

Warszawa 30.05.2015

Prof. dr hab. Włodzimierz Koczara
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Warszawska

Opinia Rozprawy Doktorskiej

Mgr inż. Błażeja Jakubowskiego nt.

ANALIZA PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADÓW STEROWANIA AUTONOMICZNYM GENERATOREM INDUKCYJNYM

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska liczy 167 stron oraz 115 pozycji literatury.

Ocena aktualności dziedziny i tematu pracy.

Generatory indukcyjne klatkowe należą do grupy najstarszych urządzeń wykorzystujących energie odnawialne w układach elektrowni wiatrowych i wodnych zarówno we współpracy z siecią jak i w konstrukcjach autonomicznych. Zaletą generatorów indukcyjnych klatkowych, pracujących autonomicznie, była prostota budowy oraz prymitywne sterowanie (stycznikowe) poprzez załączanie kondensatorów i dodatkowego obciążenia. Budowane układy elektrowni z generatorami indukcyjnymi zwykle nie przekraczały 100 kW. Prymitywne metody sterowania oraz niebezpieczeństwo niekontrolowanego samowzbudzenia nie pozwalały na realizację współczesnych źródeł o dokładnej regulacji mocy biernej. Dążąc do utrzymania istniejących elektrowni zgodzono się na pracę ze współczynnikiem $tg\varphi = 0.4$ czyli na dość znaczny pobór mocy biernej z sieci elektroenergetycznej. Układy autonomiczne nie miały możliwości poboru mocy biernej więc z założenia powinny być przekompensowane a ponadto dołączenie odbiorników wymagających znacznych mocy biernych mogło doprowadzić do utraty zdolności wytwarzania napięcia. Oznaczało to niestabilność i bardzo niską jakość produkowanej energii elektrycznej. Postęp w budowie przekształtników energoelektronicznych wyzwolił budowę elektrowni wiatrowych dużych mocy z generatorami synchronicznymi, asynchronicznymi z generatorami pierścieniowymi oraz z generatorami o magnesach trwałych. Szczególne przyspieszenie nastąpiło w ostatnim dziesięcioleciu. Podjęto też próby zastosowania klasycznego, w technice napędu elektrycznego, układu z podwójnym przekształcaniem i z pośrednim obwodem napięcia stałego. Rozwiązanie takie, chociaż odpowiadające współczesnemu stanowi nauki i techniki nie jest konkurencyjne pod względem finansowym. Nakłady finansowe związane z dwukrotnym przekształcaniem pobieranej energii

poprzez przekształtniki przekraczające znacznie moc czynną wytwarzaną przez generator nie mogą być odzyskiwane w wymaganym czasie. Z tego powodu sterowanie pracą generatora, poprzez ciągłą regulację prądu biernego przekształtnikiem energoelektronicznym o małej mocy, przyłączonym równolegle do odbiornika, zaczyna odgrywać bardzo istotną rolę. Jednakże dla zapewniania niezawodnej pracy źródła, interpretowanej jako bezprzerwowe zasilanie napięciem przemiennym o zadanych parametrach, wymagane jest odpowiednie sterowanie. W niniejszej rozprawie sterowanie to zostało opracowane poprzez wykorzystanie nowoczesnych metod rozwiniętych w technice napędu silnikami indukcyjnymi klatkowymi w topologii szeregowego przekształcania AC/DC/AC. Jednakże warunki w jakich pracuje generator autonomiczny znacznie odbiegają od pracy w połączeniu z siecią elektroenergetyczną. Bowiem w układzie autonomicznym w każdej chwili może nastąpić zanik napięcia generatora a ponowne odzyskanie możliwości generowania mocy wymagają osobnej procedury doprowadzającej do samowzbudzenia. Opracowanie układu automatycznej regulacji napięcia poprzez ciągłą regulację wzbudzenia przekształtnikiem energoelektronicznym doprowadza do bardzo nowoczesnych rozwiązań elektrowni autonomicznych o zadanej jakości napięcia. Zatem temat jest nowoczesny i nawiązuje do współczesnej nauki i techniki na poziomie światowym.

Zakres i charakterystyka pracy

We wstępnej części pracy poruszane są zagadnienia klasycznego wzbudzenia metodą dołączania kondensatorów równoległych. Metoda ta nie jest jednakże wykorzystana, natomiast, w dalszym ciągu pracy, stosowana jest metoda wzbudzenia i stabilizacji napięcia poprzez równoległy przekształtnik dwupoziomowy. Opracowane są modele matematyczne układów regulacji oraz kryteria optymalizacji (rozdz. 4). Rozpatrywane jest głównie sterowanie amplitudą napięcia stojana ograniczając się do wykorzystania układów nie mających tendencji zmian prędkości (minimalna częstotliwość 47.3Hz). W zakresie sterowania skalarne skoncentrowano się na analizie i syntezie regulacji napięcia stałego przekształtnika AC/DC. Obecność zadanej wartości napięcia stałego, przy braku kondensatorów równoległych, jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia pracy autonomicznej. Wyniki analizy i syntezy są potwierdzone obliczeniami komputerowymi oraz laboratoryjnymi, odniesionymi do nastaw regulatora napięcia w zakresie pracy bez obciążenia i przy zmieniającym się obciążeniu i częstotliwości w granicach 48 – 50 Hz. Wyniki są bardzo zbliżone a różnice wynikają głównie z dokładności estymacji.

