

Piotr Kolber*, Janusz Piechocki**

*Katedra Eksploatacji Maszyn

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

**Katedra Elektrotechniki i Energetyki

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

ANALIZA WPŁYWU NIESYMETRII OBCIĄŻEŃ ODBIORCÓW WIEJSKICH NA JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W LINII NISKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ stopnia niesymetrii obciążeń odbiorców wiejskich na wartości wybranych parametrów jakościowych energii elektrycznej w linii niskiego napięcia. Zrealizowano to poprzez badania za pomocą programu symulacyjnego wykorzystującego m.in. wyniki pomiarów obciążeń u odbiorców dla linii o ustalonej długości, topografii, przekroju przewodów i wartości pobieranej mocy.

Słowa kluczowe: niesymetria obciążeń, parametry jakościowe energii elektrycznej

Wstęp

Zagadnienie niesymetrii obciążeń w liniach niskiego napięcia, wynikające w głównej mierze z niesymetrii obciążeń odbiorców, wiąże się z jakością dostarczanej energii. Niesymetria ta niekorzystnie wpływa na wielkość strat przesyłania i zwiększenie kosztów eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Powoduje również zwiększone spadki i odchylenia napięcia, a więc konieczne jest uwzględnienie jej przy projektowaniu sieci.

Problem ten ma szczególne znaczenie w sieciach wiejskich, gdzie mamy linie stosunkowo długie przy relatywnie niewielkiej liczbie odbiorców. Ponadto w sieciach tych użytkowane są odbiorniki jednofazowe o dużej mocy [Jaworski, Piechocki 2000], których wpływ na nierównomierność obciążeń fazowych jest najdotkliwszy.

Urządzenia elektryczne są projektowane przy założeniu, że będą pracować w warunkach normalnych, przy pracy ciągłej, gdy układy napięć i prądów tworzą układy symetryczne. Niezachowanie tej symetrii powoduje m.in.: zwiększenie poboru mocy czynnej, przyspieszenie starzenia izolacji, skrócenie „żywności” odbiorników elektrycznych, zmniejszenie strumienia źródeł światła itd.

W sieciach niskiego napięcia niesymetria obciążeń jest efektem nierównomiernego rozkładu obciążeń na poszczególne fazy, który wynika z nierównomiernego rozkładu mocy odbiorników jednofazowych na fazy linii i losowego charakteru włączania ich do sieci. Wpływ na niesymetrię mają również: niejednakowe fazowe impedancje wzajemne linii elektroenergetycznych, nierówne wartości fazowych rezystancji i reaktancji niektórych odbiorników oraz niesymetria napięć zasilających.

Cel pracy

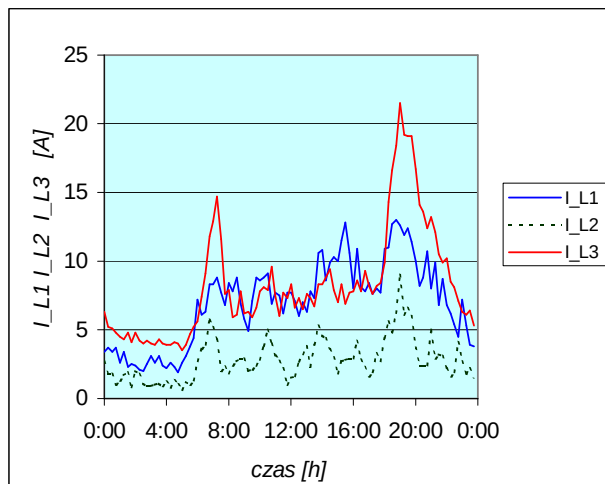
W artykule starano się przedstawić wpływ czynnika jakim jest niesymetria obciążeń odbiorców wiejskich w linii niskiego napięcia na wartość wybranych parametrów określających jakość dostarczanej energii elektrycznej.

Obiekt badań

Obiektem badań jest elektroenergetyczna linia niskiego napięcia, obciążona niesymetrycznie, zasilająca odbiorców wiejskich.

Do analizy przyjęto model linii II rodzaju charakteryzujący się zerowymi wartościami parametrów poprzecznych schematu zastępczego (konduktancja jednostkowa linii $G_o = 0$, susceptancja jednostkowa linii $B_o = 0$). Rozpatrywany typ linii czteroprzewodowej, napowietrznej o płaskim ułożeniu przewodów jest charakterystyczny dla obszarów wiejskich. Jest on również najbardziej rozpowszechniony i najbardziej niekorzystny ze względu na impedancje wzajemne linii w aspekcie niesymetrii obciążeń, a tym samym jakości energii dostarczanej do odbiorców. Przyjęto założenie, że w ogólnym przypadku, odbiory mają charakter rezystancyjno-indukcyjny.

