

Wind Farm Reliability Modelling Using Bayesian Networks and Semi-Markov Processes

Author

Robert Adam Sobolewski

Keywords

wind power, reliability, Bayesian networks, semi-Markov processes

Abstract

Technical reliability plays an important role among factors affecting the power output of a wind farm. The reliability is determined by an internal collection grid topology and reliability of its electrical components, e.g. generators, transformers, cables, switch breakers, protective relays, and busbars. A wind farm reliability's quantitative measure can be the probability distribution of combinations of operating and failed states of the farm's wind turbines. The operating state of a wind turbine is its ability to generate power and to transfer it to an external power grid, which means the availability of the wind turbine and other equipment necessary for the power transfer to the external grid. This measure can be used for quantitative analysis of the impact of various wind farm topologies and the reliability of individual farm components on the farm reliability, and for determining the expected farm output power with consideration of the reliability. This knowledge may be useful in an analysis of power generation reliability in power systems. The paper presents probabilistic models that quantify the wind farm reliability taking into account the above-mentioned technical factors. To formulate the reliability models Bayesian networks and semi-Markov processes were used. Using Bayesian networks the wind farm structural reliability was mapped, as well as quantitative characteristics describing equipment reliability. To determine the characteristics semi-Markov processes were used. The paper presents an example calculation of: (i) probability distribution of the combination of both operating and failed states of four wind turbines included in the wind farm, and (ii) expected wind farm output power with consideration of its reliability.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015307

1. Introduction

A wind farm's power output transferred to a power grid depends on several technical, wind, and environmental factors. The technical factors include the farm's reliability. The reliability is determined mainly by the internal collection grid topology and the reliability of the electrical equipment, including generators, transformers, inverters, cables, switch breakers, protective relays and busbars, included in the wind farm (WF). The importance of technical factors increases with more and longer lasting wind conditions conducive to power generation at the WF site [1]. The wind speed range at which wind energy can be converted into electricity is considered as favourable. The farm's internal collection grid topology and equipment reliability determine an ability to power generation and output from individual wind turbines to the external grid, also while failures are spreading to adjacent components. Failures can spread in the following situations: (i) protective relay's failure (missed tripping when required), or (ii) circuit breakers' and protective relays' location in the internal grid, which doesn't allow for outage of the damaged components

only. Failure spreading may result in the need to switch off the entire branch with the damaged component or the entire WF.

A useful WF reliability quantitative measure may be the probability distribution of the occurrence of a combination of wind turbine (WT) both operating and failed states. Operating state of a WT means its ability to generate power and output it to the external power grid, which means the availability of the WT and of other components necessary to transfer power to an external grid. This measure can be used for analysing the impact of different WF internal grid topologies and WF components availability on the farm's reliability, and determining its expected output power in view of its reliability. This knowledge may be useful in an analysis of power generation reliability.

The relevant literature offers several different WF reliability models, which were used for WF reliability representation in models that quantitatively describe the characteristics of WT and farm power and energy output [2–7]. These models feature a simplified representation of the impact of multiple factors on WF reliability.

This paper presents probabilistic models that, to a greater extent than before, take into account the important factors that determine WF's reliability and allow one to determine the probability distribution of the occurrence of combinations of both operating and failed states of the WTs that make up the farm. To formulate the models Bayesian networks (BN) and semi-Markov processes (SMP) were used. Using BN wind farm reliability was mapped taking into account the internal collection grid topology and quantitative characteristics describing the reliability of a farm's individual components. To determine these characteristics SMP was used, the parameters of which are the components' reliability parameters.

2. The use of Bayesian networks for wind farm reliability modelling

The methodological basis for probabilistic modelling using BN can be found in the literature, such as [8–9]. Formulation of a WF reliability model entails the following elements: (i) identification of network nodes, (ii) development of network structure, (iii) formulation of conditional probability tables (CPT) for nodes, and (iv) setting of probabilities of the occurrence of individual operating and failed states of the wind farm components represented by root nodes. The network nodes identification includes: (i) root nodes, (ii) intermediate nodes representing the combination of both operating and failed states of the parent nodes, and (iii) a leaf node representing the wind farm's reliability. To the root nodes CPTs are assigned that include the probabilities of the components operating and failed states occurrence. The number of these states for a component depends on its type and location in the wind farm's internal topology. It is appropriate to distinguish between devices with: (i) two states – “operating” or “failed”, and (ii) three states – “operating”, “failed” and “failed with failure spreading.” This identification of three-state components is due to the occurrence of protective relays' missed tripping when required that leads to switching off unaffected components; e.g. instead of switching off a failed turbine the branch must be switched off that contains this and other turbines connected to this branch. To the intermediate nodes and leaf node CPTs are assigned that include the conditional probabilities of the occurrence of both operating and failed states, resulting from possible combinations of states considered in their respective parent nodes. As for the root nodes, intermediate nodes may feature two or three types of states. On the other hand, the CPT assigned to the leaf node contains all combinations of both operating and failed states of the turbines. WT operating state “1” means an ability of the turbine and the components in at least one internal collection grid branch, through which the unit's power generated may be transferred to the external grid. Failed state “0” means the condition opposite to state “1”. The BN structure development entails identification of all network nodes and connecting their edges adequately to the components taken into account in the WF's model, topology of its internal collection grid, and combination of the farm components' operating and failed states. Formulation of CPT for intermediate nodes and the leaf node entails assigning to them the probabilities “0” or “1” in such a way that the dependencies describing the conditional probabilities

of occurrence of individual states represented by the nodes reflect the occurrence of possible combinations of states of their respective parent nodes. Values in the CPTs assigned to intermediate nodes may correspond to disjunction and conjunction of states of their parent nodes or other combinations of component states.

3. The use of semi-Markov processes for wind farm equipment reliability modelling

The methodological basis for probabilistic modelling using SMP can be found in the literature, such as [10–11]. The use of SMP to determine the probabilities of the considered WF components operating and failed states allows for: (i) describing the time to fault and repair time of component with any probability distribution and (ii) considering the sequence of component failure occurrences. The second feature allows for appropriate representation in the model of up and down states related to protective relays' necessary and missed trips. Owing to this the probabilities can be determined of the occurrences of WF component's up and down states related to protective relays' missed trips, which cause the spreading of failures and the need to shut down the component adjacent to that affected by the failure. The model assumes that: (i) farm component can be either up or down, (ii) protective relay can be either up or down (protection relay consists of a relay and a switch breaker that switches off the damaged unit), (iii) upon the occurrence of a component failure while the component's protective relay is available, the component shall be switched off (necessary tripping), (iv) upon the occurrence of a component failure while the component's protective relay is unavailable, the component shall not be switched off by the protective relay (missed tripping), but by a backup protective relay, and (v) protective relay's unfolded tripping and failures are neglected upon the occurrence of a failure of the component so protected.

States of SMP are defined as follows: S₀ – component and protective relay are in their “up” states, S₁ – component is failed and protective relay is in “up” state (necessary tripping), S₂ – component is in an “up” state and protective relay is in “down” state, S₃ – component and protective relay are in their “down” states (missed tripping). If the times to failure and repair times of component and protective relay are described by exponential distribution, then the probabilities of occurrence of each SMP state have the following forms:

$$P_0 = \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot \xi}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}, P_1 = \frac{\lambda^2 \cdot \xi}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}$$

$$P_2 = \frac{\gamma \cdot \xi \cdot \theta}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}, P_3 = \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot \theta}{(\gamma + \lambda) \cdot \lambda \cdot \xi + (\lambda + \xi) \cdot \gamma \cdot \theta}$$

where:

λ – component failure rate, θ – protective relay failure rate, γ – component repair rate, ξ – protective relay repair rate.

