

# Elektryczne maszyny wirujące – Komitet Studiów A1

## Rotating electrical machines – Study Committee A1

Komitet Maszyn Elektrycznych obejmuje swoim zakresem wszystkie maszyny wirujące służące do produkcji energii oraz silniki dużych mocy. W zakresie zainteresowań Komitetu znajduje się również rozwój materiałów i technologii, w tym technologii nadprzewodnikowej, która może mieć zastosowanie w maszynach elektrycznych. Zakres prac Komitetu to: badania, projektowanie, produkcja, eksploatacja, konserwacja, długoterminowa ocena maszyny oraz jej części składowych.

Pod względem technicznym sesja okazała się bardzo interesująca, zaakceptowane artykuły przedstawiono w trzech tematach wiodących (Preferential Subjects):

### Temat 1: Zastosowanie maszyn elektrycznych w produkcji energii

- Rozwój konstrukcji o wyższej sprawności, koszty wytwarzania i problemy operacyjne.
- Wpływ awarii i zaburzeń sieci na strategię rozwoju konstrukcji i projektowania maszyn.
- Nowe trendy.

### Temat 2: Zarządzanie żywotnością maszyn elektrycznych

- Retrofity, modernizacje, podniesienie mocy, wzrost sprawności – analiza ekonomiczna wpływu wymagań operatora sieci na decyzje związane z modernizacją maszyny.
- Kontrola, monitoring i diagnostyka.
- Najnowsze osiągnięcia w zakresie inspekcji z wykorzystaniem specjalistycznych robotów.

### Temat 3: Rozwój maszyn elektrycznych wirujących i doświadczenie serwisowe

- Poprawa i rozwój konstrukcji w zakresie projektowania, produkcji, obsługi i konserwacji. Rozwój materiałów izolacyjnych, niezawodność systemów chłodzenia i łożysk.
- Wpływ specyfikacji klienta i wymagań operatora sieci na konstrukcję i koszty.
- Zmiany umożliwiające podniesienie mocy znamionowej dużych generatorów.

W zakresie Tematu 1 „Zastosowanie maszyn elektrycznych w produkcji energii” przyjęto 6 artykułów.

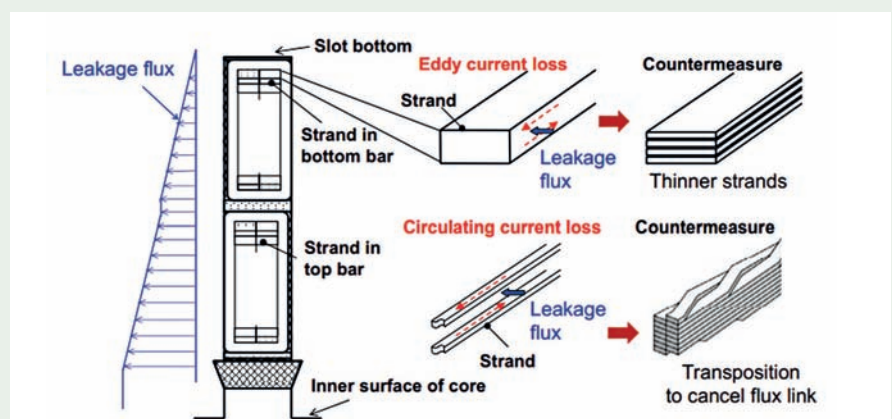
W obszarze Tematu 2 „Zarządzanie żywotnością maszyn elektrycznych” zaakceptowano do publikacji 10 artykułów.

W przypadku Tematu 3 „Rozwój maszyn elektrycznych wirujących i doświadczenie serwisowe” zaakceptowano 10 artykułów.

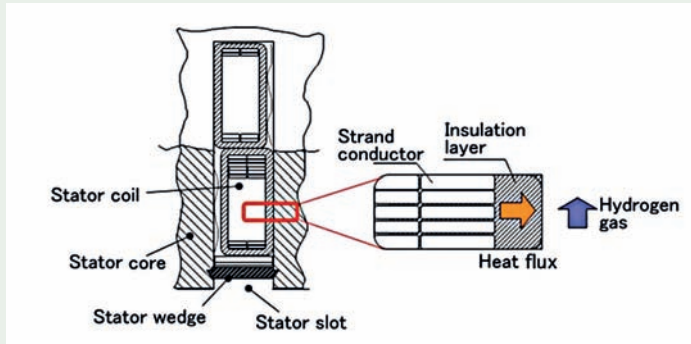
### Rozwój technologii

Zauważalny na całym świecie rozwój energetyczny zarówno w obszarze wytwarzania, dystrybucji i transmisji pokazuje, że istnieje coraz większa potrzeba zapewnienia gwarancji niezawodności i bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej, poprawy efektywności bloków energetycznych, jak również redukcji emisji CO<sub>2</sub>. W związku z tym producenci generatorów pracują na wdrożeniu nowych technologii, które umożliwiają sprostanie tym wymaganiom i uzyskanie większej sprawności maszyn elektrycznych.

