

Ewelina PLIKUNAS\*

## **ANALIZA WPLYWU DŁUGOŚCI LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ SN NA POCHODZĄCE OD PRĄDÓW ODKSZTAŁCONYCH JEDNOSTKOWE STRATY MOCY CZYNNEJ**

W referacie podjęto dyskusję nad wpływem budowy linii elektroenergetycznej SN na jednostkowe straty mocy czynnej w liniach SN, wywołane przepływem prądów odkształconych, pochodzących od odbiorców wiejskich. Analizie poddano linię SN zasilającą stację transformatorową SN/nn, do której przyłączony jest odbiorca wpływający na jakość energii elektrycznej, wprowadzający do sieci prądy elektryczne wyższych harmonicznych. Modelowany w programie symulacyjnym fragment rozpatrywanego systemu elektroenergetycznego, analizowany w dziedzinie częstotliwości, wykorzystano do numerycznego obliczenia strat mocy czynnej w linii SN o różnej długości, lecz stałych parametrach skupionych.

SŁOWA KLUCZOWE: straty mocy czynnej, wyższe harmoniczne, linie średniego napięcia

### **1. WPROWADZENIE**

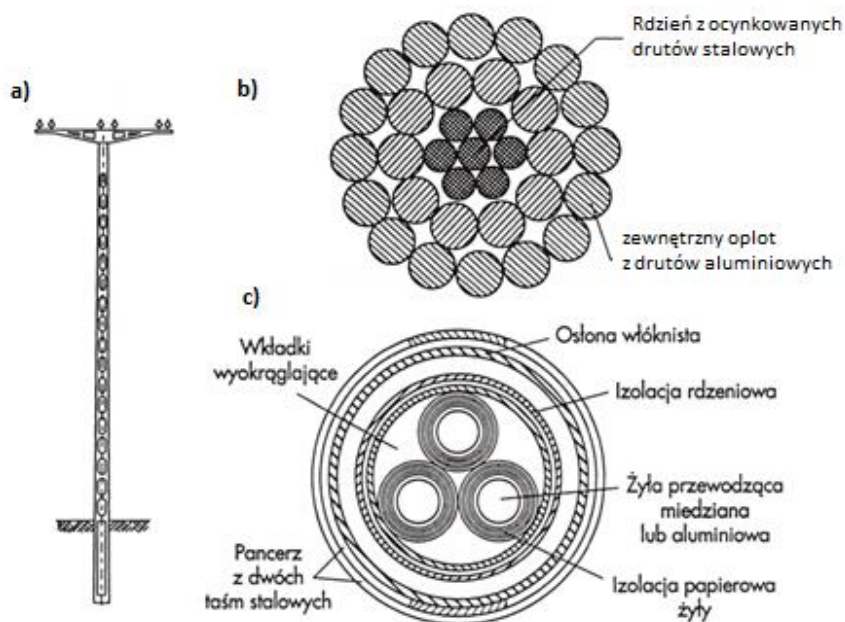
Przesyłowi energii elektrycznej zawsze towarzyszą straty, ponieważ każdy element sieci ma rezystancję, powodującą zamienianie części prądu na ciepło. Dlatego też rozbudowując czy modernizując system elektroenergetyczny, operatorzy powinni wykorzystywać dostępne i jednocześnie uzasadnione ekonomicznie możliwości techniczne w celu minimalizowania strat przesyłowych. W niniejszym referacie podjęto temat strat występujących w sieciach średniego napięcia, stanowiących łącznik pomiędzy napięciem wysokim używanym do przesyłania energii na duże odległości i napięciem niskim – doprowadzanym do odbiorcy końcowego. W sieciach średniego napięcia odbywa się rozdział energii, dlatego cechują się one dużą złożonością i obejmują praktycznie cały kraj. Ze względu na budowę linie można podzielić na napowietrzne z przewodami podwieszanymi na słupach oraz kablowe układane w ziemi w tunelach lub kanałach.

---

\* Politechnika Białostocka.

