

MODELOWANIE NIEZAWODNOŚCI FARMY WIATROWEJ Z WYKORZYSTANIEM SIECI BAYESOWSKICH I PROCESÓW SEMI-MARKOWA

Robert Adam SOBOLEWSKI

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok
tel.: 85 7469385; e-mail: r.sobolewski@pb.edu.pl

Streszczenie: Niezawodność urządzeń technicznych farmy wiatrowej (FW) wpływa między innymi na moc wyjściową farmy. Ilościową miarą tej niezawodności może być rozkład prawdopodobieństwa kombinacji stanów gotowości elektrowni wiatrowych (EW) farmy, tj. stanów oznaczających ich gotowość do produkcji energii elektrycznej i przekazywania jej do sieci elektroenergetycznej. Miarę tę można stosować do np. ilościowej analizy wpływu różnych topologii FW i niezawodności urządzeń farmy na jej niezawodność oraz wyznaczać wartość oczekiwaną mocy farmy z uwzględnieniem niezawodności. W artykule przedstawiono modele probabilistyczne opisujące ilościowo niezawodność FW, wykorzystujące sieci Bayesowskie (BN) i procesy semi-Markowa (PSM). W artykule zaprezentowano przykład obliczeniowy dotyczący analizy niezawodności FW składającej się z 4 EW, potwierdzający użyteczność metody.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, niezawodność, sieci Bayesowskie, procesy semi-Markowa

1. WSTĘP

Poziom wytwarzanej i przekazywanej mocy z FW do sieci elektroenergetycznej zależy między innymi od niezawodności urządzeń elektroenergetycznych wchodzących w skład farmy (generatorów, transformatorów, inwerterów, łączników, szyn zbiorczych, kabli, zabezpieczeń elektroenergetycznych itd.), o której decydują głównie: topologia wewnętrznej sieci elektroenergetycznej i niezawodność tych urządzeń. Waga czynników technicznych bardziej uwypukla się, jeżeli częściej i dłużej panują warunki wiatrowe sprzyjające produkcji energii w lokalizacji FW [1]. Za sprzyjające warunki wiatrowe należy uważać zakres prędkości wiatru, w którym energia wiatru może być przetwarzana na energię elektryczną. Topologia sieci wewnętrznej i niezawodność urządzeń decydują o gotowości do wytwarzania i przekazywania energii elektrycznej z poszczególnych EW do sieci zewnętrznej, w tym również w warunkach rozprzestrzeniania się uszkodzeń na urządzenia sąsiednie. Rozprzestrzenianie się uszkodzeń może mieć miejsce np. w sytuacji: (1) zawodności (zadziałania brakującego) zabezpieczenia elektroenergetycznego (ZE) lub (2) takiej lokalizacji wyłączników i ZE w sieci wewnętrznej, która nie pozwala na wyłączenie jedynie urządzenia uszkodzonego. Konsekwencją rozprzestrzeniania się uszkodzeń może być konieczność wyłączenia całej gałęzi zawierającej uszkodzone urządzenie lub całej FW.

Użyteczną ilościową miarą niezawodności FW może być rozkład prawdopodobieństwa występowania kombinacji stanów gotowości EW. Stan gotowości danej EW oznacza jej gotowość do produkcji energii elektrycznej i przekazywania jej do sieci zewnętrznej, co oznacza zdatność EW i pozostałych urządzeń niezbędnych do przekazania energii

do sieci. Miarę tę można wykorzystywać np. do analizy wpływu różnych topologii FW i niezawodności urządzeń farmy na jej niezawodność oraz do wyznaczania wartości oczekiwanej mocy farmy z uwzględnieniem niezawodności. Wiedza ta może być przydatna w analizie niezawodności wytwarzania energii elektrycznej.

W literaturze można znaleźć kilka różnych modeli niezawodności FW, które były wykorzystane między innymi do odwzorowania niezawodności FW w modelach opisujących charakterystyki mocy i energii wytwarzanej przez EW i FW [2–6]. Cechuje je uproszczone odwzorowanie wpływu wielu czynników na niezawodność.

