ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z. 52 Nr kol. 488

Jan POPCZYK

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

O PEWNYCH MOŻLIWOŚCIACH UWZGLĘDNIENIA NIEOKREŚLONOŚCI W OPTYMALIZACJI OBSŁUGI RUCHOWEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. Zaproponowano kombinację kryterium decyzyjnego dla warunków określoności statystyczno-probabilistycznej oraz wybranego kryterium dla warunków nieokreśloności jako podstawę wyboru wariantu organizacyjnego obsługi ruchowej sieci napowietrznej średniego napięcia na etapie planowania dobowego.

W artykule ograniczono się do zagadnień optymalizacji obsługi ruchowej w sieciach napowietrznych średnich napięć. Okazuje się, że w sieciach tych obsługa ruchowa w stanach awaryjnych jest jednym z głównych czynników stanowiących o wielkości energii niedostarczonej odbiorcom. Im systemy obsługowe są mniej obciążone i technicznie lepiej wyposażone, tym energia niedostarczona jest mniejsza. Naturalnie rosną wtedy nakłady na ich organizację oraz koszty związane z ich utrzymaniem. W związku z tym pojawia się problem optymalizacji systemów obsługowych. Optymalizację należy przeprowadzać ze względu na ogólny koszt. Jako zasadnicze składowe tego kosztu należy uwzględnić:

- składową wynikającą z kosztu wyposażenia i ewentualnej reorganizacji systemu,
- koszt utrzymania systemu,
- koszt niedostarczonej energii.

Główne trudności optymalizacji wynikają stąd, że uzyskanie uniwersalnych charakterystyk statystycznych procesu odnowy w sieci, a w szczególności strumieni uszkodzeń, jest niemożliwe, zależą one bowiem od lokalnych warunków i w związku z tym zmieniają się znacznie w różnych sieciach. Dlatego bardzo ważne znaczenie posiada:

- określenie możliwości identyfikacji statystyczno-probabilistycznej procesu odnowy w konkretnej sieci,
- kryterium decyzyjne w warunkach określoności statystyczno-probabilistycznej procesu odnowy,
- kryterium decyzyjne w warunkach nieokreśloności.

W szczególności różnica optymalnych systemów obsługowych w warunkach zidentyfikowanego procesu odnowy i w warunkach nieokreśloności daje możliwość określenia racjonalnego poziomu redukcji nieokreśloności. Jest to ważne z tego powodu, że identyfikacja, podstawą której są badania statystyczne, związana jest też z kosztami.

Możliwości nowego podejścia do optymalizacji systemów obsługowych z uwzględnieniem wymienionych powyżej problemów można dobrze przedstawić na przykładzie planowania dobowego wariantu obsługi w aspekcie likwidacji skutków uszkodzeń.

Modele intensywności uszkodzeń i prognozy pogody

Informacja w procesie prognozowania dobowego uszkodzeń może się zmieniać w zakresie od kompletnej ignoracji (całkowitej nieokreśloności) aż do pełnego opisu za pomocą apriorycznego rozkładu prawdopodobieństwa - zależy to przede wszystkim od posiadanego modelu intensywności oraz posiadanego modelu dobowych komunikatów meteorologicznych. O postaci pierwszego z tych modeli decydują dwa fakty: duża wrażliwość sieci napowietrznej na warunki pogodowe oraz specyfika procesu odnowy, powodująca, że ważny jest rodzaj uszkodzonego elementu sieciowego. Z tego powodu w pracy [2] przyjęto następujący model intensywności:

$$\Lambda = \left[\bar{\lambda}_{ij}\right] \tag{1}$$

$\bar{\lambda}_{ij}$ - intensywność przeciętna uszkodzeń elementu "i" w stanie pogodowym "j" $\left[\frac{\text{usz.}}{100\ \text{km}\ \text{h}}\right]$.

