

Dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski
Politechnika Warszawska
Wydział Elektryczny
Zakład Maszyn Elektrycznych

Warszawa 08. 08. 2017

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Gozdowiaka

pt. Anormalne stany pracy turbogeneratorsa w analizie polowo-obwodowej

**Opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej
z dnia 19. 06. 2017 r.**

Promotor: dr hab. inż. Ludwik Antal, prof. PWr
Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Kisielewski

1. Aktualność i oryginalność tematyki oraz cel i teza rozprawy

W recenzowanej rozprawie Doktorant podjął oryginalny i aktualny problem dotyczący analizy anormalnych stanów pracy turbogeneratorsa na podstawie modelu polowo-obwodowego maszyny. Ważność analizowanego problemu wynika z doniosłości obiektu, którym jest turbogenerator o mocy 500 MW, stanowiący jedną z podstawowych jednostek prądowórczych krajowego systemu elektroenergetycznego. Oczywiście uzyskane wyniki mają znaczenie ogólniejsze i mogą być rozszerzone i przystosowane do analizy wskazanych problemów w innych tego typu maszynach. Podjęty kierunek badań jest również znaczący ze względu na aspekt rozpoznania stanów technicznych turbogeneratorsów spowodowanych sytuacjami anormalnymi powodującymi stan niesprawności czy wprost niezdatności maszyny, a więc jest wstępem do badań diagnostycznych na podstawie opracowanego modelu i schematu obliczeniowego.

Przedstawiona w pracy teza w sformułowaniu, której Autor stwierdza możliwość opisania zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w anormalnych stanach pracy turbogeneratorsa i na ich podstawie wskazania skutków niesprawności niektórych elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyny, jest sformułowana prawidłowo i można uznać za udowodnioną, a cel pracy za osiągnięty.

2. Charakterystyka treści rozprawy

Praca doktorska mgra inż. Adama Gozdowiaka pt. „*Anormalne stany pracy turbogeneratorsa w analizie polowo-obwodowej*” liczy 133 strony oraz zawiera wstęp, 6 rozdziałów, podsumowanie i bibliografię obejmującą 116 pozycji.

We wstępie Autor omówił analizowane w pracy zagadnienia oraz sformułował cel, zakres pracy, tezę i metodykę badań.

Wybór obiektu do polowo-obwodowego modelowania jest trafny ze względu na ekstremalne wartości parametrów eksploatacyjnych (P_N , U_N , I_N) tego turbogeneratorsa oraz pewne osobliwości strefy żłobkowo-zębowej i uzwojenia magnesnicy tej jednostki.

W rozdziale drugim zostały określone zasady formułowania modelu matematycznego w reprezentacji polowo-obwodowej turbogeneratorsa na przykładzie analizowanej maszyny (tbg 500 MW). Zamieszczone jednak w tym punkcie fotografie nie są spójne, ponieważ na drugiej fotografii jest generator innej konstrukcji niż *pięćsetka* (i prawdopodobnie z napędem turbiny gazowej).

Rozdział trzeci zatytułowany „Weryfikacja modelu turbogeneratorsa”, dotyczy obliczeń podstawowych charakterystyk statycznych i parametrów obwodowych z nimi związanych. Oraz wyznaczenia funkcji głównych reaktancji; podprzejściowej i przejściowej, charakteryzujących stany nieustalone maszyny.

W rozdziale czwartym Autor analizuje wpływ utraty pola wzbudzającego (wskutek zwarcia lub rozwarcsa uzwojenia wzbudzającego) na stany awaryjne i stan pracy asynchronicznej turbogeneratorsa.

W rozdziale piątym została przedstawiona analiza konsekwencji przypadkowego załączenia odstawionego turbogeneratorsa.

W rozdziale szóstym omówiono nieprawidłowości synchronizacji przy niespełnieniu podstawowych warunków koniecznych synchronizowania turbogeneratorsa z siecią sztywną.