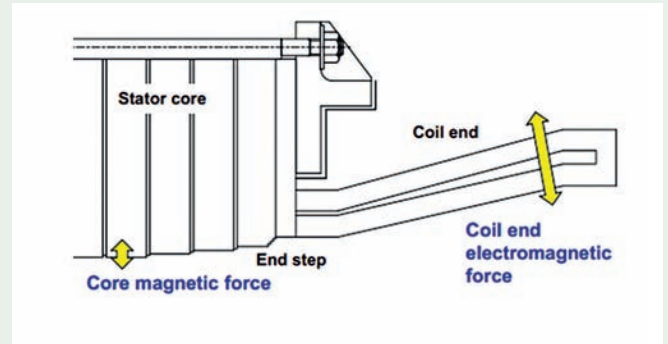
W odpowiedzi na potrzebę rynku firma *Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.* opracowała dwie technologie umożliwiające dalszy rozwój generatorów o pośrednim wodorowym systemie chłodzenia [25]. Pierwsza z nich związana jest z optymalizacją przewodów elementarnych (rys. 1) w pręcie stojana wraz z zastosowaniem



Rys. 1. Optymalizacja ułożenia przewodów elementarnych w pręcie stojana



Rys. 2. Przekrój poprzeczny pręta stojana



Rys. 3. Siła elektromagnetyczna w rdzeniu i strefie czołowej uzwojenia stojana

izolacji głównej (rys. 2) o wysokiej przewodności cieplnej w skrócie HHT (high heat transmission).

Umieszczenie przewodnika w niesymetrycznym ośrodku magnetycznym powoduje nierównomierny rozkład gęstości prądu. Zjawisko to może mieć charakter pozytywny, np. w indukcyjnych silnikach głębokożłobkowych, lub negatywny w prętach uzwojeń tworników maszyn dużych mocy, np. generatorach.

Negatywny charakter tego zjawiska widoczny jest w postaci:

- niepełnego wykorzystania przekroju przewodu,
- zwiększenia strat i zmniejszenia sprawności,
- nierównomiernego nagrzewania się uzwojenia.

Zjawisko to wywołane jest niejednakowym sprzężeniem magnetycznym warstw przewodnika od strumienia rozproszenia wzdłuż wysokości żłobka, który indukuje w tych warstwach napięcia różnej wartości. Są one źródłem prądów wirowych zamykających się w obrębie jednego boku uzwojenia. Dlatego w maszynach bardzo dużej mocy uzwojenia wykonuje się w postaci wiązki odizolowanych, równoległych przewodów połączonych skuwkami w strefie połączeń czołowych. Nie eliminuje to powstawania prądów cyrkulacyjnych zamykających się przez równoległe połączone przewody elementarne zwarte skuwkami. Prądy te można wyeliminować lub znacznie ograniczyć przez takie umieszczenie przewodów elementarnych uzwojenia, aby wszystkie znajdowały się w jednakowych warunkach magne-

tycznych, tak od strumienia głównego jak i strumienia rozproszenia, tzw. przeplecenie prętów opatentowane przez Roebela w 1912 roku. Przeplecenie przewodów elementarnych dokonywane jest w strefie żłobkowej oraz na czołowych odcinkach prętów.

Zastosowana technologia HHT zwiększa trzykrotnie przewodność cieplną izolacji głównej pręta względem konwencjonalnego systemu.

Kolejną technologią umożliwiającą podniesienie mocy generatora o pośrednim wodorowym systemie chłodzenia jest odpowiednia konstrukcja czoł. Opracowane rozwiązanie umożliwia redukcję drgań całego uzwojenia stojana.

