

BOGUSŁAW SZEWC, KURT ZMUDA

Katedra Elektroenergetyki

ZALEŻNOŚĆ STRAT ULOTU W LINIACH BARDZO  
WYSOKIEGO NAPIĘCIA OD WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH

Streszczenie. Na podstawie literatury światowej podano aktualne poglądy na związek strat mocy i energii ulotu linii BWN z warunkami hydrometeorologicznymi i przedstawiono przegląd osiągnięć w zakresie znalezienia metody liczbowego określenia tych strat.

Aktualnie prowadzone badania strat ulotu mają dwa zasadnicze cele:

- 1) znalezienie możliwie prostej metody określania strat ulotu;
- 2) ustalenie techniczno-ekonomicznych kryteriów wyboru parametrów linii bardzo wysokiego napięcia.

Realizacja celu drugiego, głównego jest uwarunkowana realizacją pierwszego. Właściwej metody poszukuje się na drodze teoretycznej i praktycznej. Złożoność jednak zjawiska, niejednoznaczność w definiowaniu pojęć podstawowych i czynników towarzyszących sprawia, że znacznie pręcej można się spodziewać rozwiązań otrzymanych na drodze praktycznej, doświadczalnej - ale z całym bagażem mankamentów jakie niosą z sobą metody o niepełnej podbudowie teoretycznej. Metody, które w dalszym ciągu zostaną omówione, można nazwać próbami metodyki, aczkolwiek w braku innych są one często zatwierdzane jako obowiązujące w niektórych krajach.

Zasadniczym problemem dla praktyków jest ilościowe i jakościowe uwzględnienie wpływu czynników meteorologicznych na straty ulotu. Jedynym punktem zgodnym u prawie wszystkich autorów jest zasada, że roczne straty energii obliczać należy jako sumę strat cząstkowych według stanów pogody:

$$\Delta A_r = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta P_i \cdot V_i \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta P_i$  - straty dla danego stanu pogody,

$V_i$  - czas występowania (prawdopodobieństwo) tego stanu.

Niezgodności zaczynają się wtedy, gdy chodzi o ilość i rodzaj czynników pogodowych, jakie należy uwzględnić, a także w określeniu strat  $\Delta P_i$ . Nie wdając się w szczegóły co do ścisłych definicji konkretnego stanu pogody, spotkać można m.in. następujące podziały:

1. Knudsen [1] - 1) dobra pogoda, 2) mgła, 3) deszcz, 4) śnieg, 5) sadź;
2. Anderson [2] - 1) dobra pogoda, 2) zła pogoda;
3. Jemieljanow [3] - 1) dobra pogoda, 2) deszcz, 3) śnieg, 4) sadź;
4. Burgsdorf [4] - 1) dobra pogoda, 2) deszcz, 3) suchy śnieg, 4) sadź;
5. Popkow [5] - 1) dobra pogoda, 2) podwyższenie wilgotności, 3) mgła, 4) deszcz, 5) mokry śnieg, 6) suchy śnieg, 7) sadź, szron i lód;
6. Keitley [6] - 1) dobra pogoda, 2) wilgoć, 3) deszcz, 4) śnieg;
7. Kohoutova [7] - 1) dobra pogoda, 2) mgła, 3) deszcz, 4) śnieg, 5) sadź;
8. Rukowodjaszczije ukazania [8] - 1) dobra pogoda, 2) deszcz i mokry śnieg, 3) suchy śnieg, 4) sadź i lód

Te podziały można mnożyć, gdyż wyniki uzyskane przez poszczególnych autorów nie wykazują zgodności odnośnie wpływu poszczególnych czynników na wielkość strat ulotu. Przy tym nie ma jednoznaczności w określaniu poszczególnych stanów pogody.

