EUI 2003

Romuald WŁODEK, Szczepan MOSKWA

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki

Model procedury diagnostycznej w eksploatacji urządzeń WN

Streszczenie. *W artykule przedstawiono model matematyczny szacowania czasu życia układów izolacyjnych z uwzględnieniem stanów przejściowych oraz możliwością odnowy stanu, oparty na zastosowaniu łańcuchów Markowa. Model może być zastosowany również do wyznaczania optymalnych okresów przeprowadzania badań kontrolnych jako elementów procesu nadzoru eksploatacyjnego urządzeń wysokiego napięcia.*

Abstract. *(**Model of diagnostic procedure in the exploitation of high voltage devices).** Paper presents the mathematical model of the assessment of insulating systems lifetime with the consideration of transient states and the possibility of renovation, based on the Markov chains. Model can be applied also to the determination of the optimal periods of control procedures as the elements of exploitation maintenance of high voltage arrangements.*

Słowa kluczowe: diagnostyka, eksploatacja układów izolacyjnych, procesy Markowa, model matematyczny.
Keywords: diagnostic, exploitation of insulation systems, Markov processes, mathematical model.

Wstęp

Jednym z elementów eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych jest ich diagnostyka, od której między innymi zależy niezawodność urządzeń, jak również pewność dostaw energii elektrycznej. Całość procedury diagnostycznej zawiera dwa główne składniki: a) zbieranie/gromadzenie danych pomiarowych wg przyjętych zasad i norm oraz b) podjęcie decyzji, która może być przedstawiana w różnego rodzaju formie, np. jako ostrzeżenie, zagrożenie, wyłączenie itp. Informacje opisujące aktualny stan układu izolacyjnego mogą być dostarczane w formie prawdopodobieństwa uszkodzenia lub/i prawdopodobieństwa długości pozostałego czasu życia. Każda z form informacji a zatem i decyzji jest oparta na wiedzy o czynnikach wpływających na procesy starzeniowe badanego systemu. Wszystkie te procesy oprócz opisu ich podstaw fizycznych mogą być traktowane w praktycznym podejściu jako procesu losowe. W ten sposób ich probabilistyczne cechy można użyć w formie danych dla dalszego przetwarzania za pomocą odpowiednich metod.

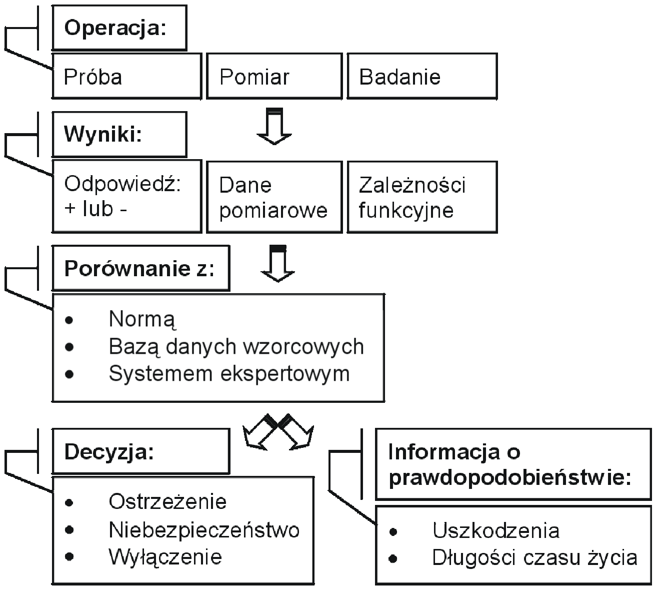
Rola diagnostyki

Wzrastające znaczenie analizy ekonomicznej procesu eksploatacji systemów energetycznych wzmacnia rolę diagnostyki jako części tego procesu. Diagnostyka jest ważnym składnikiem a) bezpieczeństwa, czyli braku zagrożenia dla ludzi, b) niezawodności, czyli spełniania ustalonej funkcji systemu lub procesu, wyrażonej brakiem uszkodzeń i błędów.
Eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych może przebiegać w czasie według jednego z dwu następujących modeli:

- praca urządzenia do końca jego czasu życia/trwałości technicznej z minimalnym nakładem na diagnostykę, a zatem przy niskich kosztach eksploatacji,
- monitoring stanu urządzeń za pomocą nowoczesnych systemów diagnostyki technicznej i przedłużanie czasu ich eksploatacji oraz podwyższenie dyspozycyjności/ zdatności do pracy. Całkowite koszty eksploatacji zawierają w tym przypadku koszty technicznej diagnostyki systemu i przetwarzania zebranych danych oraz ewentualne remonty urządzeń.