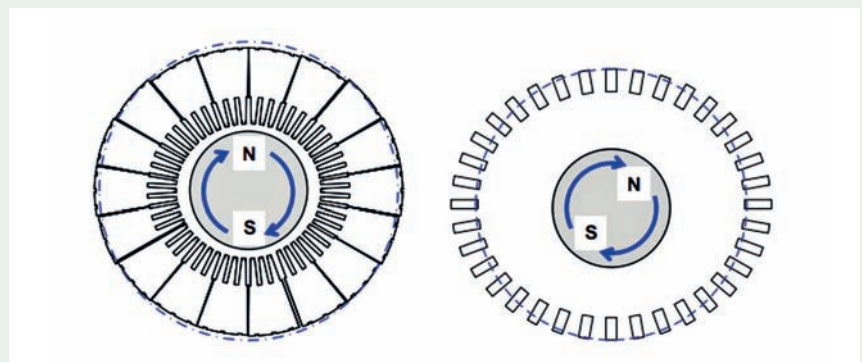
Jak pokazano na rysunku 3, drgania prętów uzwojenia stojana są wzbudzone przez siłę elektromagnetyczną indukowaną w dwóch obszarach: rdzeń stojana i strefa czołowa (rys. 3).

Wibracje w każdej części przedstawiono na rysunku 4. W przypadku maszyny

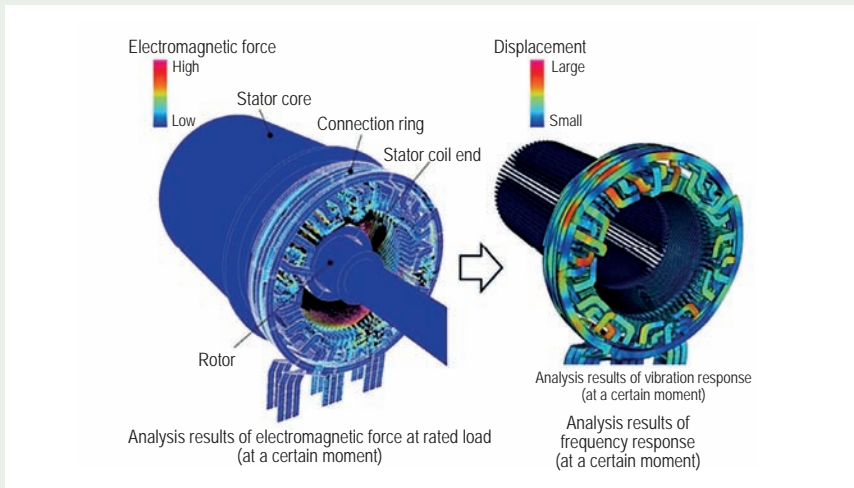
dwubiegunowej, rdzeń stojana jest zdeformowany eliptycznie w wyniku siły magnetycznej między biegunami wirnika i rdzeniem stojana. Ta eliptyczna deformacja obraca się wraz z wirnikiem maszyny. Koncentrując się na jednej lokalizacji w rdzeniu stojana biegun wirnika i jego pole magnetyczne wibruje z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości obrotu.

Kolejnym czynnikiem wzbudzającym drgania jest siła elektromagnetyczna generowana w strefie końcowej uzwojenia stojana. Częstotliwość tej siły jest również dwa razy większa od częstotliwości obrotów wirnika. Przykład analizy siły elektromagnetycznej przedstawiono na rysunku 5.

Opracowaną technologią HHT wraz z optymalizacją przewodów elementarnych w pręcie stojana i odpowiednią konstrukcją czoł zastosowano w generatorze o mocy 600 MVA (napięcie 20 KV) z pośrednim wodorowym systemie chłodzenia (rys. 6).



Rys. 4. Eliptyczna deformacja w strefie rdzenia (po lewej) i w strefie czołowej uzwojenia (po prawej)



Rys. 5. Przykład analizy siły elektromagnetycznej w warunkach znamionowej pracy generatora



Rys. 6. Generator of mocy 600 MVA z technologią HHT

Na podstawie wyników pomiarów z testów ruchowych (rys. 7) potwierdzono skuteczność technologii HHT i możliwość obniżenia temperatur uzwojenia stojana o około 40% w stosunku do konwencjonalnej izolacji.

