



Zygmunt MACIEJEWSKI\*

## Wpływ linii przesyłowych prądu przemiennego na efektywność systemu elektroenergetycznego

**STRESZCZENIE.** Najważniejszymi parametrami, które charakteryzują linie elektroenergetyczne prądu przemiennego są: rezystancja i reaktancja (elementy szeregowe) oraz konduktancja i susceptancja (elementy równoległe). W liniach wysokich napięć rezystancje i konduktancje są małe w odniesieniu do reaktancji i susceptancji, dlatego mogą nie być brane pod uwagę. Przewód wiązkowy, tworzący jedną fazę linii, składa się z dwóch, trzech, czterech lub większej liczby przewodów utrzymywanych w stałych odległościach od siebie.

W pracy podano podstawowe zależności wyznaczające reaktancję i susceptancję jednostkową linii elektroenergetycznej. Wyprowadzono wzory określające wpływ przewodów wiązkowych na zmianę wartości tych parametrów. Na tej podstawie przedstawiono szczegółowe wartości zmian reaktancji i susceptancji w zależności od liczby przewodów w wiązce dla linii 400 kV krajowego systemu elektroenergetycznego. Wykazano możliwość zwiększenia zdolności przesyłowych linii elektroenergetycznych ze wzrostem liczby przewodów w wiązce. Wskazano na dodatkowy korzystny wpływ przewodów wiązkowych na efektywność pracy systemu elektroenergetycznego. Dotyczy to w szczególności zwiększenia zapasu stabilności, zmniejszenia strat przesyłu i strat napięcia, zwiększenia mocy naturalnej linii oraz zmniejszenia strat ulotu linii. Zmniejszenie ulotu z przewodów wiązkowych wpływa także korzystnie na obniżenie poziomu hałasu oraz zakłóceń radioelektrycznych wytwarzanych przez linie elektroenergetyczne, szczególnie w czasie złej pogody.

**SŁOWA KLUCZOWE:** system elektroenergetyczny, linia elektroenergetyczna, przewody wiązkowe, prąd przemienny, przesył mocy, efektywność energetyczna

---

\* Dr hab. inż. – e-mail: [zygmunt37@neostrada.pl](mailto:zygmunt37@neostrada.pl)

## Wprowadzenie

Najważniejszymi parametrami, które charakteryzują linie elektroenergetyczne prądu przemiennego są: rezystancja  $R$  [ $\Omega$ ], reaktancja  $X$  [ $\Omega$ ] (elementy szeregowe) oraz konduktancja  $G$  [S] i susceptancja  $B$  [S] (elementy równoległe). W liniach wysokich napięć rezystancje i konduktancje są małe w odniesieniu do reaktancji i susceptancji, dlatego często mogą nie być brane pod uwagę.

Jednostkowe wielkości reaktancji indukcyjnej  $X_j$  i susceptancji pojemnościowej  $B_j$  linii elektroenergetycznych prądu przemiennego są określone zależnościami (Taylor 1994; Kacejko i Machowski 1993; Bernas 1986; Adamska i Niewiedział 1989):

$$X_j = \omega \cdot L_j = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{d}{r_0} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1)$$

$$B_j = \omega \cdot C_j = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot 8,85 \cdot 10^{-9}}{\ln \left( \frac{d}{r} \cdot \frac{h}{H} \right)} \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (2)$$

w których:

- $\omega$  – pulsacja [rad/s], ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ),
- $f$  – częstotliwość prądu płynącego w przewodzie [Hz],
- $L_j$  – indukcyjność jednostkowa przewodu [H/km],
- $C_j$  – pojemność jednostkowa przewodu [F/km],
- $d$  – średni odstęp między przewodami fazowymi dla jednorowowych linii symetrycznych lub symetryzowanych [cm],
- $d = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3, d_1, d_2, d_3}$  – odległości między przewodami fazowymi [cm],
- $r$  – promień rzeczywisty przewodu [cm],
- $r_0$  – zastępczy promień przewodu, tzn. promień rury o nieskończenie cienkiej ściance, którego prąd wywołuje taki sam strumień magnetyczny jak prąd przewodu rzeczywistego o promieniu  $r$ , ale na zewnątrz [cm], (w przypadku przewodów stalowo-aluminiowych typu AFL  $r_0 \cong 0,8 \cdot r$ ),
- $h$  – średnia geometryczna odległość przewodów fazowych a, b, c od ich lustrzanych odbić względem powierzchni ziemi [m],  $h = \sqrt[3]{h_{aa} \cdot h_{bb} \cdot h_{cc}}$ ,
- $H$  – średnia geometryczna odległość przewodów fazowych a, b, c od lustrzanych odbić faz różnoimiennych [m],  $H = \sqrt[3]{H_{ab} \cdot H_{bc} \cdot H_{ca}}$ .

