

*Konferencja „Jakość Dostawy Energii Elektrycznej –
wspólna odpowiedzialność wytwórców, dystrybutorów, konsumentów i prosumentów”*

Częstochowa, 28-29 listopada 2019

doi: 10.32016/1.67.08

PROPOZYCJA WYKORZYSTANIA ODSTAWIANYCH GENERATORÓW TGH-120 DO KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ

Roman KROK

Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: +48 32 237 17 46 e-mail: roman.krok@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia techniczne związane z dostosowaniem generatora TGH-120 do pracy w charakterze kompensatora synchronicznego. Konieczność wytwarzania dodatkowej mocy biernej indukcyjnej w systemie elektroenergetycznym wynika z zastępowania starych bloków węglowych z generatorami synchronicznymi źródłami odnawialnymi. Z doświadczeń remontowych wynika, że generatory TGH-120 po przejściu na pracę ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie oraz częstych uruchomieniach ulegają powtarzającym się uszkodzeniom, w szczególności dotyczy to uzwojenia wzbudzenia. Przedstawione nowe wdrożone do produkcji uzwojenie wzbudzenia zapewnia bezawaryjną eksploatację generatora przy dużych i częstych zmianach prądu wzbudzenia związanych z koniecznością regulacji mocy biernej.

Słowa kluczowe: kompensator synchroniczny, modernizacja generatora synchronicznego, transformacja systemu elektroenergetycznego.

1. WPROWADZENIE

W polskim systemie elektroenergetycznym ciągle wzrasta całkowita moc wytwarzana przez źródła odnawialne oraz likwidowane są stare bloki węglowe [1, 2]. Większość źródeł odnawialnych nie ma możliwości generowania mocy biernej indukcyjnej. W celu zbilansowania mocy biernej w systemie elektroenergetycznym konieczne jest wytworzenie dodatkowej mocy biernej indukcyjnej.

W ostatnich latach odstawiło wiele bloków z generatorami TGH-120. Przed ich likwidacją warto rozważyć możliwość dalszej pracy w charakterze kompensatorów synchronicznych. Przy niewielkich kosztach modernizacji można mieć do dyspozycji bardzo duże regulowane źródła mocy biernej indukcyjnej zainstalowane w wielu różnych miejscach systemu elektroenergetycznego.

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej wspólnie z firmą EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu prowadził prace dotyczące modernizacji generatora TGH-120 [3] w celu podwyższenia mocy z jednoczesnym przystosowaniem do częstych uruchomień i pracy ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie. Zaprojektowane nowe uzwojenie wzbudzenia, w którym zastosowano wiele innowacyjnych rozwiązań jest dostosowane do pracy przy dużych i częstych zmianach prądu wzbudzenia. Wykonane szczegółowe przeglądy okresowe pracującego zmodernizowanego generatora potwierdziły całkowite wyeliminowanie powtarzających się uszkodzeń fabrycznego uzwojenia wzbudzenia.

Zastosowanie nowego uzwojenia wzbudzenia w odstawianych generatorach TGH-120 umożliwi ich dalszą wieloletnią eksploatację w charakterze kompensatorów synchronicznych. Pozwala to na budowanie kolejnych dużych elektrowni wiatrowych i słonecznych bez instalowania dodatkowych urządzeń wytwarzających moc bierną indukcyjną, na którą jest zapotrzebowanie w systemie elektroenergetycznym.

2. PRZYCZYNY WZROSTU AWARYJNOŚCI GENERATORÓW TGH-120

Generatory TGH-120 pracujące przy stałym obciążeniu i niewielkiej liczbie uruchomień charakteryzowały się bardzo małą awaryjnością. Reżim pracy generatorów synchronicznych w systemie elektroenergetycznym ulega jednak radykalnej zmianie. Obecnie większość generatorów pracuje ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie oraz często przeprowadzane są uruchomienia. W przypadku rozpatrywanego generatora synchronicznego zmiana warunków pracy skutkuje powtarzającymi się uszkodzeniami, a w konsekwencji licznymi odstawieniami awaryjnymi oraz kosztownymi remontami.

