

Nowoczesny system energoelektroniczny dla SMR

Streszczenie. Nowoczesne układy energoelektroniczne są niezbędne do optymalizacji wydajności, niezawodności i bezpieczeństwa małych reaktorów modułowych. Systemy te zapewniają zaawansowane procesy konwersji i dostosowywanie parametrów energii elektrycznej, algorytmy sterowania, funkcje ochrony i możliwości diagnostyczne. Przekład się to bezpośrednio na zwiększenie wydajności energetycznej SMR i minimalizację ryzyka awarii w obwodach elektroenergetycznych (ang. fail-safe). Dzięki kompaktowej i modułowej konstrukcji, a także możliwości integracji z siecią i odnawialnymi źródłami energii-jak choćby produkcja wodoru, nowoczesne systemy energoelektroniczne mają kluczowe znaczenie dla pomyślnego wdrożenia SMR jako czystego i niezawodnego rozwiązania energetycznego. Zważywszy, że SMR nadal nabierają rozpędu jako opłacalne rozwiązanie energetyczne, rozwój zaawansowanych systemów energoelektronicznych będzie miał zasadnicze znaczenie dla wykorzystania ich pełnego potencjału.

Abstract. Modern power electronics systems are necessary to optimize the performance, reliability and safety of small modular reactors. These systems provide advanced electricity conversion and customization processes, control algorithms, protection functions and diagnostic capabilities. This translates directly into increasing the energy efficiency of SMRs and minimizing the risk of failure in power circuits (fail-safe). Thanks to their compact and modular design, as well as the possibility of integration with the grid and renewable energy sources - such as hydrogen production - modern power electronic systems are crucial for the successful implementation of SMR as a clean and reliable energy solution. As SMRs continue to gain momentum as a cost-effective energy solution, the development of advanced power electronics systems will be essential to realizing their full potential. (A modern power electronic system for SMR)

Słowa kluczowe: Energetyka Jądrowa, PEP2040, Małe Modułowe Reaktory.

Keywords: Nuclear Energy, PEP2040, Small Modular Reactor.

Wstęp

Energetyka kraju oparta jest na paliwach kopalnych. Z węgla kamiennego pozyskuje się obecnie 44.07% energii, natomiast z węgla brunatnego 22.09%. Energetyka bazująca na tradycyjnych źródłach energii ma wiele zalet, jak choćby stałe źródło zasilania czego nie można przypisać odnawialnym źródłom energii, których funkcjonowanie warunkowane jest warunkami pogodowymi. Krajowe zasoby paliw kopalnych stopniowo maleją, bądź ich wydobycie staje się nie rentowne. Mając na uwadze stały wzrost zapotrzebowania na energię konieczne jest wprowadzenie do sektora energetycznego nowych mocy wytwórczych opartych na technologiach gwarantujących bezpieczeństwo oraz niezawodność dostaw energii. Energetyka jądrowa pozwoli na stopniową dekarbonizację sektora energetycznego bez konieczności implementacji rewolucyjnych zmian w sposobie jego funkcjonowania. Bowiem powieła koncepcję działania konwencjonalnej elektrowni z tą różnicą że w elektrowni konwencjonalnej ciepło pochodzi ze spalania paliw, natomiast w elektrowni jądrowej ciepło generowane jest w trakcie kontrolowanej reakcji rozszczepienia izotopu. Niemniej układ szeregu przemian energetycznych pozostaje bez zmian. Gdyż wytworzona energia pochodząca z reakcji rozszczepienia zamieniana jest za pośrednictwem pary wodnej w energię mechaniczną, która napędza turbiny sprzęgnięte z generatorami aby w ostatecznej drodze trafić do odbiorcy w postaci energii elektrycznej.

