

NOWE UZWOJENIE STOJANA TURBOGENERATORA PRZEZNACZONEGO DO PRACY ELASTYCZNEJ

Roman KROK

Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32 237 12 29, e-mail: roman.krok@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono nowe uzwojenie stojana turbogeneratorsa o mocy 200 MW umożliwiające elastyczną pracę bloku po podwyższeniu mocy. Wykonane obliczenia oraz pomiary nagrzewania turbogeneratorsa zmodernizowanego i fabrycznego wykazały bardzo duże obniżenie temperatury nowego uzwojenia stojana w porównaniu do fabrycznego pomimo znacznego podwyższenia mocy turbogeneratorsa z 200 do 240 MW. Bardzo niska temperatura uzwojenia stojana oraz wykonanie wszystkich przewodów elementarnych pełnych i drażonych z jednego materiału (miedzi) zapewnia bezawaryjną pracę zmodernizowanego turbogeneratorsa przy pracy elastycznej. Innowacyjne rozwiązanie prętów uzwojenia stojana wykorzystano przy modernizacjach turbogeneratorsów związanych z realizacją programu dla polskiej energetyki „Blok 200+”.

Słowa kluczowe: rewitalizacja bloków energetycznych, elastyczna praca bloku, modernizacja turbogeneratorsa.

1. WPROWADZENIE

W polskim systemie elektroenergetycznym ciągle wzrasta całkowita moc wytwarzana przez generatory napędzane energią wiatru oraz panele fotowoltaiczne. Ze względu na brak możliwości regulacji mocy wydawanej z tych źródeł energii, zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju wymaga zainstalowania w systemie odpowiedniej liczby źródeł o regulowanej mocy.

Program dla energetyki „Blok 200+” przewiduje, że regulowanymi źródłami energii w polskim systemie elektroenergetycznym będą zmodernizowane bloki węglowe o mocy 200 MW.

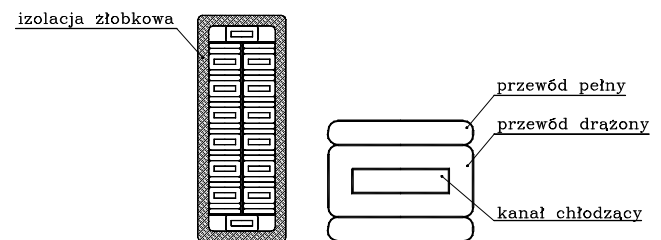
Obecnie na szeroką skalę prowadzone są badania mające na celu opracowanie innowacyjnych rozwiązań wdrażanych przy modernizacji bloków energetycznych. Zmniejszenie emisji dwutlenku węgla oraz zapewnienie elastycznej pracy bloku wymaga nie tylko modernizacji kotła i turbiny, ale również dokonania znacznych zmian w turbogeneratorsie. Opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych elementów bloku energetycznego dodatkowo utrudnia fakt, że w założeniach projektowych przewidziano znaczne podwyższenie mocy.

W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie jednego z najważniejszych elementów turbogeneratorsa, jakim jest uzwojenie stojana. Umożliwi ono znaczne podwyższenie mocy przy jednoczesnym dostosowaniu turbogeneratorsa do pracy elastycznej. Pomiary zmodernizowanych turbogeneratorsów w pełni potwierdziły realizację postawionych celów.

2. UZWOJENIE STOJANA TURBOGENERATORSA FABRYCZNEGO O MOCY 200 MW

2.1. Budowa uzwojenia stojana

Uzwojenie stojana turbogeneratorsa wykonane jest z prętów chłodzonych wodą destylowaną. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój pręta uzwojenia stojana, na którym widoczne są elementarne przewody pełne oraz drażone, którymi przepływa woda chłodząca. W rozwiązaniu fabrycznym przewody elementarne zarówno pełne, jak i drażone wykonane są z miedzi, przy czym na jeden przewód drażony przypadają dwa przewody pełne.