## 2. LINIE ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

W sieciach elektroenergetycznych średnich napięć wykorzystywane są zwykle trzy podstawowe rodzaje przewodów: gołe, w osłonie izolacyjnej oraz kable (napowietrzne i ziemne). Sieci wykonywane są przeważnie w rozwiązaniu napowietrznym, tzn. w układzie trójprzewodowym na słupach wyposażonych w osprzęt pomocniczy lub w kanałach podziemnych, gdzie trzy jednożyłowe lub jeden trójżyłowy kabel jest prowadzony pod warstwą gruntu. Polskie sieci elektroenergetyczne średniego napięcia są zbudowane w około 80% z linii napowietrznych i blisko 20% z linii kablowych. Na poniższym rysunku 1 przedstawiono schematyczną budowę głównych elementów tworzących linie napowietrzne i kablowe SN [1].



Rys. 1. Elementy składowe sieci napowietrznej i kablowej SN: a) słupy żelbetonowe linii napowietrznych linii SN, b) przekrój poprzeczny przewodu stalowo-aluminiowego linii napowietrznej, c) przekrój poprzeczny kabla elektroenergetycznego

## 3. STRATY W LINIACH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Straty mocy czynnej w liniach średniego napięcia zależą od ich konstrukcji. Zgodnie z prawem Joule'a-Lentza, straty mocy czynnej są wprost proporcjonalne do kwadratu natężenia prądu płynącego przez przewód, rezystancji i długości przewodu. Zatem im większa rezystancja i długość linii, tym większe są w niej

sumaryczne straty. Ze względu na budowę linie można podzielić na napowietrzne z przewodami podwieszanymi na słupach oraz kablowe układane w ziemi w tunelach lub kanałach.

Jednak jakość energii elektrycznej i wielkość strat przesyłowych zależą nie tylko od długości linii przesyłowych i właściwości zastosowanych materiałów. Rozwój technologii sprzyja zwiększaniu się liczby odbiorników energii o nieliniowych charakterystykach prądowo–napięciowych. Powoduje to, że w przebiegach prądów i napięć pojawiają się wyższe harmoniczne prądu, deformujące ich sinusoidalny charakter. Harmoniczne to funkcje sinusoidalnie zmienne o częstotliwości będącej całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej sieci elektroenergetycznej. Obecność harmonicznych prądu sprzyja powstawaniu harmonicznych napięcia. Istotny wpływ na parametry przesyłanej energii ma obecność urządzeń wyposażonych w prostowniki z pojemnościowymi filtrami napięcia, świetlówek, UPSy oraz innych odbiorników o nieliniowych charakterystykach.

Przyjętą miarą zniekształceń nieliniowych, pozwalającą ocenić zawartość harmonicznych w przebiegu wielkości elektrycznej, są współczynniki całkowitych zniekształceń harmonicznych prądu i napięcia – THDi oraz THDu, definiowane wzorami:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I_{(1)}} \quad \text{oraz} \quad THD_u = \frac{\sqrt{U^2 - U_{(1)}^2}}{U_{(1)}}$$

gdzie:  $I$ ,  $U$  – skuteczne wartości prądu napięcia,  $I_{(1)}$ ,  $U_{(1)}$  – prąd i napięcie harmonicznej podstawowej.

W coraz większym stopniu rolę dominujących źródeł zaburzeń harmonicznych stanowią niedużej mocy odbiorniki przemysłowe lecz rozproszone odbiorniki komunalne o niewielkich mocach jednostkowych, ale występujące w dużej liczbie. Do negatywnych skutków obecności wyższych harmonicznych można zakwalifikować m.in.:

- wzrost strat mocy w przewodach,
- wzrost strat mocy z transformatorach (histerezowych, proporcjonalnych od częstotliwości oraz straty od prądów wirowych, wprost proporcjonalnych do kwadratu częstotliwości),
- zwiększone straty mocy i szybsze starzenie baterii kondensatorów,
- wzrost strat w uzwojeniach i magnetowodach, oscylacje mechaniczne, a także zwiększona emisja zakłóceń akustycznych w silnikach i generatorach,
- utrudniony łagodny rozruch silników,
- inne [2].

