

Recenzja pracy doktorskiej
mgra inż. Adama Gozdowiaka
pt. „Anormalne stany pracy turbogeneratorsa w analizie polowo-obwodowej”
wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Ludwika Antala, prof. PWr.

Opinia opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki
Wrocławskiej z dnia 23.06.2017 r.

1. Ocena wyboru tematu i celu pracy

W dzisiejszych czasach trudno jest sobie wyobrazić życie bez energii elektrycznej. Walory tej energii doceniamy dopiero przy jej braku. Współcześnie dominującym źródłem energii elektrycznej są nadal konwencjonalne elektrownie ciepłne. W tych elektrowniach do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje się turbogeneratory, tj. szybkoobrotowe generatory synchroniczne dużej mocy. Niestety maszyny te narażone są na różnego rodzaju uszkodzenia. Są one spowodowane głównie awariami w systemie elektroenergetycznym lub występującymi podczas eksploatacji błędami obsługi. Podczas długoletniej eksploatacji skutki wielu takich zdarzeń kumulują się i objawiają zmęczeniem oraz starzeniem materiałów konstrukcyjnych, co zwiększa podatność generatora na uszkodzenie. Bezawaryjność turbogeneratorów jest warunkiem koniecznym do sprawnego funkcjonowania przemysłu, transportu oraz różnego rodzaju dziedzin działalności ludzkiej. Przestoje turbozespołów spowodowane uszkodzeniami zagrażają utrzymaniu ruchu i pewności zasilania zwłaszcza, gdy w systemie elektroenergetycznym istnieją niewielkie rezerwy zainstalowanych i gotowych do szybkiego włączenia do ruchu bloków energetycznych.

Z powyższych względów w wielu ośrodkach naukowych na świecie i w kraju pracuje się intensywnie nad pogłębioną analizą zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w stanach awaryjnych generatorów. Badanie te mają na celu m.in. wskazanie elementów konstrukcyjnych najbardziej narażonych podczas wystąpienia awarii oraz określenie wielkości fizycznych, które mogą posłużyć do wczesnego wykrywania zagrożeń. W efekcie przez modyfikacje konstrukcji maszyny oraz opracowanie nowych lub modyfikację stosowanych procedur postępowania i metod zabezpieczeń dąży się do ograniczania wpływu stanów awaryjnych na niezawodność generatorów.

Autor pracy dobrze wpasował się w nurt prowadzonych aktualnie w tym zakresie badań. Jako cel pracy przyjął: **„dokładniejsze zbadanie zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych zachodzących we współczesnym turbogeneratorze podczas anormalnych stanów jego pracy”**. Do badania tych zjawisk wykorzystał polowo-obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych. W rozważaniach uwzględnił dynamikę układu. Zastosowanie ujęcia polowo-obwodowego w analizie awarii turbogeneratorów umożliwia m.in. wiarygodniej opisać zjawiska w podatnych na

uszkodzenia, a trudno dostępnych pomiarowo częściach wirnika. Pozwala również na wskazanie elementów konstrukcyjnych najbardziej narażonych podczas wystąpienia awarii oraz na wyselekcjonowanie wielkości fizycznych, które mogą posłużyć do wczesnego wykrycia zagrożenia.

Uważam zatem, że tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona, zarówno z naukowego jak też i z technicznego punktu widzenia.

2. Redakcja i zakres rozprawy

Rozprawa liczy 133 strony i składa się z 8 rozdziałów oraz spisu literatury obejmującego 116 pozycji, w tym 12 współautorskich Doktoranta.

W rozdziale 1 uzasadniono podjętą tematykę badań, sformułowano cel, tezę oraz podano zakres rozprawy.

W rozdziale 2 omówiono badany turbogenerator oraz przedstawiono wykorzystywany do obliczeń model połowo-obwodowy. Model dyskretny rozpatrywanego turbogeneratorsa zbudowano przy wykorzystaniu programu FLUX.

