



ELEKTROWNIE JĄDROWE W WARUNKACH AWARII KATASTROFALNEJ

dr inż. Ireneusz Grządzielski / Politechnika Poznańska
dr inż. Krzysztof Sroka / Politechnika Poznańska

1. WPROWADZENIE

W polskim systemie elektroenergetycznym wymagane są daleko idące zmiany w sektorze wytwórczym. Wynikają one z dwóch przesłanek:

- znacznie wyeksploatowanej bazy wytwórczej – ponad 45 proc. źródeł wytwórczych eksploatowane jest już dłużej niż trzydzieści lat
- konieczności znacznego ograniczenia emisji CO₂.

Ponieważ aktualnie 96 proc. energii elektrycznej wytwarza się w elektrowniach opalanych węglem kamiennym lub brunatnym, 2 proc. pochodzą z elektrociepłowni opalanych gazem ziemnym, a kolejne 2 proc. z odnawialnych źródeł energii, istnieje pilna potrzeba dywersyfikacji energii pierwotnej, wykorzystywanej w procesie generacji energii elektrycznej. W dokumencie „Polityka energetyczna Polski do roku 2030” przyjmuje się, że nadal podstawowym surowcem energetycznym w Polsce będzie węgiel, jednak w sposób znaczący w procesie wytwarzania energii elektrycznej wzrośnie udział odnawialnych źródeł energii oraz istotne miejsce znajdzie również energetyka jądrowa.

Ta zmiana struktury źródeł wytwórczych może w istotny sposób wpływać na pracę systemu elektroenergetycznego i znacząco determinować rozwiązania dotyczące scenariuszy obrony i odbudowy systemu elektroenergetycznego w warunkach awarii katastrofalnej.

Ponieważ w planach rozwoju elektroenergetyki do roku 2030 energetyka jądrowa może osiągnąć poziom nawet 10 000 MW mocy zainstalowanej w nowych elektrowniach, warto już teraz, na etapie planowania i projektowania tych elektrowni, brać pod uwagę aspekt bezpieczeństwa ich pracy i stosować rozwiązania pozwalające na właściwe ich użytkowanie w warunkach zagrożeń awariami systemowymi.

Wobec braku bezpośrednich doświadczeń eksploatacyjnych elektrowni jądrowych w Polsce, próbę wstępnej oceny zachowania się elektrowni jądrowych w warunkach blackoutu oparto na doświadczeniach z przebytych awarii w krajach ze znaczącą generacją z elektrowni jądrowych. W szczególności źródłem takich obserwacji była awaria w dniu 14 sierpnia 2003 roku w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie. Na bazie tych doświadczeń podjęto próbę zdefiniowania charakterystycznych cech elektrowni jądrowych i sformułowania wymagań, jakie muszą spełniać te elektrownie w systemie elektroenergetycznym w kontekście możliwości wystąpienia blackoutu.

2. DOŚWIADCZENIA Z AWARII SYSTEMOWYCH W KRAJACH Z GENERACJĄ Z ELEKTROWNI JĄDROWYCH

Doświadczenia z awarii systemowej w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie w roku 2003 [6]

Blackout w dniu 14 sierpnia 2003 roku spowodował wyłączenie 263 elektrowni (531 jednostek wytwórczych) w USA i Kanadzie, głównie w czasie drugiej fazy awarii (podczas kaskady napięciowej i częstotliwościowej), ale nie powodując znaczących szkód w tych obiektach. W czasie tej awarii, w USA aż dziewięć elektrowni jądrowych, a w Kanadzie siedem, zostało gwałtownie wyłączonych na skutek zaniku napięcia w sieci zewnętrznej (LOOP – *loss of offsite power*). Cztery inne kanadyjskie elektrownie jądrowe odłączyły się automatycznie od sieci na skutek zakłóceń w sieci, ale mogły nadal kontynuować pracę przy obniżonym poziomie mocy i powrócić

