

Kurt Żmuda

Institut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

MODEL OPTYMIZACYJNY STOPNIA PEWNOŚCI LINII NAPOWIETRZNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję statystycznego modelu optymicznego stopnia pewności linii, oparte o podstawowy warunek minimalizacji kosztów jednostkowych. Zaproponowano wydzielenie z linii jako całości szeregu elementów funkcjonalnych oraz podano analizę wzajemnych powiązań między nimi. Rozpatrzono sposób określania niektórych składników kosztów zawadności linii.

1. Wstęp

Zagadnienie obiektywnego doboru stopnia pewności urządzeń technicznych jest możliwe poprzez zastosowanie nowoczesnych metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. W odniesieniu do przesyłowych linii napowietrznych istnieje już szereg opracowań, m.in. [1], [2]. Charakterystyczne jest jednak to, że przedmiotem rozważań są wydzielone elementy linii, rozpatrywane w pewnym stopniu w oderwaniu od pozostałych. Poza tym odczuwa się również brak pełnego uzasadnienia od strony ekonomicznej.

Poniżej przedstawiono, jako próbę wypełnienia niektórych luk, model optymiczny linii, który ma pozwolić na określenie skoordynowanych wzajemnie stopni pewności różnych elementów linii. Model ten, mający charakter probabilistyczno-statystyczny, w dużym stopniu bazuje na danych możliwych do uzyskania ze statystyk awaryjności linii.

2. Warunek optymiczny

Optymiczność stopnia pewności linii powinna wychodzić z przesłanek ekonomicznych. Wg obowiązujących przepisów [5] podstawą wyboru wariantu inwestycyjnego jest wskaźnik efektywności inwestycji E , będący w istocie całkowitym kalkulowanym kosztem jednostkowym. Dla urządzeń przesyłowych wzór na E z uwzględnieniem kosztów strat spowodowanych awaryjnością linii można zapisać w postaci

$$E = \frac{m J + S' + K_{str}}{A_r} \quad (1)$$

gdzie J - nakłady inwestycyjne z uwzględnieniem ich zamrożenia w okresie budowy,

m - współczynnik kosztów stałych,

S' - roczne koszty strat spowodowanych awaryjnością linii,

$A_{rpl} = P_{sr} (T_{pl} - dt)$ - roczny efekt użytkowy, czyli energia przesłana linią, z uwzględnieniem postojów awaryjnych linii,

dt - łączny czas trwania postojów awaryjnych linii w ciągu roku,

K_{str} - roczne koszty strat mocy i energii w linii.

Optymalny wariant inwestycyjny odpowiada minimalnej wartości E . Wygodniej jest jednak żądać minimum wyrażenia $E A_{rpl}$ gdzie $A_{rpl} = P_{sr} T_{pl} = \text{const}$ oznacza planowany efekt użytkowy przy założeniu bezawaryjnej pracy linii

$$E A_{rpl} = \frac{mJ + S' + K_{str}}{1 - \frac{dt}{T_{pl}}} \approx (mJ + S' + K_{str}) \left(1 + \frac{dt}{T_{pl}}\right) \approx$$

$$\approx mJ + S' + K_{str} + mJ \frac{dt}{T_{pl}} = \min. \quad (2)$$

W zależności (2) pierwsze uproszczenie wynika z rozwinięcia funkcji $\frac{1}{1 - \frac{dt}{T_{pl}}}$ w szereg potęgowy z uwzględnieniem tylko dwóch pierwszych wyrazów

ponieważ $\frac{dt}{T_{pl}} \ll 1$, natomiast drugie uproszczenie jest uzasadnione nierów

nościami S' i $K_{str} \ll mJ$. Dodatkowo w zależności (2) można opuścić K_{str} jako wielkość stałą, czyli ostatecznie równanie optymalizacyjne stopnia pewności linii przyjmie postać

$$mJ + S = \min, \quad (3)$$

gdzie $S = mJ \frac{dt}{T_{pl}} + S' = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$ - całkowite koszty zawodności linii, składające się z n (kilka) składników.

Czynnik $S_1 = mJ \frac{dt}{T_{pl}}$ potraktowano jako jeden ze składników kosztów zawodności linii, gdyż wynika on z niewypełnienia przez linię zadanych funkcji z powodu jej awaryjności. Inną drogą do podobnego wniosku dochodzi się w publikacji [3].