W modelu wyróżnia się takie elementy sieciowe jak słup, transformator śn/nn, odłącznik, przewód itd. oraz takie stany pogodowe jak dobra pogoda mgła, burza, sadź itd. Badania statystyczne, w oparciu o które zaproponowano powyższą postać modelu, wykazały, że w niektórych stanach pogodowych intensywność uszkodzeń poszczególnych elementów osobno, a także wszystkich elementów traktowanych łącznie, może być kilkaset razy większa od intensywności przeciętnej. Zatem model (1) daje możliwość dużego polepszenia informacji w prognozowaniu dobowym uszkodzeń pod warunkiem, że zostanie uzupełniony odpowiednim komunikatem meteorologicznym. Jako model komunikatu zaproponowano w pracy [3] macierz prawdopodobieństw bezwzględnych:

$$P_p = \left[p_{zj}\right], \quad z = \text{I, II, III}, \quad j = 1,2,\ldots, \tag{2}$$

gdzie: z = I, II, III oznacza kolejne zmiany robocze w ciągu doby.

Założono przy tym, że macierz ta jest dana z kilkunastogodzinnym wyprzedzeniem.

Model komunikatu meteorologicznego o postaci (2), mimo bardzo prostej budowy, stanowi w chwili obecnej jądro zagadnienia niepełności informacji Jeśli przyjąć, że prawdopodobieństwa p_{zj} są równe 0 lub 1, to przetworzenie ogólnie dostępnego komunikatu meteorologicznego na komunikat (2) jest stosunkowo proste. Jeśli natomiast prawdopodobieństwa p_{zj} mogą przyjmować wszystkie wartości w zakresie od 0 do 1, to przetworzenie takie wymaga wcześniejszych obszernych badań statystycznych. W pierwszym przypadku wiarogodność przetworzonego komunikatu będzie niewielka, czyli nieokreśloność będzie duża. W drugim przypadku nieokreśloność będzie tym mniejsza, im dokładniejsze będą badania statystyczne. Pojawia się jednak wtedy pytanie: do jakiego stopnia nieokreśloność warto zmniejszać. Pewne naświetlenie powyższych problemów zostanie podane w dalszej części artykułu.

Aprioryczny rozkład prawdopodobieństwa liczby uszkodzeń

Rozważmy ogólny przypadek, kiedy prawdopodobieństwa p_{zj} mogą przyjmować wszystkie wartości w zakresie od 0 do 1. Określmy na macierzy P_p funkcję:

$$F(P_p) = \left[f_{zj}\right] \tag{3}$$

gdzie:

$$f_{zj} = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli} & p_{zj} > 0 \\ 0 - \text{jeżeli} & p_{zj} = 0 \end{cases}$$

Ponadto przyjmijmy, że dla stanu pogodowego "dobra pogoda" j = 1.

Powyższe dane i ustalenia pozwalają wyznaczyć oczekiwane liczby uszkodzeń elementu sieciowego "i" w czasie trwania zmiany "z". Niech liczby te tworzą macierz:

$$U = \left[\bar{u}_{zi}\right], \quad z = \mathrm{I, II, III}, \quad i = 1,2,\ldots, \tag{4}$$

Elementy macierzy U można w przybliżeniu liczyć ze wzoru:

$$\bar{u}_{zi} = \frac{L}{100} \sum_j \left[p_{zj}\,\bar{\lambda}_{ij} + (1 - p_{zj})\,\frac{\sum_j p_{zj}\,\bar{\lambda}_{ij}}{\sum_j p_{zj}}\right] t_{zj}, \quad z=\mathrm{I,II,III},$$

$$i = 1,2,\ldots \tag{5}$$

We wzorze (5) L jest długością sieci w [km], a t_{zj} jest czasem trwania stanu pogodowego "j" zredukowanym do warunków zmiany "z" wg relacji:

dla $\sum_{j\neq 1} f_{zj}\,\bar{t}_{sj} < 8$ jest: $t_{z1} = 8 - \sum_{j\neq 1} f_{zj}\,\bar{t}_{sj}$

$$t_{zj} = f_{zj}\,\bar{t}_{sj},\quad j = 2,3,\ldots$$

dla

$\sum_{j\neq 1} f_{zj}\,\bar{t}_{sj} > 8$ jest: $t_{z1} = 0$

$$t_{zj} = f_{zj}\,\bar{t}_{sj}\,\frac{8}{\sum_{j\neq 1} f_{zj}\,\bar{t}_{sj}},\quad j = 2,3,\ldots$$

W powyższych relacjach $\bar{t}_{sj}$ jest czasem przeciętnym trwania stanu pogodowego "j". Wyniki badań statystycznych tych czasów przytoczono w pracy [2].

