyższe napięcia są znane, lecz drogie, i ich stosowanie w elektrowniach wiatrowych i elektrowniach wodnych nie jest ekonomicznie uzasadnione. Wadą falownika jest także generacja do sieci harmonicznych prądu. W dalszym ciągu poszukuje się prostych i stosunkowo tanich rozwiązań układów regulacji napięcia prądnic wzbudzanych magnesami trwałymi [1].

2. Regulacja napięcia prądnicy przełącznikiem zaczepów

Prądnicą synchroniczną wzbudzana magnesami trwałymi jest trójfazowa. Uzwojenie twornika wszystkich faz ma zaczepty, które są wyprowadzone na przełącznik zaczepów. Pozycję ustawienia przełącznika zaczepty realizuje układ serwomechaniczny M. Pozycja ta jest wybierana przez sterownik mikroprocesorowy μP , który mierzy parametry pracy prądnicy: napięcie, prąd, $\cos\phi$, częstotliwość, i przekazuje do układu serwomechanicznego M polecenie przełączenia zaczepty na żadaną pozycję. Schemat blokowy układu przedstawia rys. 1. Przełączniki zaczepów są identyczne jak w transformatorach.

W transformatorach stosowanych jest kilka rodzajów przełączników zaczepów [3]. Wykorzystując te same przełączniki zaczepów w prądnicach, należy końcówki zaczepów uzwojenia twornika dopasować do konstrukcji wybranego przełącznika zaczepów. Ogólnie przełączniki zaczepów można podzielić na:

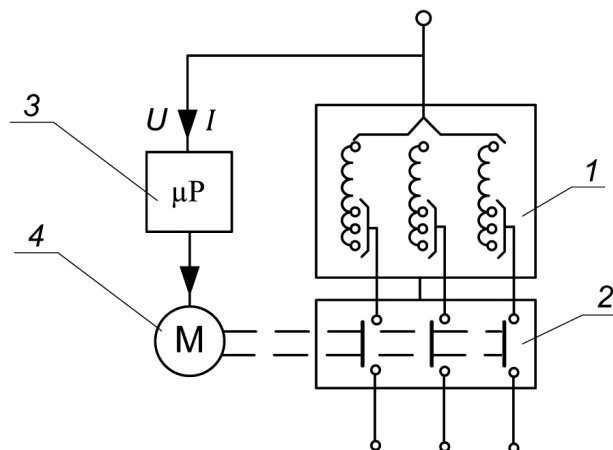
- jednostopniowe proste;
- jednostopniowe podobciążeniowe;
- dwustopniowe szeregowo;
- krzyżowe dwustopniowe szeregowo.

Rozwiązanie połączenia zaczepów uzwojenia z przełącznikiem jednostopniowym jest przedstawione na rys. 2.

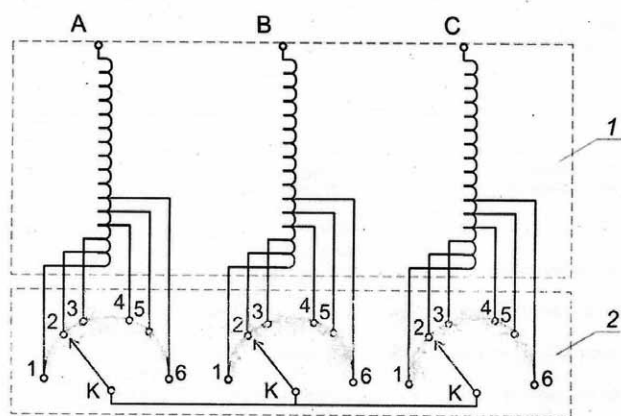
Przełączanie zaczepów można realizować w stanie bezprądowym i w czasie postoju prądnicy. Przełączenie zaczepów w czasie pracy prądnicy spowoduje powstanie łuku elektrycznego między zaciskami przełączanymi, który opala styki przełącznika i powoduje przejściowe zwarcie zwojowe między zaczeptami uzwojenia prądnicy. W krótkim czasie doprowadzi to do awarii prądnicy i awarii przełącznika zaczepów.