Pozostałe (S_2, S_3, \dots, S_n) składniki kosztów zawodności dotyczą zarówno strat powstających u odbiorców (S_2), jak również w samym systemie (S_3, S_4, \dots, S_n).

Straty u odbiorców w przybliżeniu można ocenić jako iloczyn niedostarczonej energii ΔA_r i ekonomicznego równoważnika niedostarczonej energii k_A . Współczynnik k_A powinien tutaj posiadać charakter wielkości

normatywnej ze względu na specyfikę problemu, gdzie nie są ściśle znane warunki eksploatacji projektowanego zbioru linii. Roczną wartość niedostarczonej energii ΔA_r proponuje się określać z iloczynu jednostkowej wartości niedostarczonej energii ΔA_j przypadającej na jedno wyłączenie i liczby wyłączeń w roku d . Analiza wykonana na obszernym zbiorze danych dla linii 110 kV i 220 kV wykazała, że ΔA_j , globalnie biorąc, nie wykazuje korelacji z czasem trwania wyłączenia (nie mylić z czasem trwania zakłócenia). Pozwala to na przyjęcie jednej wartości ΔA_j dla wszystkich określonych w p. 3, elementów funkcjonalnych linii.

$$S_2 = k_A \Delta A_j d \quad (4)$$

Straty w systemie są jak dotychczas niedostatecznie jeszcze opracowane. Poniżej rozpatrzono dwa składniki tych strat: straty S_3 spowodowane remontami awaryjnymi linii oraz straty S_4 wynikające ze zwiększonych strat mocy i energii w systemie.

Odnosnie S_3 proponuje się określenie jednostkowej wartości kosztu remontu K , odniesionego do jednego wyłączenia awaryjnego linii (szczegóły w p. 5). Roczne koszty strat wyniosą

$$S_3 = K d. \quad (5)$$

Koszty zwiększonych strat mocy i energii w systemie, przy założeniu niezależności momentu wyłączenia od obciążenia, można wyrazić jako

$$S_4 = \Delta (\Delta P)_s k_{ms} \frac{dt}{8760} + \Delta (\Delta P)_{sr} dt k_{pr} \quad (6)$$

gdzie

$\Delta (\Delta P)_s$ - przyrost strat mocy w systemie przy awaryjnym wyłączeniu linii w chwili występowania szczytowego obciążenia systemu,

$\Delta (\Delta P)_{sr}$ - jw., lecz wielkość przeciętna dla różnych momentów wyłączenia,

k_{ms}, k_{pr} - odpowiednio koszt jednostkowy strat mocy i energii.

Wyrażenie $\frac{dt}{8760}$ przedstawia prawdopodobieństwo, że wyłączenie linii wystąpi w okresie szczytowego obciążenia systemu. Wielkość $\Delta (\Delta P)_s$ i $\Delta (\Delta P)_{sr}$ należy traktować jako średnie z wyłączeń różnych linii w systemie.

Aby powiązać $\Delta (\Delta P)_{sr}$ z $\Delta (\Delta P)_s$ przeanalizujemy przypadek wyłączenie jednej z linii w systemie. Jej obciążenie przyjmują pozostałe linie, czyli, np. dla linii j -k przyrost strat mocy wyniesie

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta P)_{jk} &= c(S_{jk}^2 - S_{jk}^2) \approx c \left[(S_{jk} + \delta S_{jk})^2 - S_{jk}^2 \right] = \\ &= c \left[S_{jk}^2 + 2S_{jk} \delta S_{jk} + (\delta S_{jk})^2 - S_{jk}^2 \right] \approx c 2 S_{jk} \delta S_{jk}. \end{aligned}$$

Z powyższego wynika, że zależność przyrostu strat mocy od chwilowego obciążenia systemu ma w przybliżeniu charakter kwadratowy. Podobna zależność zachodzi między stratami mocy w systemie a jego obciążeniem, wobec tego dla określenia $\Delta(\Delta P)_{\text{śr}}$ można skorzystać z wielkości τ_s charakterystycznej dla strat mocy w systemie. Tak więc zachodzi

$$\Delta(\Delta P)_{\text{śr}} = \frac{\int_0^{8760} \Delta(\Delta P) dt}{8760} \approx \Delta(\Delta P)_s \frac{\tau_s}{8760}, \quad (7)$$

gdzie τ_s oznacza czas występowania maksymalnych strat mocy w systemie. Uwzględniając (7) ostateczny wzór na straty S_4 ma postać

$$S_4 = \Delta(\Delta P)_s \frac{dt}{8760} (k_{ms} + \tau_s k_{pr}), \quad (8)$$

3. Podział zakłóceń własnych linii

Zakłócenia własne, czyli spowodowane przez samą linię, mogą mieć swe źródło w trzech jakościowo różnych grupach przyczyn:

- I) oddziaływanie na linię silnych czynników atmosferycznych lub elektrycznych,
- II) wady materiałowe, fabrykacyjne, montażowe itp.,
- III) oddziaływanie różnych przypadkowych czynników (powódź, samolot, zarzutki itp).