Na rys. 1. przedstawiono przykładowy dobowy wykres prądów fazowych na początku linii niskiego napięcia (nN) zasilanej ze stacji średniego na niskie napięcie (SN/nN). Można na nim zaobserwować wyraźne niezrównoważenie obciążeń fazowych linii będące w głównej mierze wypadkową niesymetrii obciążeń u odbiorców.



Rys. 1. Dobowy wykres wartości prądów fazowych w linii nN zasilanej ze stacji SN/nN

Fig. 1. 24-hour graphs of phase currents value in LV line supplied from MV/LV substation

Niesymetria obciążeń odbiorców

Wartość mocy szczytowej pobierana przez odbiorcę w okresie szczytowego obciążenia jest sumą wartości mocy w poszczególnych fazach pobieranych w tym okresie. Pośród każdej grupy wartości trzech mocy fazowych można wyodrębnić: P_{maxi} – moc fazy najbardziej obciążonej, P_{pi} – moc fazy pośrednio obciążonej, P_{mini} – moc fazy najmniej obciążonej. Tak więc moc szczytową w i-tym punkcie odbiorczym linii przedstawia zależność:

$$P_{si} = P_{maxi} + P_{pi} + P_{mini} \quad (1)$$

Na podstawie powyższych mocy można określić współczynniki będące miarą niezrównoważenia obciążeń fazowych odbiorcy [Kujaszczyk 1991]:

– współczynnik obciążenia pośredniego

$$k_{1i} = \frac{P_{pi}}{P_{maxi}} \approx \frac{I_{pi}}{I_{maxi}} \quad (2)$$

- współczynnik obciążenia minimalnego

$$k_{2i} = \frac{P_{mini}}{P_{maxi}} \approx \frac{I_{mini}}{I_{maxi}} \quad (3)$$

- współczynnik obciążenia maksymalnego

$$w_i = \frac{P_{maxi}}{P_{si}} \quad (4)$$

Pomiędzy powyższymi współczynnikami zachodzi relacja określona zależnością:

$$k_{1i} + k_{2i} = \frac{1}{w_i} - 1 \quad (5)$$

W przypadku obciążenia symetrycznego współczynniki te przyjmują wartości: $k_{1i} = 1$, $k_{2i} = 1$, $w_i = 1/3$, natomiast w przypadku skrajnej niesymetrii, kiedy całkowita moc pobierana jest przez jedną fazę, wartości ich są następujące: $k_{1i} = 0$, $k_{2i} = 0$, $w_i = 1$. Przedziały wartości poszczególnych współczynników określają zależności:

$$\frac{1}{3} \leq w_i \leq 1 \quad (6)$$

$$k_{1i} \geq k_{2i} \quad (7)$$

dla $w_i \in <1/3 ; 1/2>$

$$\frac{\frac{1}{w_i} - 1}{2} \leq k_{1i} \leq 1 \quad (8)$$

$$\frac{1}{w_i} - 2 \leq k_{2i} \leq \frac{\frac{1}{w_i} - 1}{2} \quad (9)$$

dla $w_i \in <1/2 ; 1>$

$$\frac{\frac{1}{w_i} - 1}{2} \leq k_{1i} \leq \frac{1}{w_i} - 1 \quad (10)$$

$$0 \leq k_{2i} \leq \frac{\frac{1}{w_i} - 1}{2} \quad (11)$$

Kształtowanie się wartości współczynników niesymetrii obciążeń fazowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości współczynników niesymetrii obciążeń fazowych

Table 1. Values of phase load asymmetry coefficients

w_i	1/3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
k_{1i}	1	0,75÷1	0,5÷1	0,33÷0,66	0,125÷0,25	0
k_{2i}	1	0,5÷0,75	0÷0,5	0÷0,33	0÷0,125	0

Na podstawie badań obciążeń fazowych u odbiorców wiejskich wartości współczynników niezrównoważenia w okresie szczytu obciążenia przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości współczynników niezrównoważenia obciążeń fazowych u odbiorców w okresie szczytowego obciążenia

Table 2. The values of phase load imbalance coefficients on the premises of subscribers during peak hours

Liczność szczytów obciążenia: 30	w_i	k_{1i}	k_{2i}
Średnia arytmetyczna	0,541	0,650	0,287
Odchylenie standardowe	0,134	0,233	0,239
Minimum	0,368	0,075	0,002
Maksimum	0,928	0,967	0,783