Ze wzorów (1) i (2) wynika, że zwiększenie promienia przewodu  $r$  powoduje zmniejszenie reaktancji jednostkowej linii  $X_j$  przy jednoczesnym zwiększeniu jej susceptancji jednostkowej  $B_j$ .

Dla częstotliwości  $f = 50$  Hz (znamionowa częstotliwość krajowego systemu elektroenergetycznego), wzory (1) i (2) przyjmują postać:

$$X_j = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-2} \cdot \ln \frac{d}{r_0} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3)$$

$$B_j = \frac{1,77 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-6}}{\ln \left( \frac{d}{r} \cdot \frac{h}{H} \right)} \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (4)$$

## 1. Przewody wiązkowe

W liniach wysokich i najwyższych napięć są stosowane przewody wiązkowe. Przewód wiązkowy, tworzący jedną fazę linii, składa się z dwóch, trzech, czterech lub większej liczby przewodów utrzymywanych w stałych odległościach od siebie (30–50 cm) za pomocą tzw. odstępników.

Przewody wiązkowe są zwykle rozmieszczone w wierzchołkach wieloboku foremnego o boku  $a$ . Oznacza to, że odległość między sąsiednimi przewodami należącymi do wiązki wynosi  $a$  cm. We wzorach (3) i (4) promienie  $r_0$  i  $r$  zostają wówczas zastąpione przez promienie zastępcze przewodów wiązki  $r_{0z}$  i  $r_z$ , które są określone zależnościami (Bernas 1986):

$$r_{0z} = \sqrt[n]{r_0 \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdots a_{1n}} \quad (5)$$

$$r_z = \sqrt[n]{r \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdots a_{1n}} \quad (6)$$

w których:

- $a_{1k}$  – odległość przewodu  $k$  od przewodu o numerze 1;  $k = 2, 3, \dots, n$ ,
- $n$  – liczba przewodów w wiązce.

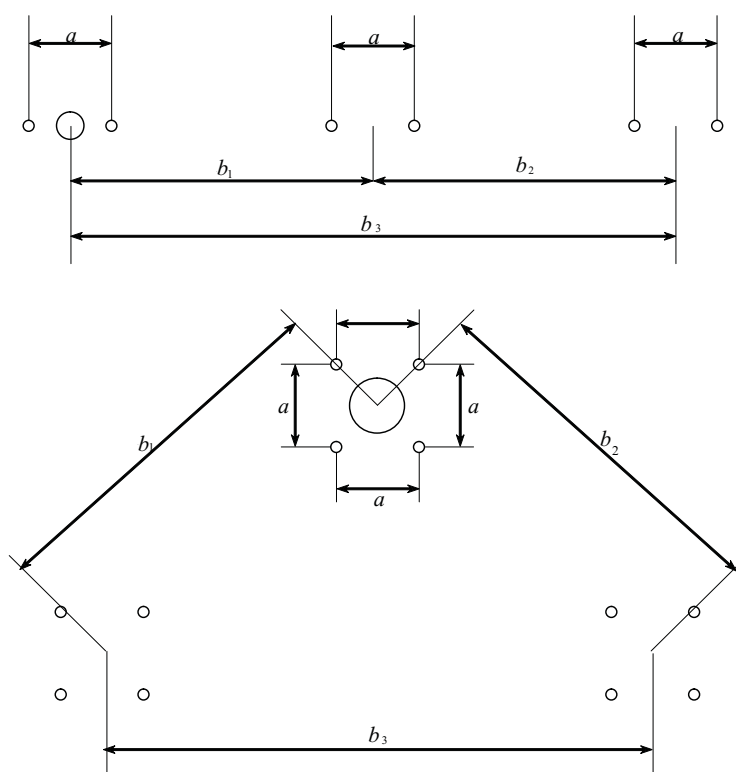
Dla wielokąta foremnego o  $n$  wierzchołkach odległość  $k$ -tego przewodu od przewodu o numerze 1 wyznacza się ze wzoru

$$a_{1k} = a \cdot \frac{\sin \frac{(k-1) \cdot \pi}{n}}{\sin \frac{\pi}{n}} \quad (7)$$