Macierz (4) pozwala wyznaczyć aprioryczny rozkład prawdopodobieństwa liczby uszkodzeń, istnieją bowiem podstawy *), aby rozkład ten w obrębie każdej zmiany uważać za rozkład Poissona. Jest zatem:

$$P_k = \left[p_{zk}\right],\quad p_{zk} = \frac{\left(\sum_i \bar{u}_{zi}\right)^k \exp\left(-\sum_i \bar{u}_{zi}\right)}{k!},\quad z = I,II,III,$$

$$k = 0,1,\ldots \tag{6}$$

p_{zk} - prawdopodobieństwo wystąpienia "k" uszkodzeń w ciągu zmiany "z".

Obok rozkładu prawdopodobieństwa zapisanego w postaci (6) istotne jest określenie oczekiwanej liczby uszkodzeń $\bar{u}_{zi}(k)$ elementu "i" przy ogólnej liczbie uszkodzeń "k" w czasie trwania zmiany "z". Liczbę tę można wyznaczyć ze wzoru:

$$\bar{u}_{zi}(k) = k\,p_{zi},\quad z = I,II,III,\quad k = 0,1,\ldots,\quad i = 1,2,\ldots \tag{7}$$

p_{zi} - prawdopodobieństwo warunkowe uszkodzenia elementu "i" w czasie zmiany "z". Prawdopodobieństwa p_{zi} tworzą macierz:

---

*) zbiory elementów sieciowych poszczególnych rodzajów są bardzo duże, a intensywność przeciętna uszkodzeń w danym stanie pogodowym jest stała.

$$P_i = \left[p_{zi}\right], \quad p_{zi} = \frac{\bar{u}_{zi}}{\sum_i \bar{u}_{zi}}, \quad z=I,II,III, \quad i=1,2,...$$

Kryteria decyzyjne

Zagadnienie podejmowania decyzji odnośnie stopnia mobilizacji służb ruchowych ma najelegantsze rozwiązanie wtedy, gdy rozkład prawdopodobieństwa (6) jest dany, tzn. dany jest pełny aprioryczny opis możliwych uszkodzeń w sieci. Należy wówczas obliczyć oczekiwany koszt likwidacji skutków uszkodzeń dla interesujących, z praktycznego punktu widzenia, wariantów organizacji (stopni mobilizacji)[x] służb ruchowych i wybrać ten wariant, który ma koszt oczekiwany najmniejszy. W sposób sformalizowany warunek ten można zapisać w postaci:

$$\bar{K}_d\left[P_k,\ kP_i;\ W_d\right] = \min_{W_d}, \tag{8}$$

$\bar{K}_d$ - dobowy oczekiwany koszt likwidacji skutków uszkodzeń,

W_d - wariant dobowej organizacji służb ruchowych.

Składowymi kosztu $\bar{K}_d$ są: koszt niedostarczonej energii, koszt płac, koszt transportu i koszt niezrealizowanych zadań planowych.

Załóżmy teraz, że przeprowadzono badania statystyczne w ramach których obserwowano, czy komunikaty meteorologiczne o postaci (2) sprawdzają się, czy nie. Stwierdzono, że frakcja komunikatów, które sprawdzają się, wynosi(1 - a)(nie wchodzimy narazie w zagadnienie, co praktycznie należy rozumieć przez określenie, że komunikat (2) sprawdził się). Poza tym nie ma żadnych podstaw, aby przewidywać cokolwiek o pogodzie, która wystąpi.