Rys. 1. Przekrój pręta uzwojenia stojana turbogeneratorsa fabrycznego

2.2. Model do obliczeń pola temperatury

Obliczenia rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa wykonano przy wykorzystaniu autorskiej metody zmodyfikowanych sieci cieplnych [1]. Metoda sieci cieplnych w ujęciu klasycznym [2, 3] umożliwia jedynie wyznaczenie średniej temperatury elementów maszyny elektrycznej. Zmodyfikowana metoda sieci cieplnych pozwala obliczyć pole temperatury w elementach maszyny elektrycznej. W uzwojeniu stojana dużego turbogeneratorsa różnica pomiędzy maksymalną i minimalną temperaturą wynosi nawet kilkadziesiąt K [4, 5], a w konsekwencji ocena stanu cieplnego wymaga wyznaczenia rozkładu temperatury.

W rozpatrywanym turbogeneratorsie kolektory wodne wlotowe i wylotowe w uzwojeniu stojana zainstalowane są od strony turbiny. Zmodyfikowaną sieć cieplną wystarczy zatem opracować dla dwóch prętów uzwojenia stojana (odległych o poskok uzwojenia) połączonych szeregowo. W modelu uwzględniono:

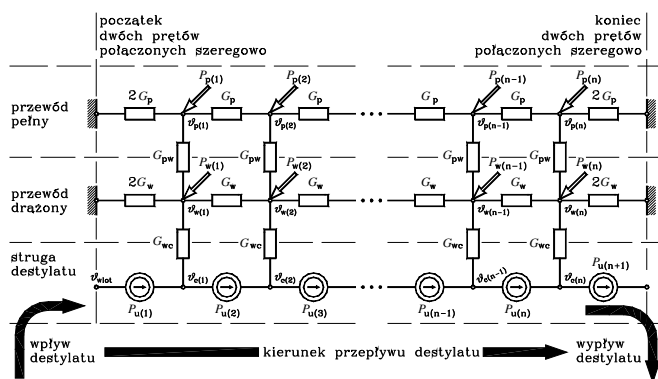
- straty dodatkowe wywołane zjawiskiem wypierania prądu w przewodach elementarnych,

- zależność strat mocy w przewodach uzwojenia od ich temperatury,
- nagrzewanie się wody przepływającej w kanałach chłodzących usytuowanych wewnątrz przewodów drążonych,
- zjawisko unoszenia ciepła w strugach wody chłodzącej.

W celu utworzenia zmodyfikowanej sieci cieplnej pręty uzwojenia stojana turbogeneratora podzielono wzdłuż kierunku przepływu wody na obszary różnicowe. Następnie elementem uzwojenia oraz strudze wody chłodzącej w obrębie wydzielonych obszarów różnicowych przyporządkowano węzły sieci cieplnej (rys. 2).

Na schemacie cieplnym występują następujące wielkości:

- przewodności dla strumieni ciepła przepływających odpowiednio wzdłuż przewodu pełnego (G_p) oraz drążonego (G_w),
- przewodności dla strumieni ciepła przepływających pomiędzy przewodem pełnym i drążonym (G_{pw}),
- przewodności dla strumieni ciepła przepływających na skutek konwekcji wymuszonej z powierzchni kanału w przewodzie drążonym do strugi wody chłodzącej (G_{wc}),
- straty mocy odpowiednio w przewodzie pełnym (P_p) oraz drążonym (P_w),
- moc cieplna unoszona przez strugę wody przepływającej przez ścianki obszarów różnicowych wydzielonych w kanałach chłodzących (P_u).