For components with two reliability states (operating and failed), the states' probabilities in BN root nodes are expressed by the following formulas:

- probability that the component occupies operating state
 $P_{ZD} = P_0 + P_2$
- probability that the component occupies failed state
 $P_{NIEZ} = P_1 + P_3$

For components with three reliability states (operating, failed and failed with spreading failure), the states' probabilities in BN root nodes are expressed by the following formulas:

- probability that the component occupies operating state
 $P_{ZD} = P_0 + P_2$
- probability that the component occupies failed state
 $P_{NIEZ} = P_1$
- probability that the component occupies failed with spreading failure state
 $P_{NIEZB} = P_3$

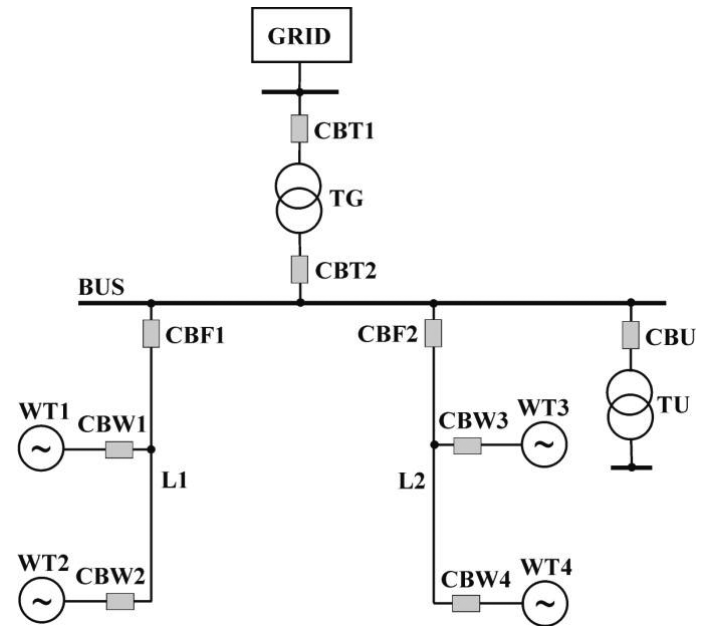
4. Example calculation

The example calculation refers to reliability analysis of an FW with two internal collection grid topologies (radial and ring), including the determination of: (i) probability distribution of combinations of farm's WTs operating and failed states, and (ii) expected WF output power in view of its reliability for different wind speed at the site of WT number 1 (WT1). WF is located in Poland and consists of four WTs, with rated power $P_{Ri} = 2$ MW ($i = 1, 2, 3, 4$) each. It was assumed that the times to failure and repair times of the components are described by exponential distributions with known parameters. The expected WTs output power were determined based on actual data recorded at 10-minute intervals during the period from January to June 2012. The amount of data used in the calculation amounted to 21 282 records. The expected WTs output powers determined for a priori wind speeds and for speeds assumed for WT1 site, are shown in Tab. 1.

| Expected WT output power [kW] | Wind speed at WT1 site | | | | | |
|--|------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| | a priori | $U_1 = [3-4]$ | $U_1 = [5-6]$ | $U_1 = [7-8]$ | $U_1 = [9-10]$ | $U_1 = [11-12]$ |
| $E[P_{WT1}]$ | 519.3 | 100.2 | 256.4 | 640.6 | 1235.6 | 1794.4 |
| $E[P_{WT2}]$ | 581.4 | 111.8 | 306.7 | 740.0 | 1354.8 | 1819.6 |
| $E[P_{WT3}]$ | 527.4 | 108.8 | 270.0 | 659.8 | 1214.4 | 1709.2 |
| $E[P_{WT4}]$ | 505.3 | 110.7 | 261.6 | 616.7 | 1141.2 | 1654.4 |
| Percentage difference between min. and max | 15.0% | 11.6% | 19.6% | 20.0% | 18.7% | 10.0% |

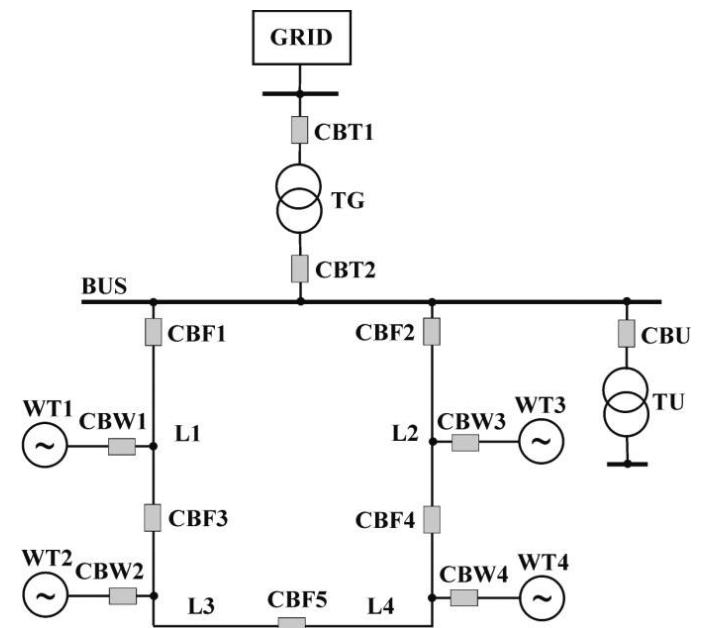
Tab. 1. Expected WTs output power determined for various wind speeds at WT1 site

The expected WTs output power listed in Tab. 1 were obtained from the model as a BN, whereby its structure and node parameters were set in the network learning process. In Tab. 1 the expected WTs output power are colour coded to illustrate the order of values from the smallest to the largest for a given wind speed, i.e. min. value – yellow, second min. value – green,



Legend: L1 and L2 – cables; CBF1, CBF2 – circuit breakers in feeders; CBW1, CBW2, CBW3 and CBW4 – WT circuit breakers; TG – MV/HV transformer; CBT1 and CBT2 – TG transformer circuit breakers; TU – grounding and auxiliary MV/LV transformer; CBU – TU transformer circuit breaker; BUS – busbar; GRID – external power grid

Fig. 1. Diagram of WF internal collection grid with radial topology



Legend: L3 and L4 – cables; CBF3, CBF4 and CBF5 – section circuit breakers. Other designations as in Fig. 1

Fig. 2. Diagram of WF internal collection grid with ring topology

third min. value – blue and max. value – red. It may be noted that despite the same WT power ratings their expected output powers for a given wind speed are:

- (i) different, and
- (ii) their order may change within the min. to max. range. The last row of Tab. 1 shows the percentage difference between min. and max. for a given wind speed. This difference reaches as much as 20% at wind speed $u_1 = [7-8]$.