#### 4. WYNIKI BADAŃ

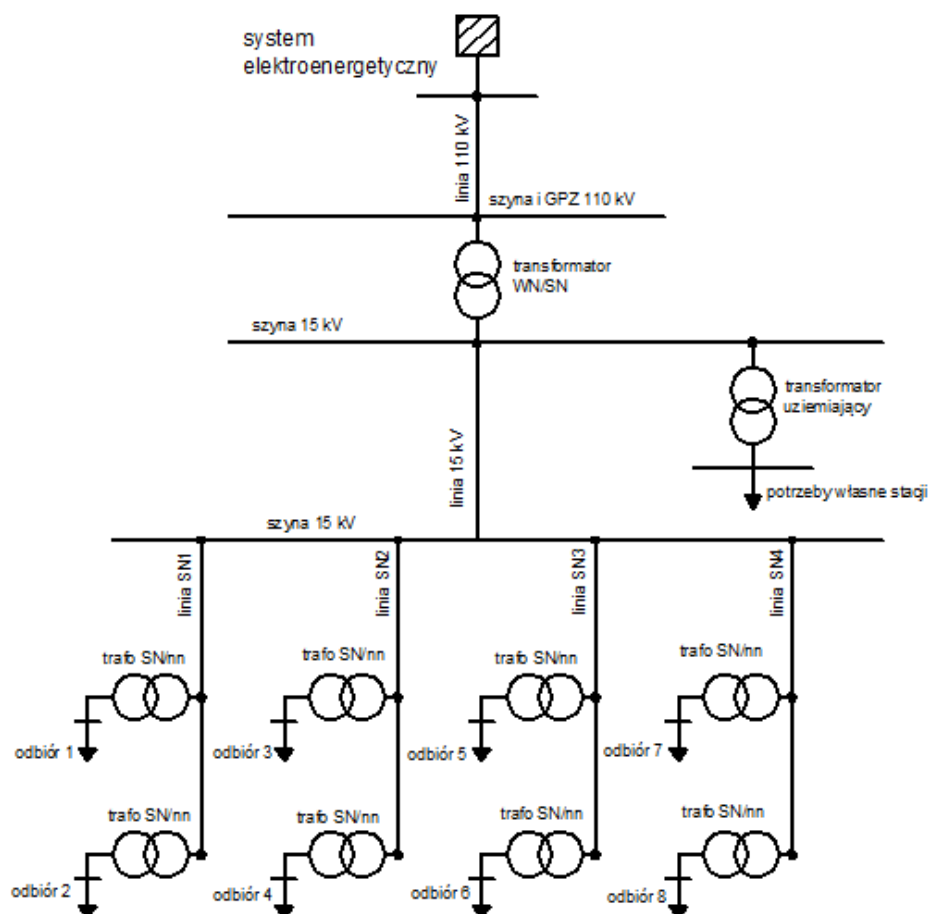
Celem przeprowadzenia symulacyjnych badań wpływu budowy linii elektroenergetycznej średniego napięcia na występujące w nich jednostkowe straty mocy czynnej, przy wykorzystaniu programu DigSILENT PowerFactory Version 14.0, stworzony został model, odwzorowujący rzeczywisty fragment sieci. Rozpatrywany w pracy fragment sieci jest układem połączeń poszczególnych modeli elementów elektroenergetycznych. Każdy element stworzonego modelu charakteryzuje się zestawem parametrów, na podstawie których obliczane są wartości jednostkowych strat mocy czynnej oraz wartości współczynników THDu i HDi. Układ stanowi pojedyncza stacja GPZ. W jej skład wchodzi następujące elementy:

- Jeden transformator energetyczny o mocy znamionowej 40 kVA, transformujący napięcie wysokie 110 kV na średnie 15 kV. Część wysokonapięciowa jest przyłączona do szyn zbiorczych 110 kV, popierających energię elektryczną z elementu reprezentującego system elektroenergetyczny. Część średnionapięciowa jest przyłączona do szyn zbiorczych 15 kV.
- Transformator uziemiający, którego strona pierwotna jest przyłączona do szyn średniego napięcia, zaś strona wtórna do szyn niskiego napięcia stacji GPZ 0,4 kV, do których przyłączono obciążenie reprezentujące potrzeby własne obiektu.
- Linia średniego napięcia, której długość zmieniano dla kolejnych symulacji od 1 do 20 km dla wariantu linii kablowej i napowietrznej,
- Ośmiem transformatorów energetycznych o mocach znamionowych bliskich 1 MVA każdy.
- Linie niskiego napięcia, o identycznych długościach w kolejnych symulacjach.

