

Straty w sieciach niskiego napięcia (nN) – analiza przypadków

Krzysztof Billewicz

Straty energii są stałym zjawiskiem ubocznym w energetyce. Największe wartości strat występują po stronie niskiego napięcia. Wyliczenie ich jest jednak utrudnione ze względu na dużą liczbę potrzebnych danych. Przedstawione w artykule wyliczenia zostały wykonane na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, zebranych za pomocą systemu odczytującego dane pomiarowe z liczników energii u odbiorców komunalnych. System umożliwił dalszą obróbkę danych, w szczególności wyznaczenie wartości składowych strat. System został pilotażowo wdrożony w kilku lokalizacjach. Otrzymanych wyników nie można jednak bezpośrednio odnosić do innych, nawet analogicznych podsieci, ponieważ każda z nich może mieć własną specyfikę.

Podział strat w sieciach

Klasyczny podział strat na techniczne i handlowe wydaje się niewystarczający. Trudno bowiem jednoznacznie przypisać do nich pewne wielkości. Wydaje się, że lepszy byłby podział na:

- Straty techniczne – energia tracona w wyniku występowania określonych zjawisk fizycznych, towarzyszących przesyłowi energii (przepływowi prądu) przez sieć lub napięciu w sieci.
- Potrzeby własne – energia zużywana przez urządzenia pomocnicze np. liczniki, energia zużywana zimą na podgrzanie niektórych szafek licznikowych. W sieci elektroenergetycznej są zainstalowane takie urządzenia i zużywają energię, która osobno nie jest mierzona. Jej pobór można wyliczyć, znając moc urządzeń oraz czas pracy (zwykle jest to praca ciągła).
- Straty handlowe – energia niezmierniona wskutek niedostosowania układów pomiarowych do struktury poboru. W jej skład wchodzi również nielegalny pobór energii oraz inne niemierzalne odchylenia.

Sposoby wylizania strat

Wylizanie strat technicznych

Straty obciążeniowe

Straty te, inaczej nazywane stratami podłużnymi lub prądowymi, wyznacza się metodą rozpliwów mocy, znając:

- wartości prądów wylizanych z rzeczywistych danych pomiarowych w określonych odcinkach sieci
- topologię sieci oraz lokalizację odbiorców

- zastosowane kable i przewody – w tym liczbę żył i ich rezystancje.

Na podstawie rezystancji obliczeniowych przewodów wziętych z tabel katalogowych wylizuje się prąd płynący przez poszczególne odcinki kabli i przewodów. Zdaniem niektórych naukowców [2], wartości jednostkowych rezystancji przewodów, podawane w danych katalogowych przez wytwórców, należy zwiększyć o ok. 10%. W tym opracowaniu wartości te jednak nie zostały zwiększone.

W rozpatrywanym układzie mierzona była jedynie energia czynna. Aby wyznaczyć wartość energii biernej i pozornej, a następnie wartość prądu, na podstawie wyników rozmaitych badań [2] przyjęto następujące założenia:

- drobni odbiorcy miejscy, którzy są przyłączeni do sieci nN, pobierają energię przy średnim współczynniku mocy $\cos \varphi_m = 0,93$ ($\operatorname{tg} \varphi_m = 0,395$)
- drobni odbiorcy wiejscy – przy $\cos \varphi_w = 0,87$ ($\operatorname{tg} \varphi_w = 0,250$).

Straty te powstają w wyniku płynięcia prądu przez przewód/kabel o pewnej rezystancji – opisuje je prawo Joule’a-Lenza. Straty obciążeniowe w liniach napowietrznych i kablowych oblicza się ze wzoru:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$\Delta P_{\text{obc}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_L = 3 \cdot I^2 \cdot R_0 \cdot l = \frac{S^2}{U_N^2} \cdot R_0 \cdot l = \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} \cdot R_0 \cdot l$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{obc}} &= \int \Delta P_{\text{obc}} dt = 3 R_0 l \int I^2(t) dt = 3 R_0 l \int \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} dt \\ &= 3 R_0 l \int \frac{P^2 + (P \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2}{U_N^2} dt \end{aligned}$$