W związku z powyższymi badaniami przyjmujemy, że komunikat meteorologiczny (2) redukuje nieokreśloność do poziomu a. Powstaje zatem nowa jakościowo sytuacja, w której o decyzjach stanowią: nieokreśloność z wagą a i rozkłady prawdopodobieństwa (6) oraz (7) z wagą (1-a). Punktem wyjściowym w tej nowej sytuacji jest kryterium podejmowania decyzji w warunkach zupełnej nieokreśloności. W tym miejscu staje się jednak konieczne bliższe wyjaśnienie, jak należy dalej rozumieć nieokreśloność, oczywiście chodzi o rozumienie nie w ujęciu aksjomatycznym a praktycznym, i to w dodatku w konkretnym, rozważanym aspekcie.

Zacznijmy od dwóch uwag. Po pierwsze rozsądnie jest przyjąć, że stanami przyrody są liczby uszkodzeń, czyli, że stany te tworzą zbiór dyskretny. Po drugie zbiór ten jest ograniczony; jest to istotna różnica w sto-

---

[x]) dalej określenia te są używane zamiennie.

sunku do zbioru stanów, na których został określony rozkład prawdopodobieństwa (6). W przypadku rozkładu (6) nie ma merytorycznej potrzeby ograniczania zbioru stanów, mimo że na etapie obliczeń numerycznych ograniczenie jest naturalne.

Właśnie to ograniczenie numeryczne przy podejmowaniu decyzji wg kryterium (8) może stanowić jedną z podstaw ograniczania zbioru stanów przyrody w zagadnieniu podejmowania decyzji w warunkach nieokreśloności. Inną podstawą są możliwości przeprowadzenia mobilizacji służb ruchowych w jednostce organizacyjnej energetyki, w której wykonuje się planowanie dobowe.

Niech liczba możliwych stanów przyrody w ciągu zmiany "z" wynosi k_z (czyli liczba możliwych uszkodzeń wynosi $k=0,1,\dots,k_z-1$). O nieokreśloności będziemy mówili wówczas, gdy brak jest jakichkolwiek przesłanek, który z k_z stanów wystąpi.

Załóżmy tak jak w kryterium (8), że W_d oznacza wariant dobowej organizacji służb ruchowych i ponumerujmy te warianty od 1 do $W(W_d=1,2,\dots W)$. Liczby W i k_z stanowią wymiary macierzy strat:

$$S = \left[s_{W_d k}\right], \quad W_d = 1,2,\dots,W, \; k = 0,1,\dots,k_z, \; z = I, II, III \tag{9}$$

Konsekwencje przyjęcia wariantu "W_d" przeciwko stanowi "k" proponuje się teraz oceniać w kategoriach strat, które należy rozumieć inaczej niż koszt w kryterium (8). Mianowicie, niech "$W_{d\ opt}$" jest optymalnym wariantem przeciwko stanowi "k" w warunkach pewności (wiadomo na pewno, że wystąpi stan "k"). Wtedy odpowiednia strata jest równa różnicy kosztów:

$$s_{W_d k} = K_d\left[W_d, k\right] - K_d\left[W_{d\ opt}, k\right], \quad s_{W_d k} > 0 \tag{10}$$

Koszt K_d występujący w (10) należy obliczać tak jak we wzorze (8).

Zastąpienie kosztu stratami jest warunkiem możliwości konsekwentnego sformułowania zadania wyboru wariantu dobowej organizacji służb ruchowych w warunkach nieokreśloności w terminach teorii gier. Koszt nie nadaje się do tego celu dlatego, bo ze względu na koszt najniekorzystniejszy stan przyrody dominuje wszystkie pozostałe stany. Rowziązanie zadania z tego względu jest nie do przyjęcia z praktycznego i banalne z teoretycznego punktu widzenia.

Ponieważ strata (10) jest dodatnia, zatem rozwiązanie problemu decyzyjnego polega na znalezieniu minimalnej wartości gry w zbiorze strategii mieszanych (zrandomizowanych) przy strategiach czystych określonych przez macierz (9). Można wykorzystać do tego celu metody programowania liniowego [4].