W rozdziale siódmym przedstawiono stany anormalne maszyny w rodzaju: stanu pracy asynchronicznej i niesprawności w obwodzie wzbudzającym magnesnicy.

W podsumowaniu pracy Autor ponownie określił cele i wyniki pracy. Sklasyfikował stopnie zagrożeń maszyny w stanach różnych od warunków pracy nominalnej, a więc w stanach: biegu asynchronicznego, zmniejszenia napięcia twornika czy utraty wzbudzenia. Za kryterium oceny przyjął poziom wartości prądów stojana i prądów zaindukowanych w klinach

żłobków magnesu oraz wartości indukcji magnetycznej w całym ustroju obwodu magnetycznego maszyny.

Bibliografia zawarta w pracy jest dobrana właściwie, choć nazbyt obszerna i zawiera pozycje, które nie są bezpośrednio związane z tematyką rozprawy. Nie wszystkie pozycje zamieszczone w wykazie są cytowane.

3. Charakterystyka wyników i ocena wartości naukowej rozprawy

Opracowany dwuwymiarowy model polowo-obwodowy turbogeneratorsa, na podstawie profesjonalnego programu FLUX firmy CEDRAT, jest efektywnym opisem sformułowanego w pracy celu badań, określonego mianem efektów zjawisk fizycznych powstających w turbogeneratorze wskutek anormalnych stanów eksploatacyjnych zaistniałych w maszynie.

Sformułowane modele i ich rozwiązania dostarczają wielu nowych jakościowych i ilościowych informacji użytecznych w procesie eksploatacji tych maszyn.

Doniosłość energetyczno-ekonomiczna i społeczna maszyny, jako jednej z głównych jednostek prądowców w systemie elektroenergetycznym, uzasadnia tworzenie złożonych modeli i analizowanie różnych sytuacji awaryjnych zaistniałych w eksploatacji tego typu maszyn.

Prawidłowa jest ocena stanu anormalnego turbogeneratorsa na podstawie obliczonych wartości: prądu stojan, prądów zaindukowanych w elementach litych i indukcji magnetycznej w określonych podobszarach ferromagnetycznych wirnika. Uzyskane wyniki mogą być przydatne przy analizie innych efektów fizycznych takich jak oddziaływania - siły elektrodynamiczne, straty mocy i stany cieplne powstające w różnych stanach eksploatacyjnych. BOWIEM głównymi czynnikami zagrożeniowymi w eksploatacji maszyn o mocach granicznych są problemy wytrzymałościowe i przegrzania niektórych elementów konstrukcyjnych.

Opracowanie modelu polowo-obwodowego turbogeneratorsa do badania stanów anormalnych tej maszyny jest niewątpliwie przedsięwzięciem oryginalnym i rzadko spotykanym kierunkiem badań naukowych. Wybór stanów anormalnych w procesie eksploatacji turbogeneratorsa w rodzaju stanu asynchronicznego i zakłóceń w obwodzie wzbudzającym magnesu jest właściwy, a na podstawie uzyskanych wyników Autor dobrze wyjaśnia powstające zagrożenia maszyny. Z przedstawionej w pracy analizy przyczyn i powstających stanów zagrożeniowych; czy wyrażając to w konwencji diagnostycznej, stanów niesprawności albo nawet stanu niezdatności maszyny; można stwierdzić, że podjęte w pracy

badania nadają nowy kierunek badaniom diagnostycznym tych maszyn. Oczywiście wymagać to będzie odpowiedniego oprzyrządowania maszyny, wyboru miejsc instalacji czujników pomiarowych i sformułowania miar diagnostycznych.

Odnosnie do warsztatu obliczeniowego stosowanego przez Doktoranta należy wyróżnić efektywność zastosowanego modelu dyskretnego maszyny, dość uniwersalnego w parametrycznych obliczeniach polowych. W szczególności mającego znaczenie w obliczeniach strumieni magnetycznych przy różnych położeniach osi magnetycznych magneśnicy i pasm fazowych twornika, co w konsekwencji jest podstawą obliczeń reaktancji maszyny.

