

Henryk Mrowiec

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

WSKAŹNIKI NIEZAWODNOŚCI PRACY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono dyskusję możliwych kryteriów oceny niezawodności pracy systemu. Następnie zaproponowano wynikowe wskaźniki charakteryzujące pracę układu, w zastosowaniu do pewnych zagadnień praktycznych, zróżnicowanych ze względu na rodzaj układu elektroenergetycznego oraz sposób zastosowania wyników obliczeń.

1. Klasyfikacja metod oceny niezawodności

Ilościowe miary niezawodności pracy systemu energetycznego oraz kryteria oceny niezawodności wynikają bezpośrednio z definicji niezawodności. Wg ogólnie przyjętej definicji: "niezawodność jest to prawdopodobieństwo, że rozpatrywane urządzenie spełni swoje zadanie w wymaganym zakresie w danych warunkach i w określonym czasie" Z definicji tej wynika konieczność przeanalizowania:

- zadań systemu energetycznego, które uważa się za najważniejsze,
- czasokresu, w którym te zadania są wykonywane,
- celu obliczeń i związanych z tym informacji na których nam zależy,

i na tej podstawie określenia miar niezawodności najbardziej odpowiednich w danej sytuacji.

- 1) Pierwszy z tych czynników, - zadania systemu energetycznego lub jego fragmentów zależą w szczególności od:
 - a) rodzaju analizowanego fragmentu układu, jego rozległości i ważności

Opierając się na dotychczasowych doświadczeniach, proponuje się tutaj wyróżnić:

- układ pracy sieci przesyłowej najwyższych napięć (400, 220 kV),
- sieci przesyłowo rozdzielcze 110 kV
- sieci rozdzielcze średnich napięć
- sieci przemysłowe wewnątrz zakładowe średnich napięć.

Przykładowo: w sieci przesyłowej główne zadania polegają na zachowaniu stateczności pracy systemu, zasilaniu odbiorców, wyprowadzeniu mocy z elektrowni, wymianianiu mocy rezerwowych przy możliwie najmniejszych kosz-

tach. Kryterium oceny układu przy planowaniu, będzie wtedy zminimalizowanie oczekiwanego kosztu rocznego, a miarą oceny niezawodności będą straty u odbiorców spowodowane nieciągłością zasilania, obliczone na podstawie wskaźników niezawodności odnoszących się do konkretnych węzłów [2], [8].

- b) Struktury odbiorców obsługiwanych przez układ, wrażliwości na stany nienormalne (na częstość lub czas trwania przerw) oraz ich ważności
- 2) W zależności od czasokresu sprawdzania poprawności spełnienia zadań systemu różne są wymagania odnośnie postaci liczbowych miar wskaźników niezawodnościowych. Dla celów projektowania będą to np. prawdopodobieństwa niezawodnej pracy w dłuższym okresie czasu, dla celów planowania, np. prawdopodobieństwo poprawnej pracy w określonym przedziale czasu (doby, tygodnia lub tp.).
- 3) Cel obliczeń - do funkcji celu wprowadza się składniki, których miary liczbowe są potrzebne do optymalizacji parametrów lub stanów, na które możemy mieć wpływ.

Dwa ostatnie czynniki, wpływające na wybór miar niezawodnościowych zależne są od konkretnych potrzeb użytkowników. Analizując obecne potrzeby w zakresie obliczeń niezawodnościowych, prowadzonych przez różnych użytkowników, celowe wydaje się wyróżnienie metod służących do następujących zagadnień:

- a) planowanie perspektywiczne i długoterminowe; użytkownicy - biura studiów i projektów
- b) planowanie okresowych układów pracy np. układów normalnych pracy systemu; użytkownicy - PDM, ODM
- c) bieżące planowanie układów pracy w cyklu dobowym lub krótszym; użytkownicy - służba przygotowawcza PDM, ODM, RDR
- d) operatywne kierowanie pracą systemu; użytkownicy - dyspozytor w PDM ODM, kierujący bezpośrednio systemem.