Oznaczmy strategię mieszaną decydenta przez $B\ (b_1, b_2, \dots, b_W)$, a przyrody przez $C(c_1, c_2, \dots, c_{k_z})$, gdzie $b_1, b_2, \dots b_W$ są to aprioryczne częstości stosowania odpowiednich wariantów dobowych organizacji służb ruchowych, a $c_1, c_2, \dots c_{k_z}$ są to prawdopodobieństwa poszczególnych stanów przyrody. Częstości $b_1, b_2, \ldots, b_W$ należy dobrać w ten sposób, aby zminimalizować stratę s, stanowiącą wartość gry, przy strategii przyrody maksymalizującej tę stratę.

W teorii gier [1] dowodzi się, że sformułowane powyżej zadanie posiada rozwiązanie (możliwość stosowania strategii mieszanych sprawia, że gra zawsze posiada punkt równowagi). Dla znalezienia tego rozwiązania należy zauważyć, że optymalna strategia decydenta powinna dla dowolnej strategii przyrody zapewniać stratę nie mniejszą od s oraz stratę równą s, dla optymalnej strategii przyrody. W zapisie formalnym wygląda to następująco:

$$\sum_{W_d=1}^{W} b_{W_d} s_{W_d k} < s, \quad k=0,1,\ldots,k_z, \quad z=I,II,III \tag{11a}$$

Przekształcając (11) otrzymuje się natychmiast

$$\sum_{W_d=1}^{W} \varkappa_{W_d} s_{W_d k} \leqslant 1, \quad \varkappa_{W_d} = \frac{1}{s} b_{W_d}, \quad k=0,1,\ldots,k_z,$$

$$z = I,II,III \tag{11b}$$

Z warunku $\sum_{W_d=1}^{W} b_{W_d} = 1$ wynika, że $\sum_{W_d=1}^{W} \varkappa_{W_d} = \frac{1}{s}$. Ponieważ stratę s należy minimalizować, zatem funkcję liniową L problemu (11b) należy maksymalizować:

$$L = \sum_{W_d=1}^{W} \varkappa_{W_d} = \max \tag{12}$$

Relacje (11b) i (12) opisują typowe zadanie programowania liniowego. Można to zadanie rozwiązać metodą simpleks uzyskując optymalną strategię w zbiorze strategii B. Stosując podobny schemat postępowania (trzeba oczywiście minimalizację straty s zastąpić maksymalizacją) otrzymuje się optymalną strategię w zbiorze strategii C.

Znajomość optymalnej strategii B jest podstawą podjęcia decyzji. Należy w tym celu dokonać losowania wg rozkładu wartości częstości określającego strategię optymalną i wybrać za każdym razem do realizacji ten wariant organizacyjny, na który wskaże wynik losowania. Losowanie można przeprowadzić korzystając z rozkładu równomiernego prawdopodobieństwa w przedziale $\langle 0,1 \rangle$ [5].

W literaturze [1] warunek (8) oparty na pełnym apriorycznym rozkładzie prawdopodobieństwa stanów przyrody i koszcie (w konkretnym przypadku)przyjęto nazywać kryterium minimalnego ryzyka. Kryterium oparte natomiast na macierzy strat (9) i rozwiązaniu problemu liniowego (11) oraz (12) przyjęto nazywać kryterium minimaksowej straty.

Jeśli w praktycznym działaniu godzimy się uznać aprioryczny rozkład prawdopodobieństwa stanów przyrody w stopniu (1-a), a resztę przyjąć za nieokreśloność, to w celu podjęcia decyzji trzeba zredukować częstości b_{W_d} stosując współczynnik redukcyjny równy a i następnie obliczyć częstości b'_{W_d} określające strategię optymalną w sposób następujący:

$$b'_{W_d} = \begin{cases} \left[a\, b_{W_d} + 1(1-a)\right] & - \text{ dla } W_d = W'_d \\ a\, b_{W_d} & - \text{ dla } W_d \neq W'_d \end{cases} \tag{13}$$

gdzie: W'_d jest wariantem spełniającym warunek (8).

