

dr inż. Jerzy Andruszkiewicz

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
jerzy.andruszkiewicz@put.poznan.pl

prof. dr hab. inż. Józef Lorenc

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
jozef.lorenc@put.poznan.pl

mgr inż. Krzysztof Łowczowski

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
krzysztof.lowczowski@put.poznan.pl

mgr inż. Agnieszka Weychan

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, Polska
agnieszka.weychan@put.poznan.pl

dr inż. Józef Zawodniak

Enea Operator sp. z o.o.
ul. Strzeszyńska 58, 60-479 Poznań, Polska
jozef.zawodniak@enea.pl

**Ograniczanie strat energii w żyłach powrotnych linii i mostów kablowych
średniego napięcia wykorzystujących kable jednożyłowe**

**Energy losses' reduction in metallic screens of MV cable power lines
and busbar bridges composed of single-core cables**

Słowa kluczowe: *linie kablowe, sieć średniego napięcia, straty energii, żyła powrotna*

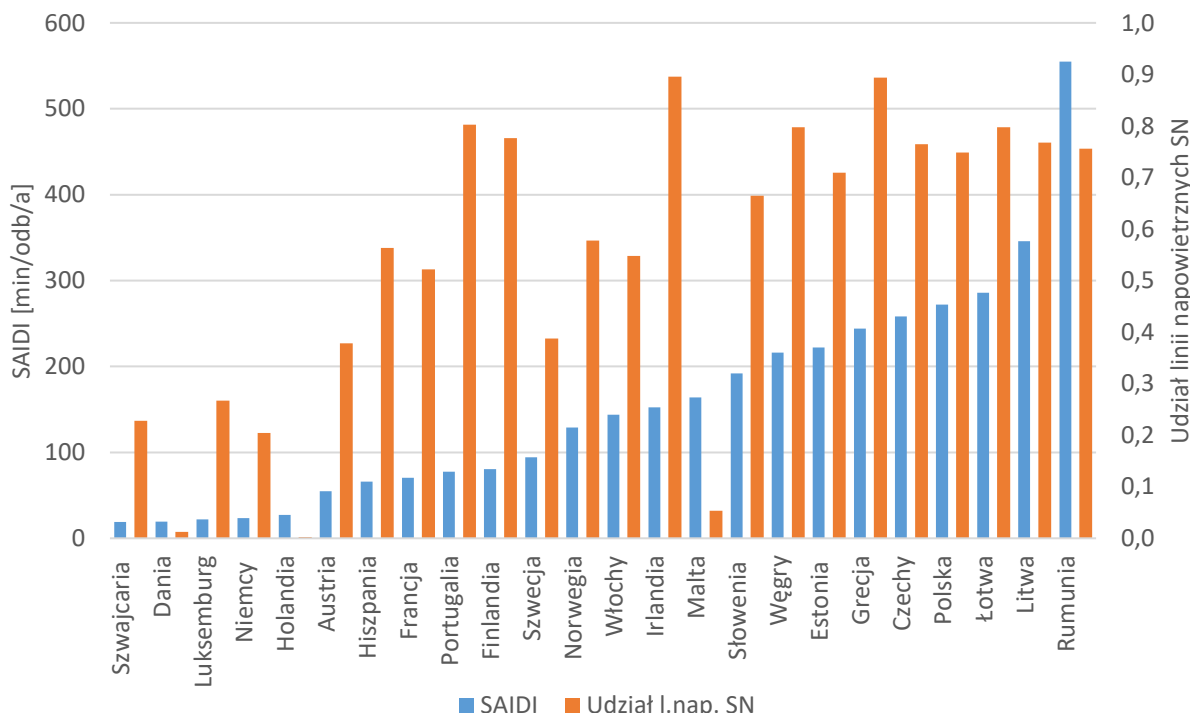
Keywords: *cable lines, medium voltage network, energy losses, metallic cable screen*

Streszczenie: Rosnące skablowanie linii średniego napięcia w sieciach dystrybucyjnych stawia przed operatorami tych sieci wyzwanie prawidłowej eksploatacji linii kablowych. Powiązane jest to z redukowaniem strat energii w żyłach roboczych i powrotnych kabli. W artykule skupiono się na stratach energii w żyłach powrotnych linii oraz mostów kablowych wykonanych przy wykorzystaniu kabli jednożyłowych z metalicznymi żyłami powrotnymi oraz możliwych sposobach ich ograniczania. Przedstawiono analizę symulacyjną i pomiarową poziomu strat energii w żyłach powrotnych kabli wraz z analizą ekonomiczną różnych wariantów ich redukcji poprzez zmianę sposobu pracy tych żył w stosunku do tradycyjnego obustronnego ich uziemienia. Przedstawione zostały również problemy techniczne oraz zagrożenia związane z zastosowaniem rozważanych modyfikacji pracy żył powrotnych podczas zakłóceń zwarciovych w sieciach dystrybucyjnych.

Abstract: The growing share of medium voltage cable lines in distribution networks challenges distribution network operators in terms of proper mode of operation of these lines. It is related to the reduction of energy losses in cable conductors and metallic cable screens. The article focuses on energy losses in metallic cable screens of cable lines and substation busbar bridges composed of single-core cables with metallic screens and possible ways of their reduction. Simulation and measurement analysis of the level of energy losses in the metallic screens of cables is presented together with the economic analysis of various variants of losses reduction through the change of the way these screens are operated in relation to the traditional bilateral earthing at both ends of cable. Technical problems and threats connected with the use of considered modifications of metallic screens operation during earth fault disturbances in distribution networks are also presented.

1. Wstęp

Wskaźniki SAIDI (ang. System Average Interruption Duration Index) charakteryzujące niezawodność dostaw energii elektrycznej z sieci dystrybucyjnej średniego napięcia znacznie odbiegają w Polsce od wskaźników państw europejskich wiodących w tych statystykach. Jedną z istotnych przyczyn tego stanu rzeczy jest stosunkowo niski stopień skablowania odcinków sieci średniego napięcia (SN) nieprzekraczający w Polsce 25% [4]. Spodziewane zyski ze skablowania sieci SN można ocenić porównując średnie wartości wskaźnika SAIDI osiągnięte w polskich sieciach dystrybucyjnych oraz w sieciach zagranicznych o znacznie większym stopniu skablowania. Sieci dystrybucyjne Szwajcarii, Danii, Luksemburga, Niemiec i Holandii, wykorzystujące zasadniczo sieć kablową, osiągają poziom tego wskaźnika wielokrotnie niższy w porównaniu z sieciami o znacznym udziale linii napowietrznych, co zobrazowano na rys. 1.



Rys. 1. Wskaźniki SAIDI w zestawieniu z udziałem linii napowietrznych w całkowitej długości sieci dystrybucyjnej średniego napięcia na podstawie danych z [4]

W celu poprawy tej sytuacji w Polsce przygotowany jest szeroki plan skablowania odcinków sieci charakteryzujących się wysokimi statystycznymi wskaźnikami uszkodzeń obejmujący w dużej mierze odcinki przebiegające przez lasy lub tereny zadrzewione. W nadchodzącym dwudziestolecu należy zatem spodziewać się znaczącego przyrostu sieci kablowej średniego napięcia (SN) na poziomie 40 000 km [40]. Przebudowa istniejących linii napowietrznych na linie kablowe pozwoli więc wyeliminować oddziaływanie klimatyczne i zwiększy niezawodność eksploatacyjną tych odcinków [17, 29]. Ponadto, linie kablowe cechują się mniejszym oddziaływaniem na krajobraz i są łatwiej akceptowane przez społeczeństwo [49].

W ostatnim dwudziestolecu nastąpiły też znaczące zmiany w technologii linii kablowych. Najbardziej powszechnym materiałem izolacyjnym stosowanym jest polietylen usieciowany, a do budowy linii kablowych stosuje się kable jednożyłowe z żyłą powrotną mającą zapewnić skuteczne odprowadzenia prądu zwarciovego i umożliwić szybkie działania zabezpieczeń w linii przed długotrwałym oddziaływaniem tego prądu na pozostałe żyły kabla oraz otoczenie [37, 43]. W przypadku braku żyły powrotnej w pobliżu miejsca zwarcia mogłyby wystąpić także istotne zagrożenia porażeniowe. Szczegółowe wymagania w zakresie ochrony porażeniowej w sieciach SN przedstawiono w [14-16].

Przedstawione okoliczności skłaniają do podjęcia badań nad prawidłową eksploatacją sieci dystrybucyjnej średniego napięcia zawierającej coraz większy udział odcinków linii kablowych wykonanych w nowej technologii przy zastosowaniu trzech kabli jednożyłowych z żyłami powrotnymi. Problemem przedstawionym w niniejszym artykule są straty energii w żyłach powrotnych powstające na skutek stosowania ich obustronnego uziemienia oraz sposoby zapobiegania takim stratom na skutek modyfikacji tradycyjnego sposobu pracy żył powrotnych. Przedyskutowano zalety i wady proponowanych modyfikacji. Zagadnienie to przedstawiono wykorzystując komputerowe symulacje pracy linii kablowych, które zweryfikowano na podstawie pomiarów przeprowadzonych w odcinkach rzeczywistych linii kablowych sieci średniego napięcia jednego z polskich operatorów sieci dystrybucyjnych. Zagadnienie wpisuje się w światowe trendy ograniczania strat energii w sieciach dystrybucyjnych [7].

Straty energii w kablach związane są z występowaniem żyły roboczej, izolacji oraz żyły powrotnej lub innych metalowych powłok kabla. Rozróżnić można straty w żyły roboczej związane z jej rezystancją, straty dielektryczne związane z pojemnością kabla i parametrami izolacji oraz straty w żyłach powrotnych związane z przepływem prądu przez te powłoki i prądami wirowymi [2, 35]. Straty związane z prądami wirowymi są zazwyczaj znacznie mniejsze w żyłach powrotnych niż straty związane z przepływem prądu przez obwód żyły powrotnej i nie zależą od układu połączeń w tym obwodzie [37].

Straty energii w liniach kablowych zależą od przekroju znamionowego żyły roboczej i powrotnej, sposobu ułożenia kabli (układ płaski lub trójkąt), a także w dużej mierze od układu połączeń i sposobu uziemienia żył powrotnych kabli [32, 34, 38, 52]. Im większe odległości pomiędzy kablami jednożyłowymi, niezależnie od grubości poszczególnych żył, tym większe obserwuje się straty w tych układach kabli, stąd znacznie większe straty występować będą w przypadku kabli w układzie płaskim, niż w układzie trójkątnym [20, 37]. W przypadku występowania więcej niż jednego systemu kablowego, przykładowo dwóch kabli trójfazowych obok siebie, straty energii zależą również od kolejności faz w poszczególnych kablach jednofazowych [38].

