

Zbigniew GACEK

Institut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

PRZEGLĄD STRATEGII OBSŁUGI EKSPLOATACYJNEJ WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Streszczenie. Artykuł zawiera przegląd wybranych strategii obsługi eksploatacyjnej wysokonapięciowych układów izolacyjnych, wynikających z ogólnych zasad profilaktyki obiektów technicznych. Przedstawiono ogólne zasady racjonalnej obsługi eksploatacyjnej, przydatne w wysokonapięciowej technice izolacyjnej. W rozważaniach uwzględniono dwie grupy tzw. prostych strategii obsługi (zależnych od czasu pracy i stopnia zużycia obiektu) oraz grupę strategii obsługi zależnych od poziomu gotowości obiektu.

Stwierdzono, że ogólne zasady profilaktyki obiektów technicznych mogą być pomocne przy wyborze strategii racjonalnej obsługi eksploatacyjnej wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Przedstawiono przykład praktycznego zastosowania jednej z tych strategii dla izolacji linii napowietrznych, pracujących w trudnych warunkach zabrudzeniowych. Opierając się na zmodyfikowanej strategii wymian grupowych z pełną naprawą uszkodzonego elementu oszacowano częstość i czasokres czyszczenia izolatorów liniowych, zależnie od stopnia narażenia zabrudzeniowego i wymaganej niezawodności izolacji między kolejnymi czyszczeniami.

1. Wprowadzenie

Układy izolacyjne należą do podstawowych i jednocześnie najbardziej niewrażliwych elementów funkcjonalnych urządzeń elektroenergetycznych, decydując w znacznej mierze o ich niezawodności. Korzystny wpływ na stan i właściwości techniczne izolacji wywierają między innymi odpowiednie zabiegi eksploatacyjne. Poniżej przedstawiono ogólne zasady racjonalnej obsługi eksploatacyjnej, przydatne w wysokonapięciowej technice izolacyjnej. Zakres rozważań nie obejmuje zagadnień związanych z organizacją służb eksploatacyjnych (m.in. sposobów wykonywania usług, niezbędnych kwalifikacji i liczności personelu, technicznego wyposażenia brygad) oraz zagadnień ekonomicznych (szeroko rozumianych kosztów eksploatacji i zawodności). Celem rozważań jest przede wszystkim wywołanie problemu, a nie podawanie gotowych recept do praktycznego wykorzystania. Dokonano jednak próby zastosowania jednej ze zmodyfikowanych strategii obsługi do oszacowania uzasadnionej częstości czyszczenia izolatorów liniowych.

2. Niektóre strategie obsługi eksploatacyjnej wysokonapięciowej izolacji

Odpowiednia obsługa eksploatacyjna izolacji urządzeń elektroenergetycznych jest jednym ze sposobów zapewnienia jej dostatecznej niezawodności oraz ograniczenia do uzasadnionego minimum strat gospodarczych, spowodowanych wyłączeniami awaryjnymi sieci. Taki pogląd wynika również z aktualnych przepisów, określających ogólne zasady eksploatacji sieci elektroenergetycznych^{x)}. W przepisach tych odstąpiono od normatywnych czasokresów przeglądów i odnowień, wprowadzając zasadę określania ich częstości na podstawie wyników oceny rzeczywistego stanu technicznego i analizy awaryjności urządzeń. Racjonalne i elastyczne postępowanie w tym zakresie może przynieść wymierne korzyści, ale wymaga znajomości choćby przybliżonych współzależności między zakresem i częstością wykonywanych czynności eksploatacyjnych a niezawodnością obsługiwanego izolacji urządzeń. Takie informacje uzyskuje się w wyniku długotrwałych statystycznych badań zakłóceń lub wspomaganymi komputerowo badań symulacyjnych, umożliwiających określenie wpływu modelowanych wariantów obsługowych na generowane strumienie zakłóceń.