Problemy sformułowane w rozdziałach 4. i 7. są w pełni trafne w wyborze i właściwie opracowane. Szczególnie ważna jest analiza stanu podwójnego zwarcia doziemnego uzwojenia wzbudzającego. Wyniki uzyskane na podstawie wyznaczonych rozwiązań, co zaznaczyłem uprzednio, są oryginalne i mogą być uogólnione na inne konstrukcje turbogeneratorów oraz, co warte jest podkreślenia, można rozszerzyć na przypadki innych stanów anormalnych tych maszyn.

Trafna jest uwaga Autora, że metoda zabezpieczenia maszyny, w sytuacjach pewnych anormalności, ujawniona na podstawie wielkości polowych - strumieni skojarzonych, może być czulsza sygnałowo i skuteczniejsza w szybkości reakcji zabezpieczeń, niż metoda śledzenia impedancji lub kąta obciążenia maszyny.

Bardzo ciekawe są wyniki obliczeń polowych ujawniające obrazy lokalnie zamkniętych linii sił pola magnetycznego, w centralnym obszarze (w wale) odkuwki magneśnicy, powstających w sytuacji określonego zwarcia. Sugerowałbym silniejsze zaakcentowanie tego wyniku. Trzeba również podkreślić, że Doktorant umiejętnie zastosował metody modelowania i symulacji komputerowej złożonych zjawisk fizycznych, rozszerzając obliczenia na wyznaczenie spektrum harmonicznego czasowych w stanach anormalnych.

W ocenie końcowej należy podkreślić dobrą stronę redakcyjną pracy. Język pracy jest poprawny, następstwo wywodów prawidłowe. Dobrze należy ocenić poziom edytorski rozprawy pod względem opracowanych i przedstawionych wyników uzyskanych z badań symulacyjnych i obliczeniowych.

4. Uwagi krytyczne o rozprawie

We współczesnych pracach promocyjnych obserwuje się stosowanie profesjonalnego oprogramowania do rozwiązania postawionego zadania, natomiast w mniejszym stopniu

przycacza się matematyczne modele – równania, stanowiące podstawę rozpatrywanych zagadnień. W pracy zamieszczony są trzy wzory (2.1 – 2.3), które dotyczą równania na potencjał wektorowy, jako wielkości bazowej w rozwiązaniach zagadnień elektrodynamiki technicznej. Ponieważ brak jest rozwinięcia tych zależności, to niejasne jest zamieszczenie we wzorze (2.1) wielkości H_c , która reprezentuje namagnesowanie cechujące magnes trwały, który raczej nie stanowi elementu konstrukcyjnego turbogeneratora.

Szkoda, że na schematach przedstawionych na rys. 2.4. i 2.6. (bardzo ważnych w tworzeniu modelu obwodowego maszyny), nie zamieszczono oznaczeń elementów. A szczególnie interesujące byłyby wartości fizyczne tych elementów.

Ponieważ zaprezentowane podejście do problemu obejmuje model polowy i obwodowy, tak więc podobnie do równań (2.1 -2.3) należało przytoczyć odpowiednie równania obwodowe opisujące stany eksploatacyjne turbogeneratora w sytuacjach anormalnych.

Dyskusje przedstawione w rozdziałach 5. i 6. recenzent uważa za zbyt czyste. Bowiem przypadkowe załączenie odstawionego turbogeneratora należy uznać za niedopuszczalne. Spowodowanie takiego załączenia jest karygodne i wskazałoby na niekompetencje służb eksploatacyjnych elektrowni.

