

doi:10.15199/48.2015.10.06

Pole elektromagnetyczne i straty mocy czynnej w strefie skrajnej turbogeneratora

Streszczenie. Niniejszy artykuł przedstawia wyniki obliczeń i analizy rozkładów pola elektromagnetycznego w strefie skrajnej turbogeneratora dużej mocy. W ich wyniku uzyskano informację o miejscach szczególnie narażonych na działanie składowej osiowej pola rozproszenia wnikażącej do rdzenia stojana. Przeprowadzono również obliczenia strat indukowanych w metalowych elementach konstrukcji prasującej rdzenia. Badania przeprowadzono na drodze symulacji komputerowej przy zastosowaniu metody elementów skończonych na nieliniowym modelu trójwymiarowym.

Abstract. This paper presents results of calculations and analysis of electromagnetic fields in end region of high power turbogenerator. As a result, information about elements of stator core especially endangered by high axial flux was gained. In addition, calculations of eddy current losses induced in conductive elements of stator core pressing construction were performed. Presented calculations were performed with usage of finite element method on 3D nonlinear model. (**Electromagnetic fields and losses in end region of turbogenerator**).

Słowa kluczowe: turbogenerator, strefa skrajna, MES

Keywords: turbogenerator, end-region, FEM

Wstęp

Energia elektryczna stanowi aktualnie jedno z podstawowych mediów energetycznych. Jej obecność w nowoczesnym świecie wydaje się być sprawą oczywistą i można by rzec, zupełnie naturalną. Z tego względu proces jej wytwarzania i dystrybucji nie wydają się być sprawą szczególnie trudną, zważywszy na to, że człowiek ma z nim do czynienia już od ponad stu lat. Co prawda w tym czasie nie zmieniły się fundamentalne prawa fizyki, których zastosowanie pozwala na wytworzenie energii elektrycznej, ale pojawienie się nowych materiałów oraz metod inżynierskich przyczynia się do ciągłego rozwoju w tej dziedzinie.

Większość, bo prawie dwie trzecie, dzisiaj produkowanej energii elektrycznej wytwarzana jest z paliw kopalnych [1]. Ten stan rzeczy nie uległ większej zmianie na przestrzeni ostatnich 40 lat i można przypuszczać, że utrzyma się w najbliższej przyszłości. Produkcja energii elektrycznej z paliw kopalnych wiąże się z koniecznością ich spalania, a w dalszym etapie, z napędzeniem generatora. W rozwiązaniu najbardziej typowym, spalane paliwo pozwala na napędzenie turbiny która z kolei stanowi źródło napędu dla generatora który najczęściej jest szybkoobrotową maszyną synchroniczną, czyli turbogeneratorem.

Zagadnienia strefy skrajnej turbogeneratora

Turbogeneratory w swej konstrukcji nie różnią się zasadniczo od klasycznych maszyn synchronicznych dla których metodologia obliczeń projektowych jest doskonale znana. Istotną różnicą, która wprowadza konieczność indywidualnego podejścia do ich obliczeń, jest duży stopień wyzyskania maszyny który jest efektem uwarunkowań technicznych oraz ekonomicznych. W turbogeneratorach szczególnego znaczenia nabierają zjawiska często pomijane lub znacząco upraszczane w trakcie obliczeń klasycznych maszyn małej mocy. Do grupy takich zagadnień należy problematyka strefy skrajnej turbogeneratora. Pod pojęciem strefy skrajnej rozumiemy obszary znajdujące się poza lub na skraju części aktywnej maszyny czyli odpowiedzialnej za proces przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną zachodzący w turbogeneratorze. W strefie skrajnej znajdują się połączenia czołowe fragmentów, elementy konstrukcji mechanicznej jak również fragment obwodu magnetycznego.

Jednym ze zjawisk fizycznych zachodzących w strefie skrajnej jest indukowanie strat mocy czynnej. Straty te, klasyfikowane jako straty dodatkowe, wynikają z obecności zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego, które zgodnie z prawem Faradaya wywołuje przepływ prądu.

