

System diagnostyki *online* uszkodzeń termicznych stojana dużego turbogeneratora

Andrzej Bytnar, Roman Krok

W turbogeneratorach pracujących w cyklu zmiennych obciążeń dochodzi często do uszkodzeń zębów w skrajnych częściach rdzenia stojana. Zwarcia blach w głowach zębów rdzenia mogą powodować nadmierne wzrosty ich temperatury (aż do tzw. „pożaru żelaza”), a w konsekwencji doprowadzać do uszkodzenia izolacji prętów uzwojenia stojana i zwarcia doziemnego. Z praktyki remontowej wynika, że częstą przyczyną uszkodzeń izolacji prętów uzwojenia stojana są również ich lokalne przegrzania spowodowane zmniejszoną drożnością kanałów chłodzących w przewodach elementarnych, np. na skutek gromadzenia się produktów erozji. Ograniczona liczba czujników do pomiaru temperatury rdzenia i uzwojenia stojana (lub ich brak) uniemożliwia wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie ich rozwoju.

Zagadnienie obliczeń i analizy pola temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa przy uwzględnieniu zakłóceń w rozplywie destylatu jest aktualne i stanowi temat prac badawczych wykonywanych w ostatnich latach [1]. W celu wyznaczenia wartości kryterialnych dla systemu diagnostyki uszkodzeń stojana turbogeneratorsa, autorzy utworzyli siec cieplna do obliczeń rozkladu temperatury w prętach uzwojenia stojana chłodzonego bezpośrednio destylatem uwzględniającą zjawiska termiczne w zębie rdzenia przy uszkodzaniu się izolacji jego blach oraz zmiany drożności kanałów chłodzących w przewodach elementarnych. Przeprowadzone obliczenia cieplne dla turbogeneratorów dużej mocy (w formie przykladu podano ich wyniki dla mocy 230 MW) umożliwiły opracowanie nowej metody diagnostyki *online* stanu technicznego zębów rdzenia i uzwojenia stojana.

Uszkodzenia rdzenia stojana turbogeneratorsa

Uszkodzenia elementów i węzłów konstrukcyjnych stojana turbogeneratorsa są spowodowane najczęściej wibracjami wywołanymi siłami pochodzącymi od zjawisk [2–5]: magnetycznych (naciąg magnetyczny pomiędzy stojanem i wirnikiem), elektromagnetycznych (oddziaływanie pomiędzy prętami uzwojenia) i termomechanicznych (wydłużenia termiczne prętów i rdzenia).

W procesie uszkodzenia zębów rdzenia można wyodrębnić trzy fazy. W pierwszej dochodzi do oddzielenia się zewnętrznych blach zębów pakietów i uszkodzeń ich izolacji spowodowanych uderzeniami o rozpórki kanałów wentylacyjnych. W drugiej fazie rozwoju uszkodzenia na powierzchni wewnętrznej i bocznej skrajnych pakietów rdzenia pojawia się ruda, lub rudo-czarny pył. Pochodzi on głównie od korozji czarnej blach zębów. Uderzenia blach o rozpórki kanałów wentyla-

ONLINE DIAGNOSTIC SYSTEM OF THERMAL DAMAGES OF A LARGE TURBOGENERATOR STATOR

Abstract: *The paper presents an original – worked out by the authors – way of online detecting the damages of a large turbogenerator core and stator winding. The distillate temperature measured at the outlet from the stator winding coils is a diagnostic signal. It was shown, using the stator thermal model developed, that the considered turbogenerator damages cause a measurable increase in the distillate temperature in some outlet boxes. The proposed way of prevention diagnostics enables determination of the kind and location of a damage as well as the preliminary estimation of its size. It allows elimination of wide damages of turbogenerators. The exemplary calculations were carried out for a 230 MW turbogenerator which is very common in the Polish power system.*