Najbardziej popularne w sieciach SN w Polsce jest obustronne połączenie i uziemienie żył powrotnych na obydwu końcach odcinka linii kablowej. W układach takich, w warunkach

pracy normalnej pod obciążeniem, na żyłach powrotnych występuje pomijalnie niskie napięcie, ale płyną przez nie prądy indukowane przez prądy w żyłach roboczych, przez co występują dodatkowe straty w żyłach powrotnych, a obciążalność prądowa kabli może ulec obniżeniu. Straty w żyłach powrotnych kabli wywołane przez indukowane prądy zależą od impedancji sprzęgających żył roboczych i żył powrotnych kabla [52]. Dla standardowych kabli średniego napięcia dodatkowe straty w żyłach powrotnych stanowią 2-10% całkowitych strat występujących w kablu [20]. Ze względu na dużą liczbę czynników warunkujących straty w żyłach powrotnych, w najbardziej niekorzystnych przypadkach straty w żyłach powrotnych mogą być większe niż straty w żyłach roboczych kabla [18]. Redukcja strat powstających w żyłach powrotnych jest możliwa poprzez stosowanie alternatywnych układów połączeń i uziemienia żył powrotnych, takich jak jednostronne uziemienie żył powrotnych stosowane w kablach wysokiego napięcia [6, 11, 52] i dołączanie ograniczników przepięć [20, 30], przeplecenia żył powrotnych (ang. cross-bonding) [6, 11, 21, 33] lub przeplecenia w połączeniu z transpozycją kabli [44], dołączanie dodatkowych rezystancji lub indukcyjności w miejscu uziemienia żył powrotnych kabli lub w miejscu uziemienia muf przepleceniowych [24, 32, 46] lub zmniejszanie przekroju żył powrotnych, które bardzo często są przewymiarowane [3, 27, 28, 50]. Rozwiązania te rzadko są jednak stosowane w sieciach średniego napięcia ze względu na obawy przed zagrożeniem porażeniowym lub przepięciowym [11, 20] oraz spodziewane problemy eksploatacyjne z wykrywaniem uszkodzeń kabli ze zmodyfikowanymi układami połączeń [10, 23] i możliwość uszkodzeń dodatkowych muf lub szafek kablowych w przypadku przepleceń żył powrotnych [48]. W niniejszym badaniu podjęto nowe zadanie wyznaczania opłacalności stosowania środków ograniczających straty w żyłach powrotnych i badano tę opłacalność w realnych warunkach rynkowych w zależności od obciążenia linii i zastosowanego sposobu przeciwdziałania stratom w żyłach powrotnych.

Proponowane metody redukcji strat w żyłach powrotnych kabli wymagają również analizy podczas stanów zakłóceń. Analiza zagrożeń porażeniowych w sieciach kablowych [41] powinna uwzględniać wpływ liczby stacji SN/nn pracujących w sieci SN i ich uziemień oraz rezystancji powłok kabli na rozptył prądu ziemnozwarciowego. Rozptył prądu zwarciego w instalacji uziemiającej jest również przedmiotem analizy w [42], gdzie uwzględnia się wpływ metalowych elementów znajdujących się w ziemi. W [5] analizuje się wpływ parametrów powłok kablowych i uziemień na rozptył prądu zwarcia jednofazowego i zagrożenia porażeniowe z tym związane. Nowym podejściem zaprezentowanym w niniejszym artykule są badania symulacyjne i poligonowe rozptyłu prądu zwarcia jednofazowego w przypadkach odziemiania żył powrotnych w celu identyfikacji stopnia wzrostu zagrożenia porażeniowego w takich przypadkach.

Istotnym elementem analizy pracy kabla w sytuacjach zakłóceń jest również badanie przepięć, które mogą występować na odziemionych krańcach żył powrotnych kabla. Zagadnienia dotyczące przepięć są najczęściej analizowane dla linii wysokiego napięcia [6, 20, 48], rzadziej dla linii średniego napięcia [19], jednak ich analiza jest niezwykle istotna dla zapewnienia odpowiedniego stanu izolacji żył powrotnych kabli. W niniejszym artykule zwrócono więc uwagę na możliwe występowanie przepięć przy stosowaniu proponowanych metod redukcji strat w żyłach powrotnych kabli.

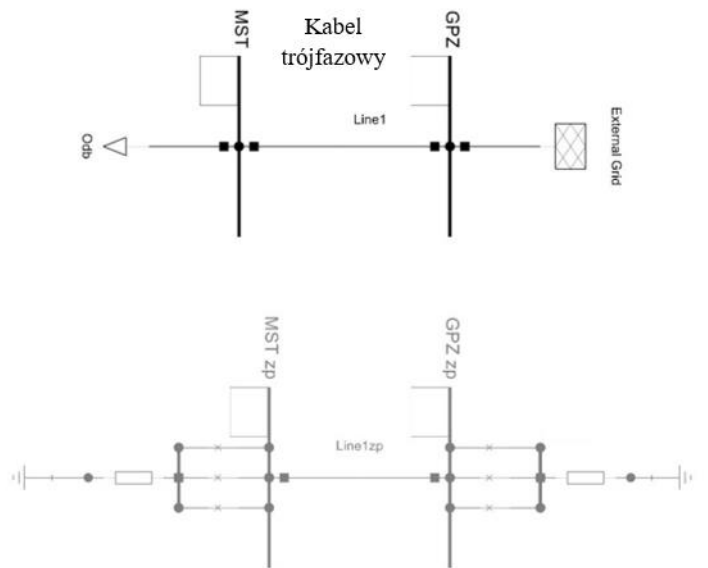
W niniejszym artykule podjęto tę tematykę w celu wypracowania propozycji eksploatacji linii kablowych budowanych w omówionej technologii pozwalającej na redukcję strat w żyłach powrotnych, w uzasadnionych ekonomicznie przypadkach, przy jednoczesnym zachowaniu wymogów w zakresie ochrony przepięciowej, jak również ochrony przeciwporażeniowej na stacjach SN/nn transformujących energię do niższego poziomu

napięcia. W tym celu przeprowadzono szerokie badania symulacyjne sieci średniego napięcia z odcinkami kablowymi, badania na modelach zawierających odcinki rzeczywistych linii kablowych oraz pomiary na odcinkach kabli pracujących w sieci dystrybucyjnej, które opisano poniżej.

2. Modelowanie linii kablowych

Analizowane odcinki linii kablowych pracujących w sieci dystrybucyjnej modelowano przy wykorzystaniu oprogramowania PowerFactory firmy DlgSILENT. W procedurze modelowania linii kablowych tworzony jest najpierw typ kabla jednożyłowego, którego odcinki składają się na kabel trójfazowy. Dane wprowadzane dotyczą wszystkich warstw przewodzących, izolacyjnych i pół-przewodzących, które występują. Wprowadzane są wszystkie parametry geometryczne definiujące przekrój poprzeczny oraz dane definiujące własności wszystkich materiałów składowych.

Posługując się zdefiniowanym typem kabla można utworzyć model symulacyjny systemu kablowego służącego do dystrybucji energii przedstawiony na rys. 2. Danymi uwzględnianymi w tym celu są: typ kabla jednożyłowego wykorzystywanego do budowy systemu kablowego, położenie każdej z żył kabla w stosunku do poziomu ziemi oraz położenie każdej z żył w stosunku do pozostałych żył a także środowisko ułożenia kabla (ziemia, powietrze), częstotliwość, rezystywność gruntu, czy liczba równoległych systemów kablowych.



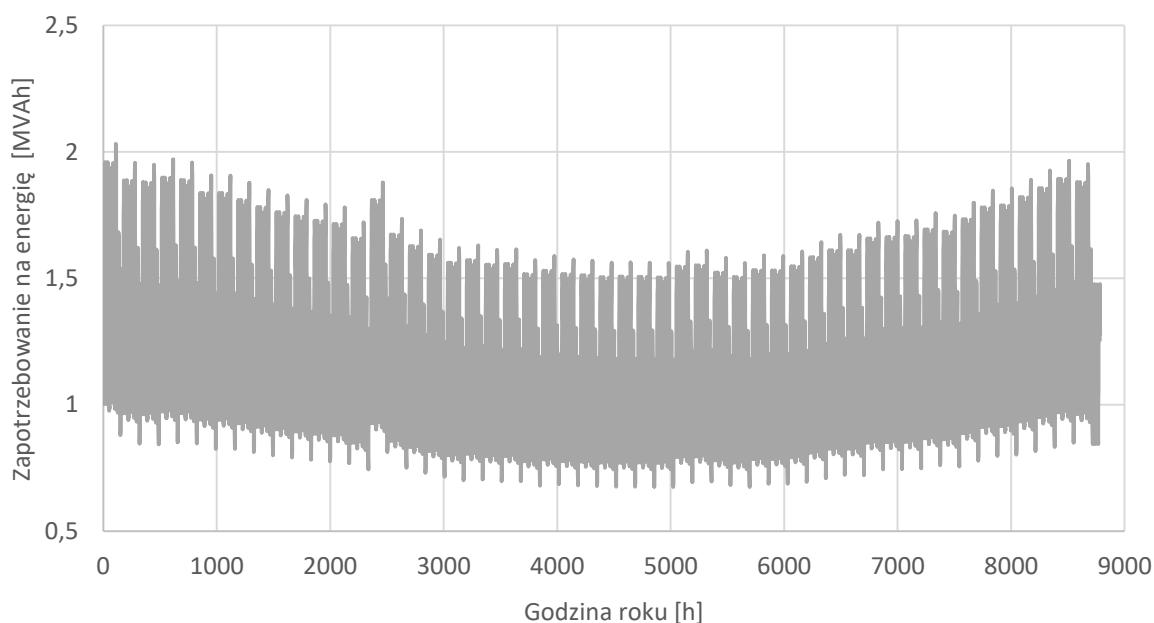
Rys. 2. Model systemu kablowego w sieci

Obliczenia dla systemu kablowego utworzonego przez trzy kable jednożyłowe są prowadzone w oparciu o rozwiązywanie macierzowych równań różniczkowych wiążących prądy w żyłach roboczych i powrotnych kabla z napięciami wzdłuż warstw przewodzących kabla [2, 8, 9]. Pozwala to symulować pracę systemu kablowego w zakresie prądów i napięć w żyłach roboczych i powrotnych w stanach ustalonych i przejściowych podczas normalnej pracy oraz przy zwarcia. Model przedstawiony na rys. 2 umożliwia symulowanie eksploatacji kabla przy różnych sposobach połączenia żył powrotnych ze sobą i z ziemią oraz symulacje

występujących rezystancji uziomów. W przypadku mostów kablowych modelowano system kablowy, jako złożony z trzech lub czterech wiązek kabli w połączeniu równoległym pomiędzy transformatorem WN/SN a szynami zbiorczymi stacji SN. W analizowanym przypadku kable oraz mosty kablowe zamodelowane zostały zgodnie ze standardem kablowych sieci dystrybucyjnych SN przedstawionym w [12].

