

1. Klasyfikacja linii elektroenergetycznych

1.1. Ze względu na sposób wykonania (budowy)

Ogólnie rzecz biorąc linie elektroenergetyczne można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- linie napowietrzne,
- linia kablowe.

Porównanie wybranych właściwości poszczególnych linii elektroenergetycznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie linii napowietrznej z linią kablową

	Linia napowietrzna	Linia kablowa
Koszt inwestycyjny	niższy	większy (kilkukrotnie od kosztów linii napowietrznej)
Obciążalność prądowa	porównywalna	
Spadek napięcia	większy	mniejszy (ze względu na mniejszą reaktancję indukcyjną)
Zagrożenie porażeniowe	większe	mniejsze
Eksploatacja	są bardziej zawodne (ze względu na wpływ warunków atmosferycznych)	bardziej niezawodne
Uciążliwość dla otoczenia	większa	mniejsza
Lokalizacja uszkodzenia	łatwiejsza	utrudniona

1.2. Ze względu na wartość napięcia znamionowego

Przyjmując jako kryterium podziału poziom napięcia, wyróżnia się:

- **linie niskiego napięcia (nn)** – do 1 kV, długość tych linii zwykle wynosi kilkaset metrów (przeznaczone są do zasilania budynków mieszkalnych oraz drobnych odbiorców);
- **linie średniego napięcia (SN)** – powyżej 1 kV, ale nie więcej niż 60 kV, długość tych linii zwykle wynosi kilka - kilkanaście kilometrów (przeznaczone są do zasilania zakładów przemysłowych, obszarów wiejskich, mniejszych miast); w Polsce najbardziej popularnymi liniami SN są linie **15 kV** oraz 20 kV (pozostałe linie: 6 kV, 10 kV oraz 30 kV należą już do rzadkości);
- **linie wysokiego napięcia (WN)** – powyżej 60 kV, ale nie więcej niż 200 kV, długość tych linii zazwyczaj wynosi kilkadziesiąt kilometrów (przeznaczone są do zasilania dużych miast i dużych zakładów przemysłowych); w Polsce liniami WN są linie o napięciu znamionowym 110 kV;
- **linie najwyższych napięć (NN)** – powyżej 200 kV, długość tych linii wynosi zwykle kilkaset kilometrów (przeznaczone są do przesyłu energii elektrycznej na znaczne odległości); w Polsce liniami NN są linie o napięciach: 220 kV oraz 400 kV;

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

- **linie ultrawysokich napięć (UWN)**, w Polsce linią UWN jest linia 750 kV (aktualnie linia ta nie jest eksploatowana; linia ta łączy stację elektroenergetyczną „Rzeszów” w miejscowości Widelka z elektrownią jądrową Chmielnicka na Ukrainie). Linie UWN występują w rozległych krajach (tj. np.: Rosja, USA, Kanada).

1.3. Ze względu na pełnione funkcje


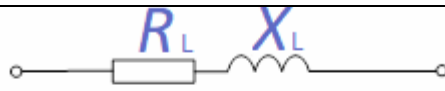
- sieci przesyłowe – służą do przesyłania energii elektrycznej w skali krajowej (sieci państwowe) lub w obrębie okręgów (sieci okręgowe). Do sieci tych zalicza się linie o napięciu 220 kV i 400 kV;
- sieci rozdzielcze – służą do rozprowadzania energii elektrycznej bezpośrednio do zakładów przemysłowych, miast i większych skupisk odbiorców. Do sieci tych zalicza się linie średnich napięć oraz 110 kV.

2. Schematy zastępcze linii elektroenergetycznych

W celu odwzorowania zjawisk występujących w liniach elektroenergetycznych (przy przesyłaniu energii elektrycznej) zachodzi potrzeba operowania schematem zastępczym. W zależności od sposobu odwzorowania linii elektroenergetycznych operuje się następującymi terminami:

- linia I rodzaju – którą odwzorowuje się jednym parametrem, rezystancją linii (dot. linii napowietrznych niskiego napięcia oraz linii kablowych do 6 kV);
- linia II rodzaju – którą odwzorowuje się dwoma parametrami: rezystancją linii oraz reaktancją indukcyjną;
- linia III rodzaju – odwzorowane schematem typu (patrz tabela 2.).