W artykule przedstawiono modele probabilistyczne, które w większym stopniu niż dotychczas uwzględniają istotne czynniki decydujące o niezawodności FW i umożliwiają wyznaczanie rozkładu prawdopodobieństwa występowania kombinacji stanów gotowości EW wchodzących w skład farmy. Do sformułowania tych modeli wykorzystano BN i PSM. Za pomocą BN odwzorowano niezawodność FW uwzględniającą topologię sieci wewnętrznej oraz charakterystyki ilościowe opisujące niezawodność poszczególnych urządzeń farmy. Do wyznaczania tych charakterystyk zastosowano PSM, których parametrami są parametry niezawodnościowe urządzeń.

2. WYKORZYSTANIE BN DO MODELOWANIA NIEZAWODNOŚCI FW

Podstawy modelowania za pomocą BN można znaleźć między innymi w [7–8]. Sformułowanie modelu opisującego niezawodność FW obejmuje: (1) ustalenie węzłów sieci, (2) utworzenie struktury sieci, (3) sformułowanie tabel prawdopodobieństw warunkowych (TPW) dla węzłów i (4) zadanie prawdopodobieństw poszczególnych stanów niezawodnościowych urządzeń reprezentowanych przez węzły źródłowe. Ustalenie węzłów sieci dotyczy: (1) węzłów źródłowych, (2) węzłów pośrednich reprezentujących kombinacje stanów niezawodnościowych węzłów rodziców dla tych węzłów i (3) węzła typu „liść” reprezentującego niezawodność FW. Węzłom źródłowym przypisane są TPW zawierające prawdopodobieństwa stanów urządzeń. Liczba stanów danego urządzenia zależy od jego rodzaju i umiejscowienia w strukturze wewnętrznej FW. Celowe jest rozróżnienie urządzeń o: (1) dwóch stanach – „zdatne” i „niezdatne” oraz (2) trzech stanach – „zdatne”, „niezdatne” i „niezdatne z rozprzestrzeniającym się uszkodzeniem”. Wyodrębnienie urządzeń o trzech stanach jest spowodowane zadziałaniami brakującymi ZE (ZE obejmuje zabezpieczenie i wyłącznik

realizujący wyłączenie urządzenia) prowadzącymi do wyłączenia nieuszkodzonych urządzeń (np. zamiast wyłączenia uszkodzonej EW musi być wyłączona gałąź zawierająca tę i inne EW przyłączone do tej gałęzi). Węzłom pośrednim i typu „liść” przypisane są TPW zawierające warunkowe prawdopodobieństwa stanów wynikających z możliwych kombinacji stanów uwzględnionych w węzłach rodzicach. Węzły pośrednie mogą uwzględniać dwa lub trzy rodzaje stanów. Natomiast TPW przypisana do węzła typu „liść” zawiera wszystkie kombinacje stanów gotowości lub niegotowości EW. Stan gotowości „1” EW oznacza, że zdalna jest EW i urządzenia w przynajmniej jednej gałęzi sieci wewnętrznej, dzięki którym możliwe jest przekazywanie wytworzonej energii do sieci zewnętrznej. Stan niegotowości „0” oznacza stan przeciwny w stosunku do stanu „1”. Utworzenie struktury sieci obejmuje zadanie wszystkich węzłów sieci i połączenie ich krawędziami adekwatnie do: uwzględnianych w modelu urządzeń, topologii sieci wewnętrznej i kombinacji stanów niezawodnościowych urządzeń. Sformułowanie TPW dla węzłów pośrednich i węzła typu „liść” polega na wypełnieniu ich wartościami prawdopodobieństw „0” lub „1” w taki sposób, aby zależności na prawdopodobieństwa warunkowe poszczególnych stanów reprezentowanych przez te węzły odwzorowywały występowanie możliwych kombinacji stanów węzłów rodziców. W przypadku węzłów pośrednich wartości w TPW mogą odpowiadać dysjunkcji i koniunkcji stanów węzłów rodziców lub też innym kombinacjom stanów urządzeń.