3. Modelowanie obciążeń i strat energii w ciągach kablowych SN

Zasadniczo celem prowadzonych badań było wyznaczenie strat w żyłach roboczych i powrotnych dla zarejestrowanych obciążeń dla wybranych rzeczywistych odcinków linii kablowych w celu zaproponowania rozwiązań technicznych umożliwiających ograniczenie straty energii w żyłach powrotnych kabla. W sieci miejskiej wyznaczono dwa ciągi kablowe wyprowadzające moc ze stacji WN/SN, określanych jako Główne Punkty Zasilające (GPZ), złożone z trzech odcinków kablowych połączonych szeregowo w układzie trójkątnym. Dla odcinków wychodzących z GPZ zarejestrowano rzeczywiste wartości prądów obciążenia pól liniowych, przekazanych przez Centralną Dyspozycję Mocy (CDM) wykorzystującą centralny system nadzoru nad pracą GPZ-tów, dla wybranych dni 2017 roku w okresie zimowym, wiosennym, letnim oraz jesiennym dla okresów od środy do niedzieli. Na podstawie względnych zmian zużycia energii w poszczególnych tygodniach roku wyznaczony został roczny profil obciążenia dla badanego obiektu. Utworzony roczny profil zapotrzebowania na energię, dla przypadku maksymalnego obciążenia rzędu 2,0 MVA przedstawiony został na rys. 3.

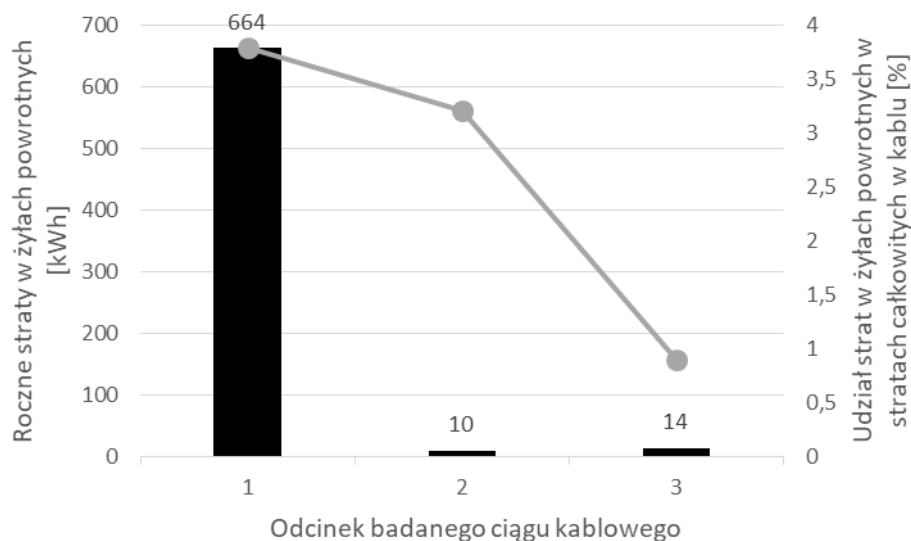


Rys. 3. Roczny profil obciążenia dla linii kablowej wyprowadzającej moc z badanego GPZ-tu

Zobrazowany profil obciążenia dotyczy jedynie odcinka kablowego wyprowadzającego moc z GPZ o przekroju żył roboczych $3 \times 240 \text{ mm}^2$ oraz przekroju żył powrotnych 50 mm^2 . Dla kolejnych odcinków kablowych przekrój żył roboczych uległ zmniejszeniu do $3 \times 120 \text{ mm}^2$, na skutek zmniejszenia obciążenia ze względu na obecność dodatkowych odpyływów w stacjach SN/nn, przy zachowaniu tego samego przekroju żył powrotnych. Uwzględniając liczbę i moce

transformatorów SN/nn na wybranym ciągu zasilania możliwe jest wyznaczenie względnego obciążenia kolejnych odcinków linii kablowych tworzących ciąg przy założeniu równomiernego obciążenia transformatorów rozdzielczych SN/nn, proporcjonalnego do ich mocy znamionowych. Wyznaczono w ten sposób obciążenie drugiego odcinka ciągu na poziomie 72% obciążenia pierwszego odcinka. Analogicznie, uwzględniając kolejne miejskie stacje zasilające odcinek trzeci był obciążony na poziomie 63% obciążenia pierwszego odcinka. W miarę rozwoju systemów inteligentnego opomiarowania dokładniejszą metodą wyznaczenia obciążeń poszczególnych odcinków linii kablowej byłoby wykorzystanie danych dotyczących obciążeń stacji SN/nn na podstawie danych z liczników bilansujących zainstalowanych na tych stacjach, lecz dane takie nie były dostępne w czasie prowadzenia przedstawianych badań.

Dla pierwszego z rozważanych ciągów, z uwagi na duże różnice w długości odcinków kabla, straty w odcinku II oraz III były znacznie mniejsze niż w odcinku I. Straty w poszczególnych odcinkach badanego ciągu kablowego wykazują się zmiennością sezonową, zgodnie ze zmiennością obciążenia zamodelowaną na rys. 3. Wykonane analizy pozwalały na określanie strat w żyłach powrotnych kabla, przedstawionych w formie wykresu na rys. 4. jako roczne bezwzględne wartości strat w kWh oraz jako udział w całkowitych stratach energii w kablu dla analizowanych odcinków. Z analizy wynika, że średni udział strat energii w żyłach powrotnych wynosił 3,5% strat całkowitych w kablu.

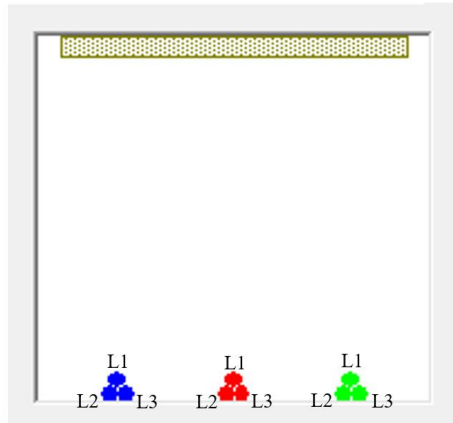


Rys. 4. Poziom strat energii w żyłach powrotnych badanych odcinków linii kablowej

Dla drugiego badanego ciągu kablowego przeprowadzono analogiczne symulacje. Moc roczna maksymalna wyprowadzana tym ciągiem z GPZ, przy tym samym przekroju linii kablowej jak dla pierwszego ciągu, była znacząco niższa rzędu 0,8 MV, lecz drugi odcinek ciągu był obciążony tak samo jak pierwszy natomiast trzeci w stopniu nieznacznie niższym rzędu 88% obciążenia pierwszego odcinka. Ze względu na mniejsze obciążenie drugiego badanego ciągu kablowego wartości bezwzględne strat w żyłach powrotnych kabla są mniejsze i dla całego odcinka wynoszą ok. 40 kWh rocznie. Udział strat w żyłach powrotnych w całkowitych stratach w poszczególnych odcinkach kabli wynosi 2,3% dla pierwszego odcinka, 1,1% dla drugiego oraz 0,5% dla trzeciego, wynosząc średnio 1,5%.

Przeanalizowano również pod względem strat w żyłach powrotnych straty w moście kablowym zbudowanym z trzech odcinków kabli trójfazowych $3 \times 3 \times 240/50 \text{ mm}^2$ połączonych

równoległe, o długości 23 m. Schemat ułożenia poszczególnych kabli jednożyłowych w badanym moście kablowym przedstawiono na rys. 5. Warto zauważyć, że podobne układy pracy linii kablowych można spotkać w liniach wyprowadzających moc z dużych lokalnych źródeł energii [19]. Obciążenie maksymalne mostu wyprowadzającego moc z transformatora 25 MVA wynosiło 13 MVA. Po uwzględnieniu sezonowych zmian obciążenia roczne straty w żyłach powrotnych na podstawie symulacji obliczeniowych określono na poziomie 150 kWh, co stanowi ok. 6,7% całkowitych strat w rozpatrywanym moście kablowym.



Rys. 5. Schemat budowy mostu kablowego

4. Weryfikacja pomiarowa wyników symulacji

Weryfikacja pomiarowa modeli obliczeniowych linii kablowych SN wymagała przeprowadzania serii pomiarów dla przykładowych odcinków linii kablowych oraz mostów kablowych zbudowanych z trzech kabli jednożyłowych. Celem weryfikacji było stwierdzenie poziomu rozbieżności w wartościach prądów w żyłach powrotnych wynikających z pomiarów prądów w żyłach roboczych, w stosunku do wyników symulacyjnych otrzymywanych poprzez modelowanie prądów w żyłach powrotnych przy wykorzystaniu oprogramowania firmy DIgSILENT.

Pomiary weryfikacyjne zostały wykonane na trzech odcinkach linii kablowych ułożonych w układzie trójkątnym oraz na moście kablowym na stacjach z łatwą dostępnością żył powrotnych. Dla każdego z powyższych odcinków zmierzone zostały wartości prądów w żyłach roboczych kabla oraz prądów w żyłach powrotnych. Do wykonania pomiarów wykorzystane zostały następujące urządzenia pomiarowe:

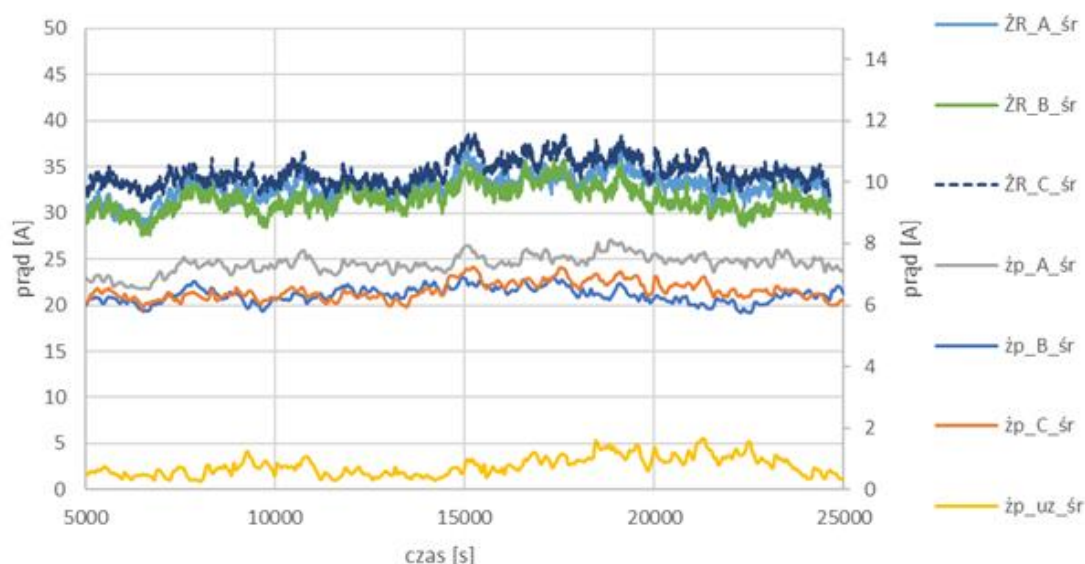
- analizator jakości zasilania i energii Fluke 435 dla żył roboczych badanych odcinków kablowych wyposażony w cewki Rogowskiego – dokładność pomiaru 2%,
- mierniki cęgowe BRYMEN BM135s dla żył powrotnych badanych odcinków kablowych – dokładność pomiaru 5%,
- w przypadku mostów kablowych, jako wartość prądu w żyłach roboczych przyjęto wartości prądów rejestrowane w systemie nadzoru nad pracą GPZ, podawane z dokładnością do czwartej cyfry znaczącej.