### Podniesienie sprawności generatora

Ze względu na wysoką sprawność i nieskomplikowaną obsługę, turbogeneratory o pośrednim wodorowym systemie chłodzenia są bardziej preferowanymi maszynami niż turbogeneratory o wodno-wodorowym systemie chłodzenia, w tych samych zakresach mocy. W artykule [23] opisano sposób podniesienia sprawności turbogeneratora z pośrednim wodorowym systemem chłodzenia. Parametry maszyny przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

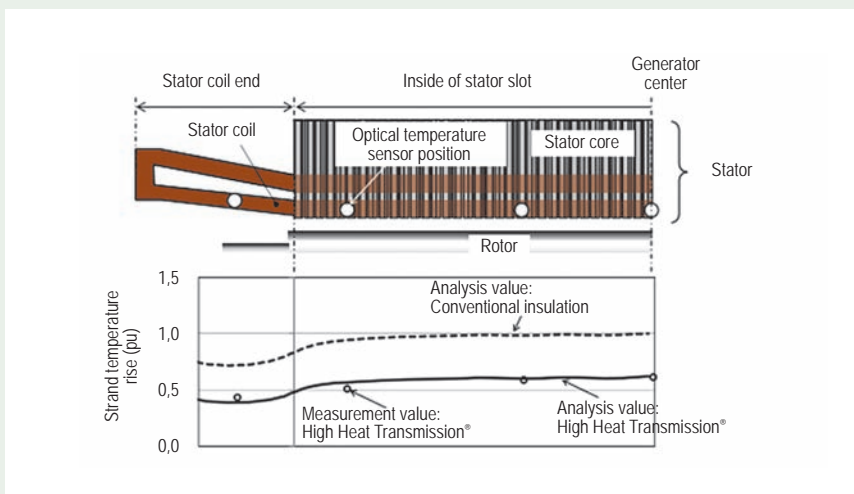
Parametry generatora (zaimplementowane w modelu elektromagnetycznym)

Rated output	870 MVA
Rated voltage	25 kV
Rated pf	0.85
Frequency	60 Hz
Rated current	20.092 kA
Maximum leading pf	0.95

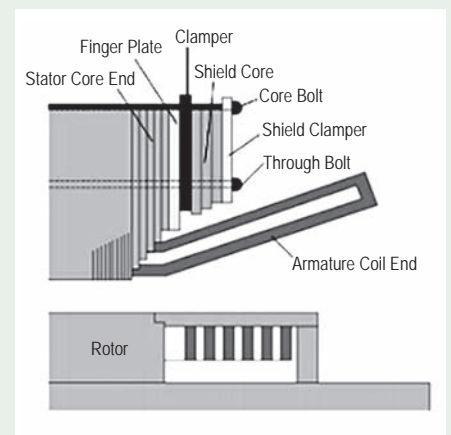
W tym celu został opracowany model elektromagnetyczny zawierający siatkę z ponad 30 milionami węzłów. Model ten umożliwia policzenie i minimalizowanie strat w generatorze, a w konsekwencji poprawę sprawności maszyny. Przy tworzeniu modelu uwzględniono zjawiska elektromagnetyczne występujące w strefie czołowej rdzenia, wirnika i prętach uzwojenia stojana (rys. 8).

Przykład rozkładu strat w pierścieniu laminowanym przy zastosowaniu tzw. rozcięć – slits przedstawiono na rysunku 9, a strat w palcach dociskowych na rysunku 10.

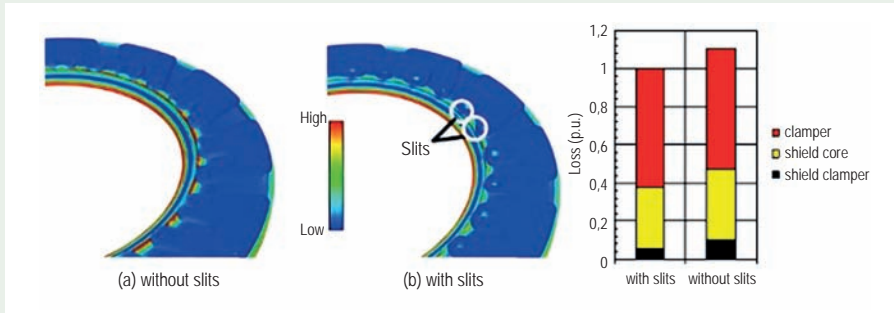
Obliczeniowy model elektromagnetyczny pręta uzwojenia stojana zawiera 100 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Przy obliczeniach uwzględniono straty w strefie czołowej uzwojenia, jak i straty wywołane prądami cyrkulacyjnymi. W tym celu zamodelowano sprzężenia magnetyczne przewodów