3. WYKORZYSTANIE PSM DO MODELOWANIA NIEZAWODNOŚCI URZĄDZEŃ FW

Podstawy modelowania za pomocą PSM można znaleźć w [9–10]. Wykorzystanie PSM do wyznaczania prawdopodobieństw stanów niezawodnościowych urządzeń FW umożliwia: (1) opisanie czasów do uszkodzenia i czasów odnowy dowolnymi rozkładami probabilistycznymi oraz (2) uwzględnienie kolejności występowania uszkodzeń. Druga cecha pozwala na właściwe odwzorowanie w modelu stanów niezawodnościowych związanych z wyłączeniami potrzebnymi i brakującymi ZE. Dzięki temu możliwe jest wyznaczanie prawdopodobieństw stanów urządzeń, związanych zadaniami brakującymi ZE, które powodują rozprzestrzenianie się uszkodzeń i konieczność wyłączania urządzeń sąsiednich w stosunku do uszkodzonego urządzenia. Założono, że: (1) urządzenie i ZE mogą znajdować się albo w stanie zdatności albo niezdatności, (2) po wystąpieniu uszkodzenia w urządzeniu i jednoczesnej zdatności ZE urządzenie jest wyłączane (zadziałanie potrzebne), (3) po wystąpieniu uszkodzenia w urządzeniu przy niezdatnym ZE urządzenie nie jest wyłączane przez ZE (zadziałanie brakujące) lecz przez zabezpieczenie rezerwowe oraz (4) pomija się zadaniami zbędne ZE i występowanie uszkodzeń ZE w momencie pojawienia się uszkodzenia w urządzeniu.

Wyróżniono następujące stany PSM: S_0 – urządzenie i ZE są zdadne, S_1 – urządzenie jest niezdatne i ZE jest zdadne, S_2 – urządzenie jest zdadne i ZE jest niezdatne, S_3 – urządzenie i ZE są niezdatne. Jeśli przyjąć, że czasy do uszkodzenia urządzenia i ZE oraz odnowy urządzenia i ZE opisane są rozkładem wykładniczym, to prawdopodobieństwa poszczególnych stanów mają postać:

$$P_0 = \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot \xi}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}, \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{\lambda^2 \cdot \xi}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}, \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\gamma \cdot \xi \cdot \theta}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}, \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot \theta}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}. \quad (4)$$

gdzie: λ – intensywność uszkodzeń urządzenia,
 θ – intensywność uszkodzeń ZE,
 γ – intensywność odnowy urządzenia,
 ξ – intensywność odnowy ZE.

W przypadku urządzeń o dwóch stanach, prawdopodobieństwa tych stanów wyrażone są następująco:

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest zdadne
$$P_{ZD} = P_0 + P_2, \quad (5)$$

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne
$$P_{NIEZ} = P_1 + P_3. \quad (6)$$

Natomiast, w przypadku urządzeń o trzech stanach, prawdopodobieństwa tych stanów opisują wzory:

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest zdadne
$$P_{ZD} = P_0 + P_2, \quad (7)$$

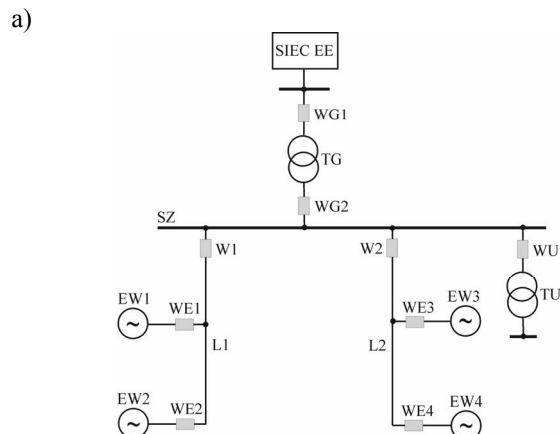
- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne
$$P_{NIEZ} = P_1, \quad (8)$$

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne i wystąpiło zadziałanie brakujące ZE
$$P_{NIEZB} = P_3. \quad (9)$$