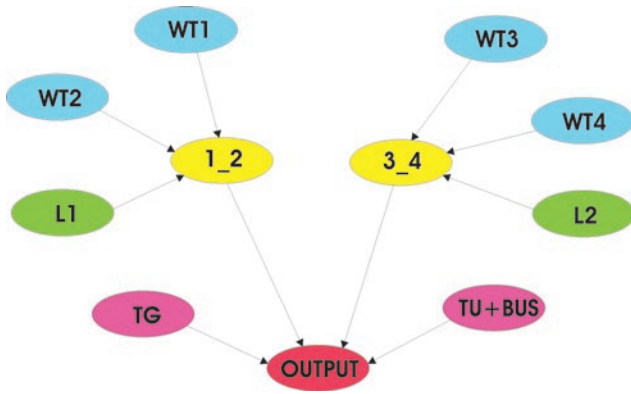


Fig. 3. BN mapping WF reliability structure of WF with radial internal collection grid topology. Root node designations as in Fig. 1. Other node designations in the text

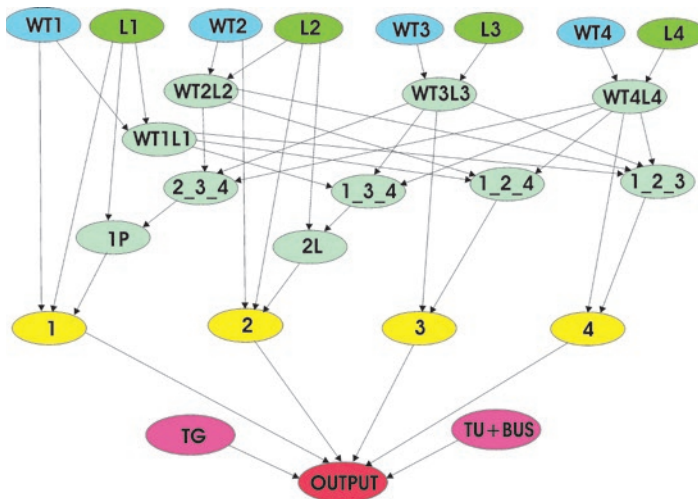


Fig. 4. BN mapping the reliability structure of FW with ring internal collection grid topology. Root node designations as in Fig. 2. Other node designations in the text

Fig. 1 is a diagram of an WF internal grid's radial topology. It is the simplest configuration with relatively short cable lengths. Its biggest drawback is relatively low reliability resulting primarily from the need to switch off an entire branch containing a few or a dozen or so WTs because of the occurrence of failures of some components in the branch, such as cables and circuit breakers.

Fig. 2 shows a diagram of an WF internal grid's ring topology. The main difference with respect to the radial topology is the cable ring closure and the addition of sectioning switches in cable lines. This entails an increase in the total cable length. In return, the grid reliability increases, because as a rule no switching off of failed equipment results in the need to switch off the entire branch containing a few or a dozen or so WTs.

Fig. 3 shows the BN mapping the reliability structure of WF with radial internal collection grid topology. The root node designations refer to the WF components designations (Fig. 1). Nodes 1_2 and 3_4 are the intermediate nodes mapping combinations of operating and failed states of components WT1, WT2, L1, WT3,

| Combination of WTs that are simultaneously in operation | Occurrence probability of combination of WTs that are simultaneously in operation | |
|---|---|-----------------------|
| | Radial topology | Ring topology |
| WT1 and WT2 and WT3 and WT4 | 0.996573 | 0.996491 |
| WT1 and WT2 and WT3 | 0.000489 | 0.000788 |
| WT1 and WT2 and WT4 | 0.000489 | 0.000788 |
| WT1 and WT2 | 0.000516 | $6.23 \cdot 10^{-7}$ |
| WT1 and WT3 and WT4 | 0.000489 | 0.000747 |
| WT1 and WT3 | $2.39 \cdot 10^{-7}$ | $5.90 \cdot 10^{-7}$ |
| WT1 and WT4 | $2.39 \cdot 10^{-7}$ | $5.13 \cdot 10^{-7}$ |
| WT1 | $2.53 \cdot 10^{-10}$ | $7.80 \cdot 10^{-8}$ |
| WT2 and WT3 and WT4 | 0.000489 | 0.000747 |
| WT2 and WT3 | $2.39 \cdot 10^{-7}$ | $5.13 \cdot 10^{-7}$ |
| WT2 and WT4 | $2.39 \cdot 10^{-7}$ | $5.90 \cdot 10^{-7}$ |
| WT2 | $2.53 \cdot 10^{-10}$ | $7.80 \cdot 10^{-8}$ |
| WT3 and WT4 | 0.000516 | $4.93 \cdot 10^{-7}$ |
| WT3 | $2.53 \cdot 10^{-10}$ | $3.51 \cdot 10^{-10}$ |
| WT4 | $2.53 \cdot 10^{-10}$ | $3.51 \cdot 10^{-10}$ |
| NONE | 0.000438 | 0.000436 |

Tab. 2. Occurrence probabilities of combinations of WTs that are simultaneously in operation (a priori reliability of WF components) in radial and ring topologies of internal collection grid

WT4 and L2. OUTPUT node is the node that takes into account the combination of states of nodes 1_2, 3_4, TG and TU+BUS.

Fig. 4 shows a mapping BN reliability structure WF of the radial topology of the internal collection grid. The root node designations refer to the WF equipment designations (Fig. 2). Nodes WT1L1, WT2L2, WT3L3 and WT4L4 are the intermediate nodes mapping combinations of operating and failed states of the components represented by root nodes, respectively, WT1 and L1, WT2 and L2, WT3 and L3, and WT4 and L4. Nodes 1_2_3, 1_2_4, 1_3_4 and 2_3_4 are the intermediate nodes mapping states of nodes WT_xL_x (x = 1, 2, 3, 4). Nodes 1P, 1L, 1, 2, 3 and 4 also are intermediate nodes, wherein the last four of these represent combinations of operating and failed states of WT_x and the other inner grid equipment necessary to output the power from WT_x to the external grid. The OUTPUT node takes into account combinations of x nodes' states.

The WF equipment's time to fault and repair time distribution parameters are as follows:

- WT_i failure rate $\lambda_{WTx} = 0.09$ 1/year
- L_j failure rate $\lambda_{Lx} = 0.08$ 1/year (for cable lines in farm internal grid radial topology) and $\lambda_{Lx} = 0.04$ 1/year (for cable lines in farm internal grid ring topology)
- TG failure rate $\lambda_{TG} = 0.02$ 1/year
- TU and BUS failure rate $\lambda_{TU+BUS} = 0.03$ 1/year
- protective relay failure rate $\theta_{PR} = 0.005$ 1/year

- repair rate $\gamma_{ij} = 182.5$ 1/year (average repair time 48 hrs) – for components: WT_x, L_x, TG, TU and BUS
- protective relay repair rate $\xi_{PR} = 121.667$ 1/year (average repair time 72 hrs).

Tab. 2 shows the determined occurrence probabilities of a combination of WTs that are simultaneously in operation in radial and ring internal collection grid topology.

Combination of WTs that are simultaneously in operation
Occurrence probability of combination of WTs that are simultaneously in operation

It follows from Tab. 2 that in both internal grid topologies the occurrence probability of all WTs (i.e. WT1 and WT2 and WT3 and WT4) in the operation is the highest relative to the probability of other combinations. The probability is around 0.0082% higher in radial topology than in ring topology. The lowest probabilities were noted for individual combinations of WTs. Higher reliability in ring topology than in radial topology may be indicated by the higher occurrence probabilities of a combination of three WTs that are simultaneously in operation in both topologies

and the lower probability of at least one WT in operation (the NONE combination in Tab. 2). FW reliability analysis can also be linked to the determination of occurrence probabilities of an WTs combination that are in operation in both topologies while one or more components are failed. The determined occurrence probabilities of a number of WTs in operation in both topologies while WT1 and L2 are failed are shown in Tab. 3.

Using the expected WT output powers (Tab. 1) and the calculated probabilities of a combination of WTs EWs that are simultaneously in operation in both topologies (Tab. 2 i 3), expected WF output power can be determined. Tab. 4 shows the expected output powers of WF with radial and ring internal collection grid topologies expressed as a percentage of the expected WF output power (with all WF components are in operation).