Po uwzględnieniu zależności (7) i dokonaniu przekształceń (Maciejewski 2009; Dommel 1975), wzory (5) i (6) przyjmują postać:

$$\begin{aligned}
 \text{dla } n=2 \quad r_{0z} &= \sqrt{r_0 \cdot a} & r_z &= \sqrt{r \cdot a} \\
 \text{dla } n=3 \quad r_{0z} &= \sqrt[3]{r_0 \cdot a^2} & r_z &= \sqrt[3]{r \cdot a^2} \\
 \text{dla } n=4 \quad r_{0z} &\cong 1,0905 \cdot \sqrt[4]{r_0 \cdot a^3} & r_z &\cong 1,0905 \cdot \sqrt[4]{r \cdot a^3} \\
 \text{dla } n=5 \quad r_{0z} &\cong 1,2123 \cdot \sqrt[5]{r_0 \cdot a^4} & r_z &\cong 1,2123 \cdot \sqrt[5]{r \cdot a^4} \\
 \text{dla } n=6 \quad r_{0z} &\cong 1,3480 \cdot \sqrt[6]{r_0 \cdot a^5} & r_z &\cong 1,3480 \cdot \sqrt[6]{r \cdot a^5} \\
 \text{dla } n=7 \quad r_{0z} &\cong 1,4912 \cdot \sqrt[7]{r_0 \cdot a^6} & r_z &\cong 1,4912 \cdot \sqrt[7]{r \cdot a^6} \\
 \text{dla } n=8 \quad r_{0z} &\cong 1,6387 \cdot \sqrt[8]{r_0 \cdot a^7} & r_z &\cong 1,6387 \cdot \sqrt[8]{r \cdot a^7}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Przykłady układów przewodów wiązkowych dwu- i czteroprzewodowych są przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Przewody wiązkowe dwu- i czteroprzewodowe

Fig. 1. Bundled conductors for two and four wires

## 2. Linie 400 kV krajowego systemu elektroenergetycznego

W liniach przesyłowych 400 kV krajowego systemu elektroenergetycznego są stosowane przewody wiązkowe stalowo-aluminiowe AFL, w relacji dwa przewody na fazę ( $2 \times 525 \text{ mm}^2$ ) oraz w relacji trzy przewody na fazę ( $3 \times 350 \text{ mm}^2$ ). Sumaryczny przekrój znamionowy części aluminiowej przewodów AFL stosowanych w liniach przesyłowych 400 kV krajowego systemu elektroenergetycznego wynosi zatem ( $1000 \text{ mm}^2$ ). Dla przewodów stalowo-aluminiowych AFL o kilku warstwach drutów aluminiowych  $r_0 \cong 0,8 \cdot r$ .

Linie jednotorowe 400 kV krajowego systemu elektroenergetycznego są budowane na słupach typu Y 52 (Maciejewski 2002). Są to słupy o poziomym układzie przewodów:  $d_1 = 1030 \text{ cm}$ ,  $d_2 = 1030 \text{ cm}$ ,  $d_3 = 2060 \text{ cm}$  i wysokości zawieszenia przewodów względem ziemi wynoszącym około 26,5 m. Oznacza to, że  $d \cong 1297,7 \text{ cm}$ ,  $h \cong 53 \text{ m}$ ,  $H \cong 53,99 \text{ m}$ ,  $h/H \cong 0,98$ . Odległość między sąsiednimi przewodami w wiązce  $a \cong 40 \text{ cm}$ .