W zakresie projektowania linii, w sensie wyboru jej parametrów technicznych, mamy wpływ w zasadzie tylko na częstość występowania zakłóceń I typu. Dodatkowo możliwe jest ograniczenie skutków zakłóceń II i III typu przez niedopuszczenie do występowania uszkodzeń wtórnych innych elementów linii. Pod tym względem klasyczny przypadek stanowi przypadkowe zerwanie przewodu, stwarzając istotne zagrożenie dla słupów przelotowych. W optymalizacji stopnia pewności linii powinny więc być brane pod uwagę - w zróżnicowany sposób - zarówno zakłócenia I, jak również II i III typu.

W linii napowietrznej wydzielić można szereg elementów, spełniających różne funkcje oraz posiadających zróżnicowane parametry techniczne, które będą podlegały optymalizacji. Elementy te nazwano elementami funkcjonal-

nyimi linii. Każdemu elementowi odpowiada określone zakłócenie własne pierwotne (tabl. 1).

Tablica 1

Elementy funkcjonalne linii i zakłócenia własne pierwotne

Element funkcjon.	Zakłócenie pierwotne	Charakter zakłócenia
SM	i = 1	uszkodzenie słupa mocnego
SP	2	uszkodzenie słupa przelotowego
PR	3	zerwanie przewodu roboczego
PO	4	zerwanie przewodu odgromowego
ŁO	5	zerwanie łańcucha odciągowego
ŁP	6	zerwanie łańcucha przelotowego
I	7	przeskok na izolatorze
IP	8	przeskok na izolacji powietrzenj
OO	9	przeskok spowodowany wyż. atmos.

Zakłócenie i-te można z kolei rozbić na szereg szczególnych przypadków. Przykładowo dla izolacji (I) można rozpatrywać przeskok zabrudzeniowy, przeskok spowodowany przepięciami łączeniowymi itp. jednakże z punktu widzenia aktualnych potrzeb analizy takie rozbić nie jest potrzebne. Staże się ono jednak koniecznością z chwilą przystąpienia do szczegółowej optyimizacji stopnia pewności danego elementu. Pożądane jest natomiast rozdzielenie w obrębie danego elementu zakłóceń na spowodowane elementem właściwym i osprzętem.

Liczbę zakłóceń długotrwałych (nie zlikwidowanych przez SPZ) dla i-tego elementu można przedstawić w postaci sumy

$$d_i = D_i (1 - k_{spzi}) + d_{oi} + d_{wi} + d_{li}, \quad (9)$$

gdzie

- D_i - liczba zakłóceń pierwotnych I typu (krótkotrwałych i długotrwałych) w ciągu roku na 100 km lub długość przeciętnego odcinka linii,
- k_{spzi} - skuteczność działania urządzeń SPZ dla zakłóceń jw.,
- d_{oi} - liczba zakłóceń spowodowanych osprzętem,
- d_{wi} - liczba zakłóceń II typu czyli spowodowanych wadami materiałowymi, montażowymi itp.,
- d_{li} - liczba zakłóceń III typu czyli spowodowanych różnymi czynnikami "losowymi".

Najistotniejszą wielkością jest tutaj D_1 , wynikająca wprost z klasycznego modelu probabilistycznego "losowe obciążenie - losowa wytrzymałość". Zadaniem optyimizacji jest ustalenie gospodarczo uzasadnionej wartości D_1 , a stąd odpowiednich parametrów technicznych i-tego elementu funkcjonalnego. Pozostałe wielkości w równaniu (9) można traktować jako stałe, określone z danych statystycznych. Mają one wpływ na optyimizację parametrów technicznych linii w warunkach zakłóceńowych (dotyczy to w szczególności słupów).