Zastosowane uproszczenia przy wylizaniu strat obciążeniowych (opisane szerzej w [5]):

- 1) W przypadku odbiorców trójfazowych zakłada się odbiory symetryczne, czyli równomierne obciążenie wszystkich faz.

dr inż. Krzysztof Billewicz – WINUEL SA,
Wrocławski Park Biznesu

- 2) Do obliczeń używana jest uśredniona wartość 15-minutowa; zakłada się, że przez ten okres obciążenie jest stałe.
- 3) Pobór energii odbiorcy jednofazowego, podłączonego do kabla lub przewodu trójfazowego, został rozłożony proporcjonalnie na 3 fazy. Nie ma algorytmu, dzięki któremu dałoby się wywnioskować, że dane liczniki odbiorcze obciążają tę, a nie inną fazę i są w określony sposób pogrupowane i przypisane do konkretnych faz.
- 4) Straty energii dla kabla lub przewodu jednofazowego są rozpatrywane jednofazowo.
- 5) Zakłada się, że napięcie ma określoną wartość, chociaż w rozpatrywanych lokalizacjach, w których zainstalowany został system AMR (*Automatic Meter Reading* – automatyczny odczyt licznika), faktycznie nie było ono zmierzone. Można zwiększyć dokładność liczenia strat technicznych dodając woltomierz przy transformatorze.

Z powodu tych uproszczeń wynik określa szacunkowo poziom strat, a nie ich dokładne wartości. Należy je interpretować w ten sposób, że rzeczywiste straty techniczne są nie mniejsze niż wyliczone w ten sposób.

Straty wynikające z upływu prądu do ziemi

Potrzeby wynikające z upływu prądu do ziemi przez niedoskonałą izolację (straty poprzeczne na kondunktacjach, napięciowe).

Straty powstałe wskutek upływu prądu do ziemi (godzinowa wartość strat) w linii przez niedoskonałą izolację (rocznych strat upływnościowych energii w zbiorze linii) wylicza się [1] następująco:

$$\Delta E_{u\Sigma} = I_{\Sigma} \Delta P'_{u} = I_{\Sigma} \Delta E'_{u}$$

Jest to wzór uproszczony, ponieważ nie uwzględnia zależności jednostkowych strat mocy $\Delta P'_{u}$ od pogody i napięcia roboczego. Założenie jest w pełni do przyjęcia w praktyce. Można przyjąć [1], że wartości przeciętne jednostkowych strat mocy $\Delta P'_{u}$ dla linii napowietrznych nN wynoszą 1,5 W/km.

Inne straty

Dodatkowo można wyznaczyć średnie roczne straty mocy, powstające na upływności (dielektryczne) w elementach sieci niskiego napięcia [2]. Wynoszą one dla wewnętrznych linii zasilających – WLZ – 0,02–0,15 W na WLZ oraz dla instalacji zalicznikowych odbiorców 0,1–1,0 W na instalację. Ze względu na ich niewielką wartość w stosunku do pozostałych, zostały one pominięte. Straty na instalacjach zalicznikowych odbiorców znajdują się poza rozpatrywanym obszarem mierzenia strat. Ich poziom jest znacznie mniejszy niż dokładność pomiaru energii przez liczniki odbiorcze, przeważnie klasy 2.

Występują również straty wynikające z wydzielania się ciepła na niedociśniętych złączkach, łączących ze sobą końcówki odcinków sieci.

Wyliczanie potrzeb własnych

Pobór energii elektrycznej przez zainstalowane liczniki

Można tu wyróżnić pobór:

- mocy w obwodzie/obwodach napięciowych
- mocy w obwodzie/obwodach prądowych
- mocy w obwodzie pomocniczym
- przez odbiorcę prądu o wartości mniejszej niż próg rozruchowy.

Powyższe parametry określone są przez producenta danego licznika.