It follows from Tab. 4 that the WF components variants of states (a priori, WT1 failed, L1 failed) impact to varying degrees the expected WF output power. This impact also depends on the adopted internal collection grid topology and the assumed wind speed. In the WF components variant of states a slight decrease may be expected of the expected output power compared to the value specified in the last row of Tab. 4. In radial topology it is

| Combination of WTs that are simultaneously in operation | Occurrence probability of combination of WTs that are simultaneously in operation, while WT1 is failed | | Occurrence probability of combination of WTs that are simultaneously in operation, while L1 is failed | |
|---|--|----------------------|---|----------------------|
| | Radial topology | Ring topology | Radial topology | Ring topology |
| WT2 and WT3 and WT4 | 0.997102 | 0.997238 | 0 | 0.997279 |
| WT2 and WT3 | 0.000489 | 0.000789 | 0 | 0.000489 |
| WT2 and WT4 | 0.000489 | 0.000789 | 0 | 0.000788 |
| WT2 | 0.000516 | $6.88 \cdot 10^{-7}$ | 0 | 0.000300 |
| WT3 and WT4 | 0.000964 | 0.000747 | 0.998108 | 0.000489 |
| WT3 | $4.72 \cdot 10^{-7}$ | $5.91 \cdot 10^{-7}$ | 0.000489 | $2.40 \cdot 10^{-7}$ |
| WT4 | $4.72 \cdot 10^{-7}$ | $5.13 \cdot 10^{-7}$ | 0.000489 | $3.86 \cdot 10^{-7}$ |
| NONE | 0.000438 | 0.000436 | 0.000913 | 0.000654 |

Tab. 3. Occurrence probabilities of a number of WTs that are simultaneously in operation in both topologies while WT1 is failed

| WF internal grid topology / WF components variant of states | Wind speed at WT1 site | | | | | |
|---|------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| | <i>a priori</i> | $v_1 = [3-4]$ | $v_1 = [5-6]$ | $v_1 = [7-8]$ | $v_1 = [9-10]$ | $v_1 = [11-12]$ |
| <i>Radial/a priori</i> | 99.86% | 99.86% | 99.86% | 99.86% | 99.86% | 99.86% |
| <i>Ring/a priori</i> | 99.88% | 99.88% | 99.88% | 99.88% | 99.88% | 99.88% |
| Radial/WT1 failed | 75.55% | 76.67% | 76.47% | 75.78% | 74.91% | 74.18% |
| Ring/WT1 failed | 75.57% | 76.69% | 76.49% | 75.80% | 74.93% | 74.19% |
| Ring/L1 failed | 48.34% | 50.80% | 48.49% | 47.97% | 47.56% | 48.14% |
| Radial/L1 failed | 75.55% | 76.67% | 76.47% | 75.78% | 74.91% | 74.18% |
| Expected WF output power in view of components operation [kW] | 2133.4 | 431.5 | 1094.7 | 2657.1 | 4946.0 | 6977.7 |

Tab. 4. Expected WF output power for various operating and failed states of FW components and various wind speeds at WT1 site, expressed as a percentage of the expected output with all farm components in operation

0.14%, while in ring topology 0.12%. In radial topology the WT1 damage reduces the output power from 23.53% at $u_1 = [3-4]$ to 25.82% at $u_1 = [11-12]$. However, in ring topology the output power reduction in both wind speed cases is 0.02% less than in radial topology. L1 damage reduces the output power from 49.20% at $u_1 = [3-4]$ to 52.44% at $u_1 = [9-10]$ – for radial topology and from 23.33% at $u_1 = [3-4]$ to 25.82% at $u_1 = [11-12]$ – for ring topology.

5. Conclusions

This paper presents probabilistic models using BN and SMP for reliability analysis of WF with different internal collection grid topologies. The main advantage of the models is taking into account the most important technical factors that determine WT ability to generate power and its output to the external power grid. An important feature of the developed models is also easy inference on the probabilities of a combination of WTs that are simultaneously in operation for assumed operating and failed states of WF components. Obtained probabilities can also be successfully used to calculate the expected WF output power in view of its reliability.

REFERENCES

1. Sobolewski R.A., Analiza niezawodności układu wytwórczo-przyłączeniowego turbiny wiatrowej wykorzystująca kryterium ekonomiczne zawodności [Reliability analysis of a wind turbine's generation/output system using economic reliability criterion], *Przegląd Elektrotechniczny* 2010, Vol. 86, No. 10, pp. 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, 11–15 June 2006.
3. Quinonez-Varela G. i in., Electrical collector system options for large offshore wind farms, *IET Renewable Power Generation* 2007, No. 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. Segura-Heras I., Escrivá-Escrivá G., Alcazar-Ortega M., Wind farm electrical power production model for load flow analysis, *Renewable Energy* 2011, No. 36, pp. 1008–1013.
6. Mabel M.C., Raj R.E., Fernandez E., Analysis on reliability aspects of wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, No. 15, pp. 1210–1216.
7. Ali M., Matevosyan J., Milanovic J.V., Probabilistic assessment of wind farm annual energy production, *Electric Power Systems Research* 2012, No. 89, pp. 70–79.
8. Darwiche A., Modelling and reasoning with Bayesian networks, Cambridge University Press 2009.
9. Kjaerulf U.B., Madsen A.L., Bayesian Networks and Influence Diagrams. A Guide to Construction and Analysis, Springer.
10. Grabski F., Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji [Semi-Markov reliability and operability models], Series: Badania Systemowe, Vol. 30, Polish Academy of Sciences, Systems Research Institute, Warsaw 2002.
11. Howard R.A., Dynamic Probabilistic Systems, Vol. II: Semi-Markov and Decision Processes, Dover Books on Mathematics, 2007.

Robert Adam Sobolewski

Białystok University of Technology

e-mail: r.sobolewski@pb.edu.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering at Białystok University of Technology, where he was also awarded a doctoral degree in technical sciences (2002). His research interests include: determination of probabilistic characteristics and forecasting of wind farm power and energy output, reliability analysis of power generation in wind farms and of power systems, use of stochastic processes and Bayesian networks in power systems modelling.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 71–76. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Modelowanie niezawodności farmy wiatrowej z wykorzystaniem sieci Bayesowskich i procesów semi-Markowa

Autor

Robert Adam Sobolewski

Słowa kluczowe

energetyka wiatrowa, niezawodność, sieci Bayesowskie, procesy semi-Markowa

Streszczenie

Wśród czynników wpływających na moc wyjściową farmy wiatrowej (FW) istotną rolę odgrywa niezawodność techniczna. O niezawodności tej decydują m.in.: topologia wewnętrznej sieci elektroenergetycznej FW i niezawodność urządzeń elektrycznych wchodzących w jej skład, np. generatorów, transformatorów, kabli, łączników, zabezpieczeń elektroenergetycznych, szyn zbiorczych. Ilościową miarą niezawodności FW może być rozkład prawdopodobieństwa kombinacji stanów gotowości elektrowni wiatrowych (EW) farmy. Stan gotowości danej EW oznacza jej gotowość do produkcji energii elektrycznej i przekazywania jej do zewnętrznej sieci elektroenergetycznej, co oznacza zdatność EW oraz pozostałych urządzeń niezbędnych do przekazania energii do sieci zewnętrznej. Miarę tę można wykorzystywać m.in. do ilościowej analizy wpływu różnych topologii FW i niezawodności poszczególnych urządzeń farmy na jej niezawodność oraz wyznaczać wartość oczekiwaną mocy farmy z uwzględnieniem niezawodności. Wiedza ta może być przydatna w analizie niezawodności wytwarzania energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono modele probabilistyczne opisujące ilościowo niezawodność FW z uwzględnieniem wspomnianych wyżej czynników technicznych. Do sformułowania modeli niezawodnościowych wykorzystano sieci Bayesowskie (BN) i procesy semi-Markowa (PSM). Za pomocą BN odwzorowano niezawodność strukturalną FW i charakterystyki ilościowe opisujące niezawodność urządzeń. Do wyznaczania tych charakterystyk zastosowano PSM. W artykule zaprezentowano przykład obliczeniowy dotyczący wyznaczenia: (i) rozkładu prawdopodobieństwa kombinacji stanów gotowości czterech EW wchodzących w skład FW i (ii) oczekiwanej mocy wyjściowej FW z uwzględnieniem jej niezawodności.