Błąd określano zgodnie z poniższą zależnością:

$$\delta I_{\dot{z}p} = \frac{I_{pom_zp} - I_{sym_zp}}{I_{pom_zp}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: I_{pom_zp} – wartość prądu w żyłce powrotnej kabla wyznaczona z pomiarów (średnia wartość w ciągu minuty), I_{sym_zp} – wartość prądu w żyłce powrotnej kabla dla analogicznego stanu obciążenia uzyskana w programie PowerFactory.

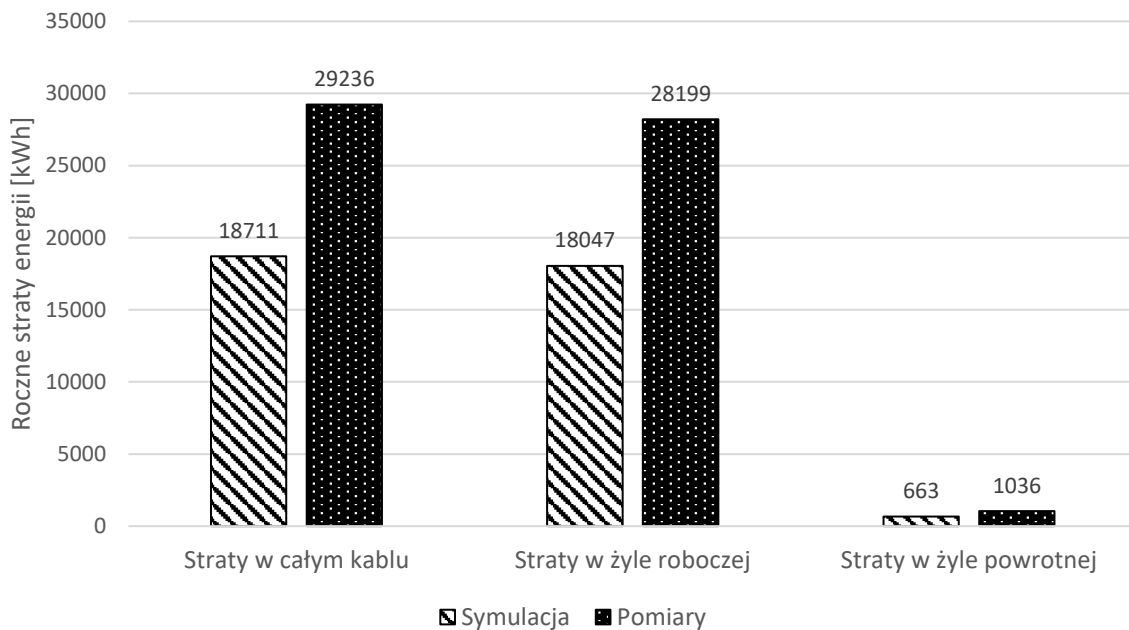
Zarejestrowane pomiary prądów w żyłkach roboczych i powrotnych przeanalizowano dla poszczególnych stanów obciążeń, określonych z częstością uśredniania wartości skutecznych zastosowanych mierników. Przykładowe wyniki rejestracji przedstawiono na rys. 6.



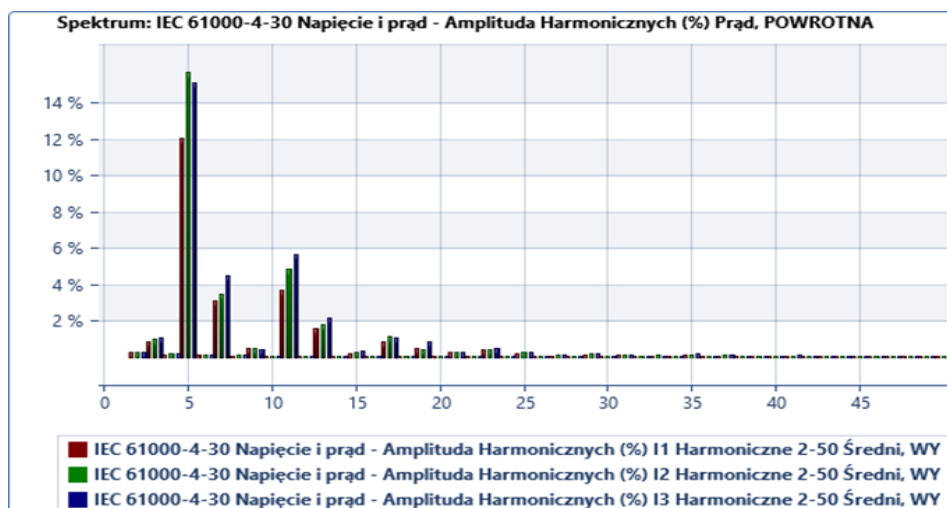
Rys. 6. Prądy w żyłkach roboczych i powrotnych w drugim okresie pomiarów (ŻR- żyła robocza; żp - żyła powrotna; uz – uzium żył powrotnych)

Stwierdzono znaczącą rozbieżność wyników symulacji oraz wartości prądów pomierzonych dla analizowanych obiektów wynoszącą dla prądów rzeczywiście mierzonych w żyłkach powrotnych kabli od +20% do +35%. Biorąc pod uwagę weryfikację pomiarową symulacji komputerowych prądów w żyłkach powrotnych oraz błąd pomiaru zastosowanych przyrządów pomiarowych w dalszych rozważaniach dotyczących opłacalności stosowania środków zaradczych dla ograniczania poziomu strat w żyłkach powrotnych założono, że prądy płynące w żyłkach powrotnych kabli są o 25% większe w stosunku do wyników otrzymanych w symulacjach komputerowych. Na rysunku 7 przedstawiono wzrost strat rocznych, w wyniku przyjętego na podstawie pomiarów odchylenia rzeczywistego prądu w żyłkach powrotnych w stosunku do symulowanego (dla odcinka linii kablowej analizowanego na rys. 3).

Jedną z przyczyn powstałych błędów może być zawartość harmonicznych w prądach żył roboczych, przenosząca się na żyły powrotne przedstawiona na rys. 8, a nieuwzględniana w obliczeniach symulacyjnych. Kolejną przyczyną mogą być prądy płynące przez żyły powrotne, będące wynikiem różnic potencjałów stacji łączonych przez odcinek badany. Prąd płynący przez uzium, przedstawiony na rys. 6, jest sumą tych prądów i obejmuje prądy harmoniczne spływające do uziumu.



Rys. 7. Porównanie rocznych wartości strat w żyłkach powrotnych badanych odcinków linii kablowych otrzymanych z symulacji oraz po weryfikacji pomiarami



Rys. 8. Średnia miesięczna zawartość harmonicznych prądu w żyłce powrotnej kabla wyprowadzającego moc z jednego z GPZ

5. Dobór przekroju i modyfikacje sposobu uziemiania żył powrotnych kabla prowadzące do ograniczania strat mocy czynnej

Występujące straty w żyłkach powrotnych odcinków linii kablowych można ograniczyć następującymi sposobami:

- przeplecenia,
- odziemienia jednostronne,
- zastosowanie niższego przekroju w stosunku do przyjmowanego standardowo.

Pierwszy z wymienionych sposobów, w przypadku zastosowania dwóch przepleceń na jednej trzeciej i dwóch trzecich długości kabla, zapewnia ograniczenie strat praktycznie do wartości pomijalnych przy prądach nieodkształconych. Wymaga on jednak zastosowania

specjalnych muf przepleceniowych lub budowy skrzynek kablowych dla dokonywania przepleceń, co jest kosztowne. Służby eksploatacyjne kabli obawiają się także przepleceń ze względu na oczekiwane utrudnienia w prowadzeniu eksploatacyjnej diagnostyki linii kablowych.

Odziemianie jednostronne żył powrotnych ogranicza straty, lecz wymaga analizy i stwierdzenia dopuszczalności występujących wartości przepięć izolacji żyły powrotnej na odziemionych końcach kabla w przypadku prądów zwarciovych płynących przez żyły robocze. Ponadto uziemienie żył powrotnych stosowane jest dla ograniczenia prądu uziomowego wpływającego przez uziom roboczy stacji SN/nn zasilanych liniami kablowymi, co przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa porażeniowego na stacjach SN. Zatem, w przypadku linii kablowych, konieczna jest także weryfikacja wartości napięć rażeniowych występujących przy zwarciach jednofazowych na tych obiektach w przypadku odziemienia jednej czy dwóch żył powrotnych.

Mniejszy przekrój żył powrotnych, to rozwiązanie techniczne do zastosowania na etapie budowy nowych odcinków linii kablowych, które prowadzi do znacznych oszczędności w nakładach inwestycyjnych. Ponadto wyższa wartość rezystancji żyły powrotnej powoduje ograniczenie prądu indukowanego w żyłach dwustronnie uziemionych, co prowadzi do ograniczenia strat. Zagrożeniem dla żył o zmniejszonym przekroju może być niedopuszczalny wzrost temperatury przy zwarciach dwufazowych z udziałem ziemi na odcinku wyprowadzającym moc z GPZ [26]. Można jednak w takim przypadku, dla zapobieżenia ich szkodliwemu oddziaływaniu cieplnemu na żyły powrotne, uruchomić na takim odcinku bezzwłoczne zabezpieczenia nadprądowe.

