

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Szulawskiego pt.: **Zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym**

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Szulawskiego została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Lecha Grzesiaka - Pismo z dnia 26.07.2019 r.

I. TEMAT I CEL PRACY

Współcześnie są intensywnie rozwijane układy energetyki z wykorzystaniem mikrosieci. Mikrosieć elektroenergetyczna (*micro-grid*) stanowi zbiór urządzeń wytwórczych, zasobników i odbiorników energii elektrycznej połączonych we wspólną sieć, mającą na celu zapewnienie niezawodnej dostawy energii elektrycznej oraz zminimalizowanie jej kosztu. Mikrosieci projektowane są na moce do kilku megawatów, a wszystkie urządzenia w mikrosieci znajdują się w niewielkiej odległości od siebie. Układy sterowania mikrosieci pozwalają na pracę autonomiczną (wyspowa) lub współpracę mikrosieci z siecią energetyki zawodowej.

Jako źródła energii elektrycznej przyłączane do mikrosieci mogą być stosowane różnego rodzaju źródła energii konwencjonalnej (agregaty prądowórcze) lub układy generacyjne energii odnawialnej. W agregatach prądowórczych często jest stosowany generator synchroniczny, napędzany silnikiem spalinowym. Przy eksploatacji tego rodzaju układu żąda się małego zużycia paliwa, pracy układu z dużą sprawnością, stabilizacji częstotliwości i amplitudy wytwarzanych napięć, możliwości pracy przy przeciążeniach, szybkiej reakcji na zmiany obciążeń i wiele innych wymagań. Wymagania te są trudne do spełnienia w przypadku konwencjonalnych wykonawców układów agregatów prądowórczych z generatorami synchronicznymi.

Z tych względów w rozprawie jest analizowana i badana nowatorska koncepcja zintegrowanego układu wytwarzania energii elektrycznej, nazywanego Synchronogeneratorem. Ten układ generacji energii składa się z konwencjonalnego agregatu prądowórczego z generatorem synchronicznym i z przyłączonym równolegle do uzwojenia twornika generatora przekształtnikiem energoelektrycznym z magazynem energii elektrycznej. Tego rodzaju nowatorski układ generacji energii elektrycznej zapewnia wiele możliwości zarządzania rozdziałem mocy czynnej i biernej wytwarzanych przez generator i przekształtnik oraz wiele możliwości wykorzystania zdolności przekształtnika do szybkiej reakcji na zmiany wielkości regulowanych. Autor rozprawy jest współautorem koncepcji takiego hybrydowego układu wytwarzania energii, co zostało potwierdzone uzyskaniem dwóch współautorskich patentów.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej są zagadnienia analizy nowatorskiego zintegrowanego układu wytwarzania energii elektrycznej, nazywanego dalej Synchronogeneratorem. Stany pracy, właściwości i zasady sterowania tego rodzaju zintegrowanego układu wytwarzania energii nie są jeszcze w pełni poznane i wymagają podjęcia odpowiednich badań naukowych. Problemy rozpatrywane w rozprawie stanowią nowoczesną dziedzinę współcześnie prowadzonych badań naukowych w zakresie elektromechanicznego przetwarzania energii, przekształtnikowych układów sterowania oraz optymalizacji pracy rozproszonych układów generacji energii elektrycznej. Stąd należy uznać, że wybór celu i tematyki rozprawy jest uzasadniony i bardzo istotny zarówno pod względem poznawczym oraz praktycznym.

II. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 101 stron i składa się z 7 rozdziałów, załączników i wykazu literatury. Poszczególne rozdziały mają różną objętość i zakres naukowy. Dla formalnego celu informacyjnego, objętości poszczególnych rozdziałów wynoszą: 1 - 3 str., 2 - 10 str., 3 - 7 str., 4 - 16 str., 5 - 37 str., 6 - 7 str. i 7 - 5 str.

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera wprowadzenie do tematyki rozprawy. Omówiono w nim przedstawienie rodzajów układów wytwarzania energii elektrycznej z generatorami synchronicznymi oraz wymagania stawiane tym układom przy pracy autonomicznej i sieciowej. Dokonano przeglądu literatury naukowo-technicznej, związanej z zastosowaniami tego rodzaju układów. Przedstawiono niekorzystne właściwości stosowanych dotychczas układów wytwarzania energii elektrycznej z generatorami synchronicznymi.

Na tej podstawie Autor rozprawy sformułował cel rozprawy, którym jest opracowanie topologii, algorytmów sterowania oraz przeprowadzenie szczegółowych analiz i badań zintegrowanego, przekształtnikowego układu wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym, nazywanego dalej Synchrongenverterem. Autor pracy, przypuszczalnie przez nadmierną skromność nie podaje w treści rozdziału, że jest współautorem koncepcji nowoczesnego układu Synchrongenvertera, co zostało potwierdzone dwoma zgłoszeniami patentowymi, zakończonych przyznaniem dwóch współautorskich patentów. Prace nad nowoczesnym, zintegrowanym układem Synchrongenvertera prowadzone były w zespole naukowym, kierowanym przez prof. dr hab.inż. Włodzimierza Koczare, w Zakładzie Napędu Elektrycznego Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej.

Autor rozprawy w rozdziale pierwszym nie sformułował tezy naukowej, która pozwoliłaby na wyraźne sprecyzowanie zagadnień naukowych, które są przedmiotem rozważań w dalszej części rozprawy. Ze względu na to, że w rozprawie rozpatrywany jest nowatorski i złożony układ wytwarzania energii elektrycznej, to sformułowanie odpowiedniej tezy naukowej nie byłoby trudnym problemem.