Prądy wirowe indukowane są praktycznie we wszystkich przewodzących elementach znajdujących się w strefie skrajnej czego efektem jest wydzielanie się strat mocy czynnej oraz wzrost temperatury elementów. Intensywność omawianych zjawisk zależy od wielu czynników, min. mocy wydawanej przez generator [2]. Przegrzanie elementów znajdujących się w strefie skrajnej może prowadzić do degradacji materiałów [3] oraz awarii. Z tego względu dopuszczalne nagrzewanie elementów w strefie skrajnej stanowi jedno z głównych ograniczeń mocy wydawanej przez generator a samą strefę skrajną zalicza się do miejsc występowania najwyższych temperatur w turbogeneratorze [4][5].

Możliwości obliczeniowe

Rozwiązanie problemu nagrzewania elementów w strefie skrajnej należy do grupy zagadnień nastroczających wiele trudności natury obliczeniowej. Wynika to ze złożoności geometrii strefy skrajnej, skomplikowanego charakteru pola elektromagnetycznego w tym obszarze oraz nieliniowych własności zastosowanych materiałów. Z wyżej wymienionych względów analiza problemu ma często charakter jakościowy. Przebiega ona w oparciu o doświadczenia wynikające z eksploatacji maszyny i poparta jest wynikami przybliżonych obliczeń. Ten sposób prowadzenia badań przynosi oczekiwane rezultaty ale wymaga zgromadzenia wiedzy dotyczącej skutków określonych zabiegów konstrukcyjnych co wymaga czasu. Podejście takie traci na wartości w przypadku konieczności analizy zagadnienia dla maszyny nietypowej lub odmiennej konstrukcyjnie. Istnieje zatem konieczność indywidualnego podejścia do problemu tak, aby możliwe było określenie zagrożeń w strefie skrajnej już na etapie projektu.

Obliczenia strat mocy czynnej w strefie skrajnej można przeprowadzić w oparciu o zależności przybliżone których postać analityczna ma podłoże teoretyczne oraz empiryczne. Ich stosowanie wymaga znajomości parametrów maszyny oraz wartości składowych pola elektromagnetycznego w badanym obszarze [5][6][7]. Dane maszyny są zwykle doskonale znane dla wytwórcy jednak dokładne określenie rozkładu pola elektromagnetycznego nie jest sprawą prostą. Wymagane do obliczeń wartości składowych wektorów indukcji oraz natężenia pola można uzyskać na drodze obliczeń. Analityczne podejście do zagadnienia skutkuje stworzeniem matematycznego modelu pozwalającego na określenie wpływu zmian głównych wymiarów na pole, a w dalszym etapie, na straty indukowane w wybranych elementach strefie skrajnej. Jest to więc metoda użyteczna na etapie projektowym lecz cechuje się ona

ograniczoną dokładnością na którą wpływ ma między innymi doświadczenie konstruktora maszyny. Dokładność zastosowanego modelu może i powinna być obiektem walidacji na podstawie pomiarów pola wykonanych po uruchomieniu maszyny [8]. Istotną wadą metod analitycznych obliczania strat w strefie skrajnej jest brak możliwości precyzyjnego określenia miejsc, gdzie straty kumulują się. Metody te w głównej mierze dostarczają informacji co do wymiernej wartości strat mocy czynnej co jest przydatne na etapie określania sprawności maszyny. Określenie miejsc szczególnie narażonych na przegrzanie z powodu kumulacji strat należy w tym przypadku do konstruktora.

Istotnym krokiem w dziedzinie obliczeń maszyn elektrycznych było opracowanie oraz wprowadzenie do użycia metod numerycznych takich jak metoda elementów skończonych (MES). Zastosowanie MES niesie ze sobą wiele udogodnień wśród których można wymienić możliwość relatywnie łatwego definiowania problemu obliczeniowego czy wprowadzenia do obliczeń materiałów konstrukcyjnych o parametrach nieliniowych. Wymienione aspekty są szczególnie istotne w przypadku obliczeń strefy skrajnej maszyny elektrycznej w której mamy do czynienia z dużą liczbą elementów o często skomplikowanych kształtach i nieliniowych charakterystykach magnesowania.