Tabela 2. Schematy zastępcze linii elektroenergetycznych

Schemat zastępczy linii	Zastosowanie
<ul style="list-style-type: none">• Linie napowietrzne nn• Linie kablowe do 6 kV	 <p>Diagram przedstawiający schemat zastępczy linii I rodzaju. Jest to prosty przewód z dwoma końcówkami, w którym umieszczono rezystor oznaczony R_L.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Linie napowietrzne SN• Linie kablowe powyżej 6 kV, ale poniżej 30 kV	 <p>Diagram przedstawiający schemat zastępczy linii II rodzaju. Jest to prosty przewód z dwoma końcówkami, w którym umieszczono rezystor oznaczony R_L i reaktancję indukcyjną oznaczoną X_L.</p>

ELEKTROENERGETYKA

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

Tabela 2. – cd.

Schemat zastępczy linii	Zastosowanie
<ul style="list-style-type: none"> Linie napowietrzne o napięciu znamionowym powyżej 30 kV Linie kablowe o napięciu 30 kV 	
<ul style="list-style-type: none"> Linie napowietrzne WN oraz SN Linie kablowe o napięciu znamionowym powyżej 30 kV 	

Rezystancja linii (związana z wydzielaniem się ciepła)

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot s}$$

l - długość linii [m]
 γ - konduktywność [m/Ωmm²]
 s - przekrój żyły [mm²]

Reaktancja linii (związana z polem magnetycznym)

$$X_L = \omega L_K l$$

$$L_K = \left(4,6 \log \frac{b_{sr}}{0,779r} \right) \cdot 10^{-4} \left[\frac{H}{km} \right]$$

Konduktancja linii (związana z upływnością)

$$G_L = G_K l$$

$$G_K = \frac{\Delta P_k}{U_N^2}$$

Susceptancja linii (związana z istnieniem pola elektrycznego)

$$B_L = \omega C_K l$$

$$C_K = \frac{0,02415}{\log \frac{b_{sr}}{r}} \cdot 10^{-6} \left[\frac{F}{km} \right]$$

3. Spadek napięcia i strata napięcia w liniach elektroenergetycznych

Przepływ prądu w linii powoduje powstanie spadku napięcia, który zależy m.in. od jej długości, przekroju przewodów oraz materiału z jakiego zostały one wykonane. Ze względu na pracę urządzeń odbiorczych wartość spadku napięcia nie może przekraczać dopuszczalnego zakresu, określonego odpowiednimi przepisami.

Spadkiem napięcia δU nazywamy algebraiczną różnicę wartości skutecznych napięć w dwóch punktach sieci (równanie (3.1)).

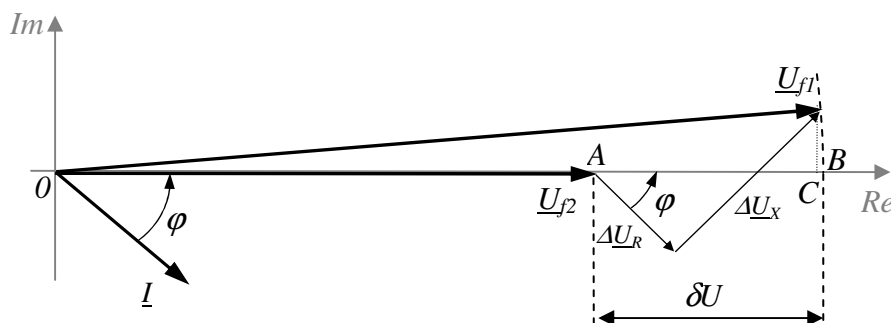
$$\delta U = U_{f1} - U_{f2} \quad (3.1)$$

gdzie:

U_{f1} – wartość skuteczna napięcia na początku sieci,

U_{f2} – wartość skuteczna napięcia na końcu sieci.

Innymi słowy jest to różnica długości wskazów napięć U_{f1} i U_{f2} . Spadek napięcia graficznie przedstawiono na rys. 3.1. Zakreślając z punktu O łuk o długości odpowiadającej wskazowi U_{f1} do przecięcia z osią rzeczywistych otrzymamy punkt B . Jeśli koniec wskazów napięcia U_{f2} potraktujemy jako punkt A , to odcinek \overline{AB} będzie spadkiem napięcia.



Rys. 3.1. Wykres wskazowy – ilustracja spadku napięcia

W liniach niskiego i średniego napięcia (do 30 kV włącznie dla linii napowietrznych oraz do 15 kV włącznie dla linii kablowych) spadek napięcia można łatwo obliczyć korzystając z uproszczonej zależności (3.2)

$$\delta U = I' \cdot R_L - I'' \cdot X_L = R_L \cdot I \cos \varphi + X_L \cdot I \sin \varphi \quad (3.2)$$

gdzie:

R_L – rezystancja linii przesyłowej,

X_L – reaktancja linii przesyłowej,

I' – składowa rzeczywista prądu,

I'' – składowa urojona prądu,

I – wartość skuteczna prądu,

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

przy założeniu, że wektor napięcia leży na osi liczb rzeczywistych. Uproszczenie to wynika z faktu, że po rzutowaniu wektora \underline{U}_{f1} na oś rzeczywistych otrzymany odcinek \overline{OC} jest niewiele krótszy od \overline{OB} (rys. 3.1.).