Zaczepty uzwojenia można także zwierzać wyłącznikami. Korzystnie jest, jeśli uzwojenie prądnicy (1) jest połączone w gwiazdę, a punkt łączenia gwiazdy jest na zaczeptach. W tym rozwiązaniu wyłączniki pełnią funkcję przełącznika zaczepów. Na rysunku 3 przedstawiono schemat uzwojenia z trzema zaczeptami przełączanymi wyłącznikami. Wyłączniki muszą być wzajemnie blokowane, to znaczy, że gdy jeden z nich jest załączony, to dwa pozostałe wyłączniki muszą być otwarte. Załączenie kolejnego wyłącznika musi być poprzedzone wyłączeniem wyłącznika, który był załączony. Jeśli te warunki są spełnione, to przełączanie zaczepów uzwojenia można realizować w czasie pracy prądnicy.

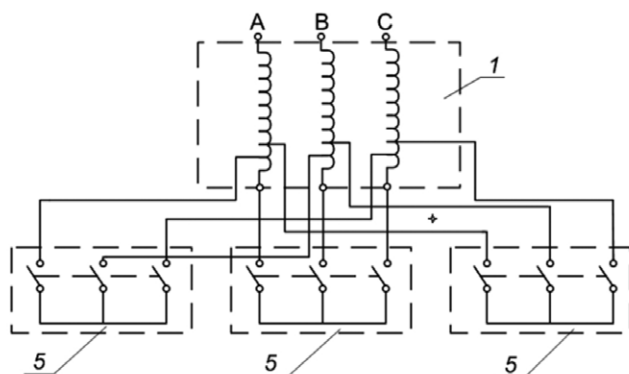
Jednak w czasie pracy prądnicy wyłączenie wyłącznika przerywa przepływ prądu. Przerwanie prądu generuje przepięcia



Rys. 1. Schemat blokowy zaczeptowego układu regulacji napięcia prądnicy wzbudanej magnesami trwałymi: 1 - uzwojenie twornika z zaczeptami; 2 - przełącznik zaczepów; 3 - sterownik mikroprocesorowy; 4 - serwomechaniczny układ napędowy



Rys. 2. Schemat połączenia zaczepów uzwojenia z przełącznikiem jednostopniowym: 1 - uzwojenie twornika; 2 - przełącznik zaczepów



Rys. 3. Schemat połączenia zaczepów uzwojenia z wyłącznikami: 1 - uzwojenie twornika; 5 - wyłączniki

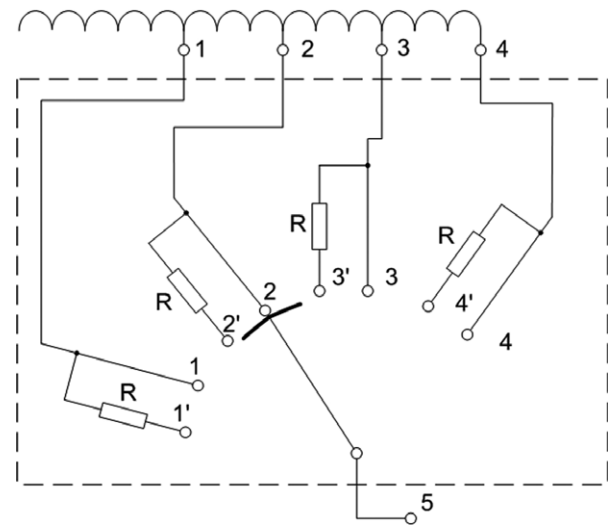
w uzwojeniu, narażając izolację na przebicie. W prądnicach włączonych do sieci elektroenergetycznej, w czasie przełączania wyłączników, prądnicą może utracić synchronizację. Załączenie