Rozdział drugi i trzeci stanowią wprowadzenie do głównych zagadnień rozpatrywanych w rozprawie. W rozdziale drugim Autor rozprawy przedstawił modele matematyczne odpowiednio: 3-fazowego generatora synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym oraz silnika spalinowego Diesla. Silnik Diesla został wybrany jako maszyna napędowa generatora synchronicznego, która jest często stosowana w układach generacji energii elektrycznej o małej i średniej mocy. W rozdziale trzecim omówiono metody sterowania mocy czynnej i biernej konwencjonalnego generatora synchronicznego podczas pracy autonomicznej generatora i przy współpracy generatora z siecią elektroenergetyczną AC.

Dalsze rozdziały rozprawy należy uznać jako te rozdziały, które stanowią oryginalny dorobek naukowy Autora rozprawy.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące budowy konstrukcyjnej, topologii oraz zasad pracy i zasad sterowania zintegrowanego układu wytwarzania energii elektrycznej, nazywanego Synchrongenverterem. Synchrongenverter jest układem elektromechaniczno-energoelektronicznym, złożonym z 3-fazowego generatora synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym i sprzężonego mechanicznie z maszyną napędową oraz z 3-fazowego przekształtnika energoelektronicznego typu DC/AC o dwukierunkowym przepływie energii elektrycznej. Do obwodu pośredniczącego DC tego przekształtnika głównego jest włączony kondensator lub układ kondensatorów o stosunkowo dużej pojemności. W typowych przypadkach przekształtnik Synchrongenvertera jest wyposażony również w magazyn energii elektrycznej, który jest przyłączony do obwodu pośredniczącego DC przekształtnika przez dodatkowy dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny typu DC/DC. Obwody strony AC 3-fazowego przekształtnika głównego są przyłączone równolegle do zacisków 3-fazowego uzwojenia twornika generatora synchronicznego. W dalszej części rozdziału czwartego Doktorant omówił zagadnienia o charakterze projektowym i eksploatacyjnym. W szczególności Doktorant sformułował zasady wyznaczania znamionowej mocy układu Synchrongenvertera dla stanów pracy tego układu przy warunku zachowania stałej znamionowej mocy biernej oraz przy warunku zachowania stałego współczynnika mocy. W tych stanach generator synchroniczny jest tak sterowany, aby nie wytwarzał mocy biernej, co pozwala na zwiększenie jego znamionowej mocy czynnej do wartości znamionowej

mocy pozornej generatora. Wymagana moc bierna jest wtedy wytwarzana w układzie Synchronvertera przez przekształtnik przyłączony do uzwojenia twornika generatora synchronicznego. W przypadku wyposażenia układu Synchronvertera w magazyn energii elektrycznej, przekształtnik główny może generować dodatkowo również moc czynną, zwiększając dodatkowo korzystnie moc czynną wytwarzaną przez generator synchroniczny. W dalszej części rozdziału czwartego Doktorant przeprowadził analizę sprawności całego układu Synchronvertera z uwzględnieniem wpływu poszczególnych zespołów układu. Ważnym wynikiem tej analizy jest określenie przez Doktoranta warunków doboru zespołów układu Synchronvertera, przy których jest możliwe zachowanie takich samych wartości strat mocy, jakie występują w układzie konwencjonalnym z zastosowaniem tylko generatora synchronicznego o typowym sterowaniu.

Ważną część rozprawy stanowi rozdział piąty w którym Doktorant omówił zagadnienia dotyczące analizy pracy autonomicznej układu Synchronvertera. Przewidywane jest, że stan pracy autonomicznej będzie należał do najczęściej stosowanych stanów pracy Synchronvertera. Z tych względów Doktorant przyjął, że rozdział piąty ma największą objętość, równą ponad 1/3 objętości całej rozprawy. W rozdziale tym Doktorant sformułował zasady regulacji mocy czynnej i biernej w układzie Synchronvertera podczas pracy autonomicznej. Na tej podstawie Doktorant opracował złożoną strukturę obwodów mocy układu Synchronvertera, która obejmuje generator synchroniczny GV z układem napędowym, przekształtnik energoelektroniczny CV, dodatkowy przekształtnik energoelektroniczny ESC, magazyn energii elektrycznej i obwody AC autonomicznych odbiorników energii. Układ regulacji obejmuje sterowanie maszyny napędzającej generator, obwody mocy generatora synchronicznego, obwody przekształtników energoelektronicznych, magazynu energii i obwodów obciążenia. Doktorant opracował również złożoną strukturę układów regulacji, która w rozprawie jest przedstawiona w postaci odpowiednich schematów blokowych. Z powodu dużej złożoności, układ regulacji został podzielony na trzy zespoły funkcjonalne: dla sterowania generatorem synchronicznym GV, sterowania przekształtnikiem CV i sterowania przekształtnikiem ESC. Obwody mocy i układy regulacji Synchronvertera zostały przez Doktoranta zaimplementowane w środowisku symulacyjnym PSIM. Przy wykorzystaniu tego pakietu symulacyjnego Doktorant wykonał szereg badań symulacyjnych potwierdzających poprawność działania i pozwalających na poznanie właściwości układu Synchronvertera. Dla celów racjonalnego wykonania badań symulacyjnych Doktorant wprowadził klasyfikację możliwych stanów pracy Synchronvertera w zależności od generowanej mocy czynnej i biernej oraz kierunku przepływu tych mocy. Doktorant wykonał szereg badań symulacyjnych dla wybranych stanów pracy Synchronvertera, które pozwoliły na weryfikację nastaw bloków regulacji oraz określenie właściwości procesów w układzie elektromechanicznym i w układach energoelektronicznych. Dla zapewnienia większej ogólności analiz i badań symulacyjnych Doktorant rozpatrzył również zagadnienia dotyczące pracy układu Synchronvertera podczas zwiększonego obciążenia oraz zasilania odbiorów o charakterze niesymetrycznym i nieliniowym. Doktorant wykazał, że w przypadku zasilania przez układ Synchronvertera odbiorników nieliniowych lub pracy z obciążeniem niesymetrycznym konieczne jest zmodyfikowanie struktury wybranych bloków regulacji przekształtnika CV. Zostało to potwierdzone przez przeprowadzone przez Doktoranta badania symulacyjne z zastosowaniem zmodyfikowanych bloków regulacji.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące analizy pracy układu Synchronvertera przy współpracy z siecią energetyczną AC. Doktorant omówił odmienności sterowania układem Synchronvertera przy współpracy z siecią i podczas pracy autonomicznej. Doktorant opracował zmodyfikowany układ regulacji dla układu Synchronvertera przy jego współpracy z siecią elektroenergetyczną. Na tej podstawie Doktorant wykonał szereg badań symulacyjnych określających przebiegi chwilowe generowanych mocy czynnych i biernych. Przebiegi te pozwoliły na poznanie odmiennych właściwości układu regulacji układu Synchronvertera przy pracy sieciowej.

