



Jan C. STĘPIEŃ

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Ocena optymalnego czasu eksploatacji linii kablowych 15 kV z uwzględnieniem ich zawodności

Streszczenie: W referacie przedstawiono model wyznaczania optymalnych czasów użytkowania linii kablowych średniego napięcia, opierający się na rocznych zdyskontowanych kosztach użytkowania linii z uwzględnieniem ich zawodności.

Abstract: (Evaluation of optimum exploitation time for 15 kV cable lines taking into account their unreliability). A model for evaluation of optimum exploitation time for medium voltage cable lines, based on annual exploitation discount cost of the lines, taking into account their unreliability, has been presented in the paper.

Słowa kluczowe: niezawodność, linie kablowe 15 kV, optymalny czas eksploatacji, zarządzanie eksploatacją.

Key words: reliability, cable lines 15 kV, optimum exploitation time, management of maintenance.

Wstęp

W miarę upływu czasu eksploatacji w izolacji kabli zachodzą procesy starzeniowe i linia kablowa coraz częściej się uszkadza. Występowanie awarii linii kablowych jest więc nieuchronne.

Wzrost liczby awarii oraz duża liczba napraw wpływa na koszty eksploatacji systemu elektroenergetycznego i obniża poziom świadczonych przez dystrybutora energii elektrycznej usług.

Naturalną metodą poprawy funkcjonowania systemu (zmniejszenia liczby awarii) jest wymiana fragmentów linii o dużej intensywności awarii. Wymiana, z jednej strony podwyższa sprawność systemu (obniża intensywność awarii), z drugiej strony wymaga dodatkowych nakładów. W konsekwencji wymaga dokładnej analizy ekonomicznej jej celowości.

Ponieważ intensywność awarii kabli jest rosnąca w związku z powyższym koszty związane z niezawodnością przypadające na jednostkę czasu rosną. Wynika stąd, że może istnieć taka chwila w której opłaca się wymienić linię na nową, niż ponosić coraz większe koszty jej użytkowania. Należy przy tym mieć na względzie, że zbyt wczesne wycofanie linii z ruchu nie jest opłacalne, ponieważ roczne koszty kapitałowe mogą być wtedy duże. Można więc założyć że istnieje optymalny okres czasu, dla którego minimalizują się jednostkowe koszty użytkowania linii, z uwzględnieniem kosztów zawodności i w tym okresie powinna następować planowana wymiana linii na nową.

Wyznaczenie optymalnych czasów eksploatacji linii kablowych średniego napięcia, umożliwia minimalizację kosztów użytkowania ponoszonych przez dystrybutora energii.

Awarie mogą wystąpić w dowolnym miejscu linii. Po wystąpieniu awarii następuje naprawa, która polega na wymianie krótkiego odcinka linii, który uległ awarii. Oznacza to, że w wyniku naprawy jedynie mały odcinek linii ulega odnowie. Ponieważ długość wymienianego odcinka jest nieznaczną w stosunku do długości całej linii dlatego dla celów analizy niezawodnościowej zakłada się że takie pojedyncze naprawy nie zmieniają charakterystyk niezawodnościowych linii.

Praca linii kablowych odpowiada następującym założeniom [4,5,6]:

1. Linia pracuje z reguły w sposób ciągły, a przy pracy z przerwami jako zmienną t przyjmuje się łączny czas działania,

2. W razie uszkodzenia linii, w chwilach $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, podlega ona naprawie polegającej na wymianie uszkodzonego odcinka,
3. Czas naprawy (odnowy) jest pomijalnie mały w stosunku do czasu poprawnej pracy,
4. Po dokonaniu naprawy linia nie zmienia swoich własności niezawodnościowych,
5. Znane są średnie koszty wynikające z powstałych awarii.