W związku z powyższym elektrownię jądrową można podzielić na trzy elementy/ sektory/ funkcyjne:

1. Wyspa jądrowa
2. Wyspa turbinowa
3. Wyspa potrzeb własnych

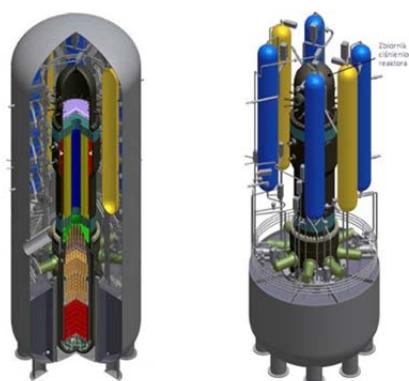
Natomiast, ze względu na sposób chłodzenia reaktory możemy podzielić :

1. Reaktory lekkowodne (LWR)
2. Reaktory wodne -ciśnieniowe (PWR)
3. Reaktory -wrzące (BWR)
4. Reaktory Kanałowe Wielkiej Mocy (RBMK)
5. Reaktory wodne basenowe
6. Reaktory ciężkowodne (PHWR)
7. Reaktory gazowe (GCR, AGR, HTGR)

8. Reaktory prędkie (LMFR)

9. Reaktory solne (MRS)

W oparciu o politykę energetyczną kraju od roku 2040/ PEP 2040/ ma nastąpić rozpowszechnienie energetyki jądrowej i uruchomienie pierwszego bloku do 2033 roku. Wytyczne PEP 2040 zakładają powstanie 6 bloków energetycznych. Krajowe podmioty gospodarcze w szczególności jednostki B+R mają szansę uczestniczyć w procesie budowy pierwszej elektrowni jądrowej. Małe Modułowe Reaktory (ang. SMR) lekko wodne o mocy 300MW mają stać się odpowiedzią na potrzeby własne przemysłu, kolejną dziedziną wykorzystania jest produkcja ciepła systemowego, oraz produkcja wodoru którego zapotrzebowanie stale wzrasta. Na uwagę zasługuje fakt że poszczególne moduły SMR można łączyć w bloki energetyczne tym samym zwiększając moc pojedynczego bloku.



Rys. 1. Model reaktora SMR. [źródło: Internet]

Układy i urządzenia energoelektroniczne na potrzeby SMR

Na wstępie wspomniano, iż elektrownie jądrową można podzielić na trzy wyspy/ sektory/. Ostatni z wymienionych sektorów przyczynia się do bezawaryjnej pracy elektrowni jądrowej .Tenże sektor składa się z wielu urządzeń energoelektronicznych pracujących w podwyższonym rygorze bezpieczeństwa oraz bezawaryjności. Urządzenia energoe-

elektroniczne muszą być odporne na ekstremalne czynniki środowiskowe : temperaturę, ciśnienie, wilgotność, promieniowanie jonizujące, wibracje (w tym zagrożenia sejsmiczne OBE/S1 SSE/S2), oraz pożar. Urządzenia muszą przejść proces kwalifikowania zgodny z szeregiem norm opisanych w IEEE 323.

W skład systemu potrzeb własnych wchodzi :

1. Odbiorniki I Kategorii, dla których niedopuszczalna jest przerwa w zasilaniu (dłuższa niż ułamek sekundy) również podczas pracy awaryjnej. Są to przede wszystkim układy kontrolne, pomiarowe, sterowania, zabezpieczeń oraz łączność.

2. Odbiorniki II kategorii, dla których to wymaga się stabilnego pewnego zasilania, jednak dopuszczalna jest krótkotrwała przerwa w zasilaniu. Niemniej nie dłuższa niż trzy minuty. Do tych urządzeń można zaliczyć urządzenia służące do chłodzenia reaktora i podstawowych urządzeń technologicznych.

3. Odbiorniki III kategorii to pozostałe urządzenia potrzeb własnych, które wymagają niezawodności zasilania podobnie jak przy konwencjonalnych elektrowniach.

Aby zapewnić najwyższą niezawodność zasilania potrzeb własnych elektrowni jądrowych przyjęto stosować następujące zasady ich projektowania i budowy:

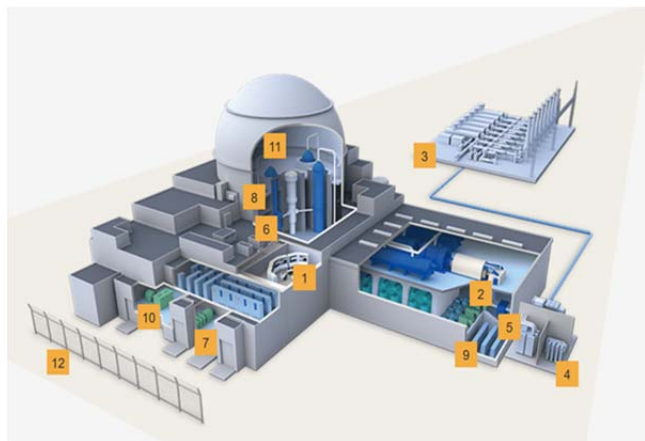
1. Wymaga się istnienie kilku alternatywnych źródeł zasilania; sieć energetyki zawodowej- dwa zasilania najlepiej z niezależnych linii, oraz zapasowe źródło zasilania na terenie elektrowni: agregaty prądotwórcze, baterie akumulatorów.

2. Urządzenia rozdzielcze (rozdzielnice) średniego napięcia powinny być podzielone na niezależne sekcje.

3. Odbiorniki energii elektrycznej muszą być podzielone na sekcje z punktu widzenia zadań technologicznych i wymagań bezpieczeństwa.

4. Powinny być zastosowane Urządzenia rozdzielcze zapewniające szybkie przełączanie dla przywrócenia zasilania wyłączonych odbiorników (czas poniżej 1 sekundy).

W celu przybliżenia zagadnienia na poniższym rysunku zaznaczono komponenty elektrowni jądrowej wraz z urządzeniami potrzeb własnych.



Rys. 2. Widok modelu elektrowni jądrowej z zaadaptowanymi urządzeniami. [źródło: Internet]

1. Sterownia wraz z systemami bezpieczeństwa
2. Turbina wraz z generatorem
3. Komory izolacji gazowej
4. Transformator
5. Wyłącznik obciążenia generatora oraz wyłącznik obrotu gazu
6. Silnik pompy
7. Generator Diesla
8. Zawory elektryczne
9. Rozdzielnia wraz z centrum sterowania silnikami
10. Magazyny energii z inwentarami
11. Oprzyrządowanie bezpieczeństwa
12. Wygodzenie ochronne z monitoringiem

10. Magazyny energii z inwentarami
11. Oprzyrządowanie bezpieczeństwa
12. Wygodzenie ochronne z monitoringiem

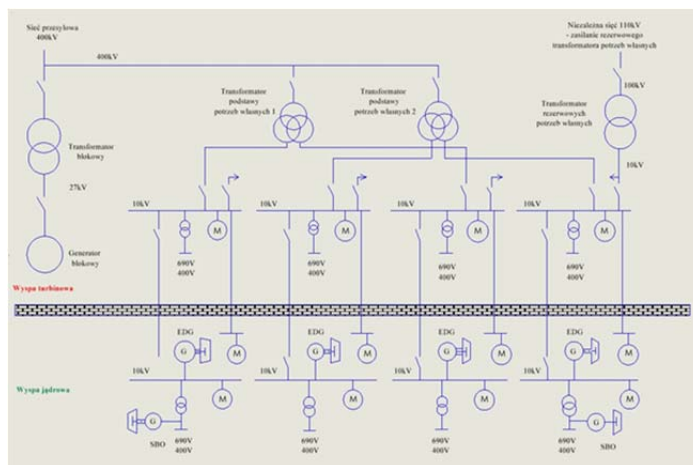
Zasilanie odbiorników energii potrzeb własnych elektrowni jądrowych realizuje się poprzez :

1. Sieć średniego napięcia przemiennego (zwykle 6kV lub 10kV) z której zasilane są silniki i inne odbiorniki dużej mocy (powyżej 200kW)

2. Sieci niskiego napięcia przemiennego (400 V lub 690 V), sprzęgniętą z siecią SN transformatorami SN/nn zapewniają zasilanie silników mniejszej mocy (poniżej 200kW) , innych odbiorników niskiego napięcia, instalacji ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji, zasilaczy urządzeń elektronicznych.

3. Sieć napięcia stałego 220V , z bateriami akumulatorów ładowanymi z sieci prądu przemiennego poprzez prostowniki, mogące zasilić również odbiorniki prądu przemiennego poprzez falowniki.