Parametry jakościowe energii elektrycznej

Niesymetria obciążeń ma istotny wpływ na jakość energii w linii niskiego napięcia. Spośród szeregu parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom jednymi z najistotniejszych są wartość skuteczna i niesymetria napięcia zasilającego. Parametry te charakteryzowane są przez odchylenie napięcia i współczynniki niesymetrii napięciowej określone przez poniższe zależności:

- odchylenie napięcia fazowego

$$\delta U_f = \frac{U_f - U_n}{U_n} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie:

U_f – wartość napięcia fazowego,

U_n – wartość napięcia znamionowego

- współczynnik asymetrii napięciowej kolejności przeciwnej

$$\alpha_{U_2} = \sqrt{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha - \frac{\pi}{3}) - 2U_B U_C \cos(\beta - \frac{\pi}{3}) - 2U_C U_A \cos(\alpha + \beta + \frac{\pi}{3})}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) - 2U_B U_C \cos(\beta + \frac{\pi}{3}) - 2U_C U_A \cos(\alpha + \beta - \frac{\pi}{3})}} \quad (13)$$

$$\alpha_{U_2}^* = \alpha_{U_2} \cdot 100\% \quad (14)$$

- współczynnik asymetrii napięciowej kolejności zerowej

$$\alpha_{U_0} = \sqrt{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 + 2U_A U_B \cos \alpha + 2U_B U_C \cos \beta + 2U_C U_A \cos \beta}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - 2U_A U_B \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) - 2U_B U_C \cos(\beta + \frac{\pi}{3}) - 2U_C U_A \cos(\alpha + \beta - \frac{\pi}{3})}} \quad (15)$$

$$\alpha_{U_0}^* = \alpha_{U_0} \cdot 100\% \quad (16)$$

gdzie:

U_A, U_B, U_C – napięcia fazowe,
 U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – napięcia przewodowe

$$\alpha = \arccos \frac{U_A^2 + U_B^2 - U_{AB}^2}{2U_A U_B} \quad \beta = \arccos \frac{U_B^2 + U_C^2 - U_{BC}^2}{2U_B U_C} \quad (17)$$

Według normy PN-EN 50160 [1998] wartości odchyień napięcia powinny się zawierać w granicach dopuszczalnych:

$$-10\% < \delta U_f < +10\% \quad (18)$$

natomiast wartości współczynnika asymetrii napięciowej

$$\alpha_{U_2} \leq \alpha_{dop} = 2\% \quad (19)$$

Badania symulacyjne

Ze względu na trudności związane z realizacją kompleksowych badań dotyczących obciążeń odbiorców jak również ich kosztowność opracowano program symulacyjny, który umożliwia wyznaczenie wartości wybranych parametrów jakościowych energii elektrycznej. Program jest uniwersalny i pozwala na obliczenie parametrów dla linii o różnej długości, różnym przekroju przewodów, rozmieszczeniu punktów odbiorczych i stopniu niesymetrii obciążeń.

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla napowietrznej linii nN o torze prostym o długości $l=1080\text{m}$. Założono równomierne rozmieszczenie odbiorców wzdłuż linii ($n=10$), którzy byli jednorodni pod względem pobieranej wartości mocy szczytowej, którą określono na poziomie wartości średniej arytmetycznej otrzymanej z wyników badań obciążeń u odbiorców wiejskich ($P_{sg} = 5,753 \text{ kW}$ przy $\cos\varphi = 0,923$). Dla kilku wartości współczynnika obciążenia maksymalnego otrzymanych na podstawie badań własnych:

$$w_i = \bar{w} - \sigma_w = 0,406 \quad w_i = \bar{w} = 0,541 \quad w_i = \bar{w} + \sigma_w = 0,675 \quad w_i = \bar{w} + 2\sigma_w = 0,709$$

generowane były wartości współczynnika k_{1i} z rozkładu jednostajnego w zakresie wartości określonym zależnością (10). Po przekształceniu zależności (5) wyznaczono wartości współczynnika k_{2i} w poszczególnych punktach odbiorczych linii. Na podstawie tak otrzymanych wartości współczynników określających niesymetrię obciążenia u odbiorcy oraz wartości mocy szczytowej wyznaczono moce fazowe w poszczególnych przyłączach. Były one podstawą do obliczenia prądów fazowych. Prądy te w sposób losowy przyporządkowywane były do faz linii. Pozwalało to w efekcie na wyznaczenie poziomów napięć fazowych, a tym samym wartości odchylen napięcia [Kowalski 1996] i współczynników niesymetrii napięciowej, które charakteryzują jakość energii elektrycznej w linii niskiego napięcia.