Badania weryfikacyjne opracowanego numerycznego modelu generatora zaprezentowano w rozdziale 3. Polegały one na porównaniu podawanych przez producenta parametrów elektromagnetycznych i charakterystyk generatora z otrzymanymi za pomocą opracowanego modelu maszyny. Uzyskaną dobrą zgodnością porównywanych parametrów i charakterystyk, a w szczególności tych, które opisują zachowanie się maszyny w stanach dynamicznych Doktorant uzasadnił wykorzystanie zbudowanego modelu numerycznego do badania zachowania się turbogeneratorsa w anormalnych stanach pracy.

W rozdziałach od 4 do 7 mgr inż. Adama Gozdowiak przedstawił wyniki badań symulacyjnych wybranych anormalnych stanów pracy generatora współpracującego z systemem elektroenergetycznym. W szczególności rozpatrywał: a) utratę pola wzbudzenia, b) przypadkowe załączenie odstawionego turbogeneratorsa, c) nieprawidłową synchronizację, d) podwójne zwarcie doziemne w uzwojeniu wzbudzenia. Doktorant scharakteryzował te stany pracy i wskazał najczęstsze przyczyny ich powstawania. Szczegółowo i krytycznie przeanalizował uzyskane wyniki badań symulacyjnych oraz wskazał na występujące w tych stanach pracy zagrożenia zarówno dla podzespołów generatora, jak i dla systemu elektroenergetycznego. Badał skuteczność stosowanych wzorców diagnostycznych do detekcji rozpatrywanych anormalnych stanów pracy generatora.

Podsumowanie badań i wnioski końcowe zawarto w rozdziale 8 pracy.

Uważam, że treść i zakres rozprawy są zgodne z jej tytułem. Układ pracy jest logiczny i spójny. Rozprawa napisana jest komunikatywnie, a jej redakcja jest poprawna. Autor w sposób jasny i jednoznaczny precyzuje częściowe cele, tezy i założenia upraszczające. Precyzyjnie i poprawnie formuje wynikające z przeprowadzonych badań wnioski. Niewątpliwie świadczy to o jego dojrzałości naukowej. Dobór literatury wskazuje na to, że doktorant ma duże rozeznanie i na bieżąco śledzi publikacje z dziedziny będącej przedmiotem jego zainteresowań.

Bogaty i trafnie dobrany materiał graficzny przygotowano bardzo starannie, co jeszcze bardziej sprzyja zrozumieniu intencji autora.

3. Ocena wartości naukowej

Mgr inż. Adam Gozdowiak udowodnił słuszność postawionej w rozprawie tezy oraz osiągnął zamierzony cel.

Na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych Doktorant słusznie stwierdził, że klasyczne modele obwodowe maszyny nie zapewniają wystarczającej dokładności. Umożliwiają one wyznaczanie wielkości całkowych i nie są dostosowane do oceny lokalnych obciążeń magnetycznych czy termicznych. Zatem przy ich wykorzystaniu trudno jest wskazać najbardziej narażone na uszkodzenia elementy konstrukcyjne generatora. Z powyższych względów do opisu zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w anormalnych stanach pracy turbogeneratora oraz oceny związanych z nimi zagrożeń wykorzystał On model polowo-obwodowy.

Wykazał się przy tym bardzo dużą wiedzą i pomysłowością zarówno w zakresie opracowania polowo-obwodowego modelu turbogeneratora jak i modelowania zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych. W modelu tym równania opisujące rozkład pola elektromagnetycznego w maszynie powiązane są z równaniami Kirchhoffa obwodów elektrycznych oraz równaniem dynamiki maszyny. Przyjęto, że pole magnetyczne w części elektromagnetycznie czynnej maszyny jest niezmiennie wzdłuż osi wału. Połączenia czołowe odwzorowano poprzez wprowadzenie do równań modelu elementów skupionych o znanej rezystancji oraz indukcyjności. Wartości parametrów skupionych wyznaczono z zależności stosowanych w projektowaniu maszyn elektrycznych. W rozważaniach uwzględniono nieliniowość obwodu magnetycznego, prądy wirowe indukowane w elementach litych oraz w uproszczony sposób system elektroenergetyczny.