Schemat rozpatrywanego fragmentu sieci przedstawiono na rys. 2.

Symulacje zostały przeprowadzone dla dwóch wariantów: linii napowietrznej i kablowej. W obu przypadkach analizowano zmienność jednostkowych strat mocy czynnej i odkształceń harmoniczných w funkcji długości linii średniego napięcia, zmieniającej się od 1 do 20 km. Pozostałe parametry układu pozostawały niezmiennie. Podczas przeprowadzania symulacji dla linii napowietrznej, uwzględniono straty związane ze zjawiskiem naskórkowości.

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano wartości procentowych udziałów poszczególnych harmoniczných prądu i napięcia u najdalej położonego odbiorcy przedstawione przez Jerzego Niebrzydowskiego i Grzegorza Hołyńskiego w artykule nt. oceny parametrów jakości energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom wiejskim na podstawie wyników badań, podczas konferencji IV konferencji naukowej JAWK [4].

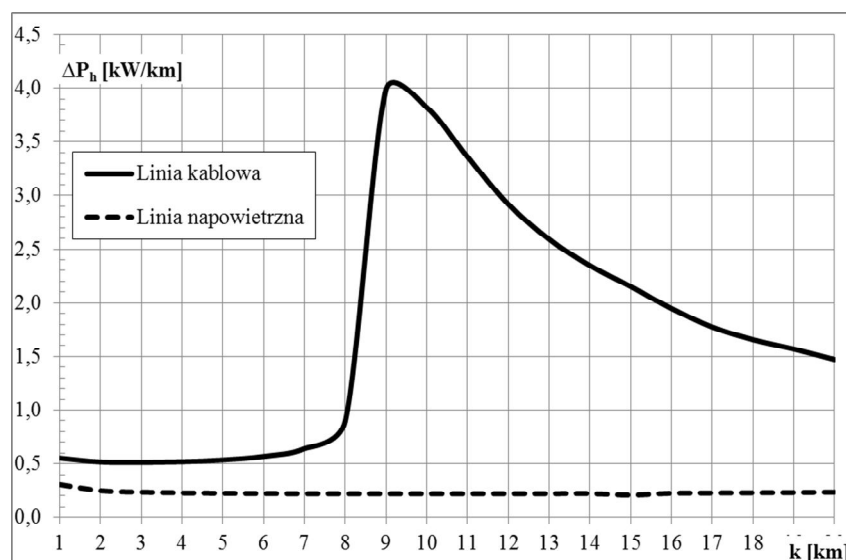


Rys. 2. Schemat rozpatrywanego fragmentu sieci SN

#### 4.1. Jednostkowe straty mocy czynnej

Straty w liniach napowietrznych i kablowych można podzielić na obciążeniowe, jałowe oraz dodatkowe. Straty obciążeniowe mocy czynnej są skutkiem przepływu prądów odkształconych pochodzących od poszczególnych harmonicznych. Są one wprost proporcjonalne do rezystancji przewodu i kwadratu natężenia prądu płynącego przez przewód. W przypadku linii napowietrznych występuje zjawisko naskórkowości, skutkujące wzrostem rezystancji przewodu wraz z rzędem harmonicznej, przyczyniające się do wzrostu strat mocy. Straty jałowe są wywołane zjawiskiem ulotu elektrycznego i upływem w izolacji [3, 5].

Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono wykres jednostkowych strat mocy czynnej w funkcji długości linii.