W rozdziale siódmym rozprawy przedstawiono podsumowanie zawierające wnioski końcowe z badań opisanych w rozprawie oraz wyszczególnienie własnych osiągnięć naukowych Autora rozprawy.

W rozdziale: Załączniki, Doktorant przedstawił zestawienia liczbowe parametrów i danych znamionowych podstawowych zespołów układu Synchronvertera oraz dane przyjęte dla układu sterowania i wybranego bloku regulacji.

Pien

W ostatnim nienumerowanym rozdziale rozprawy Autor przedstawił wykaz cytowanych publikacji naukowych związanych z tematyką rozprawy. Wykaz publikacji naukowych obejmuje 47 pozycji, z których 70% stanowią pozycje literatury zagranicznej w języku angielskim, a 30% pozycje literatury krajowej w języku polskim. Wykaz literatury obejmuje 10 pozycji, stanowiących współautorskie publikacje z tematyki będącej przedmiotem rozprawy, z których 2 pozycje dotyczą opisu przyznanych patentów, a 8 pozycji stanowią artykuły naukowe, opublikowane w znaczących czasopismach naukowych lub referaty naukowe, wygłoszone i zamieszczone w materiałach znaczących sympozjów i konferencji naukowych.

III. OCENA ROZPRAWY

Na podstawie wnikliwej analizy zagadnień naukowych zawartych w przedłożonej rozprawie recenzent stwierdza, że przyjęte przez Autora cele rozprawy zostały osiągnięte.

Do najbardziej istotnych i oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć:

- Współautorski udział w opracowaniu nowatorskiej koncepcji zintegrowanego układu wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym, nazywanego układem Synchrongenverter;
- Analiza stanów pracy zintegrowanego układu Synchrongenvertera. Wprowadzenie klasyfikacji możliwych stanów pracy układu Synchrongenvertera w zależności od wartości, rodzaju i kierunku przepływu mocy elektrycznych w jego podzespołach;
- Opracowanie algorytmów i metod regulacji układu Synchrongenvertera dla pracy autonomicznej i przy współpracy z siecią elektroenergetyczną;
- Opracowanie szczegółowych topologii i struktur układów regulacji układu Synchrongenvertera, odpowiednio dla pracy autonomicznej i przy współpracy z siecią elektroenergetyczną - określenie struktur poszczególnych bloków regulacji, określenie rodzaju regulatorów, dobór nastaw regulatorów, określenie ograniczeń sygnałów w układzie regulacji, określenie wymaganych sygnałów pomiarowych i ich przetwarzania;
- Opracowanie odpowiednich modeli symulacyjnych z uwzględnieniem dużej złożoności układu elektromechanicznego, złożoności układów przekształtnikowych i układów regulacji oraz praktyczne zaimplementowanie tych modeli symulacyjnych z wykorzystaniem nowoczesnego pakietu symulacyjnego;
- Wykonanie szerokiego zakresu badań symulacyjnych związanych z analizą układu Synchrongenvertera dla pracy autonomicznej i przy współpracy z siecią elektroenergetyczną;
- Opracowanie wyników badań symulacyjnych z przedstawieniem interpretacji fizycznej otrzymanych przebiegów wielkości elektromagnetycznych.

Doktorant rozwiązał rozpatrywane w rozprawie zagadnienia naukowe dotyczące zintegrowanego układu wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym, nazywanego układem Synchrongenverter w sposób samodzielny, z zastosowaniem właściwych metod analizy i właściwych metod badań. Przedstawione metody analizy i otrzymane wyniki badań charakteryzują się w dużym stopniu oryginalnością oraz dużym stopniem nowości. Należy wyróżnić dobrą znajomość przez Doktoranta nowoczesnych metod sterowania i umiejętność ich praktycznego wykorzystania. Pewnym niedostatkiem pracy jest brak eksperymentalnej weryfikacji przeprowadzonych analiz teoretycznych i badań symulacyjnych.

Przedstawiona rozprawa jest potwierdzeniem znacznego wkładu pracy własnej Autora. Autor rozprawy wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, analizy i syntezy otrzymanych wyników badań oraz formułowania wniosków końcowych z badań.

W opinii recenzenta praca zasługuje na ocenę pozytywną.

IV. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Poniżej przedstawiono uwagi stanowiące zauważone przez recenzenta uchybienia w Rozprawie. Przeważająca większość tych uwag może być rozpatrywana jako uwagi dyskusyjne lub pewne nieprawidłowości w wykonanych analizach teoretycznych i badaniach symulacyjnych.

Wszystkie przedstawione uwagi nie powodują obniżenia końcowej, pozytywnej oceny rozprawy.