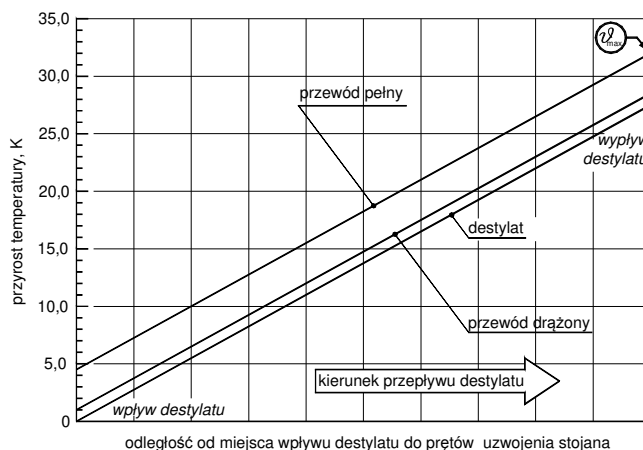
Rys. 2. Zmodyfikowana sieć cieplna dla uzwojenia stojana turbogeneratora fabrycznego o mocy 200 MW

Na bazie sieci cieplnej wykonano program komputerowy do obliczeń pola temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratora. Umożliwia on wyznaczenie rozkładu przyrostu temperatury w przewodach elementarnych pełnych i drążonych oraz w strudze wody przepływającej w kanałach chłodzących. Przyrosty temperatury określone są w odniesieniu do temperatury zimnej wody na wpływie do uzwojenia stojana.

2.3. Wyniki obliczeń cieplnych

Na rysunku 3 przedstawiono obliczony rozkład przyrostu temperatury w dwóch prętach uzwojenia stojana turbogeneratora fabrycznego. Rozkład przyrostu temperatury w strudze wody chłodzącej odbierającej ciepło wytwarzane w przewodach elementarnych jest liniowy, a w konsekwencji rozkład przyrostu temperatury w przewodach elementarnych pełnych i drążonych są również liniowe. Największy przyrost temperatury mają przewody pełne na końcu pręta, na którym wypływa woda chłodząca.

Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów. Różnica pomiędzy temperaturami obliczonymi i zmierzonymi czujnikami zabudowanymi w uzwojeniu stojana nie przekracza 3 K.



Rys. 3. Rozkład przyrostu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratora fabrycznego przy mocy 200 MW

3. KONCEPCJA NOWEGO UZWOJENIA STOJANA TURBOGENERATORA

Badania dotyczące doskonalenia konstrukcji turbogeneratorów są prowadzone na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej od 1991 roku. Przedmiotem prac jest opracowanie nowych rozwiązań głównych węzłów konstrukcyjnych turbogeneratorów, w tym przeznaczonych dla jednostek o mocy 200 MW. Większość z tych rozwiązań została wdrożona do produkcji w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu.

Pierwsze prace dotyczące modernizacji turbogeneratorów o mocy 200 MW rozpoczęte w 1993 roku dotyczyły opracowania zmian zapewniających możliwość podwyższenia mocy o kilkanaście MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy. Całkowita moc generowana wtedy przez odnawialne źródła energii zainstalowane w systemie elektroenergetycznym była niewielka, a w konsekwencji bloki węglowe pracowały przy stałym obciążeniu. Modernizacja uzwojenia stojana turbogeneratora polegała jedynie na niewielkim zwiększeniu przekroju czynnego prętów przez zastosowanie cieńszych warstw izolacji wykonanych z nowych materiałów elektroizolacyjnych.

Dalsze podwyższenie mocy turbogeneratora z 200 do 220 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy wymagało zmiany konstrukcji prętów uzwojenia stojana. Dodatkowo zmodernizowane turbogeneratory miały być zainstalowane w elektrowni w Bułgarii. Warunki klimatyczne tego kraju powodują, że temperatura wody destylowanej chłodzącej uzwojenie stojana osiąga w lato wartości maksymalne wyższe niż w Polsce. Zaprojektowano nowe pręty uzwojenia stojana, w których zmniejszono liczbę przewodów drążonych oraz zwiększono liczbę przewodów pełnych - pomiędzy przewodami drążonymi w kolumnie umieszczono po trzy przewody pełne. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zmniejszenie liczby przewodów drążonych powoduje zmniejszenie powierzchni oddawania ciepła do wody, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Maleją jednak znacznie straty dodatkowe powodowane wypieraniem prądu w przewodach elementarnych. Straty te zależą od wysokości przewodów elementarnych i są bardzo duże dla wysokich