Streszczenie

W artykule podjęto próbę wstępnej oceny pracy elektrowni jądrowych w warunkach awarii katastrofalnej. Analizę tę przeprowadzono, wykorzystując doświadczenia z przebytych awarii katastrofalnych w krajach ze znaczącą generacją z elektrowni jądrowych. Na bazie tych doświad-

czeń podjęto próbę zdefiniowania charakterystycznych cech elektrowni jądrowych i sformułowania wymagań, jakie muszą spełniać te elektrownie w systemie elektroenergetycznym w kontekście możliwości wystąpienia blackoutu.



do systemu elektroenergetycznego po odbudowaniu sieci. Sześć amerykańskich elektrowni jądrowych i jedna kanadyjska doznały znacznych uszkodzeń elektrycznych, ale ich stan techniczny umożliwiał udział w restytucji systemu i generację energii elektrycznej.

Dziewięć amerykańskich elektrowni jądrowych wyłączyło się w ciągu 60 sekund na skutek zakłóceń w sieci. Wyłączenia wszystkich jednostek nastąpiły automatycznie przez zadziałanie systemów zabezpieczeń reaktora albo turbosespołu w odpowiedzi na warunki w sieci, a nie na skutek ręcznego odstawienia przez obsługę. Awaryjne odstawienie tych jednostek odbyło się z zachowaniem zasad bezpieczeństwa i dobrego stanu technicznego układów i urządzeń technologicznych, a wyłączone elektrownie pozostawały w bezpiecznych warunkach aż do restartu. Czas wyłączenia elektrowni jądrowych w USA zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Czas wyłączenia elektrowni jądrowych w USA

Elektrownia	Wyłączenie reaktora	Wyłączenie generatora
Perry	16:10:25	16:10:42
Fermi 2	16:10:53	16:10:53
Oyster Creek	16:10:58	16:10:57
Nine Mile1	16:11:00	16:11:09
Indian Point 2	16:11:00	16:11:21
Indian Point 3	16:11:00	16:11:32
FitzPatrick	16:11:04	16:11:04
Ginna	16:11:36	16:12:17
Nine Mile2	16:11:48	16:11:52

Nuclear Working Group (NWG), badająca przebieg awarii z 14 sierpnia 2003 roku, nie znalazła dowodów na to, że wyłączenie amerykańskich i kanadyjskich elektrowni jądrowych spowodowało blackout lub przyczyniło się do jego rozszerzenia. Wszystkie elektrownie reagowały prawidłowo na warunki w sieci elektroenergetycznej. Przebiegające procesy przejściowe w sieci spowodowały dojście parametrów pracy generatorów, turbin lub reaktorów do granic bezpieczeństwa i zadziałanie odpowiednich zabezpieczeń powodujących wyłączenie elektrowni. Odłączenie elektrowni od sieci następowało tylko w sposób automatyczny.

Powody wyłączenia elektrowni były następujące:

- wyłączenie generatora jako rezultat wahań napięcia i częstotliwości w systemie
- wyłączenie turbiny jako rezultat wahań częstotliwości w systemie
- wyłączenie reaktora jako wynik zadziałania systemu kontroli niskiego ciśnienia w turbinie, wywołanego wahaniami częstotliwości w systemie
- odłączenie generatora od systemu i automatyczna redukcja mocy reaktora jako skutek znacznej utraty mocy elektrycznej wywołanej wahaniami częstotliwości w systemie
- odłączenie generatora od systemu i automatyczna redukcja mocy reaktora spowodowana kołysaniami mocy w systemie
- redukcja mocy reaktora do poziomu 60 proc. (ten reaktor był gotowy kontynuować dostarczanie energii elektrycznej do systemu na polecenie operatora systemu).