W ramach współpracy Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej i firmy EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu przeprowadzono analizę dokumentacji z przeglądów i remontów wielu generatorów typu TGH-120 [3]. Określono, które elementy generatora nie są dostosowane do pracy przy zmiennym obciążeniu. Uzyskane wyniki badań wykorzystano następnie przy opracowaniu projektu modernizacji generatora w celu podwyższenia mocy do 130 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy z jednoczesnym dostosowaniem do pracy regulacyjnej.

Elementem generatora synchronicznego, który ulega powtarzającym się uszkodzeniom jest uzwojenie wzbudzenia. W generatorach synchronicznych pracujących przy dużych i częstych zmianach obciążenia oraz częstych uruchomieniach nawet po kilku miesiącach od wymiany uzwojenia wzbudzenia dochodziło do jego powtórnego uszkodzenia. Po zdjęciu kołpaków w wirniku generatora widoczne są uszkodzenia czoł cewek uzwojenia wzbudzenia (rys. 1). Ze względu na rozległy charakter uszkodzeń konieczna jest wymiana całego uzwojenia wzbudzenia generatora.



Rys. 1. Widok czołowy fabrycznego uzwojenia wzbudzenia generatora

Z dokumentacji remontowej wynika, że inne elementy generatora TGH-120 poza uzwojeniem wzbudzenia praktycznie nie ulegają uszkodzeniom. Zastosowanie nowego uzwojenia wzbudzenia odpornego na duże i częste zmiany prądu wzbudzenia wyeliminuje powstające obecnie liczne awarie generatora synchronicznego.

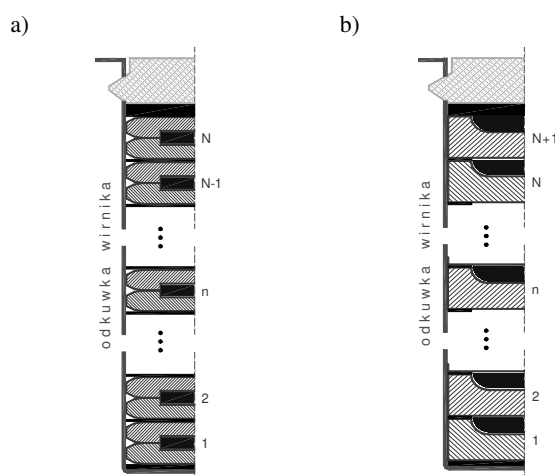
3. MODERNIZACJA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Wnioski z analizy dokumentacji remontowej wykorzystano przy opracowaniu projektu modernizacji generatora TGH-120 w celu podwyższenia mocy do 130 MW z jednoczesnym przystosowaniem do częstych uruchomień i pracy ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie. Najtrudniejszym problemem do rozwiązania było zaprojektowanie nowego uzwojenia wzbudzenia.

Na rysunku 2a przedstawiono przekrój poprzeczny przewodów fabrycznego uzwojenia wzbudzenia generatora. Pojedynczy przewód składa się z dwóch bardzo cienkich i szerokich taśm miedzianych wyprofilowanych w kształcie litery C, które po złożeniu tworzą wewnętrzny kanał wentylacyjny. Przy dużych zmianach prądu wzbudzenia zmienia się w szerokim przedziale temperatura przewodów uzwojenia, co powoduje dużą zmianę długości. W strefie czołowej cewek uzwojenia wzbudzenia dochodzi do pofalowania cienkich taśm miedzianych, co skutkuje uszkodzeniem izolacji zwojowej, a następnie powstaniem łuku elektrycznego. Dodatkowo w wyniku przesuwania się względem siebie taśm miedzianych dochodzi do zmniejszenia drożności kanałów wentylacyjnych, co wywołuje lokalnie duży wzrost temperatury, a w konsekwencji uszkodzenie termiczne przekładek izolacyjnych.