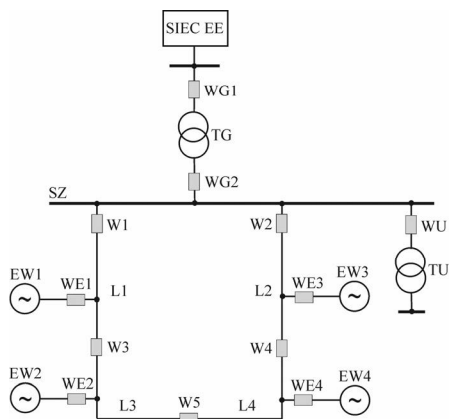
4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Przykład dotyczy analizy niezawodności FW o dwóch topologiach sieci wewnętrznej (promieniowej i pierścieniowej), obejmującej wyznaczenie: (1) rozkładu prawdopodobieństwa kombinacji stanów gotowości EW wchodzących w skład FW oraz (2) wartości oczekiwanej mocy FW z uwzględnieniem jej niezawodności dla różnych prędkości wiatru w lokalizacji EW1. FW zlokalizowana jest w Polsce i składa się z 4 EW, każda o mocy $P_{Ri} = 2$ MW ($i = 1, 2, 3, 4$). Założono, że czasy do uszkodzenia i odnowy urządzeń są opisane rozkładami wykładniczymi i znane są ich parametry. Wartości oczekiwane mocy EW wyznaczono na podstawie rzeczywistych danych zarejestrowanych w odstępach 10 min. w okresie od stycznia do czerwca 2012 r. Liczba rekordów danych wyniosła 21282.

Na rysunku 1 przedstawiono schematy promieniowej i pierścieniowej topologii wewnętrznej sieci FW. Natomiast na rys. 2 zaprezentowano BN odwzorowującą strukturę niezawodnościową FW o promieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia węzłów źródłowych odnoszą się do oznaczeń urządzeń FW (rys. 1a).



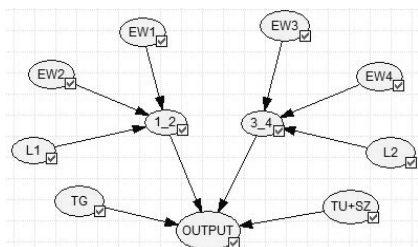
b)



Rys. 1. Schemat wewnętrznej sieci FW o topologii:

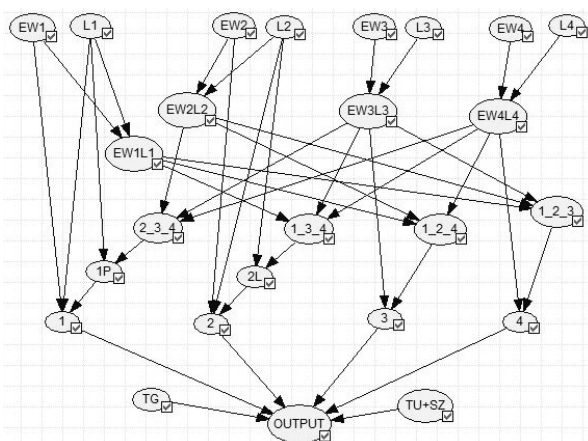
a) promieniowej i b) pierścieniowej. Oznaczenia: L1 i L2, L3 i L4 – linie kablowe, W1, W2, W3, W4, WE1, WE2, WE3, WE4, WG1, WG2, WU – wyłączniki, TG i TU – transformatory, SZ – szyny zbiorcze, SIEC EE – sieć elektroenergetyczna

Węzły 1_2 i 3_4 (rys. 2) są węzłami pośrednimi, natomiast węzeł OUTPUT jest typu „liść”.



Rys. 2. BN odwzorowująca strukturę niezawodnościową FW o promieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia w tekście

Na rysunku 3 przedstawiono BN odwzorowującą strukturę niezawodnościową FW o pierścieniowej topologii sieci. Oznaczenia węzłów źródłowych odnoszą się do oznaczeń urządzeń FW (Rys. 1b). Węzły EW1L1, EW2L2, EW3L3 i EW4L4, 1_2_3, 1_2_4, 1_3_4, 2_3_4, 1P, 1L, 1, 2, 3 i 4 są węzłami pośrednimi. Węzeł OUTPUT jest typu „liść”.



