

Wpływ warunków atmosferycznych na obciążalność prądową elektroenergetycznych linii napowietrznych

Obciążalność prądowa napowietrznych linii elektroenergetycznych zależy od aktualnie panujących na danym terenie warunków atmosferycznych (temperatura otoczenia, prędkość i kierunek wiatru oraz nasłonecznienie), a także środowiskowych (czystość atmosfery, albedo) [1]. Warunki te mogą zmieniać się w szerokim zakresie zarówno w czasie, jak i przestrzeni.


WALDEMAR SZPYRA **WIESŁAW NOWAK** **RAFAŁ TARKO** **ANDRZEJ KACZMARCZYK**
 Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

W praktyce do określenia obciążalności prądowej linii stosowane są różne podejścia. Najczęściej wykorzystuje się deterministyczną obciążalność statyczną (np. letnią oraz zimową), która wyznaczana jest dla ściśle ustalonych warunków pogodowych. Takie podejście może powodować jednak ograniczenie wykorzystania zdolności przesyłowych linii elektroenergetycznych, szczególnie projektowanych na dopuszczalną temperaturę przewodów +40°C. Problemy te stają się szczególnie istotne ze względu na wzrost obciążenia sieci elektroenergetycznych latem.

Z tych względów dąży się do określania dynamicznej obciążalności przewodów linii elektroenergetycznych, w której wyznacza się zarówno obciążalność bieżącą (w danej chwili) na podstawie aktualnie panujących warunków atmosferycznych, jak i prognozowaną na podstawie przewidywanych warunków pogodowych. **Opracowanie takiego systemu jest przedmiotem projektu badawczego pt.: „Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych”, który jest dofinansowany ze środków**

Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w ramach konkursu GEKON [2]. Jednym z istotnych elementów opracowywanego systemu do dynamicznego zarządzania przesyłem w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych (SDZP) jest model obciążalności prądowej przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych w zmiennych warunkach atmosferycznych i środowiskowych. Przedstawione w artykule wyniki obliczeń uzyskano przy wykorzystaniu tego właśnie modelu.

Model obciążalności prądowej linii elektroenergetycznych

Opracowany model obciążalności prądowej oparty jest na bilansie cieplnym przewodu, który zawiera cztery składniki. Podejście takie zastosowane jest również

W artykule omówiono składniki bilansu cieplnego przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych oraz czynniki mające wpływ na ich obciążalność prądową. Przedstawione rozważania zilustrowano wynikami obliczeń wartości prądu, przy której przewód osiąga temperaturę projektową w zależności od wartości prądu dla różnych pór roku i doby, temperatury otoczenia, prędkości i kierunku wiatru.

w modelach CIGRE [3] oraz IEEE [4]. Równanie bilansu cieplnego ma następującą postać:

$$P_{AC} + P_S - P_C - P_R = 0 \quad (7.1)$$

gdzie:

- P_{AC} – moc wydzielona w przewodzie w wyniku prądu płynącego przez przewód, W/m;
- P_S – moc zaabsorbowana przez przewód na skutek promieniowania słonecznego, W/m;
- P_C – moc oddawana przez przewód poprzez konwekcję, W/m;
- P_R – moc oddawana przez przewód poprzez promieniowanie, W/m.

Moc wydzielona w przewodzie w wyniku prądu płynącego przez przewód zależy od kwadratu wartości prądu oraz rezystancji przewodu. W przypadku prądu przemiennego konieczne jest uwzględnienie zjawisk, wynikających z oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego, takich jak efekt naskórkowości, a w przypadku przewodów z rdzeniem ferromagnetycznym – straty w rdzeniu (prądy wirowe, histereza) oraz zmianę gęstości prądu w poszczególnych warstwach przewodu w wyniku oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego (efekt transformatorowy) [5].

Promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię przewodu częściowo jest absorbowane przez nią w bardzo cienkiej warstwie powierzchniowej. Absorpcyjność przewodów zależy przede wszystkim od stanu ich powierzchni. Nowe przewody aluminiowe lub ze stopu aluminium mają mniejszą zdolność absorpcyjną niż te same przewody po utlenieniu lub po okresie eksploatacji w powietrzu. Równocześnie z procesem absorpcji promieniowania słonecznego ma miejsce proces refleksji (odbicia) promieniowania. Ponieważ powierzchnia przewodu jest szorstka, odbicie promieniowania następuje we wszystkich możliwych kierunkach. Ciepło zaabsorbowane przez przewód wskutek promieniowania słonecznego zależy od następujących czynników:

- intensywność promieniowania padającego na powierzchnię przewodu,
- intensywność promieniowania rozproszonego,
- usytuowanie przewodu w przestrzeni,
- położenie geograficzne linii elektroenergetycznej,

- dzień roku kalendarzowego,
- refleksyjności otoczenia linii elektroenergetycznej.