To ostatnie zagadnienie eliminuje się w chwili obecnej z ogólnych metod badania niezawodności. Jest to odrębna, dotychczas nie rozeznana dziedzina badania układów w czasie rzeczywistym.

2. Kryteria oceny niezawodności

Mając na uwadze zadania, które muszą być spełnione przez system oraz stawiany cel obliczeń i związane z tym wymagane informacje, możliwe wskaźniki oceny niezawodności układu dzielimy na dwie grupy:

A. Wskaźniki obrazujące zachowanie się poszczególnych węzłów układu (w szczególności węzłów odbiorczych) w wybranym okresie czasu. Należy tu wyróżnić:

- wskaźniki średnie
- wskaźniki ekstremalne.

Wskaźniki średnie są miarą niezawodności pracy układu w dłuższym okresie czasu. Wśród tych wskaźników w pierwszej kolejności należy wymienić:

- prawdopodobieństwo niezawodnej pracy węzła w wybranym okresie czasu,
- oczekiwaną częstość zaburzeń węzła,
- oczekiwany czas trwania zaburzenia.

Wskaźniki te mają sens jedynie przy założeniu dwustanowego modelu pracy odbiorców (praca - wypad.). Jeżeli zachodzi konieczność bardziej wnikliwej oceny obiektu (w szczególności systemu), należy wydzielić większą ilość stanów, różniących się istotnie z punktu widzenia jakości wykonywania zadań.

Wskaźniki ekstremalne mają charakter liczbowych wartości prawdopodobieństw przekroczenia pewnych granicznych wartości, np. prawdopodobieństwo, że dany węzeł nie będzie zasilany przez czas dłuższy niż 10 minut; prawdopodobieństwo wypadu większe niż jeden dzień na 10 lat itp.

Wskaźniki typu A, uwzględniane w dalszej kolejności w kompleksowej analizie ekonomicznej, mają szczególne znaczenie w planowaniu rozwoju systemu, przy projektowaniu zasilania nowych układów. Istotne znaczenie mają one także dla oceny niezawodności dostawy energii dla konkretnych stacji odbiorczych istniejącego układu pracy.

B. Wskaźniki obrazujące zachowanie się systemu.

W zależności od wymaganego stopnia szczegółowości obliczanych wskaźników oraz od posiadanych danych umożliwiających uogólnienie otrzymanych wielkości liczbowych wyróżnia się:

B1. Wskaźniki określające prawdopodobieństwo występowania i skutki wynikię przy konkretnych stanach zaburzeniowych.

Wskaźniki te można otrzymać poprzez symulowanie pojedynczych oraz różnych kombinacji zaburzeń w układzie, oraz przeanalizowaniu i określeniu skutków powodowanych przez to zaburzenie. W szczególności dla każdego zaburzenia należy sprawdzać, czy konsekwencją jego zaistnienie będzie:

- ograniczenie lub całkowite wyłączenie określonych odbiorców
- brak możliwości wyprowadzenia mocy z elektrowni
- ogólny deficyt mocy
- przeciążenie innych elementów przesyłowych.

Dla każdego zaburzenia prowadzącego do w.w konsekwencji należy podać:

- skutki występujące przy tym zaburzeniu, przedstawione w formie opisowej lub w postaci umownych symboli;
- współczynniki charakteryzujące prawdopodobieństwo, częstość występowania lub tp., danego zaburzenia oraz zaistniałych skutków w analizowanym okresie czasu.

Przykładowo: Prawdopodobieństwo wyłączenia linii X wynosi p_x . Wyłączenie tej linii spowoduje przeciążenie linii Y i jej wyłączenie z prawdopodobieństwem p_y oraz pozbawienie zasilania odbiorcy A.