Rys. 3. BN odwzorowująca strukturę niezawodnościową FW o pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia w tekście

Parametry rozkładów czasu do uszkodzenia i odnowy urządzeń FW są następujące: intensywność uszkodzeń EWi $\lambda_{EWi}=0,09$ 1/rok, intensywność uszkodzeń Lj $\lambda_{Lj} = 0,08$ 1/rok (topologia promieniowa) i $\lambda_{Lj} = 0,04$ 1/rok (topologia pierścieniowa), intensywność uszkodzeń TG $\lambda_{TG} = 0,02$ 1/rok,

intensywność uszkodzeń TU i SZ $\lambda_{TU+SZ} = 0,03$ 1/rok, intensywność uszkodzeń ZE $\theta_{ZE} = 0,005$ 1/rok, intensywność odnowy $\gamma_U = 182,5$ 1/rok – dotyczy EWi, Lj, TG, TU i SZ oraz intensywność odnowy ZE $\xi_{ZE} = 121,667$ 1/rok.

Tablica 1 przedstawia prawdopodobieństwa kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatości.

Tablica 1. Wartości prawdopodobieństwa wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatości (niezawodność a priori) dla dwóch topologii sieci wewnętrznej

Kombinacja EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatości	Prawdopodobieństwo kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatości	
	t. promieniowa	t. pierścieniowa
EW1,EW2,EW3,EW4	0,996573	0,996491
EW1,EW2,EW3	0,000489	0,000788
EW1,EW2,EW4	0,000489	0,000788
EW1,EW3,EW4	0,000489	0,000747
EW1,EW3	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$5,90 \cdot 10^{-7}$
EW1,EW4	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$5,13 \cdot 10^{-7}$
EW1	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$7,80 \cdot 10^{-8}$
EW2,EW3,EW4	0,000489	0,000747
EW2,EW3	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$5,13 \cdot 10^{-7}$
EW2,EW4	$2,39 \cdot 10^{-7}$	$5,90 \cdot 10^{-7}$
EW2	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$7,80 \cdot 10^{-8}$
EW3,EW4	0,000516	$4,93 \cdot 10^{-7}$
EW3	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$3,51 \cdot 10^{-10}$
EW4	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$3,51 \cdot 10^{-10}$
BRAK	0,000438	0,000436

Z tablicy 1 wynika, że w obu przypadkach topologii sieci prawdopodobieństwo wszystkich EW znajdujących się w stanie zdatości jest największe w stosunku do prawdopodobieństw wystąpienia innych kombinacji. Jest ono o 0,0082% większe dla topologii promieniowej w porównaniu z pierścieniową. Najmniejsze prawdopodobieństwa są dla pojedynczych kombinacji EW. O wyższej niezawodności topologii pierścieniowej w stosunku do promieniowej świadczyć mogą większe prawdopodobieństwa w odniesieniu do trzech EW i niższe prawdopodobieństwo braku przynajmniej jednej EW.

Korzystając z wartości oczekiwanych mocy EW i obliczonych prawdopodobieństw kombinacji EW znajdujących się jednocześnie w stanie zdatości (Tablica 1) można wyznaczyć wartości oczekiwane mocy FW. Tablica 2 przedstawia wartości mocy farmy o obu topologiach sieci wyrażone w procentach wartości mocy uwzględniającej zdatość wszystkich urządzeń.

Z tablicy 2 wynika, że warianty niezawodności urządzeń FW w różnym stopniu wpływają na wartość oczekiwaną mocy. Wpływ ten zależy również od przyjętej topologii sieci wewnętrznej i założonej prędkości wiatru. W wariancie a priori niezawodności urządzeń można się spodziewać niewielkiego obniżenia wartości oczekiwanej mocy w stosunku do wartości podanej w ostatnim wierszu tablicy, przy czym wynosi ono 0,14% i 0,12% odpowiednio dla topologii promieniowej i pierścieniowej. W przypadku promieniowej, niezdatność EW1 powoduje obniżenie mocy od 23,53% przy $v_1 = [5-6]$ do 25,09% przy $v_1 = [9-10]$. Natomiast w przypadku pierścieniowej, obniżenie mocy w obu przypadkach prędkości wiatru jest o 0,02% mniejsze w stosunku do pro-

mieniowej. Niezdatność L1 skutkuje obniżeniem mocy od 51,51% przy $v_1 = [5-6)$ do 52,44% przy $v_1 = [9-10)$ – dla promieniowej i od 23,53% przy $v_1 = [5-6)$ do 25,09% przy $v_1 = [9-10)$ – dla pierścieniowej.