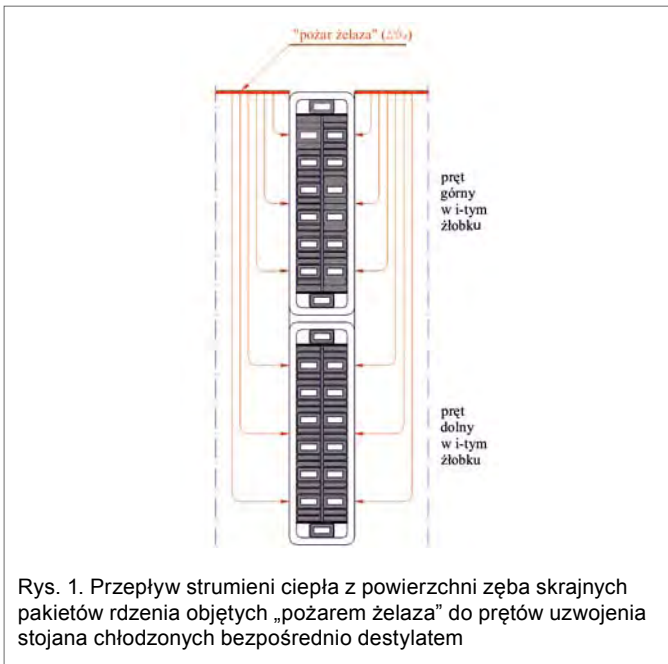
cyjnych powodują ich „wycieranie”, a następnie łamanie. Swobodne fragmenty uszkodzonych blach mogą uszkadzać izolację prętów uzwojenia. W trzeciej fazie uszkodzeń dochodzi do nieodwracalnego rozwarstwienia się zębów skrajnych pakietów rdzenia. Zazwyczaj w tej fazie powstają zwarcia blach zębów, które wywołują nadmierne nagrzewanie żelaza czynnego i uszkodzenia izolacji prętów uzwojenia.

Nadmierne nagrzewanie zębów rdzenia stojana może być również powodowane przez skojarzone strumienie rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika (szczególnie w obszarze pracy pojemnościowej turbogeneratorsa).

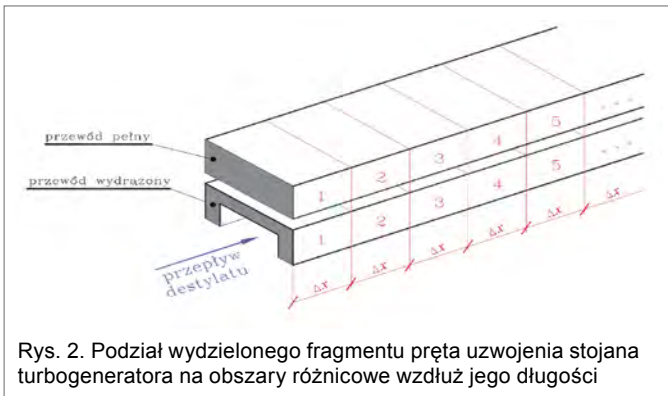
Na skutek poważnego uszkodzenia prętów występują zwykle zwarcia doziemne uzwojenia stojana.

Zmniejszenie drożności kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana

Destylat wykorzystywany do chłodzenia uzwojenia stojana w dużych turbogeneratorach powoduje erozję ścianek kanałów chłodzących w przewodach elementarnych. Produkty erozji gromadzące się w kanałach powodują zmniejszenie ich drożności. W konsekwencji wzrasta temperatura tych prętów, w których maleje wydatek destylatu. Na skutek oddziaływania podwyższonej temperatury zmniejsza się żywotność izolacji prętów gorzej chłodzonych, a w skrajnym przypadku dochodzi do ich termicznego uszkodzenia. Występowanie tego typu zjawiska potwierdzają oględziny remontowanych turbogeneratorów.



Rys. 1. Przebieg strumienia ciepła z powierzchni zęba skrajnych pakietów rdzenia objętych „pożarem żelaza” do prętów uzwojenia stojana chłodzonych bezpośrednio destylatem



Rys. 2. Podział wydzielonego fragmentu pręta uzwojenia stojana turbogeneratorsa na obszary różnicowe wzdłuż jego długości

Sieć cieplna do obliczeń rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa z uszkodzonym rdzeniem oraz przy zakłóceniach w rozpliwie destylatu chłodzącego

Do obliczeń pola temperatury wykorzystano zmodyfikowane i udoskonalone sieci cieplne opracowane dla modelowania rozkładów temperatury w maszynach elektrycznych z licznymi kanałami chłodzącymi [7, 8]. Sieć cieplną sporządzono dla uzwojenia stojana przykładowego turbogeneratorsa o mocy 230 MW [2, 7]. Uzwojenie chłodzone bezpośrednio destylatem zbudowane jest z prętów o konstrukcji przedstawionej na rysunku 1.