W rozważaniach praktycznych posługuje się względną wartością spadku napięcia wyrażoną w procentach (3.3)

$$\delta U_{\%} = \frac{\delta U_p}{U_N} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

gdzie:

δU_p – przewodowy spadek napięcia ($\delta U_p = \sqrt{3}\delta U$),

U_N – napięcie znamionowe sieci.

Przepływ prądu w linii, oprócz spadku napięcia, wywołuje także **czynną stratę napięcia** ΔU_R (na rezystancji), która jest w fazie z prądem oraz **bierną stratę napięcia** ΔU_X (na reaktancji indukcyjnej). Zgodnie z napięciowym prawem Kirchhoffa napięcie na początku linii będzie równe sumie napięcia na końcu linii i obu strat napięcia (3.4)

$$\underline{U}_{f1} = \underline{U}_{f2} + \Delta \underline{U}_R + \Delta \underline{U}_X \quad (3.4)$$

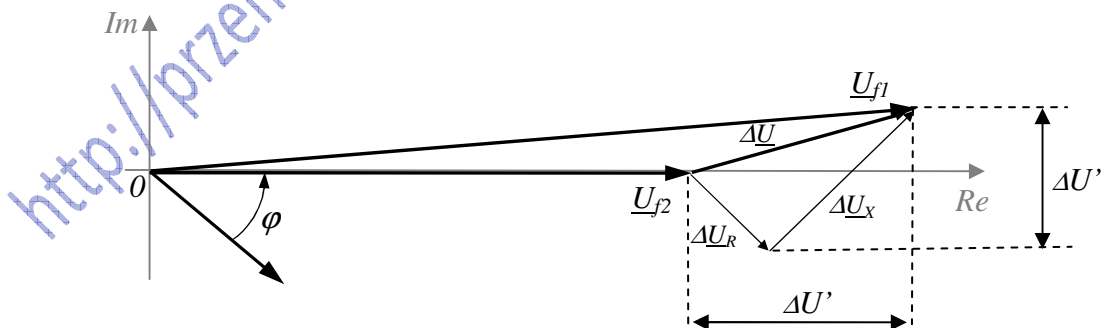
Suma geometryczna obu strat (czynnej i biernej) nazywana jest **całkowitą stratą napięcia** i można ją wyznaczyć z zależności (3.5)

$$\Delta \underline{U} = \Delta \underline{U}_R + \Delta \underline{U}_X = \underline{I}(R_L + jX_L) \quad (3.5)$$

Stratą napięcia $\Delta \underline{U}$ w układzie przesyłowym nazywa się geometryczną różnicę wartości skutecznych wektorów napięć w dwóch punktach sieci np. między początkiem 1 i końcem 2 linii (3.6).

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_{f1} - \underline{U}_{f2} = \underline{I}Z_L \quad (3.6)$$

Rzut wektora $\Delta \underline{U}$ na kierunek osi rzeczywistych nazywa się **podłużną stratą napięcia** $\Delta U'$, natomiast rzut na oś urojonych **poprzeczną stratą napięcia** $\Delta U''$ (rys. 3.2.).



Rys. 3.2. Wykres wskazowy – ilustracja poszczególnych strat napięcia

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

Podłużną i poprzeczną stratę napięcia można wyznaczyć z zależności (3.7) i (3.8)