Tablica 2. Wartości oczekiwane mocy FW dla różnych stanów niezawodnościowych urządzeń i różnych prędkości wiatru, wyrażone w procentach mocy uwzględniającej zdadność urządzeń

Topologia/ wariant niezawodności urządzeń FW	Prędkość wiatru w lokalizacji EW1 [m/s]			
	<i>a priori</i>	$v_1=[5-6)$	$v_1=[7-8)$	$v_1=[9-10)$
Prom./ <i>a priori</i>	99,86%	99,86%	99,86%	99,86%
Pierśc./ <i>a priori</i>	99,88%	99,88%	99,88%	99,88%
Promieniowa/ niezdat. EW1	75,55%	76,47%	75,78%	74,91%
Pierścieniowa/ niezdat. EW1	75,57%	76,49%	75,80%	74,93%
Promieniowa/ niezdatna L1	48,34%	48,49%	47,97%	47,56%
Pierścieniowa/ niezdatna L1	75,55%	76,47%	75,78%	74,91%
Wartość oczekiwana mocy [kW]	2133,4	1094,7	2657,1	4946,0

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano modele probabilistyczne wykorzystujące BN i PSM, przeznaczone do analizy niezawodności FW o różnych topologiach sieci wewnętrznej. Główną zaletą modeli jest uwzględnienie najważniejszych czynników technicznych decydujących o gotowości EW. Ważną cechą opracowanych modeli jest również łatwe wnioskowanie dotyczące prawdopodobieństw kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdadności, dla

zadanych stanów niezawodnościowych wybranych urządzeń FW. Wyznaczane prawdopodobieństwa można również wykorzystywać do obliczania wartości oczekiwanej mocy FW z uwzględnieniem jej niezawodności.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Sobolewski R.A.: Analiza niezawodności układu wytwórczo-przylączeniowego turbiny wiatrowej wykorzystująca kryterium ekonomiczne zawodności, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 Nr 10/2010, s. 324–329.
2. Sannino A., Breder H., Nielsen E.K.: Reliability of collection grids for large offshore wind parks. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden – June 11–15, 2006.
3. Quinonez-Varela G., Ault G.W., Anaya-Lara O., McDonald J.R.: Electrical collector system options for large offshore wind farms. IET Renewable Power Generation, 2007, 1, (2), pp. 107–114.
4. Bahirat H.J., Mork B.A., Hoidalén H.K.: Comparison of wind farm topologies for offshore applications. IEEE Power and Energy Society General Meeting 2012.
5. Mabel M.C., Raj R.E., Fernandez E.: Analysis on reliability aspects of wind power. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1210–1216.
6. Ali M., Matevosyan J., Milanovic J.V.: Probabilistic assessment of wind farm annual energy production. Electric Power Systems Research 89 (2012) 70–79.
7. Darwiche A.: Modeling and reasoning with Bayesian networks. Cambridge University Press 2009.
8. Kjaerulff U.B., Madsen A.L.: Bayesian Networks and Influence Diagrams. A Guide to Construction and Analysis. Springer.
9. Grabski F.: Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Seria: Badania systemowe, tom 30. Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2002.
10. Howard R.A.: Dynamic Probabilistic Systems. Volume II: Semi-Markov and Decision Processes. Dover Books on Mathematics, 2007.

WIND FARM AVAILABILITY MODELING BASED ON BAYESIAN NETWORKS AND SEMI-MARKOV PROCESSES

Factors that influence wind-farm output power also include the availability of a farm. The availability depends on: arrangements of a wind farm (WF), internal collection grid topology and reliability of electrical equipment included in WF (e.g. generators, transformers, cables, breakers, protective relays, busbars and so on). One of the measures of WF availability can be probability distribution of combinations of availability states of wind turbines generators (WTGs), where availability state means the WTG is able to generate and deliver power to external grid. This measure can be applied in e.g.: (1) study of different internal collection grid topologies and reliability of WF electrical equipment effects on availability of WF and (2) assessment of WF output power considering farm availability. In this work the probabilistic models of WF availability are presented. Because of stochastic nature of electrical equipment failures they rely on two modeling methods, i.e. Bayesian networks and semi-Markov processes. Both approaches allow taking into account the electrical equipment of WF, internal grid topology of WF and reliability characteristics of equipment. The case study of availability modeling is presented as well.

Keywords: wind energy, availability, Bayesian networks, semi-Markov processes