Uproszczony wzór wg [1] wyliczania rocznych strat energii w licznikach (MWh) wygląda następująco:

$$\Delta E_{03} = (1,5N_{03j} + 3,5N_{03t}) \cdot 10^{-6}$$

Pobór energii elektrycznej czynnej przez liczniki energii elektrycznej zainstalowane w danej lokalizacji wyliczono na podstawie danych katalogowych [kWh]:

$$\Delta E_{liczników} = \sum_{i=1}^{n_s} E_i = \sum_{i=1}^{n_s} (E_U \cdot k_U + E_I \cdot k_I + E_P)_i$$

Przepływ prądu o wartości mniejszej niż próg rozruchowy licznika

Straty wynikające z przepływu prądu przez licznik mniejszego niż próg rozruchowy nie są wielkie, rzędu 0,2 kWh/odbiorcę i dobę. Ta wielkość nie jest jednak zbyt pewna, ponieważ dokładniej była badana w latach 1970–1980 i nie jest aktualna. Straty te są zbyt małe, żeby przeprowadzić w istniejących warunkach nowe, kosztowne badania, nierokujące większych korzyści [2].

Pobór energii elektrycznej przez grzałkę

Dodatkowo w skład strat wchodzi energia zużywana zimą na potrzeby podgrzania niektórych szafek licznikowych, zwłaszcza tych, znajdujących się na wolnym powietrzu przy transformatorach. Energia zużywana na ten cel nie jest osobno mierzona. Obecnie w sieci komunalnej odchodzi się od takiego rozwiązania, ponieważ zabudowane tam urządzenia wytrzymują temperaturę do -30°C i same z siebie wydzielają ciepło. Wcześniej stosowano grzałki 50 W. Obecnie stosuje się je głównie na GPZach (Głównych Punktach Zasilania) i tam, gdzie jest zainstalowana skomplikowana aparatura. Mają ok. 50–200 W i załączone są w okresie listopad – marzec.

Wyliczanie strat handlowych

Niedokładność pomiaru energii elektrycznej przez liczniki

Błędy te wynikają z klasy liczników i przyczyniają się do niedokładności metody pomiaru energii przez urządzenia pomiarowe.

W przypadku sumy pomiarów, z których każdy obarczony jest błędem stosuje się wyliczenie **błędu granicznego** [4]. Jest to przypadek najbardziej niekorzystny dla danych pomiarów.

Występuje jednak bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia takiego błędu, w którym błędy systematyczne wszystkich składowych wartości jednocześnie przyjmowałyby wartości graniczne i niekorzystny układ znaków. Wylizanie błędu granicznego prowadzi do zawyżonych wyników. Dlatego częściej jego wartość wylizca się ze wzoru z zastosowaniem różniczki zupełnej. Względny błąd graniczny wylizca się wtedy w następujący sposób:

$$\delta_g = \left| \frac{\partial \Delta E}{\partial E_1} \frac{E_1}{\Delta E} \delta_1 \right| + \left| \frac{\partial \Delta E}{\partial E_2} \frac{E_2}{\Delta E} \delta_2 \right| + \left| \frac{\partial \Delta E}{\partial E_3} \frac{E_3}{\Delta E} \delta_3 \right| + \dots + \left| \frac{\partial \Delta E}{\partial E_n} \frac{E_n}{\Delta E} \delta_n \right| + \left| \frac{\partial \Delta E}{\partial E_{licz.bilans}} \frac{E_{licz.bilans}}{\Delta E} \delta_{bilans} \right|$$

Ponieważ błędy systematyczne przy takich pomiarach układają się losowo dla poszczególnych wielkości mierzonych i niezależnie od siebie, więc błąd wypadkowy można obliczać tak, jak błąd przypadkowy.

Nielegalny pobór energii elektrycznej

Wartości skradzionej energii nie można wylizczyć za pomocą wzoru. Można natomiast próbować ją oszacować. Od wartości różnicy bilansowej należy odjąć wartości wylizczonych pozostałych strat i tak otrzymuje się skorygowaną różnicę bilansową, w której znaczący udział ma wartość nielegalnie pobranej energii.

Straty ewidencyjne

Polegają na przesunięciach odczytów stanów liczników pomiędzy okresami ewidencyjnymi i są spowodowane niejednoczesnością odczytów tych stanów. Występują silnie przy rozliczeniach miesięcznych, nie stanowią problemu przy rozliczeniach rocznych. W systemach AMR w zasadzie nie występują, ponieważ występuje synchronizacja czasu liczników i przesunięcia czasowe pomiędzy odczytami liczników są rzędu kilku sekund.