przewodów drażonych. Ostatecznie wprowadzone zmiany spowodowały obniżenie temperatury uzwojenia stojana turbogeneratora. Do wyznaczenia wymiarów przewodów elementarnych wykorzystano autorskie programy komputerowe do obliczeń pola temperatury w uzwojeniu stojana [1]. Sprawdzające pomiary cieplne wykonane przy dopuszczeniu turbogeneratorów do pracy wykazały uzyskanie założonych w projekcie celów. Temperatura uzwojenia stojana po zwiększeniu mocy turbogeneratora do 220 MW przy zachowanym znamionowym współczynniku mocy oraz podwyższonej temperaturze zimnej wody destylowanej nie przekroczyła wartości dopuszczalnej.

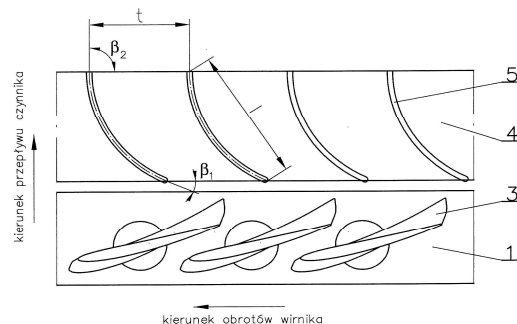
Kolejne podwyższenie mocy modernizowanych turbogeneratorów do 240 MW wymagało dalszej zmiany konstrukcji uzwojenia stojana. Wykonane autorskie programy komputerowe do badań wpływu liczby oraz wymiarów przewodów elementarnych pełnych i drażonych na rozkład przyrostu temperatury [1] umożliwiły zaprojektowanie nowego uzwojenia stojana, w którym znacznie zmniejszono straty mocy. Nowe pręty uzwojenia stojana turbogeneratora zawierają dwie kolumny przewodów elementarnych, przy czym pomiędzy przewodami drażonymi znajdują się po cztery przewody pełne.

Przy dużych zmianach obciążenia turbogeneratora zmienia się w szerokim przedziale temperatura uzwojenia stojana. Różnica wartości współczynników wydłużalności termicznej miedzi oraz izolacji skutkuje powstawaniem naprężeń w prętach uzwojenia stojana. Efektem przejścia turbogeneratora z pracy ze stałym obciążeniem do pracy elastycznej są częste uszkodzenia uzwojenia stojana. Rozwiązaniem tego problemu jest bardzo duże obniżenie temperatury uzwojenia stojana turbogeneratora. Cel ten można zrealizować poprzez zmianę konstrukcji prętów uzwojenia stojana zapewniającą obniżenie strat mocy połączonej z poprawą chłodzenia rdzenia stojana.

Pręty uzwojenia stojana umieszczone są w żłobkach rdzenia stojana. Straty wytwarzane w uzwojeniu stojana odprowadzane są do wody destylowanej przepływającej w przewodach drażonych oraz do rdzenia stojana. Temperaturę uzwojenia stojana można zatem obniżyć poprawiając skuteczność chłodzenia rdzenia. Rdzeń stojana wykonany jest w formie pakietu blach. W kanałach w rdzeniu stojana przepływa wodór chłodzący, którego przepływ wymuszają wentylatory osadzone na wale wirnika. Wykorzystując programy komputerowe do obliczeń wentylacyjnych wykonano projekty nowych wentylatorów o różnej liczbie łopatek, a następnie zbudowano w skali modele fizyczne [6, 7]. Modele te badano następnie w tunelu aerodynamicznym. Dzięki możliwości nastawiania łopatek znaleziono optymalny kąt natarcia zapewniający maksymalny wzrost wydajności wentylatora. Na podstawie wyników badań modelowych zaprojektowano nowe wentylatory wirnika dla turbogeneratora o mocy 200 MW (rys. 4). Przeprowadzone badania wykazały również, że możliwy jest dodatkowy wzrost wydajności wentylatorów poprzez zastosowanie tylnych łopatek kierowniczych. Wentylatory wirnika zmodernizowanego turbogeneratora wyposażono w tylne łopatki kierownicze (rys. 5).