Konwekcja naturalna (swobodna) ma miejsce zawsze i zależy głównie od różnicy temperatury przewodu i otoczenia oraz gęstości powietrza. Intensywność konwekcji wymuszonej, oprócz wymienionych wcześniej czynników, silnie zależy od prędkości i kierunku wiatru. W przypadku występowania obu rodzajów konwekcji

o sumarycznej ilości oddawanego ciepła decyduje konwekcja wymuszona.

W przypadku oddawania ciepła przez promieniowanie zakłada się, że promieniowanie własne przewodu jest jednakowe we wszystkich kierunkach. Powierzchnię przewodu linii elektroenergetycznej uważa się za ciało szare. Emisja promieniowania zachodzi w bardzo cienkiej warstwie powierzchniowej. W rzeczywistości przewód promieniuje górną częścią w przestrzeń nieskończoną, a dolną częścią w stronę ziemi.

W opracowanym modelu wyróżniono 23 parametry oraz 9 zmiennych:

$$P_{AC}(c_1, \dots, c_{15}, I_p, T_s) + P_S(N, T, c_{16}, c_{17}, c_{18}, N_s, F, c_{19}, c_{20}) - P_C(T_s, T_a, c_{16}, c_{21}, c_{22}, \Phi_w, V, c_{17}) - P_R(T_s, T_a, c_{16}, c_{23}) = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- c_i – parametr, $i = 1, \dots, 23$,
- $c_1 = \rho_r$ – rezystywność materiału rdzenia w temperaturze 20°C w $\Omega \times m$,
- $c_2 = \alpha_r$ – współczynnik temperaturowy rezystancji materiału rdzenia w K^{-1} ,
- $c_3 = g_r$ – gęstość materiału rdzenia w $kg \times m^{-3}$,
- $c_4 = d_r$ – średnica drutu rdzenia w m,
- $c_5 = L_{wr}$ – liczba warstw w rdzeniu (drut środkowy to warstwa nr 1),
- $c_6 = L_{dwr}$ – liczba drutów w poszczególnych warstwach rdzenia,
- $c_7 = L_{fr}$ – skok zwoju w poszczególnych warstwach rdzenia w m,
- $c_8 = \rho_a$ – rezystywność materiału części przewodzącej (aluminium) w temperaturze 20°C w $\Omega \times m$,
- $c_9 = \alpha_a$ – współczynnik temperaturowy rezystancji materiału części przewodzącej (aluminium) w K^{-1} ,
- $c_{10} = \mu_a$ – względna przenikalność magnetyczna materiału części przewodzącej (aluminium),
- $c_{11} = d_a$ – średnica drutu części przewodzącej w m,
- $c_{12} = L_{wa}$ – liczba warstw w części przewodzącej,
- $c_{13} = L_{dwa}$ – liczba drutów w poszczególnych warstwach części przewodzącej,
- $c_{14} = L_{fa}$ – skok zwoju w poszczególnych warstwach części przewodzącej w m,
- $c_{15} = f$ – częstotliwość prądu w Hz,
- $c_{16} = D$ – średnica zewnętrzna przewodu w m,
- $c_{17} = y$ – wysokość przewodu nad poziom morza w m,
- $c_{18} = \varphi$ – szerokość geograficzna,
- $c_{19} = \alpha_s$ – absorpcyjność powierzchni przewodu (wartość z przedziału $<0,28, 0,93>$),
- $c_{20} = \gamma_c$ – azymut przewodu,
- $c_{21} = d$ – średnica pojedynczego drutu przewodu w m,
- $c_{22} = \beta$ – kąt nachylenia przewodu w stopniach ($\beta < 80^\circ$),
- $c_{23} = \epsilon_n$ – współczynnik emisyjności powierzchni przewodu (wielkość bezwymiarowa),
- I_p – wartość skuteczna prądu płynącego w przewodzie w A,
- N – kolejny dzień roku,
- T – godzina (czas uniwersalny), w której rozpatrujemy absorpcję promieniowania słonecznego (0-24),
- T_s – temperatura powierzchni przewodu w °C,
- T_a – temperatura otoczenia w °C,
- Φ_w – kąt pomiędzy kierunkiem wiatru a osią przewodu (linii),
- V – prędkość wiatru w $m \times s^{-1}$,
- N_s – czystość atmosfery,
- F – albedo (wartość z przedziału $<0,1>$) zależne od rodzaju podłoża,

Numeryczne rozwiązanie równania (2) umożliwi m.in. wyznaczenie w zadanych warunkach atmosferycznych i środowiskowych zarówno temperatury przewodu przy znanej wartości prądu płynącego w przewodzie, jak i dopuszczalnej wartości prądu przy zadanej temperaturze dopuszczalnej przewodu.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe wykresy poszczególnych składników bilansu cieplnego (2) przewodu AFL-8 525 mm².