Nie wdając się w krytykę oceny konsekwencji przyjęcia wariantu "W_d" przeciwko stanowi "k" w warunkach nieokreśloności za pomocą strat można wskazać na inną możliwość, mianowicie oceny w kategoriach ryzyka, gdzie ryzyko definiuje się w sposób następujący:

$$r_{W_d}k = s_k - s_{W_d}k, \quad s_k = \max_{W_d} s_{W_d}k,$$

$$W_d = 1,2,\ldots,W, \; k=0,1,\ldots,k_z, \; z=\mathrm{I},\ \mathrm{II},\ \mathrm{III} \tag{14}$$

Kryterium oparte na macierzy ryzyka nazywa się kryterium minimaksowego ryzyka. Strategie optymalne według tego kryterium wyznacza się w identyczny sposób jak dla minimaksowej straty.

Zakończenie

Artykuł jest próbą wskazania nowych możliwości w rozwiązywaniu problemów decyzyjnych na etapie planowania dobowego procesu obsługi ruchowej sieci napowietrznych średnich napięć. Podkreślić trzeba, że przedstawiony model decyzyjny jest początkiem drogi i nie rozwiązuje zadowalająco żadnego praktycznego zagadnienia, za to budzi wiele wątpliwości. Przede wszystkim trudno się pogodzić z tym, że przyroda zastosuje optymalną strategię po to, aby odebrać decydentowi wszelkie szanse na obniżenie strat poniżej jego poziomu bezpieczeństwa. Nawet uwaga o złośliwości rzeczy martwych wydaje się tu niewielkim pocieszeniem. Z drugiej jednak strony dla decydenta chcącego zabezpieczyć się przed dużymi stratami jest do przyjęcia założenie, że przyroda jest jego rozumnym przeciwnikiem, mimo że w to nie wierzy. Co z takiego założenia wynika, łatwo widać po rozwiązaniu zadania programowania liniowego i określeniu optymalnej strategii przyrody. Można wtedy porównać tę strategię z apriorycznym rozkładem prawdopodobieństwa stanów przyrody. Różnica między strategią i rozkładem może stanowić obiektywną podstawę do ustalenia pożądanego poziomu redukcji nieokreśloności. Jest to chyba zasadnicza korzyść, jaką może dać analiza wg omówionego modelu decyzyjnego już w chwili obecnej.

LITERATURA

[1] Luce R.D., Raiffa H.: Gry i decyzje. PWN, Warszawa 1964 r.

[2] Popczyk J., Wosik J., Ciura Sz.: Optymalizacja organizacji i wyposażenia służb eksploatacyjno-ruchowych utrzymujących urządzenia sieciowe w gotowości ruchowej w nawiązaniu do automatycznego prowadzenia ruchu sieci. Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej. Gliwice 1975 r. (praca nie publikowana).

[3] Popczyk J., Szymik F.: Niektóre zagadnienia obsługi ruchowej w napowietrznych sieciach rozdzielczych. Prace IEiSU Politechniki Śląskiej, z. 2 Gliwice 1976 r.

[4] Wentcel J.S.: Isliedowanije opieracij. Sowietskoje Radio, Moskwa 1972

[5] Zieliński R.: Generatory liczb losowych. WNT, Warszawa 1972 r.

Przyjęto do druku w czerwcu 1976 r.

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Р е з ю м е

В статье предлагается, как основу выбора варианта оперативного обслуживания воздушных сетей среднего напряжения в суточном планировании принимать комбинацию принципа, разработанного для условий статистически-вероятной определенности и одного из принципов, разработанных для условий неопределенности.

CERTAIN POSSIBILITIES OF CONSIDERING INDEFINITENESS IN BRINGING TO PERFECTION MAINTENANCE SERVICE IN ELECTRIC LINES

S u m m a r y

The paper presents the combination of a decision criterion for the conditions of statistic-probability definiteness with a chosen criterion for

the conditions of indefiniteness. The discussed combination constitutes the basis for chosing the organization form suitable for daily planning of maintenance servicing of the over-head medium voltage power line.