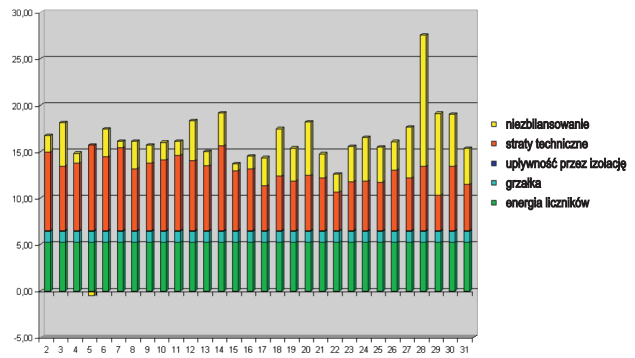
Przykładowe miejscowości

Instalacja wiejska

Opis

Mała wioska znajdująca się przy granicy słowackiej. Rozważana instalacja została wykonana w terenie wiejskim i obejmuje wszystkich odbiorców zasilanych z jednej stacji transformatorowej SN/nN. W skład tej instalacji wchodzi 49 bezpośrednich indukcyjnych oraz elektronicznych liczników energii elektrycznej jedno- i trójfazowych wraz z przystawkami komunikacyjnymi oraz jeden półpośredni licznik bilansujący.

Sieć napowietrzna ma ok. 30 lat i była wielokrotnie zrywana, najczęściej na skutek wiejących tam wiatrów halnych. Połączona jest wieloma złączkami. Na początku instalacji systemu pracownicy spółki dystrybucyjnej za pomocą kamery termowizyjnej sprawdzali,



Rys. 1. Wieś. Podział dobowego niezbilansowania na poszczególne straty (kWh)

na których złączkach wydziela się dużo ciepła (w wyniku większej rezystancji). Zły styk utrudniał transmisję danych z liczników. W ramach prac dostosowujących sieć, kilka przyłączy zostało przeniesionych na zewnątrz budynków.

Wyniki obliczeń

Uwzględniając pomiary energii zużytej przez okres od 2 marca do 31 marca 2004 r., potrzeby bilansowe kształtują się na poziomie 4,93 %. Wartość niezbilansowania pomniejszona o energię zużywaną przez liczniki i straty wynikające z upływności, oraz straty obciążeniowe są na poziomie 1,05 %. Skład poszczególnych strat prezentuje tab. 1.

Tab. 1

Straty	Wartość (kWh)	Udział procentowy w energii dostarczonej do sieci (%)	Udział procentowy w różnicy bilansowej (%)
licznik bilansujący	10 098,6	-	-
suma liczników odbiorczych	9 600,9	95,07	-
różnica bilansowa	497,8	4,93	-
energia liczników	157,0	1,55	31,53
grzałka	36,0	0,36	7,23
upływność	2,3	0,02	0,47
straty techniczne	196,9	1,95	39,55
inne straty	105,6	1,05	21,22

Wnioski

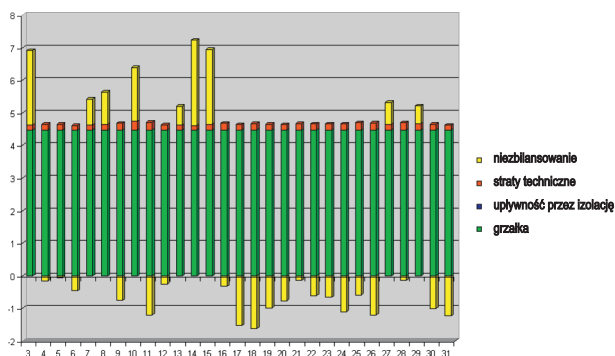
System działał od września 2003 r., bardzo często był dostępny komplet odczytów z liczników. Straty techniczne były wyznaczane na podstawie bardzo szczegółowych schematów sieci. Jest to przykładowe miejsce, gdzie szafka licznikowa przy transformatorze była podgrzewana grzałką.

