

Modernizacja wirnika generatora GTHW-360

Abstract. The article presents the scope of GTHW-360 generator rotor modernization in order to raise the generator power up to 396 MW at $\cos\varphi=0.85$ (inductive) and $\cos\varphi=0.95$ (capacitive). There are presented results of thermal calculations in comparison with results of the measurements of some GTHW-360 generators. On the basis of the repairing experiences and the thermal calculations, the article presents a proposal of modernization of excitation winding in the end winding area.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zakres modernizacji wirnika generatora GTHW-360 w celu podwyższenia mocy generatora do 396 MW przy $\cos\varphi=0,85$ ind. oraz przy $\cos\varphi=0,95$ poj. Wyniki obliczeń cieplnych porównano z wynikami pomiarów wykonanych na kilku generatorach GTHW-360. Na bazie doświadczeń remontowych oraz uzyskanych wyników obliczeń cieplnych przedstawiono propozycję modernizacji uzwojenia wzbudzenia w strefie połączeń czołowych. **Modernization of the GTHW-360 generator rotor**

Słowa kluczowe: generator, wirnik, modernizacja

Keywords: generator, rotor, modernization

Wstęp

W 1977 r. DolmelWrocław zakupił licencję na produkcję generatora GTHW-360 o mocy 360 MW w szwajcarskiej firmie BBC. Pierwszy generator tego typu wyprodukowano w 1980 r. W sumie wyprodukowano 17 jednostek, z czego 16 pracuje w kraju (Elektrownia Bełchatów i Opole), a 1 szt. za granicą (Elektrownia Kostolec).

Generator GTHW-360 ma bezpośrednie chłodzenie wodorowe wirnika oraz chłodzenie wodne uzwojenia stojana. Ciśnienie wodoru w generatorze wynosi 400 kPa. Dwa wentylatory promieniowe umieszczone po obydwu stronach wirnika wymuszają obieg medium chłodzącego w generatorze.

Uzwojenie wzbudzenia ma odkryte kanały boczne zewnętrzne w strefie połączeń czołowych oraz zamknięte kanały wewnętrzne w strefie żłobkowej wirnika.

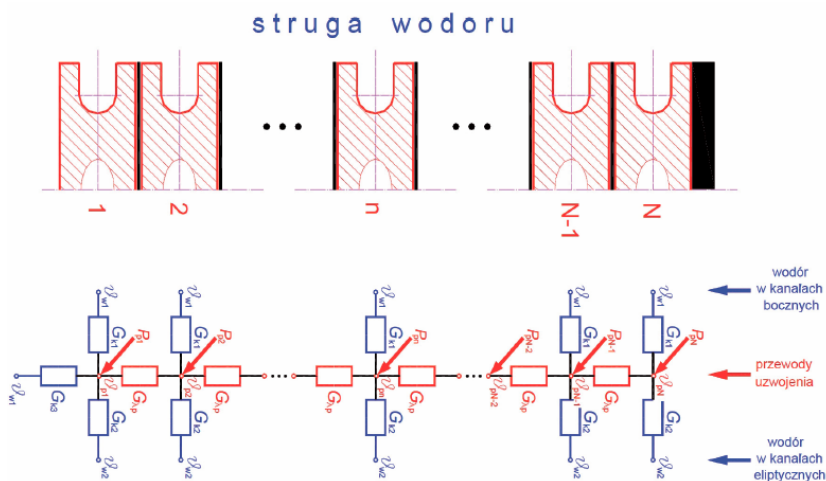
Z przeprowadzonej analizy pomiarów cieplnych oraz oględzin wywojenego wirnika wynika, że zastosowany w generatorze GTHW 360 system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia jest bardzo skuteczny i umożliwia zwiększenie jego mocy znamionowej przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy. W części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia nie są widoczne uszkodzenia nawet po długim okresie eksploatacji generatorów. W projekcie modernizacji nie przewiduje się zatem dokonywania jakichkolwiek zmian tej części uzwojenia. Zapewnienie bezawaryjnej pracy wirnika wymaga natomiast modernizacji czoł uzwojenia wzbudzenia generatora. Konieczna jest optymalizacja kształtu, jak i zmiana przekroju poprzecznego przewodów

uzwojenia wzbudzenia w części czołowej (w celu zwiększenia ich sztywności) oraz obniżenie przyrostu temperatury przewodów w czołach usytuowanych bezpośrednio pod kołpakami.