prądnicy niesynchronizowanej generuje duży moment udarowy, który może uszkodzić układ napędowy. Alternatywnym rozwiązaniem jest przełącznik zacze­pów jednostopniowy podobciążeniowy. Przełącznik taki jest rozwiązaniem standardowym stosowanym w transformatorach stacyjnych. Przełącznik ten charakteryzuje się tym, że przejście suwaka stykowego z jednej pozycji na drugą odbywa się z włączeniem rezystora R . Na rysunku 4 pokazano schemat podobciążeniowego przełącznika zacze­pów. Rysunek 4 ilustruje budowę przełącznika i ułatwia zrozumienie jego działania. Stałe pozycje ruchomego styku suwaka to: 1, 2, 3 i 4. Pozycje przejściowe to: 1', 2', 3' i 4'. Styk ruchomy suwaka ma kształt łuku o długości tak dobranej, aby w czasie przełączania zwierał dwa sąsiednie zaciski przełącznika. Zmiana zacze­pu suwaka np. z pozycji 2 na pozycję 3 odbywa się w trzech etapach:

- suwak zwiera styki 2 i 3', co powoduje zwarcie zacze­pu uzwojenia 2 i 3 przez rezystancję;
- suwak zwiera pozycje 3' i 3, co powoduje rozwar­cie zacze­pu uzwojenia i pracę równoległą zacisków 3' i 3 przełącznika;
- pozycja 3 jest końcowym położeniem suwaka.

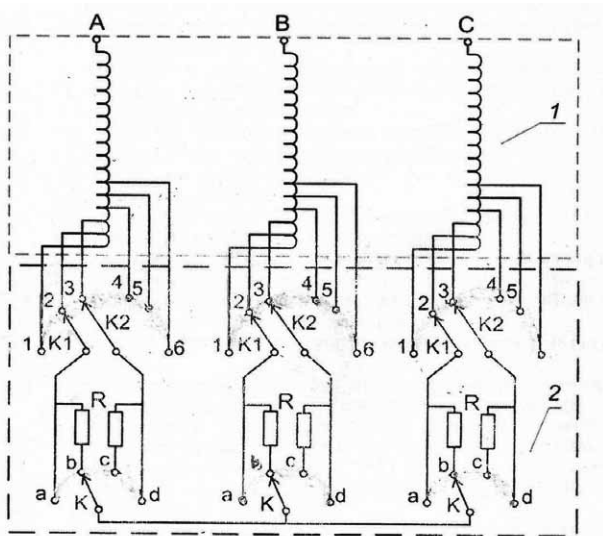
Przeskok suwaka przez zacisk pośredniczący 3' odbywa się bardzo szybko, jest to czas kilku ms, zapewnia to sprężyna w układzie mechanicznym serwomechanizmu przełączającego suwak. Krótki czas przełączenia powoduje, że ilość ciepła wydzielanego na rezystancji jest mała i rezystory gabarytowo są niewielkie.

Przełącznik zacze­pów podobciążeniowy dwustopniowy szeregowy jest przedstawiony na rys. 5. Jest to przełącznik stosowany w transformatorach dużych mocy. Przełącznik ma dla każdej fazy uzwojenia trzy suwaki: K1, K2, K. Suwaki K1 i K2 pracują równoległe i ślizgają się po zaciskach: 1, 2, 3, 4, 5, 6 przyłączonych do zacze­pów uzwojenia. Suwak K ma styk łukowy i ślizga się po zaciskach: a, b, c, d, przyjmując kolejno pozycje: a, ab, b, bc, c, cd, d. Praca ustalona suwaka K jest na pozycjach a oraz d. Pozostałe pozycje są przejściowe, po których

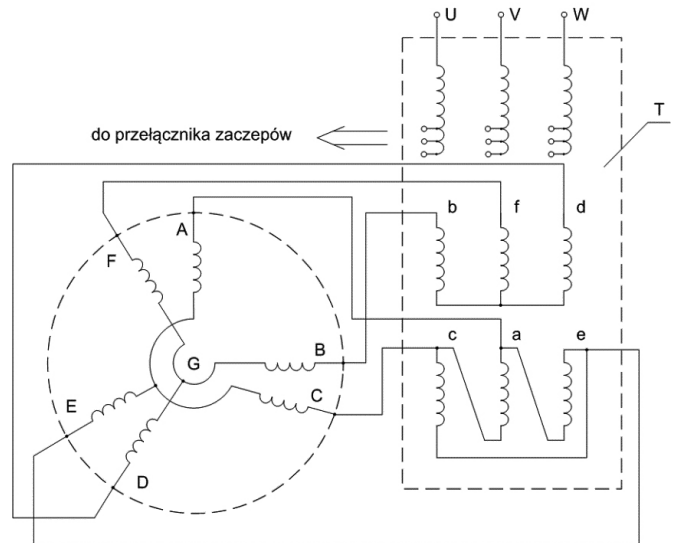


Rys. 4. Schemat podobciążeniowego jednostopniowego przełącznika zacze­pów jednej fazy