Wynika stąd, że dla przewodów wiązkowych podwieszonych na słupach typu Y 52, wzory (3) i (4) wyznaczające reaktancję i susceptancję jednostkową linii przyjmują postać:

$$X_j \cong 2 \cdot \pi \cdot 10^{-2} \cdot \ln\left(\frac{1297,7}{r_{0z}}\right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (9)$$

$$B_j \cong \frac{1,77 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{1271,746}{r_z}\right)} \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (10)$$

w których wartości  $r_{0z}$  i  $r_z$ , w zależności od liczby przewodów w wiązce, są określone zależnościami (8).

W tabeli 1, zgodnie z zależnościami (9) i (10), przedstawiono wyniki obliczeń reaktancji jednostkowej  $X_j$  i susceptancji jednostkowej  $B_j$  linii 400 kV zbudowanej na słupach typu Y 52.

TABELA 1. Wyniki obliczeń reaktancji i susceptancji linii 400 kV

TABLE 1. Calculated values of reactance and susceptance of 400 kV lines

$n$ [-]	$s$ [mm <sup>2</sup> ]	$n \times s$ [mm <sup>2</sup> ]	$r$ [cm]	$r_{0z}$ [cm]	$r_z$ [cm]	$X_j$ [Ω/km]	$B_j$ [μS/km]
2	525	1050	1,575	7,099	7,937	0,3273	3,4411
3	350	1050	1,305	11,865	12,781	0,2950	3,7975
4	262,5*	1050	1,130*	16,913	17,883	0,2727	4,0966
5	210*	1050	1,011*	22,224	23,239	0,2555	4,3648
6	175*	1050	0,932*	27,765	28,817	0,2416	4,6127
7	150	1050	0,8625	33,397	34,479	0,2300	4,8421
8	131,25*	1050	0,807*	39,133	40,240	0,2200	5,0587

\* Oznacza przekrój  $s$  i promień  $r$  przewodu niestandardowego.

Obliczenia wykonano dla liczby przewodów w wiązce  $n = 2, 3, \dots, 8$ , przy zachowaniu sumarycznego przekroju znamionowego części aluminiowej przewodów AFL 1050 mm<sup>2</sup>.

Z przedstawionych w tabeli 1 danych wynika, że dla sumarycznego przekroju znamionowego części aluminiowej przewodów AFL 1050 mm<sup>2</sup>, zwiększenie liczby przewodów w wiązce od 2 do 8 powoduje zmniejszenie jednostkowej reaktancji linii od 0,3273 do 0,2200 Ω/km, tzn. o 32,78% oraz zwiększenie jednostkowej susceptancji linii od 3,4411 do 5,0587 μS/km, tzn. o 31,9%.

### 3. Przesył mocy liniami elektroenergetycznymi prądu przemiennego

W celu wykonania obliczeń rozplywu prądów i mocy w linii elektroenergetycznej niezbędne jest jej odwzorowanie schematem zastępczym. Parametry charakteryzujące przewody linii trójfazowej: rezystancja  $R$ , reaktancja indukcyjna  $X$ , konduktancja  $G$  i susceptancja pojemnościowa  $B$ , są rozłożone równomiernie wzdłuż całej długości linii. Do wykonywania obliczeń rozplywów mocy przyjmuje się uproszczenie, polegające na traktowaniu poszczególnych parametrów linii jako parametrów skupionych. Podstawowym założeniem przy wykonywaniu obliczeń sieciowych w ustalonym stanie pracy systemu elektroenergetycznego jest symetria trójfazowych napięć i prądów. Umożliwia to przedstawienie schematu zastępczego linii elektroenergetycznej w postaci jednej fazy za pomocą czwórnika o stałych skupionych typu  $\pi$ , w którym impedancję podłużną linii  $\underline{Z} = R + jX$  przyjmuje się w całości, a admitancję linii  $\underline{Y} = G + jB$  dzieli się na połowę i załącza jako gałęzie poprzeczne przed i za impedancją.