Zastosowanie jednego z wyżej wymienionych sposobów ograniczenia strat energii w żyłach powrotnych kabli powinno być efektywne ekonomicznie. Stanem wyjściowym pozwalającym ocenić uzyskane oszczędności są straty występujące w obecnie stosowanym standardzie pracy kabla przy obustronnie uziemionych żyłach powrotnych. Oszczędności uzyskane dzięki zastosowanej modernizacji powinny w okresie eksploatacji kabla przewyższać nakłady inwestycyjne pozwalające na wdrożenie określonego środka zaradczego służącego ograniczaniu poziomu strat, co można wyrazić poniższą zależnością:

$$\Delta E_{Lmd} - V_i > 0 \quad (2)$$

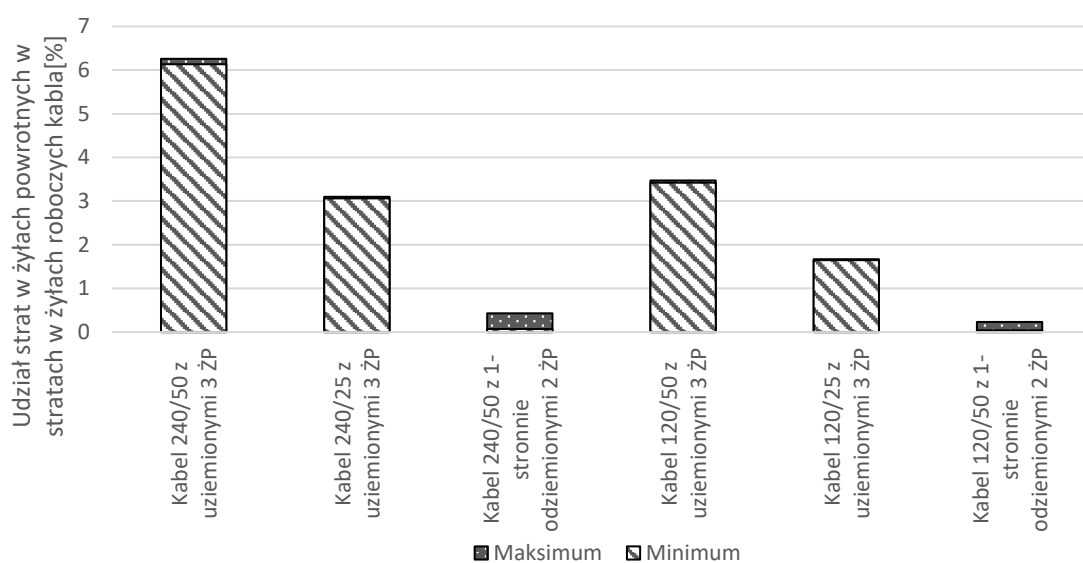
gdzie: ΔE_{Lmd} – zdyskontowane, za rozważany czas eksploatacji, oszczędności na skutek modyfikacji sposobu pracy żył powrotnych kabla, V_i – nakłady na modernizację pracy żył powrotnych kabla.

Podjęcie decyzji o zastosowaniu konkretnego sposobu ograniczania strat w żyłach powrotnych powinno być uzasadnione uproszczonymi analizami ekonomicznymi wykorzystującymi stosunkowo łatwo dostępne dane dotyczące analizowanej linii kablowej. W celu oceny możliwych do osiągnięcia oszczędności na stratach w żyłach powrotnych kabla przeprowadzono symulacje obliczeniowe strat w żyłach powrotnych w zależności od stopnia obciążenia kabli w przypadku zastosowania przepleceń, odziemiania jednostronnego tych żył oraz zastosowania zmniejszonego przekroju. Uwzględniono wyniki weryfikacji pomiarowej wykazującej 25% zwiększenie prądu w żyłach powrotnych w stosunku do wartości uzyskanych w symulacjach obliczeniowych. Przekłada się to na następujący wzrost strat w żyłach powrotnych (3):

$$\Delta P_{rz} = I_{rz}^2 \cdot R = (1,25 \cdot I_{sym})^2 \cdot R = 1,5625 \cdot I_{sym}^2 \cdot R = 1,5625 \cdot \Delta P_{sym} \quad (3)$$

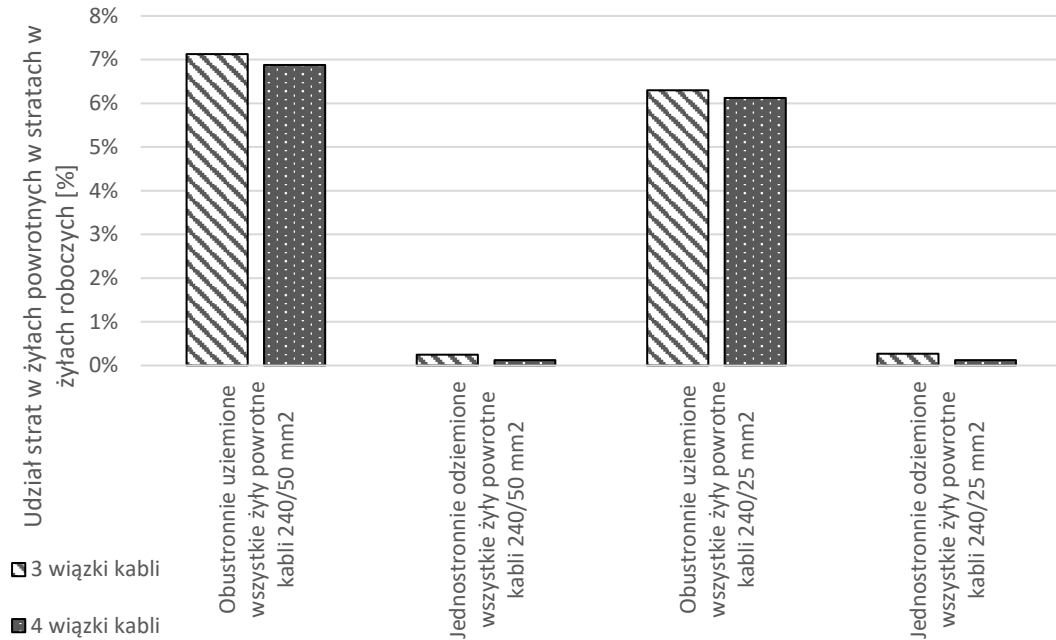
gdzie: ΔP_{sym} – straty mocy otrzymane z symulacji, I_{sym} – prąd w żyłach powrotnych otrzymany z symulacji, R – rezystancja kabla, I_{rz} – prąd rzeczywisty w żyłach powrotnych kabli, ΔP_{rz} – rzeczywiste straty w żyłach powrotnych kabli.

W przypadku zastosowania przepiecen straty w żyłach powrotnych są pomijalnie małe. Dla pozostałych analizowanych przypadków wyniki obrazujące udziały strat w żyłach powrotnych w stosunku do strat w żyłach roboczych kabla dla wybranych przekrojów kabli i żył powrotnych przedstawiono na rys. 9. Widoczny zaciemniony zakres wyników dla poszczególnych rodzajów kabli wynika z różnych długości odcinków kablowych analizowanych leżących w zakresie 0,1 do 1 km. Dla przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że udział strat w żyłach powrotnych w stratach w żyłach roboczych kabla jest stały dla poszczególnych układów kabli w zakresie od 5 do 100% obciążenia prądem znamionowym.



Rys. 9. Udział strat mocy w żyłach powrotnych w stratach w żyłach roboczych dla kabli 240 oraz 120 mm² dla przypadków odziemiania i ograniczenia przekroju tych żył

W przypadku krótkich odcinków linii kablowych pracujących w mostach kablowych przepiecenia nie mają zastosowania, natomiast racjonalne jest odziemienie jednostronne wszystkich żył powrotnych, jako że uziemienie żył powrotnych nie ma istotnego znaczenia ze względu na bezpieczeństwo porażeniowe na stacji WN/SN po poprawnym zaizolowaniu odziemionych końców. Udział strat mocy w żyłach powrotnych w stratach w żyłach roboczych mostów kablowych dla różnych konfiguracji połączeń żył powrotnych oraz analizowanych mostów kablowych uzyskane na podstawie skorygowanych pomiarowo symulacji pracy mostów przy różnych obciążeniach przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Udział strat mocy w żyłach powrotnych w stratach w żyłach roboczych w mostach kablowych dla różnych konfiguracji połączeń oraz mostów kablowych złożonych z 3 lub 4 wiązek kabli

Przedstawione wyniki można wykorzystać dla oszacowania oszczędności rocznych wynikających ze zmiany sposobu uziemiania żył powrotnych zgodnie z niżej przedstawioną procedurą.

a. Wyznaczanie strat maksymalnych P_{max} w kablu w żyłach roboczych (4):

$$P_{max} = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot \frac{l}{\gamma \cdot s} \quad (4)$$

gdzie: I_{max} – prąd w żyłce roboczej odcinka kabla analizowanego, l – długość odcinka [m], γ – przewodność żyły roboczej [$m/(\Omega mm^2)$], s – przekrój [mm^2].

Dane dotyczące obciążenia analizowanych odcinków można pozyskać z rejestracji obciążeń pól w GPZ przez system zarządzania pracą sieci (DMS) dla wyprowadzeń kablowych z GPZ; dla ciągów w głębi sieci można dokonać podziału prądu kabla wyprowadzającego moc z GPZ, zarejestrowanego przez DMS, wg udziału sumy mocy transformatorów SN/nn zasilanych z danego kabla do sumy mocy wszystkich transformatorów zasilanych z analizowanego ciągu wyprowadzającego moc z GPZ.

b. Określenie rocznych oszczędności w stratach energii $\Delta E_{l(BEB-m)_i}$ w żyłach powrotnych w roku i na skutek zmiany sposobu ich pracy z obustronnego uziemienia (ang. both-end earthing *BEB*) na analizowany sposób po modernizacji (m):

$$\Delta E_{l(BEB-m)_i} = (\Delta P_{lBEB\%} - \Delta P_{lm\%}) \cdot P_{max} \cdot \tau_{max} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_a}{100}\right)^i \quad (5)$$

gdzie: $\Delta P_{lBEB\%}$; $\Delta P_{lm\%}$ – wartości strat mocy [%] dla rozważanych sposobów pracy żył powrotnych przedstawione przykładowo na rys. 9 oraz 10; P_{max} – straty w żyłach roboczych odcinka linii kablowej według zależności (4), τ_{max} – roczny czas trwania strat maksymalnych w analizowanym odcinku kabla, ΔP_a – przyrost roczny strat na skutek przyrostu obciążenia odcinka [%].

W celu określenia rozpliwów mocy w poszczególnych odcinkach linii kablowych P_{max} można posłużyć się metodą rozdziału obciążeń na podstawie mocy znamionowych zasilanych transformatorów, rozdziału obciążeń na podstawie miesięcznych odczytów przepływającej energii, analizą obciążeń na podstawie standardowych profili obciążenia lub wykorzystaniu danych rejestrowanych przez liczniki inteligentne (ang. AMI, Advanced Metering Infrastructure) [1]. Powszechnie uważa się, że wykorzystanie danych z systemu AMI pozwala na osiągnięcie najdokładniejszych wyników [25, 47], niemniej jednak ze względu na fakt, że system AMI nie osiągnął pełnej funkcjonalności w analizach wykorzystuje się często dane wynikające ze standardowych profili obciążeń [22].

