

doi:10.15199/48.2020.03.08

## Przystosowanie generatorów klasy 120 MW do pracy w charakterze kompensatora synchronicznego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problemy techniczne związane z przystosowaniem generatorów klasy 120 MW do pracy w charakterze regulowanych źródeł mocy biernej. Konieczność wytwarzania dodatkowej mocy biernej indukcyjnej w systemie elektroenergetycznym wynika z zastępowania starych bloków węglowych z generatorami synchronicznymi źródłami odnawialnymi. Zapewnienie bezawaryjnej pracy kompensatora synchronicznego przy ciągłej regulacji mocy biernej wymaga modernizacji niektórych węzłów konstrukcyjnych.

**Abstract.** Technical problems arising during adaptation of 120MW class generators for reactive power sources are presented in the paper. Necessity of providing additional inductive reactive power in the power grid results from ongoing replacement of old coal-fired power units with synchronous generators for renewable energy sources. The failure-free operation of synchronous compensator with continuous control of reactive power requires some modernization of machine design. (**Adaptation of 120 MW class generators for synchronous compensator operation**).

**Słowa kluczowe:** kompensator synchroniczny, modernizacja generatora synchronicznego, transformacja systemu elektroenergetycznego, generacja mocy biernej indukcyjnej.

**Keywords:** synchronous compensator, modernization of synchronous generator, transformation of power system, generation of inductive reactive power.

### 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 klasy 120 MW. 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 klasy 120 MW [3] 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. 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 umożliwi ich dalszą wieloletnią eksploatację w charakterze kompensatorów synchronicznych. Umożliwia to budowanie dużych elektrowni wiatrowych i słonecznych bez instalowania dodatkowych urządzeń wytwarzających moc bierną indukcyjną, na którą jest zapotrzebowanie w systemie elektroenergetycznym.

### Przyczyny wzrostu awaryjności generatorów

Generatory klasy 120 MW pracując przy stałym obciążeniu i niewielkiej liczbie uruchomień charakteryzowały się bardzo małą awaryjnością. Reżim pracy generatorów w systemie elektroenergetycznym ulega jednak znacznej zmianie. Obecnie większość generatorów pracuje ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w

szerokim zakresie oraz często wykonywane są uruchomienia. W przypadku rozpatrywanego generatora 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 szczegółową analizę dokumentacji z przeglądów i remontów wielu generatorów klasy 120 MW. Na jej podstawie określono, które elementy generatora nie są dostosowane do pracy ze zmiennym obciążeniem, a w konsekwencji ulegają powtarzającym się uszkodzeniom. Wyniki pracy wykorzystano 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 najczęściej ulega powtarzającym się uszkodzeniom jest uzwojenie wzbudzenia. W generatorach fabrycznych 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 były uszkodzenia czoł cewek uzwojenia wzbudzenia (rys. 1). Ze względu na rozległy charakter uszkodzeń konieczna była wymiana całego uzwojenia wzbudzenia generatora.



Rys. 1. Widok czoł uzwojenia wzbudzenia fabrycznego generatora

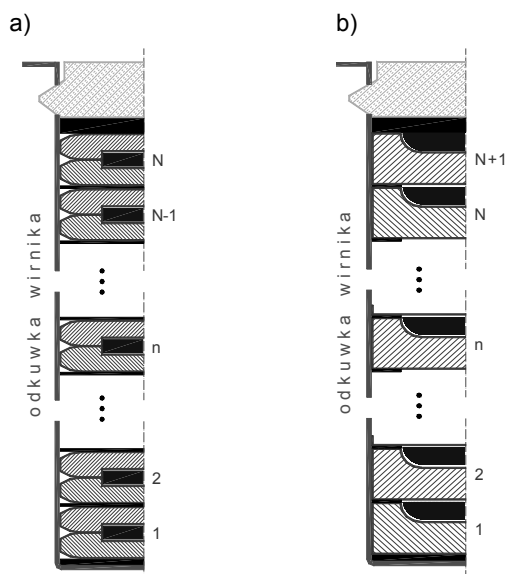
Z dokumentacji remontowej wynika, że inne elementy generatora znacznie rzadziej ulegają uszkodzeniom.