Charakterystyczne cechy elektrowni jądrowej z punktu widzenia zagrożeń blackoutem są następujące:

- Układ elektryczny bloku jądrowego – w zasadzie jest on analogicznie rozwiązany jak w konwencjonalnych blokach energetycznych, zarówno w zakresie toru wyprowadzenia mocy, jak również zasilania potrzeb własnych (podstawowo z odczepu z głównego generatora i rezerwowo z mostu rezerwowo-rozruchowego), a istotna różnica polega na tym, że w przypadku nieakceptowalnego napięcia wyłączniki zasilania rozdzielni blokowych potrzeb własnych są automatycznie otwarte, a wybrane sekcje rozdzielni są natychmiast zasilone z szybkostartujących awaryjnych agregatów prądotwórczych.
- Reakcja elektrowni jądrowej na zmiany napięcia – w trybie automatycznym pracy regulatora napięcia głównego generatora, generator będzie reagował na zmiany napięć, zmieniając generację mocy biernej. Zabezpieczenie podnapięciowe gwarantuje bezpieczną pracę rozdzielni elektrowni jądrowej i poszczególnych elementów układu technologicznego (urządzeń potrzeb własnych). W szczególności



jest ono wykorzystane w reaktorach wodnych ciśnieniowych (PWR) do zabezpieczenia pomp wody chłodzącej reaktor.

- Cechy zabezpieczeń elektrowni jądrowej – zarówno generator, jak i turbina mają system zabezpieczeń podobny do stosowanego w konwencjonalnej elektrowni opalanej paliwem stałym. Generalnie systemy zabezpieczeń reaktora są projektowane do zabezpieczenia układu paliwowego reaktora przed uszkodzeniem oraz do zabezpieczenia układu chłodzenia reaktora przed przekroczeniami dopuszczalnych ciśnień i temperatur. Należy podkreślić, że pomiędzy poszczególnymi zabezpieczeniami występują określone interakcje.

Osobnej uwagi wymagają elektrownie kanadyjskie, w których stosowane są reaktory typu CANDU. W przeciwieństwie do reaktorów wodno-ciśnieniowych (PWR), wykorzystywanych w USA, w których jako paliwo stosowany jest uran wzbogacony, a zwykła woda pełni rolę czynnika chłodzącego i moderatora, reaktor CANDU wykorzystuje uran naturalny i ciężką wodę jako chłodziwo i moderator. Dzięki temu reaktor CANDU może pracować ze znaczną redukcją obciążenia. Znacznie mniejsza liczba prętów regulacyjnych w reaktorze pozwala na bezpieczną redukcję mocy nawet do 60 proc. Konsekwencją możliwej znacznej redukcji mocy jest to, że reaktor nie będzie ulegał „zatruciu” i będzie mógł pozostawać w stanie zredukowanej mocy nawet do dwóch dni. W reaktorze typu PWR wymagana jest redukcja mocy do zera. Te unikatowe własności reaktorów CANDU pozwalają na redukcję pełnej mocy do 60 proc. również podczas odłączenia generatora od systemu i w razie potrzeby utrzymywanie gotowości przez kilka dni. Po ponownym zsynchronizowaniu z systemem można już po kilku minutach uzyskać obciążenie 60 proc., a pełną moc po 25 godzinach. Specyficzna konstrukcja reaktora CANDU jest również powodem zastosowania innego systemu zabezpieczeń reaktora. Najczęściej reaktor taki ma dwa oddzielne, niezależne i różne systemy wyłączenia reaktora w przypadku zakłóceń w pracy systemu elektroenergetycznego. Pierwszy wykorzystuje dużą liczbę awaryjnych prętów kadmowych, które wprowadzane są do rdzenia reaktora, powodując pochłanianie neutronów. Drugi system polega na wysokociśnieniowym wtryskiwaniu azotanu gadolinu również pochłaniającego neutrony. W przypadku odłączenia jednostki wytwórczej od systemu następuje bezpieczny zrzut mocy reaktora, a utrzymanie niezbędnych systemów jest zabezpieczone przez zasilanie ich z baterii akumulatorów i awaryjnych generatorów. W przypadku redukcji obciążenia reaktora do zera powrót do stanu pełnego obciążenia reaktora trwa ok. 2 dni i dopiero po tym czasie można uruchomić turbinę i zsynchronizować jednostkę z systemem. Te własności reaktorów CANDU zostały wykorzystane do szybkiego restartu niektórych elektrowni jądrowych w Kanadzie.