Dla linii odwzorowanej czwórnikiem typu  $\pi$ , który jest najczęściej stosowany do modelowania elementów systemu elektroenergetycznego, prąd fazowy  $\underline{I}$  i moc czynna  $P$  przesyłana linią są określone zależnościami (Maciejewski 2002):

$$\underline{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{U_1 \cdot R \cdot \cos \delta + U_1 \cdot X \cdot \sin \delta - U_2 \cdot R}{R^2 + X^2} - \frac{U_2 \cdot G}{2} \right) + \quad (11)$$

$$-j \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{U_1 \cdot X \cdot \cos \delta - U_1 \cdot R \cdot \sin \delta - U_2 \cdot X}{R^2 + X^2} - \frac{U_2 \cdot B}{2} \right)$$

$$P = \frac{X}{R^2 + X^2} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \sin \delta + \frac{R}{R^2 + X^2} \cdot U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \delta - \left( \frac{R}{R^2 + X^2} + \frac{G}{2} \right) \cdot U_2^2 \quad (12)$$

gdzie:  $R$  – rezystancja linii,  
 $X$  – reaktancja linii,  
 $G$  – konduktancja linii,

- $B$  – susceptancja linii,
- $U_1, U_2$  – moduły napięć przewodowych na krańcach linii,
- $\delta$  – kąt rozchylenia między wektorami  $\underline{U}_1$  i  $\underline{U}_2$ .

Po uwzględnieniu założeń upraszczających:  $U_1 = U_2 = U, R = 0, G = 0$ , zależności (11) i (12) przyjmują postać:

$$\underline{I} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X} \cdot \sin \delta + j \cdot \frac{U}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot X} \cdot \left( 4 \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} - X \cdot B \right) \quad (13)$$

$$P = \frac{U^2}{X} \cdot \sin \delta \quad (14)$$

#### 4. Wpływ przewodów wiązkowych na przesył mocy czynnej

Badanie wpływu przewodów wiązkowych na przesył mocy czynnej wykonano na podstawie obliczeń dla linii 400 kV o długości 300 km zbudowanej na słupach typu Y 52. Obliczenia wykonano dla (tab. 1):

- ✧ sumarycznego przekroju roboczego przewodów linii AFL 1050 mm<sup>2</sup>,
- ✧ liczby przewodów w wiązce:  $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ ,
- ✧ odległości między sąsiednimi przewodami w wiązce:  $a = 40$  cm,
- ✧ kąta rozchylenia między wektorami napięć na krańcach linii  $\delta = 30^\circ$ .

Po podstawieniu przyjętych danych do wzorów: (13), (14), otrzymano następujące wyniki obliczeń, które są przedstawione w tabeli 2.

TABELA 2. Wyniki obliczeń prądów i mocy czynnych linii 400 kV

TABLE 2. Calculated values of currents and real power of 400kV lines

	$\underline{I}$ [A]	$I$ [A]	$P$ [MW]
2	1 175,986 + j 195,902	1 192,192	814,75
3	1 304,746 + j 218,056	1 322,842	903,95
4	1 411,442 + j 236,284	1 431,083	977,88
5	1 506,459 + j 252,453	1 527,466	1 043,71
6	1 593,130 + j 267,089	1 615,364	1 103,75
7	1 673,479 + j 280,673	1 696,853	1 159,42
8	1 749,546 + j 293,551	1 774,002	1 212,12

Największą moc czynną jaką można przesłać rozpatrywaną linią  $P_{gra}$ , przy założeniu wytrzymałości termicznej przewodów, określa zależność (Bernas 1986; Kundur 1994; Kujarczyk 1997):

$$P_{gra} = \frac{U^2}{X} \quad (15)$$

Warunek stabilności pracy linii jest spełniony w zakresie kątów  $0 \leq \delta < \frac{\pi}{2}$  oraz przesyłanej mocy czynnej:  $0 \leq P < P_{gra}$ . Punkt  $(\delta_{gra}, P_{gra})$ , który jest wierzchołkiem charakterystyki mocy czynnej (sinusoidea), stanowi granicę stabilności. W danym punkcie pracy  $(\delta_0, P_0)$  zapas stabilności (odległość od granicy stabilności) jest określony tzw. współczynnikiem zapasu stabilności lokalnej  $k_p$  (statycznej) (Machowski i Bernas 1989):

$$k_p = \frac{P_{gra} - P_0}{P_{gra}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

