

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka  
Politechnika Śląska  
Instytut Elektrotechniki i Informatyki  
Gliwice, ul. Akademicka 10

Gliwice, dnia: 05. 12. 2013r.

**O C E N A**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Sieńko**  
**pt „Strategia sterowania przekształtnikiem macierzowym do**  
**wysokosprawnych siłowni gazowych”**

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Pol. Krakowskiej prof. dr hab. inż. Adama St. Jagiełły, pismo nr EO.4/388/2013 z dnia 30.09.2013r.

**Tematyka rozprawy**

Oceniana praca doktorska dotyczy przetwarzania energii elektrycznej o napięciu przemiennym i częstotliwości rzędu 1 - 4 kHz na częstotliwość 50Hz. Energia elektryczna o częstotliwości napięcia 1 – 4 kHz uzyskiwana jest z prądnicy synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi napędzanej mikroturbiną gazową. Rozwój konstrukcji tego typu agregatów prądowców jest na czasie, gdyż ich stosowanie stale rośnie. Agregaty zasilane biogazem spełniają bowiem warunki źródeł ekologicznych, mogą współpracować z siecią energetyczną i są stosowane jako rezerwowe źródła energii np. w szpitalach oraz w innych obiektach. Ich zaletą jest równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła, które może być wykorzystane dla celów grzewczych. Standardowym przekształtnikiem energii w tych agregatach jest przemiennik częstotliwości AC/DC/AC. Przekształtniki takie są stosunkowo złożone, gdyż konstrukcyjne muszą być dostosowane do transmisji energii w dwóch kierunkach, ponieważ prądnica pełni także funkcję rozrusznika turbiny gazowej. Cyklokonwertor sterowany macierzowo ma prostszy układ zaworów energoelektronicznych (rys.3.11) i tym samym może mieć wyższą sprawność przetwarzania energii, gdyż nie ma szeregowo połączonych zaworów. Temat jest aktualny i jest oryginalny. Praca podsumowuje wieloletnie badania Doktoranta, prowadzone pod kierownictwem promotora prof. dr hab. inż. Tadeusza Sobczyka, w tematyce sterowania macierzowego przekształtnikiem energoelektronicznym.

**Ocena merytoryczna**

Recenzowana praca doktorska zawiera 131 stron formatu A4 i obejmuje: spis treści, streszczenie, rozdziały od 1 do 6, spis tabel, spis rysunków i bibliografię. Bibliografia zawiera 83 pozycje w tym 11 pozycji współautorskich Doktoranta, opublikowanych między innymi w *Archives of Electrical Engineering* (1) i *materiałach konferencyjnej IEEE* (2). W pozycji [19] jest podana praca dyplomowa magisterska Doktoranta, co dowodzi, że tematyką przekształtników macierzowych zajmuje się od czasów studiów, już 10 lat. Tematycznie monografia doktorska koncentruje się na sposobach jednookresowego sterowania przekształtnikami macierzowymi spełniających założenie uzyskania, z sinusoidalnego wielofazowego źródła napięcia, napięcia sinusoidalnego trójfazowego o wartości stałej i częstotliwości 50 bądź 60 Hz. Źródłem napięcia jest prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi. Stabilizację napięcia wyjściowego uzyskuje się poprzez zmianę prędkości obrotowej turbiny, zatem amplituda i częstotliwość napięcia generatora nie jest stała. Analizuje się różne liczby faz i zmianę kolejności faz napięć źródła. Kryteriami porównawczymi sposobów sterowania są napięcia i prądy po obu stronach przekształtnika, moment elektromagnetyczny i przepięcia komutacyjne zaworów. Na bazie wymienionych

założeń, w rozdziale 1 zatytułowanym „Wstęp”, sformułowano tezę: „wykazanie korzystnych właściwości przekształtnika macierzowego sterowanego jednookresowo jako elementu dopasowującego w torze wytwarzania energii elektrycznej w małych siłowniach z turbinami gazowymi.” Treść merytoryczna rozprawy obejmuje rozdziały od 2 do 5 i rozdział 6 - Wnioski.