Na wartość rocznych kosztów eksploatacyjnych elektroenergetycznych linii kablowych składają się również koszty strat mocy i energii. Koszty te zmieniają się w czasie, nie są jednak zależne od chwili wymiany linii. Nie zależą one od tego czy linia jest nowa, czy też po dłuższym czasie eksploatacji (jeżeli zakłada się wymianę linii na nową o podobnych parametrach technicznych). Biorąc pod uwagę te założenia, można przyjąć założenie upraszczające polegające na pominięciu tych kosztów w kryterium optymalizacyjnym.

Kryterium oceny optymalnych czasów eksploatacji linii kablowych średniego napięcia

Za kryterium optymalizacyjne przyjęto minimum jednostkowych kosztów użytkowania linii. Jeżeli za jednostkę czasu przyjmiemy się rok, wówczas funkcją celu są roczne koszty użytkowania linii z uwzględnieniem kosztów zawodności. Przy zastosowaniu takiego kryterium konieczne jest zastosowanie dynamicznych metod oceny ekonomicznej za pomocą rachunku dyskonta, gdyż koszty zawodności na skutek narastania uszkodzeń z upływem czasu są zmienne.

Przyjmuje się założenie, że znane są następujące dane:

K_n - nakłady inwestycyjne linii,

k_z - średnie jednostkowe koszty naprawy awaryjnej, w skład których wchodzi koszty remontu, koszty strat gospodarczych u odbiorcy energii, koszty utraty zysku dystrybutora energii, koszty bonifikat i upustów za nie dostarczoną energię elektryczną,

λ_i - funkcja intensywności uszkodzeń obiektu.

Przy takich założeniach koszty roczne użytkowania linii, z uwzględnieniem rachunku dyskonta i kosztów zawodności można przedstawić za pomocą wyrażenia [2,7]:

$$(1) \quad K_r(t) = K_n \cdot r(t) + a_r(t) \cdot k_z \cdot \sum_{i=1}^{i=t} \lambda_i \cdot (1+p)^{t-i}$$

gdzie: $r(t)$ - współczynnik rocznych kosztów kapitałowych, $a_r(t)$ - czynnik dyskontujący, p - stopa dyskonta, t - kolejne lata eksploatacji.

Aby powyższe wyrażenie, będące funkcją kryterialną rozpatrywanego problemu, posiadało minimum muszą być spełnione dwa konieczne warunki:

1. konieczny jest rosnący charakter funkcji intensywności uszkodzeń,
2. wartość ilorazu zdyskontowanych kosztów strat wynikłych na skutek zawodności do zdyskontowanych kosztów nakładów inwestycyjnych związanych z wymianą linii kablowej na nową musi być większa od jedności.

W przypadku niespełnienia chociaż jednego z podanych warunków funkcja kryterialna nie będzie miała minimum i wymiany profilaktyczne nie będą ekonomicznie uzasadnione. Brak minimum funkcji kryterialnej lub jego występowanie dla bardzo dużych wartości t oznaczałoby, że najlepszą strategią użytkowania linii kablowej jest ciągle dokonywanie napraw aż do kresu technicznych możliwości.

Przy uwzględnieniu zależności na $r(t)$ i $a_r(t)$ [1] funkcję tą można przedstawić w postaci zależności:

$$K_r(t) = K_n \cdot \frac{p \cdot (1+p)^t}{(1+p)^t - 1} + \frac{p}{(1+p)^t - 1} \cdot k_z \cdot \sum_{i=1}^{i=t} \lambda_i \cdot (1+p)^{t-i} \quad (2)$$

Powyzsza zależność jest słuszna, jeżeli koszty zawodności nie wykazują zmienności czasowej i mają jedynie zmienność losową, co pozwala na posługiwanie się wartością średnią k_z .