Obsługa eksploatacyjna izolacji urządzeń obejmuje w ogólnym ujęciu następujące czynności: przegląd i kontrolę stanu technicznego, częściową lub pełną naprawę profilaktyczną, wymianę profilaktyczną, naprawę lub wymianę wymuszoną przez awarię. Celem tych czynności jest ewentualne odnowienie izolacji, tj. przywrócenie stanu jej zdatności do dalszej eksploatacji (tabl. 1). Ogranicza się w ten sposób liczbę słabych ogniw w złożonych pod względem funkcjonalnym i konstrukcyjnym układach izolacyjnych. Najmniej racjonalne jest ograniczenie się tylko do obsług wymuszonych przez awarie (uszkodzenia). Znacznie bardziej uzasadnione są obsługi profilaktyczne izolacji, wykonywane jeszcze w stanie jej zdatności do spełniania określonych zadań funkcjonalnych.

Ogólne zasady profilaktyki obiektów technicznych zostały stworzone na podstawie teorii niezawodności i odnowy [1,2]. Istnieją różne strategie wykonywania czynności obsługowych - w zależności od rodzaju, sposobu, zakresu i harmonogramu wykonywanych obsług^{xx)}

^{x)} Zarządzenie Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 17 lipca 1987 r. (Monitor Polski nr 25 z dnia 4 września 1987 r.).

^{xx)} W zależności od harmonogramu obsług profilaktycznych wyróżnia się:

- a) strategię sztywne, wg których czynności obsługowe są wykonywane ściśle okresowo (w z góry ustalonych terminach),
- b) strategię elastyczne, wg których czynności obsługowe są wykonywane w terminach ustalanych losowo (zależnie od zmieniającego się stanu technicznego obiektu).

Tablica 1

Ogólna klasyfikacja eksploatacyjnych czynności obsługowych izolacji

Głębokość odnowy	RODZAJ CZYNNOŚCI OBSŁUGOWEJ IZOLACJI	
	W STANIE ZDATNOŚCI ¹⁾	W STANIE NIEZDATNOŚCI ²⁾
Bez odnowy	Kontrola stanu izolacji bez dalszych czynności obsługowych (w przypadku pozytywnych wyników kontroli)	-
Odnowa niepełna	Kontrola stanu izolacji, a następnie jej częściowe odnowienie (w przypadku stwierdzenia wyraźnego pogorszenia się określonych własności technicznych) ³⁾	Doraźna naprawa uszkodzonej izolacji (przywrócenie stanu pełnej zdatności) ⁶⁾
Odnowa pełna	Kontrola stanu izolacji, a następnie jej wymiana (w przypadku negatywnych wyników kontroli) ⁵⁾	Wymiana lub naprawa uszkodzonej izolacji (przywrócenie stanu pełnej zdatności) ⁶⁾
<p>UWAGI: 1) Planowane obsługi profilaktyczne. 2) Obsługi eksploatacyjne nieplanowane, wymuszone przez awarie. 3) Przykładowo: czyszczenie i silnikowanie izolatorów stacyjnych, wprowadzanie dolewek i domieszek do olejów transformatorowych itd. 4) Przywrócenie dostatecznego, ale niekoniecznie pierwotnego poziomu zdatności izolacji (np. taśmowanie, wulkanizowanie lub kitowanie przewodów oponowych i kabli). 5) Przykładowo: pomiar rozkładu napięcia na łańcuchach izolatorów kołpakowych i wymiana uszkodzonych ogniw, wymiana oleju w transformatorach i przekładnikach itd. 6) Przywrócenie pierwotnego stanu zdatności technicznej izolacji (np. wymiana przebitych izolatorów, odcinków kabli, elementów izolacji wewnętrznej urządzeń i aparatów itd.).</p>		

Przed dokonaniem wyboru rodzaju strategii należy rozważyć całokształt uwarunkowań technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych, a przede wszystkim:

- warunki pracy, zadania funkcjonalne, stopień złożoności i strukturę niezawodnościową izolacji,
- praktyczne możliwości wykonywania przeglądów i kontroli stanu technicznego izolacji,
- podatność izolacji na starzenie oraz na wykonywanie napraw,
- spodziewany przebieg funkcji intensywności zakłóceń w czasie eksploatacji oraz jej zależności od częstości obsługi profilaktycznych izolacji,
- koszty eksploatacyjne obsługi profilaktycznych oraz całkowite koszty strat gospodarczych, spowodowanych wyłączeniami awaryjnymi sieci.