Można wyróżnić trzy następujące poziomy technicznej realizacji procedur w celu pozyskania całościowej i jakościowej informacji o stanie badanego urządzenia:

- próby, polegające na poddaniu urządzenia działaniu określonego narażenia w określonych warunkach. Odpowiedź jest ambiwalentna: spełnia wymagania – nie spełnia wymagań (przykład: próby napięciowe).
- pomiary, w wyniku, których otrzymuje się wartości określonych wielkości mierzonych.
- badania, w wyniku, których otrzymuje się zależności funkcyjne określonych wielkości lub ich zależności czasowe, gdy celem badania są np. określone procesy starzeniowe.



Rys.1. Schemat procedury diagnostycznej

Szacowanie czasu życia izolacji

Etap końcowy każdej procedury diagnostycznej dotyczy opracowania otrzymanych powyżej wyników pomiarowych oraz interpretacji dla określonego, końcowego celu tej procedury. Spośród kilku różnych celów można podać jako przykład szacowanie czasu życia układu izolacji elektrycznej.

Chociaż rzeczywiste możliwość takiego szacowania są nadal dyskusyjne, próby takich oszacowań i badań tego problemu są prowadzone intensywnie dla izolacji wielkich maszyn elektrycznych, ponieważ ich efekty mogłyby mieć duże znaczenie dla wykorzystania w praktycznej eksploatacji. Przedstawiana w artykule metoda estymacji/szacowania skupia się głównie na prawdopodobieństwie przetrwania izolacji w dobrym stanie do chwili kolejnego planowanego przeglądu lub ewentualnie przewidzenia, jakie operacje powinny zostać przedsięwzięte, by zregenerować izolację, jeśli takie prawdopodobieństwo jest zbyt małe. Oczywiście określenie granicznego prawdopodobieństwa, które poprzedza właściwą decyzję, w tym przypadku ma charakter arbitralny, ale musi być poparte analizą ekonomiczną. Są dwa sposoby określania długości pozostałego czasu życia układów izolacji: a) monitoring narażeń, które są odpowiedzialne za degradację struktury izolacji i/lub b) obserwacja symptomów za pomocą badań i kontroli okresowych oraz ocenę pozostałego czasu życia na podstawie zebranych doświadczeń. Pierwsze rozwiązanie jest raczej drogie i ma zastosowanie tylko przy bardzo ważnych obiektach pod warunkiem, iż jest wiele narażeń, które mogą wpłynąć na ciągły proces starzenia lub skokowa degradacja izolacji powinna być monitorowana. Drugi sposób wymaga badania różnego rodzaju współczynników poprzez pomiary diagnostyczne podczas normalnej pracy/eksploatacji (on-line) albo podczas przestojów przy przerwie zasilania (off-line). Pozostały czas życia w takim przypadku jest szacowany na podstawie doświadczenia z procesami starzeniowymi w przeszłości. Dla tych celów są systematycznie opracowywane i rozwijane systemy ekspertowe. Jeśli dane mogą być uzyskane z poprzednio wykonanych badań (zwykle zgromadzonych danych lub interpolacji) wówczas może zostać zastosowane podejście probabilistyczne w celu określenia pozostałego czasu życia izolacji. Takie probabilistyczne podejście jest oparte na założeniu, że proces starzenia się systemu izolacji może zostać potraktowany jako model Markowa, to znaczy, że system ulega starzeniu przechodząc przez stany pośrednie aż do końca, czyli uszkodzenia. Oczywiście uszkodzenie systemu może być również efektem innych przypadkowych czynników, a nie tylko skutkiem procesu starzenia. Jeśli stany pośrednie izolacji można wykryć podczas kontroli lub badań profilaktycznych oraz innych działań, to możliwe jest wówczas zregenerowanie izolacji, podnoszące jej niezawodność. W tym procesie pracy system izolacji może przejść przez różne stany, począwszy od nowego do końcowego uszkodzenia z określonym prawdopodobieństwem przejścia w ten sposób, iż każdy stan jest możliwy do osiągnięcia dwiema drogami: 1) do planowanego przeglądu, który podniesie jakość izolacji albo 2) do awarii przypadkowej, bez możliwości odnowienia układu. Model matematyczny zbudowany na założeniach, które umożliwiają wyznaczenie czasu do uszkodzenia układu jest dość skomplikowanej natury lub wymaga dodatkowych założeń upraszczających.