1. Przedmiotem rozprawy jest analiza elektromechaniczno-energoelektronicznego układu wytwarzania energii elektrycznej, nazywanego przez autorów układem Synchronverter. Jest to układ nowatorski, co zostało potwierdzone dwoma patentami współautorskimi, przyznanymi kilka lat temu. Analiza teoretyczna i badania tego układu mają duże znaczenie naukowe i praktyczne. W części początkowej rozprawy Doktorant nie przedstawił jednak światowego stanu techniki oraz krytycznego omówienia głównych ośrodków naukowych i zespołów badawczych, prowadzących badania naukowe w dziedzinach związanych z tematyką rozprawy. Doktorant nie wspomniał tu dużego znaczenia prac naukowych prof. dr hab. inż. Włodzimierza Koczary, związanych z rozwojem różnych układów energetyki rozproszonej, mikrosieci i energetyki odnawialnej. Podobny układ do rozpatrywanego w rozprawie jest rozwijany przez pracowników firmy *Gummins Generator Technologies Ltd, UK*. Zostało to potwierdzone kilkoma publikacjami pracowników tej firmy na renomowanych międzynarodowych konferencjach i przyznaniem pracownikom firmy patentu na opracowany przez nich układ wytwarzania energii. Patent firmy jest cytowany przez Doktoranta w dalszej treści rozprawy jako literatura [S3], natomiast publikacje pracowników tej firmy nie są w rozprawie cytowane. Patent przyznany firmie *Gummins* ma późniejszą datę zgłoszenia w porównaniu do dwóch patentów współautorskich Doktoranta, co wskazuje na pierwszeństwo opracowania innowacji.

W rozprawie nie ma również żadnego omówienia bardzo dużej liczby publikacji w literaturze światowej, dotyczących analizy i badania innego układu o nazwie Synchronverter. Synchronverter jest układem przekształtnikowym, który realizuje pracę wirtualnego generatora synchronicznego. Układ Synchronvertera obejmuje przekształtnik DC/AC z filtrem sieciowym, obwód DC z możliwym magazynem energii oraz układ sterowania. Układ sterowania ma dwa kanały: do oddzielnego sterowania mocy czynnej i mocy biernej, podobnie jak w rzeczywistym generatorze synchronicznym. Praca i sterowanie układu Synchronverter są podobne do pracy układu przekształtnikowego przyłączonego równolegle do generatora synchronicznego w układzie Synchronverter.

2. Nieodpowiedni jest sformułowany przez Doktoranta tytuł rozdziału 2: *Budowa i zasada działania generatora synchronicznego*. Generatory synchroniczne są maszynami elektrycznymi o ponad stuletniej historii. Tego rodzaju tytuł jest odpowiedni dla podręcznika szkolnego lub akademickiego, a nie jako tytuł rozdziału w rozprawie doktorskiej o wysokim poziomie naukowym. Ponadto ten tytuł nie jest zgodny z treścią tego rozdziału, ponieważ rozdział 2 przedstawia tylko model matematyczny generatora synchronicznego. Z podanym tytułem rozdziału 2 nie jest również spójny podrozdział 2.3. *Model matematyczny silnika Diesla*.

3. Pewne zastrzeżenia merytoryczne budzi model matematyczny generatora synchronicznego przedstawiony w rozdziale 2.

a) Jako model wyjściowy przyjęto model obwodowy maszyny synchronicznej jawnobiegunowej, sformułowany dla współrzędnych naturalnych, czyli dla zmiennych fazowych twornika, wirnika i zastępczych obwodów tłumiących. Następnie zastosowano transformację tych współrzędnych naturalnych do wspólnego układu współrzędnych przetransformowanych $dq0$, a nie jak podano w rozprawie do układu dq . Otrzymano równania modelu matematycznego dla współrzędnych $dq0$ w postaci układu równań różniczkowych o stałych współczynnikach, wynikających z wyeliminowania zmienności indukcyjności maszyny od kąta położenia wirnika. W opisie modelu podano nieprawidłowo, że układ współrzędnych dq wiruje zgodnie z wirnikiem generatora synchronicznego. Taki warunek jest spełniony tylko dla maszyny synchronicznej o liczbie par biegunów $p=1$. Dla maszyny synchronicznej o liczbie par biegunów $p>1$ należy maszynę wielobiegunową przekształcić do maszyny równoważnej o $p=1$. Wtedy zamiast mechanicznego kąta obrotu wirnika i mechanicznej prędkości kątowej wirnika rozpatruje się elektryczny kąt obrotu wirnika i elektryczną prędkość kątową wirnika. Przyjęty układ współrzędnych dq wiruje zatem z elektryczną, a nie z mechaniczną prędkością kątową wirnika.