Na poniższym rysunku przedstawiono komponenty elektrowni jądrowej wraz z układami zasilania potrzeb własnych.



Rys. 3. Schemat elektryczny zasilania układów potrzeb własnych EJ Olkiluoto 3 z reaktorem Areva EPR. Objasnienia skrótów: EDG, SBO – agregaty zasilania awaryjnego, RCP – główne pompy cyrkulacyjne reaktora

Instytut Elektrotechniki posiada szerokie doświadczenie w dziedzinie energoelektroniki oraz układów sterowania, które z powodzeniem mogą okazać się pomocne w wsparciu PEP 2040.

Jako przykład urządzenia zaprojektowanego w IEL, dedykowanego na potrzeby energetyki jądrowej jest „ Wysooko precyzyjne źródło prądu stałego”. Urządzenie zostało wykonane na potrzeby Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej do zasilania elektromagnesu nadprzewodnikowego akceleratora cząstek elementarnych. Urządzenie umożliwia zadanie prądu zewnętrznym sygnałem sterującym do wartości 1000A i jego stabilizację długookresową na poziomie 50mA peak-to-peak nawet podczas zmian reaktancji elektromagnesu nadprzewodnikowego.

Urządzeniem mogącym mieć zastosowanie w EJ może być kompensator zapadów napięcia zasilającego 6,3 kV AC. Działanie polega na ciągłym monitorowaniu sieci zasilającej w miejscu przyłączenia odbiornika. Każde odchylenie od znamionowych parametrów napięcia, czyli jego zapadu lub zaniku jest natychmiast wykrywany (ułamek sekundy), co powoduje zastąpienie zasilania z S.E.E zasilaniem z baterii kondensatorów. Od chwili wykrycia zakłócenia w sieci zasilającej chronione obwody odbiorcze stają się instalacją wyspową. Przejście z pracy on-line na off-line i odwrotnie nie jest zauważalne przez odbiorniki, które nie tracą ciągłości zasilania.



Parametry urządzenia	
Napięcie zasilania. Moc	3 x 400VAC, 80 kW
Prąd wyjściowy i napięcie wyjściowe	1000A, 80 V
Dokładność stabilizacji długookresowej	50 mA (peak-to-peak)
Szybkość narastania prądu	1000 A/s
Interfejsy komunikacyjne	CAN, RS485, PROFIBUS

Rys. 4. Widok wysoko precyzyjnego źródła prądu zaimplementowanego w IBJ w Dubnej.



Rys. 5. Widok opracowanego kompensatora zapadów napięcia zasilającego.



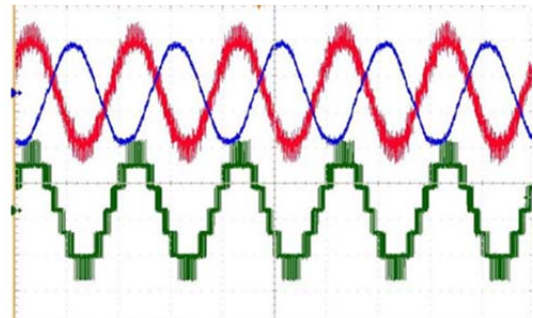
Rys. 6. Super kondensatorowy zasobnik energii.

Każda wyspa potrzeb własnych elektrowni jądrowej posiada zasobniki energii na wypadek zaniku napięcia zasilania. Zwykle tego typu urządzenia wykorzystuje się jako podtrzymanie napięcia zasilania urządzeń monitoringu oraz łączności. Tego typu urządzenie wykonane w Instytucie Elektrotechniki przedstawiono na rysunku 6.

Urządzeniami mającymi zastosowanie w energetyce jądrowej mogą okazać się wielopoziomowe falowniki średniego napięcia AC/AC



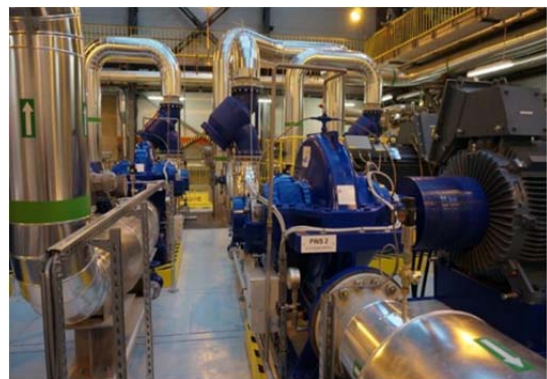
Rys. 7. Widok wielopoziomowego falownika średniego napięcia AC/AC.