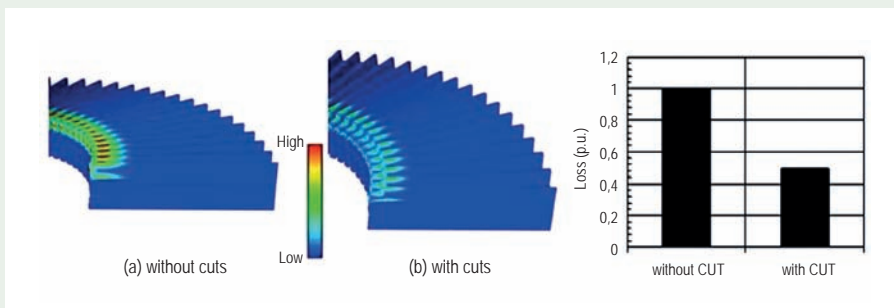
Rys. 7. Analiza rozkładu temperatury w pręcie stojana i porównanie z wynikami obliczeń



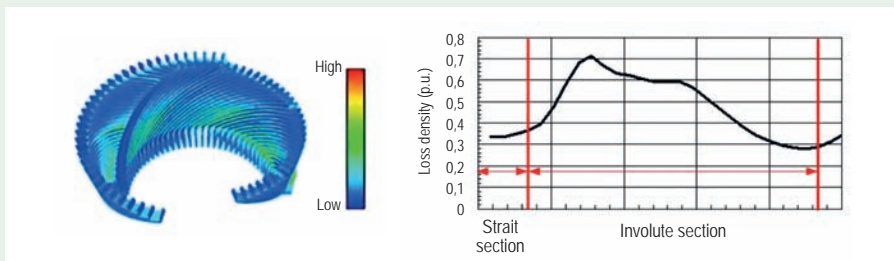
Rys. 8. Struktura strefy czołowej generatora zaimplementowana w modelu elektromagnetycznym



Rys. 9. Rozkład strat w pierścieniu laminowanym przy zastosowaniu „rozcieć - slits”



Rys. 10. Rozkład strat w palcach dociskowych przy zastosowaniu odpowiedniej struktury nacięć



Rys. 11. Rozkład strat w strefie czołowej – ewolwentowej pręta

elementarnych w każdej części uzwojenia, tzn. w strefie żłobkowej (środowisku ferromagnetycznym) oraz strefie czołowej (środowisku niemagnetycznym). Rozkład strat w części ewolwentowej pręta pokazano na rysunku 11.

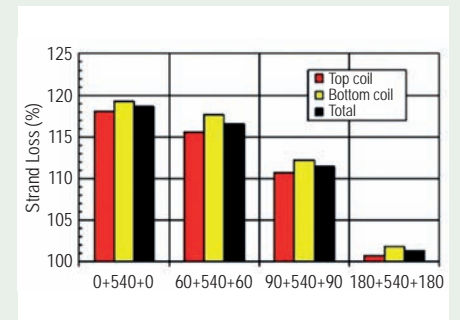
Prądy cyrkulacyjne płynące w poszczególnych prętach elementarnych połączonych równolegle pojawiają się, jeżeli znajdują się w różnych warunkach magnetycznych. Dla uzyskania jednakowych warunków magnetycznych pręty elementarne należy tak rozmieścić za pomocą przepłotu Roebela, żeby w każdym z nich indukowała się taka sama siła elektromotoryczna w części żłobkowej, zarówno pod wpływem strumienia głównego  $F_m$  – podłużnego, jak i strumienia rozproszonego

$F_s$  – poprzecznego, oraz taka sama siła elektromotoryczna w odcinkach połączeń czołowych pod wpływem strumienia rozproszenia.

Prąd cyrkulacyjny jest więc prądem pasożytniczym, niepożądanym, powodującym straty mocy i podnoszącym temperaturę uzwojenia. Należy go eliminować lub maksymalnie ograniczać.

Do ograniczenia prądu cyrkulacyjnego między przewodami elementarnymi stosuje się przepłot Roebela o odpowiedniej podziałce transpozycji. Wówczas każdy z elementarnych prętów zajmuje w żłobku średnio identyczne położenie powodując, że siła elektromotoryczna indukowana przez strumień rozproszony w pętli utworzonej z dwóch dowolnych przewodów elementar-

nych zostaje skompensowana lub w znacznym stopniu ograniczona. Rodzaje przepłotu różnią się zmianą położenia przewodu elementarnego na początku i końcu rozpatrywanej strefy (żłobkowej lub połączenia czołowego). Określony kątem transpozycji, np. 180+360+0, oznacza, że na jednym połączeniu czołowym pręty przekręcone są o kąt 180 stopni, w części żłobkowej o 360, a na drugim połączeniu czołowym pręty nie zmieniają swojego położenia. Znak plus lub minus określa umowny kierunek skrótu przewodów elementarnych. Wyniki obliczeń strat w przecie górnym i dolnym w zależności od zastosowanego kąta transpozycji przewodów elementarnych przedstawiono na rysunku 12.