Proces odbudowy zdolności wytwórczych elektrowni jądrowych po awarii w dniu 14 sierpnia był następujący:

Elektrownie amerykańskie

- 17 sierpnia – generację energii elektrycznej podjęły cztery elektrownie
- 18 sierpnia – dwie elektrownie
- 20 sierpnia – jedna elektrownia
- 21 sierpnia – jedna elektrownia
- 22 sierpnia – jedna elektrownia
- po usunięciu awarii na skutek problemów z urządzeniami – przywrócono pracę w dwóch

Elektrownie kanadyjskie

- 7 godzin po zdarzeniu – z siecią zostały zsynchronizowane cztery jednostki
- 17 i 18 sierpnia – trzy jednostki
- 22–25 sierpnia – pozostałe.

Awaria w Skandynawii w roku 2003 [4]

Awaria miała miejsce na obszarze południowej Szwecji i duńskiej Zelandii 23 września 2003 roku, czyli na pięć dni przed dużą awarią włoską. Początek awarii systemowej rozpoczął się od awaryjnego odstawienia bloku elektrowni jądrowej Oskarshamn o mocy 1175 MW, o godz. 12.30. Automatyczne uruchomienie rezerw w elektrowniach wodnych rozpoczęło proces stabilizacji częstotliwości, jednakże o godz. 12.35 miało miejsce podwójne zwarcie szyn zbiorczych w stacji Horred, wyprowadzającej moc z elektrowni jądrowej Ringhals, spowodowane mechanicznym uszkodzeniem odłącznika. W trakcie zwarcia wypadły dwa bloki jądrowe o mocy łącznej 1750 MW. W następnych 90 sekundach od zwarcia w stacji zaczęły wypadać kolejne linie przesyłowe oraz nastąpiło oddzielenie systemu południowego Szwecji, w którym wystąpił znaczny niedobór mocy skutkujący blackoutem.



Awaria w Szwecji pokazuje, że generację energii elektrycznej z elektrowni jądrowych cechują znaczne moce jednostkowe poszczególnych źródeł wytwórczych. Powoduje to w przypadku awarii znaczny deficyt mocy w systemie. Badania symulacyjne przeprowadzone w Szwecji podczas analizy awarii wykazały, że system elektroenergetyczny powinien w takich przypadkach spełniać kryterium bezpieczeństwa n-2.

3. WYMAGANIA STAWIANE ELEKTROWNIOM JĄDROWYM PODCZAS ODBUDOWY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Celem pierwszoplanowym każdej elektrowni znajdującej się w stanie beznapięciowym po wystąpieniu awarii katastrofalnej w systemie elektroenergetycznym, w tym elektrowni jądrowej w szczególności, powinno być możliwie szybkie odbudowanie zasilania energią elektryczną urządzeń potrzeb własnych tej elektrowni z zewnętrznego źródła. Co w konsekwencji zapewni bezpieczną obsługę reaktora i umożliwi restart elektrowni.