W rozpatrywanym turbogeneratorsie kolektory wodne wlotowe i wylotowe zwojów w uzwojeniu stojana znajdują się od strony turbiny. W tym przypadku sieć cieplną wystarczy utworzyć tylko dla dwóch prętów uzwojenia stojana (odległych o poskok uzwojenia) połączonych szeregowo.

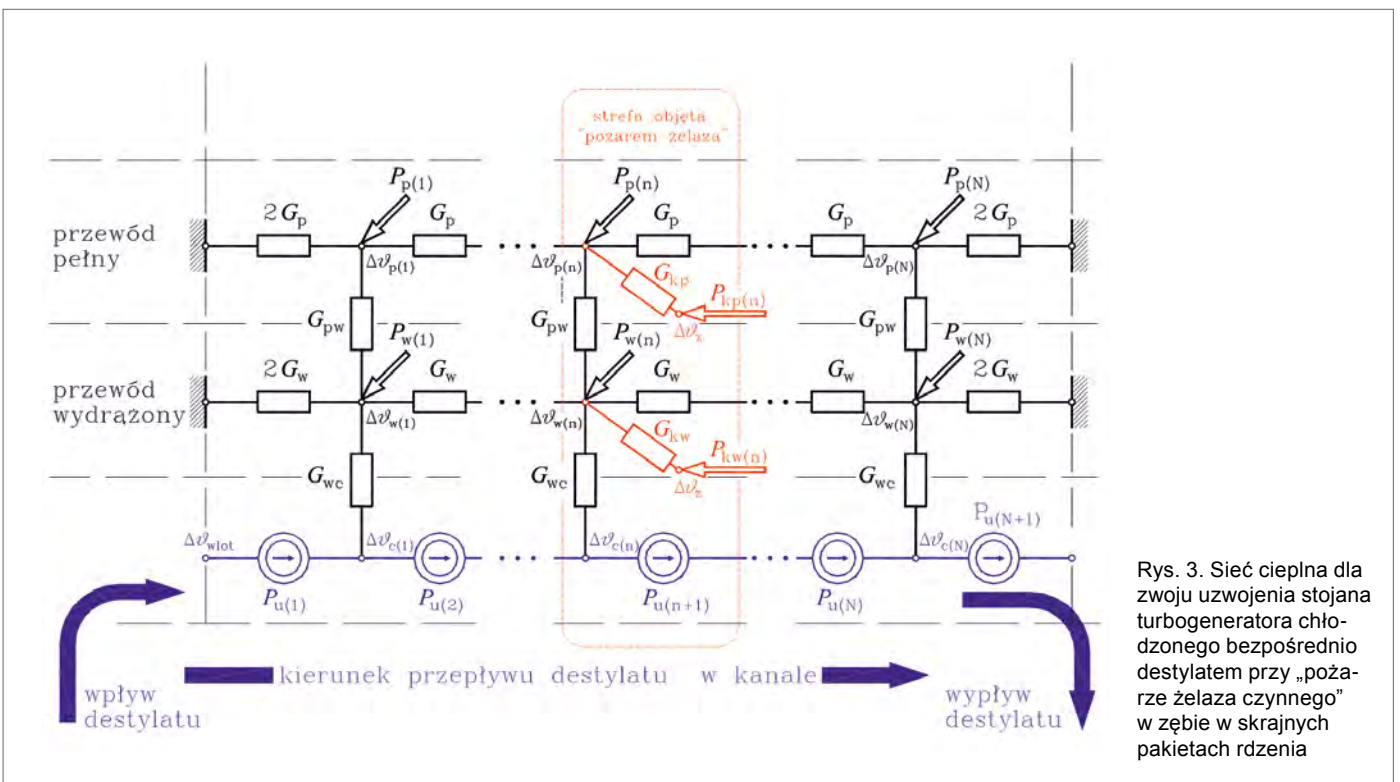
W modelu cieplnym uwzględniono:

- straty dodatkowe w przewodach elementarnych prętów uzwojenia wywołane zjawiskiem wypierania prądu;
- zależność strat mocy w przewodach elementarnych od ich temperatury;
- nagrzewanie się destylatu przepływającego w kanałach chłodzących znajdujących się wewnątrz przewodów wydrążonych;
- zjawisko unoszenia ciepła w strudze destylatu.