Plus

- b) W równaniach (2.1.3) i (2.1.4) w składnikach opisujących napięcia rotacji powinna występować elektryczna prędkość kąтова wirnika, a nie mechaniczna prędkość kąтова wirnika.
- c) Doktorant w rozprawie nie przedstawił macierzy transformacji współrzędnych naturalnych i nie podał, czy zastosowano transformację inwariantną, zachowującą niezmienniczość wartości mocy elektrycznych, czy transformację nieinwariantną, zachowującą niezmienniczość wartości modułów wektorów wielkości elektromagnetycznych. Dopiero na podstawie współczynnika (3/2) występującego w równaniu (2.2.3) na moment elektromagnetyczny generatora można stwierdzić, że została zastosowana transformacja nieinwariantna.
- d) Niezbyt poprawna jest postać schematów zastępczych maszyny synchronicznej we współrzędnych $dq0$ przedstawionych na rys.2.1.3. Na rysunku tym, w obwodach zastępczych dla osi d i osi q wyeliminowano sprzężenia magnetyczne. Obwód uzwojenia wzbudzenia i obwody uzwojeń tłumiących generatora zostały połączone galwanicznie z odpowiednimi obwodami zastępczymi uzwojenia twornika. Takie połączenie galwaniczne jest możliwe tylko w przypadku gdy wielkości elektromagnetyczne i parametry uzwojenia wzbudzenia i obwodów tłumiących zostaną odpowiednio przeliczone na stronę twornika. Natomiast na schematach z rys.2.1.3 takiego przeliczenia nie zastosowano i obwody zastępcze mają takie same parametry i wielkości elektromagnetyczne jak w modelu wyjściowym maszyny z obwodami sprzężonymi magnetycznie i niepołączonymi galwanicznie.
- e) Z analizy formy równań modelu (2.1.1), (2.1.3)-(2.1.8) oraz schematów z rys.2.1.3 wynika, że równania modelu matematycznego maszyny synchronicznej zostały sformułowane przy przyjęciu Systemu Strzałkowania Odbiornikowego (SSO). Dla tego systemu strzałkowania moc elektryczna i moment elektromagnetyczny maszyny synchronicznej przy pracy silnikowej mają wartości dodatnie, a przy pracy generatorowej mają wartości ujemne. Przy tym strzałkowaniu w równaniu ruchu (2.2.1) dla pracy generatorowej moment elektromagnetyczny generatora powinien występować ze znakiem (+), ponieważ wartość algebraiczna tego momentu wynikająca z równania (2.2.3) będzie ujemna. W wynikach badań symulacyjnych przedstawionych w rozprawie na wszystkich przebiegach chwilowych wartości momentu elektromagnetycznego generatora synchronicznego są jednak dodatnie. Czy uzyskano to drogą obliczeniowego przeliczenia wartości czy też zmiany modelu matematycznego generatora.
- f) W rozprawie brak jest objaśnienia momentu opisywanego równaniem (2.2.4) i nazywanego momentem tłumiącym ruch wirnika generatora. Nie podano cytatu literatury dla wzoru opisującego moment tłumiący. Moment ten stanowi osobny składnik w równaniu ruchu (2.2.1). Nie podano interpretacji fizycznej tego momentu tłumiącego. Jeżeli ten moment ma charakter elektromagnetyczny, to powinien on być składową momentu elektromagnetycznego (2.2.3), wywoływaną zmianami kąta mocy generatora.
- g) Niepoprawny jest wzór (2.1.28). W tym wzorze występują moduły, czyli amplitudy wektora napięcia i prądu twornika generatora. Moc pozorna generatora jest równa 3-krotnej wartości iloczynu wartości skutecznych napięcia i prądu generatora, a nie 3-krotnej wartości iloczynu amplitud napięcia i prądu generatora.
- h) W schemacie blokowym modelu matematycznego silnika Diesla w bloku aktuatora zastosowano ograniczenie maksymalnego momentu mechanicznego maszyny napędowej (silnika Diesla) do wartości 1.1 momentu znamionowego generatora synchronicznego. W układzie Synchrongenvertera rozpatrywana jest możliwość zwiększenia mocy znamionowej, a stąd też i momentu znamionowego generatora do wartości 1,25 mocy znamionowej. Czy to ograniczenie momentu dla sterowania silnikiem Diesla nie będzie przeszkodą dla uzyskania tego stanu pracy
4. Koncepcja układu Synchrongenverter jest oparta na wspólnym sterowaniu generatora synchronicznego i przekształtnika DC/AC przyłączonego do uzwojenia twornika generatora. Przyjęto tu założeni, że generator może być zawsze obciążany znamionową mocą pozorną. Warunek ten oznacza, że przy pracy generatora synchronicznego ze współczynnikiem mocy

większym od wartości znamionowej, generator może być obciążany wartością mocy czynnej większą od znamionowej wartości czynnej. W szczególnym przypadku generator może pracować bez wytwarzania mocy biernej, czyli przy wytwarzaniu zwiększonej mocy czynnej do wartości znamionowej mocy pozornej. Warunki te są oparte na założeniu, że granice obciążalności generatora stanowi okrąg na płaszczyźnie PQ o promieniu równym znamionowej mocy pozornej lub znamionowemu prądowi twornika. Założenie to nie jest zgodne z teorią pracy maszyn synchronicznych. Wg teorii, granice obciążalności maszyny synchronicznej są wyznaczone na płaszczyźnie PQ przez dwa niecentryczne okręgi: okrąg o stałej wartości prądu twornika i okrąg o stałej wartości prądu wzbudzenia. Granice rzeczywistej obciążalności generatora stanowi wtedy wielobok, określony przez odpowiednie ograniczenia: moc znamionowa maszyny napędzającej generator, granice stabilności statycznej i dynamicznej, dopuszczalne temperatury elementów maszyny i warunki chłodzenia. Z podawanych w literaturze wykresów granicznych obciążeń generatora synchronicznego wynika, że praca ciągła maszyny synchronicznej ze znamionową mocą pozorną jest dopuszczalna tylko w bardzo małym przedziale. Ponadto ze względu na stabilność pracy i przeciążalność momentem (mocą) celowe jest aby maszyna synchroniczna pracowała zawsze przy wytwarzaniu mocy biernej. Przy pracy maszyny z obciążeniem czynnym rośnie kąt mocy i maleje przeciążalność i stabilność pracy maszyny. W rozprawie brakuje obliczeń porównawczych przeciążalności generatora przy obciążeniu znamionową mocą czynną i znamionową mocą bierną z przeciążalnością generatora obciążonego mocą czynną równą znamionowej mocy pozornej.