Rys. 8. Oscylogram przebiegów napięć i prądów z falownika wielopoziomowego.

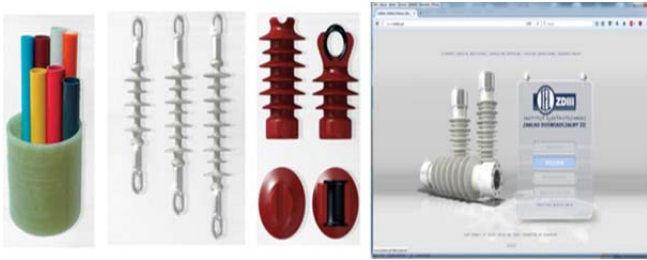
1. Niebieski – (Napięcie zasilania z S.E.E) -6kV, 50 Hz
2. Czerwony- (Prąd zasilania z S.E.E). Układ PFC z kompensacją mocy biernej: indukcyjnej, oraz pojemnościowej
3. Zielony - (Międzyfazowe napięcie wyjściowe z falownika).

Elektrownie jądrowe o ilet chłodzenie nie jest grawitacyjne wyposażone są w szereg układów chłodniczych obiegu cyrkulacyjnego. Powszechnym zjawiskiem staje się nabudowywanie falownika na korpus silnika- pozwala to na zaoszczędzenie miejsca, oraz wyeliminowanie okablowania fazowego. Instytut Elektrotechniki przez szereg lat wyspecjalizował się w produkcji napędów elektrycznych na potrzeby różnych gałęzi przemysłu. Poniższy rysunek przedstawia napędy elektryczne zastosowane do poprawnej pracy pomp wodociągowych.



Rys. 9. Zestaw napędów elektrycznych zasilających pompy wodociągowe.

Sieć Badawcza Łukasiewicz -Instytut Elektrotechniki od 1 stycznia 1966 roku zajmuje się produkcją izolatorów i materiałów elektroizolacyjnych, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie w energetyce jądrowej- linie przesyłowe na wyspie potrzeb własnych.



Rys. 10. Izolatory energetyczne i materiały elektroizolacyjne.

Sieć Badawcza Łukasiewicz nając na uwadze program PEP 2040 jest w stanie zaproponować urządzenia dla potrzeb własnych energetyki jądrowej. Poniżej przedstawiono proponowane urządzenia:

1. Falowniki 1-i 3 fazowe
2. Inwertery ładowania baterii
3. Modułowe magazyny energii na wypadek braku zasilania powstałego na skutek awarii. Skutkiem czego może okazać się utrata systemu sterowania, brak zasilania pomp obiegu chłodniczego oraz monitoringu
4. Prostowniki dwukierunkowe
5. Tyrystorowe przełączniki statyczne (TPS)
6. Układy prostownikowe

7. Wyspecjalizowane napędy elektryczne pomp cyrkulacyjnych reaktora (RCP)
8. Transformatory z systemem stabilizacji napięcia sieci
9. Izolatory

Podsumowanie i wnioski końcowe

Artykuł omawia budowę elektrowni jądrowej wraz z głównymi elementami elektrycznymi. Systemy potrzeb własnych z ich podziałem oraz opisem.

Autorzy: dr inż. Dariusz Świerczyński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: dariusz.swierczynski@iel.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Artur Moradewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: artur.moradewicz@iel.lukasiewicz.gov.pl; mgr inż. Przemysław Szostak, Sieć Badawcza Łukasiewicz-Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: przemyslaw.szostak@iel.lukasiewicz.gov.pl;

LITERATURA

- [1] Omar S. Mazzoni. Electrical Systems for Nuclear Power Plants
- [2] Fulcher M., Nuclear Power Plants
- [3] Knowles B.J Nuclear Electric Power volume 14
- [4] Lannoy A. Reliability of Nuclear Power Plants