Doktorant w celu zweryfikowania wiarygodności opracowanego w programie FLUX numerycznego modelu turbogeneratora porównał parametry i charakterystyki generatora podawane przez producenta z uzyskanymi z obliczeń symulacyjnych.

Uzyskując dobrą zbieżność pomiarów i obliczeń potwierdził, że dwuwymiarowy model polowo-obwodowy turbogeneratora dużej mocy poprawnie odwzorowuje zachowanie się maszyny i zjawiska zachodzące zarówno w stanach ustalonych, jak i przejściowych. Zweryfikowany model numeryczny Doktorant z powodzeniem wykorzystał do analizy wybranych dynamicznych stanów pracy turbogeneratora współpracującego z systemem elektromagnetycznym. Rozpatrzył charakterystyczne dla eksploatacji turbogeneratora anormalne stany pracy takie jak: utrata pola wzbudzenia, przypadkowe załączenie odstawionego generatora, nieprawidłowa synchronizacja i podwójne zwarcie doziemne w uzwojeniu wzbudzenia.

Autor rozprawy przeprowadził wnikliwą i poprawną analizę rezultatów obszernych badań symulacyjnych. Wykazał się przy tym dobrym zrozumieniem przebiegu złożonych zjawisk elektromagnetycznych w stanach dynamicznych generatora. Sformułował wiele wartościowych wniosków szczegółowych i ogólnych dotyczących analizowanych stanów

pracy oraz związanych z nimi zagrożeń dla generatora i dla systemu elektroenergetycznego. Wskazał na możliwość i celowość wykorzystania wartości strumienia stojana, jako kryterium wykrywania stanu utraty pola wzbudzenia.

Rozprawa cechuje się bardzo wysokim poziomem naukowym. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- a) opracowanie dwuwymiarowego, polowo-obwodowego modelu turbogeneratora,
- b) dokonanie zadawalającej weryfikacji modelu obliczeniowego poprzez porównanie charakterystyk statycznych i charakterystycznych parametrów elektromagnetycznych turbogeneratora uzyskanych z pomiarów,
- c) analiza wybranych anormalnych stanów pracy stanowiących największe zagrożenie dla pracy turbogeneratora, takich jak:
 - utrata pola wzbudzenia,
 - przypadkowe załączenie odstawionego turbogeneratora,
 - nieprawidłowa synchronizacja,
 - podwójne zwarcie doziemne w uzwojeniu wzbudzenia,
- d) analiza zjawisk zachodzących w trudno dostępnych pomiarowo strefach wirnika,
- e) wskazanie najbardziej narażonych na uszkodzenia węzłów konstrukcyjnych turbogeneratora,
- f) porównanie klasycznych i proponowanych kryteriów wykrywania zagrożenia dla pracy turbogeneratora podczas utraty pola wzbudzenia,
- g) wskazanie wzorca diagnostycznego do wykrywania podwójnego zwarcia doziemnego w uzwojeniu wzbudzenia.

Osiągnięciem Autora jest również zaadoptowanie profesjonalnego oprogramowania do symulacji pola dla specyficznych wymogów związanych z analizowanym zagadnieniem. Na uwagę zasługuje także bardzo dobrze opanowana przez Doktoranta umiejętność formułowania wniosków na podstawie uzyskanych wyników symulacji.

Recenzowana praca wnosi duży wkład w pogłębienie wiedzy w zakresie analizy nieustalonych stanów pracy turbogeneratora i związanych z nimi narażeń dla maszyny i systemu elektroenergetycznego.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

W trakcie zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęło się mi kilka pytań i uwag o charakterze dyskusyjnym.

1. W opisie modelu polowo-obwodowego podano, że rozkład pola w przekroju poprzecznym maszyny wynika z rozwiązania równania Poisson'a (2.1). Dlaczego w równaniu tym występuje natężenie koercji pola magnetycznego magnesu H_c , skoro w generatorze nie ma magnesów trwałych?
2. Do opisu pola elektromagnetycznego wykorzystuje się różnego rodzaju pomocnicze skalarne i wektorowe potencjały magnetyczne oraz elektryczne.