Szczegółowe instrukcje ruchowe elektrowni określają szczegółowo harmonogramy czasowe awaryjnego odstawienia jednostki wytwórczej oraz jej uruchomienia, a także warunki, które muszą być spełnione, aby można było przeprowadzać te procedury. Ze względu na te wymagania, powrót elektrowni jądrowej do pracy w systemie elektroenergetycznym może być znacznie dłuższy niż innych typów elektrowni. Takie stwierdzenie znajduje się w dokumencie NERC Electric System Restoration [6]: „Jądrowe jednostki wytwórcze wymagają specjalnego traktowania. Wytyczne startowe Nuclear Regulatory Commission generalnie nie zezwalają na gorący restart. Jednostki jądrowe, które zostały awaryjnie odłączone od sieci w sposób bezpieczny, mogą być przywrócone do pracy najwcześniej w ciągu około 24 godzin, ale bardziej prawdopodobne jest przywrócenie ich zdolności wytwórczych w czasie 48 godzin po awaryjnym wyłączeniu. Dlatego o ile przywrócenie napięcia z sieci zewnętrznej dla elektrowni jądrowej wymaga szczególnej szybkości, to jednak przywracanie zasilania odbiorców będzie musiało się odbyć bez udziału tej elektrowni jądrowej”. Z tych względów przywrócenie zasilania wszystkich odbiorców w podsystemach, w których znaczny udział mają elektrownie jądrowe, może nie być możliwe nawet przez kilka dni.

Elektrownia jądrowa w warunkach awaryjnego odstawienia

W pierwszym momencie po wystąpieniu blackoutu operator systemu przesyłowego musi zostać poinformowany o tym, czy elektrownia jądrowa została bezpiecznie odstawiiona i czy jest w stanie technicznym pozwalającym zachować jej bezpieczeństwo. O bezpiecznym przetrwaniu elektrowni po takim awaryjnym odstawieniu decydować będzie skuteczne zasilanie pewnych urządzeń potrzeb własnych. W elektrowniach konwencjonalnych będą to potrzeby związane z pracą obracarek turbin, pracą pomp oleju smarowego i uszczelniającego, z pracą obrotowych podgrzewaczy powietrza itd. W elektrowni jądrowej te potrzeby związane z bezpiecznym przetrwaniem są jeszcze bardziej znaczące. Dlatego elektrownie jądrowe są wyposażone w awaryjne źródła zasilania, najczęściej agregaty dieslowskie, które zapewniają w razie niebezpieczeństwa pracę systemów chłodzenia rdzenia reaktora w taki sposób, żeby reaktor i turbina mogły zostać bezpiecznie odstawione podczas utraty wszystkich zewnętrznych źródeł zasilania.

Generalnie elektrownia jądrowa może pozostawać w stanie awaryjnego odstawienia przez dłuższy okres czasu. Jednak wymagania techniczne elektrowni pozwalają kontynuować trwanie w stanie odstawienia przy braku zewnętrznych źródeł zasilania tylko przez określony czas. Dlatego tryb, w którym jednostka wytwórcza będzie zagrożona podczas blackoutu, jest funkcją długości czasu, jaki potrzebny będzie do przywrócenia zasilania z zewnętrznych źródeł. Natomiast ostatecznie wymagany czas restytucji będzie przyjmowany jako czas rozruchu aż do synchronizacji elektrowni jądrowej z systemem elektroenergetycznym.

Elektrownie jądrowe są projektowane tak, aby radzić sobie z utratą zewnętrznej mocy (LOOP – *loss of offsite power*) przy wykorzystaniu źródeł awaryjnych, głównie generatorów Diesla. Chociaż pręty regulacyjne są wsunięte do rdzenia reaktora, zatrzymując reakcję rozszczepiania, to jednak rozpadowi izotopów radioaktywnych powstałych w czasie pracy reaktora towarzyszy wydzielanie ciepła, które należy z rdzenia odbierać przez kilka tygodni. Brak chłodzenia może doprowadzić do uszkodzenia elementów paliwowych i uwolnienia materiału radioaktywnego do otoczenia. Do odprowadzania ciepła rozpadu w dłuższym okresie konieczne jest zasilanie z sieci zewnętrznej lub uruchomienie źródeł awaryjnych. Dlatego uważa się zdarzenie LOOP za potencjalnego prekursora dużo poważniejszych sytuacji. Ryzyko uszkodzenia rdzenia reaktora rośnie przy wzroście częstości występowania albo czasu trwania LOOP.