Rozdział 2 zatytułowany „Właściwości przekształtnika macierzowego sterowanego okresowo” jest podstawowym rozdziałem monografii. Przedstawiono w nim koncepcję sterowania przekształtnikiem macierzowym, a wykorzystując okresowość zmiany napięcia po obydwóch stronach przekształtnika macierzowego, zaproponowano jednookresową formułę jego sterowania. Następnie analizowano wpływ częstotliwości i liczby faz (3, 6, 12, 18) napięcia wejściowego i obciążenia indukcyjnego, trzech wybranych metod sterowania ( $\tau_N - \tau_M$ ,  $\tau_N + \tau_M$ , „kwadracikowo”), na przebieg napięcia wyjściowego. Rozdział 2 zamyka rozważanie dotyczące problemów komutacyjnych, przy ww. metodach sterowania przekształtnikiem macierzowym. Analiza przebiegów napięcia wykazała, że najkorzystniejszą metodą sterowania *PM* jest metoda według ( $\tau_N - \tau_M$ ) i tę metodę wybrano do dalszych badań i nazwano ją sterowaniem jednookresowym. Rozdział 3 zatytułowany „Warianty budowy modułu mikroturbiny z przekształtnikiem macierzowym”. Przedstawiono pięć modułowych wariantów przetwarzania energii z różną kombinacją liczby faz: 3 i 12. Omówiono poszczególne podzespoły mikroagregatu, a więc generator wzbudzany magnesami trwałymi, trzy warianty rozwiązania przekształtnika macierzowego, model transformatora przetwarzającego liczbę faz 3/12, model układu obciążenia oraz modele filtrów pasmowo zaporowego i komutacyjnego. Rozdział 4 zatytułowany „Porównanie wybranych wariantów budowy toru przekształcania energii z przekształtnikiem macierzowym”. Analizowano kolejno moduły przekształtnika macierzowego o liczbie faz:  $N/M = 3/3; 3/12; 12/3; 12/12; 3/12/12$  (rys.4.26). Analizowano przebiegi: napięcia wyjściowego, momentu elektromagnetycznego, napięcie i prąd generatora oraz napięcie i prąd klucza. W oparciu o wyniki analizy do dalszych badań wybrano moduł przekształtnika macierzowego 12/12, jako wariant najbardziej korzystny. Badano wpływ: reaktancji synchronicznej generatora ( $x_d = 0,2; 1,2$ ), lokalizację filtra komutacyjnego od strony generatora i od strony transformatora oraz rodzaj połączenia uzwojenia 12-to fazowego transformatora. Badania wykazały, że wzrost reaktancji synchronicznej generatora poprawia przebiegi: napięć, prądów i momentu modułu. Wykazano, że praca modułu w zakresie zmiany  $0,2 \leq x_d \leq 1,2$  jest poprawna, a lokalizacja filtra komutacyjnego i rodzaj połączenia uzwojenia transformatora nie mają wpływu na parametry pracy modułu. Rozdział 5 zatytułowany „Sterowanie modułu  $\mu T$  pracującego autonomicznie i współpracującego z *SEE*”. Dla pracy autonomicznej analizowano przebiegi: napięcia i prądu, momentu oraz mocy czynnej i biernej przy zmianie: prędkości obrotowej, mocy turbiny, impedancji obciążenia i kąta fazowego sterowania *PM*. Wyniki te wykazały, że praca  $\mu T$  jest poprawna, gdyż uzyskuje się stabilizację napięcia i częstotliwości napięcia wyjściowego. Podobne badania przeprowadzono przy pracy  $\mu T$  na *SEE*. Wynik tych badań jest także pozytywny, sterowanie mocą czynną uzyskuje się poprzez sterowanie *PM*, a sterowanie mocą bierną poprzez sterowanie prędkością turbiny.

Oceniana monografia obejmuje modele matematyczne i badania symulacyjne  $\mu T$ , przy czym badania skoncentrowano na przekształtniku macierzowym. Opracowano autorską metodę sterowania nazwaną sterowaniem jednookresowym. Wykazano, że siłownia z wysokoobrotową turbiną gazową, generatorem synchronicznym wzbudzany magnesami trwałymi i z przekształtnikiem energoelektronicznym typu cyklokonwertor sterowany macierzowo jednookresowo, ma korzystne właściwości, tak przy pracy samotnej jak i na sieć elektroenergetyczną. Tym samym udowodniono zdefiniowaną we wstępie tezę. Praca jest merytorycznie poprawna, przyjęte założenia są logiczne, a uzyskane wyniki badań symulacyjnych są wiarygodne. Nie mam uwag i zastrzeżeń merytorycznych do treści

rozprawy. Praca jest napisana czytelnie i dobrze jest zilustrowana rysunkami, które ułatwiają zrozumienie tekstu.