Zastosowanie zatem nowego uzwojenia wzbudzenia odpornego na duże i częste zmiany prądu wzbudzenia powinno znacznie zmniejszyć awaryjność generatora.

### Modernizacja generatora

Wnioski z analizy dokumentacji remontowej wykorzystano przy opracowaniu projektu modernizacji generatora 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 uzwojenia wzbudzenia fabrycznego generatora. Pojedynczy przewód składa się z dwóch bardzo cienkich i szerokich taśm miedzianych wyprofilowanych w kształcie litery C, które po złożeniu tworzą osiowy 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 popalowania cienkich taśm miedzianych, co skutkuje uszkodzeniem izolacji zwojowej, a następnie powstaniem łuku elektrycznego. Dodatkowo przesuwanie się względem siebie taśm miedzianych powoduje zmniejszenie drożności kanałów wentylacyjnych, co wywołuje duży lokalny wzrost temperatury, a w konsekwencji uszkodzenie termiczne przekładek izolacyjnych.



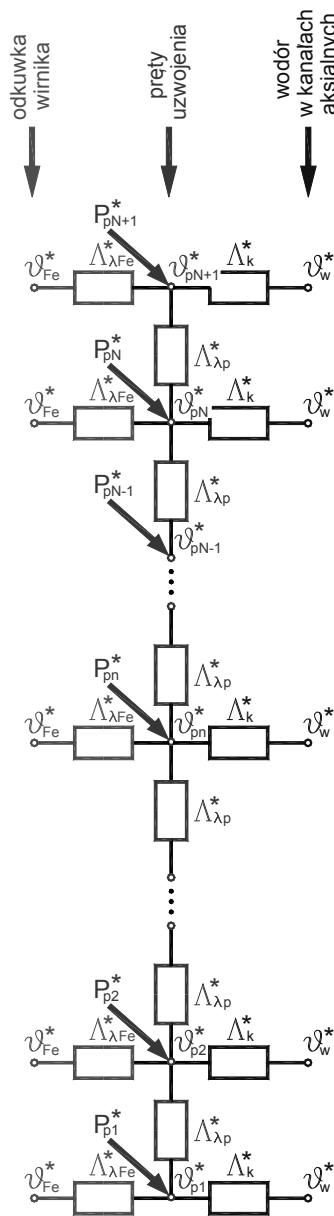
Rys. 2. Przekrój poprzeczny przewodów uzwojenia wzbudzenia generatora: a) fabrycznego, b) zmodernizowanego

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. Powoduje to bardzo duże zwiększenia sztywności czoł cewek uzwojenia wzbudzenia. Zmieniając jednocześnie kształt i wymiary kanałów wentylacyjnych zwiększono o 23% powierzchnię oddawania ciepła z przewodów uzwojenia wzbudzenia do wodoru w odniesieniu do rozwiązania fabrycznego. Zwiększono również 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 zmianie temperatury.

Przy projektowaniu nowego uzwojenia wzbudzenia wykorzystano program komputerowy opracowany na bazie autorskiej metody zmodyfikowanych sieci cieplnych [4, 5].

Na rysunku 3 przedstawiono utworzoną sieć cieplną do obliczeń rozkładu temperatury w przewodach nowego uzwojenia wzbudzenia usytuowanych w żłobkach wirnika generatora.



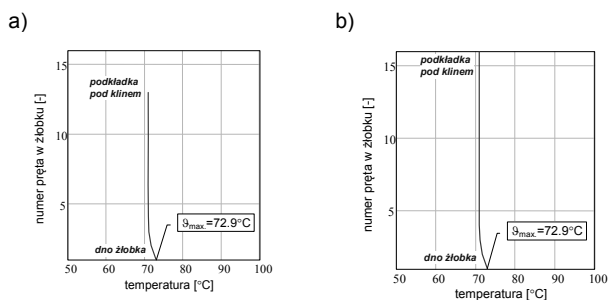
Rys. 3. Sieć cieplna do obliczeń rozkładu temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia generatora