4. Uszkodzenia wtórne

Każde zakłócenie pierwotne może ulec pogłębieniu poprzez wystąpienie uszkodzeń wtórnych innych elementów linii. W linii napowietrznej można wydzielić sześć takich istotnych przypadków, które wraz z odpowiednimi prawdopodobieństwami P_{1j} ich wystąpienie podano w tabl. 2

Tablica 2

Uszkodzenia wtórne i prawdopodobieństwa ich wystąpienia

Uszkodzen. wtórne		Zakłócenie pierwotne		1=1	2	3	4	5	6	7	8	9
		SM	SP	PR	PO	ŁO	ŁP	I	IP	OO		
j=a	uszkodzenie słu- pa mocnego			-	-	-	-	-	-	-	-	-
b	uszkodzenie słu- pa przelotowego	1,0	1,0	P_{3b}	P_{4b}	P_{5b}	-	-	-	-	-	-
c	zerwanie prze- wodu roboczego	-	-	-	-	-	P_{6c}	P_{7c}	P_{8c}	P_{9c}		
d	zerwanie prze- wodu odgrom.	-	-	-	-	-	-	P_{7d}	P_{8d}	P_{9d}		
e	zerwanie łań- cucha odciąg.	-	-	-	-	-	-	P_{7e}	-	P_{9e}		
f	zerwanie łańcucha przelot.	-	-	-	-	-	-	P_{7f}	-	P_{9f}		

Tylko niektóre z podanych prawdopodobieństw można kształtować w procesie optyimizacji - dotyczy to P_{3b} , P_{4b} i P_{5b} (szczegóły w p.5). Pozostałe można uważać za stałe dla określonego typu linii i powinny one być wyznaczone drogą analizy statystyki awaryjności linii.

5. Analiza elementów funkcjonalnych linii

Bazując na wprowadzonych w pp. 3 i 4 pojęciach spróbujemy ująć w odpowiedniej formie matematycznej dwa czynniki decydujące o kosztach zawodności dla danego elementu funkcjonalnego, tj. czas trwania zakłócenia t_1 i koszty remontu K_1 . W tym celu przyjmiemy wyidealizowany układ linii z równomiernie rozłożonymi słupami mocnymi o stosunku n liczby słupów przelotowych do mocnych.

5.1. Słupy przelotowe i mocne

Dla właściwej oceny oczekiwanych skutków uszkodzenia pierwotnego SM lub SP należy uzależnić czas postoju linii i koszty remontu od liczby uszkodzonych słupów. Poprzez analizę zaszłych awarii słupowych lub obliczenia można ustalić przybliżoną wartość jednostkową (na jeden uszkodzony słupek) czasu postoju t_{12} i kosztu remontu K_{12} .

Wtedy

dla uszkodzenia SM

$$t_1 = n_1 t_{12} \quad (10)$$

$$K_1 = n_1 K_{12} \quad (11)$$

dla uszkodzenia SP

$$t_2 = n_2 t_{12} \quad (12)$$

$$K_2 = n_2 K_{12}, \quad (13)$$

gdzie n_1 i n_2 oznaczają odpowiednio oczekiwaną liczbę uszkodzonych słupów w przypadku uszkodzenia pierwotnego SM lub SP.

W celu określenia n_1 i n_2 konieczne jest przyjęcie pewnego założenia. Dotyczy ono wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia sąsiednich słupów przelotowych przy uszkodzeniu pierwotnym SM lub SP. Z samej idei słupów przelotowych wynika, że nie są one przeznaczone do przenoszenia tak dużych obciążeń awaryjnych. Potwierdza to również praktyka, kiedy w czasie jednej awarii uszkodzeniu ulega zazwyczaj kilka słupów, a w drastycznych przypadkach nawet kilkanaście. Dlatego proponuje się przyjąć powyższe prawdopodobieństwo z pewnym zastrzeżeniem jako 1,0. W tym przypadku n_1 i n_2 można (po przeanalizowaniu założonego układu linii) wyrazić jako:

$$n_1 = (1 - r_{2a})^2 \sum_{x=1}^{x=m} r_{2a}^{x-1} x [(x+1)(n+1) - 1] \quad (14)$$

$$n_2 = (1-r_{2a})^2 \sum_{x=1}^{x=m} r_{2a}^{x-1} x [x(n+1) - 1] \quad (15)$$

gdzie

- r_{2a} - ryzyko uszkodzenia SM przy uszkodzonym sąsiednim SP,
 m - liczba uwzględnianych sekcji odciągowych (kwestia dokładności obliczenia n_1 lub n_2).