1. Wstęp

Poziom wytwarzanej i przekazywanej mocy z FW do sieci elektroenergetycznej zewnętrznej zależy od wielu czynników technicznych, wiatrowych i środowiskowych. Do czynników technicznych zalicza się między innymi jej niezawodność. O niezawodności tej decydują głównie: topologia wewnętrznej sieci elektroenergetycznej i niezawodność urządzeń elektrycznych, m.in. generatorów, transformatorów, inwerterów, kabli, łączników, zabezpieczeń elektroenergetycznych, szyn zbiorczych, wchodzących w skład FW. Waga czynników technicznych bardziej wypukła się, jeżeli częściej i dłużej panują warunki wiatrowe sprzyjające produkcji energii elektrycznej 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 zachodzić, np. w sytuacji: (i) zawadności (zadziałania brakującego) zabezpieczenia elektroenergetycznego (ZE) lub (ii) 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 urządzenie dotknięte uszkodzeniem lub całej FW.

Jedną z użytecznych ilościowych miar 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 zewnętrznej sieci elektroenergetycznej, co oznacza zdatność EW oraz pozostałych urządzeń niezbędnych do przekazania energii do sieci zewnętrznej. Miarę tę można wykorzystywać m.in. 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 m.in. do odwzorowania niezawodności FW w modelach ilościowo opisujących charakterystyki mocy i energii wytwarzanej przez EW i FW [2–7]. Modele te cechuje uproszczone odwzorowanie wpływu wielu czynników na niezawodność FW.

W artykule przedstawiono modele probabilistyczne, które w większym stopniu niż dotychczas uwzględniają istotne czynniki decydujące o niezawodności FW i umożliwiają wyznaczenie 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 sieci Bayesowskich do modelowania niezawodności farmy wiatrowej

Podstawy metodologiczne modelowania probabilistycznego z wykorzystaniem BN można znaleźć w literaturze, m.in. w [8–9]. Sformułowanie modelu opisującego

niezawodność FW obejmuje następujące elementy: (i) ustalenie węzłów sieci, (ii) utworzenie struktury sieci, (iii) sformułowanie tabel prawdopodobieństw warunkowych (TPW) dla węzłów i (iv) zadanie prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych stanów niezawodnościowych urządzeń FW reprezentowanych przez węzły źródłowe. Ustalenie węzłów sieci dotyczy: (i) węzłów źródłowych, (ii) węzłów pośrednich reprezentujących kombinacje stanów niezawodnościowych węzłów rodziców dla tych węzłów i (iii) węzła typu liść, reprezentującego niezawodność FW. Węzłom źródłowym przypisane są TPW, zawierające prawdopodobieństwa wystąpienia stanów niezawodnościowych urządzeń. Liczba stanów dla danego urządzenia zależy od jego rodzaju i umiejscowienia w strukturze wewnętrznej FW. Celem jest rozróżnienie urządzeń o: (i) dwóch stanach – „zdatne” i „niezdatne” oraz (ii) trzech stanach – „zdatne”, „niezdatne” i „niezdatne z rozprzestrzeniającym się uszkodzeniem”. Wyodrębnienie urządzeń o trzech stanach jest spowodowane występowaniem zdarzeń brakujących ZE prowadzących do wyłączania urządzeń niedotkniętych uszkodzeniem, 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 wystąpienia stanów niezawodnościowych, wynikających z możliwych kombinacji stanów uwzględnionych w węzłach rodzicach. Podobnie jak w przypadku węzłów źródłowych, węzły pośrednie mogą uwzględniać dwa lub trzy rodzaje stanów. Natomiast TPW przypisane do węzła typu liść zawiera wszystkie kombinacje stanów gotowości/niegotowości EW. Stan gotowości „1” EW oznacza, że zdatna 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 FW, topologii jej sieci wewnętrznej i kombinacji stanów niezawodnościowych urządzeń farmy. Sformułowanie TPW węzłów pośrednich i węzła typu liść polega na wypełnieniu ich wartościami prawdopodobieństw „0” lub „1” w taki sposób, aby zależności na prawdopodobieństwa warunkowe wystąpienia 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 procesów semi-Markowa do modelowania niezawodności urządzeń FW

Podstawy metodologiczne modelowania probabilistycznego z wykorzystaniem PSM można znaleźć w literaturze [10–11]. Wykorzystanie PSM do wyznaczania prawdopodobieństw rozpatrywanych stanów niezawodnościowych urządzeń FW umożliwia: (i) opisanie czasów do uszkodzenia i czasów odnowy urządzeń dowolnymi rozkładami probabilistycznymi oraz (ii) uwzględnienie kolejności występowania uszkodzeń urządzeń. Druga cecha pozwala na właściwe odwzorowanie w modelu stanów niezawodnościowych związanych z wyłączeniami potrzebnymi i brakującymi ZE. Dzięki temu możliwe jest wyznaczanie prawdopodobieństw występowania stanów niezawodnościowych urządzeń FW, związanych z zadaniami brakującymi ZE, które powodują rozprzestrzenianie się uszkodzeń i konieczność wyłączania urządzeń sąsiednich w stosunku do urządzenia dotkniętego uszkodzeniem. W modelu założono, że: (i) urządzenie może się znajdować albo w stanie zdadności albo niezadadności, (ii) ZE może się znajdować w stanie zdadności albo niezadadności (ZE obejmuje zabezpieczenie i wyłącznik realizujący wyłączenie uszkodzonego urządzenia), (iii) po wystąpieniu uszkodzenia w urządzeniu i jednoczesnej zdadności ZE ma miejsce wyłączenie urządzenia (zadziałanie potrzebne), (iv) po wystąpieniu uszkodzenia w urządzeniu przy niezadadnym ZE urządzenie nie jest wyłączane przez ZE (zadziałanie brakujące) lecz przez zabezpieczenie rezerwowe oraz (v) pomija się zadziałania zbędne ZE i występowanie uszkodzeń ZE w momencie pojawienia się uszkodzenia w chronionym urządzeniu.

Stany PSM są zdefiniowane następująco: S_0 – urządzenie i ZE są zdadne, S_1 – urządzenie jest niezadadne i ZE jest zdadne, S_2 – urządzenie jest zdadne i ZE jest niezadadne, S_3 – urządzenie i ZE są niezadadne. Jeśli przyjąć, że czasy do uszkodzenia urządzenia i ZE oraz odnowy urządzenia i ZE opisane są rozkładem wykładniczym, to prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych stanów mają postać:

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

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

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

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

gdzie:

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

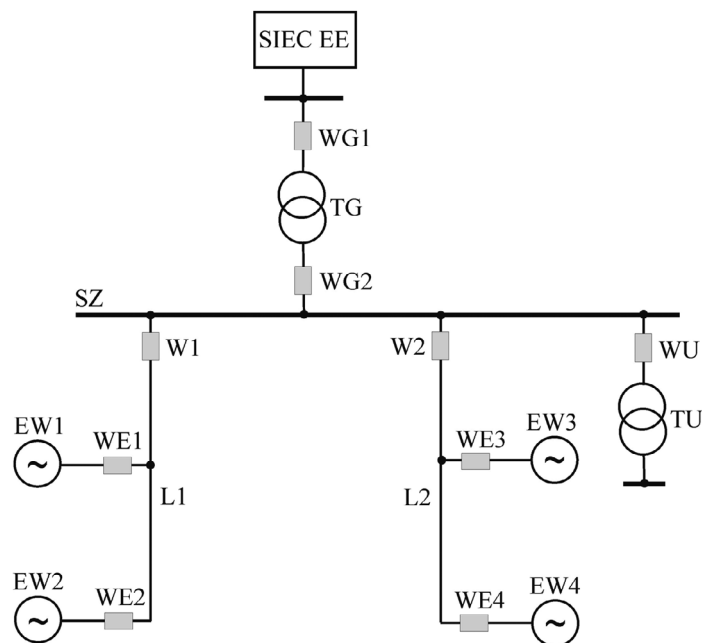
W przypadku urządzeń o dwóch stanach niezawodnościowych prawdopodobieństwa tych stanów w węzłach źródłowych BN wyrażone są następującymi wzorami:

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest zdadne

$$p_{ZD} = P_0 + P_2$$

| Wartość oczekiwana mocy EW [kW] | Prędkość wiatru w lokalizacji EW1 | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| | a priori | $U_1 = [3-4]$ | $U_1 = [5-6]$ | $U_1 = [7-8]$ | $U_1 = [9-10]$ | $U_1 = [11-12]$ |
| $E[P_{EW1}]$ | 519,3 | 100,2 | 256,4 | 640,6 | 1235,6 | 1794,4 |
| $E[P_{EW2}]$ | 581,4 | 111,8 | 306,7 | 740,0 | 1354,8 | 1819,6 |
| $E[P_{EW3}]$ | 527,4 | 108,8 | 270,0 | 659,8 | 1214,4 | 1709,2 |
| $E[P_{EW4}]$ | 505,3 | 110,7 | 261,6 | 616,7 | 1141,2 | 1654,4 |
| Procentowa różnica między min. i max | 15,0% | 11,6% | 19,6% | 20,0% | 18,7% | 10,0% |

Tab. 1. Wartości oczekiwane mocy EW wyznaczone dla różnych prędkości wiatru w lokalizacji EW1



Oznaczenia: L1 i L2 – linie kablowe, W1, W2 – wyłączniki w polach liniowych, WE1, WE2, WE3 i WE4 – wyłączniki EW, TG – transformator SN/WN, WG1 i WG2 – wyłączniki transformatora TG, TU – transformator uziemiający i potrzeb własnych SN/nn, WU – wyłącznik transformatora TU, SZ – szyny zbiorcze, SIEC EE – sieć elektroenergetyczna zewnętrzna

Rys. 1. Schemat sieci wewnętrznej FW o topologii promieniowej

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne

$$p_{NIEZ} = P_1 + P_3$$

Natomiast w przypadku urządzeń o trzech stanach niezawodnościowych, prawdopodobieństwa tych stanów w węzłach źródłowych BN opisują wzory:

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest zdadne

$$p_{ZD} = P_0 + P_2$$

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne

$$p_{NIEZ} = P_1$$

- prawdopodobieństwo tego, że urządzenie jest niezdatne i wystąpiło zadziałanie brakujące ZE

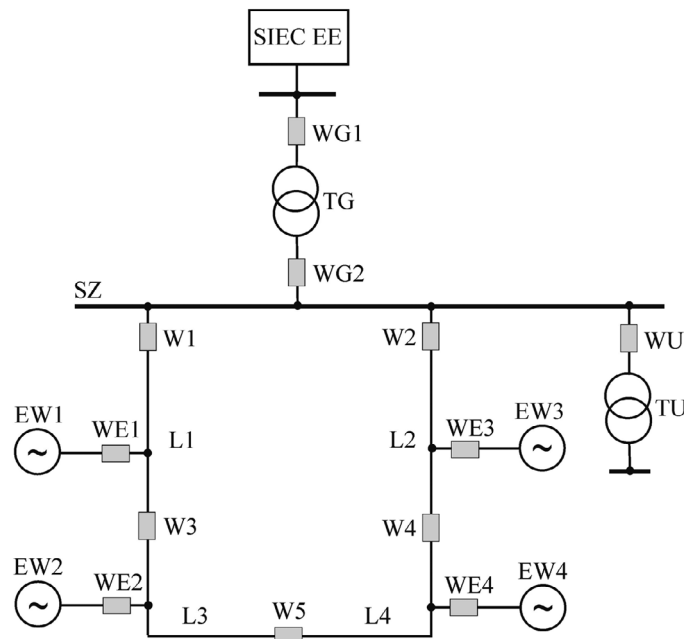
$$p_{NIEZB} = P_3$$

4. Przykład obliczeniowy

Przykład obliczeniowy dotyczy analizy niezawodności FW o dwóch topologiach sieci wewnętrznej (promieniowej i pierścieniowej), obejmującej wyznaczenie: (i) rozkładu prawdopodobieństwa kombinacji stanów gotowości EW wchodzących w skład FW oraz (ii) wartości oczekiwanej mocy FW z uwzględnieniem jej niezawodności dla różnych prędkości wiatru w lokalizacji EW1. FW zlokalizowana jest w Polsce i składa się z czterech EW, każda o mocy znamionowej $P_{Ri} = 2$ MW ($i = 1, 2, 3, 4$). Założono, że czasy do uszkodzenia i odnowy urządzeń FW są opisane rozkładami wykładniczymi i znane są parametry tych rozkładów. Wartości oczekiwane mocy EW wyznaczono na podstawie rzeczywistych danych zarejestrowanych w odstępach 10-minutowych, w okresie od stycznia do czerwca 2012 roku. Liczba danych użytych w obliczeniach wyniosła 21 282 rekordów. Wyznaczone wartości oczekiwane mocy wytwarzanej przez EW, dla prędkości wiatru *a priori* i dla założonych prędkości wiatru w lokalizacji EW1, przedstawiono w tab. 1.

Wartości oczekiwane mocy EW zamieszczone w tab. 1 uzyskano na podstawie modelu w postaci sieci Bayesowskiej, przy czym jej struktura i parametry węzłów zostały wyznaczone w procesie uczenia sieci. W tab. 1 wartości oczekiwane mocy EW wyróżniono różnymi kolorami po to, aby zobrazować kolejność wartości od najmniejszej do największej dla danej prędkości wiatru, tj. wartość min. – żółty, wartość druga po min. – zielony, wartość trzecia po min. – błękitny i wartość max – czerwony. Można zauważyć, że pomimo jednakowej mocy znamionowej EW wartości oczekiwane ich mocy dla danej prędkości wiatru są: (i) różne i (ii) może się zmieniać ich kolejność w przedziale od min. do max. W ostatnim wierszu tab. 1 pokazano procentową różnicę pomiędzy wartością min. i max. dla danej prędkości wiatru. Różnica ta osiąga nawet 20% przy prędkości wiatru $v_1 = [7-8]$.

Na rys. 1 przedstawiono schemat promieniowej topologii wewnętrznej sieci FW. Jest ona najprostszą konfiguracją charakteryzującą się relatywnie małą długością kabli.