Przeprowadzenie poprawnej symulacji MES jest procesem który wymaga metodycznego podejścia. Na proces ten składa się przygotowanie modelu badanego obszaru, przyjęcie parametrów materiałowych oraz wymuszeń jak również zadanie parametrów analizy MES. Wynikiem symulacji są rozkłady pól które można interpretować graficznie albo numerycznie, a ich postać pozwala na precyzyjną analizę zjawisk zachodzących w strefie skrajnej. Wyniki te mogą również posłużyć jako dane wejściowe do dalszych analiz, np. termicznych, prowadzonych w sprężonych modułach MES. Zastosowanie metody MES pozwala na precyzyjną lokalizację miejsc przegrzań, obliczenie całkowitych strat mocy w badanym obszarze oraz sprawdzenie wpływu wybranych zmian konstrukcyjnych na ich występowanie. Dzięki temu możliwa jest optymalizacja konstrukcji. Należy przy tym jednak pamiętać, że przedstawiana metoda z trudem znajduje zastosowanie do obliczeń projektowych. Wynika to głównie z jej czasochłonności – oczekiwanie na wyniki nierazkto wynosi wiele dni. Ograniczenie to można próbować zminimalizować poprzez uproszczenie i redukcję modelu, odpowiednią modyfikację wymuszeń bądź prowadzenie symulacji etapowo.

Przykład obliczeniowy

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykład obliczeniowy zrealizowany w celu określenia rozkładu pola elektromagnetycznego oraz strat mocy czynnej w strefie skrajnej. Obliczenia przeprowadzono dla turbogeneratora TWW-560 którego podstawowe parametry znamionowe zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe turbogeneratora TWW-560

Moc pozorna	658,8 MVA
Moc czynna	560 MW
Współczynnik mocy	0,85 (ind.)
Napięcie stojana	20 kV
Prąd stojana	19,02 kA
Częstotliwość	50 Hz
Prędkość obrotowa	3000 obr/min
Prąd wzbudzenia	3,42 kA

TWW-560 jest maszyną synchroniczną dużej mocy napędzaną z szybkobieżnej turbiny parowej. W żłobkach odkuwki wirnika zlokalizowane jest dwubiegunowe uzwojenie wzbudzenia natomiast w żłobkach uzwojenia stojana umieszczone jest trójfazowe, dwuwarstwowe

uzwojenie. Pakietowany z wykrojów blachy elektrotechnicznej rdzeń stojana jest prasowany za pomocą układu palców dociskowych i płyt prasujących. Turbogenerator posiada bezpośredni wodno - wodorowy układ chłodzenia. Chemicznie czysta woda przepływa w kanałach wydrążonych w prętach uzwojenia stojana natomiast wodór pod ciśnieniem omywa uzwojenie wzbudzenia oraz przepływa przez promieniowe kanały w rdzeniu stojana.

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu MES. Przygotowany na bazie dokumentacji model 3D można umyślnie podzielić na dwie części: żłobkową oraz czołową. Część żłobkowa maszyny została skrócona do długości 0,5 m co pozwoliło na obserwację zjawisk strefy skrajnej rdzenia a jednocześnie na ograniczenie objętości rdzenia w której nie występują zjawiska istotne z punktu widzenia prowadzonych badań. Na część żłobkową stojana składał się rdzeń oraz cewki uzwojenia. W modelu rdzenia uwzględniono obecność promieniowych kanałów wentylacyjnych natomiast cewki uzwojenia stojana miały postać prostopadłościanów o zewnętrznych gabarycie między każdej z warstw uzwojenia. Tym samym pominięto wszystkie zjawiska, poza przewodzeniem prądu, zachodzące w rzeczywistym uzwojeniu turbogeneratorskiego. Głównym elementem wirnika maszyny jest jego odkuwka. W jej części żłobkowej, zwanej beczką, wyfrezowane są żłobki pokrywające dwie trzecie obwodu. W nich umiejscowione jest uzwojenie wzbudzenia które zamodelowano podobnie jak uzwojenie stojana – w formie brył trapezoidalnych o gabarytach całkowitych miedzi w żłobku. W części czołowej modelu mieszczą się połączenia czołowe uzwojeń oraz elementy konstrukcji nośnej takie jak palce dociskowe i płyta prasująca rdzeń stojana pominięto natomiast podzespoły nie mające wpływu na rozkład pola elektromagnetycznego. Wśród nich należy wymienić wykonany z niemagnetycznej stali kołpak wirnika, kliny zamykające żłobki stojana i wirnika oraz konstrukcję nośną korony uzwojenia stojana. W modelu nie uwzględniono również korpusu maszyny, elementów układu hermetyzacji takich jak pokrywy oraz wentylatorów i kierownic wodoru. Pominięcie tych elementów może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki lecz podjęto decyzję o ich tymczasowym wyłączeniu z modelu. Ich wpływ na wyniki będzie przedmiotem osobnych badań. W ten sposób udało się ograniczyć wymagany nakład obliczeniowy co pozwoliło na ich przeprowadzenie w akceptowalnym czasie.