W prętach uzwojenia stojana wydzielono wielokrotnie powtarzający się fragment (rys. 2) zawierający: 1 przewód pełny, 1/2 przewodu wydrążonego oraz 1/2 kanału chłodzącego, w którym przepływa destylat.

Wymienione elementy podzielono na obszary różnicowe o długości Δx , a następnie każdemu z nich przyporządkowano węzeł sieci cieplnej (rys. 3) reprezentujący jego średnią temperaturę.

Na powierzchniach zębów skrajnych pakietów rdzenia w obszarze rozwijających się zwarć blach może wzrastać tempera-



Rys. 3. Sieć cieplna dla zwoju uzwojenia stojana turbogeneratorsa chłodzonego bezpośrednio destylatem przy „pożarze żelaza czynnego” w zębie w skrajnych pakietach rdzenia

tura do wartości topienia się żelaza (1540°C) i wyższej – przy znacznych zakłóceniach w przepływie gazu chłodzącego w promieniowych kanałach wentylacyjnych (przy uszkodzonych rozpórkach). W tym przypadku od powierzchni zębów rdzenia do przewodów elementarnych prętów uzwojenia, stykających się z uszkodzonym zębem, przepływa dodatkowy strumień ciepła. Dla jego uwzględnienia w sieci cieplnej (rys. 3) wprowadzono strumienie ciepła przepływające z powierzchni uszkodzonego zęba (o przyroście temperatury $\Delta\theta_z$) do przewodów elementarnych pełnych (P_{kp}) oraz wydrążonych (P_{kw}) odpowiednio poprzez zastępcze przewodności cieplne G_{kp} i G_{kw} .

Wykorzystując sporządzoną sieć cieplną, opracowano algorytm oraz program komputerowy do badań cieplnych uzwojenia stojana turbogenerators, gdy w zębach skrajnych pakietów rdzenia rozwija się „pożar żelaza” lub dochodzi do zmniejszenia drożności kanałów chłodzących w jego przewodach elementarnych.

Straty w miejscu uszkodzenia izolacji rdzenia turbogenerators

Straty w miejscu zwarcia blach w rdzeniu turbogenerators można wyznaczyć ze wzoru [6]:

$$P_k = \frac{(222 h g B_j)^2}{r_k} \quad (1)$$

gdzie:

h – odległość miejsca powstania zwarcia blach rdzenia od powierzchni płaszczyznej jarzma;

g – grubość zwartych blach;

B_j – indukcja w jarzmie;

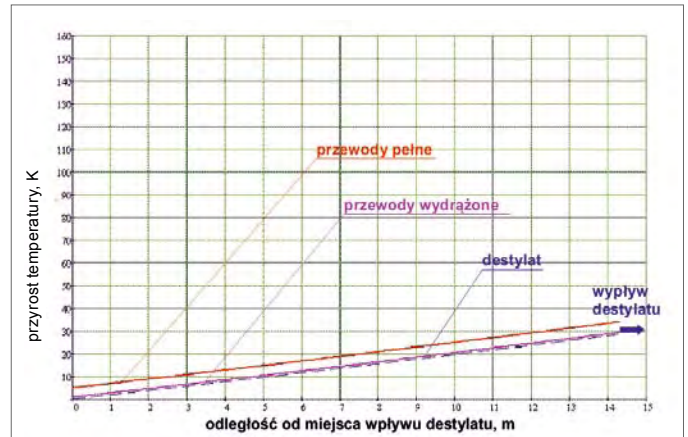
r_k – przejściowa rezystancja zwarcia blach.

Wartość rezystancji r_k jest zmienna i przypadkowa, zależy przede wszystkim od rozmiarów uszkodzenia izolacji blach oraz od typu turbogenerators i rodzaju jego pracy.