Średnie koszty wynikające z awarii można określić zależnością uwzględniającą średnie koszty remontu, koszty utraty zysku przez dystrybutora, koszty bonifikat i upustów za nie dostarczoną energię oraz koszty strat u odbiorcy energii:

$$k_z = k_{sua} + (k_{js} - k_{jk}) \cdot A_n + k_{js} \cdot A_n + k_A \cdot A_n \quad (3)$$

gdzie: k_{sua} - średni koszt naprawy uszkodzenia w linii kablowej, k_A - jednostkowy wskaźnik strat odbiorcy, na jednostkę nie dostarczonej energii elektrycznej, k_{jk} - jednostkowa cena energii za jaką dystrybutor kupuje energię z sieci przesyłowych wyższych napięć, k_{js} - jednostkowa cena energii dla odbiorcy wynikająca z taryfy opłat, A_n - nie dostarczona odbiorcy energia wskutek przerwy w zasilaniu.

Optymalny czas eksploatacji linii kablowej można wyznaczyć jako rok eksploatacji, przy którym funkcja określająca roczne koszty użytkowania obiektu określona poniższym zapisem osiąga minimum:

$$K_r(t) = K_n \cdot \frac{p \cdot (1+p)^t}{(1+p)^t - 1} + \frac{p}{(1+p)^t - 1} \cdot (k_{sua} + (k_{js} - k_{jk}) \cdot A_n + k_{js} \cdot A_n + k_A \cdot A_n) \cdot \sum_{i=1}^{i=t} \lambda_i \cdot (1+p)^{t-i} \quad (4)$$

Ocena optymalnego czasu eksploatacji linii kablowych z uwzględnieniem ich zawodności

Określenie optymalnego czasu eksploatacji linii kablowych z uwzględnieniem ich zawodności mogą być wykonywane metodą kolejnych iteracji, których celem jest

znalezienie takiej wartości czasu eksploatacji linii, dla której wartość wyrażenia (4) jest minimalna.

Wykonując obliczenia według zaproponowanego modelu, przy podstawieniu wartości wskaźników wchodzących w skład wyrażenia wyznaczonych na podstawie badań i ich modeli probabilistycznych, można określić optymalny czas wymiany linii kablowej, co jest celem przedstawionej strategii użytkowania linii kablowych średniego napięcia.

Dla przedstawienia wpływu parametrów wyrażenia (3) na wartości wyrażenia (4) przeprowadzono analizę zmian kosztów rocznych w funkcji czasu eksploatacji, odniesionych do długości linii kablowej 1 km, dla różnych wartości stopy dyskonta p , różnych wartości nie dostarczonej energii A_n i różnych wartości kosztów usuwania awarii k_{sua} .

Należy przy tym stwierdzić, że wartości A_n i k_{sua} dobierano zgodnie z wartościami wyznaczonymi na podstawie przeprowadzonych badań, zamieszczonych w [2].

Charakterystyki przedstawione na rysunku 1 wykonano przy następujących danych:

- koszty inwestycyjne linii $K_n = 150\ 000$ zł/km [3],
- jednostkowe koszty zakupu przez dystrybutora energii $k_{jk} = 0,15$ zł/kW·h,
- jednostkowe koszty sprzedaży przez dystrybutora energii $k_{js} = 0,40$ zł/kW·h,
- wskaźnik jednostkowych strat odbiorcy, na jednostkę nie dostarczonej energii na podstawie danych statystycznych przyjęto $k_A = 8,0$ zł/kW·h, [3],
- średnie koszty usuwania awarii w liniach kablowych wyznaczone na podstawie badań $k_{sua} = 1200$ zł [3],
- średnia wartość nie dostarczonej wskutek przerwy w zasilaniu odbiorcy energia (na podstawie badań) $A_n = 2600$ kW·h [3].