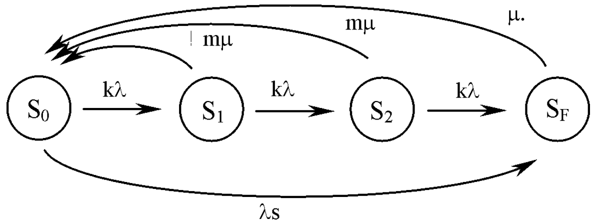
Poniżej zostaną przedstawione dwa modele matematyczne eksploatacji układów izolacyjnych możliwe do wykorzystania podczas podejmowania decyzji w trakcie procesu diagnostycznego. Pierwszy z nich obrazuje proces eksploatacyjny wraz z możliwością regeneracji układu w toku jego użytkowania oraz po zaistnieniu awarii, natomiast drugi przedstawia proces skokowych zmian stanów układu wraz z upływem czasu.

Model matematyczny ze stanami odnawialnymi

Procedura diagnostyczna powinna dostarczać informacji o procesie starzenia się układu izolacyjnego. Starzenie się jest podstawowym procesem zmniejszającym wymagane cechy układu izolacyjnego dla jego dalszego wykorzystania w eksploatacji. Podstawowy znany model takiego procesu, jest oparty na prawie Arrhenius'a dotyczącym cieplnego wpływu energii na procesy chemiczne; tym sposobem są opisane również inne modele oparte na przykład na energii pola elektrycznego. Jednakże w praktyce może okazać się iż skokowe zmiany inicjujące postępujący proces starzeniowy izolacji mogą spowodować również skokowe pogorszenie się stanu izolacji – lub z drugiej strony – w wyniku procesu samoregeneracji mogą doprowadzić do poprawy tego stanu. Przykładem dla pierwszego przypadku są efekty wyładowań niezupełnych, natomiast dla drugiego przypadku można podać zjawisko samoregeneracji układu izolacyjnego kondensatora z elektrodami z papieru metalizowanego. W ten sposób układ izolacyjny może się znaleźć w kilku stanach, zaczynając od nowego, prawidłowego, poprzez pośredni, będący skutkiem procesu starzenia, aż do pełnego nieodwracalnego uszkodzenia. Również jest możliwe natychmiastowe uszkodzenie bez poprzedzającego stanu pośredniego. Taki przykładowy model jest przedstawiony poniżej.

Założenia dla potrzeb tego zadania są następujące:
- istnieje możliwość napraw układu powodując jego powrót do stanu początkowego,
- przeprowadzenie napraw jest możliwe w toku eksploatacji,
- istnieją dwa stany pośrednie pomiędzy nowym układem, a stanem awarii,
- układ jest stacjonarny (prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy stanami jest stałe w czasie).

Graf stanów przedstawianego przykładu jest pokazany na Rysunku 2.



Rys.2. Możliwe stany układu izolacyjnego w czasie

Oznaczenia:
S_0 – stan wyjściowy „nowy"
S_1, S_2 – stany pośrednie
S_F – stan uszkodzenia, awarii
μm – naprawy podczas eksploatacji
μ – naprawy po awarii
k – liczba stanów przed awarią
λ – strumień zdarzeń starzeniowych układu
λs – strumień zdarzeń związany z awarią losową

Prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami można obliczyć wyliczyć z poniższego układu równań, opisujących prawdopodobieństwa poszczególnych zdarzeń:

(1) $$\begin{bmatrix} -(3\lambda+\lambda s) & \mu m & \mu m & \mu \\ 3\lambda & -(3\lambda+\mu m) & 0 & 0 \\ 0 & 3\lambda & -(3\lambda+\mu m) & 0 \\ \lambda s & 0 & 3\lambda & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Podstawiając do powyższych równań następujące dane: μm= 0,2, μ = 10, k = 3, λ = 0,3, λs = 0,5, otrzymuje się wartości prawdopodobieństw, w których może znaleźć się dany układ: p_1 = 0,385, p_2 = 0,315, p_3 = 0,258, p_F = 0,042. Średni czas (w latach) do awarii wyznacza się z wzoru:

(2) $$\overline{T_{ij}} = \left(\overline{T_i} + \overline{T_s}\right)\sum p_{si}^{k}$$

gdzie: i – stan wyjściowy, s – stan pośredni, j – stan końcowy (uszkodzenie).