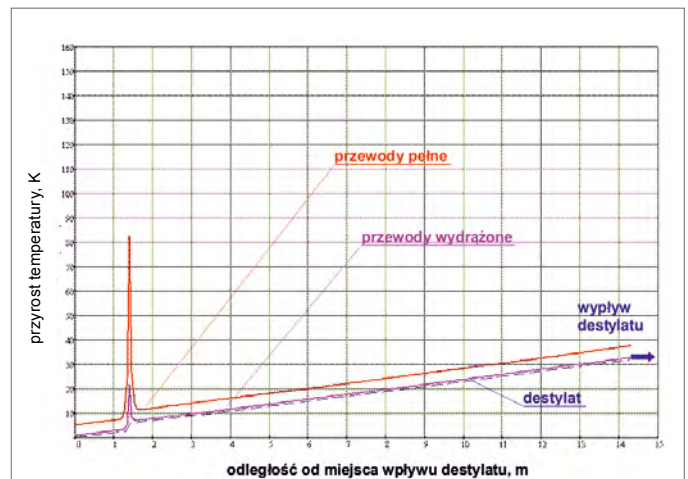
Ze względu na stosunkowo małą przewodność cieplną blach i ograniczone warunki chłodzenia rdzenia oraz małą przewodność cieplną izolacji prętów uzwojenia stojana, strumienie cieplne (w stanach cieplnie ustalonych) płynące w kierunku elementów stojana o niższych temperaturach oraz do czynnika chłodzącego w kanałach promieniowych rdzenia są małe. Powoduje to bardzo duży wzrost temperatury rdzenia w obszarze uszkodzonym i tak np. przyrost ten wynosi ok. 200°C w środku pakietu, gdzie powstają straty rzędu 155 W. Tak duży przyrost temperatury powoduje gwałtowne starzenie się izolacji sąsiednich blach i rozszerzenie się obszaru uszkodzeń (dalszy wzrost strat miejscowych i przyrost temperatury). Zwarcie blach przeobraża się ostatecznie w „pożar żelaza” powodujący nadtopienie fragmentów rdzenia, a następnie uszkodzenie izolacji prętów i powstanie bardzo groźnego w skutkach zwarcia doziemnego uzwojenia stojana. Diagnostyka prewencyjna zważyć w rdzeniu we wczesnej fazie ich rozwoju umożliwia ograniczenie zakresu uszkodzeń turbogenerators.

Obliczenia cieplne uzwojenia stojana turbogenerators przy uszkodzeniu rdzenia oraz zakłóceniach w przepływie destylatu chłodzącego

Celem przeprowadzonych obliczeń cieplnych uzwojenia stojana turbogenerators (w formie przykładu o mocy 230 MW) było określenie wpływu zwarcia blach rdzenia oraz zmniejszenia



Rys. 4. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwojów uzwojenia stojana turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem przy znamionowym wydatku destylatu

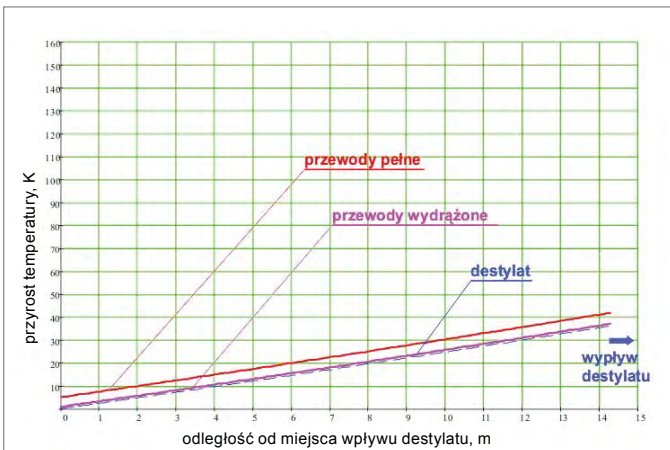


Rys. 5. Rozkład przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwoju zawierającego pręt górny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza” ($\Delta\theta_z = 1500$ K, uszkodzenie jednego skrajnego pakietu rdzenia)

drożności kanałów chłodzących w przewodach elementarnych na wzrost temperatury destylatu na wypływach z rozpatrywanych zwojów. Wykazanie mierzalnego wzrostu temperatury gorącego destylatu w skrzynkach odpływowych wywołanego rozpatrywanymi uszkodzeniami turbogenerators potwierdza możliwość jego wykorzystania jako sygnału diagnostycznego.