5. Pewne zastrzeżenia budzą zależności energetyczne na jakich oparte jest sterowanie układem Synchronizera. Sterowanie to jest oparte na teorii chwilowej mocy czynnej i chwilowej mocy biernej. Dla zastosowania tej teorii 3-fazowe chwilowe wielkości elektromagnetyczne twornika generatora synchronicznego GV i 3-fazowe chwilowe wielkości elektromagnetyczne obwodów AC przekształtnika CV są transformowane do współrzędnych określonych w wirującym układzie xy . Przyjęto, że oś x układu xy jest zawsze współliniowa z położeniem chwilowym wektora napięcia fazowego twornika generatora i układ xy wiruje synchronicznie z tym wektorem napięcia. Doktorant nie podaje w rozprawie postaci macierzy transformacji elektromagnetycznych zmiennych fazowych do układu xy i nie wiadomo, czy ta transformacja jest inwariantna i zachowuje niezmienniczość mocy, czy też jest nieinwariantna i zachowuje niezmienniczość modułów wektorów wielkości elektromagnetycznych. Z podanego warunku (4.1.1) wynika, że wektor napięcia fazowego twornika w układzie xy ma moduł równy amplitudzie napięcia fazowego twornika, czyli transformacja jest nieinwariantna. W tym przypadku we wszystkich zależnościach energetycznych, np.(4.1.5)-(4.1.11) i innych powinien występować współczynnik $(3/2)$ zapewniający równowagę mocy po transformacji. W zależnościach (4.1.5)-(4.1.11) współczynnik $(3/2)$ nie występuje, co może sugerować, że zastosowana transformacja jest inwariantna. Ale wtedy nieprawdziwy jest warunek (4.1.1), gdyż transformacja inwariantna nie zachowuje warunku niezmienniczości modułów wektorów przestrzennych.
6. Doktorant stosuje podobną zasadę sterowania mocy czynnej i biernej przekształtnika CV, która jest znana z techniki sterowania mocą prostowników sieciowych PWM jako metoda *VOC (Voltage Oriented Control)* - metoda sterowania z orientacją względem wektora napięcia sieci. W technice sterowania mocą prostowników sieciowych rozwinięto również wiele innych zaawansowanych metod sterowania, jak metoda DPC, metody ruchu ślizgowego, sterowania rozmytego, sieci neuronowych i kombinacji tych metod. Doktorant nie podaje żadnego cytatu literatury z tematyki sterowania prostowników sieciowych. Czy te inne zaawansowane metody sterowania były przez Doktoranta rozważane pod kątem możliwości ich wykorzystania do sterowania w układzie Synchronizera.
7. Uwagi szczegółowe dotyczące układów regulacji z Rys.5.1.1 i Rys.6.1.2:
 - a) Układ z Rys.5.1.1. Dlaczego blok Riesz2 jest nazywany regulatorem – na jego wejście nie jest podawana odchyłka regulacji. Blok T5 o strukturze xy/abc powinien mieć strukturę odwrotną – abc/xy . Czy prawidłowe jest pominięcie tu filtra indukcyjnego po stronie AC przekształtnika CV – w modelu symulacyjnym (rys.5.1.4) taki filtr występuje.

Pien

- b) Układ z Rys.6.1.2. Czy uzasadnione jest stosowanie takiego złożonego układu regulacji w przypadku pracy układu Synchrongenverter na sieć elektroenergetyczną. W tym przypadku zachowywanie odpowiednich bilansów mocy czynnej i mocy biernej między generatorem i przekształtnikiem nie jest konieczne. Generator może pracować bez wytwarzania mocy biernej bez konieczności jej uzupełnienia przez przekształtnik, bo uzupełnienie tej mocy może być zrealizowane przez system sieciowy. Do sieci jest dołączonych wiele urządzeń wytwórczych i odbiorczych. Z tych względów praktycznie nie jest możliwe zapewnienie zadanych przepływów mocy między generatorem i przekształtnikiem układu Synchrongenverter. Stąd bardziej celowe może być zastosowanie oddzielnych i niezależnych od siebie układów sterowania generatora synchronicznego i przekształtnika.
- c) Uwagi do Rys.6.1.2. Blok T5 o strukturze xy/abc powinien mieć strukturę odwrotną – abc/xy. Czy prawidłowe jest pominięcie tu filtra indukcyjnego po stronie AC przekształtnika CV – w modelu symulacyjnym (rys.5.1.4) taki filtr występuje. Nazywanie bloku T2 przekształtnikiem (str.85) jest mylące - jest to blok estymacji mocy elektrycznej generatora GV.
8. Doktorant w wielu miejscach w rozprawie stosuje nieprawidłową terminologię zarówno odnośnie niektórych elementów konstrukcyjnych oraz niektórych wielkości elektromagnetycznych maszyny synchronicznej.
- a) Do podstawowych mechanicznych elementów konstrukcyjnych maszyny synchronicznej należy stojan i wirnik. Natomiast 3-fazowe uzwojenie rozmieszczone przestrzennie w zębках stojana generatora synchronicznego nie powinno być nazywane uzwojeniem stojana lecz uzwojeniem twornika. Doktorant w całej rozprawie używa wyłącznie niepoprawnych terminów: uzwojenie stojana, prądy uzwojeń stojana, napięcia uzwojeń stojana, rezystancja stojana, itp. W terminach tych słowo: stojan powinno być zastąpione przez słowo: twornik.
- b) W równaniach modelu matematycznego maszyny synchronicznej Doktorant stosuje nieprawidłową terminologię określając iloczyn indukcyjności i prądu jako strumień lub strumień magnetyczny, zamiast poprawnego terminu: strumień magnetyczny sprzężony. Strumień magnetyczny i strumień sprzężony są odmiennie definiowane fizykalnie i nie są sobie równoważne.
- c) W wielu przypadkach Doktorant dla generatora synchronicznego zamiast krótkiego sformułowania: moment elektromagnetyczny generatora, stosuje długi termin opisowy: moment hamujący wał maszyny napędowej. Dla maszyny synchronicznej i innych typów maszyn elektrycznych moment elektromagnetyczny podczas pracy generatorowej ma zawsze fizykalnie zwrot przeciwny do zwrotu prędkości kątowej wirnika i wprowadzanie powyższego terminu opisowego jest niepotrzebne. Sformułowanie: moment hamujący, może być mylnie interpretowane jako moment powodujący zmniejszanie prędkości lub zatrzymanie wirnika.
- d) Wprowadzone przez Doktoranta na str.15 definicje reaktancji maszyny synchronicznej w osi podłużnej i w osi poprzecznej są nieprawidłowe. W tych definicjach podano, że wybrana reaktancja jest równa iloczynowi odpowiedniej indukcyjności i synchronicznej prędkości kątowej. Wg prawidłowej definicji reaktancje powinny być zdefiniowane jako iloczyn odpowiedniej indukcyjności i pulsacji prądu płynącego przez tą indukcyjność. Tylko dla maszyny synchronicznej o $p=1$ synchroniczna prędkość kątowa jest równa pulsacji prądu płynącego przez indukcyjność.
9. Uwagi dodatkowe:
- a) We wzorze (4.1.7) błędnie podano symbol obliczania składowej rzeczywistej zamiast właściwego symbolu obliczania składowej urojonej.
- b) Dlaczego w (4.3.12) moc czynna generatora jest wyznaczana jako iloczyn sprawności i mocy pozornej generatora.
- c) Z wzoru (4.3.16) wynika ujemna wartość strat mocy generatora.
- d) Podpis pod rys.5.2.3 jest kopią podpisu z rys.5.2.2 i jest nieprawidłowy. W podpisie do rys. 5.2.3 powinno być podane, że przekształtnik CV dostarcza moc bierną, a pobiera moc czynną.
- e) Na rys.5.2.4 wprowadzono ograniczenie mocy biernej przekształtnika CV. Czy podobne ograniczenie mocy biernej nie powinno być wprowadzone również dla generatora GV.