Ogólnie biorąc, wpływ czynników meteorologicznych na straty ulotu można scharakteryzować - z zastrzeżeniem pewnej pobieżności - następująco:

## D o b r a   p o g o d a

Za dobrą pogodę uważa się na ogół stan, kiedy nie ma żadnego opadu. Niektórzy jednak badacze zastrzegają też brak mgły, wilgotność poniżej 90% itp. Ogólnie uważa się, że straty przy dobrej pogodzie są niewielkie, ale nie pomijalne z uwagi na czas występowania (60-90% w ciągu roku). Uznaje się ich zależność od względnej gęstości powietrza. Często napotyka się stwierdzenie, że obliczanie strat przy dobrej pogodzie nie stanowi problemu. Przeprowadzone jednak obliczenia wg zależności podanych przez Langhrera, Burgsdorfa i Jemieljanowa nie wykazują zbieżności, poza wspólną tendencją traktowania strat w formie:

$$\Delta P = \alpha \exp[\beta E + \gamma] \quad (2)$$

Jemieljanow dodatkowo wprowadza postać wzoru:

$$\Delta P = \alpha E \cdot \exp[\beta E + \gamma]^2 \quad (3)$$

gdzie:

$\Delta P$  - jednostkowe straty ulotu,

$E$  - natężenie pola elektrycznego na przewodzie,

$\alpha, \beta, \gamma$  - współczynniki liczbowe, różne wg różnych źródeł.

## W i l g o t n o ś ć

Do niedawna nie stwierdzono widocznego wpływu wilgotności względnej powietrza na straty ulotu poza stanem krytycznej kondensacji wilgoci na przewodzie. Dotąd większość badaczy jest zdania, że wilgotność jest sprawą pomijalną, gdyż jej ewentualny wpływ na wzrost strat niweluje nagrzewanie przewodów prądem roboczym. Jednak właśnie Lewitow i Popkow [5], którzy badali linie rzeczywiste, nie doświadczalne, a zatem linie stale obciążone - zalecają wydzielenie z dobrej pogody okresu o podwyższonej wilgotności, gdy straty są wielokrotnie wyższe niż przy dobrej pogodzie. Wyjątkiem jest tu Bartenstein [9] uważający za rzecz oczywistą bezpośredni związek wilgotności i strat.

### M g ła

Zagadnienie mgły jest traktowane podobnie jak w przypadku wilgotności - większość źródeł pomija wpływ mgły, niektóre jednak podkreślają duże jej znaczenie. Żaden jednak autor nie podaje bliższych określeń omawianej mgły - jej gęstości, wysokości, obszaru itp.

### D e s z c z

Niewątpliwy jest bardzo poważny wpływ deszcz na straty ulotu. Okres deszczu i tuż po nim (wysychanie przewodów) cechuje wzmożony ulot. Zależny jest on od intensywności deszczu, jednak nie celowe jest całkowanie strat podług wszystkich intensywności chwilowych, a tylko podług pośrednich za pewien przeciąg czasu. Bardzo daleko idące wnioski wyciąga stąd Burgsdorf [4] zalecający korzystanie z intensywności średniorocznej, niewiele się różniącej na wielkich obszarach.

### Ś n i e g

Śnieg uważa się za czynnik powiększający straty ulotu. Większość źródeł wyróżnia śnieg suchy i mokry, nie wyróżniają tego jednak roczniki meteorologiczne (przynajmniej w Polsce). Duża część autorów skłania się do zamieniania śniegu na równoważną ilość opadu deszczu, przy czym mówi się tu dodatkowo o stosowaniu współczynników proporcjonalności przy przeliczaniu śniegu na deszcz.

### S a d ź

Tworzenie się powłoki lodowej na przewodzie powoduje bardzo poważny wzrost strat. Już pierwsze krystalizujące się grudki sadzi powodują zniekształcenie pola w pobliżu powierzchni przewodu oraz silny ulot miejscowy. Sadź może przekształcać się w pełną powłokę lodową, co łagodzi wzrost strat, ale za to przedłuża okres ich występowania. Okres opadania sadzi charakteryzuje się również silnymi stratami (lokalny wzrost natężenia po-

la elektrycznego), przy czym może on trwać przez wiele godzin w różnych miejscach linii. Na skutek złożonego charakteru sady niektórzy wyróżniają szron, sadź i lód, przy czym nie ma jasności co do definicji tych zjawisk; czasem włącza się szron do okresu dobrej pogody.

W ostatnich latach daje się zauważyć tendencja do upraszczania zależności rocznych strat ulotu przez zamianę różnych stanów pogodowych.