Wielkości występujące na schemacie cieplnym oznaczają odpowiednio:

- temperatura n-tego przewodu w żłobku wirnika  $\vartheta_{pn}$ ,
- temperatura zęba odkuwki wirnika generatora  $\vartheta_{Fe}$ ,
- temperatura wodoru w osiowych kanałach wentylacyjnych  $\vartheta_w^*$ ,
- straty mocy w n-tym przewodzie w żłobku wirnika  $P_{pn}$ ,

- przewodność dla strumienia ciepła przepływającego pomiędzy przewodami w żłobku wirnika  $\lambda_{i,p}$ ,
- przewodność dla strumienia ciepła przepływającego z przewodów uzwojenia wzbudzenia do zęba odkuwki wirnika generatora  $\lambda_{i,Fe}$ ,
- przewodność dla strumienia ciepła przepływającego z powierzchni kanałów osiowych w przewodach do wodoru chłodzącego  $\lambda_k$ .

Na rysunku 4 przedstawiono obliczony rozkład temperatury w części żłobkowej przewodów uzwojenia wzbudzenia przy obciążeniu zmodernizowanego generatora znamionową mocą czynną podwyższoną do 130 MW i znamionowym współczynnikiem mocy.



Rys. 4. Rozkład temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia zmodernizowanego generatora w żłobku: a) nr 1, b) nr 2-7

Z wykonanych obliczeń cieplnych wynika, że po wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych temperatura uzwojenia wzbudzenia po podwyższeniu mocy generatora do 130 MW nie przekracza wartości dopuszczalnej dla izolacji klasy B, zaś w celu zapewnienia możliwości pracy regulacyjnej generatora izolację uzwojenia wzbudzenia wykonano w klasie F. Należy podkreślić, że wyniki obliczeń zostały następnie potwierdzone pomiarami wykonanymi przy odbiorze zmodernizowanego generatora.

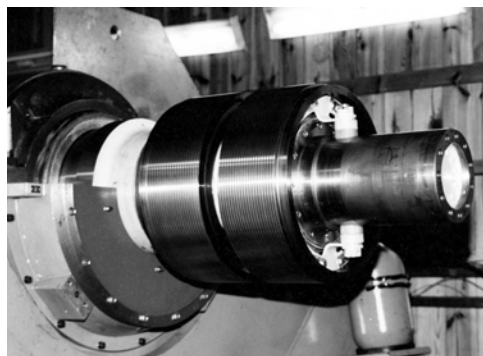
Na rys. 5 przedstawiono wirnik i czoła uzwojenia wzbudzenia zmodernizowanego generatora.



Rys. 5. Widok wirnika i czoła uzwojenia wzbudzenia generatora

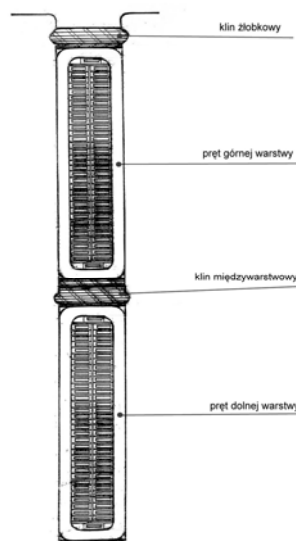
W zmodernizowanym generatorze powiększono odporność wirnika na obciążenie niesymetryczne przez zastosowanie klatki tłumiącej o strukturze dwuwarstwowej ciągłej wzdłuż całej długości beczki wirnika.

W celu poprawy stopnia bezpieczeństwa wodorowego w generatorze: zastosowano nowe rozwiązanie wyprowadzeń prądowych w wirniku, zmodernizowano uszczelnienia wału oraz udoskonalono konstrukcję pierścieni ślizgowych wirnika (rys. 6). Dodatkowo dokonano zmiany osadzenia kołpaków końcowych polegającej na zastosowaniu kołpaków mocowanych jednostronnie do beczki wirnika przy wykorzystaniu nakrętek zabezpieczających kołpaki przed zsunięciem.