- f) Na str.61 podano: „...zmianę położenia δ_{GV} zgodnie ze wzorem (2.2.1).” - We wzorze (2.2.1) nie występuje δ_{GV} .
- g) Na wykresach wektorowych w rozdz.5 wektor u_{GV} jest wektorem napięcia fazowego twornika generatora. Ponieważ znamionowe napięcie fazowe twornika generatora GV wynosi 230 V, to amplituda lub moduł wektora $|u_{GV}|=325$ V. Takie wartości amplitud napięcia u_{GVa} występują na rys.5.3.2 i rys.5.3.3. Natomiast na rys.5.3.1 i rys.5.3.6 podano, że $|u_{GV}|\approx 600$ V.
- h) Na rys.5.3.1, 5.3.6 i 5.4.1 błędnie podano oznaczenia jednostki prędkości kątowej w obr/min. Przebiegi te nie dotyczą jednak prędkości kątowej, ale prędkości obrotowej. Z przebiegów podanych na rys. 5.3.1, 5.3.6 i 5.4.1 wynika, że otrzymana z badań symulacyjnych prędkość obrotowa wirnika generatora synchronicznego wynosi 1000 obr/min. natomiast z danych znamionowych generatora wynika, że prędkość znamionowa generatora wynosi 1500 obr/min. Z przedstawionych badań symulacyjnych wynika, że generator generuje przebiegi napięć i prądów o częstotliwości równej 50 Hz, czyli powinien pracować przy prędkości znamionowej wirnika równej 1500 obr/min., a nie 1000 obr/min..
- i) Zastrzeżenia budzą przebiegi z rys.5.3.6b dotyczące rozruchu silnika indukcyjnego. W załączniku A.1.5 nie podano typowych danych katalogowych silnika indukcyjnego: typu silnika, prądu rozruchowego, momentu rozruchowego i przeciążalności momentem silnika. Można przyjąć, że jest to silnik indukcyjny klatkowy o typowym momencie rozruchowym zawartym w przedziale 1÷2 momentu znamionowego silnika. Natomiast z badań symulacyjnych przedstawionych na rys.5.3.6b wynika, że moment rozruchowy silnika indukcyjnego wynosi kilkanaście procent momentu znamionowego silnika. Określając na podstawie symulacyjnych przebiegów chwilowych przybliżoną wartość przyspieszenia kątowego wirnika silnika indukcyjnego i uwzględniając katalogowy moment bezwładności wirnika silnika można wyliczyć, że podczas rozruchu moment rozruchowy silnika indukcyjnego powinien być na poziomie co najmniej momentu znamionowego tego silnika.
- j) Załącznik A.1.1 przedstawia parametry i dane znamionowe generatora synchronicznego wykorzystywanego w analizach i badaniach symulacyjnych. Mimo, że jest to generator produkowany fabrycznie, to nie podano typu generatora (prawdopodobnie HCI 534D/544D), nie podano wartości znamionowych napięcia i prądu twornika. Wątpliwości recenzenta budzą wartości parametrów elektromagnetycznych tego generatora. Podana rezystancja uzwojenia wzbudzenia $R_f=1.3$ m Ω , a prąd znamionowy wzbudzenia $I_fN=135$ A. Przy tych danych znamionowe napięcie wzbudzenia miałyby nierealną technicznie bardzo małą wartość równą: $U_fN=R_f I_fN=0.175$ V. Podobne wątpliwości budzą małe wartości indukcyjności wybranych uzwojeń generatora podawane w μ H. Doktorant stosuje również niewłaściwe sformułowanie: Ilość par biegunów, zamiast: Liczba par biegunów.
- k) W załączniku A.1.3 niepotrzebnie dwukrotnie podano wartość parametru L_{cv} .
- l) Załącznik A.1.5 przedstawia parametry i dane znamionowe silnika indukcyjnego wykorzystywanego w badaniach symulacyjnych. Nie podano typu silnika, wartości znamionowych napięcia i prądu stojana, momentu i prądu rozruchowego, przeciążalności momentem. Jest to przypuszczalnie silnik indukcyjny klatkowy, ale nie podano, czy parametry wirnika są rzeczywiste, czy przeliczone na stronę stojana. Rezystancja wirnika jest nazywana niepoprawnie rezystancją twornika, a liczba par biegunów ilością par biegunów. Podana liczba par biegunów silnika jest niepoprawna, ponieważ wyznacza niewłaściwą wartość prędkości synchronicznej tego silnika. Wątpliwości recenzenta budzi stosunkowo duża wartość podanego momentu bezwładności wirnika silnika.
- m) Literatura. Doktorant stosuje niejednolity sposób opisu danych bibliograficznych dla poszczególnych pozycji literatury. Dla pozycji [C3] zamieniono kolejność autorów, dla pozycji [L4] nie podano autora lecz skład komitetu serii wydawniczej, dla pozycji [M3] i [P4] trudne do określenia jest miejsce publikacji. Pozycje wykazu literatury: [1], [C1], [I1] i [X1] nie są cytowane w treści rozprawy. Na str.44 jest powołanie na literaturę [K11], ale [K11] nie występuje w wykazie literatury.
10. Uwagi dodatkowe dotyczące terminologii:
- a) W rozprawie stosowanych jest wiele niepoprawnych sformułowań:

„Uzwojenia trójfazowego stojana można zastąpić dwufazowym układem współrzędnych wirujących ...” - (str.12);
„wektor składowej prądu generatora,, , zamiast „składowa wektora prądu generatora” – (np.str.18);
„kąt napięcia indukowanego względem napięcia wyjściowego” - (str.19);
„wyznaczenie wartości paliwa” – (str.20);
„kąt położenia wirnika względem napięcia sieci” - (str. 22);
„prądy w osi x generatora synchronicznego”, zamiast „składowe x wektora prądu generatora synchronicznego” - (str.25);
„moc czynna pobierana jest równa momentowi napędowemu.” - (str.25);
„oś x jest zgodna z napięciem wyjściowym” - (str.32);
„straty przekształtnika będą równe różnicy sprawności generatora ...” – (str.43);
„dostarczanie długotrwałej mocy czynnej” - (str.46);
„zapotrzebowanie na energię elektryczną nie jest większe niż znamionowa moc czynna generatora – (str.53);
„moc czynna ... jest sumą prądu czynnego ... i prądu dostarczanego z magazynu energii ...” - (str.54);
„możliwość dostarczenia szybkozmiennych prądów” –(str.89);
„do wyjścia generatora synchronicznego”, „napięcie wyjściowe z generatora” - (w całej rozprawie).

11. Wykaz zauważonych błędów edytorskich zamieszczono w załączniku do niniejszej Recenzji.

V. WNIOSKI KOŃCOWE

Rozprawa przedstawia w dużym stopniu oryginalne wyniki przeprowadzonych analiz teoretycznych oraz wykonanych badań symulacyjnych dotyczących zintegrowanego, przekształtnikowego układu wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym, nazywanego Synchrongenverterem

Treść rozprawy jest zgodna z tytułem rozprawy, a otrzymane wyniki potwierdzają realizację przyjętego celu pracy. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają wartości naukowej prezentowanej rozprawy.

Rozprawa stanowi rozwiązanie ważnego problemu naukowego. Autor wykazał się dobrą umiejętnością i zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz znajomością współczesnych i nowoczesnych metod i technik badań symulacyjnych.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Szulawskiego, pt.: **Zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym** spełnia wymagania obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Krzysztof Pieńkowski

Załącznik do RECENZJI
 rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Szulawskiego
 pt.: **Zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej**
z generatorem synchronicznym

Wykaz zauważonych błędów edytorskich

Gdzie	Jest	Powinno być lub uwaga
Str.5, L.3	powiększenia generowanej mocy	zwiększenia generowanej mocy
Str.9, L.1-3	Zdanie niegramatyczne	Podmiot w liczbie pojedynczej, a orzeczenie w drugiej części zdania jest w liczbie mnogiej.
Str.9, L.9	moczy czynnej	mocy czynnej
Str.9, L.18	Generatory synchroniczne używane są ...	Słowo: używane tu raczej nieodpowiednie
Str.9, L.20	za wysokiego	zbyt wysokiego
Str.9, L.20-21	za niskiego	zbyt niskiego
Str.10, L.3	Rozwój generatora synchronicznego ...	Rozwój generatorów synchronicznych ...
Str.10, L.12-18	Zdanie niegramatyczne i złożone z około 60 wyrazów.	Zastąpić przez kilka krótszych zdań.
Str.11, L.11	wyliczenia	obliczenia
Str.11, L.19-20	Zdanie niezakończony	
Str.12, L. 8	trójfazowego stojana	trójfazowego uzwojenia twornika
Str.17, (2.1.20)	L_F	L_f
Str.25, L.10	generowanie jednej wartości mocy	generowanie takiej samej wartości mocy
Str.26, L.1	pracując autonomizmie	pracując autonomicznie
Str.28	$i_{u1} > i_{u2}$	$i_{u2} > i_{u1}$
Str.30, L.10	obwodu DC	obwodu DC
Str.30, L.12	powiększenie dostępnej mocy	zwiększenie dostępnej mocy
Str.32, L.1	nie w odpowiada	nie odpowiada
Str.35, L.2	Moc czynną dostarczaną przez przekształtnik ...	Moc czynną znamionową dostarczaną przez przekształtnik ...
Str.35, L.6 od dołu	... moc bierna wyrażona jest znamionowa moc bierna wyrażona jest ...
Str.36, L.2 od dołu	przy zatasowaniu	przy zastosowaniu
Str.39, L.1	Synchrogen vertera składa się	Synchrogenverter składa się
Str.42	Nieprawidłowy wzór (4.3.12)	
Str.46, L.8	Rifv	Rif
Str.49, L.12	$i_{GV}=0$	$i_{GVV}=0$
Str.50, L.10-11	W zdaniu brak orzeczenia.	
Str.65, L.10 i 11	zmiana	zmiennosc
Str.65, L.18	Regulator modułu napięcia $Rugvx$	Regulator $Rugvx$ składowej x wektora napięcia
Str.69, L.18	zmniejszenie zmiany momentu	zmniejszenie zmienności momentu
Str.75, podpis do Rys.5.5.2	wartości chwilowe	przebiegi chwilowe
Str.87, L.6	prądu stojana	prądu stojana
Str.87, L.20	uzwojenia wzbudzeni	uzwojenia wzbudzenia
Str.87, L.23	niezerową moc bierną $q_{GV}=0$	wartość mocy biernej różną od zera $q_{GV} \neq 0$
Str.87, L.6-7 od dołu	Moc bierna przekształtnika p_{CV}	Moc bierna przekształtnika q_{CV}
Str.89, L.5	dostarcza napięcie	wytwarza napięcie
Str.89, L.17-18	dołączony jest równoległy przekształtnik	przyłączony jest równoległe przekształtnik