EthosEnergy Poland S.A. (dawniej TurboCare Poland S.A.) w 2010 r. przy współpracy z Politechniką Śląską podjął prace projektowe nad nowym uzwojeniem wzbudzenia do tego typu generatorów. Prace te zakończono w pierwszej połowie 2011 r. Nowy przekrój przewodu uzwojenia wzbudzenia generatora zgłoszono do Urzędu Patentowego RP celem ochrony. W roku 2014 Urząd Patentowy RP udzielił patentu na powyższe rozwiązanie [4].

Model do obliczeń rozkładu temperatury w uzwojeniu wzbudzenia generatora z osiowym systemem chłodzenia

Sporządzenie modelu cieplnego wirnika wymaga znajomości rozpyły wodoru w tym elemencie. Po obu stronach generatora znajdują się wentylatory promieniowe z dyfuzorem, które wyciągają gaz chłodzący z chłodnic i nadmuchują w strefę połączeń czołowych maszyny, gdzie rozpyływa się on na strumienie cząstkowe. Część gazu chłodzącego przepływa pod pierścieniem centrującym wirnika w przestrzeni czoł uzwojenia wzbudzenia, a następnie dzieli się w okolicy wprowadzenia przewodów z beczki wirnika na dwie części.



Rys. 1. Sieć cieplna dla czoł uzwojenia wzbudzenia z osiowym systemem kanałów chłodzących

Większa jego część przepływa przez przewody drążone w części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia, odbiera ciepło wytwarzane na skutek strat mocy, a następnie wypływa promieniowo do szczeliny przywornikowej w środku generatora. Stąd płynie przez promieniowe kanały wentylacyjne blach stojana na zewnątrz ku grzbietowi kadłuba i kieruje się do chłodnic. Mniejsza część gazu chłodzącego z przestrzeni czoł uzwojenia przepływa wzdłuż bocznych kanałów chłodzących przewodów profilowych, odbiera ciepło wytwarzane na skutek strat mocy i wypływa przez specjalnie w tym celu przewidziane żłobki w strefie biegunowej końca beczki wirnika do szczeliny przywornikowej. Reasumując, przewody uzwojenia wzbudzenia zarówno w części żłobkowej, jak i czołowej chłodzone są wodorem przepływającym w kanałach osiowych.

Na rysunku 1 przedstawiono strukturę sieci cieplnej sporządzonej dla czoł uzwojenia wzbudzenia z osiowym systemem kanałów chłodzących. Każdemu przewodowi elementarnemu przyporządkowano węzeł cieplny reprezentujący jego średnią temperaturę. Przewody ponumerowano, poczynając od dna żłobka w kierunku klina. W modelu cieplnym uwzględniono przepływ ciepła z przewodów elementarnych do strug wodoru przepływających w kanałach osiowych oraz pomiędzy sąsiednimi przewodami przez przekładki izolacyjne. Kanały eliptyczne w przewodach występują w przypadku modernizacji wirnika. Straty generowane w przewodach elementarnych uzwojenia wzbudzenia zależą od ich temperatury z powodu temperaturowej zmiany rezystywności miedzi. Struktura sieci cieplnej utworzonej dla żłobkowej części uzwojenia wzbudzenia wygląda podobnie, jedynie dodatkowo uwzględniono w niej przepływ ciepła z przewodów elementarnych uzwojenia do odkuwki wirnika przez izolację żłobkową.