Rys. 6. Zmodernizowana głowica pierścieni ślizgowych wirnika generatora

Dla zmodernizowanego generatora zaprojektowano również nowe uzwojenie stojana, w którym straty mocy zmniejszono aż o 19% w porównaniu do fabrycznego i uzyskano jednakowe temperatury w prętach warstwy górnej i dolnej uzwojenia (rys. 7). Przy projektowaniu wykorzystano program komputerowy do obliczeń uzwojenia stojana chłodzonego bezpośrednio wodą destylowaną. Zastosowany w nim model w postaci zmodyfikowanej sieci cieplnej [4] uwzględnia zjawisko wypierania prądu w przewodach uzwojenia stojana oraz nagrzewanie strugi wody chłodzącej. Dodatkowo unowocześniono izolację główną uzwojenia stojana poprzez zastosowanie izolacji klasy F w miejsce dotychczasowej izolacji klasy B. Poprawiono mocowanie czoł uzwojenia stojana generatora.



Rys. 7. Nowe pręty uzwojenia stojana generatora

Z przeprowadzonych obliczeń cieplnych wynika, że w zmodernizowanym generatorze obciążonym mocą 130 MW maksymalna temperatura uzwojenia stojana jest o 2,5 K mniejsza w porównaniu do generatora fabrycznego obciążonego mocą 120 MW.

Temperatury wszystkich aktywnych elementów zmodernizowanego generatora przy obciążeniu mocą podwyższoną do 130 MW i znamionowym współczynnikiem mocy są mniejsze od dopuszczalnych.

#### Badania i przeglądy zmodernizowanego generatora

Po podłączeniu zmodernizowanego generatora do systemu elektroenergetycznego wykonano próbę nagrzewania. Przeprowadzone pomiary potwierdziły poprawność obliczeń wykonanych przy opracowaniu projektu modernizacji 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  $\cos\varphi_n=0,8$ .

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 (rys. 8).



Rys. 8. Wirnik zmodernizowanego generatora po zdjęciu kołpaków

W czołach cewek uzwojenia wzbudzenia generatora nie stwierdzono (rys. 9): deformacji przewodów, śladów po łuku elektrycznym oraz uszkodzeń izolacji i elementów mocujących.



Rys. 9. Czoła cewek uzwojenia wzbudzenia zmodernizowanego generatora

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 budzi żadnych zastrzeżeń.

#### Praca generatora w charakterze kompensatora synchronicznego

Odstawiane generatory klasy 120 MW 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 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.

Zaproponowana zmiana konstrukcji uzwojenia wzbudzenia umożliwia 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 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 przy regulacji wytwarzanej mocy biernej indukcyjnej w szerokim zakresie. Należy zaznaczyć, że ostateczne określenie mocy znamionowej kompensatora synchronicznego będzie możliwe po wykonaniu pełnego projektu modernizacji. Po zaprojektowaniu wszystkich nowych elementów generatora możliwe będzie określenie zakresu pracy stabilnej oraz ograniczeń wynikających z nagrzewania elementów skrajnych rdzenia stojana generatora.

#### Podsumowanie

Doświadczenie uzyskane przy przeglądach i remontach generatorów klasy 120 MW oraz opracowane programy do obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych można wykorzystać przy sporządzeniu pełnego projektu modernizacji generatora w celu przystosowania do pracy w charakterze kompensatora. Zastosowane nowe rozwiązania konstrukcyjne umożliwiają przystosowanie kompensatora do pracy przy dużych i częstych zmianach wytwarzanej mocy biernej oraz częstych uruchomieniach.

Pozyskanie stosunkowo niewielkim kosztem wielu dużych regulowanych źródeł mocy biernej indukcyjnej w systemie elektroenergetycznym umożliwia dalszy wzrost mocy generowanej przez odnawialne źródła energii bez niebezpieczeństwa naruszenia bilansu mocy biernej oraz konieczności instalowania drogiego urządzeń do kompensacji mocy biernej indukcyjnej.

**Autor:** dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice, E-mail: roman.krok@polsl.pl.

#### LITERATURA

- [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 habilitacyjna, 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)