Funkcja intensywności awarii linii określona została za pomocą rozkładu Weibulla o postaci:

$$\lambda(t) = \frac{v}{b} \left(\frac{t}{b} \right)^{v-1} \quad (5)$$

gdzie: v - parametr kształtu rozkładu Weibulla, b - parametr skali rozkładu Weibulla,

dla wartości parametrów [3]:

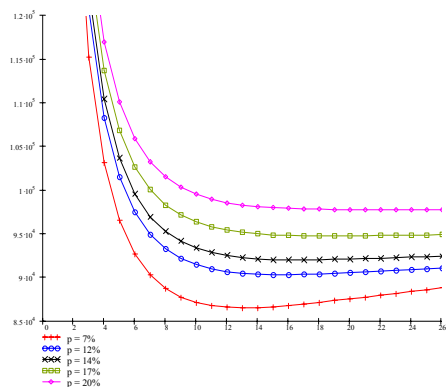
$$v = 1,28;$$

$$b = 6,45.$$

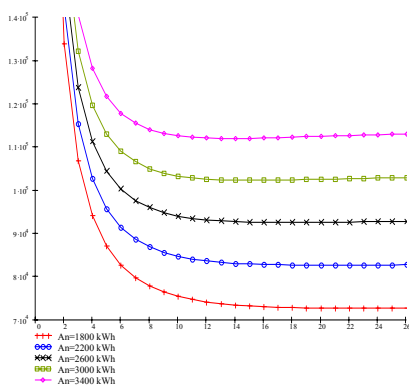
Na rysunku 1 przedstawiono charakterystyki kosztów użytkowania linii kablowej odniesione do długości 1 km w funkcji czasu ich pracy przy różnych wartościach stopy dyskonta p . Z rysunku 1 można zauważyć, że przy wartości stopy dyskonta równej 7% uzyskuje się na podstawie funkcji celu (4), że optymalny czas użytkowania linii kablowej wynosi 12-14 lat. Należy również zauważyć, iż przy zwiększaniu stopy dyskonta optymalny czas użytkowania linii kablowej wydłuża się, natomiast w miarę zmniejszania stopy dyskonta czas ten ulega skróceniu. Przy wartości stopy dyskonta powyżej 14% koszty roczne linii praktycznie nie zmieniają się po 14 roku użytkowania.

Na wartość czasu optymalnych wymian linii kablowych wpływa wartość nie dostarczonej odbiorcom energii elektrycznej wynikająca z awarii linii kablowych. Na rysunku 2 zaprezentowano charakterystyki kosztów użytkowania linii kablowych przy różnych wartościach nie dostarczonej energii. Obliczenia wykonano przy stopie dyskonta $p = 14\%$.

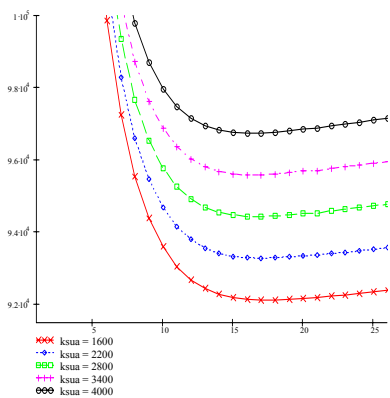
Analizując otrzymane charakterystyki można zauważyć, że im większa wartość nie dostarczonej energii tym optymalny czas użytkowania linii kablowych zmniejsza się.



Rys. 1. Charakterystyki kosztów jednostkowych użytkowania linii kablowych w funkcji czasu ich pracy przy różnych wartościach stopy dyskonta p



Rys. 2. Charakterystyki kosztów jednostkowych użytkowania linii kablowych dla różnych wartości nie dostarczonej energii A_n

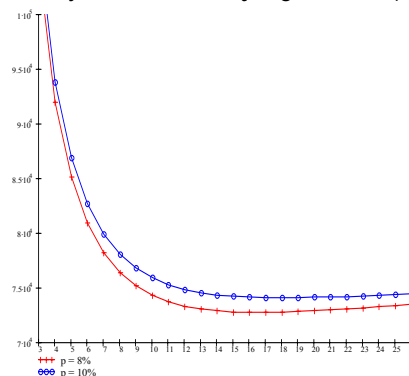


Rys. 3. Charakterystyki kosztów jednostkowych użytkowania linii kablowych dla różnych wartości kosztów usuwania awarii k_{sua}