Zależność (15), po uwzględnieniu wzoru (14) przyjmuje postać

$$k_p = (1 - \sin \delta) \cdot 100 \quad [\%] \quad (17)$$

Z zależności (17) wynika, że dla rozpatrywanego przypadku pracy ( $\delta = 30^\circ$ ), przy zachowaniu stałego przekroju roboczego przewodów, niezależnie od liczby przewodów w wiązce, współczynnik zapasu stabilności  $k_p$  jest niezmienny i wynosi 50%. Oznacza to, że przy zachowaniu stałego przekroju roboczego przewodów, powiększenie liczby przewodów w wiązce nie zmienia warunków stabilności pracy układu, zwiększa natomiast znacznie możliwości przesyłowe linii. Z danych liczbowych zawartych w tabeli 2 wynika, że możliwości przesyłowe mocy czynnej dla linii 400 kV zostają zwiększone od 815 MW ( $n = 2$ ) do 1212 MW ( $n = 8$ ), tzn. około 49%. Odpowiednio do mocy czynnej przesyłanej linią zostają zwiększone prądy płynące od 1192 A ( $n = 2$ ) do 1774 A ( $n = 8$ ).

Dopuszczalna obciążalność trwała przewodów AFL o sumarycznym przekroju 1050 mm<sup>2</sup> wynosi około 2400 A co oznacza, że wytrzymałość termiczna badanej linii dla  $n = 8$  będzie zachowana.

Dla zachowania stabilności lokalnej pracy linii wartość współczynnika  $k_p$  (Kundur 1994) powinna być nie mniejsza niż 30%, co oznacza, że największa wartość kąta  $\delta$  nie powinna przekraczać 44°. Dla wartości kąta  $\delta = 44^\circ$  wyniki obliczeń prądów i mocy czynnych płynących badaną linią 400 kV są przedstawione w tabeli 3.

Moc naturalna linii elektroenergetycznej  $P_{nat}$  wyrażona w MW jest określona wzorem (Maciejewski 2002):

$$P_{nat} \approx U_n^2 / \sqrt{X_j / B_j} = U_n^2 / Z_f \quad (18)$$

w którym:  $U_n$  oznacza napięcie znamionowe w kV,  $Z_f$  – impedancję falową linii.



TABELA 3. Wyniki obliczeń prądów i mocy czynnych dla wartości kąta  $\delta = 44^\circ$ TABLE 3. Calculated values of currents and real power of 400kV lines for angle  $\delta = 44^\circ$ 

$n$	$\underline{I}$ [A]	$I$ [A]	$P$ [MW]
2	1 633,817 + j 540,902	1 721,027	1 131,94
3	1 812,706 + j 600,831	1 909,686	1 255,88
4	1 960,940 + j 650,360	2 065,975	1 358,58
5	2 092,948 + j 694,404	2 205,137	1 450,04
6	2 213,362 + j 734,467	2 332,041	1 533,46
7	2 324,992 + j 771,623	2 449,692	1 610,80
8	2 430,674 + j 806,818	2 561,080	1 684,02

Jeśli moc czynna  $P$  przesyłana linią jest większa niż jej moc naturalna  $P_{nat}$ , to podłużne straty mocy biernej indukcyjnej są większe od mocy biernej generowanej w gałęziach poprzecznych i linia jest odbiornikiem mocy biernej. Gdy  $P$  jest mniejsze od  $P_{nat}$ , wówczas linia jest źródłem mocy biernej indukcyjnej. W tych przypadkach mogą nastąpić nadmierne wzrosty napięć węzłowych. Obciążenie mocą czynną decyduje czy linia generuje moc bierną, czy jest jej odbiornikiem.

Jak wynika z zależności (18), liczba przewodów w wiązce ma wpływ na wartość impedancji falowej linii  $Z_f$ , a więc ma wpływ na wartość mocy naturalnej linii  $P_{nat}$ . Wyniki tego wpływu dla rozpatrywanego przypadku linii 400 kV są przedstawione w tabeli 4.