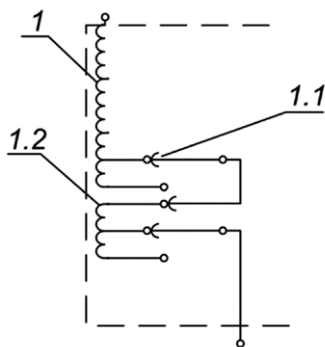
ślizga się styk suwaka K w czasie przełączania zacze­pu na uzwojeniu. Na pozycji b włącza się w obwód rezystor R , na pozycji bc włącza się w obwód zwojów przełączanego zacze­pu rezystor $2R$ i na pozycji c włącza się rezystor R . Na rys. 5 suwak K1 jest na pozycji 2, a suwak K na pozycji a. Takie ustawienie suwaków przełącznika zacze­pów tworzy gwiazdę uzwojenia na zacze­pie 2. Suwak K2 jest na pozycji 3, lecz jest wolny, przez niego prąd nie płynie i może być dowolnie przełączany. W celu przejścia na zacze­p 3 uzwojenia wystarczy przesunąć suwak K na pozycję d. Z zacze­pu 3 można wrócić na zacze­p 2, a także na zacze­p 1. Przejście z zacze­pu 3 na zacze­p 1 to przesunięcie wolnego suwaka K1 na zacze­p 1 i przesunięcie suwaka K na zacze­p a. Z zacze­pu 2 można przejść na zacze­p 4, przesu­wając wolny suwak K2 na zacze­p 4 i suwak K na pozycję d.



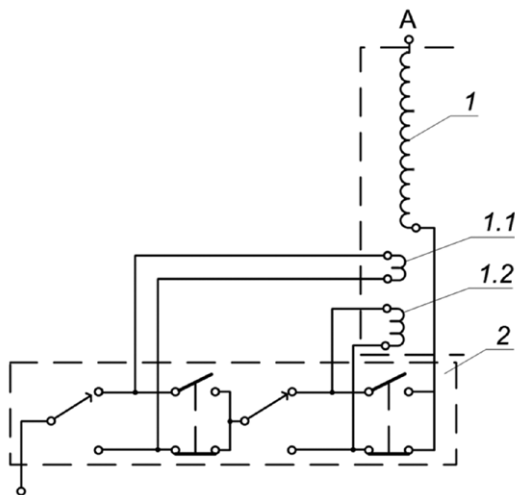
Rys. 5. Schemat połączenia zaczepek na uzwojeniu twornika 1 z przełącznikiem zaczepek 2 dwustopniowym szeregowym



Rys. 8. Prądnica sześciofazowa i regulacja napięcia na zaczepekach transformatora 6/3 fazowego



Rys. 6. Zaczepek do regulacji zgrubnej 1.1 na uzwojeniu twornika podstawowym 1 i zaczepek do regulacji drobnej na uzwojeniu twornika dodatkowym 1.2



Rys. 7. Uzwojenia twornika dodatkowe: 1.1 do regulacji zgrubnej i 1.2 do regulacji drobnej oraz połączenie uzwojeń z przełącznikiem zaczepek 2 krzyżowym

Prądnica może mieć na uzwojeniu twornika jeden zaczepek do regulacji zgrubnej, o większej liczbie zwojów, i dodatkowe uzwojenie do regulacji drobnej o mniejszej liczbie zwojów. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 6, na uzwojeniu twornika 1 jest zaczepek 1.1 do regulacji zgrubnej i jest uzwojenie dodatkowe 1.2 z dwoma zaczepekami do regulacji drobnej.