Tabela 2. Parametry materiałów przyjętych do symulacji

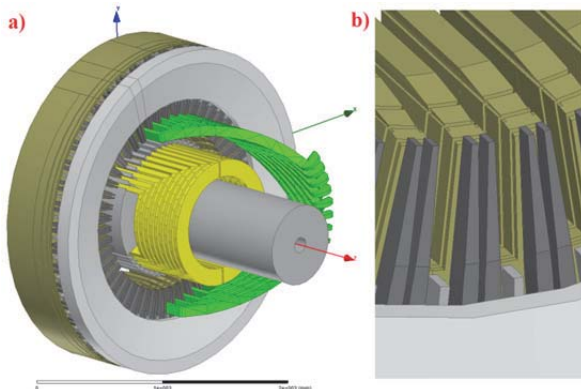
Element	Materiał	Konduktywność, MS/m	Przenikalność magnetyczna
Uzwojenia	Miedź	58	0.999991
Rdzeń stojana	Blacha elektrotechniczna	0	$B_1 = f(H)$
Odkuwka wirnika	Stal wysokojakościowa	0	$B_2 = f(H)$
Płyta dociskowa	Aluminium	38	1.000021
Palce dociskowe	Aluminium Stal stopowa	38 1,1	1.000021 1
Wolne przestrzenie	Próżnia	0	1

Kolejnym etapem procesu obliczeniowego było przyjęcie parametrów materiałowych dla zamodelowanych elementów. Dokonano tego w oparciu o dokumentację techniczną tak aby odwzorować obiekt rzeczywisty. Dwa podstawowe parametry materiałów charakteryzujące ich właściwości w przedstawianych obliczeniach to jego konduktywność oraz przenikalność magnetyczna. W tabeli 2 zestawiono parametry materiałów użytych podczas symu-

lacji. Do niniejszego zestawienia należy dodać, iż rdzeń stojana jest pakietowany co wiąże się z wprowadzeniem współczynnika wypełnienia pakietu równego 0,96 natomiast pozostałe materiały mają strukturę jednorodną.

Specyficzne podejście do problemu w omawianym przypadku zaowocowało stworzeniem modelu który pozwala na dość dobre odwzorowanie zjawisk w strefie skrajnej natomiast praktycznie pomija podstawowy proces przetwarzania energii w turbogeneratorze. Z tego względu niemożliwe staje się przyjęcie klasycznych warunków wymuszeń przez które rozumiemy napędzenie wirnika maszyny, wzbudzenie pola oraz przyłączenia odbiornika do uzwojenia stojana. Do obliczeń przyjęto wymuszenia pod postacią sinusoidalnego prądu stojana oraz prądu stałego przepływającego w uzwojeniu wzbudzenia. Jednocześnie wymuszono ruch obrotowy wirnika w kierunku wirowania pola stojana z prędkością znamionową i zachowano przy tym odpowiedni kąt obciążenia turbogeneratora. Parametry wymuszeń, takie jak wartość prądu czy kąta obciążenia, zostały uprzednio obliczone na modelu analitycznym dla wybranego stanu obciążenia maszyny. Przygotowano w ten sposób symulację stabilnego i symetrycznego stanu obciążenia turbogeneratora.

Na rysunku 1 przedstawiono widoki przygotowanego modelu obliczeniowego. Jak już wspomniano, składa się nań fragment rdzenia stojana, uzwojenie stojana (na rysunku 1-a widoczna jest jedna grupa zwojów), konstrukcja wsporcza rdzenia oraz odkuwka wirnika wraz z uzwojeniem wzbudzenia. W modelu odwzorowane zostały promieniowe kanały wentylacyjne oraz skos rdzenia w jego krańcowej części co jest widoczne na rysunku 1-b. celu uproszczenia modelu pominięto natomiast niektóre szczegóły konstrukcyjne.