TABELA 4. Wyniki obliczeń impedancji falowej i mocy naturalnej linii 400 kV

TABLE 4. Calculated values of wave impedance and natural power of 400 kV lines

$n$ [-]	$X_j$ [ $\Omega$ /km]	$B_j$ [ $\mu$ S/km]	$Z_f$ [ $\Omega$ ]	$P_{nat}$ [MW]
2	0,3273	3,4411	308,41	518,79
3	0,2950	3,7975	278,72	574,05
4	0,2727	4,0966	258,01	620,13
5	0,2555	4,3648	241,94	661,32
6	0,2416	4,6127	228,86	699,12
7	0,2300	4,8421	217,95	734,11
8	0,2200	5,0587	208,54	767,24

Z danych zawartych w tabeli 4 wynika, że zwiększenie liczby przewodów w wiązce powoduje wzrost mocy naturalnej linii. Jeżeli moc czynna przesyłana linią przekracza moc naturalną linii, to wówczas następuje spadek napięcia w węźle odbiorczym. W przypadku

przesyłu mocy czynnej przekraczającej moc naturalną linii, zwiększenie liczby przewodów w wiązce ułatwia zachowanie poziomów napięć węzłowych w dopuszczalnych granicach.

Zastosowanie przewodów wiązkowych w porównaniu z pojedynczym przewodem o przekroju takim samym jak łączny przekrój przewodów wiązki, zmniejsza indukcyjność linii oraz powiększa jej pojemność. Zmniejszenie indukcyjności linii powoduje zmniejszenie jej reakcji, co ma istotny wpływ na zwiększenie możliwości przesyłu mocy czynnej oraz zwiększenie zapasu stabilności lokalnej (statycznej) linii. Mniejsza indukcyjność i większa pojemność linii zmniejszają również straty napięcia. Przewody wiązkowe umożliwiają również zwiększenie obciążalności linii ze względu na lepsze warunki chłodzenia.

Przewody wiązkowe zmniejszają także natężenie pola elektrycznego wokół przewodu, co powoduje wzrost napięcia krytycznego ulotu, a więc ograniczenie ulotu. Ulot jest zjawiskiem niepożądanym, powodującym straty mocy czynnej w linii. Ograniczenie ulotu z przewodów wiązkowych wpływa także korzystnie na obniżenie poziomu hałasu oraz zakłóceń radioelektrycznych wytwarzanych przez linie elektroenergetyczne, szczególnie w czasie złej pogody.

Korzyści ze stosowania przewodów wiązkowych są znaczne, mają wpływ na poprawę stabilności pracy systemu i zwiększenie możliwości przesyłowych sieci najwyższych napięć. Stosowanie przewodów wiązkowych o większej liczbie przewodów na jedną fazę ma zatem bezpośredni wpływ na poprawę efektywności energetycznej systemu elektroenergetycznego. Należy jednak zwrócić uwagę, że zwiększenie liczby przewodów w wiązce zwiększa koszty podwieszenia przewodów.

## Podsumowanie

Polską sieć najwyższych napięć tworzą 241 linie o łącznej długości 13 338 km, w tym:

- ✧ 1 linia o napięciu 750 kV i długości 114 km (obecnie nieczynna),
- ✧ 73 linii o napięciu 400 kV i długości 5303 km,
- ✧ 167 linii o napięciu 220 kV i długości 7921 km,
- ✧ 106 stacji najwyższych napięć,
- ✧ podmorskie połączenie 450 kV DC Polska–Szwecja o długości 254 km.

W krajowym systemie elektroenergetycznym zadania przesyłowe pełnią linie o napięciach 400 i 220 kV, a także część linii o napięciu 110 kV. Linie 400 i 220 kV współpracują równolegle z siecią o napięciu 110 kV, która pełni w zasadzie funkcję sieci dystrybucyjnej, zasilającej sieci średniego napięcia.

Przewody wiązkowe są stosowane tylko w liniach 400 kV. Jako standardowe rozwiązanie przyjmowano dwa przewody na fazę (AFL  $2 \times 525 \text{ mm}^2$ ) o sumarycznym roboczym przekroju przewodów  $1050 \text{ mm}^2$ . Tylko pierwsza krajowa linia 400 kV w relacji Mikułowa (El. Turów) – Joachimów (Częstochowa), uruchomiona w 1963 roku, miała przewody wiązkowe AFL  $2 \times 400 \text{ mm}^2$ . Budowane obecnie nowe linie 400 kV mają trzy przewody na fazę (AFL  $3 \times 350 \text{ mm}^2$ ).