Biorąc pod uwagę wielki rozrzut danych pomiarowych, Tichodiejew i Jegorowa [10] zaproponowali całkowicie uśredniony wzór na obliczanie strat średniorocznych, ważny dla środkowego pasa europejskiej części ZSRR i Syberii:

$$\Delta P = 2,4 \cdot 10^{-6} U_{kr}^2 \exp \left[ 8,7 \left( \frac{U_m}{U_{kr}} - 0,53 \right) \right] \quad (4)$$

gdzie:

$U_{kr}$  - napięcie krytyczne,

$U_m$  - napięcie maksymalne

Badacze amerykańscy - Anderson, Baretzky i MacCarthy [2] po 2 1/2-letnich badaniach na doskonale wyposażonej stacji doświadczalnej zaproponowali stosowanie następującego wzoru:

$$\Delta P = \Delta P_{dp} + \left[ \frac{U}{\sqrt{3}} J r^2 \ln(1 + 10R) \right] \sum_1^n E^m \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta P_{dp}$  - straty przy dobrej pogodzie,

$U$  - napięcie znamionowe,

$J$  - współczynnik,

$r$  - promień zastępczy przewodu,

$R$  - intensywność opadu,

$n$  - liczba przewodów,

$m$  - współczynnik.

Interesujący jest fakt, że przez określenie współczynnika  $J$  dla wyników badań innych uczonych autorzy tego wzoru udowodnili, że proponowana przez nich zależność rzeczywiście zachodzi.

Kolejnym uczonym, który ujął wyniki badań w zależność końcową jest Jemieljanow [3], podający następującą postać wzoru:

$$\Delta P = \delta^2 n r_0^2 E a \exp \left[ -b \left( \frac{E}{E_0} - c \right)^2 \right] \quad (6)$$

gdzie:

- $\delta$  - względna gęstość powietrza,
- $E_0$  - początkowe natężenie pola elektrycznego,
- $a, b, c$  - współczynniki pogodowe,
- $E$  - średnie równoważne natężenie pola elektrycznego.

Kłopotliwe jest wyliczenie natężenia  $E$  wysnutego z rozważań teoretycznych - z drugiej strony jednak stanowi to naukowe uzasadnienie wzoru.

Większość autorów unika stosowania bezpośrednich wzorów do obliczeń strat średniorocznych, a nawet dla pewnego stanu pogody, proponując korzystanie z uśrednionych zależności graficznych. W opracowaniach radzieckich i czeskich przyjmuje się na ogół wykresy w układzie współrzędnych:

$$\frac{P}{n^2 r_0^2} = f\left(\frac{E}{E_0}\right)$$

przy czym Jemieljanow wprowadza tu specyficznie rozumiane pojęcie  $E$ , jak to uprzednio wspomniano. Takie charakterystyki wykonuje się jako uśrednione dla różnych typów przewodów i ich układów. W układzie współrzędnych półlogarytmicznym są one zbliżone do prostych i mogą być aproksymowane jako funkcje wykładnicze przy podstawie  $e$ .

Jemieljanow wskazuje na celowość korekty przez podnoszenie członu wykładniczego do kwadratu (patrz wzór (3)); na celowość tej korekty wskazują także wyniki badań uzyskane w Rheinau [9]. Warto nadmienić, że Anderson i in. [2] uważają wyniki z Rheinau za potwierdzające wzór (5).

Langhrer [12] przedstawia wyniki pomiarów przy dobrej pogodzie jako prostą w układzie półlogarytmicznym przy współrzędnych:

$$\frac{P}{n r_0^2} = f(E)$$

Uzyskuje stąd zależność:

$$\Delta P_{dp} = n r_0^2 \exp [0,3E - 6,2] \quad (7)$$

Podobną też zależność (wykreślną) uzyskali Cahen i Pelissier [11] z badań w Chevilly.