$$\Delta U' = I' R_L - I'' X_L \quad (3.7)$$

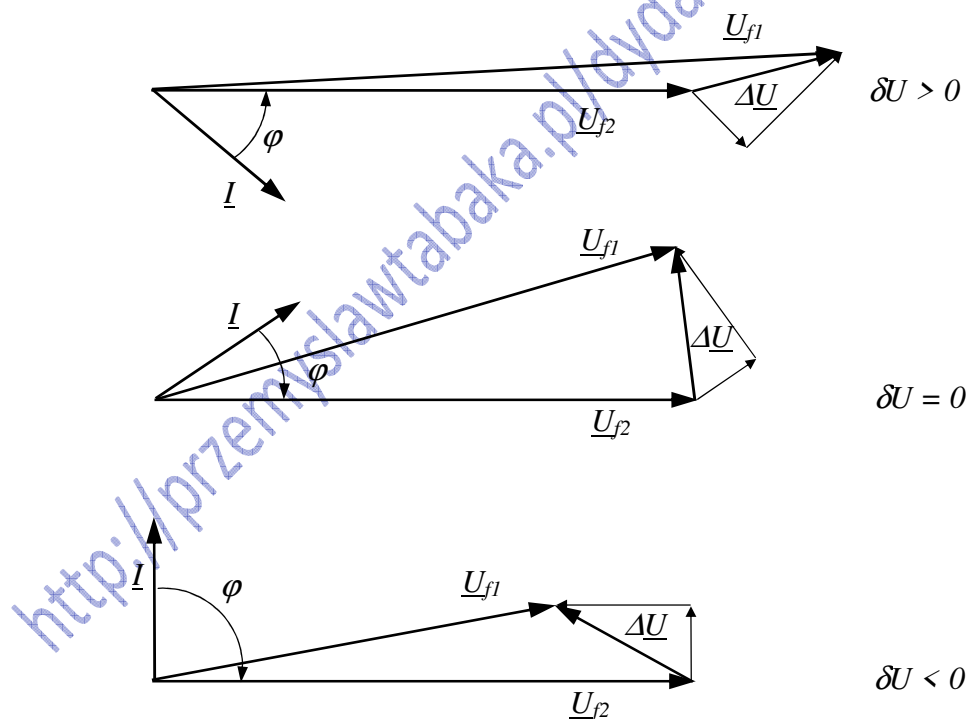
$$\Delta U'' = I'' R_L + I' X_L \quad (3.8)$$

Między stratą i spadkiem napięcia zachodzi bardzo istotna różnica. Strata napięcia równa iloczynowi $\underline{I} \underline{Z}_L$ występuje zawsze, ilekroć przez linię o impedancji \underline{Z}_L płynie prąd \underline{I} , natomiast w zależności od rodzaju impedancji i przesunięcia fazowego prądu (wynikającego z charakteru obciążenia linii), przy tej samej wartości bezwzględnej straty napięcia, spadek napięcia może być:

- dodatni,
- ujemny (tzn. że występuje na końcu linii wzrost napięcia, zamiast obniżenia),
- równy zero.

Straty napięcia i spadki napięcia dla trzech wymienionych przypadków graficznie przedstawiono na wykresach wskazowych (rys. 3.3.) – dla linii II –go rodzaju.

Ujemny spadek napięcia może wystąpić jedynie w linii, dla której reaktancja nie równa się zero. Stosunkowo dużą reaktancję mają linie napowietrzne.

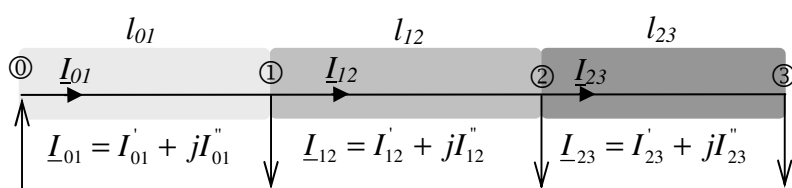


Rys. 3.3. Straty i spadki napięcia w linii dla różnych przypadków obciążenia

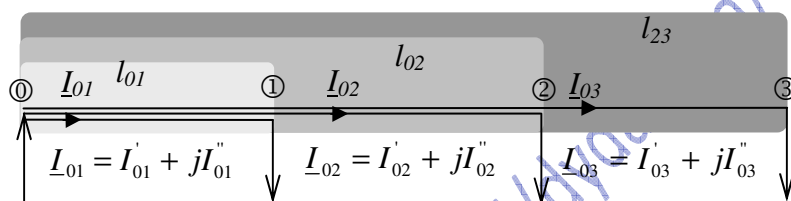
Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

W sieciach rozdzielczych o dużej liczbie odbiorów spadki napięć można wyznaczyć jedną z dwóch metod:

- *sumowania odcinkami* – polegającą na sumowaniu spadków napięć w poszczególnych odcinkach sieci (rys. 3.4.),
- *sumowania momentami* – polegającą na sumowaniu spadków napięć spowodowanych odbiorami na odcinku od punktu zasilania do punktu odbioru (rys. 3.5.).