Wykonane wyliczenia wskazują, że z dużym prawdopodobieństwem można powiedzieć, że nie występuje tam nielegalny pobór energii, ponieważ wartość pozostałych (nieokreślonych strat) jest na dość niskim poziomie, jak na sieć wiejską.

Instalacja miejska

Opis

W dużym mieście w 2002 r. został wybudowany nowy budynek mieszkalny. Liczniki zostały zamontowane na klatkach schodowych. W budynku tym zainstalowany został system zdalnego odczytu liczników odbiorczych.



Rys. 2. Duże miasto. Rzeczywisty wykres zależności dobowej różnicy bilansowej względnie od czasu

Rozważana instalacja obejmuje wszystkich odbiorców zasilanych z jednej stacji transformatorowej SN/nN. W skład tej instalacji wchodzi 44 bezpośrednich indukcyjnych oraz elektronicznych liczników energii elektrycznej jedno- i trójfazowych wraz z przystawkami komunikacyjnymi oraz 1 półpośredni licznik bilansujący.

Uwzględniając pomiary energii zużytej przez okres od 3 marca do 31 marca 2004 r., potrzeby bilansowe kształtują się na poziomie 2,19 %. Niezbilansowanie, pomniejszone o energię zużywaną przez liczniki oraz

Tab. 2

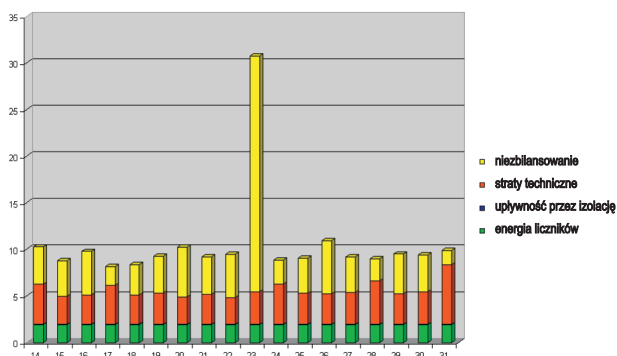
Straty	Wartość (kWh)	Udział procentowy w energii dostarczonej do sieci (%)	Udział procentowy w różnicy bilansowej (%)
licznik bilansujący	6068,0	-	-
suma liczników odbiorczych	5935,2	97,81	-
różnica bilansowa	132,8	2,19	-
energia liczników	129,7	2,14	97,65
grzałka	0,0	0,00	0,00
upływność	0,1	0,00	0,05
straty techniczne	5,4	0,09	4,08
inne straty	-2,4	-0,04	-1,78

straty techniczne, jest na poziomie -0,04 %. Z tego wynika, że odbiorcy i liczniki zużywają więcej energii niż jest dostarczone. Wynika to z faktu, że dla liczników klasy 2 błąd pomiaru energii może być na poziomie $\pm 2\%$. Skład poszczególnych strat prezentuje tab. 2.

Małe miasto

Opis

W mieście w kilku budynkach został zainstalowany system zdalnego odczytu liczników odbiorczych. Rozważana instalacja obejmuje wszystkich odbiorców zasilanych z jednej stacji transformatorowej SN/nN. W skład tej instalacji wchodzi 69 bezpośrednich elektronicznych liczników energii elektrycznej jedno- i trójfazowych wraz z przystawkami komunikacyjnymi oraz 15 bezpośrednich liczników bilansujących.



Rys. 3. Małe miasto. Rzeczywisty wykres zależności dobowej różnicy bilansowej względnie od czasu

Na każdej fazie odejścia od transformatora został zainstalowany licznik bilansujący. Dodatkowo zostało założonych 12 liczników bilansujących: po jednym na każdej fazie każdego z 4 przyłączy.

Uwzględniając pomiary energii zużytej przez okres od 14 października do 31 października 2004 r., potrzeby bilansowe kształtują się na poziomie 2,97 %.

Tab. 3

Straty	Wartość (kWh)	Udział procentowy w energii dostarczonej do sieci (%)	Udział procentowy w różnicy bilansowej (%)
licznik bilansujący	6396,5	-	-
suma liczników odbiorczych	6206,6	97,03	-
różnica bilansowa	190,0	2,97	-
energia liczników	35,0	0,55	18,43
grzałka	0,0	0,00	0,00
upływność	0,1	0,00	0,03
straty techniczne	66,0	1,03	34,75
inne straty	88,9	1,39	46,80

Pomniejszone o energię zużywaną przez liczniki oraz straty obciążeniowe, niezbilansowanie jest na poziomie 1,39 %.