Rys.1. Widok ogólny modelu (a) oraz budowa strefy wyjścia ze żłobka (b)

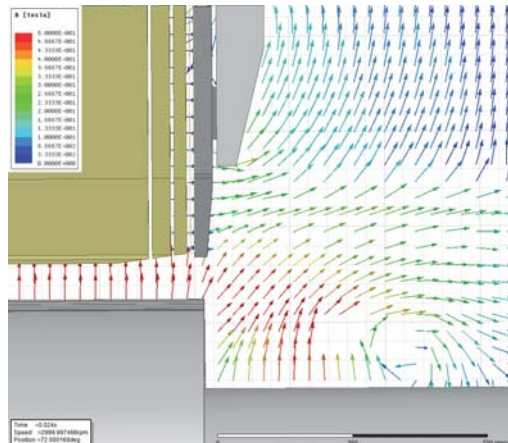
Do obliczeń zastosowano odpowiednio przygotowaną siatkę elementów skończonych. Siatka ta została silnie zagęszczona w wybranych obszarach modelu co pozwoliło na uzyskanie dokładnych wyników przy jednoczesnym ograniczeniu czasu wymaganego na przeprowadzenie symulacji.

Wyniki oraz ich interpretacja

Wynikiem przeprowadzonej symulacji są rozkłady pól dla wybranych chwil czasowych. Na ich podstawie możliwe jest określenie całkowitych strat mocy czynnej (za okres) w wybranych elementach konstrukcyjnych jak również ich rozkładu w przestrzeni.

Przyczyną indukowania strat mocy czynnej jest występujące w maszynie zmienne pole elektromagnetyczne. Pole to jest polem wypadkowym, składającym się z pola od uzwojenia wzbudzenia jak i stojana a jego charakter jest zależny od warunków obciążenia maszyny. Badany turbogenerator jest maszyną o strumieniu

promieniowym to znaczy, że roboczy strumień pola zamyka się w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika a na magnetowód składają się: beczka wirnika, szczelina główna i rdzeń stojana. Rozptyw strumienia pola elektromagnetycznego komplikuje się znacząco w strefie krańcowej maszyny. W tym obszarze strumień pola zamyka się w środowisku o ograniczonej przenikalności magnetycznej. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład pola na płaszczyźnie wzdłuż osi maszyny w wybranej chwili czasowej.



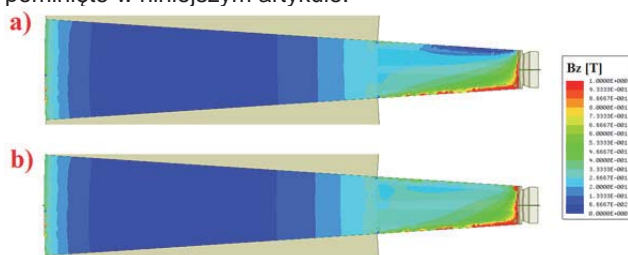
Rys.2. Rozptyw strumienia magnetycznego w strefie skrajnej w wybranej chwili czasowej

Przedstawione pole ma bardzo złożony charakter. Część strumienia opuszcza rdzeń stojana praktycznie prostopadle do jego powierzchni i zamyka się wokół płyty dociskowej do bocznej płaszczyzny modelu jak również wokół korony uzwojenia do odkuwki wirnika. Obliczenie wartości składowej osiowej strumienia w strefie skrajnej jest szczególnie istotne ze względu na fakt, że to właśnie ona wnika do rdzenia stojana indukuje w nim prądy wirowe. Ponieważ rdzeń stojana w tej płaszczyźnie nie ma struktury pakietu to wartość indukowanych prądów wirowych w tej płaszczyźnie ograniczana jest jedynie rezystywnością materiału oraz geometrią obiektu. Jedną z możliwości ograniczenia strat indukowanych jest zastosowanie rozcięcia zęba stojana co powoduje przecięcie drogi rozprysku prądów wirowych. Takie rozwiązanie nie eliminuje jednak problemu całkowicie. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład składowej osiowej indukcji pola rozproszenia w zewnętrznej płaszczyźnie rdzenia stojana dla dwóch stanów obciążenia generatora. Rozkład przedstawia maksymalną obliczoną wartość składowej pola. Jak można zauważyć, najsilniej obciążonym elementem jest ząb w pobliżu swoich krawędzi bocznych graniczących z szczeliną główną oraz ze żłobkiem. Drugim obciążonym magnetycznie obszarem jest zewnętrzna powierzchnia jarzma. Przez ten obszar zamyka się strumień rozproszenia rozpryskujący się wokół płyty dociskowej (rysunek 2). Obszarem praktycznie nie obciążonym składową osiową pola jest środkowa część jarzma. wynika to między innymi z ekranującego działania aluminiowej płyty dociskowej.