Szczególnie ważne jest poszukiwanie optymalnych strategii obsługi, tzn. strategii zapewniających osiągnięcie założonego celu zgodnie z przyjętym kryterium (np. w postaci minimalizacji łącznych kosztów eksploatacji i zawodności).

W tabelicy 2 przedstawiono niektóre strategie obsługi eksploatacyjnej obiektów technicznych, które mogą być przydatne w wysokonapięciowej technice izolacyjnej. Uwzględniono dwie grupy tzw. prostych strategii obsługi (o pomijalnym czasie trwania odnowy). Są one zróżnicowane pod względem wielkości kryterialnych, bowiem stosowne decyzje podejmuje się w zależności albo od czasu poprawnej pracy (grupa A), albo stopnia zużycia obiektu (grupa B). Oddzielna grupa C zawiera strategie o niepomiąlnym czasie trwania odnowy, a stosowne decyzje podejmuje się zależnie od tzw. poziomu gotowości obiektu (mierzonego udziałem czasu jego zdatości do całkowitego czasu eksploatacji). Zadaniem strategii z grupy C jest określenie takiej sekwencji działania profilaktycznego, aby zapewnić minimalizację oczekiwanych łącznych kosztów eksploatacji i zawodności, przy jednoczesnym zapewnieniu dostatecznej zdolności do wykonania zadania przez obiekt.

Proste strategie obsługi, zależne od czasu pracy obiektu (grupa A), są przydatne głównie dla izolacji zewnętrznej, nie starzejącej się wyraźnie w przedziale odnowy i eksploatacyjnej w długim przedziale czasu. Proste strategie z grupy B są przydatne głównie dla szybko starzejącej się izolacji wewnętrznej, o czasie przewidywanej eksploatacji porównywalnym z długością przedziału odnowy. Strategie obsługi zależne od poziomu gotowości obiektu (grupa C) są przydatne głównie dla złożonych i odpowiedzialnych pod względem funkcjonalnym układów izolacji wewnętrznej, których czas trwania obsługi (kontroli, wymiany lub naprawy) nie może być pominięty w porównaniu z czasem poprawnej pracy urządzenia.

3. Przykład zastosowania strategii obsługi izolacji

Rozpatruje się izolację wysokonapięciowych linii napowietrznych, znajdujących się w obszarze o silnym zanieczyszczeniu atmosfery pochodzenia przemysłowego. Celem rozważań jest wyznaczenie uzasadnionej częstości czyszczenia izolatorów na podstawie zmodyfikowanej strategii A4 z tabl. 2 oraz następujących założeń:

1. Obsługa izolacji polega albo na wymianach uszkodzonych izolatorów i sprzętu, albo na wymianach profilaktycznych, w postaci ściśle okresowego czyszczenia izolatorów na szczególnie narażonym odcinku linii (w chwilach τ , 2τ , 3τ , ...).

2. Intensywność zakłóceń zabrudzeniowych na odcinku linii wyraźnie wzrasta, jeśli czyszczenie izolatorów nie zostanie terminowo wykonane.

3. Każda odnowa, tj. wymiana wymuszona lub profilaktyczna, jest odnową pełną i wykonywaną w pomijalnie krótkim przedziale czasu.

4. Czas eksploatacji (t) oraz przedziały czasu między kolejnymi zakłóceniami (t_z) lub chwilami czyszczenia izolatorów (τ) są rozpatrywane jako tzw. wielkości zredukowane^{x)}.