Wskaźniki typu B1 umożliwiają wyszukanie dla analizowanego układu, najgroźniejszych i najczęstszych przypadków, co umożliwia ich ewentualne usunięcie lub ograniczenie.

B2. Wskaźniki obrazujące wystąpienie określonych skutków w systemie przy zaistnieniu różnego typu zaburzeń.

Możliwe skutki różnych zaburzeń w systemie dzielimy na kilka grup, stopniowanych według ich "ciężaru".

Następnie analizuje się poszczególne przypadki zaburzeń w systemie, biorąc pod uwagę skutki przez nie powodowane. Dla zaburzeń odpowiadającym skutkom zakwalifikowanym do tej samej grupy wyznacza się wypadkowe wskaźniki niezawodnościowe, przy czym rodzaj tych wskaźników zależy jest od celu obliczeń oraz praktycznych możliwości ich uzyskania - ogólnie charakter tych wskaźników będzie podobny do wskaźników typu A.

Sprecyzowanie ilości tych grup i zaliczanie do nich poszczególnych zaburzeń jest uzależnione od wymaganej dokładności uzyskiwanych informacji oraz od wymogów praktycznych. Zwiększanie dokładności oszacowania powoduje konieczność zwiększenia liczby grup (w szczególności, nieograniczona liczba grup prowadzi do wskaźników typu B1), z drugiej strony, w zagadnieniach optymalizacyjnych, do wyboru wariantu optymalnego najlepiej byłoby posługiwać się wskaźnikiem wypadkowym.

Wydaje się, że najbardziej celowe będzie wyróżnienie maksymalnie 3 + 5 grup.

Z punktu widzenia oceny układów pracy systemu najwyższego napięcia proponuje się wyróżnienie następujących grup:

- 1) Zaburzenia prowadzące do wyłączenia pojedynczych elementów przesyłowych, nie powodujące bezpośrednio zaburzeń w pracy odbiorców
- 2) Zaburzenia w elektrowniach prowadzące do wystąpienia deficytu mocy
- 3) Zaburzenia prowadzące do:
 - pozbawienia zasilania pojedynczej, mniej ważnej stacji odbiorczej
 - częściowego ograniczenia mocy kilku stacji odbiorczych, możliwego do opanowania przez automatykę SCO
 - częściowego ograniczenia mocy w elektrowniach na skutek zaburzeń w systemie
- 4) Zaburzenia prowadzące do:
 - pozbawienia zasilania kilku stacji odbiorczych jednocześnie
 - wyłączenia dużego węzła sieciowego (uprzednio wytypowanego) lub całej stacji elektrownianej

5) Zaburzenia prowadzące do:

- wyłączenia kilku ważnych stacji odbiorczych lub węzłów elektrowni - nych
- utraty równowagi statycznej
- pozbawienia zasilania odbiorców o łącznej mocy większej niż moc wyłączenia maksymalnie przez automatykę SCO.

Dla oceny układów pracy sieci rozdzielczych, głównie średnich napięć, zasilającej konkretnych odbiorców, proponuje się natomiast zróżnicować grupy zaburzeń wg ważności (kategorii) odbiorców zasilanych z tej sieci.

Dla wykorzystania obliczonych wskaźników dla celów praktycznych, należy w dalszej kolejności przyjąć "wagę" poszczególnych stopni, dochodząc w rezultacie do jednego zastępczego wskaźnika niezawodności pracy systemu dla analizowanego okresu czasu. Najważniejszy problem utworzenia "wagi" wymaga odrębnych analiz przeprowadzonych w rzeczywistym systemie. W analizach tych powinny być wzięte pod uwagę zarówno występujące skutki przy zaistnieniu poszczególnych stanów jak i częstość ich występowania.