Czasy trwania strat maksymalnych τ_{max} dla odcinków sieci dystrybucyjnej w Polsce podawane są w literaturze i zgodnie z [36] dla mostów kablowych czy odcinków wyprowadzających moc z pól GPZ zakres tych czasów leży w przedziale 1248 – 4449 h przy wartości średniej 2525 h i odchyleniu standardowym 510 h. Wybór właściwego czasu trwania strat maksymalnych zależy od rodzajów obciążeń przenoszonych danym elementem – większe czasy dla obciążeń przemysłowych, mniejsze dla bytowo-komunalnych. Dla odcinków w głębi sieci, obciążonych stacjami SN/nn, zakres rozważanych czasów leży w obszarze wartości od 788 do 2444 h przy wartości średniej 1662 h i odchyleniu standardowym 801 h. Dla ciągów liniowych zasilających poszczególne stacje SN/nn w głębi sieci, gdy nie dysponujemy obciążeniami z pomiarów, racjonalne będzie przyjęcie wartości z podanego zakresu z uwzględnieniem udziału sumy mocy znamionowych zasilanych z danej sekcji kabla do sumy mocy wszystkich stacji transformatorowych zasilanych z analizowanego ciągu liniowego, a także rodzaju zasilanych odbiorów.

c. Zdyskontowana wartość strat za okres eksploatacji kabla ΔE_{Lmd}

W celu wyznaczenia wartości zaoszczędzonych strat zdyskontowanych ΔE_{Lmd} należy zsumować oszczędności roczne powstałe w wyniku modernizacji, których wartość sprowadzamy do roku zerowego, stosując poniższą zależność:

$$\Delta E_{Lmd} = \sum_{i=1}^{25} \left[\Delta E_{l(BEB-m)i} \cdot C_{ee0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta C_a}{100}\right)^i \cdot \left(1 + \frac{R_d}{100}\right)^{-i} \right] \quad (6)$$

gdzie: $\Delta E_{l(BEB-m)i}$ - roczne oszczędności w stratach energii dane zależnością (5), C_{ee0} , ΔC_a – cena rynkowa energii elektrycznej w roku zerowym [zł/kWh] i jej spodziewany roczny przyrost w [%], R_d – roczna stopa dyskonta w [%] dla określenia wartości strat w roku 0.

Okres dyskonta przyjęto na 25 lat to znaczy nieznacznie powyżej księgowego okresu amortyzacji linii kablowej wynoszącego 22,5 roku [45].

Nakłady inwestycyjne na modernizację sposobu pracy żył powrotnych odcinków kabli V_i występujące w nierówności (2) zależą od zastosowanego rozwiązania. Najtańszym rozwiązaniem jest jednostronne uziemienie żył powrotnych, co wiąże się z kosztami pracy brygady eksploatacyjnej przeprowadzającej zaizolowanie odziemionego końca kabla i niewielkimi kosztami materiałowymi. Zastosowanie przepleceń jest zdecydowanie bardziej kosztowne, ponieważ wymaga zakupu i zainstalowania muf przepleceniowych lub skrzynek kablowych dla realizacji przepleceń. Zastosowanie żyły powrotnej o mniejszym przekroju, w stosunku do dotychczas uznawanego za rozwiązanie standardowe, prowadzi do znaczących oszczędności w nakładach inwestycyjnych, które są tym większe im dłuższy jest analizowany odcinek kabla oraz skutkuje ograniczeniem poziomu strat, ale jest do wdrożenia tylko na etapie budowy linii kablowej, bo jej wymiana na linię o mniejszym przekroju żyły powrotnej nie jest

ekonomicznie efektywna z powodu wysokich nakładów inwestycyjnych zbliżonych do rozwiązania pierwotnego budowy linii kablowej.

Przeprowadzono wiele analiz opłacalności zastosowania przedstawionych wyżej modernizacji sposobu pracy żył powrotnych dla ograniczenia strat w żyłach powrotnych kabli. Koszty strat sprowadzono do roku zerowego, tzn. 2017 przy zastosowaniu dwóch stóp dyskonta: niskiej, wynoszącej 2,5% stosowanej przy obliczaniu wartości pomocy publicznej w przypadku rozłożenia płatności na raty oraz wyższej, wynikającej z kosztu kapitału operatorów sieci dystrybucyjnych w Polsce wynoszącej 5,633%. Założono wzrost rocznego obciążenia odcinków na poziomie 0,5% i roczny wzrost cen energii na pokrycie strat na poziomie 2,5% w stosunku do ceny z 2017. Wyniki przeprowadzonych analiz skłaniają do sformułowania następujących wniosków:

- brak opłacalności stosowania przepieciń istniejących odcinków linii kablowych ze względu na niską wartość zdyskontowanych strat zaoszczędzonych, wynoszącą dla analizowanych odcinków linii maksymalnie do 3000 zł w okresie 25 lat, dla bieżących obciążeń linii kablowych charakterystycznych dla odbiorców bytowo-komunalnych,
- opłacalność zastosowania odziemiania dwóch żył powrotnych dla kabli obciążonych mocą maksymalną rzędu 2 MVA dla odbiorców bytowo-komunalnych,
- brak opłacalności zastosowania odziemiania żył powrotnych w istniejących mostach kablowych ze względu na niską wartość zdyskontowanych strat w żyłach powrotnych tych mostów obciążenia, co wynika z ich małej długości, mimo ich znaczącego obciążenia,
- opłacalność zastosowania w nowych liniach kablowych żył powrotnych o przekroju 25 mm² w miejsce standardowo stosowanych dotychczas 50 mm² i rozważanie opłacalności odziemienia 2 z 3 żył powrotnych takich kabli w zależności od wyników szacunkowej analizy ekonomicznej,
- opłacalność zastosowania w mostach kablowych żył powrotnych o przekroju 25 mm² przy jednostronnym odziemieniu wszystkich żył powrotnych w przypadku nowych inwestycji.

6. Zagrożenia wynikające z odziemiania żył powrotnych odcinków linii kablowych

Jednostronne odziemianie wybranych lub wszystkich żył powrotnych kabli jest najbardziej interesującym sposobem zapobiegania nadmiernym stratom w żyłach powrotnych kabli. Niestety zidentyfikowano również zagrożenia wynikające z tego sposobu pracy żył powrotnych omówione poniżej.

6.1. Zagrożenia porażeniowe na stacjach rozdzielczych SN/nn

Odziemianie żył powrotnych wpływa na prądy uziomowe oraz na napięcia rażeniowe mogące występować podczas zwarć doziemnych na stacjach SN/nn oraz w obwodach nn zasilanych z tych stacji [41, 42]. Prąd zwarciový doziemny I_{kl} rozdziela się na składową spływającą poprzez uziom stacji I_e oraz prąd powracający żyłami powrotnymi I_s :

$$I_{kl} = I_e + I_s \quad (7)$$

Tylko składowa I_e powoduje wzrost napięć rażeniowych na stacjach. Zmniejszanie prądu uziomowego I_e , na skutek odprowadzania części prądu zwarciového przez żyły powrotne kabli, wyznacza się w oparciu o znajomość wartości współczynnika redukcyjnego r powodującego ograniczenie wartości prądu uziomowego, zgodnie ze wzorem:

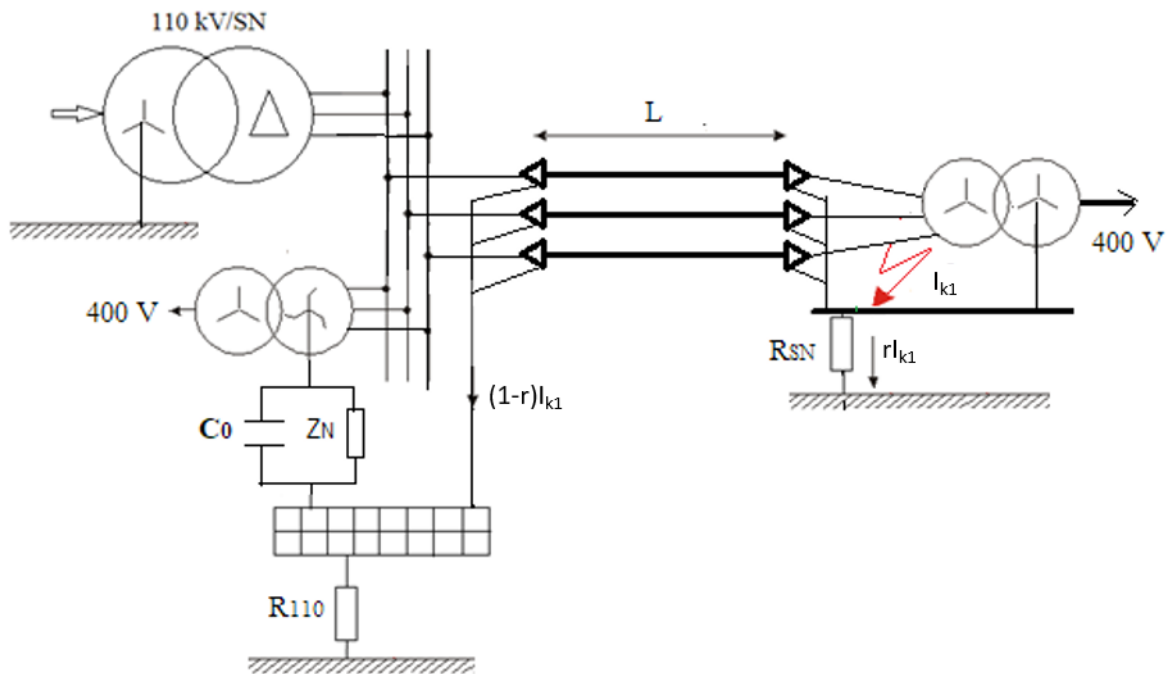
$$I_e = r \cdot I_{k1} \quad (8)$$

Współczynnik redukcyjny wyznaczany dla linii kablowej złożonej z kabli jednożyłowych jest najczęściej opisywany zależnością:

$$r = 1 - \frac{Z_M}{Z_{\Sigma P}} = \frac{Z_{\Sigma P} - Z_M}{Z_{\Sigma P}} \quad (9)$$

gdzie: Z_M – oznacza impedancję wzajemną pomiędzy żyłą roboczą, w której przepływa prąd I_k a żyłami powrotnymi kabla, $Z_{\Sigma P}$ – oznacza wypadkową impedancję własną żył powrotnych kabla.

Wzór ten jest w pełni uzasadniony przy pominięciu rezystancji uziemienia trzech żył powrotnych. Po uwzględnieniu rezystancji uziemień [5], rozptyw prądu zwarcia doziemnego będzie zgodny z rys. 11, na którym zaznaczono przypadek zakłócenia doziemnego w stacji SN/nn zasilanej linią kablową bezpośrednio z GPZ-tu.



Rys. 11. Rozptyw prądu zwarcia doziemnego na stacji SN/nn z uwzględnieniem żył powrotnych kabla zasilającego oraz rezystancji uziemień obu stacji; Z_N – impedancja uziemienia punktu neutralnego sieci SN (rezystor lub cewka Petersena), C_0 – pojemność doziemna sieci, I_{k1} – prąd zwarcia doziemnego, R_{110} – rezystancja uziemienia głównej stacji zasilającej, R_{SN} – rezystancja uziemienia stacji odbiorczej, L – długość rozpatrywanego odcinka kabla [km]

Różnicę potencjałów pomiędzy uziomami GPZ i stacji SN/nn opisać można następującą zależnością:

$$(1-r)I_{k1}Z_{\Sigma Pj} - I_{k1}Z_{Mj} \cdot L = rI_{k1}(R_{110} + R_{SN}) \quad (10)$$

gdzie: Z_{Mj} i $Z_{\Sigma Pj}$ – impedancje jednostkowe [Ω/km], r – współczynnik redukcyjny, R_{110} – rezystancja uziemienia głównej stacji zasilającej, R_{SN} – rezystancja uziemienia stacji odbiorczej, L – długość rozpatrywanego odcinka [km].