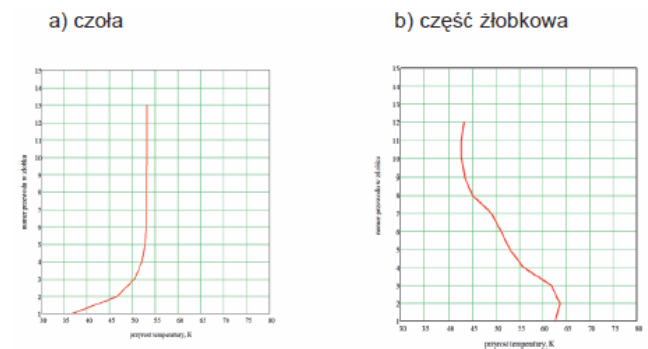
GTHW 360 w wersji fabrycznej

Wyniki pomiarów cieplnych generatora GTHW 360 umożliwiły przeprowadzenie weryfikacji sporządzonych sieci cieplnych oraz wyznaczenie prędkości wodoru w kanałach osiowych w przewodach uzwojenia wzbudzenia. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że przy obciążeniu generatora mocą $P=380$ MW i znamionowym współczynnikiem mocy $\cos\phi_n=0,85$ ind. prąd wzbudzenia wynosi $I_f=2893$ A, zaś odpowiadający temu stanowi pracy maszyny średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wynosi 51 K. Dla tego stanu obciążenia generatora wykonano obliczenia rozkładów przyrostu temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia wykorzystując opracowane programy komputerowe.

Z uzyskanych wyników obliczeń cieplnych wirnika wynika (rys. 2), że w rozpatrywanym stanie pracy generatora w wersji fabrycznej największy przyrost temperatury występuje w części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia w drugim przewodzie elementarnym (licząc od dna żłobka) i wynosi 63,6 K. Średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia w rozpatrywanym stanie pracy generatora wynosi 51 K i jest on o 14 K mniejszy od dopuszczanego przez producenta (65 K).

Przyrosty temperatury przewodów elementarnych od 4 do 13 (licząc od dna żłobka) w czołach uzwojenia wzbudzenia są praktycznie jednakowe z powodu tych samych warunków odprowadzania ciepła do wodoru. Przewód 1 (na dnie żłobka) jest dodatkowo chłodzony strugą wodoru omywającą jego dolną powierzchnię, a w konsekwencji ma on najniższy przyrost temperatury. Do tego najzimniejszego przewodu odprowadzana jest część ciepła z przewodów sąsiednich (2 oraz 3) przez przekładki izolacyjne, co powoduje obniżenie ich przyrostu temperatury w odniesieniu do pozostałych przewodów.

W części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia występuje znacznie większa nierównomierność rozkładu przyrostu temperatury niż w czołach. Największe przyrosty temperatury w części żłobkowej mają przewody umieszczone na dnie żłobka, zaś najmniejsze umieszczone bezpośrednio pod klinem. Różne wymiary przewodów i wydrążonych w nich kanałów chłodzących w części żłobkowej powodują, że różne są wytwarzane w nich straty mocy zamieniane na ciepło (różna jest gęstość prądu w przewodach), jak i warunki odprowadzania ciepła do wodoru. Znacząco mniejszy obwód kanałów chłodzących w przewodach uzwojenia wzbudzenia usytuowanych na dnie żłobka jest głównym czynnikiem powodującym ich największy przyrost temperatury.



średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia: 51 K

Rys. 2. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360 w wersji fabrycznej wzdłuż wysokości żłobka wirnika – $I_f=2893$ A, $P=380$ MW, $\cos\phi_n=0,85$ ind.



Rys. 3. Zdjęcie części żłobkowej uzwojenia remontowanego generatora GTHW 360

Z wyników pomiarów i obliczeń cieplnych generatora GTHW 360 w wersji fabrycznej wynika, że przy obciążeniu generatora mocą 380 MW i $\cos\phi_n=0,85$ ind. uzwojenie wzbudzenia nie jest w pełni wykorzystane pod względem cieplnym. Istniejący zapas w odniesieniu do średniego przyrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia może być wykorzystany do zwiększenia prądu wzbudzenia w celu podwyższenia mocy generatora powyżej 380 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy. Należy jednak w tym miejscu zwrócić uwagę na wyniki oględzin remontowanych wirników generatorów GTHW 360 – rys. 4 i 5.