Wartości wybranych parametrów jakościowych energii elektrycznej otrzymane w wyniku badań symulacyjnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki parametrów jakościowych energii elektrycznej na końcu linii dla zadanego poziomu niesymetrii obciążeń u odbiorców

Table 3. Results of quality parameters of electric energy at the end of a supply line for given level of load asymmetry on subscribers' premises

w_i	α_{U_2}	α_{U_0}	δU_A	δU_B	δU_C
$\bar{w} - \sigma_w = 0,406$	1,12	5,41	-16,9	-8,6	-7,8
$\bar{w} = 0,541$	2,08	9,85	-21	-5,7	-5,5
$\bar{w} + \sigma_w = 0,675$	2,0	10,67	-20,1	-0,8	-11,8
$\bar{w} + 2\sigma_w = 0,709$	2,77	14,39	-23,1	2,9	-12,0

gdzie:

$\bar{w}$, σ_w – wartość średnia i odchylenie standardowe współczynnika obciążenia maksymalnego w_i na podstawie badań własnych dotyczących obciążeń fazowych u odbiorców wiejskich w okresie szczytu obciążenia,

$\alpha_{U_2}, \alpha_{U_0}$ – współczynniki asymetrii napięciowej,
 $\delta U_A, \delta U_B, \delta U_C$ – fazowe odchylenia napięcia.

Podsumowanie

Analiza wyników badań symulacyjnych pozwala stwierdzić o wrażliwości układu, jakim jest linia elektroenergetyczna niskiego napięcia, na stopień niesymetrii obciążeń odbiorców w aspekcie jakości dostarczanej energii elektrycznej. Dla względnie umiarkowanej niesymetrii obciążeń występującej u odbiorców ($w = 0,406$) wartość współczynnika asymetrii napięciowej mieściła się w granicach dopuszczalnych ($\alpha_{U_2} = 1,12\% < \alpha_{dop} = 2\%$), natomiast nastąpiło przekroczenie wartości dopuszczalnej odchylenia napięcia w jednej z faz ($\delta U_A = -16,9\% < -10\%$). W przypadku bardzo wyraźnej niesymetrii obciążeń odbiorców ($w = 0,709$) wartość współczynnika niesymetrii napięciowej przekroczyła wartość dopuszczalną ($\alpha_{U_2} = 2,77\% > \alpha_{dop} = 2\%$) i ponadto wystąpiło przekroczenie wartości dopuszczalnej odchylen napięcia w dwóch fazach, przy czym w jednej z nich bardzo zdecydowanie ($\delta U_A = -23,1\% < -10\%$).

Ze względu na złożoność zjawiska niesymetrii obciążeń konieczne jest opracowywanie modeli symulacyjnych, które wykorzystując dane o sieci, odbiorcach oraz wyniki pomiarów obciążeń u reprezentatywnych odbiorców pozwalają ocenić ryzyko przekroczenia wartości dopuszczalnych wybranych parametrów przesyłanej energii w linii nN. To z kolei umożliwia uwzględnienie niesymetrii obciążeń przy projektowaniu nowej sieci (np. dobór przekroju przewodów), kontroli jakości energii w już istniejącej i ewentualnej jej modernizacji.

Bibliografia

- Jaworski J., Piechocki J. 2000. Zużycie energii elektrycznej przez odbiorców wiejskich. *Inżynieria Rolnicza*. 8 (19), 273-281
- Kowalski Zb. 1996. Wyznaczanie odchylen i spadków napięcia w sieciach niskiego napięcia zasilających niesymetryczne i nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej. *Jakość i użytkowanie energii elektrycznej tom II*.
- Kujszczyk Sz. 1991. *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze tom II*. PWN, Warszawa.
- Polska Norma PN-EN 50160. 1998. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF ASYMMETRIC LOADS
OF RURAL SUBSCRIBERS ON THE QUALITY
OF ELECTRIC POWER IN LV LINES**

Summary

The paper describes how the asymmetry of loads of rural subscribers affects the values of selected electric energy quality indicators in low voltage line. This has been achieved by the study performed with the aid of a simulation program, using, among others, values of load measured on the premises of subscribers using supply line of fixed length, topography, conductors gauge and power drawn.

Key words: asymmetry of loads, quality parameters of electric energy