Rys. 4. Nowe wentylatory wirnika turbogeneratora

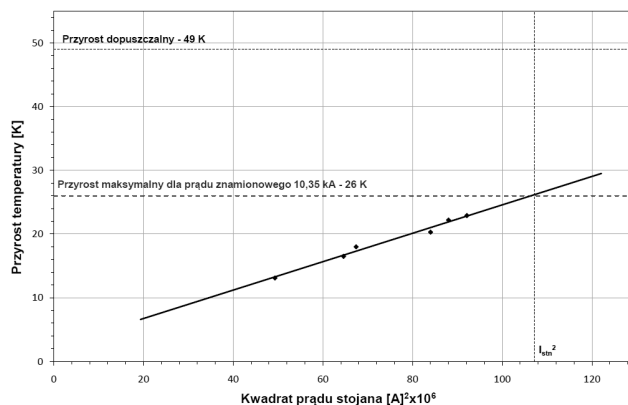


Rys. 5. Nowy wentylator wyposażony w tylne łopatki kierownicze

4. POMIARY CIEPLNE NOWEGO UZWOJENIA I RDZENIA STOJANA TURBOGENERATORA

Po modernizacji turbogeneratora wykonano sprawdzające pomiary cieplne mające na celu dopuszczenie do pracy przy mocy znamionowej podwyższonej do 240 MW i znamionowym współczynniku mocy.

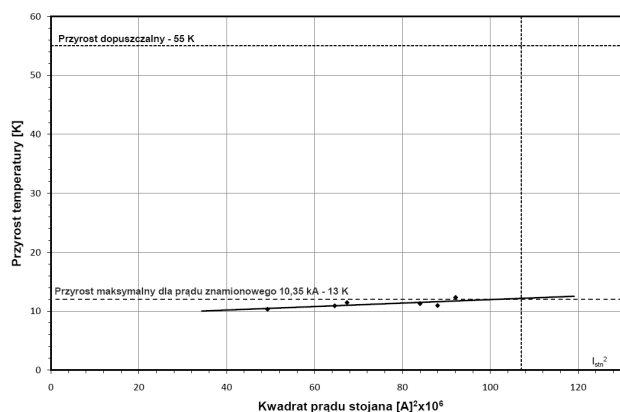
Na rysunku 6 przedstawiono ekstrapolację zmierzonej zależności maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana od kwadratu prądu stojana. Przy znamionowym prądzie stojana 10,35 kA (odpowiadającym obciążeniu turbogeneratora znamionową mocą podwyższoną do 240 MW) maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana wynosi zaledwie 26 K i jest aż o 23 K mniejszy od dopuszczalnego.



Rys. 6. Zależność zmierzonego maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana od kwadratu prądu stojana

W wyniku wprowadzonych zmian konstrukcyjnych uzyskano znaczne zmniejszenie maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana. Dla porównania, w turbogeneratorze fabrycznym przy obciążeniu mocą 200 MW maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana wynosi 32 K (rys. 3).

Uzyskane zmniejszenie przyrostu temperatury uzwojenia stojana po modernizacji turbogeneratorsa jest spowodowane nie tylko zmniejszeniem strat mocy po zmianie konstrukcji prętów, ale również znaczną poprawą skuteczności chłodzenia rdzenia stojana dzięki zastosowaniu nowych wentylatorów wirnika o zwiększonej wydajności. Bardzo dobre odprowadzanie ciepła z rdzenia stojana potwierdzają pomiary cieplne turbogeneratorsa. Na rysunku 7 przedstawiono zależność zmierzzonego maksymalnego przyrostu temperatury rdzenia stojana zmodernizowanego turbogeneratorsa od kwadratu prądu stojana. Maksymalny przyrost temperatury rdzenia stojana odpowiadający obciążeniu turbogeneratorsa mocą 240 MW wynosi zaledwie 13 K i jest aż o 42 K mniejszy od dopuszczalnego. Należy zaznaczyć, że pomiar nagrzewania wykonano dla kilku zmodernizowanych turbogeneratorsów uzyskując powtarzalność wyników.