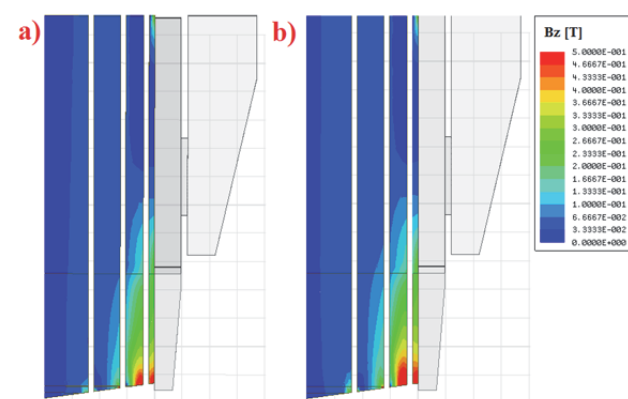
Na rysunku 4 przedstawiono maksymalną wartość składowej osiowej indukcji w rdzeniu dla dwóch stanów obciążenia generatora. Jak można zauważyć składowa osiowa wnika głęboko do rdzenia stojana i zanika dopiero na głębokości 100-150 mm.

Analizując rozkłady pól zaprezentowane na rysunkach 3 oraz 4 można potwierdzić fakt, iż zmiana współczynnika mocy od indukcyjnego ($\cos\phi=0,85$) przez rezystancyjny ($\cos\phi=1$) aż do pojemnościowego ma wpływ na pole w strefie skrajnej maszyny. Wraz ze zmianą współczynnika mocy zwiększa się obciążenie składową osiową pola a co za tym idzie straty w pakiecie blach stojana. Obliczenie

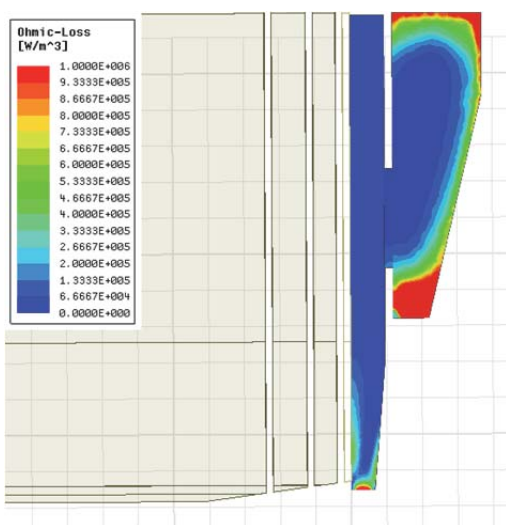
samych strat będących skutkiem oddziaływania składowej osiowej pola jest sprawą skomplikowaną i obszerną w prezentacji. Z tego względu zagadnienie to zostanie pominięte w niniejszym artykule.



Rys.3. Maksymalne wartości składowej osiowej indukcji pola na zewnętrznej płaszczyźnie rdzenia przy $\cos\phi=0.85$ (ind.) (a) oraz $\cos\phi=1$ (b)



Rys.4. Maksymalne wartości składowej osiowej indukcji w przekroju rdzenia stojana przy $\cos\phi=0.85$ (ind.) (a) oraz $\cos\phi=1$ (b)

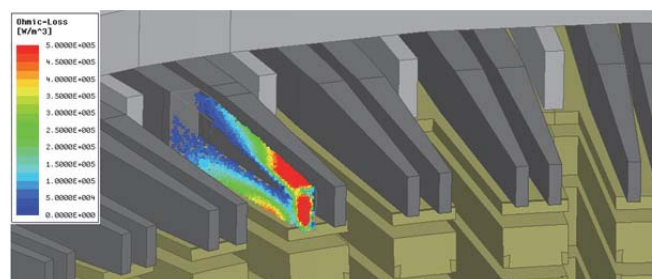


Rys.5. Rozkład strat mocy czynnej na płaszczyźnie przecinającej płytę oraz palce dociskowe.