W krajach Europy Zachodniej w liniach 400 kV stosuje się jako rozwiązanie standardowe cztery przewody na fazę. Korzyści wynikające ze stosowania większej liczby niż trzy przewody na fazę są znaczne. Zostało to wykazane w pracy.

Prognozy wzrostu krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną wskazują na konieczność znacznej rozbudowy krajowego systemu przesyłowego 400 kV, a także lepszego wykorzystania istniejącej infrastruktury sieciowej najwyższych napięć. Nowe linie 400 kV, szczególnie wyprowadzające moc z dużych elektrowni, powinny być przystosowane do przesyłów dużej mocy przy zachowaniu wymaganych warunków zachowania stabilności statycznej pracy systemu elektroenergetycznego. Wymagania te spełniają linie wyposażone w przewody wiązkowe, mające co najmniej cztery przewody na fazę. Takie rozwiązania powinny być przyjęte w budowie nowych linii krajowego systemu elektroenergetycznego.

Jak wynika ze wzorów (3), (4) i (8), zmniejszenie reaktancji jednostkowej linii  $X_j$  można uzyskać przez zwiększenie odległości  $a$  między sąsiednimi przewodami należącymi do wiązki. W Japonii, w linii 500 kV z sześcioma przewodami na fazę zwiększono odległość  $a$  między sąsiednimi przewodami wiązki z 80 do 120 cm. W rezultacie uzyskano 30% zmniejszenie reaktancji linii (Causey 2000).

## Literatura

- [1] TAYLOR, C.W. 1994. *Power System Voltage Stability*. Electric Power Research Institute Editors, Copyright by McGraw-Hill, Inc. New York, San Francisco, Washington, D.C.
- [2] KACEJKO, P. i MACHOWSKI, J. 1993. *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [3] BERNAS, S. 1986. *Systemy elektroenergetyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [4] ADAMSKA, J. i NIEWIEDZIAŁ, R. 1989. *Podstawy elektroenergetyki. Sieci i urządzenia elektroenergetyczne*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [5] MACIEJEWSKI, Z. 2009. Wpływ przewodów wiązkowych na przesył mocy liniami elektroenergetycznymi prądu przemiennego. *Elektroenergetyka Współczesność i Rozwój, Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A.* nr 2, s. 44–54.
- [6] DOMMEL, H.W. 1975. *Notes on Power System Analysis*. British Columbia.
- [7] MACIEJEWSKI, Z. 2002. *Przesył mocy liniami elektroenergetycznymi prądu przemiennego*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej.
- [8] KUNDUR, P. 1994. *Power System Stability and Control*. Electric Power Research Institute Editors, Copyright by McGraw-Hill, Inc. New York, San Francisco, Washington, D.C.
- [9] KUJSZCZYK, S. i in. 1997. *Elektroenergetyczne układy przesyłowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [10] MACHOWSKI, J. i BERNAS, S. 1989. *Stany nieustalone i stabilność systemu elektroenergetycznego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [11] CAUSEY, W. 2000. Innovative bundling reduces HV line inductance. *Electrical World* 1/2.

Zygmunt MACIEJEWSKI

## Influence of transmission lines on efficiency of the power system

### Abstract

The most important parameters which characterize the lines of a power system are resistance, reactance (series elements), conductance, and susceptance (parallel elements). In the high voltage lines of a power grid, resistance and conductance are minor in reference to reactance, and susceptance, therefore, can be neglected. The bundled conductor, which creates one phase of the line, is made up of from one to four or more wires which have a constant distance between themselves.

This paper presents the basic relations which describe the parameters of transmission lines, i.e. reactance and susceptance. It examines the influence of bundled conductors on the value of the lines' parameters. The ability to transmit for different values of line parameters are described for the 400 kV lines of the Polish power grid. It is shown that the transmission capability of the 400 kV lines increases when increasing the number of the bundled conductors. The analysis considers the influence of bundled conductors on the effectiveness of the power system. In particular, the concern is with increasing the stability, decreasing the loss of transmission and voltage, increasing the natural power of the lines, and decreasing the corona loss of transmission lines. Decreasing the loss from corona discharge for bundled conductors has an influence on decreasing the noise and interference with radio engineering coming from transmission lines, particularly during poor weather conditions.

KEY WORDS: power system, current line, bundled conductors, power transmission, efficiency of energy