Opierając się na tych założeniach, w pracach [3] i [4] wyznaczono dystrybuantę czasu między kolejnymi odnowami, oczekiwaną liczbę odnowień i czyszczeń izolacji oraz prawdopodobieństwo co najmniej jednego czyszczenia w długim przedziale czasu. W pierwszym przedziale odnowy ($0 \leq t < \tau$) prawdopodobieństwo czyszczenia jest równe zeru, ale np. w drugim wyraża się wzorem:

$$P_c(\tau \leq t < 2\tau) = [\lambda_z(t - \tau) + 1] \exp(-\lambda_z \tau), \quad (1)$$

przy czym: $\lambda_z = k_u Q_{SPZ} \lambda_p$ - zastępcza intensywność trwałych wyłączeń linii wskutek uszkodzeń izolatorów i osprzętu; $k_u Q_{SPZ} \approx 0,3$ - współczynnik empiryczny określający udział wyłączeń linii wskutek uszkodzeń w ogólnej liczbie przeskoków zabrudzeniowych (k_u) oraz prawdopodobieństwo nieskutecznego działania SPZ podczas zakłóceń zabrudzeniowych (Q_{SPZ}); λ_p - zastępcza intensywność przeskoków zabrudzeniowych na rozpatrywanym odcinku linii.

W celu wyznaczenia uzasadnionej częstości czyszczenia [4,5] przyjęto, że:

- przedział odnowy (τ) jest większy od roku obliczeniowego (T),
- czas eksploatacji w jednym przedziale odnowy $t = T \frac{\tau}{T} \approx T/N_c(T)$, a więc jest wyrażony za pomocą względnego przedziału czasu τ/T lub rocznej częstości czyszczenia $N_c(T)$,
- niezawodność zabrudzeniowa izolacji odcinka linii między kolejnymi czyszczeniami nie może być mniejsza od niezawodności wymaganej, wynikającej ze wzoru:

$$R^*(\tau) = \exp[-N_p^*(\tau)] = \exp(-\lambda_p^* \tau) = \exp\left(-\frac{\lambda_z^* \tau}{k_u Q_{SPZ}}\right), \quad (2)$$

w którym $N_p^*(\tau)$ - oczekiwana liczba przeskoków zabrudzeniowych, dopuszczalna w przedziale odnowy.

Uwzględniając powyższe założenia we wzorze (1), zmodyfikowanym do postaci $\lim_{t \rightarrow 2\tau} P_c(\tau \leq t < 2\tau) = 1$ (czyszczenie izolacji jest ściśle okresowe),

^{x)} Zgodnie z modelami obliczeniowymi, pozwalającymi wyeliminować zmienność sezonową narażenia zabrudzeniowego [3]. Strumienie zakłóceń są wtedy zbliżone do prostych strumieni Poissona, a intensywność zakłóceń jest równa największej średniej sezonowej intensywności zakłóceń w czasie zredukowanym do ok. 20-30% czasu trwania roku.

uzyskuje się zależność:

$$\left\{ \frac{k_u Q_{SPZ} N_p(T)}{N_c(T)} - k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau) + 1 \right\} \exp[-k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau)] \cong 1, \quad (3)$$

z której wynika, że:

- uzasadniona roczna częstość czyszczenia izolatorów

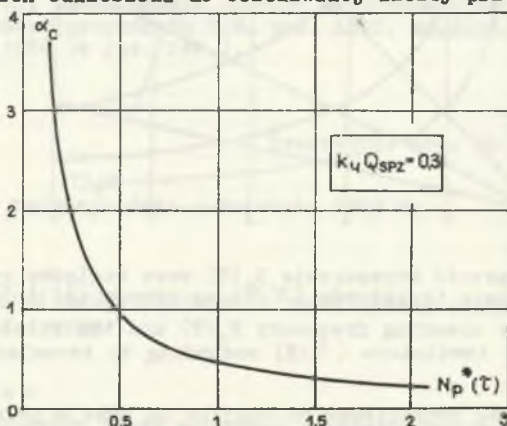
$$N_c(T) \cong \frac{k_u Q_{SPZ} N_p(T)}{k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau) + \exp k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau) - 1} = \alpha_c N_p(T), \quad (4)$$