Prądnica 1 z jednym zaczepekem 1.1 do regulacji zgrubnej na uzwojeniu twornika podstawowym 1 i dwoma zaczepekami na uzwojeniu dodatkowym 1.2 do regulacji drobnej ma sześć stopni regulacyjnych napięcia. W tym rozwiązaniu przełącznik zaczepek może być jednostopniowy jak na rys. 4, przy czym suwaki na zaczepekach 1.1 i 1.2 można przesuwac niezależnie.

Prądnica 1 może mieć także dodatkowe dwa uzwojenia regulacyjne: do regulacji zgrubnej 1.1 o większej liczbie zwojów i do regulacji drobnej 1.2 o mniejszej liczbie zwojów. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 7. Dodatkowe dwa uzwojenia regulacyjne 1.1 i 1.2 umożliwiają, przy pomocy czterech zaczepek, uzyskanie siedmiu stopni regulacji napięcia. Wymaga to dwóch przełączników zaczepek i dwóch przełączników krzyżowych. Takie rozwiązanie trójfazowego przełącznika zaczepek ma budowę złożoną.

Jest jeszcze jeden wariant rozwiązania regulacji napięcia prądnicy wzbudzonej magnesami trwałymi pracującej przy stałej prędkości obrotowej. Jest on przedstawiony na rys. 8.

Prądnica jest sześciofazowa i współpracuje z transformatorem trójuzwojeniowym. Regulacja napięcia jest realizowana na zaczepekach uzwojenia wtórnego (wyściowego) transformatora. Korzyści z tego rozwiązania to większy współczynnik grupy uzwojenia twornika prądnicy o 4,5% w stosunku do uzwojenia trójfazowego i eliminacja harmonicznych w napięciu wyściowym: w prądnicy harmonicznej $\nu = 3$ i w transformatorze $\nu = 5$ i $\nu = 7$.

3. Podsumowanie

Prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi może być konstrukcyjnie przystosowana do regulacji napięcia. Jednym z wariantów rozwiązania jest wykonanie uzwojenia twornika z zaczeпами i przyłączenie ich do przełącznika zaczeপów. Przełączniki zaczeপów standardowo są stosowane w transformatorach.


Przedstawiono układy połączenia zaczeপów uzwojenia na postoju prądnicy i prądnicy pracującej. Zmiana zaczeপu na uzwojeniu prądnicy pracującej powinna być realizowana bez przerywania prądu obciążenia, bez iskier na stykach przełącznika i bez generacji przepięć w uzwojeniu. Najprostszym rozwiązaniem przełącznika zaczeপów, który spełnia te wymagania, jest przełącznik przedstawiony na rys. 4. Wymagania te spełnia także przełącznik zaczeপów z rys. 5, lecz jego budowa jest bardziej złożona. Rozwiązania przełączników zaczeপów przedstawione na rysunkach 2, 6 i 7 można stosować do przełączania zaczeপów uzwojenia w czasie postoju prądnicy.

Użyteczne może być rozwiązanie połączenia prądnicy sześciopfazowej z transformatorem trójuzwojeniowym yd/Y z regulacją napięcia na zaczeপach uzwojeniu Y. W tym układzie eliminowane są harmoniczne napięcia 3, 5 i 7, a regulacja napięcia jest

standardowa, stosowana w transformatorach. Układ taki przedstawiono na rys. 8.

Literatura

- [1] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T.: *Układ uzwojeń prądnicy synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi*. Pat. PL 234636. Z dnia 07.05.2019 r.
- [2] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN, 2018 r. ISBN 978-83-01-20115-9.
- [3] KELASZ J.: *Transformatory. Układy nastawiania przekładni*. WNT, Warszawa 1968.
- [4] SUZUKI HITOSHI, MORIMATSU MASAKI: Stator of an AC generator. European Patent Application EP 1 107 426 A2 z 13.06.2001 r.
- [5] www.komel.com.pl.

 Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn
Elektrycznych KOMEL, Katowice

artykuł recenzowany