Omówione w rozdziale 6. nieprawidłowości synchronizacji, polegające na niespełnieniu podstawowych warunków koniecznych do synchronizowania turbogeneratora z siecią sztywną, są słuszne, jako pryncypia wykładu z maszyn elektrycznych w zakresie tematu prądnic synchronicznych. Natomiast jest to problem odrębny od podjętego w pracy. A również, jak w przypadkach sytuacji przedstawionych w rozdziale 5. podjęcie synchronizacji przy niezgodności połączeń lub znacznej niezgodności położenia gwiazd napięcia sieci i generatora ($\varphi=180^0$) uważam za niedopuszczalne. Tak więc przedstawione sytuacje eksploatacyjne turbogeneratora w przypadkach opisanych w rozdziałach 5. i 6. uważam za zbyt czyste i nie zaliczyłbym ich do stanów anormalnych, lecz katastrofalnych i zdecydowanie niedopuszczalnych. Należy jednak nadmienić, że na poziomie dyskusji akademickiej przedstawiona analiza tych zagadnień jest interesująca.

Niestosowne są niektóre określenia użyte przez Autora, a odbiegające od nazw konwencjonalnych; np. Z nie jest impedancją bazową, lecz znamionową maszyny, l nie jest *długością obiektu*, lecz długością beczki wirnika lub żelaza twornika?

Należy również unikać stwierdzeń werbalnych w rodzaju np. „całkowite straty mocy w wirniku, ...” str. 43, ponieważ wielkości te nie były obliczane. Uwaga ta dotyczy również stwierdzeń odnoszących się do efektów cieplnych czy naprężeniowych występujących w maszynie.

Na tym poziomie prac należy również unikać stwierdzeń oczywistych, w stylu – „załączenie tbg powoduje zaindukowanie się prądów w prętach obwodów tłumiących (temu one służą). Wzory (3.3, 3.4) wymagają wyjaśnienia, ponieważ nie są powszechnie znane.

Definicje reaktancji przejściowych i podprzejściowych sformułowane w pracy są zbyt powierzchowne. Należało dla jednego przykładu wielkości $X''_{(d,q)}$ lub $X'_{(dq)}$ przytoczyć ich ścisłą definicję.

Rysunki *barwne* ilustrujące rozkład ilościowy indukcji i gęstości prądów indukowanych, pomimo diagramu skali kolorów, powinny być dodatkowo zinterpretowane i opisane przez wyrażenia *explicite* liczbowe.

Do mniej istotnych uwag zliczam brak wyjaśnienia przebiegów: prędkości i momentu obciążenia (4.3, 4.4, 4.5), w szczególności odnośnie do pojawiających się punktów znikania pochodnej (ostrzy) tych wielkości. Przebiegi prędkości obrotowej zilustrowane na rys. 4.17, 4.31 można było ograniczyć do chwili 28 s, ponieważ powyżej 1.15 n_N , zadziałają tzw. *wytraski*, czyli nastąpi wysprzęgnięcie turbozespołu.

Inne drobne uwagi oznaczyłem w maszynopisie pracy.

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że Autor wykazał się dobrym poziomem wiedzy teoretycznej z dziedziny maszyn elektrycznych oraz znajomością współczesnych problemów turbogeneratorowych. Przedstawiona w pracy analiza anormalnych stanów pracy turbogeneratorsa i uzyskane wyniki, pomimo wskazanych usterek i mankamentów, pozwalają stwierdzić, że Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej elektrotechnika. Podjęte zadanie zostało rozwiązane w sposób oryginalny, co dowodzi Jego umiejętności do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Przedłożona do obrony praca doktorska nie wymaga poprawek i uzupełnień, lecz postawione w recenzji kwestie powinny być podjęte na obronie. Opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. Ustaw nr 65 poz. 5.9.5) „o stopniach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie nauki i sztuki”.

Stwierdzam, że Autor spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora nauk technicznych. W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie pracy, jako doktorskiej i dopuszczenie jej Autora mgra inż. **Adama Gozdowiaka** do publicznej obrony.

Michał Jędrzejewski