Przedstawione ujęcie pozwala m.in. na skoordynowanie stopni pewności słu-
 pów przelotowych i mocnych.

5.2. Pozostałe elementy

Dla każdego elementu funkcjonalnego założono możliwość wystąpienia o-
 kreślonych uszkodzeń wtórnych, powodujących istotne pogłębienie zakłóce-
 nia. Tak więc czas trwania zakłócenia i koszty remontu na jedno zakłóce-
 nie dla i -tego elementu można wyrazić jako:

$$t_i = (1 - \sum_j p_{ij}) t_i' + \sum_j p_{ij} t_j \quad (16)$$

$$K_i = (1 - \sum_j p_{ij}) K_i' + \sum_j p_{ij} K_j \quad (17)$$

gdzie

- t_i' , K_i' - odpowiednio czas trwania i koszt remontu w przypadku zakłóce-
 nia na i -tym elemencie i niewystąpieniu uszkodzeń wtórnych,
 t_j , K_j - odpowiednio czas trwania i koszt remontu w przypadku wystą-
 pienia j -tego uszkodzenia wtórnego,
 p_{ij} - prawdopodobieństwo wystąpienia j -tego uszkodzenia wtórnego
 przy zakłóceniu na i -tym elemencie.

W powyższych ogólnych zależnościach uwzględniono tylko pierwszy sto-
 pień uszkodzeń wtórnych, jakkolwiek dla niektórych elementów funkcjonal-
 nych celowe jest uwzględnienie również kolejnych możliwych uszkodzeń wtór-
 nych (szczegóły w [4]).

Prawie wszystkie wielkości w zależnościach (16) i (17) powinny zostać
 wyznaczone ze statystyk awaryjności linii, za wyjątkiem prawdopodobieństw
 p_{3b} , p_{4b} i p_{5b} , które można wyrazić jako:

$$p_{3b} = \frac{n-1}{n+1} [2 r_{3b} (1-r_{3b}) + r_{3b}^2] + \frac{2}{n+1} r_{3b} \approx \frac{2n}{n+1} r_{3b} \quad (18)$$

$$P_{4b} \approx \frac{2}{n+1} r_{4b} \quad (19)$$

$$P_{4b} = r_{3b}' \quad (20)$$

gdzie

r_{3b} - ryzyko uszkodzenia słupa przelotowego przy zerwanym przewodzie roboczym,

r_{4b} - jw. lecz przy zerwanym przewodzie odgromowym.

Pozwala to na skoordynowanie stopni pewności różnych elementów, a zwłaszcza słupów przelotowych i przewodów.

Przy wyprowadzaniu powyższych zależności przyjęto, że zerwanie przewodu nie stwarza istotnego zagrożenia dla słupów mocnych.

LITERATURA

1. Working Group on Safety Factors of Study Committes Nos. 6 and 7 CIGRE "A Draft for a Guide to Design of Overhead Line Towers in Regions Without Ice Loadings", Electra 1968/6.
2. Artiemiew D.E., Tichodiejew N.N., Szur S.S. "Koordynacja izolacji linii elektropieredaczi", Moskwa-Leningrad, 1966.
3. Okorokow W.R. "K woprosu opriedielenija narodnochozjajst wiennogo uszczjerba iz-za naruszzenija nadieźnosti elektrosnabženija pri planirowanii razwitija eliektroenergieticzieskich sistiem", Izw.AN SSSR, Energiетка i transport, 1970/1.
4. Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej "Koordynacja stopnia pewności elementów składowych linii przesyłowych najwyższych napięć". Praca Zespołu Instytutu, Gliwice 1972.
5. "Тумчасова инструкция branżова badania ekonomicznej efektywności inwestycji energetycznych", Zj. Energetyki, Warszawa 1965 r.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Резюме

В статье представлена концепция статистической модели оптимизации надежности линии электропередачи, основанной на минимуме удельных затрат. Предложено выделение из линии ряда функциональных элементов, а также приведен анализ взаимосвязи между ними. Рассмотрен метод определения некоторых составляющих народнохозяйственного ущерба при нарушении надежности работы линии электропередачи.

THE OPTIMIZATION MODEL OF THE OVERHEAD LINE RELIABILITY

Summary

The conception of the overhead line statistic optimization model based on the fundamental condition of unitary costs minimalization is presented in the paper. The separation of the series of the functional elements of the line is suggested and the connections between these elements are analysed. The calculation method for some components of the line deceptiveness costs is considered.