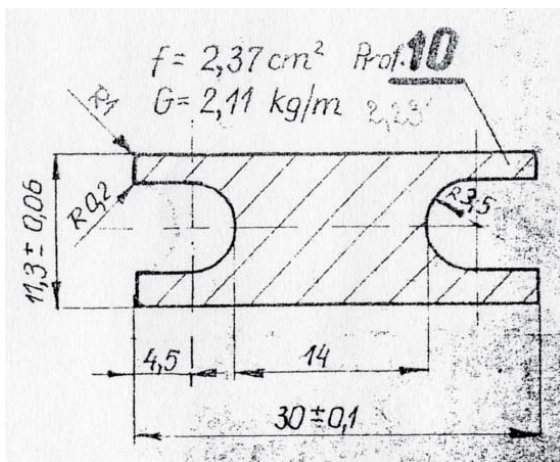


Rys. 4. Zdjęcie czoł uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360

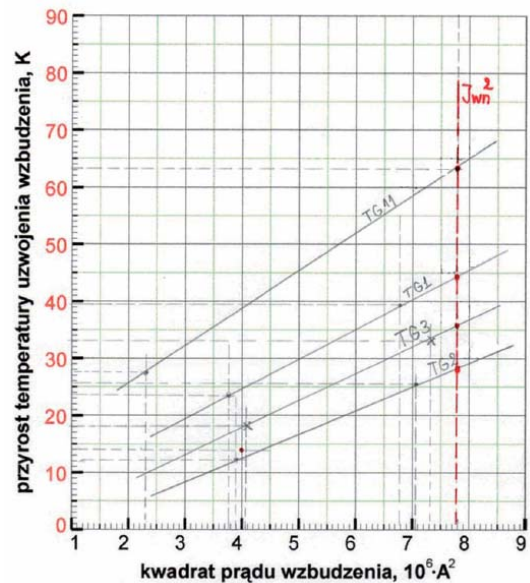


Rys. 5. Zdjęcie czoł uzwojenia wzbudzenia remontowanego generatora GTHW 360

W wyniku eksploatacji generatorów przy zmiennym obciążeniu dochodzi do deformacji oraz zwarć przewodów w części czołowej największych cewek uzwojenia wzbudzenia położonych bezpośrednio pod kołpakiem. Na zamieszczonych zdjęciach widoczne są deformacje przewodów prowadzące następnie do: uszkodzenia izolacji międzyzwojowej, zwarci wytopienia fragmentów przewodów. Elementem powodującym tego typu uszkodzenia są wystające na zewnątrz cienkie ścianki bocznych kanałów chłodzących w przewodach (o szerokości 4,5 mm i wysokości 2,15 mm) - rys. 6. Praca generatora przy zmiennym obciążeniu powoduje dylatację termiczną przewodów, zaś największe wydłużenia występują w przewodach największych cewek uzwojenia. Cienkie i długie ścianki bocznych kanałów chłodzących w przewodach uzwojenia wzbudzenia w części czołowej ulegają „pofalowaniu”, co następnie prowadzi do uszkodzenia przekładek izolacyjnych i ostatecznie do powstania zwarć zwojowych. Pałacy się łuk elektryczny powiększa obszar i zakres uszkodzeń części czołowej uzwojenia wzbudzenia. Występowanie zwarć zwojowych w uzwojeniach wzbudzenia generatorów rozpatrywanego typu potwierdzają również wyniki pomiarów cieplnych przeprowadzonych po długim okresie eksploatacji przy zmiennym obciążeniu - rys. 7. Wyznaczone z pomiarów zależności średniego przyrostu temperatury od prądu wzbudzenia dla różnych generatorów rozpatrywanego typu bardzo odbiegają od siebie i jedynym wyjaśnieniem tego zjawiska mogą być zwarcia zwojowe w uzwojeniu wzbudzenia, których skutki są widoczne przy remontach wirników.