- względny uzasadniony czasokres czyszczenia izolatorów

$$\frac{\tau}{T} \cong \frac{1}{\alpha_c N_p(T)} = \frac{k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau) + \exp k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau) - 1}{k_u Q_{SPZ} N_p(T)}, \quad (5)$$

przy czym: $N_p(T) = \lambda_p T = \frac{\lambda_p T}{k_u Q_{SPZ}}$ - oczekiwana liczba przeskoków zabru-

dzeniowych na odcinku linii w ciągu roku; $\alpha_c = N_c(T)/N_p(T)$ - względna uzasadniona częstość czyszczenia izolatorów w ciągu roku, tj. oczekiwana liczba czyszczeń odniesiona do oczekiwanej liczby przeskoków (rys. 1).

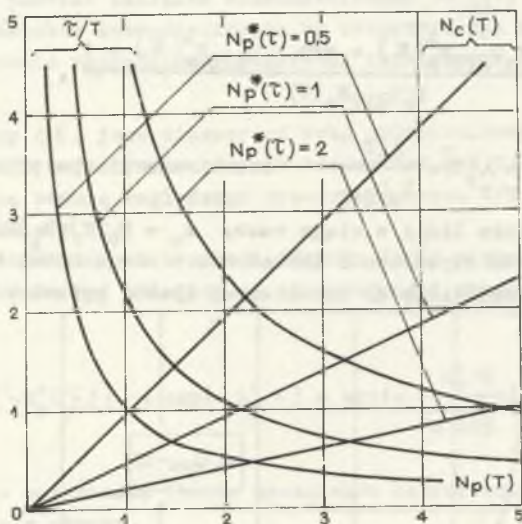


Rys. 1. Względna uzasadniona roczna częstość czyszczenia izolatorów (α_c) w zależności od dopuszczalnej liczby przeskoków zabrudzeniowych w prze-
dziale odnowy ($N_p^*(\tau)$)

Fig. 1. The relative justifiable yearly cleaning frequency of insulators (α_c) according to the expected number of pollution flashovers, admissible in the renewal time interval ($N_p^*(\tau)$)

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że dla określonej uszkodzalności izolatorów i nieskuteczności działania SPZ względna uzasadniona częstość czyszczenia izolatorów zmniejsza się nieliniowo w miarę wzrostu wielkości $N_p^*(\tau)$, a więc obniżania się poziomu wymaganej niezawodności izolacji linii między kolejnymi czyszczeniami. Wymagania niezawodnościowe wynikają z doświadczeń eksploatacyjnych i wymagają uzasadnienia techniczno-ekonomicznego. Przykładowo, jeśli dopuszczalna oczekiwana liczba przeskoków $N_p^*(\tau) \leq 1$, to wymagana niezawodność $R^*(\tau) \geq 0,37$ i stąd $\alpha_c \geq 0,46 \approx 0,5$.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń uzasadnionych parametrów odnowy: rocznej częstości $N_c(T)$ i względnego czasokresu czyszczenia (τ/T) izolatorów. Parametry te są uzależnione w dużej mierze od stopnia podatności izolacji na narażenie zabrudzeniowe (wyrażonej za pomocą oczekiwanej liczby przeskoków w ciągu roku $N_p(T)$ oraz poziomu wymagań niezawodnościowych w przedziale odnowy (wyrażonego za pomocą wielkości $N_p^*(\tau)$). Zakładając przykładowo, że $N_p^*(\tau) \leq 1$ oraz przyjmując $N_p(T) = 0,5-1$, uzyskuje się: $N_c(T) \approx 0,25-0,5$ i $\tau/T \approx 4,5 - 2,2$.



Rys. 2. Roczna częstość czyszczenia $N_c(T)$ oraz względny czasokres czyszczenia izolatorów (τ/T) wg wzorów (4) i (5)

Fig. 2. The yearly cleaning frequency $N_c(T)$ and the relative time period of cleaning of insulators (τ/T) according to formulae (4) and (5)

Uzyskane wyniki są przybliżone ze względu na brak w pełni uzasadnionych danych niezawodnościowych. Wymagają one ponadto weryfikacji na podstawie kryterium minimalizacji sumy całkowitego oczekiwanego kosztu zawodności (wymian wymuszonych i skutków awaryjnych wyłączeń linii) oraz kosztu eksploatacji (czyszczenia profilaktycznego izolatorów). Zgadzania te wykraczają jednak poza zakres artykułu.