Ciekawą metodę proponują Popkow i Lewitow [5]. Zarzucają oni charakterystyki w zalecanym przez [8] układzie współrzędnych, wprowadzając własny:

$$\frac{P}{b_p U_0} = f\left(\frac{U}{U_0}\right)$$

oddzielnie dla każdego stanu pogody, przy czym wyraźnie podkreślają znaczenie intensywności opadu. Są przy tym zdania, że krzywa strat  $P^* = f\left(\frac{U}{U_0}\right)$  dla śniegu i deszczu o równoważnej intensywności nie są identyczne. Ciekawą próbą tej metody jest wprowadzenie intensywności zastępczych, i tak:

podwyższona wilgotność odpowiada 0,1 mm/h deszczu

mgła odpowiada 0,2 mm/h deszczu

sadź, śnieg, szron odpowiada 1,5 mm/h deszczu

Wprowadzenia tych wielkości autorzy [5] nie uzasadniają.

Powyższy przegląd spotykanych w świecie metod określania strat ulotu, a także rozmach badań i nakłady na nie w krajach wysoko rozwiniętych wskazuje, jakie wielkie znaczenie przywiązuje się w świecie do rozwiązania powyższego problemu. W kraju zrezygnowano z tych badań przyjmując, że w możliwej do określenia przyszłości nie przewiduje się budowy linii o napięciu wyższym niż 400 kV, zaś do granicy 400 kV problem strat ulotu nie jest specjalnie dotkliwy.

Obliczenia wykonane w Katedrze Elektroenergetyki wykazują, że średnioroczne mocy ulotu w krajowej linii 400 kV kształtują się poniżej 10% strat podłużnych, zaś koszt energii traczonej rocznie na ulot zawiera się w granicach 10+12 mln złotych.

## LITERATURA

- [1] Knudsen N.: Corona loss and radio interference measurements at high voltage AC. on test lines in Sweden. CIGRE 1964, ref. 411.
- [2] Anderson J.G. i in.: Corona-loss characteristics of EHV transmission lines based on Project EHV research. IEEE trans. on Power App. and Syst. 1966, nr 12.
- [3] Емельянов Н.П.: Потери мощности при короне на линиях с расщеплённой фазой 330 кв и выше. "Электрические станции" 1967 № 9.
- [4] Burgsdorf V.V. i in.: Etudes de l'effet de couronne sur lignes aériennes a très haute tension. CIGRE 1960, ref. 413.
- [5] Левитов В.И., Попков В.И.: Методика расчётной оценки уровня потерь мощности и энергии на корону на проводах ЛЭП сверхвысокого напряжения. Изв. АН СССР 1968 № 1.
- [6] Keitley R. i in.: Mesure des pertes de couronne et des perturbations radio - électriques sous 400 et 750 kV sur la ligne expérimentale de Leatherhead. CIGRE 1966 ref. 419 i 419 bis.
- [7] Kohoutova D.: Měření ztrát korunou a stanovení jejich ročního průměru na vedení vvn. "Elektrotechnický obzor" 1963 nr 6.
- [8] Руководящие указания по определению среднегодовых потерь мощности на корону для линий электропередачи 330-750 кв. "Госэнергоиздат" 1961.
- [9] Bartenstein R. i in.: Mesures effectuées en vue de l'effet de couronne sur un faisceau de quatre conducteurs pour lignes triphasées a 700 kV. CIGRE 1966, ref. 426.
- [10] Александров Г.Н.: Коронный разряд на линиях электропередачи. Изд. "Энергия" 1964.
- [11] Cahen F., Pelissier R.: Resultats obtenus a la station d'essais a 500 kV de Chevilly, pendant les années 1950 et 1951 CIGRE 1952, ref. 406.
- [12] Langhrer H.: Koronastrahlung von Freileitungen und ihre Folgen AEG Mitteilungen, 1966 nr 5.

**ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ НА КОРОНУ В ЛИНИЯХ СВЕРХВЫСОКОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ГИДРО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ****Р е з ю м е**

На основании мировой литературы представлены современные взгляды на связь потерь мощности и энергии на корону на линиях сверхвысокого напряжения с гидро-метеорологическими условиями и пересмотр успехов касающихся метода количественного определения этих потерь.

**THE DEPENDENCE OF CORONA-LOSSES OF EHV-TRANSMISSION-LINES  
ON THE METEOROLOGICAL CONDITIONS****S u m m a r y**

On the base of the world literature there are given the present opinions on the connections between the corona-losses on EHV-transmission-lines and hydro-meteorological conditions, and there is given the review of results on finding out a method of numerical determining those losses.