B3. Pewnym uogólnieniem powyższych wskaźników B1 i B2, zależnym od posiadanych informacji, pozwalających na "wyważenie" skutków poszczególnych zaburzeń, jest tzw. funkcja pewności [3], [4]. Funkcja ta odnosząca się do systemu jako całości, obrazuje prawdopodobieństwo załamania pewności pracy systemu zdefiniowane jako:

- niewystarczająca moc wirująca
- przeciążenie linii lub innego elementu sieciowego
- pozbawienie zasilania określonych odbiorców
- utrata stabilności
- niedopuszczalnie niskie napięcie w jakimkolwiek punkcie sieci
- inne niedopuszczalne warunki eksploatacji.

Funkcja pewności jest funkcją czasu i jest opracowywana dla okresu kilku najbliższych godzin.

Funkcję tą można wyznaczyć jako:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) Q_i(t) W_i,$$

gdzie

- i - stan układu definiowany jako szczególna konfiguracja układu, na którą składa się pewna liczba elementów pracujących lub w rezerwie i remoncie oraz pewny układ połączeń

$P_i(t)$ - prawdopodobieństwo przebywania układu w stanie "i" w czasie t

$Q_i(t)$ - prawdopodobieństwo, że stan "i" powoduje załamanie pewności systemu.

- n - liczba możliwych stanów układu

W_j - "waga" skutków spowodowanych przez stan "i" w ogólnej problematyce pewności pracy. Współczynnik ten wynika z różnej skali trudności występujących w układzie, przy wystąpieniu pewnych skutków zaburzeń - inna będzie np. skala trudności przy utracie równowagi, lub przy wyłączeniu kilku stacji odbiorczych, a inna przy obniżeniu napięcia w kilku punktach sieci.

Po wyznaczeniu wskaźników niezawodności charakteryzujących analizowany układ, następnym problemem jest ocena czy wskaźniki te należy uznać za dopuszczalne, a więc czy układ pracy jest do przyjęcia lub uznamy, że wartość tego wskaźnika jest niedopuszczalna, wtedy zachodzi konieczność wprowadzenia zmian w układzie. Kryteria odpowiadające na postawione zagadnienie dzielimy ogólnie na:

- I. Kryteria ekonomiczne wymierne, sprowadzające analizę niezawodności do obliczeń kosztów
- II. Kryteria pozostałe, nie wyrażone bezpośrednio w kosztach, bazujące na przyjętych założeniach, lub ograniczeniach ekstremalnych,

Kryteria ekonomiczne pozwalają na pełną i poprawną analizę techniczno-ekonomiczną układów pracy systemu, umożliwiając porównywanie dowolnych układów, różniących się zarówno nakładami inwestycyjnymi, jak i kosztami strat spowodowanymi zawodną pracą układu. Praktyczne stosowanie jednak kryteriów ekonomicznych natrafia na szereg trudności, dla pokonania których konieczne jest przyjmowanie wielu założeń upraszczających, zwłaszcza dotyczących wartościowania strat w wyniku niedostarczenia pewnej wielkości energii.

Pomocne tutaj mogą być analizy kosztów strat spowodowanych niedostarczoną energią prowadzone od kilku lat dla wybranych odbiorców przemysłowych oraz dla odbiorców grupy nieprzemysłowej.

Metody oceny niezawodności oparte na kryteriach ekonomicznych znajdują szersze zastosowanie dla oceny rozwoju układów dla celów planowania, zwłaszcza średnio i długookresowego.

Dla oceny niezawodności pracy konkretnych układów pracy, przeprowadzonej w cyklu krótszym (dobowym, miesięcznym), wobec trudności, a często niemożności kompleksowego ujęcia całości kosztów, bardziej miarodajne będą kryteria pozaekonomiczne, oparte na pewnych ograniczeniach ekstremalnych przyjętych a priori. Ten sposób podejścia stosowany był w dawniejszych pracach nad optymalną rezerwą w systemie [7], gdzie przykładowo przyjmowano współczynnik pewności zasilania dla elektrowni $Q_A = 2 \cdot 10^{-5}$ jako bardzo dobry, $Q_A = 2 \cdot 10^{-4}$ jako dostateczny [6].

Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że kryteria te, wprawdzie nie obrazują bezpośrednio kosztów, są wynikiem odrębnie przeprowadzonej analizy ekonomicznej układu. Narzucenie zbyt wysokich lub zbyt niskich wymagań jest niecelowe ze względów ekonomicznych.

3. Podsumowanie

Analizując w/w możliwe do uzyskania wskaźniki można stwierdzić:

1. Dla celów planowania rozwoju systemu, przy projektowaniu nowych układów, miarodajnymi będą wskaźniki typu A, dla poszczególnych węzłów układu, poparte w dalszej kolejności analizą ekonomiczną, obejmującą zarówno koszty spowodowane zawodną dostawą energii, jak i koszty eksploatacyjne i nakłady inwestycyjne związane z danym układem. Pomocne tutaj będą także wskaźniki typu B1 pozwalające wyszukać najgroźniejsze i najczęstsze przypadki w układzie, co umożliwiłoby ich ewentualne usunięcie lub ograniczenie.
2. Przy ocenie układów pracy w cyklu krótszym (miesięcznym, dobowym) dla kierowania ruchem, wybór układu jest bardziej skomplikowany.

Układ pracy można rozpatrywać z dwu różnych aspektów:

- z punktu widzenia odbiorców - na plan pierwszy będzie się wtedy wysuwać pewność pracy poszczególnych węzłów odbiorczych. Pomocne dla oceny będą więc informacje o warunkach pracy konkretnych węzłów - wskaźniki typu A
- z punktu widzenia dyspozytora kierującego ruchem układu, wtedy na plan pierwszy wysuwać się będzie zagadnienie ~~pewności~~ pewności pracy układu jako całości, bez szczegółowej analizy poszczególnych węzłów odbiorczych układu. Ocena układu pracy powinna się opierać na wskaźnikach typu B2 lub B3 stosownie do posiadanych informacji umożliwiających uogólnienie wyników.

LITERATURA

1. Bojarski W. "Przegląd metod i zastosowań oceny niezawodności elektroenergetycznych układów sieciowych". Biuletyn Nr 11 Elektroprojekt 1968.
2. Kula M. - "Rozwinięty model analizy niezawodności elektroenergetycznych układów sieciowych" (rozprawa doktorska) Gliwice, 1970.
3. Patton A.D. - "Short - Term Reliability Calculation" IEEE Trans. Power Apparatus and Systems Nr 4/1970.
4. Patton A.D. - "A Probability Method for Bulk Power System Security Assesment, I Basic Concepts" IEEE Trans. Power Apparatus and Systems Nr 1/1972.
5. Bojarski W.W. - Wprowadzenie do oceny niezawodności działania układów technicznych - PAN Warszawa 1967.
6. Kopecki K. - Rachunek awaryjności w energetyce i obliczanie rezerw. Materiały i Studia Kom. Elektr. Polski PAN t. VIII/1 cz. III Warszawa 1960
7. Materiały i Studia Komitetu Elektryfikacji Polski PAN t. VIII/1 cz. I, II, III, Warszawa 1960.
8. Kamiński A, Kula M., Oziemblewski K. - Niezawodność zasilania wielkich odbiorców z systemu energetycznego. Zeszyty Naukowe Pol. \$l.z.28. Gliwice 1970.

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Р е з ю м е

В статье представлена оценка возможных критериев надёжности работы энергосистем. Предложены показатели, характеризующие работу системы в применении к некоторым практическим вопросам, дифференцированным в зависимости от типа энергосистемы, а также способ использования результатов расчётов.

RELIABILITY INDICES OF ELECTRIC POWER SYSTEM OPERATION

S u m m a r y

Different criteria estimating reliability of electric power system are discussed. The application of the indices characterizing reliability of the system is suggested for some practical problems. The problems are differentiated in respect to the type of electric power system and the way of application of the results.