Zastanawiający może być dobowy wzrost wartości strat, który wystąpił 23 października. Wynika on z prowadzonych tego dnia prac wdrożeniowo-serwisowych przy uruchamianiu i testowaniu systemu zdalnego odczytu energii po sieci energetycznej. Pomiedzy licznik bilansujący a liczniki odbiorcze zostało podłączonych kilka urządzeń: komputery, urządzenia kontroli jakości transmisji danych po sieci nN i in. Skład poszczególnych strat prezentuje tab. 3.

Wnioski z instalacji miejskich

Instalacje w miastach również różnią się od siebie. W małym mieście analizowana sieć znajduje się w starszych, ale już powojennych, budynkach. W dużym mieście natomiast jest to nowy budynek mieszkalny oddany do użytku w 2003 r. W budynku tym nie ma gazu. Każdy z odbiorców ma licznik trójfazowy, ponieważ zakłada się, że będzie korzystał z kuchni elektrycznej. Liczniki jednofazowe występują jedynie w garażach. W dużym mieście liczniki energii znajdują się poza lokaliami mieszkalnymi. Wyniki dokonanych wyliczeń poszczególnych składowych strat pokazują, że nie zachodzi tam podejrzenie o kradzież energii.

W małym mieście, na podstawie wartości niezbilansowania można podejrzewać, że występuje tam nielegalny pobór energii. Wyliczone zużycie energii przez liczniki jest tam ok. 3 razy mniejsze niż w pozostałych lokalizacjach. Wynika to z faktu zastosowania tam wielu liczników jednofazowych, które charakteryzują się niższym poborem energii niż trójfazowe.

Interpretacja wyników

Otrzymane wyniki nie umożliwiają wyciągnięcia generalnych wniosków co do wszystkich takich sieci. Mogą jednak posłużyć do dalszej analizy. W instalacji wiejskiej niezbilansowanie jest większe niż w na obszarach miejskich. Większe są również tzw. pozostałe straty, w skład których głównie wchodzi straty energii na złączkach zerwanych wcześniej linii napowietrznych (nieprawidłowo dociśnięte styki grzeją się).

Straty techniczne w lokalizacji wiejskiej mają dużo większe wartości niż w przypadku instalacji miejskich. Do wyliczeń zostały użyte schematy sieci. W małym mieście np. na schematach nie zaznaczono i nie opisano krótkich przewodów łączących poszczególne liczniki odbiorcze (przyłącza) z ciągiem (przewodami lub kablami) głównym. Ze szczegółowej analizy przypadku wynika, że małe prądy płynące przez te przewody mają niewielki wpływ i stanowią 5–6 % sumarycznej wartości strat technicznych. Największe straty występują w tych przewodach, przez które płyną największe prądy, czyli odchodzących bezpośrednio od transformatora.

Wartość energii zużywanej przez liczniki w zasadzie nie zależy od wielkości miejscowości. Różnice wynikają z faktu zastosowania w instalacji w małym mieście wyłącznie nowoczesnych liczników elektronicznych zintegrowanych z modułem komunikacyjnym do przesyłania danych po sieci energetycznej. Natomiast w pozostałych instalacjach w większości przypadków do istniejących liczników indukcyjnych przyłączono, przez wyjście impulsowe, moduł komunikacyjny. Wyliczona wpływność sieci jest pomijalnie mała.

Bibliografia

1. Konstanciak M., *Obliczanie potrzeb własnych oraz ocena sprawności wiejskich sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia*, WINUEL, Wrocław 1997.
2. Kulczycki J., *Ograniczanie strat energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych*, PTPIREE, Poznań 2002.
3. Popczyk J., *Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1991.
4. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., *Metrologia elektryczna*, Warszawa 1998.
5. Billewicz K., *Funkcje wyliczające straty w sieciach nN jako funkcje zmiennych losowych*, Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2006, s. 24–30. ■