Średni czas przebywania układu w stanie wyjściowym jest dany równaniem:

(3) $$\overline{T_i} = \frac{1}{\lambda_{is} + \lambda_{ij}}$$

oraz analogicznie średni czas dla stanu pośredniego:

(4) $$\overline{T_s} = \frac{1}{\lambda_{si} + \lambda_{sj}}$$

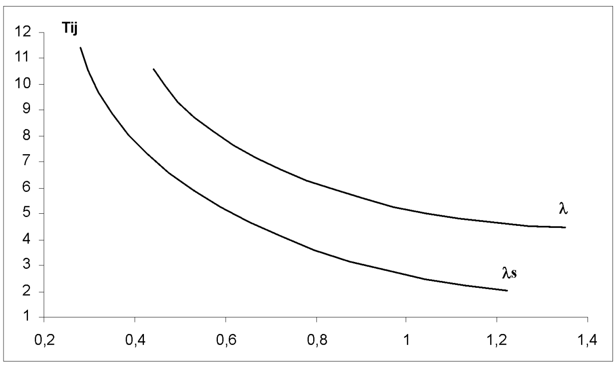
Sumaryczne prawdopodobieństwo przejścia wyznacza się ze wzoru:

(5) $$\sum p_{si}^{k} = \frac{1}{\left(1 - p_{si}\right)} = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{si} + \lambda_{sj}}$$

Podstawiając odpowiednio:

$\lambda_{ij}=\lambda s$
$\lambda_{ji}=\mu$
$\lambda_{is}=\lambda_{sj}=3\lambda$
$\lambda_{si}=\mu m$

na podstawie powyższych danych otrzymuje się wykres zależność średniego czasu do awarii od strumienia zdarzeń starzeniowych lub awarii losowych (rys. 3).



Rys.3. Wykres zależności średniego czasu życia układu izolacji od strumienia narażeń

Trójstopniowy model stanów

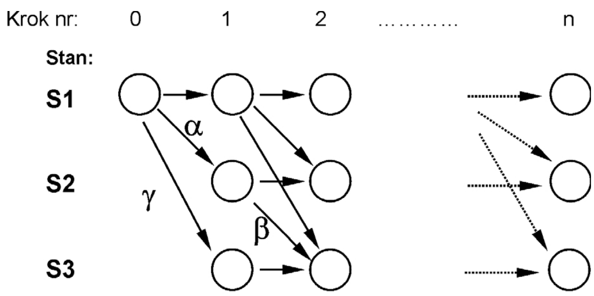
Efekty pomiarów dostarczających dane wyjściowe do procedur diagnostycznych zależą zasadniczo od stanu eksploatacyjnego, w którym pracuje układ izolacyjny. Z drugiej strony dane eksploatacyjne zależą czasu, w którym były zbierane w trakcie całego procesu starzeniowego.

Proces starzenia się układu izolacyjnego jest przedstawiany w wielu różnego rodzaju modelach matematycznych, np. jako proces ciągły w czasie w oparciu o prawa zjawisk chemicznych lub jako proces o zmianach skokowych zmniejszających stan eksploatacyjny układu (możliwości pracy) np. zainicjowany przez przepięcie, jako proces opisany za pomocą teorii katastrof.

Podobnie jak poprzednio, proponowany w dalszym ciągu model uwzględnia różne możliwe stany układu, lecz bez możliwości regeneracji izolacji w trakcie procesu eksploatacyjnego. Biorąc pod uwagę pogarszający się skokowo stan układu, stany eksploatacyjne mogą być przedstawione w postaci następujących trzech poziomów:

S1: stan „normalny"
S2: stan przejściowy
S3: uszkodzenie

Te trzy możliwe naturalne stany pozwalają na bezpośrednie przejście między nimi w następujący sposób: S1 → S2, S1 → S2, S2 → S3, które to przejście może być określone z następującym prawdopodobieństwem: α, β i γ. Jeśli przyjmie się następujące założenia dla tego przypadku, iż prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy kolejnymi stanami i w kroku (n+1) nie zależy od prawdopodobieństwa przejścia z (n-1) do n, to schemat tych przejść może być rozważany jako łańcuch Markowa, który jest przedstawiony na rysunku 4. Na rysunku tym pionowo przedstawione są możliwe stany układu w danej chwili, a poziomo kolejne stany układu, w którym może on się znaleźć z upływem czasu. Przejście pomiędzy poszczególnymi stanami może być traktowane w każdym przypadku jako na przykład skutek przepięcia lub wpływu innego czynnika starzeniowego, a prawdopodobieństwo jego pojawienie się nie powinno być zależne od czasu jego zaistnienia. Taki model ma ogólne znaczenie i różne czynniki fizyczne inicjujące przejście pomiędzy stanami mogą być wprowadzane do tego modelu.



Rys. 4. Graf przejścia pomiędzy stanami w wyniku zdarzeń losowych

Przyjęty łańcuch Markowa może być brany pod uwagę, przy wyznaczaniu prawdopodobieństwa przyszłego rozwoju procesu starzeniowego w kolejnych skokach zmian stanu. Prawdopodobieństwa tych zmian w kolejnym n-tym kroku wyrażają podane niżej wzory.