### Uwagi dyskusyjne i pytania

1. Ze wstępu (str. 3-4) wynika, że przekształtnik energoelektroniczny powinien spełniać także rolę komutatora umożliwiając „start i rozpędzenie turbiny”. W pracy problematyką rozruchową nie zajmowano się. Powstaje jednak pytanie jakie problemy wystąpią w sterowaniu pracą  $PM$  przy przepływie energii w odwrotnym kierunku?
2. Str.34. Podana definicja mocy dotyczy układu jednofazowego. Mam jednak wątpliwości czy Edward Wilson Kimbark jest autorem przytoczonej definicji. Definicja mocy czynnej i biernej, przy sinusoidalnych przebiegach napięcia i prądu, została sformułowana przed urodzeniem się E. W. Kimbarka. Nie znalazłem autora definicji mocy, koledzy zajmujących się teorią mocy powiedzieli mi, że moc została zdefiniowana (prawdopodobnie) przez Charlesa Proteusa Steinmetza. W podanym wzorze kąt  $\phi_I$  powinien mieć indeks „ $dh$ ”.
3. Str.36. „ $PM$  przy sterowaniu według  $\tau_N + \tau_M$  ma cechy zyratora”. Czy zatem nie można wykorzystać tego sterowania do budowy filtra aktywnego, który pracowałby równolegle z cyklokonwertorem sterowanym jednookresowo według  $\tau_N - \tau_M$ ?
4. Str.115. Wydaje się, że sterowanie mocą bierną powinno być także możliwe przy stałej prędkości obrotowej turbiny.
5. Str. 45 „ograniczenie wielkości rotora jest konsekwencją działania odśrodkowych sił rozrywających”. Gabaryt generatora (w tym wirnika) determinuje moment znamionowy.
6. Str. 47. Wykonanie generatora 12-to fazowego, a pod względem liczby zębów 6-io fazowego, przy małej średnicy wewnętrznej pakietu blach stojana, może być trudne do wykonania.
7. Str. 48 „W pracy przewidziano pracę generatora „
8. Str. 125. Pozycja [20]. Co oznacza WYN (11) 204643 ? Jeśli to jest patent, a tak sądzę na podstawie numeru, to należało napisać Patent RP Nr (11) 204643.
9. Str.4. Jest „...powyżej tezą..” ?

Uwagi powyższe są typu korektorskiego i nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy.

### Wniosek

Mgr inż. Tomasz Sieńko prowadził badania pod opieką, doświadczonego w tematyce maszyn elektrycznych, promotora prof. dr hab. inż. Tadeusza Sobczyka. Doktorant w swoim dorobku naukowym, oprócz monografii, ma 11 artykułów (podanych w bibliografii) opublikowanych w czasopismach i materiałach konferencji międzynarodowych o wysokiej randze naukowej.

Praca doktorska jest teoretyczna, jej wartością naukową jest model matematyczny sterowania macierzowego cyklokonwertorem przekształcającym napięcie o częstotliwości większej na częstotliwość mniejszą. Poprzez symulacje komputerowe wykazano, że najkorzystniejsze parametry agregatu prądotwórczego z turbiną gazową uzyskuje się przy przekształtniku macierzowym 12/12 sterowanym jednookresowo.

Rozprawa doktorska ma sprecyzowany cel i tezę. Postawione w pracy zadanie naukowe zostało zrealizowane. Na podkreślenie zasługuje dobre rozeznanie literatury. Praca jest napisana poprawnie, w zrozumieniu treści pomocne są rysunki i wykresy na których przedstawiono wyniki badań symulacyjnych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Sieńko „Strategia sterowania przekształtnikiem macierzowym do wysokosprawnych siłowni gazowych”, według mojej oceny, spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.