Na drodze strumienia rozproszenia w strefie skrajnej znajdują się elementy takie jak palce oraz płyta dociskowa. Są one zbudowane z przewodzących materiałów niemagnetycznych co oznacza, że pole wnikające do ich wnętrza jest silnie tłumione, a indukowane prądy wirowe płyną w pobliżu ich powierzchni. Występowanie tego zjawiska powoduje, że pole magnetyczne jest odpychane od powierzchni płyty – staje się ona ekranem elektromagnetycznym. Niekorzystną cechą wszystkich ekranów elektromagnetycznych jest wydzielanie w ich objętości strat mocy czynnej związanych z występowaniem zjawiska Joule'a – Lenza [5]. Na rysunku 5 przedstawiono

rozkład strat na płaszczyźnie przecinającej elementy konstrukcyjne (płyta oraz palce dociskowe) w wybranej chwili czasowej natomiast na rysunku 6 rozkład strat mocy czynnej w objętości palca dociskowego.

Jak można zauważyć (rysunki 5 i 6) szczególnie narażone na wydzielanie strat mocy czynnej są zewnętrzne powierzchnie płyty dociskowej jak również fragmenty palców dociskowych znajdujące się w obszarze zęba rdzenia stojana – czyli w miejscu występowania najsilniejszego pola rozproszenia.



Rys.6. Rozkład strat mocy czynnej w objętości palca dociskowego.

Podsumowanie

Niniejszy artykuł przybliży problematykę strefy skrajnej turbogenerators. Przedstawiono analityczne możliwości obliczeniowe jak również te, wynikające z zastosowania metody elementów skończonych (MES) do wyznaczania wielkości fizycznych w obszarze strefy skrajnej. Zaprezentowano również przykład obliczeń pola oraz strat w strefie skrajnej turbogenerators 560 MW.

Przedstawiona metodyka obliczeń pozwala na lokalizację miejsc w strefie skrajnej, które ze względu na występowanie zmiennego pola magnetycznego, są szczególnie narażone na przegrzanie oraz degradację. Znajomość szczególnie narażonych miejsc może być pomocna na etapie ustalania lokalizacji umocowania czujników do kontroli temperatury w strefie skrajnej.

Prezentowane obliczenia pól mogą stanowić dane wejściowe do obliczeń termicznych które dostarczą informacji na temat rozkładów temperatur które stanowią jedno z głównych ograniczeń w eksploatacji turbogenerators. Obliczenia takie, ze względu na dużą złożoność modelu, należą do bardzo trudnych.

Zastosowanie MES umożliwia ocenę wpływu zmiany współczynnika mocy na obciążenie strefy skrajnej co w dalszej perspektywie oznacza możliwość w miarę precyzyjnego określenia dopuszczalnych warunków obciążenia generatora. Ich znajomość pozwala na wykreślenie diagramu mocy maszyny.

LITERATURA

- [1] Key World Energy Statistics, International Energy Agency, 2014
- [2] Kerszenbaum I., Klempner G., Handbook of large turbo-generator operation and maintenance; John Wiley & Sons, 2008
- [3] Bytnar A., Analiza zjawisk cieplnych i magnetycznych w częściach skrajnych stojana dużego turbogenerators, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 92/2011, pp. 45-50.
- [4] Kundur P., Power system stability and control; McGraw-Hill, 1994
- [5] Turowski J., Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych; WNT, 1982
- [6] Latek W., Turbogenerators; WNT, 1973
- [7] Boldea I., Synchronous generators; CRC Press, 2006
- [8] Hensman G. O., Muhlhaus J., Myerscough C. J., Calculation and measurement of magnetic fields in turbogenerator end-regions; Proc. of IEE, vol. 123, no. 9, 1976, pp. 887-892

Author: mgr inż. Paweł Berger, EthosEnergy Poland S.A., 42-701 Lubliniec ul. Powstańców Śląskich 85, e-mail: Pawel.Berger@Turbocare.pl.