Rys. 3.4. Graficzna ilustracja metody sumowania odcinkami



Rys. 3.5. Graficzna ilustracja metody sumowania momentami

Dla linii I-go rodzaju przy obliczaniu spadku napięcia w całej sieci *metodą sumowania odcinkami*, w obwodzie trójfazowym będzie obowiązywała zależność (3.9):

$$\delta U_{o-n} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{i-1,i} \cdot I'_{i-1,i} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{l_{i-1,i}}{\gamma \cdot s} \cdot I'_{i-1,i} \quad (3.9)$$

gdzie:

- o – początkowy punkt (węzeł) sieci,
- i – numer węzła,
- n – liczba węzłów w linii,
- $R_{i-1,i}$ – rezystancja odcinka linii między węzłami $i-1$ a i ,
- $I'_{i-1,i}$ – składowa rzeczywista prądu płynąca w odcinku między węzłami $i-1$ a i ,
- $l_{i-1,i}$ – długość odcinka między węzłami na odcinku $i-1$ a i ,
- s – przekrój przewodów,
- γ – konduktywność (przewodność właściwa) materiału przewodzącego.

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

Czyli rezystancje odcinków toru obciążonego wielokrotnie mnoży się przez składowe rzeczywiste prądów płynących w tych odcinkach.

Jeśli cały tor przesyłowy został wykonany przewodem o tych samych parametrach (jednakowy przekrój, ten sam materiał żył), to iloczyn $\gamma \cdot s$ można wyciągnąć przed znak sumy i zależność (3.9) przebierze postać (3.10).

$$\delta U_{o-n} = \frac{1}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{i-1,i} \cdot I'_{i-1,i} \quad (3.10)$$

Powyzsza zależność obowiązuje dla linii trójfazowych. W liniach jednofazowych (z uwagi na to, że prąd płynie dwoma przewodami), należy uwzględnić rezystancję obu przewodów roboczych. Ponieważ oba przewody – fazowy i neutralny są jednakowe, zatem wystarczy oporność jednego z nich pomnożyć przez dwa (3.11).

$$\delta U_{o-n} = \frac{2}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{i-1,i} \cdot I'_{i-1,i} \quad (3.11)$$

W linii II-go rodzaju obok rezystancji należy uwzględnić jeszcze reaktancje (4.12)

$$\delta U_{o-n} = \sum_{i=1}^{i=n} [R_{i-1,i} \cdot I'_{i-1,i} - X_{i-1,i} \cdot I''_{i-1,i}] \quad (3.12)$$

gdzie:

$I''_{i-1,i}$ – składowa urojona prądu płynąca w odcinku między węzłami $i-1$ a i

$X_{i-1,i}$ – reaktancja na odcinku między węzłami $i-1$ a i

Po wyciągnięciu parametrów jednostkowych przed znak sumy otrzymamy (3.13)

$$\delta U_{o-n} = \frac{1}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{i-1,i} \cdot I'_{i-1,i} - X_k \sum_{i=1}^{i=n} l_{i-1,i} \cdot I''_{i-1,i} \quad (3.13)$$

gdzie:

X_k – reaktancja kilometryczna (jednostkowa),

reszta oznaczeń identyczna jak w zależności (3.9) i (3.12).

Nieco inaczej oblicza się spadki napięć w całej sieci *metodą sumowania momentami*. W linii I-go rodzaju spadek napięcia wyznaczmy z zależności (3.14)

$$\delta U_{o-n} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{o,i} \cdot I'_i \quad (3.14)$$

gdzie:

$R_{o,i}$ – rezystancja na odcinku $0-i$

I'_i – składowa rzeczywista prądu pobieranego w i -tym węźle

Zamiast prądów odcinkowych w metodzie momentów operuje się prądami poszczególnych odbiorów, co pozwala uniknąć sumowania prądów w poszczególnych odcinkach sieci.

Linie elektroenergetyczne – wybrane podstawy teoretyczne

Jeśli cała sieć ma jednakowy przekrój i rodzaj materiału przewodowego, to zależność (3.14) zapiszemy w postaci (3.15) dla linii trójfazowej i (3.16) dla linii jednofazowej

$$\delta U_{o-n} = \frac{1}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{o,i} \cdot I'_i \quad (3.15)$$

$$\delta U_{o-n} = \frac{2}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{o,i} \cdot I'_i \quad (3.16)$$

gdzie:

$l_{o,i}$ – długość odcinka $0-i$

Spadki napięć metodą momentów dla linii II-go rodzaju można wyznaczyć z zależności (3.17) lub (3.18)

$$\delta U_{o-n} = \sum_{i=1}^{i=n} [R_{o,i} \cdot I'_i - X_{o,i} \cdot I''_i] \quad (3.17)$$

$$\delta U_{o-n} = \frac{1}{\gamma \cdot s} \sum_{i=1}^{i=n} l_{o,i} \cdot I'_i - X_k \sum_{i=1}^{i=n} l_{o,i} \cdot I''_i \quad (3.18)$$

gdzie:

I''_i – składowa urojona prądu pobieranego w i -tym węźle
reszta oznaczeń identyczna jak w zależności (3.9) i (3.14).