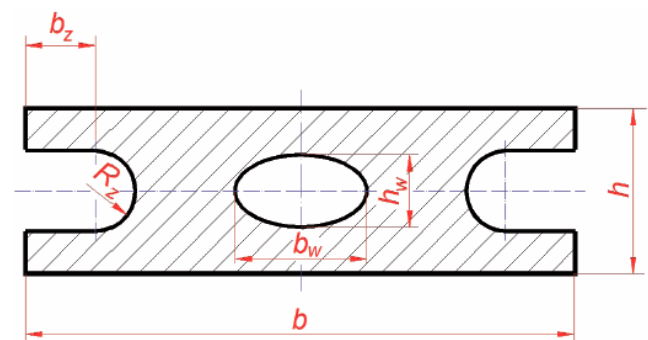
Rys. 6. Przekrój poprzeczny przewodu uzwojenia wzbudzenia w części czołowej generatora GTHW 360 w wersji fabrycznej



Rys. 7. Zależności średniego przyrostu temperatury uzwojeń wzbudzenia od kwadratu prądu wzbudzenia wyznaczone na podstawie wyników pomiarów cieplnych generatorów GTHW 360

Obliczenia cieplne zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360

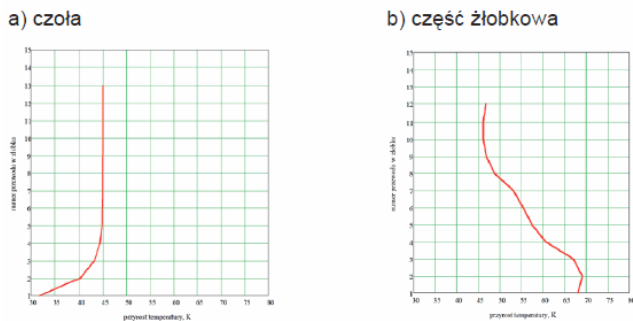
W wersji modernizacji czoł uzwojenia wzbudzenia rozpatrywanego generatora zaproponowano zachowanie kształtu bocznych kanałów chłodzących przy jednoczesnej zmianie ich wymiarów charakterystycznych. Dodatkowo w czołach uzwojenia proponuje się wprowadzić osiowe kanały chłodzące o przekroju w kształcie elipsy (na wzór kanałów osiowych zastosowanych w części żłobkowej uzwojenia). Wloty do tych dodatkowych kanałów chłodzących proponuje się wykonać w pobliżu wlotów do kanałów osiowych części czołowej uzwojenia, zaś wyloty w okolicy środka czoł. Tym sposobem utworzona zostanie dodatkowa struga wodoru w przewodach czoł uzwojenia narażonych obecnie najbardziej na uszkodzenia termiczne, równoległa w stosunku do strugi wodoru przepływającej w bocznych kanałach chłodzących. Proponuje się wykonać eliptyczne kanały chłodzące w rozpatrywanych przewodach czoł uzwojenia wzbudzenia o odpowiednich wymiarach.



Rys.8. Przekrój poprzeczny przewodów drażnionych w czołach zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360

Na rys. 9 przedstawiono obliczone rozkłady przyrostu temperatury w przewodach zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia. Wprowadzenie dodatkowych eliptycznych kanałów chłodzących w przewodach cewek uzwojenia wzbudzenia w części czołowej spowodowało, w porównaniu do rozwiązania bez tych kanałów, obniżenie:

- średniego przyrostu temperatury uzwojenia wzbudzenia do 52,4 K (czyli o 2,1 K),
- średniego przyrostu temperatury czoł uzwojenia wzbudzenia do 43,4 K (czyli o 8,3 K),
- maksymalnego przyrostu temperatury czoł uzwojenia wzbudzenia do 45,0 K (czyli o 9,2 K),
- przyrostu temperatury przewodów usytuowanych bezpośrednio pod kołpakami do 45,0 K (czyli aż o 9,2 K).