W zaprojektowanym nowym uzwojeniu wzbudzenia generatora zastosowano inny kształt przewodów. Na rysunku 2b przedstawiono przekrój poprzeczny przewodów nowego uzwojenia wzbudzenia. Znacznie zwiększono wysokość przewodów w porównaniu do

rozwiązania fabrycznego rezygnując dodatkowo z ich podziału na dwie cienkie taśmy miedziane, co prowadzi do bardzo dużego zwiększenia sztywności czoł cewek uzwojenia wzbudzenia. Zmieniając kształt i wymiary kanałów wentylacyjnych zwiększono o 23% powierzchnię oddawania ciepła z przewodów uzwojenia wzbudzenia do medium chłodzącego w odniesieniu do rozwiązania fabrycznego. Zwiększono liczbę przewodów w żłobkach o 1, co umożliwia uzyskanie wymaganego przepływu uzwojenia wzbudzenia przy mniejszym prądzie wzbudzenia. Zastosowane nowe przekładki izolacyjne pomiędzy przewodami są z jednej strony klejone, a z drugiej szlifowane dla zapewnienia małego współczynnika tarcia. Takie rozwiązanie pozwala na swobodne wydłużanie przewodów uzwojenia wzbudzenia przy wzroście temperatury.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przewodów uzwojenia wzbudzenia generatora: a) fabrycznego, b) zmodernizowanego

Na rysunku 3 przedstawiono odkuwkę wirnika generatora z nawiniętym nowym uzwojeniem wzbudzenia.



Rys. 3. Odkuwka wirnika generatora z nowym uzwojeniem wzbudzenia

W zmodernizowanym generatorze powiększono odporność wirnika na obciążenie niesymetryczne przez zastosowanie klatki tłumiącej o strukturze dwuwarstwowej ciągłej wzdłuż całej długości beczki wirnika (rysunek 3).



Rys. 4. Nowa klatka tłumiąca w wirniku generatora

Na rysunku 5 przedstawiono gotowy wirnik zmodernizowanego generatora TGH-120.



Rys. 5. Widok ogólny zmodernizowanego wirnika generatora

W wirniku generatora zmodernizowano wyprowadzenie uzwojenia do pierścieni ślizgowych uzyskując znacznie lepszą szczelność wnętrza generatora względem komory pierścieni ślizgowych. Dokonano modernizacji sposobu osadzenia kołpaków końcowych polegającej na zastosowaniu kołpaków mocowanych jednostronnie do beczki wirnika przy wykorzystaniu nakrętek zabezpieczających kołpaki przed zsunieniem.

Zmodernizowany generator ma nowe uzwojenie stojana, w którym straty mocy są mniejsze o 19% w porównaniu do fabrycznego oraz uzyskano jednakowe temperatury w warstwie górnej i dolnej uzwojenia. Unowocześniono izolację główną uzwojenia poprzez zastosowanie izolacji klasy F w miejsce dotychczasowej izolacji klasy B. Udoskonalono również mocowanie czoł uzwojenia stojana.

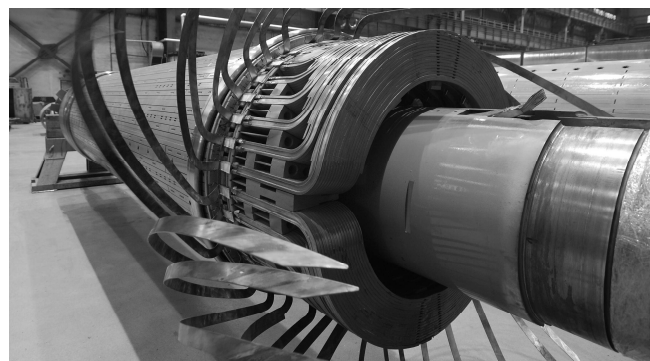
Do zaprojektowania nowego uzwojenia wzbudzenia i stojana generatora wykorzystano własne programy komputerowe opracowane na podstawie autorskiej metody zmodyfikowanych sieci cieplnych [4, 5]. Z wykonanych obliczeń cieplnych wynika, że w zmodernizowanym generatorze obciążonym mocą 130 MW średnia temperatura uzwojenia wzbudzenia jest jedynie większa o 3,5 K, zaś maksymalna temperatura uzwojenia stojana jest mniejsza o 2,5 K w porównaniu do generatora fabrycznego obciążonego mocą 120 MW. Temperatury wszystkich aktywnych elementów zmodernizowanego generatora przy obciążeniu mocą podwyższoną do 130 MW i znamionowym współczynniku mocy są mniejsze od dopuszczalnych.