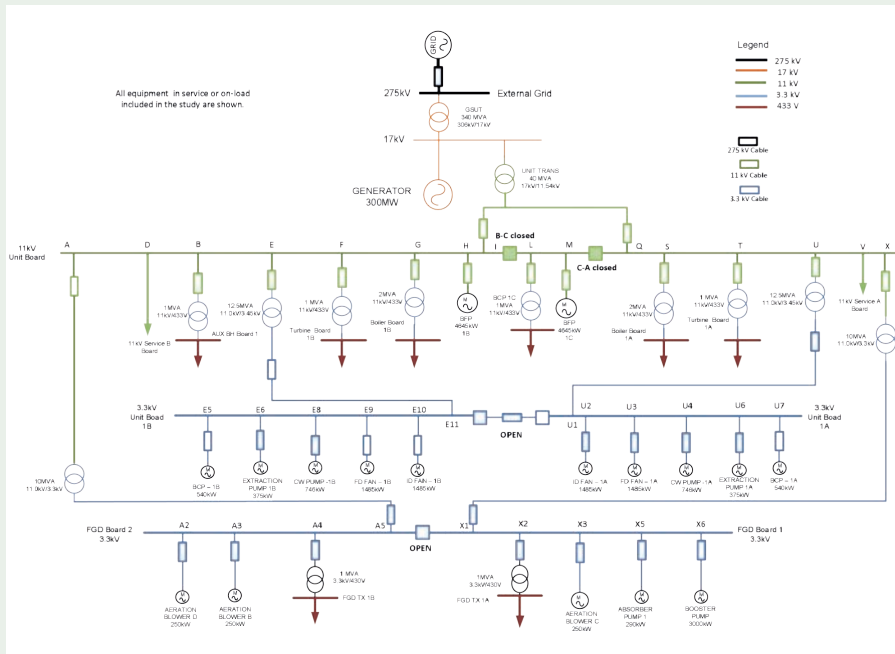


Rys. 12. Wpływ kąta transpozycji przewodów elementarnych na straty mocy w przecie generatora

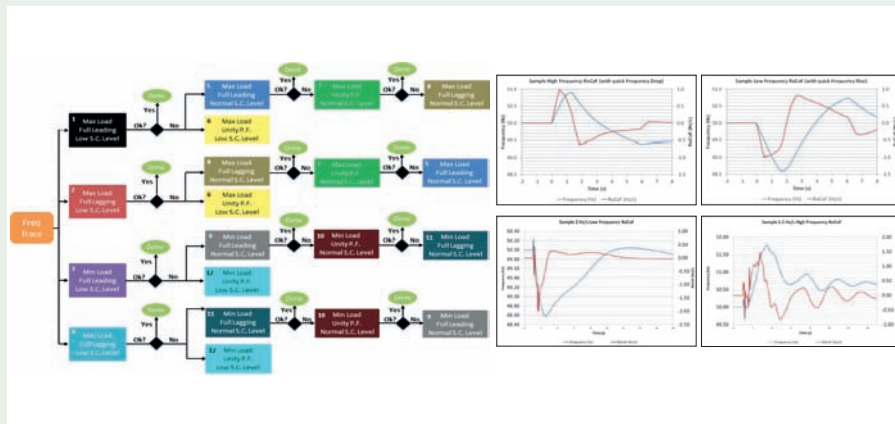
### Praca generatora przy różnych wymaganiach sieci

W artykule [02] opisano doświadczenia autorów w wyznaczeniu ROCOF („Rate of Change of Frequency” – szybkość zmiany częstotliwości w sieci) dla istniejących elektrowni w Irlandii. Wymaganie ROCOF pojawia się w wielu różnych sieciach energetycznych i nakłada na generator stabilność pracy w trakcie różnych gradientów częstotliwości sieci. Niestety wymaganie ROCOF nie jest zharmonizowane w różnych sieciach, posiadają one zdefiniowany tzw. maksymalny gradient (np. 1 Hz/s), ale warunki brzegowe są nie w pełni opisane, stąd uniemożliwiają ocenę stabilnej pracy generatora.