Istotną część rozprawy dotyczy pracy generatora autonomicznego ze sterowaniem polowo-zorientowanym względem wektora strumienia sprzężonego z wirnikiem. Oznacza to przyjęcie położenia wektora strumienia wirnik współliniowo z osią x wirującego układu współrzędnych x - y . Położenie wektora sprzężonego z wirnikiem jest wyznaczane metodą pośrednią (IFOC) oraz metodą bezpośrednią (DFOC rys. 6.1). Wyniki badań komputerowych i laboratoryjnych (rys. 6.18) wskazują, że moduł napięcia stojana jest regulowany poprzez składową i_{sx} wektora prądu stojana. W stanie ustalonym układ regulacji zapewnia stabilizację napięcia u_d i U_s z dużą dokładnością zgodnie z wartościami zadanymi. Wyniki otrzymane z badań symulacyjnych oraz wyniki badań laboratoryjnych (Rys. 6.18) są praktycznie identyczne. Zastosowanie metody polowo zorientowanej zapewnia stabilizację napięć u_d i U_s z dużą dokładnością również w stanach dynamicznych (Rys. 6.20). Również przy skokowej zmianie obciążenia (w obwodzie napięcia przemiennego) zastosowanie metody sterowania polowo-zorientowanego umożliwia stabilizację napięć u_d i U_s z dużą dokładnością nawet w stanach dynamicznych, przy zmianach wartości prędkości kątowej wirnika generatora. Końcowe efekty metody sterowania zorientowanego, względem wektora strumienia sprzężonego z wirnikiem, podają rys. 6.21 i 6.22 na których pokazano wyniki stabilizacji napięć przy obciążeniu znamionowym.

Kolejną metodą sterowania napięciem generatora to sterowanie polowo zorientowane względem wektora napięcia strumienia sprzężonego ze stojanem (Rys. 7. 1). W rozpatrywanej metodzie sterowania zmienne elektromagnetyczne maszyny indukcyjnej są wyrażone w układzie współrzędnych $(x$ - $y)$ wirującym synchronicznie z wektorem strumienia sprzężonego stojana. Zgodnie z ogólną zasadą przyjęto oś x wirującego układu współrzędnych $(x$ - $y)$ jest współliniowa z chwilowym położeniem wektora Ψ_s strumienia sprzężonego stojana. Układ sterowania składa się z dwóch torów regulacji: napięcia u_d w obwodzie prądu stałego przekształtnika AC/DC oraz modułu U_s wektora napięcia fazowego stojana generatora. W metodzie tej nadrzędny układ regulacji modułu U_s wektora napięcia stojana wyznacza zadaną wartość modułu Ψ_s^* wektora strumienia sprzężonego stojana podporządkowany obwód regulacji modułu Ψ_s wektora strumienia sprzężonego stojana wyznacza zadaną wartość składowej u_{sx}^* wektora napięcia stojana. Wyniki badań komputerowych i eksperymentalnych weryfikujących tę metodę są podane na rys. 7.21.- 7.22. Wyniki te wskazują, że metoda ta również zapewnia stabilizację napięcia u_d i amplitudy napięcia U_s z dużą dokładnością, również przy zmianach prędkości wirnika i obciążenia generatora.

Rozważania merytoryczne, odnoszące się do metod sterowania, zakończone są analizą i syntezą układu hybrydowego wzbudzenia złożonego z baterii kondensatorów oraz przekształtnika z układem regulacji zorientowanej (DFOC) względem strumienia skojarzonego z wirnikiem (Rys. 8.1). W odniesieniu do autonomicznego układu hybrydowego podano również metodę sterowania chwilowymi wartościami mocy czynnej i biernej generatora (Rys. 8.9).