Utrzymanie się układu w stanie S1:

(6) $$p_{11}^{(n)} = \left(1 - \alpha - \beta\right)^{n}$$

Odpowiednio dla przejść pomiędzy kolejnymi stanami:

S1 → S2

(7) $$p_{12}^{(n)} = \frac{\alpha}{\gamma - \alpha - \beta}\left[\left(1 - \alpha - \beta\right)^{n} - \left(1 - \gamma\right)^{n}\right]$$

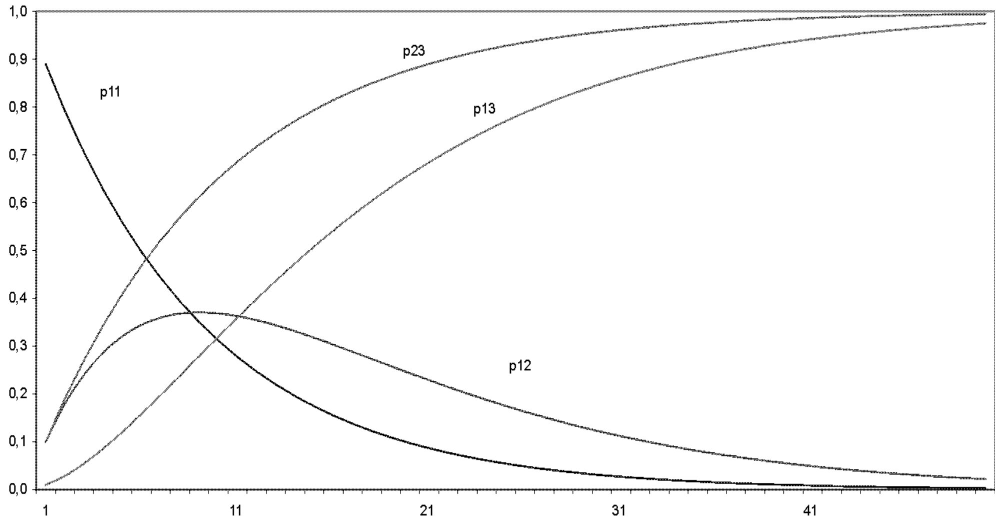
S1 → S3

(8) $$p_{13}^{(n)} = 1 - p_{11}^{(n)} - p_{12}^{(n)}$$

S2 → S3

(9) $$p_{23}^{(n)} = 1 - (1 - \gamma)^n$$

Jako przykład wykorzystania powyższych wzorów może służyć wykres przedstawiający prawdopodobieństwo uszkodzenia układu w zależności od liczby kolejnych kroków przejścia. Dla przedstawionego wykresu przyjęto następujące dane obliczeniowe: α=0,01, β=0,1, λ=0,1.



Rys. 5. Wykres prawdopodobieństwa przejścia pomiędzy stanami w zależności od ilości kolejnych kroków

Podsumowanie

Proces eksploatacyjny systemu izolacyjnego może być przedstawiony jako model matematyczny ze zmiennymi losowymi uwzględniającymi starzenie. Łańcuch Markowa lub procesy Markowa mogą być wykorzystane do tego celu, jeśli doświadczenie lub dane doświadczalne pozwalają na określenie prawdopodobieństwa stanu przejścia.

Opisany model można również zastosować do praktycznego wyznaczania optymalnego czasu kontroli. Jako optymalny, należy rozumieć czas krótszy niż przewidywany czas do uszkodzenia lub przejścia pomiędzy kolejnymi stanami eksploatacyjnymi układu.

Praca dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach umowy nr: 18.18.120.398

LITERATURA

[1] Anders G.J., Endrenyi J., Stone G.C., Ford G.L: A Probabilistic Model for Evaluation of Remaining Life of Electrical Insulation in Rotating Machines, *IEEE Trans. on EC*, (1990), Vol.5, No. 4, pp. 761 – 767

[2] Derman C.: Finite state markowian decision processes. Academic Press. New York and London (1970)

[3] Filipowicz B.: Modelowanie i optymalizacja systemów kolejkowych - cz. I Systemy markowskie. Przedsiębiorstwo Poligraficzne Tadeusz Rudkowski, Kraków (1995)

[4] Davis M.H.A.: Markov Models and Optimization, Chapman & Hall (1993)

Autorzy: *prof. dr hab. inż. Romuald Włodek, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: gewlodek@cyf-kr.edu.pl; mgr inż. Szczepan Moskwa, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: szczepan@agh.edu.pl*