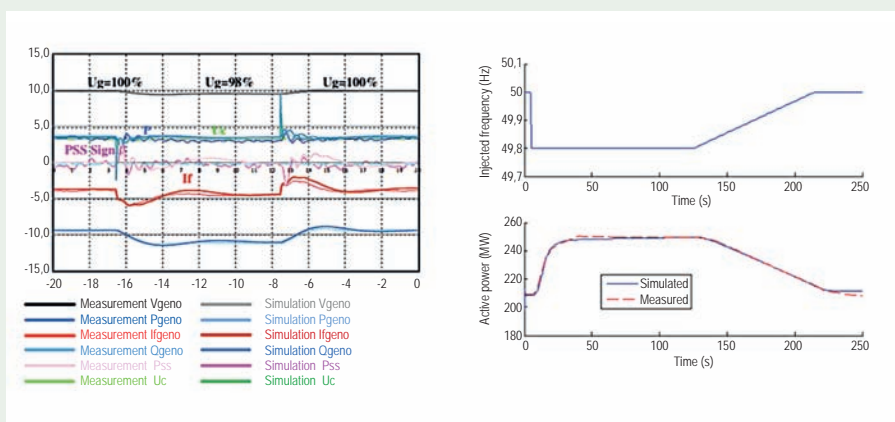
Obecnie jedynym sposobem zapewnienia zgodności elektrowni z ROCOF jest przeprowadzenie pełnej analizy zgodności



Rys. 13. Model systemu energetycznego dla badania ROCOF



Rys. 14. Przykładowy scenariusz ROCOF



Rys. 15. Walidacja modelu wzbudzenia (po lewej) i modelu sterowania (po prawej)

poszczególnych krytycznych komponentów danej elektrowni. Typowy model umożliwiający symulację systemu energetycznego dla badania ROCOF przedstawiono na rysunku 13.

Zawiera on model dynamiczny generatora wraz z układem AVR (układ automatycznej regulacji napięcia) i PSS (układ stabilizacji mocy), a dodatkowo odpowiednie modele mechaniczne z systemem sterowania turbiną, transformator blokowy oraz układy wyposażenia i linie kablowe.

W badaniu uwzględniono różne punkty pracy elektrowni dla różnych scenariuszy zmian ROCOF. Przykład takiego scenariusza przedstawiono na rysunku 14.

Sposób, w jaki układy kontrolne generatora reagują na zdarzenie ROCOF mają zasadnicze znaczenie dla zrozumienia stabilności pracy generatora w sieci. Aby zapewnić, że zachowanie modelu symulacyjnego jest prawdziwym odzwierciedleniem sieci, konieczne jest sprawdzenie działania i zachowania modeli układu sterowania. Walidacja polega na porównaniu rzeczywistych testów w elektrowni z symulacjami z modelu przy założeniu identycznych warunków pracy. Podczas sprawdzania poprawności uwzględniono układ sterowania wzbudzenia, i regulatora turbiny (rys. 15). Modele symulacyjne układów wzbudzających i regulatorów turbiny można opracować na podstawie modeli opisanych w kilku publikacjach IEEE i CIGRE [14-16].

#### REFERATY KOMITETU STUDIÓW A1

- [1] A1-101. Miller N.W., Kaushik V., Heinzmann J., Frasier J. (US), *Hybridizing Gas Turbine with Battery Energy Storage: Performance and Economics.*
- [2] A1-102. Chan K., Oesterheld J., Temtem S., Haldemann J. (CH), *Investigations on ROCOF withstand capability on large synchronous generators.*
- [3] A1-103. Braam J.-H. (DE), *Development, Test and Validation of new Generator Product Line for current and future operational regimes.*
- [4] A1-104. Wahdame B. (FR), *Impact of grid code evolution on the design of the generators for nuclear plants (Half speed, power above 800 MVA).*