Rys. 3. Wykres strat mocy linii SN kablowej i napowietrznej

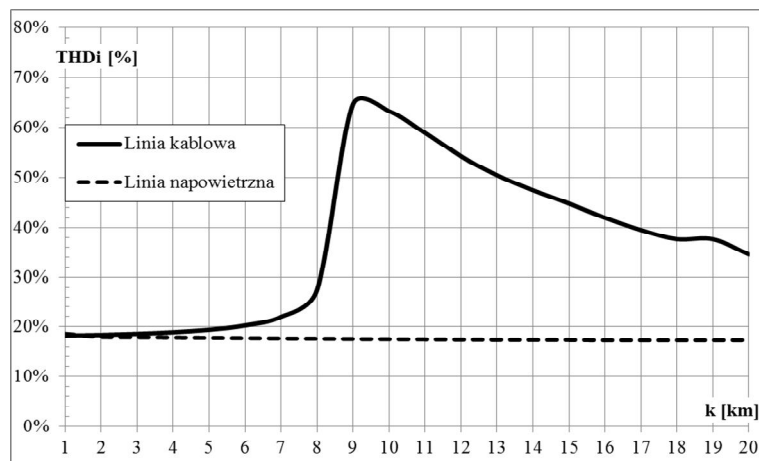
Całkowite straty mocy w liniach średniego napięcia są tym większe im większa jest całkowita długość linii. Jednostkowe straty mocy linii napowietrznych są praktycznie niezmiennie, niezależnie od długości linii. Natomiast w przypadku linii kablowych, wartości jednostkowych strat mocy nie są stałe. Dla długości linii od 1 do 7 km jednostkowe straty mocy czynnej są około dwukrotnie większe w liniach kablowych niż w liniach napowietrznych. Wartość jednostkowych strat mocy czynnej w linii kablowej o długości 9 km jest blisko ośmiokrotnie większa w linii kablowej niż w napowietrznej.

#### 4.2. Współczynnik harmonicznych prądów

Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono wykres wartości współczynnika odkształcenia prądu w funkcji długości linii – rys. 4.

Udział składowych nieliniowych prądu w sieciach napowietrznych SN jest stały niezależnie od jej długości. W sieciach kablowych SN udział składowych harmonicznych prądu zwiększa się wraz z długością linii.

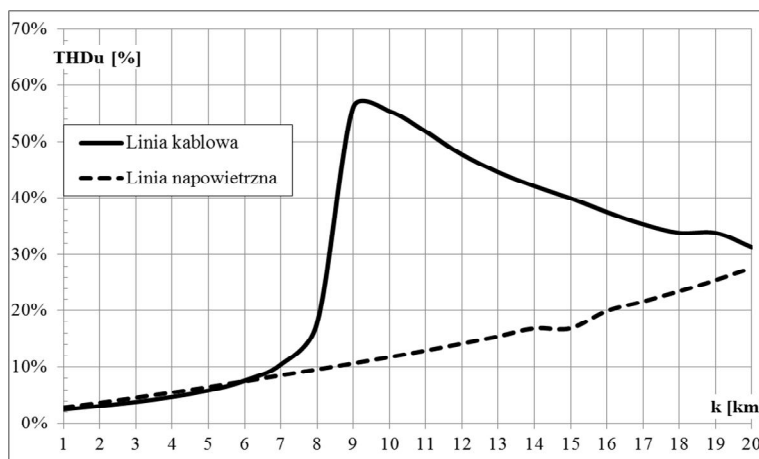
Symulacja komputerowa wykazała, że maksimum udziału wyższych harmonicznych przypada na długość linii wynoszącą 9 km. Po przekroczeniu tej długości udział składowych nieliniowych prądu maleje.



Rys. 4. Wykres wartości współczynnika THDi linii SN kablowej i napowietrznej

#### 4.3. Współczynnik harmonicznych napięć

Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono wykres wartości współczynnika odkształcenia napięcia w funkcji długości linii – rys. 5.



Rys. 5. Wykres wartości współczynnika THDu linii SN kablowej i napowietrznej

Udział składowych wyższych harmonicznych napięć wzrasta wraz z długością zarówno w liniach napowietrznych jak i kablowych. W przypadku linii napowietrznych wzrost udziału wyższych harmonicznych, towarzyszący zwiększaniu długości linii ma charakter liniowy, natomiast w przypadku linii kablowych nieliniowy.