Przekształcając wzór (10) otrzymuje się zależność na prąd uziomowy w postaci:

$$I_e = I_{kl} \cdot \frac{(Z_{ZPj} - Z_{Mj}) \cdot L}{(R_{110} + R_{SN}) + Z_{ZPj} \cdot L} \quad (11)$$

Ze względu na fakt, że najczęściej $R_{110} \ll R_{SN}$ w obliczeniach uwzględnia się przede wszystkim rezystancję uziemienia stacji odbiorczej R_{SN} .

Jak łatwo zauważyć powyższą zależność można również przedstawić w postaci:

$$I_e = r \cdot I_{kl} \cdot \frac{Z_{ZPj} \cdot L}{R_{SN} + Z_{ZPj} \cdot L} \quad (12)$$

lub

$$I_e = r_{rz} \cdot I_{kl} \quad (13)$$

gdzie:

$$r_{rz} = r \cdot K_{KOR} \quad (14)$$

a współczynnik korekcyjny K_{KOR} :

$$K_{KOR} = \frac{Z_{ZPj} \cdot L}{R_{SN} + Z_{ZPj} \cdot L} \quad (15)$$

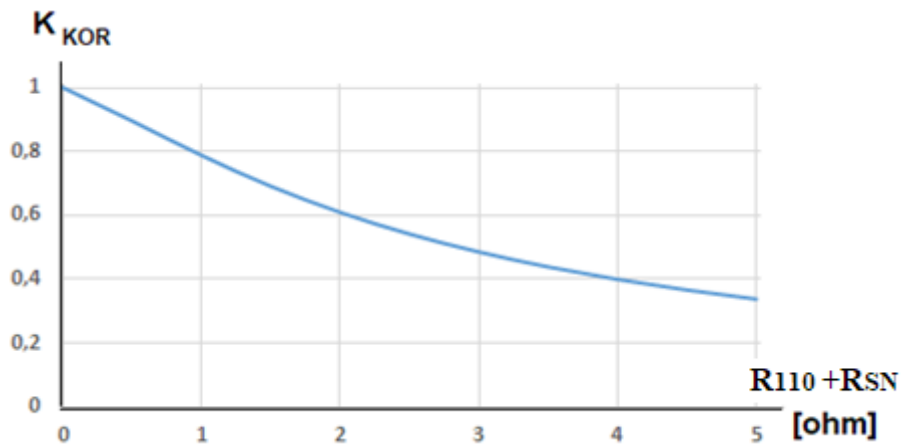
Współczynnik korekty K_{KOR} we wzorze (15) dotyczy układu, w którym uziemione są trzy żyły robocze. Po odziemieniu jednej lub dwóch żył powrotnych w stacji SN/nn wartości tego współczynnika ulegną zmianie, ponieważ zmieniają się wartości impedancji Z_{ZP} . Zakres spodziewanych zmian przedstawiono w tabeli 1 dla trzech sposobów wyznaczania współczynnika korekcyjnego:

- z pomiarów na odcinku linii kablowej zasilonej napięciem obniżonym 230/400 V,
- uproszczonych obliczeń analitycznych uwzględniających układ przestrzenny odcinka linii kablowej i jej parametry,
- symulacji obliczeniowych przy zastosowaniu oprogramowania PowerFactory.

Tabela 1. Zmiany współczynnika redukcyjnego przy odziemianiu żył powrotnych w stosunku do jego wartości podczas uziemienia trzech żył przy założeniu porównywalnych wartości impedancji Z_{ZP} i rezystancji uziemień ($R_{110} + R_{SN}$)

Lp.	Wskaźnik wzrostu wartości r wg pomiarów	Wskaźnik wzrostu wartości r wg uproszczonych obliczeń	Wskaźnik wzrostu wartości r wg symulacji PF	Uwagi
1	1,20	1,28	1,20	po odziemieniu w stacji SN/nn jednej żyły powrotnej
2	1,70	1,79	1,75	po odziemieniu w stacji SN/nn dwóch żył powrotnych

Przy ocenie rozptyłu prądów uziomowych w stacjach SN zasilanych liniami kablowymi należy w obliczeniach współczynnika redukcyjnego uwzględnić również wpływ rezystancji uziemień stacji. Dla przyjętej sumarycznej rezystancji uziemień stacji ($R_{I10}+R_{SN}$) w zakresie 0-5 Ω korekta współczynnika redukcyjnego zmieniać się może zgodnie z krzywą przedstawioną na rys. 12. W celu określenia rezystancji uziomów rzeczywistej stacji SN/nn należy wykonać pomiary zgodnie z [13, 14].



Rys. 12. Zmiany współczynnika korygującego wartości współczynnika redukcyjnego w zależności od sumarycznej rezystancji uziemień żył powrotnych kabla

Badania symulacyjne i próby poligonowe na linii kablowej przy napięciu obniżonym wykazały zwiększanie współczynnika redukcyjnego w następstwie odziemiania żył powrotnych. Dla analizowanego przypadku, wartości tego współczynnika dla obustronnie uziemionych żył powrotnych są na poziomie 0,5 i wzrastają do wartości 0,6 po odziemieniu jednej żyły powrotnej lub do 0,85 po odziemieniu dwóch żył. Dopuszczalność stosowania odziemiania żył powrotnych powinna być zatem weryfikowana pod względem dopuszczalnych napięć rażeniowych na stacji, które zależą również od rezystancji uziemienia stacji połączonych żyłami powrotnymi. Dane dla takich analiz można uzyskać prowadząc badania symulacyjne rozptyłu prądów zwarć doziemnych dla aktualnego sposobu pracy punktu neutralnego sieci przy koniecznym uwzględnieniu rezystancji uziemień żył powrotnych, przez które przepływa prąd zwarciovowy.

W przypadku mostów kablowych uziemienie obustronne żył powrotnych lub ich jednostronne odziemienie nie przyczynia się w sposób istotny do zmiany prądu przepływającego przez uziom stacji WN/SN, a zatem nie ma istotnego wpływu na zagrożenie porażeniowe podczas zwarć jednofazowych na tej stacji.

6.2. Przepięcia na izolowanych końcach żył powrotnych kabli

Odziemianie żył powrotnych nie powoduje negatywnych skutków przepięciowych podczas pracy normalnej. Zagrożenie stwarzają zwarcia doziemne oraz wielofazowe w kablach SN, gdzie jak wynika z przeprowadzonych symulacji obliczeniowych, wartość szczytowa przepięć ziemnozwarciowych w odziemionych żyłach powrotnych może być rzędu kilkunastu kV, co może stanowić zagrożenie przepięciowe dla izolacji kabla. Na ryzyko ewentualnego uszkodzenia powłoki wpływa nie tylko wartość szczytowa przepięć, ale również częstotliwość występowania zwarć w linii kablowej. Szczególnie częste narażenia mogą występować w ciągach kablowo napowietrznych, ponieważ można się spodziewać dużej ilości zwarć

w obszarze odcinków napowietrznych i negatywnego skumulowanego wpływu na izolację żył powrotnych odziemianego kabla [31, 39]. W przypadku zastosowania odizolowania dwóch żył powrotnych kabla, remedium na możliwość wzmacniania fali przepięciowej na krańcu kabla może być połączenie dwóch żył powrotnych na krańcach odizolowanych, co ogranicza zmianę impedancji falowej żyły powrotnej i powinno powodować ograniczenia wartości przepięć, lecz powoduje to wzrost strat w zwartych żyłach.

Obustronne uziemienie jednej lub dwóch żył powrotnych, jak wykazały badania modelowe, ogranicza napięcia w stanach ustalonych i nieustalonych na pozostałych odziemionych żyłach powrotnych w stosunku do napięć w stanach ustalonych i nieustalonych występujących w przypadku odziemienia trzech żył powrotnych. Można przypuszczać, że mechanizm oddziaływania obustronnie uziemionej żyły powrotnej jest zbliżony do oddziaływania ograniczającego przepięcia poprzez kabel ECC stosowany przy kablach wysokiego napięcia [51, 52].

Zastosowanie odziemiania żył powrotnych w przypadku linii kablowych wymaga przeprowadzenia dalszych badań pod względem możliwych przepięć podczas zwarć i analizy możliwych do zastosowania sposobów zapobiegania ich skutkom, jak również wpływu przepięć na izolację żyły powrotnej.

Wyniki symulacji wskazują, że przepięcia w mostach kablowych nawet podczas zwarć w ciągach zasilających cechują się stosunkowo niedużą wartością szczytową, ale należy podkreślić, że występują częściej tzn. podczas wszystkich zwarć w dowolnym miejscu w sieci zasilanej z danej stacji elektroenergetycznej. Teoretycznie mosty kablowe można bezpiecznie 1-stronnie całkowicie odziemić, ponieważ nawet w przypadku zwarć dwufazowych podwójnych wartość szczytowa przepięć, wynosi poniżej 2 kV i jest poniżej 5 kV wartości napięcia stałego próby napięciowej przeprowadzonej przy oddaniu kabla do eksploatacji.

7. Podsumowanie

Rosnący udział linii kablowych, wykonanych przy wykorzystaniu kabli jednożyłowych z żyłami powrotnymi, w całkowitej długości linii rozdzielczych średniego napięcia skłaniają do analiz optymalizacji sposobu eksploatacji tych kabli a w szczególności wyboru sposobu zapobiegania nadmiernym stratom w żyłach powrotnych tych kabli. W pracy dokonano analizy wartości strat przy obustronnym uziemieniu żył powrotnych dla linii i mostów kablowych w zależności od obciążenia i jego zmienności dla profilu obciążenia charakterystycznego dla odbiorców bytowo-komunalnych. Przeprowadzono symulacje komputerowe pracy odcinków kabla w funkcji obciążeń przenoszonych i osiągnięte wyniki zweryfikowano w zakresie strat w żyłach powrotnych przy wykorzystaniu pomiarów na obiektach rzeczywistych. Weryfikacja pomiarowa wskazała na 25% niedoszacowanie wartości prądów indukowanych w żyłach powrotnych otrzymywanych w wyniku symulacji obliczeniowych. Jedną z przyczyn większych strat może być zawartość wyższych harmonicznnych prądów w żyłach kabla.

Przeprowadzone symulacje, z uwzględnieniem korekty wynikającej z pomiarów, mogą być podstawą do oceny strat finansowych ponoszonych przy obustronnym uziemieniu żył powrotnych kabli w okresie pracy kabla. Poziom strat przy obostronnym uziemieniu żył powrotnych może skłaniać do modyfikacji sposobu pracy tych żył poprzez zastosowanie środków zaradczych takich jak przeplecenia, odziemienie jednostronne żył powrotnych czy zastosowanie mniejszego przekroju tych żył. W artykule zaproponowano uproszczoną metodykę oceny ekonomicznej redukcji tych strat podając zależności na obliczenie oszczędności na stratach w postaci wartości zdyskontowanej na rok analizy tych oszczędności

za okres 25 lat przy założeniu określonego wzrostu cen energii oraz wzrostu obciążenia w analizowanym okresie. Wyznaczone oszczędności stanowią podstawę do podjęcia decyzji o zastosowaniu modyfikacji sposobu pracy czy też przekroju żył powrotnych.