Dla celów porównawczych wykonano obliczenia rozkładu przyrostu temperatury w uzwojeniu stojana rozpatrywanego turbogenerators w znamionowym stanie pracy, przy temperaturze zimnego destylatu 30°C (temperatura odniesienia dla obliczania przyrostu temperatury). W turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem oraz w pełni drożnymi kanałami chłodzącymi w przewodach elementarnych, rozkłady temperatury w poszczególnych zwojach uzwojenia stojana są identyczne (rys. 4). Przyrost temperatury destylatu na wylocie ze wszystkich zwojów uzwojenia stojana jest wtedy taki sam i wynosi 28,6 K.

Zwarcia blach w zębie skrajnych pakietów rdzenia powodują zarówno znaczny wzrost przyrostu temperatury samego zęba,



Rys. 6. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwoju uzwojenia stojana, w którym wydatek destylatu jest zmniejszony do 80% wartości znamionowej

jak i bezpośrednio przylegających do niego odcinków prętów uzwojenia stojana. Ciepło odprowadzane z fragmentu rdzenia, w którym występuje zwarcie blach do prętów usytuowanych w sąsiednich żłobkach stojana, powoduje wzrost temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających te pręty.

Wykonano również obliczenia rozkładu przyrostu temperatury w zwojach uzwojenia stojana zawierających pręty leżące w „i-tym” żłobku, bezpośrednio sąsiadującym z zębem rdzenia objętym „pożarem żelaza”. Wartość przyrostu temperatury destylatu na wypływie z tych zwojów zależy od przyrostu temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza” ($\Delta\theta_z$) oraz szerokości tej strefy (liczby zwartych blach i pakietów rdzenia). Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury w zwoju zawierającym pręt górny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza”. Obliczenia wykonano dla przypadku zwarcia blach w pojedynczym skrajnym pakiecie rdzenia wywołującego przyrost temperatury na powierzchni uszkodzonego zęba $\Delta\theta_z = 1500$ K.

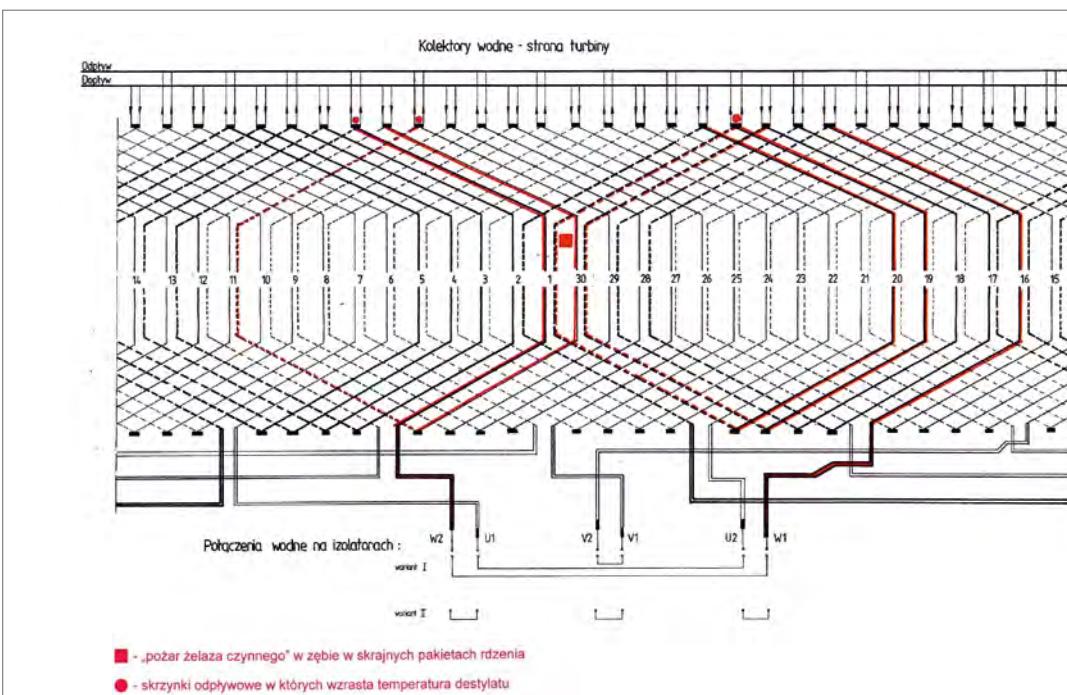
Tabela 1. Wpływ „pożaru żelaza” w zębie jednego skrajnego pakietu rdzenia na przyrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej

Rodzaj zwoju	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_{wyl}$ ($\Delta'\theta_{wyl}$)
	K	K
z prętem górnym	1000	30,8 (2,2)
	1500	31,9 (3,3)
	2000	33,0 (4,4)
z prętem dolnym	1000	30,2 (1,6)
	1500	31,0 (2,4)
	2000	31,8 (3,2)

Tabela 2. Wpływ zmniejszenia drożności kanałów chłodzących w zwoju uzwojenia stojana na przyrost temperatury destylatu na jego spływie

Względny procentowy wydatek destylatu	$\Delta\theta_{wyl}$ ($\Delta'\theta_{wyl}$)
	K
100% (w pełni drożne kanały)	28,6 (0)
90%	32,0 (3,4)
80%	36,2 (7,6)
70%	41,8 (13,2)
60%	49,5 (20,9)

W tabeli 1 zestawiono (dla znamionowej pracy turbogenerators) przyrosty temperatury gorącego destylatu w skrzynkach wylotowych zwojów uzwojenia stojana zawierających pręty leżące w „i-tym” żłobku w przypadku uszkodzeń zębów rdzenia w obrębie jednego skrajnego pakietu ($\Delta\theta_{wyl}$) oraz zmiany wartości tych przyrostów temperatury w odniesieniu do turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem ($\Delta'\theta_{wyl}$). Już w początkowej fazie rozwoju „pożaru żelaza” w zębie jednego pakietu ($\Delta\theta_z = 1000$ K), średnie przyrosty temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających pręty położone w sąsiednim żłobku wzrastają o 2,2 K (zwoj zawierający pręt górny) i 1,6 K



Rys. 7. Schemat obiegu destylatu w uzwojeniu stojana na turbogenerators o mocy 230 MW z zaznaczonym zębem rdzenia objętym „pożarem żelaza” oraz skrzynkami odpływowymi, w których wzrasta temperatura destylatu

(zwoj zawierający pręt dolny). Porównywanie mierzonych temperatur destylatu na wypływach ze wszystkich zwojów uzwojenia stojana w czasie eksploatacji turbogeneratorsa umożliwia wykrycie tych kilkustopniowych wzrostów temperatury destylatu na wylotach ze zwojów zawierających pręty bezpośrednio sąsiadujące z miejscem uszkodzenia rdzenia.

Z upływem czasu zwiększa się zarówno wartość przyrostu temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza”, jak i rozmiar tej strefy. W konsekwencji wzrasta różnica temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających pręty znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzenia rdzenia, a pozostałymi, do których praktycznie nie dopływają strumienie ciepłe generowane w strefie zwarcia blach.

Wzrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej zwoju uzwojenia stojana może być również spowodowany zmniejszeniem drożności kanałów w przewodach wydrążonych np. na skutek osadzania się produktów erozji. Na rysunku 6 przedstawiono obliczone rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwoju uzwojenia stojana, w którym wydatek destylatu jest zmniejszony do 80% wydatku znamionowego (przy w pełni drożnych kanałach chłodzących). Pozostałe parametry charakteryzujące stan pracy turbogeneratorsa mają wartość znamionową.

Przyrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej rozważanego zwoju z nie w pełni drożnymi kanałami chłodzącymi (zmniejszenie wydatku destylatu do 80%) wynosi $\Delta\vartheta_{wyl} = 36,2$ K (rys. 6) i jest on o $\Delta\vartheta_{wyl} = 7,6$ K większy niż w skrzynkach wylotowych pozostałych zwojów (rys. 4), w których wydatek destylatu jest znamionowy.

W tabeli 2 zestawiono uzyskane wyniki obliczeń cieplnych przy różnym zmniejszeniu wydatku destylatu na skutek ograniczenia drożności kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana turbogeneratorsa. Zmniejszenie wydatku destylatu w zwoju uzwojenia stojana zaledwie o 10% powoduje mierzalny kilkustopniowy wzrost temperatury gorącego destylatu na jego spływie.