Rys. 7. Zależność zmierzzonego maksymalnego przyrostu temperatury rdzenia stojana od kwadratu prądu stojana

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Nowe uzwojenie stojana umożliwia podwyższenie mocy oraz elastyczną pracę turbogeneratorsa.

Zastosowanie nowych prętów do budowy uzwojenia stojana oraz nowych wentylatorów wirnika o zwiększonej wydajności skutkuje bardzo małym przyrostem maksymalnej temperatury uzwojenia stojana, który przy podwyższeniu mocy turbogeneratorsa do 240 MW wynosi jedynie 26 K. Powoduje to znaczne zawężenie przedziału zmiany długości prętów uzwojenia stojana przy zmianie obciążenia turbogeneratorsa, co w konsekwencji zapobiega uszkodzeniom powodowanym elastyczną pracą bloku.

Zmodernizowane turbogeneratorsa z nowym uzwojeniem stojana pracują bezawaryjnie od wielu lat w elektrowniach w Polsce i krajach Unii Europejskiej przy podwyższonej mocy znamionowej i elastycznej pracy bloku.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Krok R.: Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia habilitacyjna, Gliwice 2010.
2. Mukosiej J.: Universal program for thermal calculation of electric machines by the method of equivalent thermal networks (ETN), Proceedings of IECM'96, Vigo, Spain 1996, s. 377-381.
3. Swift G., Molinski T.S., Lehn W.: A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit, IEEE Transactions on Power Delivery, N°16, 2001, s. 171-175.
4. Gurazdowski D., Zawilak J.: Rozkład temperatury w przecie uzwojenia stojana turbogeneratorsa, Zeszyty Problemowe -Maszyny Elektryczne, Komel, nr 75, 2006, s. 177-184.
5. Gurjewicz E.I., Filin A.G.: Pole temperatury w uzwojeniu stojana dużego turbogeneratorsa przy lokalnych uszkodzeniach wewnętrznego wodnego systemu chłodzenia, Elektryczestwo, N°3, 2010, s. 23-29.
6. Otte J., Dziuba J., Kardas D., Adamek J., Prysok E.: Intensyfikacja chłodzenia generatorów dużej mocy, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8, 2013, s. 351-357.
7. Sieradzki S., Adamek J., Kardas D., Krok R., Kapinos J., Prysok E.: Możliwości wzrostu mocy znamionowej turbogeneratorsów typu TWW-230 TWW-220-2A/L po modernizacji wentylatorów, Przegląd Elektrotechniczny nr 4a, 2012, s. 68-72.

NEW STATOR WINDING OF TURBOGENERATOR DEDICATED TO ELASTIC OPERATION

A proposal for changing the construction of turbogenerator stator winding is set forth in the paper. This is a winding of turbogenerator rated at 200 MW and proposed modernization should ensure elastic operation of the power unit and, at the same time, significant increase of power. This proposed design leads to reduction of power losses in stator winding bars (in relation to the original winding). In order to achieve a significant decrease of stator winding temperature it is additionally proposed to use new rotor fans (with improved efficiency) to enhance cooling of turbogenerator stator core. The conducted calculations and thermal (heating) measurements of original and modernized turbogenerators show a significant decrease of new stator winding temperature in relation to the original winding, even though turbogenerator's power has been raised from 200 to 240 MW (power factor has been maintained at its nominal value). The innovative design of stator winding bars and rotor fans was used in modernizing Polish turbogenerators in the framework of the Polish power industry programme „Blok 200+” („200+ power units”). New stator winding and fans have also been assembled into many turbogenerators operating not only in Poland, but in EU countries as well. Experimental verification of modernized turbogenerators operating in power plants and long-term periods of reliable, failure-free operation fully confirm the correctness of design assumptions.

Keywords: revitalization of power units, elastic operation of power unit, turbogenerator modernization.