Operator systemu przesyłowego powinien ustalić, jak długo elektrownia jądrowa może pozostawać w stanie bez zewnętrznego zasilania (np. ilość paliwa do ciągłej pracy generatora awaryjnego zasilania potrzeb własnych elektrowni).

Dla operatora systemu przesyłowego zadaniem o najwyższym priorytecie będzie odbudowanie zewnętrznych źródeł napięcia dla elektrowni jądrowej. Jeśli rozważy się wykorzystanie elektrowni jądrowej do odbudowy systemu, należy błyskawicznie zapewnić jej zewnętrzne źródło napięcia.

Elektrownie jądrowe, ze względu na ich duże moce i odległe położenie, z reguły połączone są z systemem elektroenergetycznym poprzez sieci najwyższych napięć. Z tego powodu nie można będzie dostarczyć do elektrowni jądrowej energii z zewnętrznych źródeł przed odbudowaniem systemu sieci najwyższych napięć. Dlatego odbudowa sieci najwyższych napięć jest szczególnie ważna dla pełnej odbudowy systemu, w którym funkcjonuje elektrownia jądrowa. Odbudowa sieci najwyższych napięć może trwać wiele godzin, co z kolei uniemożliwia szybkie dołączenie elektrowni jądrowej do systemu.

Warunki odbudowy zdolności wytwórczych elektrowni jądrowych

Elektrownia jądrowa może znajdować się w jednym z czterech typowych stanów:

- praca
- postój po awaryjnym odstawieniu
- gorąca rezerwa
- zimna rezerwa.

Optymalnym trybem dla restartu jest stan gorącej rezerwy (również postój po awaryjnym odstawieniu). Operator (DIRE) elektrowni powinien szczegółowo określić warunki, jakie muszą być spełnione, aby elektrownia mogła pozostawać w tym trybie, i długość czasu, w jakim elektrownia może pozostawać w takim stanie. Powinien również określić czasy restartu i synchronizacji z siecią z tych stanów. Informacje takie powinny być uwzględnione przy opracowywaniu strategii odbudowy całego systemu.

Poniższe zestawienie przedstawia typowe działania, które należy podjąć przed przyłączeniem elektrowni jądrowej do sieci po utracie napięcia w rozdzielni:

- Napięcie dostarczane z sieci zewnętrznej do rozdzielni elektrowni jądrowej musi być normalne i stabilne. Elektrownie jądrowe nie są projektowane do uruchamiania bez zewnętrznego zasilania.
- Szyny rozdzielni potrzeb własnych elektrowni muszą być zasilane z przyelektrownianej stacji elektroenergetycznej, a awaryjny generator Diesla jest w tym momencie już odstawiony.
- Podstawowe urządzenia potrzeb własnych elektrowni, takie jak pompy chłodzenia reaktora i pompy wody recyrkulującej, muszą być uruchomione.
- Wszystkie warunki techniczne muszą być spełnione. Warunki techniczne dla każdej elektrowni jądrowej są ustalane jako część jej licencji. Z nich wynika, jakie wyposażenie musi być sprawne oraz jakie parametry procesu technologicznego muszą być spełnione, aby reaktor mógł pracować.