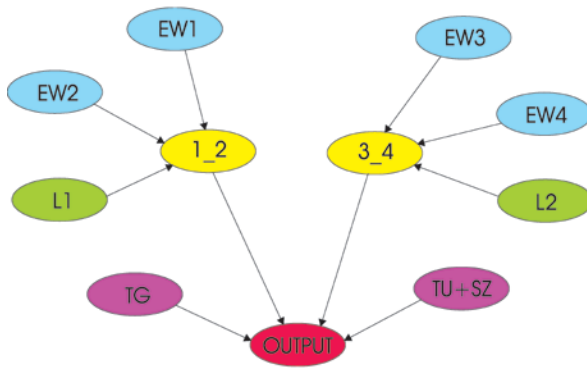


Oznaczenia: L1 i L2, L3 i L4 – linie kablowe, W3, W4 i W5 – wyłączniki sekcyjne. Pozostałe oznaczenia jak na rysunku 1

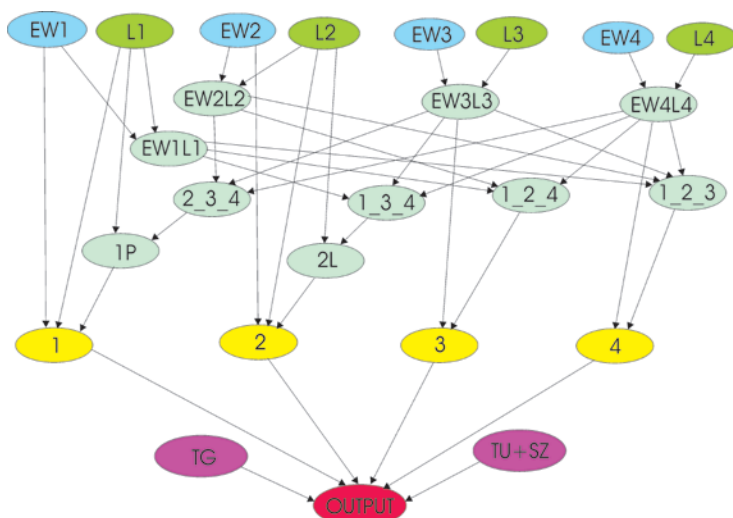
Rys. 2. Schemat sieci wewnętrznej FW o topologii pierścieniowej

| Kombinacja EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdadności | Prawdopodobieństwo wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdadności | |
|--|---|-------------------------|
| | Topologia promieniowa | Topologia pierścieniowa |
| EW1iEW2iEW3iEW4 | 0,996573 | 0,996491 |
| EW1iEW2iEW3 | 0,000489 | 0,000788 |
| EW1iEW2iEW4 | 0,000489 | 0,000788 |
| EW1iEW2 | 0,000516 | $6,23 \cdot 10^{-7}$ |
| EW1iEW3iEW4 | 0,000489 | 0,000747 |
| EW1iEW3 | $2,39 \cdot 10^{-7}$ | $5,90 \cdot 10^{-7}$ |
| EW1iEW4 | $2,39 \cdot 10^{-7}$ | $5,13 \cdot 10^{-7}$ |
| EW1 | $2,53 \cdot 10^{-10}$ | $7,80 \cdot 10^{-8}$ |
| EW2iEW3iEW4 | 0,000489 | 0,000747 |
| EW2iEW3 | $2,39 \cdot 10^{-7}$ | $5,13 \cdot 10^{-7}$ |
| EW2iEW4 | $2,39 \cdot 10^{-7}$ | $5,90 \cdot 10^{-7}$ |
| EW2 | $2,53 \cdot 10^{-10}$ | $7,80 \cdot 10^{-8}$ |
| EW3iEW4 | 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 |

Tab. 2. Wartości prawdopodobieństwa wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdadności (niezawodność *a priori* elementów FW) dla promieniowej i pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej



Rys. 3. BN odwzorowująca strukturę niezawodnościową FW w promieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia węzłów źródłowych zgodne z oznaczeniami na rys. 1. Pozostałe oznaczenia węzłów w tekście



Rys. 4. BN odwzorowująca strukturę niezawodnościową FW w pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia węzłów źródłowych zgodne z oznaczeniami na rys. 2. Pozostałe oznaczenia węzłów w tekście

Największym jej mankamentem jest stosunkowo niska niezawodność wynikająca przede wszystkim z konieczności wyłączenia całej gałęzi zawierającej kilka lub kilkanaście EW z powodu występowania uszkodzeń niektórych urządzeń w tej gałęzi, m.in. kabli, wyłączników.

Rysunek 2 przedstawia schemat pierścieniowej topologii wewnętrznej sieci FW. Zasadnicza różnica w stosunku do topologii promieniowej polega na zamknięciu pierścienia kablowego i dodaniu wyłączników sekcyjnych w liniach kablowych. Pociąga to za sobą zwiększenie sumarycznej długości kabli. W zamian uzyskuje się wyższą niezawodność sieci, gdyż wyłączenia uszkodzonych urządzeń z reguły nie powodują konieczności wyłączenia całej gałęzi zawierającej kilka lub kilkanaście EW.

Na rys. 3 przedstawiono BN odwzorowującą strukturę niezawodnościową FW o promieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia węzłów źródłowych odnoszą się do oznaczeń urządzeń FW (rys. 1). Węzły

1_2 i 3_4 są to węzły pośrednie odwzorowujące kombinacje stanów niezawodnościowych urządzeń EW1, EW2, L1, EW3, EW4 i L2. Węzeł OUTPUT jest węzłem, który uwzględnia kombinacje stanów węzłów 1_2, 3_4, TG i TU+SZ.

Na rys. 4 przedstawiono BN odwzorowującą strukturę niezawodnościową FW o pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej. Oznaczenia węzłów źródłowych odnoszą się do oznaczeń urządzeń wchodzących w skład FW (rys. 2). Węzły EW1L1, EW2L2, EW3L3 i EW4L4 są to węzły pośrednie odwzorowujące kombinacje stanów urządzeń reprezentowanych przez węzły źródłowe odpowiednio EW1 i L1, EW2 i L2, EW3 i L3 oraz EW4 i L4. Węzły 1_2_3, 1_2_4, 1_3_4 i 2_3_4 są to węzły pośrednie odwzorowujące stany węzłów EWxLx (x = 1, 2, 3, 4). Węzły 1P, 1L, 1, 2, 3 i 4 są również węzłami pośrednimi, przy czym cztery ostatnie reprezentują kombinacje stanów EWx i pozostałych urządzeń sieci wewnętrznej, niezbędnych do przekazania mocy z EWx do sieci zewnętrznej. Węzeł OUTPUT uwzględnia kombinacje stanów węzłów x.

Parametry rozkładów czasu do uszkodzenia i odnowy urządzeń FW są następujące:

- intensywności uszkodzeń EW $\lambda_{EWx} = 0,09$ 1/rok
- intensywności uszkodzeń Lj $\lambda_{Lx} = 0,08$ 1/rok (w przypadku linii kablowych w wewnętrznej sieci farmy o topologii promieniowej) i $\lambda_{Lx} = 0,04$ 1/rok (w przypadku linii kablowych w wewnętrznej sieci farmy o topologii pierścieniowej)
- intensywność uszkodzeń TG $\lambda_{TG} = 0,02$ 1/rok
- intensywność uszkodzeń TU i SZ $\lambda_{TU+SZ} = 0,03$ 1/rok
- intensywność uszkodzeń zabezpieczeń elektroenergetycznych $\theta_{ZE} = 0,005$ 1/rok
- intensywność odnowy $\gamma_U = 182,5$ 1/rok (średni czas odnowy 48 godz.) – dotyczy urządzeń: EWx, Lx, TG oraz TU i SZ
- intensywność odnowy ZE $\xi_{ZE} = 121,667$ 1/rok (średni czas odnowy 72 godz.).

Tabela 2 przedstawia wyznaczone wartości prawdopodobieństw wystąpienia kombinacji EW, jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności dla promieniowej i pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej FW. Z tab. 2 wynika, że w obu przypadkach topologii sieci wewnętrznej prawdopodobieństwo wystąpienia wszystkich EW (tj. EW1iEW2iEW3iEW4) znajdujących się w stanie zdatności jest największe w stosunku do prawdopodobieństw wystąpienia innych kombinacji. Prawdopodobieństwo to jest o 0,0082% większe dla topologii promieniowej w porównaniu z topologią pierścieniową. Najmniejsze wartości prawdopodobieństwa obserwowane są dla pojedynczych kombinacji EW. O wyższej niezawodności topologii pierścieniowej w stosunku do promieniowej mogą świadczyć większe prawdopodobieństwa wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności w odniesieniu do trzech EW i niższe prawdopodobieństwo braku przynajmniej jednej EW (kombinacja BRAK w tab. 2).