Uwagi i pytania

1. W jakim celu jest stosowany odbiornik rezystancyjny R_d w obwodzie napięcia stałego przekształtnika DC/AC? Na jakiej podstawie przyjęto $R_d = 800\Omega$ i napięcie $U_d = 450V$, przy założeniu mocy odbiornika 1000W? (Rys. 5.9)
2. W odniesieniu do stosowania magazynów energii do stabilizacji prędkości Autor wyklucza ich wykorzystanie twierdząc „*Innym rozwiązaniem dla realizacji układu sterowania częstotliwością napięcia stojana autonomicznego generatora indukcyjnego jest układ akumulacji, z zastosowaniem np. odpowiedniej baterii akumulatorów o dużej wartości pojemności. Zastosowanie takiego rozwiązania jest również niecelowe ze względu na bardzo duże rozmiary, ciężar oraz koszty baterii akumulatorów*”. Jest oczywiste, że stosowanie magazynów energii pociąga za sobą dodatkowe koszty, jednakże jest to w obecnej chwili jedna z najbardziej atrakcyjnych metod poprawy jakości energii. Obecnie na świecie obserwuje się spontaniczny rozwój magazynowania energii elektrycznej w nowoczesnych bateriach litowo-jonowych i innych o mocach nawet rzędu wielu megawatów i dziesiątek MWh. Do celów elektrowni wiatrowych mogą być stosowane magazyny energii wykorzystywane w pojazdach o napędzie elektrycznym (np. magazyny TESLA).
3. W układzie hybrydowym zastosowano regulację prądu wzbudzenia przekształtnikiem równoległym z baterią kondensatorów. Na jakiej podstawie dobrano pojemność kondensatorów? Jakie zalety i zagrożenia wynikają z obecności baterii kondensatorów w obwodzie wyjściowym generatora indukcyjnego? Proszę o zestawienie wartości częstotliwości PWM przekształtnika, częstotliwości rezonansowej wynikającej z obecności baterii kondensatorów oraz indukcyjności filtra wyjściowego przekształtnika jak również częstotliwości wytwarzanego napięcia.

Uwagi redakcyjne

1. Proszę o skorygowanie podpisu pod rys. 8.10 i skorelowanie opisu rysunku z obrazem.

2. Rys. 8.11c – co oznacza $T_s = 20s$

Ocena pracy i konkluzja

Rozprawa doktorska mgr inż. Błażeja Jakubowskiego nt. „Analiza Przekształtnikowych Układów Sterowania Autonomicznym Generatorem Indukcyjnym” jest zrealizowana przy wykorzystaniu zaawansowanych teorii sterowania indukcyjnych maszyn elektrycznych pracujących generatorowo w układzie autonomicznym. W tym stanie zapewnienie stabilności, czyli nie utracenia zdolności wytwarzania energii elektrycznej, na skutek zmian obciążenia i prędkości, jest przedsięwzięciem trudnym i wymagającym umiejętności dopasowania metody sterowania do dynamicznych warunków pracy. Z tego powodu autor przeprowadził badania wielu metod i układów. Szczególnym osiągnięciem pracy jest opracowanie sterowania i regulacji oparte na metodach:

- sterowania skalarne
- sterowania polowo-zorientowanego względem strumienia sprzężonego wirnika
- sterowania polowo-zorientowanego względem strumienia sprzężonego stojana
- metoda sterowania mocą czynną i bierną generatora

Opracowanie sterowania w każdej metodzie zostało oparte na pełnym cyklu badawczym: modelowania, symulacji i badań laboratoryjnych. Stanowiąc bardzo obszerne wykazanie właściwości metod uczynił je bardzo przydatne dla praktyki.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Błażeja Jakubowskiego nt. „**Analiza Przekształtnikowych Układów Sterowania Autonomicznym Generatorem Indukcyjnym**” spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65) oraz rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z 15 stycznia 2004 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym. Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Warszawa 30.05.2015

Prof. dr hab. Włodzimierz Koczara
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Warszawska

Nawiązując do mojej opinii rozprawy doktorskiej mgr inż. Błażeja Jakubowskiego nt. „Analiza Przekształtnikowych Układów Sterowania Autonomicznym Generatorem Indukcyjnym” pragnę dodać, że rozprawa ta ujmuje tematykę generatorów indukcyjnych w sposób niekonwencjonalny i bardzo nowoczesny. Opracowanie metod i układów sterowania zorientowanego przenosi obecną technikę z IXX wieku do wieku XXI. Odnosi się to zarówno do analizy i syntezy układów wytwórczych jak i do weryfikacji laboratoryjnej. Daje to realne perspektywy wykorzystania wyników w praktyce. W Polsce jest przewidzianych kilkaset nowych małych elektrowni. Ze względu na warunki krytyczne elektrownie te powinny być przygotowane do pracy autonomicznej. Dotychczas elektrownie z generatorami indukcyjnymi nie zapewniały podstawowej jakości dostarczanej energii. Oznaczało to większe zainteresowanie małymi generatorami synchronicznymi. Jednakże, biorąc pod uwagę dość częste, w warunkach zasilania mikrosieci, występowanie zakłócenia typu „pole-slip” elektrownie te nie powinny pracować bezobsługowo. Natomiast w warunkach różnych zakłóceń generatory indukcyjne są bardziej odporne. Zatem dzięki opracowaniu bardzo skutecznych metod sterowania generatory indukcyjne będą znacznie lepiej pełniły swoją rolę w układach autonomicznych. Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia rozprawy wnioskuję o jej wyróżnienie.