4. Wnioski

1. Ogólne zasady profilaktyki obiektów technicznych mogą być pomocne przy wyborze strategii racjonalnej obsługi eksploatacyjnej wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Niezbędne modyfikacje wynikają z całokształtu uwarunkowań technicznych, organizacyjnych i ekonomicznych.

2. Jedną z możliwości praktycznego zastosowania teorii odnowy w wysokonapięciowej technice izolacyjnej stwarza zmodyfikowana strategia wymian grupowych z pełną naprawą uszkodzonego elementu.

3. Opierając się na powyższej strategii można oszacować uzasadnioną częstość i czasokres czyszczenia izolatorów liniowych, zależnie od stopnia narażenia zabrudzeniowego i wymaganej niezawodności izolacji między kolejnymi czyszczeniami.

LITERATURA

- [1] KOPOCIŃSKI B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973.
- [2] KARPIŃSKI J., FIRKOWICZ Sz.: Zarys profilaktyki obiektów technicznych. Mała monografia PWN, Warszawa 1981.
- [3] GACEK Z.: Niezawodność izolacji linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej nr 642, s. Elektryka z. 67, Gliwice 1980 (monografia).
- [4] GACEK Z.: Strategia okresowej odnowy izolacji liniowej w warunkach zabrudzeniowych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej nr 757, s. Elektryka z.85, Gliwice 1983.
- [5] GACEK Z.: Pewne modele obsługi eksploatacyjnej izolacji w sieciach elektroenergetycznych W.N. Mat. konf. międzyn. "Eneergo-88", t.2, Warna 1988 (w jęz. ros.).

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do redakcji dnia 4 kwietnia 1989 r.

ОБЗОР СТРАТЕГИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Резюме

Статья содержит обзор избранных стратегий эксплуатационного обслуживания высоковольтных изоляционных систем, вытекающих из общих правил профилактики технических объектов. Представлены общие принципы рационального эксплуатационного обслуживания, которые пригодны в высоковольтной изоляционной технике. Обсуждены две группы простых стратегий обслуживания /зависимые

от времени работы и степени износа объекта/, а также группу стратегий обслуживания зависимых от уровня готовности объекта. Установлено, что общие положения профилактики технических объектов пригодны для выбора рациональной стратегии эксплуатационного обслуживания высоковольтных изоляционных систем. Представлен пример практического применения одной из этих стратегий для изоляции воздушной линии, работающей в районах сильных загрязнений атмосферы. Основываясь на модифицированной стратегии групповых профилактических замен с полным ремонтом поврежденного элемента, сделано оценку обоснованной частоты и интервала времени очистки изоляторов, в зависимости от степени загрязнения и полагаемой надежности изоляции в промежутке времени между очередными очистками.

SURVEY OF MAINTENANCE STRATEGIES FOR HIGH-VOLTAGE INSULATING SYSTEMS

S u m m a r y

The article contains a survey of some maintenance strategies for high-voltage insulating system resulting from general principles of technical objects' prevention. The general principles of rational maintenance procedures, useful to high-voltage insulating engineering, have been presented. Two groups of so-called simple maintenance policies (dependent on the service life and degree of wear of technical objects) as well as one group of maintenance policies dependent on the availability level of objects have been considered. It has been found that the general principles of technical objects prevention may be useful when selecting rational maintenance strategies for high-voltage insulating systems. An example of practical application of the one of these strategies for overhead lines insulation in heavily polluted region has been presented. On the basis of a modified policy of group periodical replacements with full repair of damaged elements the justifiable cleaning frequency and the the relative time period of cleaning of line insulators have been evaluated - depending on the level of pollution stress severity and the required reliability of the insulation between successive cleanings.