Udział wyższych harmoniczných napięć w liniach SN o długości do 7 km jest niemalże jednakowy w liniach kablowych i napowietrznych. Zwiększenie długości linii kablowej SN skutkuje gwałtownym wzrostem udziału wyższych harmoniczných, którego maksimum przypada na długości linii wynoszącej około 9 km. Symulacja komputerowa wykazała, że zwiększanie długości linii kablowej SN powyżej długości 9 km skutkuje zmniejszaniem jednostkowego udziału wyższych harmoniczných napięć.

## 5. PODSUMOWANIE

Celem opisanych w artykule symulacji komputerowych było określenie zmienności jednostkowych strat mocy czynnej i zawartości wyższych harmoniczných w kablowych i napowietrznych przewodach SN.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych, można stwierdzić, że długość linii napowietrznej średniego napięcia nie wpływa na wartości jej jednostkowych strat mocy czynnej ani na wartości współczynnika THDi. Zwiększanie długości linii napowietrznej średniego napięcia, powoduje wzrost wartości współczynnika THDu.

Zwiększanie długości linii kablowej średniego napięcia od 1 do 7 km, powoduje nieznaczny wzrost wartości jednostkowych strat mocy czynnej oraz współczynników THDi i THDu. Zwiększaniu długości linii SN powyżej 7 km towarzyszy nasilony wzrost jednostkowych strat mocy czynnej i odkształceń pochodzących od wyższych harmoniczných, który swoje maksimum osiąga dla długości linii wynoszącej 9 km. Zwiększaniu długości linii kablowej SN od 9 do 20 km, towarzyszy spadek jednostkowych strat mocy czynnej oraz współczynników THDi i THDu. Zatem zależności pomiędzy jednostkowymi stratami mocy czynnej linii kablowej SN, a jej długością nie mają charakteru liniowego. W liniach SN o długości wynoszącej powyżej 8 km, jednostkowe straty mocy czynnej są znacząco większe w liniach kablowych niż w liniach napowietrznych.

Wykonane symulacje pokazują, że jednostkowe straty mocy czynnej oraz wartości odkształceń pochodzących od prądów harmoniczných w linii napowietrznej SN nie zależą od długości linii. Udział harmoniczných napięć w liniach napowietrznych SN zwiększa się liniowo wraz z długością przewodu.

## LITERATURA

- [1] Arciszewski A., Zawodniak J.J., Linie średniego napięcia w aspekcie awaryjności oraz problemów formalno-technicznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 247, 2010.
- [2] Maciążek M., Pasko M., Skutki oddziaływania wyższych harmoniczných na sieć zasilającą oraz wybrane metody ich eliminacji, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 242, 2009.



- [3] Niebrzydowski J., Sieci elektroenergetyczne, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 1997.
- [4] Niebrzydowski J., Hołdyński G., Ocena parametrów jakości energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom wiejskim na podstawie wyników badań, VI Konferencja Naukowo–Techniczna Jakość energii elektrycznej i ciepłej JAWE'2000. Kołobrzeg, 8–12 maja 2000.
- [5] Żmuda K., Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze– wybrane zagadnienia z przykładami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.

**ANALYSIS THE IMPACT OF LENGTH THE MEDIUM POWER  
TRANSMISSION LINE ON THE UNITARY ACTIVE POWER LOSSES  
DERIVED FROM DISTORTED CURRENTS**

In the paper was discussed the impact of the construction of a medium voltage power line on unit active power losses in the medium voltage power lines, caused by the flow of distorted currents coming from rural customers. Analysed the medium voltage power line supply transformer station MV/LV, connected with receiver affects the quality of the electricity, introducing to network higher harmonics currents. Modelled in the simulation fragment of the power system, analysed in the frequency domain was used to calculate active power losses in line MV of different length but permanent concentrated parameters.

*(Received: 27. 01. 2017, revised: 6. 03. 2017)*