średni przyrost temperatury czoł: 43,4 K średni przyrost temp. części żłobkowej 55,4 K

średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia: 52,4 K

Rys. 9. Rozkłady przyrostu temp. w przewodach zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360 wzdłuż wysokości żłobka wirnika dla: $I_{fn}^*=2995$ A, $P_n^*=396$ MW, $\cos\phi_n=0,85$ ind.

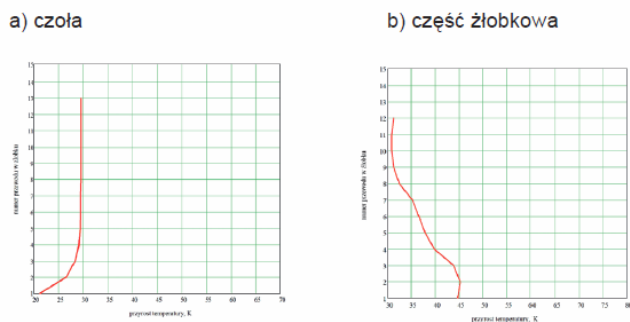
Polepszenie skuteczności chłodzenia wybranych przewodów cewek uzwojenia w części czołowej przez wprowadzenie dodatkowych kanałów eliptycznych nie ma istotnego wpływu na średnią temperaturę uzwojenia wzbudzenia. Średni przyrost temperatury zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia wynosi 52,4 K i jest on mniejszy od dopuszczanego przez wytwórcę (65 K) o 12,6 K. Istotną jednak zaletą tego rozwiązania jest znaczne obniżenie przyrostu temperatury w przewodach znajdujących się bezpośrednio pod kołpakami (aż o 9,2 K w porównaniu do rozwiązania bez kanałów eliptycznych), w których obecnie powstają deformacje na skutek dylatacji termicznej prowadzące ostatecznie do zwarć zwojowych oraz rozległych uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia.

Ocena stanu cieplnego zmodernizowanego wirnika generatora GTHW 360 przy obciążeniu generatora mocą 396 MW i współczynniku mocy pojemnościowym $\cos\phi=0,95$

Z obliczeń elektromagnetycznych zmodernizowanego generatora GTHW 360 wynika, że generuje on moc czynną do systemu elektroenergetycznego równą 396 MW przy współczynniku mocy $\cos\phi=0,95$ poj. przy prądzie wzbudzenia $I_f = 2490$ A. Na rys. 10 zamieszczono obliczone rozkłady przyrostu temperatury w przewodach zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia przy tym prądzie wzbudzenia.

W rozpatrywanym stanie pracy generatora średni przyrost temperatury zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia wynosi 34,6 K i jest on mniejszy od dopuszczanego przez wytwórcę (65 K) o 30,4 K. Przyrost temperatury przewodów uzwojenia wzbudzenia w części czołowej usytuowanych bezpośrednio pod kołpakami wynosi 29,5 K.

Reasumując, w rozpatrywanym rozwiązaniu konstrukcyjnym zmodernizowanego wirnika średnie przyrosty temperatury zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia podczas pracy generatora ze współczynnikami mocy pojemnościowym $\cos\phi=0,95$ i wydawaniu do systemu czynnej 396 MW są znacznie mniejsze od dopuszczanych przez wytwórcę. Zmodernizowane wirniki mogą zatem pracować w rozpatrywanym stanie pracy generatora.



średni przyrost temperatury czoł: 28,5 K średni przyrost temp. części żłobkowej 36,6 K

średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia: 34,6 K

Rys. 10. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia generatora GTHW 360 wzdłuż wysokości żłobka wirnika dla: $I_{fn}^*=2490$ A, $P_n^*=396$ MW, $\cos\phi=0,95$ poj.