System diagnostyki online stanu technicznego zębów rdzenia oraz drożności kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana turbogeneratorsa

Na rysunku 7 przedstawiono schemat obiegu destylatu w uzwojeniu stojana rozpatrywanego turbogeneratorsa o mocy 230 MW. Dla celów analizy założono, że w głowie zęba skrajnego pakietu rdzenia powstały zwarcia blach przeradzające się w „pożar żelaza”. Ciepło wydzielane na skutek tego zjawiska w zębie rdzenia, objętym tym uszkodzeniem, przepływa do prętów uzwojenia najbliższych położonych żłobków (nr 1 oraz 30). W konsekwencji powoduje to wzrost przyrostu temperatury destylatu w trzech skrzynkach odpływowych rozważanych zwojów zawierających pręty górne i dolne. Istniejąca korelacja pomiędzy potencjalnymi miejscami występowania zwarć w zębach rdzenia oraz odpowiadającymi im skrzynkami odpływowymi zwojów uzwojenia stojana, w których wzrasta temperatura destylatu, umożliwia wstępną lokalizację uszkodzonego fragmentu rdzenia. Bazując na tej zależności, można utworzyć selektywny system diagnostyki stanu technicznego zębów rdzenia odróżniający „pożar żelaza” (wywołujący wzrost przyrostu temperatury destylatu na wypływach z trzech zwojów zawierających pręty położone w żłobkach w pobliżu powstającego uszkodzenia) od zmniejszenia się drożności kanałów chłodzą-

cych (powodujących wzrost przyrostu temperatury destylatu na wypływach z przypadkowych zwojów uzwojenia).

Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że mierzone podczas pracy turbogeneratorsa temperatury gorącego destylatu (na wypływach z poszczególnych zwojów uzwojenia stojana) można wykorzystać do oceny stanu technicznego zębów rdzenia oraz drożności elementarnych kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana.

System diagnostyki prewencyjnej bazujący na pomiarach temperatury gorącego destylatu pozwala zapobiegać rozległym uszkodzeniom turbogeneratorsów.

Zaleca się wyposażać turbogeneratorsy z bezpośrednim chłodzeniem wodnym (destylatem) uzwojenia stojana w czujniki do pomiaru temperatury na wypływie tego medium z poszczególnych zwojów. Umożliwia to wprowadzenie skutecznej diagnostyki termicznej rdzenia i uzwojenia stojana turbogeneratorsa.

Literatura

- [1] GURJEWIC E.I., FILIN A.G.: *Temperaturnoje pole obmotki statora mosnowo turbogeneratorsa pri lokalnych naruszenjach wnutrjennjej sistjemy wodjanogo ochładzdenija*. „Elektricesstwo” nr 3/2010, s. 23–29, 2010.
- [2] BYTNAR A., KROK R.: *Termiczna diagnostyka stanu technicznego zębów rdzenia stojana dużego turbogeneratorsa*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 83/2009, BOBRME KOMEL, s. 201–206, 2009.
- [3] BYTNAR A.: *Uszkodzenia rdzenia stojana turbogeneratorsa w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych*. XLIII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, Poznań, 2–5 July 2007.
- [4] BUTOV A. V. I DG: *Povrezdaemost i kontrol zubcovyh zon zapečennych krajnih paketov stali serdecnikov statorom turbogeneratorsa*. „Elektriceskie Stancji” nr 5, s. 41–47, 2001.
- [5] CLOYDE V., MAUGHAM P. E.: *Upgrading of generators to improve reliability*. Iris Rotating Machine Conference, Santa Monica, p. 1–10, June 2003.
- [6] BYTNAR A.: *Wybrane zagadnienia z konstrukcji i eksploatacji turbogeneratorsów*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
- [7] KROK R.: *Sięci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [8] KROK R.: *Sięci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych i transformatorach*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 10, s. 318–323, 2010.

prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar – Instytut Energetyki, Warszawa, tel. 22-836 32 01, 22-345 12 65, e-mail: andrzej.bytnar@ien.com.pl;

dr inż. Roman Krok – Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska, Gliwice, tel. 32-237 29 29, e-mail: Roman.Krok@polsl.pl