- [5] A1-105. Ishizuki T., Hasagawa R., Shiozaki Y. Iwabuchi K. (JP), *Contribution of Kyogoku Power Station, an adjustable speed pumped storage, in actual grid operation.*
- [6] A1-106. Anglada J.R., Sharkh S.M., Yuratic M.A. (GB), *Calculation of Rotor Eddy Current Losses in High-Speed PM Synchronous Generators using Transfer Matrices.*
- [7] A1-201. Hildinger T. (BR), *Variability of PD readings and failure location in high voltage bars.*
- [8] A1-202. Oettl F., Engelen C., Binder E., Kessler T. (AT), *Study of the Propagation Behaviour of Partial Discharge Pulses in the High-Voltage Winding of Hydro Generators.*
- [9] A1-203. Singh A., Hughes-Narborough M. (GB), *Partial Discharge Activity in Isolated Phase Bus (IPB) – Case Studies from UK Power Stations.*
- [10] A1-204. Lee S.H., Kong T.S., Kim H.D., Kim D.M. (KR), *Analysis of Insulation Diagnosis for Generator-Motor Stator Winding and Core in Pumped Storage Power Plants.*
- [11] A1-205. Kung P. (CA), *Novel fiber optics technology monitors in-slot vibration and hot spots in an air cooled gas generator.*
- [12] A1-207. Letal J. (CA), *Importance of operating parameters when assessing the condition of machines on-line.*
- [13] A1-208. Fayez A.M., Ebrahim M.A., El-Hadidy M.A., Mansour W.M. (EG), *Torsional Oscillations Mitigation for Interconnected Power System via Novel Fuzzy Control Based Braking Resistor Model.*
- [14] A1-209. Tétreault A. (CA), *Using an air gap monitoring system during initial commissioning stages of a hydro generator.*
- [15] A1-210. Elez A. (HR), *Application of Differential Magnetic Field Measurement (DMFM method) in winding fault detection of AC rotating machines as part of expert monitoring systems.*
- [16] A1-211. Chaturvedi D.K., Gupta A.K. (IN), *Generators as Synchronous Condensers to meet Dynamic System Requirement by Renewable Mix. – Indian Scenario.*
- [17] A1-301. Silva R. (BR), *A Study of the failure and repair rate indicators of the Itaipu generator units.*
- [18] A1-302. Galvez J.D., Urbina M.D., Mader D.J. Wisniewski J.B. (US), *Forensic Analysis of Gas Turbine-generator Shaft Failures due to Possible Subsynchronous Resonance.*
- [19] A1-303. Batakovic R., Dordan B. (ME), *Analyses of possible refurbishment of generators in HPP Perucica.*
- [20] A1-304. Sokur P. (RU), *Operation experience of asynchronous turbo-generators in the Moscow power system.*
- [21] A1-305. Wang L. (CN), *Analysis on the effect of screen ventilation width on end flux distribution and eddy current losses of Turbo-generator.*
- [22] A1-306. Han J. (CN), *Influence of total flow rate on complex fluid flow and temperature rise in the rotor region of large Hydrogenerators.*
- [23] A1-307. Kometani H., Motoyoshi K., Sora N., Maeda S., Tanaka K. (JP), *Loss Reduction by large-Scale Electromagnetic Analysis for Turbine Generators.*
- [24] A1-308. Rouco L., Peran F. (ES), *Reactive power capability of large hydro generators and the European Grid Code requirements with respect to voltage stability.*
- [25] A1-309. Muramatsu S., Takahashi K., Onoda M., Tanaka K., Hattori K. (JP), *Development of Large Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator and Associated Technologies.*
- [26] A1-310. Kang B.H., Lee S.J., Hong S.D. (KR), *Analysis of Winding Temperature Characteristic by Dual-frequency Method and Real-load Test for Induction Motors.*
- [27] IEEE Std. 421.5-2016, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", 15 May 2016.
- [28] CIGRE Technical Brochure 238, "Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined Cycle Power Plants", April 2003.
- [29] IEEE Task Force Technical Report PES-TR1, "Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies", January 2013.

Piotr Mański

Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

## Transformatory i dławiki – Komitet Studiów A2

### Power transformers and reactors – Study Committee A2

Komitet Studiów A2 ma na celu promowanie postępu techniki oraz międzynarodową wymianę informacji i wiedzy w zakresie transformatorów i dławików. Dokonuje syntezy stosowanych praktyk, opracowuje zalecenia i dostarcza informacji o najlepszych rozwiązaniach.

Zakres działalności Komitetu obejmuje tematy zarządzania cyklem „życia technicznego” urządzeń: od koncepcji, poprzez badania, rozwój, projektowanie, produkcję, wdrażanie, eksploatację do końca okresu użytkowania. Na wszystkich etapach uwzględnia się aspekty techniczne, bez-

pieczeństwa, ekonomiczne, środowiskowe i społeczne, jak również interakcje z ewoluującym systemem energetycznym i środowiskiem oraz ich integrację. Uwzględnia się wszystkie aspekty wydajności, specyfikacji, testowania, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu zmieniających się interakcji