Dlaczego do opisu pola magnetycznego wybrano ujęcie bazujące na magnetycznym potencjale wektorowym \mathbf{A} i skalarnym potencjale elektrycznym V ?

3. W rozważaniach przyjęto, że w obszarze elektromagnetycznie czynnym maszyny pole magnetyczne jest niezmiennie wzdłuż osi wału. Jak wiadomo z badań i z literatury, w maszynach elektrycznych warunek ten nie jest w pełni spełniony. W rozprawie odczuwa się brak informacji o wpływie tego zjawiska na uzyskiwane wyniki obliczeń.
4. W rozprawie w sposób uproszczony odwzorowano zjawiska elektromagnetyczne w obszarze połączeń czołowych poprzez wprowadzenie do modelu połow-obwodowego ich rezystancji i indukcyjności. Do wyznaczania tych rezystancji i indukcyjności wykorzystano ujęcie klasyczne stosowane w projektowaniu maszyn elektrycznych. Wartości tych elementów skupionych mają wpływ na parametry i zachowanie się generatora. Dlaczego Autor nie wykorzystał do wyznaczania indukcyjności połączeń czołowych bardziej wiarygodnego trójwymiarowego ujęcia polowego?
5. Dlaczego przy obliczaniu zastępczej długości maszyny (zależności 3.1 – 3.5) nie bierze się pod uwagę współczynnika uwzględniającego złożenie rdzenia z blach?
6. Jakie były czasy obliczeń i na jaki sprzęcie komputerowym prowadzono obliczenia? Jaką zastosowano długość kroku czasowego.
7. Jak Autor zapatruje się na wykorzystanie trójwymiarowego modelu zjawisk elektromagnetycznych do analizy anormalnych stanów pracy turbogeneratora?
8. Dla jakiej temperatury podzespołów turbogeneratora wykonywano obliczenia?
9. Kierunki dalszy badań Doktoranta nad turbogeneratorami.

Praca została napisana poprawnym i zrozumiałym stylem. Podkreślam staranność Autora w formułowaniu zdań oraz w doborze materiału ilustracyjnego. W pracy zauważyłem nieliczne uchybienia redakcyjne. Ważniejsze z zauważonych zestawiono poniżej.

- Na stronie 12 jest: „ M – moment elektromagnetyczny w szczelinie”, a powinno być moment elektromagnetyczny w maszynie.
- Na stronie 12 jest: „W rozwiązaniu problemu nieustalonego, w każdym kroku czasowym obliczany jest elektromagnetyczny moment silnika M ”, a powinno być „W rozwiązaniu problemu nieustalonego, w każdym kroku czasowym obliczany jest elektromagnetyczny moment generatora M ”.
- Na stronie 12 jest: „ M_r – moment obciążenia”, a powinno być „ M_r – moment napędowy”.
- W równaniu (2.4) podano konwencję znaków słuszną dla pracy silnikowej, a nie generatorowej.
- Na stronie 121 w akapicie 2 jest: „... analiza dynamiczna wykorzystująca przebieg czasowy momentu, ...”. Wydaje się, że słowo „czasowy” jest tu nadmiarowe.

Powyższe uwagi ogólne i szczegółowe nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę pracy.

6. Wniosek końcowy

W przedłożonej rozprawie mgr inż. Adam Gozdowiak przedstawił oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Realizując cel pracy umiejętnie wykorzystał nowoczesne ujęcie polowo-obwodowe oraz wykazał się dużą wiedzą w zakresie analizy nieustalonych stanów pracy turbogeneratora. Doktorant potrafi samodzielnie i poprawnie rozwiązywać trudne problemy naukowe i logicznie przedstawiać wyniki swoich badań.

Uważam, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz o Stopniach i Tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595) oraz Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. Adama Gozdowiaka do publicznej obrony pracy.

Wojciech Szelağ