Przykładowe wymagania, które były między innymi narzucone po wydarzeniach 14 sierpnia, obejmują napełnienie zbiorników paliwa do agregatów Diesla, napełnienie zbiorników kondensatu, realizację wymuszonego obiegu chłodziwa reaktora. Należy wykonać testy sprawdzające zgodnie z obowiązującą specyfikacją techniczną (np. należy sprawdzić sprawność detektorów neutronów termicznych). W szczególności:

- system zabezpieczeń musi być ustawiony w stan umożliwiający uruchomienie
- ciśnienia i temperatury systemu chłodzenia reaktora muszą być ustawione odpowiednio do warunków jego uruchomienia
- należy przeprowadzić obliczenia krytyczności reaktora, aby określić ustawienie prętów regulacyjnych konieczne do osiągnięcia krytyczności, przy której reakcja łańcuchowa staje się samopodtrzymująca. Na skutek wyłączenia reaktora rośnie koncentracja niektórych produktów pochłaniających neutrony. W wodnych reaktorach ciśnieniowych należy dopasować koncentrację boru w chłodziwie w obiegu pierwotnym do poziomu wynikającego z obliczeń krytyczności.

Pod koniec cyklu paliwowego elektrownia jądrowa może nie mieć możliwości dostosowania koncentracji boru lub ustawienia prętów regulacyjnych wymaganego do uruchomienia. W takiej sytuacji uruchomienie będzie możliwe dopiero po zmniejszeniu absorpcji neutronów, a czas na to potrzebny to więcej niż 24 godziny po wyłączeniu. Może być konieczna zwłoka jednego lub więcej dni, zanim elektrownia jądrowa będzie mogła być uruchomiona po normalnym wyłączeniu.



Wyłączenia elektrowni są stanami przejściowymi dla urządzeń elektrownianych, które mogą wywoływać ich nietypowe stany eksploatacyjne i w związku z tym konieczna jest szczególnie staranna obsługa zapewniająca dobry stan techniczny tych urządzeń przed ich uruchomieniem i poprawny przebieg samego uruchamiania.

Dołączenie jednostek jądrowych do systemu elektroenergetycznego

Typowa kolejność dołączania jednostek wytwórczych do systemu jest następująca:

- elektrownie wodne
- turbiny gazowe
- elektrownie konwencjonalne (jednostki opalane paliwami kopalnymi)
- jednostki jądrowe.

Istotną część wszystkich jednostek niejądrowych powraca do systemu w ciągu 24 godzin. Szybkie dołączenie dużych jednostek do systemu nie jest pożądane z dwóch powodów. Duże jednostki mają z reguły wysokie minimum techniczne. Z tego względu nie jest zasadne dołączenie tych jednostek, zanim system nie będzie zdolny do zapewnienia odpowiedniego dociążania tych jednostek. W trakcie takiego procesu dociążania mogą wystąpić wahania częstotliwości, co może prowadzić do zadziałania zabezpieczeń i ponownego rozpadu systemu. Ponadto możliwość dołączenia tych jednostek do systemu jest ograniczona przez uruchamianie linii najwyższych napięć.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamski G., Jenkins R., Gill P., Nuclear Plant Requirements During Power System Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, August 1995, pp. 1486–1491.
2. Grzędzielski I., Marszałkiewicz K., Sroka K., Kuczyński R., Układy wyspowe wokół dużych jednostek wytwórczych jako podstawowy element scenariuszy odbudowy KSE. *Energetyka, Zeszyt tematyczny nr XVII: Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny – Rola dużych jednostek wytwórczych w realizacji planów obrony i odbudowy KSE*, 2008, s. 152–158.
3. Markov Y., Reshetov V., Stroeve V., Voropai N., Blackout Prevention in the United States, Europe and Russia, *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, November 2005.
4. Power failure in Eastern Denmark and Southern Sweden on 23 September 2003, Final report on the course of events, Elkraft System Report, November 4th, 2003, www.elkraft-system.dk.
5. Rychlak J., Kuczyński R., Regulacyjne Usługi Systemowe – środki techniczne obrony i odbudowy KSE, II Konferencja Naukowo-Techniczna: Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny, Poznań, kwiecień 2007, *Energetyka, Zeszyt tematyczny nr X/2007*.
6. U.S.-Canada Power System Outage Task Force: Final Report on the August 14, 2003, Blackout in the United States and Canada, April 2004.