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki kosztów użytkowania linii kablowych w funkcji czasu ich pracy dla różnych wartości kosztów usuwania awarii k_{sua} . Obliczenia wykonano przy założeniu $p = 14\%$, oraz przy $A_n = 2600 \text{ kWh}$. Analizując uzyskane krzywe można stwierdzić, że koszty usuwania awarii k_{sua} w małym stopniu wpływają na wartość optymalnego czasu wymiany linii kablowych. Dla rozpatrzonych wartości k_{sua} uzyskano optymalny czas eksploatacji linii kablowych wynoszący 17 lat (jedynie dla $k_{sua} = 4000 \text{ zł}$ uzyskano czas użytkowania linii 16 lat).

Jak widać z przedstawionych rysunków na wartość charakterystyki kosztów wpływa znacząco wartość stopy dyskonta p . Obecnie, dla obiektów energetycznych przyjmuje się stopę dyskonta $p = (8 \div 10)\%$ [1].

Przedstawione na rysunku 4 wyniki charakterystyki kosztów jednostkowych użytkowania linii kablowych wykonano dla dwóch wartości stopy dyskonta 8% i 10%. Wartości pozostałych parametrów przyjęto jak poprzednio. Przy tak przyjętych wartościach stopy dyskonta p optymalny czas eksploatacji linii zawiera się w granicach (14-16) lat.



Rys. 4. Charakterystyki kosztów jednostkowych użytkowania linii kablowych w funkcji czasu ich pracy dla wartości stopy dyskonta $p = 8$ i 10%

Wnioski

W referacie przedstawiono model i ocenę optymalnego, ze względu na zawodność, czasu użytkowania linii kablowych. Jak wynika z przeprowadzonych analiz na wartość tego czasu zasadniczo wpływają wartości stopy akumulacji p , wartości nie dostarczonej energii elektrycznej A_n oraz koszty usuwania awarii k_{sua} . W zależności od przyjętych do analizy parametrów otrzymano wartości optymalnego czasu zawarte w granicach od 13 do 25 lat. Wynika z tego, że każdy przypadek wymiany musi być indywidualnie analizowany. Pomocne w tym zakresie są wyznaczone wartości i rozkłady wielkości niezawodnościowych wchodzących w skład funkcji (4).

LITERATURA

- [1] Kamrat W., Metody oceny efektywności inwestowania w elektroenergetyce. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004.
- [2] Sozański J., Niezawodność zasilania energią elektryczną. WNT, Warszawa 1982.
- [3] Stępień J.C. (red), Probabilistyczne modele niezawodności i optymalizacji czasu eksploatacji linii kablowych 15 kV. Sprawozdanie z Projektu Badawczego KBN nr 8 T10B 016 21. Kielce, 2004.
- [4] Stępień J.C., Evaluation methods of power engineering objects reliability function. *Proceeding of Seminar on Electrical Engineering Beskidy* 2000. Polish Scientific Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering. Conference Archives vol. 11, 2000, Istebna – Pietraszonka, 25÷28 September 2000, s.85÷92.
- [5] Stępień J.C., Niezawodność linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji polietylenowej. VI Symposium „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EU'97”, Zakopane, 1997 r., s.363÷368.
- [6] Stępień J.C., Reliability models of medium voltage cable lines. X Międzynarodowa Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gdańsk -Jurata, 2001 r. t.I, s. 323÷330.
- [7] Stępień J.C., Optymalny czas eksploatacji linii kablowych średniego napięcia z uwzględnieniem ich zawodności. XII Międzynarodowa Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gdańsk -Jurata, 8÷10 czerwca 2005 r. t.IV, s. 313÷319.

Autor: prof. nadzw. dr hab. inż. Jan C. Stępień. Politechnika Świętokrzyska, Samodzielny Zakład Podstaw Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: stapien@tu.kielce.pl.