Analiza niezawodności FW może być również związana z wyznaczaniem prawdopodobieństw wystąpienia kombinacji EW, jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności, przy założeniu niezdatności jednego lub więcej urządzeń. Wyznaczone wartości prawdopodobieństwa wystąpienia liczby EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności przy założeniu niezdatności EW1 i L1 przedstawia tab. 3.

Korzystając z wyznaczonych wartości oczekiwanych mocy EW (tab. 1) i obliczonych prawdopodobieństw kombinacji EW, znajdujących się jednocześnie w stanie zdatności (tab. 2 i 3), można wyznaczyć wartości oczekiwane mocy FW. Tabela 4 przedstawia wartości oczekiwane mocy FW o promieniowej i pierścieniowej topologii sieci wewnętrznej, wyrażone w procentach wartości oczekiwanej mocy FW (uwzględniającej pełną zdatność urządzeń farmy).

Z tab. 4 wynika, że warianty niezawodności urządzeń FW (*a priori* niezdatna EW1, niezdatna L1) w różnym stopniu wpływają na wartość oczekiwaną mocy. Wpływ ten zależy również od przyjętej topologii

| Kombinacja EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności | Prawdopodobieństwo wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności, przy niezdatnej EW1 | | Prawdopodobieństwo wystąpienia kombinacji EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności, przy niezdatnej L1 | |
|--|--|-------------------------|---|-------------------------|
| | Topologia promieniowa | Topologia pierścieniowa | Topologia promieniowa | Topologia pierścieniowa |
| EW2iEW3iEW4 | 0,997102 | 0,997238 | 0 | 0,997279 |
| EW2iEW3 | 0,000489 | 0,000789 | 0 | 0,000489 |
| EW2iEW4 | 0,000489 | 0,000789 | 0 | 0,000788 |
| EW2 | 0,000516 | $6,88 \cdot 10^{-7}$ | 0 | 0,000300 |
| EW3iEW4 | 0,000964 | 0,000747 | 0,998108 | 0,000489 |
| EW3 | $4,72 \cdot 10^{-7}$ | $5,91 \cdot 10^{-7}$ | 0,000489 | $2,40 \cdot 10^{-7}$ |
| EW4 | $4,72 \cdot 10^{-7}$ | $5,13 \cdot 10^{-7}$ | 0,000489 | $3,86 \cdot 10^{-7}$ |
| BRAK | 0,000438 | 0,000436 | 0,000913 | 0,000654 |

Tab. 3. Wartości prawdopodobieństwa wystąpienia liczby EW jednocześnie znajdujących się w stanie zdatności, przy założeniu niezdatności EW1

| Topologia wewnętrznej sieci FW/ wariant niezawodności urządzeń FW | Prędkość wiatru w lokalizacji EW1 | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| | a priori | $v_1 = [3-4]$ | $v_1 = [5-6]$ | $v_1 = [7-8]$ | $v_1 = [9-10]$ | $v_1 = [11-12]$ |
| Promieniowa/a priori | 99,86% | 99,86% | 99,86% | 99,86% | 99,86% | 99,86% |
| Pierścieniowa/a priori | 99,88% | 99,88% | 99,88% | 99,88% | 99,88% | 99,88% |
| Promieniowa/niezdatna EW1 | 75,55% | 76,67% | 76,47% | 75,78% | 74,91% | 74,18% |
| Pierścieniowa/niezdatna EW1 | 75,57% | 76,69% | 76,49% | 75,80% | 74,93% | 74,19% |
| Promieniowa/niezdatna L1 | 48,34% | 50,80% | 48,49% | 47,97% | 47,56% | 48,14% |
| Pierścieniowa/niezdatna L1 | 75,55% | 76,67% | 76,47% | 75,78% | 74,91% | 74,18% |
| Wartość oczekiwana mocy FW z uwzględnieniem zdatności urządzenia [kW] | 2133,4 | 431,5 | 1094,7 | 2657,1 | 4946,0 | 6977,7 |

Tab. 4. Wartości oczekiwanej mocy FW dla różnych stanów niezawodnościowych urządzeń FW i różnych prędkości wiatru w lokalizacji EW1, wyrażone w procentach wartości oczekiwanej mocy uwzględniającej pełną zdadność urządzeń farmy

sieci wewnętrznej i założonej prędkości wiatru. W wariancie niezawodności urządzeń FW można się spodziewać niewielkiego obniżenia wartości oczekiwanej mocy w stosunku do wartości podanej w ostatnim wierszu tab. 4, przy czym dla topologii promieniowej wynosi ono 0,14%, natomiast dla pierścieniowej 0,12%. W przypadku topologii promieniowej niezdatności EW1 powoduje obniżenie mocy od 23,53% przy $v_1 = [3-4]$ do 25,82% przy $v_1 = [11-12]$. Natomiast w przypadku topologii pierścieniowej obniżenie mocy w obu przypadkach prędkości wiatru jest o 0,02% mniejsze w stosunku do promieniowej. Niezdatność L1 skutkuje obniżeniem mocy od 49,20% przy $v_1 = [3-4]$ do 52,44% przy $v_1 = [9-10]$ – dla topologii promieniowej i od 23,33% przy $v_1 = [3-4]$ do 25,82% przy $v_1 = [11-12]$ – dla topologii pierścieniowej.

5. Zakończenie

W referacie 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

do wytwarzania energii elektrycznej i przekazywania jej do zewnętrznej sieci elektroenergetycznej. 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 z powodzeniem wykorzystywać do obliczania wartości oczekiwanej mocy FW uwzględniającej jej niezawodność.

Bibliografia

- Sobolewski R.A., Analiza niezawodności układu wytwórczo-przyłączeniowego turbiny wiatrowej wykorzystująca kryterium ekonomiczne zawodności, *Przegląd Elektrotechniczny* 2010, r. 86, nr 10, s. 324–329.
- 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, 11–15 June 2006.
- Quinonez-Varela G. i in., Electrical collector system options for large offshore wind farms, *IET Renewable Power Generation* 2007, No. 1 (2), s. 107–114.
- 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.
- Segura-Heras I., Escrivá-Escrivá G., Alcazar-Ortega M., Wind farm electrical power production model for load flow analysis, *Renewable Energy* 2011, No. 36, s. 1008–1013.
- Mabel M.C., Raj R.E., Fernandez E., Analysis on reliability aspects of wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, No. 15, s. 1210–1216.
- Ali M., Matevosyan J., Milanovic J.V., Probabilistic assessment of wind farm annual energy production, *Electric Power Systems Research* 2012, No. 89, s. 70–79.
- Darwiche A., Modeling and reasoning with Bayesian networks, Cambridge University Press 2009.
- Kjaerulff U.B., Madsen A.L., Bayesian Networks and Influence Diagrams. A Guide to Construction and Analysis, Springer.

10. Grabski F., Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji, Seria: Badania Systemowe, tom 30, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2002.
11. Howard R.A., Dynamic Probabilistic Systems, Vol. II: Semi-Markov and Decision Processes, Dover Books on Mathematics, 2007.
-

Robert Adam Sobolewski

dr inż.

Politechnika Białostocka

e-mail: r.sobolewski@pb.edu.pl

Studia odbył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej, stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał na swoim macierzystym wydziale (2002). Jego zainteresowania badawcze to: wyznaczanie charakterystyk probabilistycznych oraz prognozowanie mocy i energii wytwarzanej przez farmy wiatrowe, analiza niezawodności wytwarzania energii elektrycznej przez farmy wiatrowe oraz niezawodności systemów elektroenergetycznych, zastosowanie procesów stochastycznych i sieci Bayesowskich w elektroenergetyce.