Podstawowym wnioskiem z przeprowadzonych symulacji jest zalecenie ograniczenia przekroju żył powrotnych w kablach do przekroju 25 mm². Przy obecnym poziomie obciążenia linii kablowych w sieci rozdzielczej zasilającej odbiorców bytowo komunalnych poziom strat nie uzasadnia zastosowania dość kosztownego środka zaradczego w postaci przepleceń żył powrotnych kabli.

Stosunkowo prostym środkiem zaradczym jest odziemianie żył powrotnych na jednym z końców. Zastosowanie tego rozwiązania poprzez jednostronne odziemienie wszystkich żył jest możliwe w przypadku mostów kablowych zbudowanych z kabli jednożyłowych. Dla linii kablowych, w przypadkach wykazujących opłacalność ograniczania strat poprzez odziemianie, można rozważyć odziemienie jednej lub dwóch żył powrotnych pozostawiając uziemioną obustronnie jedną żyłę dla zapewnienia możliwości redukcji prądu zwarciovego poprzez uziom stacji.

W artykule przedstawiono analizę zagadnienia ograniczenia prądu zwarcia jednofazowego w następstwie odziemiania żył powrotnych. Przedstawiono wyniki redukcji prądu spływającego do ziemi poprzez uziom na podstawie zależności analitycznych, symulacji komputerowych oraz badań kabli ułożonych w ziemi przy ich zasileniu napięciem obniżonym. Procedury wyznaczania rozptyłu prądów zwarcia powinny uwzględniać rezystancje własne żył powrotnych oraz rezystancje uziemień stacji, do których przyłączane są żyły powrotne. Na terenach miejskich gdzie można uznać, że systemy uziemiające tworzą zintegrowane instalacje uziemiające, zagrożenia porażeniowe nie powinny być przeszkodą w realizacji odziemienia dla ograniczenia strat.

Przeprowadzono symulacje komputerowe zagrożeń przepięciami izolacji powłoki kabla na odziemionych żyłach powrotnych mogące wystąpić podczas zwarć. Zaproponowano dla celów dalszych badań sposoby mogące ograniczać wartości takich przepięć. Przy dwóch żyłach odziemionych proponuje się zwarć tych żył na odziemionym końcu z powodu braku zmiany impedancji tych żył dla fal przepięciowych, lecz za cenę podniesienia poziomu strat jak dla przypadku zastosowania tylko jednej żyły odziemionej. Alternatywą jest pozostawienie dwóch uziemionych żył powrotnych dla wzmocnienia efektu uzyskiwanego poprzez przewody ECC w kablach wysokiego napięcia.

Literatura

1. Arritt R, Dugan R. Comparing Load Estimation Methods for Distribution System Analysis. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED 2013.
2. Barrett J S, Anders G J. Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cables – mathematical models and comparison with IEC Standard 287. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology 1997; 144: 101-110.
3. Becker J, Musique F. Economical 36 kV Cable System for the Belgian Network. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED 2001.
4. CEER Benchmarking Report 6.1 on the Continuity of Electricity and Gas Supply. Council of European Energy Regulators asbl 2018.

5. Charlton T E, Hocaoglu M H, Karacasu O, Marican A M A. Impact of cable sheath sizing, material and connections upon the safety of electrical power installations. 21st International Conference on Electricity Distribution. CIRED 2011.
6. Czapp S, Dobrzyński K, Klucznik J, Lubośny Z. Analiza napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli wysokiego napięcia dla ich wybranych konfiguracji. XVIII Międzynarodowa Konferencja Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE 2017.
7. Deschamps P, Toravel Y. Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks. CIRED Overview, final report 2017.
8. DIgSILENT Power Factory 2018 Technical Reference Documentation. Cable System, ElmCabsys, TypCabsys.
9. DIgSILENT Power Factory 2018 User Manual.
10. Dong X, Yang Y, Zhou C, Hepburn D M. Online Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents. IEEE Transactions on Power Delivery 2017; 32: 2281-2290.
11. Duda D, Szadkowski M. Ochrona przeciwprzebieciowa osłon kabli WN w różnych układach połączeń żył powrotnych. Przegląd Elektrotechniczny 2014; 10: 37-40.
12. Elektroenergetyczne linie kablowe średniego napięcia. Standard w sieci dystrybucyjnej Enea Operator Sp. z o.o. 2017.
13. European Standard PN-EN 50341-1:2013-03 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV - Part 1: General requirements - Common specifications.
14. European Standard PN-EN 50522:2011 Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.
15. European Standard PN-EN 61936-1:2011 Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules.
16. European Standard PN-HD 60364-4-442:2012 Electrical Installations of Buildings - Protection for Safety - Protection of Low-Voltage Installations Against Temporary Overvoltages and Faults Between High-Voltage Systems and Earth.
17. Gołaś A, Ciesielka W, Szopa K, Zydrón P, Bąchorek W, Benesz M, Kot A, Moskwa S. Analysis of the possibilities to improve the reliability of a 15 kV overhead line exposed to catastrophic icing in Poland. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2019; 21(2): 282–288.
18. Gouda O E, Farag A A. Factors affecting the sheath losses in single-core underground power cables with two-points bonding method. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 2012; 2: 7–16.
19. Gouramanis K V, Kaloudas Ch G, Papadopoulos T A, Papagiannis G K, Stasinou K. Sheath Voltage Calculations in Long Medium Voltage Power Cables. IEEE Trondheim PowerTech 2011.
20. Heiss A, Balzer G, Schmitt O, Richter B. Surge arresters for cable sheath preventing power losses in MV networks. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED 2001.
21. IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths. IEEE Standard 575 1988.
22. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej Enea Operator Sp. z o.o.: Standardowe profile zużycia energii na rok 2017. <http://www.operator.enea.pl/21/instrukcje/instrukcje-iriesd-883.html>, dostęp: 24.07.2019.

23. Jensen C F, Nanayakkara O M K K, Rajapakse A D, Gudmundsdottir U S, Bak C L. Online fault location on AC cables in underground transmissions systems using sheath currents. *Electric Power Systems Research* 2014; 115: 74-79.
24. Jung C K, Lee J B, Kang J W, Wang X H, Song Y H. Sheath Current Characteristic and Its Reduction on Underground Power Cable Systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting* 2005.
25. Kauppinen M, Pylvanainen J, Karjalainen J, Sihvola V, Experiences of using AMI system for DSO's business operation. *CIREN – Open Access Proceedings Journal* 2017; 1: 2756-2759.
26. Korab R, Siwy E. Statistical analysis of the double line-to-ground short-circuit current in MV urban network for the power cable metallic screen rating. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* 2006.
27. Korab R, Siwy E, Żmuda K. Analiza możliwości redukcji przekroju żył powrotnych w kablach średniego napięcia w sieciach miejskich. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka* 2004; 189: 111-120.
28. Korab R, Siwy E, Żmuda K. Podstawy racjonalnego doboru żył powrotnych (ekranów) kabli 6-20 kV różnego typu w sieciach miejskich. *Elektroenergetyczne linie kablowe* 2004; 148-149: 19-28.
29. Kornatka M. Analysis of the exploitation failure rate in Polish MV networks. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(3): 413–419.
30. Krawiec H. Przyczyny grzania się bednarki i żył powrotnych kabli 6 kV. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* 2014; 1: 141-145.
31. Li J, Xu L, Chen X, Zhao A, Liu J, Zhao X, Deng J, Zhang G. Analysis of Statistical and Frequency Characteristics of Transient Overvoltage of Hybrid Cable-OHL Lines. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* 2018; 2650-2654.
32. Lin Y, Xu Z. Cable Sheath Loss Reduction Strategy Research Based on the Coupled Line Model. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2015; 30: 2303-2311.
33. Lin Y, Yang F, Xu Z, Weng H. Cable Sheath Loss Analysis Based on Coupled Line Model. *International Conference on Power System Technology* 2014.
34. Łowczowski K. Badanie wpływu ułożenia kabli na straty energii w żył powrotnej – symulacja w programie PowerFactory. *Przegląd Elektrotechniczny* 2016; 10: 54-57.
35. Moore G F. *Electric Cables Handbook*, Third Edition. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1997.
36. Niewiedział R, Niewiedział E, Wyznaczanie czasu trwania strat maksymalnych w sieciach elektroenergetycznych modelami obliczeniowymi. <http://www.sep.krakow.pl/nbiuletyn/nr57ar2.pdf>, dostęp 5.07.2019.
37. Novak B, Koller L, Berta I. Loss reduction in cable sheathing. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 2010; 1: 293-297.
38. Novak B, Koller L. Current distribution and losses of grouped underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011; 26: 1515-1521.
39. Orsagova J, Toman P. Transient overvoltages on distribution underground cable inserted in overhead line. *20th International Conference on Electricity Distribution. CIREN* 2009.
40. *Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku, projekt*. Warszawa: Ministerstwo Energii, 2018.

41. Pons E, Colella P, Napoli R, Tommasini R. Impact of MV Ground Fault Current Distribution on Global Earthing Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2015; 51: 4961-4968.
42. Popović L M. Ground Fault Current Distribution When a Ground Fault Occurs in HV Substations Located in an Urban Area. *Progress In Electromagnetics Research B* 2014; 59: 167-179.
43. Rakowska A. Service Experiences for MV Cable Network - Optimistic or Pessimistic State of The Art. *Jicable Conference: The leading forum about Insulated Power Cables* 2007.
44. Riba Ruiz J R, Garcia A, Alabern Morera X. Circulating sheath currents in flat formation underground power lines. 2007.
45. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10.12.2010 r. w sprawie Klasyfikacji Środków Trwałych (KŚT).
46. Sakalkale S, Kanakgiri K. Study of Underground Power Cable Considering Sheath Circulating Current. *Proceedings of Fourth IRF International Conference* 2014; 7-10.
47. Sapienza G, Noce C, Valvo G. Network Technical Losses Precise Evaluation Using Distribution Management System and Accurate Network Data. *23rd International Conference on Electricity Distribution. CIRED* 2015.
48. Sobral A, Moura A, Carvalho M. Technical Implementation of Cross Bonding on Underground High Voltage Lines Projects. *21st International Conference on Electricity Distribution. CIRED* 2011.
49. Sullivan R G, Abplanalp J M, Lahti S, Beckman K J, Cantwell B L, Richmond P. Electric Transmission Visibility and Visual Contrast Threshold Distances in Western Landscapes. *National Association of Environmental Professionals Annual Conference* 2014; 1-46.
50. Tarko R, Benesz M, Nowak W, Szpyra W. Statystyczna analiza zakłóceń zwarciovych dla określenia przekroju żył powrotnych kabli średnich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny* 2016; 7: 186-189.
51. Todorovski M, Ackovski R. Equivalent Circuit of Single-Core Cable Lines Suitable for Grounding System Analysis Under Line-to-Ground Faults. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2014; 29: 751-759.
52. Żmuda K. Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze. Wybrane zagadnienia z przykładami. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2016.