4. BADANIA I PRZEGLĄDY ZMODERNIZOWANEGO GENERATORA

Po podłączeniu zmodernizowanego generatora do systemu elektroenergetycznego wykonano próbę

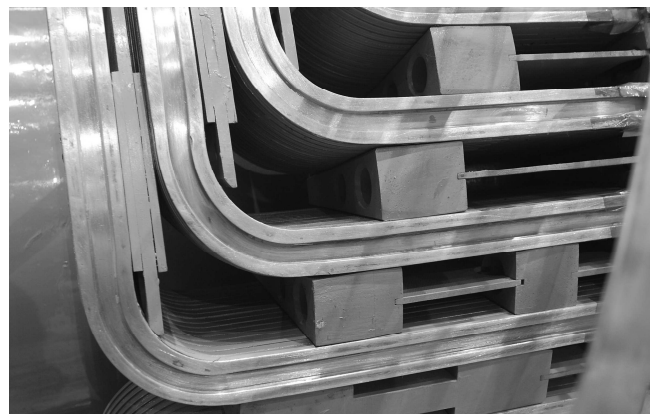
nagrzewania. Przeprowadzone pomiary potwierdziły poprawność wykonanych przy projektowaniu obliczeń cieplnych zmodernizowanego generatora. Zmierzone temperatury wszystkich elementów aktywnych generatora były mniejsze od dopuszczalnych. Zmodernizowany generator dopuszczono do pracy przy obciążeniu mocą podwyższoną do 130 MW i zachowanym znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,8$.

Zmodernizowany generator pracuje bezawaryjnie ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie oraz częstych uruchomieniach. Po 5 latach eksploatacji dokonano szczegółowego przeglądu generatora. W celu określenia stanu technicznego uzwojenia wzbudzenia w wirniku generatora zdjęto kołpaki (rysunek 6).



Rys. 6. Wirnik zmodernizowanego generatora po zdjęciu kołpaków

W czołach cewek uzwojenia wzbudzenia generatora nie stwierdzono: deformacji przewodów, śladów po łuku elektrycznym oraz uszkodzeń izolacji i elementów mocujących (rysunek 7).



Rys. 7. Czoła cewek uzwojenia wzbudzenia zmodernizowanego generatora po 5. latach eksploatacji

Wprowadzone zmiany konstrukcyjne przyniosły spodziewany efekt w postaci całkowitego wyeliminowania powtarzających się uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia generatora. Po 5 latach eksploatacji nie stwierdzono żadnych zmian w strefie czołowej uzwojenia wzbudzenia generatora. Stan techniczny pozostałych elementów generatora również nie budził żadnych zastrzeżeń.

5. PRACA GENERATORA W CHARAKTERZE KOMPENSATORA SYNCHRONICZNEGO

Odstawiane generatory TGH-120 mogą dalej pracować w systemie elektroenergetycznym, jako kompensatory synchroniczne. Generatory te w wersji fabrycznej mają

znamionową moc czynną 120 MW i moc pozorną 150 MV·A. Obliczenia elektromagnetyczne generatora fabrycznego pracującego w charakterze kompensatora synchronicznego wykonano z wykorzystaniem schematu zastępczego [6]. Kompensator synchroniczny jest w stanie wytwarzać maksymalną moc bierną indukcyjną 128 Mvar przy znamionowym prądzie wzbudzenia i prądzie stojana równym 85% wartości znamionowej. Konieczne zmiany generowanej mocy biernej indukcyjnej wymagają w kompensatorze synchronicznym ciągłej regulacji prądu wzbudzenia w szerokim zakresie. Takie warunki pracy będą skutkowały powtarzającymi się uszkodzeniami uzwojenia wzbudzenia, a w konsekwencji kosztownymi odstawieniami awaryjnymi i remontami kompensatora.

Zaproponowana zmiana konstrukcji uzwojenia wzbudzenia umożliwi podwyższenie mocy znamionowej generatora do 130 MW, co przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy $\cos\varphi_n=0,8$ ind. oznacza zwiększenie znamionowej mocy pozornej do 162,5 MV·A. Z wykonanych obliczeń elektromagnetycznych wynika, że zmodernizowany generator pracując w charakterze kompensatora synchronicznego może wytwarzać maksymalną moc bierną indukcyjną 140 Mvar przy znamionowym prądzie wzbudzenia i prądzie stojana równym 86% prądu znamionowego. Dodatkowo zastosowanie zaprojektowanego nowego uzwojenia wzbudzenia zapewni bezawaryjną pracę kompensatora synchronicznego przy regulacji wytwarzanej mocy biernej indukcyjnej w szerokim zakresie.