Wnioski końcowe

Z przeprowadzonych obliczeń cieplnych wirnika generatora GTHW 360 w wersji fabrycznej wynika, że może on pracować przy obciążeniu mocą 396 MW i $\cos\phi_n=0,85$ indukcyjny, ponieważ średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia w tym stanie pracy generatora wynosi 55,5 K i jest on mniejszy od dopuszczanego przez wytwórcę (65 K) o 9,5 K. Z oględzin remontowanych wirników tego typu generatorów wynika, że w części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia nie są widoczne żadne uszkodzenia nawet po długim okresie eksploatacji. Jednak obecnie po długim okresie pracy generatorów obciążanych mocą nie większą od znamionowej (362 MW) dochodzi do deformacji czoł uzwojenia wzbudzenia powodujących zwarcia zwojowe, a w konsekwencji bardzo poważne uszkodzenia izolacji i nadtopienia przewodów. W związku z powyższym w projekcie modernizacji nie przewiduje się dokonywania jakichkolwiek zmian w części żłobkowej uzwojenia wzbudzenia. Natomiast bez wykonania modernizacji czoł uzwojenia wzbudzenia nie jest możliwa bezawaryjna praca wirnika po zwiększeniu mocy generatora do 396 MW przy $\cos\phi_n=0,85$ indukcyjny.

Modernizacja czoł uzwojenia wzbudzenia zakłada zachowanie kształtu bocznych kanałów chłodzących w przewodach przy zmianie ich wymiarów charakterystycznych: R_z i b_z oraz dodatkowo w przewodach cewek w czołach uzwojenia proponuje się wprowadzić osiowe kanały chłodzące o przekroju w kształcie elipsy. Zmiana ta powoduje poprawę chłodzenia przewodów usytuowanych bezpośrednio pod kołpakami. Ich przyrost temperatury maleje. Średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wyznaczony z obliczeń wynosi 52,4 K i jest on mniejszy od dopuszczanego przez producenta (65 K) o 12,6 K.

Z porównania wyników obliczeń cieplnych przy obciążeniu generatora mocą 396 MW i znamionowym współczynniku mocy obciążenia $\cos\phi_n=0,85$ ind. wynika, że opracowane przez TurboCare Poland S.A. rozwiązanie czoł uzwojenia wzbudzenia jest optymalne. Zapewnia ono najmniejszy przyrost temperatury przewodów czoł uzwojenia wzbudzenia ze wszystkich rozważanych propozycji modernizacji.

Dla wszystkich rozpatrywanych wersji modernizacji wirnika możliwa jest jego praca przy obciążeniu generatora mocą 396 MW i współczynniku mocy pojemnościowym $\cos\phi=0,95$. Średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia jest wtedy znacznie mniejszy od tego, który występuje przy współczynniku mocy znamionowym

$\cos\phi_n=0,85$ indukcyjny. W celu określenia możliwości pracy generatora przy współczynniku mocy pojemnościowym należy koniecznie rozpatrzyć ograniczenia wynikające z dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów skrajnych rdzenia stojana generatora.

LITERATURA

- [1] Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa 1973.
- [2] Krok R.: Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [3] Kapinos J., Krok R.: Ocena stanu cieplnego zmodernizowanego wirnika generatora GTHW-360 po podwyższeniu mocy do 396 MW przy $\cos\phi=0,85$ ind. oraz przy $\cos\phi=0,95$ poj. Praca niepublikowana (opracowanie wykonane na zlecenie TurboCare Poland S.A.), Gliwice, czerwiec 2010 r.

[4] Patent nr 218 474 pt.: „ Przewód uzwojenia wzbudzenia generatora”.

Autorzy:

dr hab. inż. Roman Krok, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, E-mail: roman.krok@polsl.pl
dr inż. Stefan Sieradzki, s_sieradzki@poczta.onet.pl
dr inż. Damian Kardas, EthosEnergy Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: damian.kardas@turbocare.pl
dr inż. Rafał Maniara, EthosEnergy Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: rafał.maniara@turbocare.pl
dr inż. Jan Kapinos, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, E-mail: jan.kapinos@polsl.pl
inż. Jan Adamek, EthosEnergy Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: jan.adamek@turbocare.pl