Należy zaznaczyć, że przy obliczeniu maksymalnej mocy biernej indukcyjnej wytwarzanej przez kompensator synchroniczny uwzględniono jedynie ograniczenie prądu wzbudzenia i stojana wynikające z maksymalnej dopuszczalnej temperatury uzwojeń. Znamionowa moc bierna kompensatora synchronicznego może być określona dopiero po wykonaniu pełnego projektu modernizacji uwzględniającego między innymi konieczne zmiany konstrukcyjne elementów skrajnych rdzenia stojana. Przy jej wyznaczeniu należy dodatkowo uwzględnić ograniczenia związane ze stabilnością pracy oraz nagrzewaniem elementów skrajnych rdzenia stojana kompensatora synchronicznego [7].

6. PODSUMOWANIE

Należy rozważyć możliwość wykorzystania odstawianych generatorów TGH-120 w charakterze

kompensatorów synchronicznych. Przy niewielkim nakładzie finansowym można wykonać ich modernizację uzyskując regulowane źródła mocy biernej indukcyjnej w różnych miejscach systemu elektroenergetycznego. Kompensator synchroniczny po modernizacji będzie miał znamionową moc bierną indukcyjną 140 Mvar. Sprawdzona w eksploatacji nowe uzwojenie wzbudzenia zapewni jego wieloletnią bezawaryjną pracę.

Pozyskanie bardzo niewielkim kosztem wielu dużych regulowanych źródeł mocy biernej indukcyjnej w systemie elektroenergetycznym otwiera możliwości dalszego wzrostu mocy wytwarzanej przez odnawialne źródła energii bez niebezpieczeństwa naruszenia bilansu mocy biernej oraz konieczności instalowania dodatkowych urządzeń do kompensacji mocy biernej.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Popczyk J.: Energetyka rozproszona. Od dominacji energetyki w gospodarce do zrównoważonego rozwoju, od paliw kopalnych do energii odnawialnej i efektywności energetycznej, Polski Klub Ekologiczny Okręg Mazowiecki, Warszawa 2011.
2. Skoczkowski T., Bielecki S., Baran Ł.: Odnawialne źródła energii - problemy i perspektywy rozwoju w Polsce, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3, Warszawa 2016, s. 190-195.
3. Adamek J. Krok R.: Modernizacja wirnika w celu zwiększenia mocy znamionowej generatora TGH-120 do 130 MW, Energetyka, Nr 9, Katowice 2005, s. 594-597.
4. Krok R.: Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice 2010.
5. Krok R.: Modele cieplne stosowane przy projektowaniu turbogeneratorów, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12a, Warszawa 2011, s. 83-87.
6. Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2018.
7. Adamek J., Borecki H., Cholewa S., Drozdowski J., Dzioba W., Matulka W., Niedźwiedz A., Rogoziński S., Słowiński B., Szydłowski M., Śliwiński S.: Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych, Wydawca Energopomiar - Elektryka, Gliwice 2009.

SCHEME FOR APPLYING UNUSED TGH-120 GENERATORS TO REACTIVE POWER COMPENSATION

Technical issues related to adoption of TGH-120 generator for the role of reactive power compensator are presented in this paper. During the on-going transformation of Polish power system, numerous renewable energy sources are connected into the system, while old coal-fired power units are being eliminated. Most RES cannot generate inductive reactive power. Balancing reactive power in power system requires installation of devices generating reactive inductive power. After modernization, disconnected generators TGH-120 may operate as synchronous compensators. The present maintenance practice shows that when discussed generators operate in the wide range of active and reactive loads and with frequent start-ups, they are prone to repetitive damages. This is in particular true in case of field winding. A new design of excitation winding is presented in the paper; this has already been implemented in production. Such winding does not fail when changes of excitation current are high and frequent, such operating conditions are enforced by continuous control of reactive power. This performance has been verified by many years of failure-free operation of modernized generator and periodical overhauls of the rotor.

Keywords: synchronous compensator, modernization of synchronous generator, transformation of power system.