

Rezonans w sieci 400 kV z trójfazowymi dławikami kompensacyjnymi uziemionymi przez indukcyjność

Streszczenie. Artykuł przedstawia problematykę rezonansu pomiędzy pojemnością linii wysokiego napięcia a indukcyjnością dławika kompensacyjnego, którego punkt neutralny jest uziemiony przez powietrzny dławik zerowy. Obecnie w Polsce nie są stosowane takie układy, jednakże ich analiza jest istotna z punktu widzenia rozwoju sieci pod kątem uniknięcia rezonansowych stanów pracy, a także zapewniania skutecznego gaszenia prądu zwarciovego podczas błędnego zadziałania wyłącznika liniowego (otwieranie jedno- lub dwu-biegunowe). Opisano zjawiska uwzględniające wpływ dławika zachodzące w przykładowej sieci oraz metody ich analizy.

Abstract. This paper presents the topic of resonance between the high voltage overhead line capacitance and inductance of shunt reactor earthed through neutral grounding reactor (NGR). Currently the NGR are not present in the national polish transmission grid, however it is likely that in the future the grid development plans may need to include such solution as a must, mainly due to need for improvement of secondary arc current extinguishing conditions (also during stuck breaker conditions). Critical configurations as well as methods of their analysis are presented in this paper. Additionally examples of simulated voltage traces for various types of resonance are presented. **The topic of resonance between the high voltage overhead line capacitance and inductance of shunt reactor earthed through neutral grounding reactor**

Słowa kluczowe: dławik kompensacyjny, rezonans, awaria wyłącznika

Keywords: shunt reactor, resonance, stuck breaker

Wstęp

Systemy elektroenergetyczne wysokich napięć poddawane są nieustannym analizom, których celem jest zapewnienie odpowiedniej jakości energii elektrycznej. Podstawowymi aspektami są problemy związane z kompensacją mocy biernej, stabilnością napięciową, zawartością wyższych harmonicznych oraz analizą zwarciovą [1, 2]. Jednym z najbardziej istotnych elementów systemu przesyłowego są dławiki kompensacyjne, których zadaniem jest ograniczanie wzrostu napięć na długich, nieobciążonych lub lekko obciążonych liniach [3]. Obecny rozwój sieci elektroenergetycznych, który oparty jest na budowie nowych linii napowietrznych oraz kablowych zmusza operatorów do wykorzystania dławików jako priorytetowych komponentów systemu przesyłowego służących do regulacji napięcia o częstotliwości sieciowej. Jednakże, z uwagi na fakt iż długie linie napowietrzne cechują się znaczną pojemnością elektryczną, instalacja dławika może doprowadzić w pewnych układach do powstania oscylacji rezonansowych [4]. Oscylacje te cechują się znacznym wzrostem napięcia, co w przeciągu kilku okresów może doprowadzić do awarii pracujących urządzeń, w szczególności ograniczników przepięć, przekładników napięciowych oraz wyłączników [5, 6].

Niniejszy artykuł przedstawia możliwość wykonania obliczeń analitycznych oraz przeprowadzenia symulacji, w celu identyfikacji układów sieciowych potencjalnie zagrożonych z punktu widzenia możliwości wystąpienia rezonansu pomiędzy pojemnością linii napowietrznej a indukcyjnością dławika. Zaprezentowano również możliwość instalacji dodatkowego dławika uziemiającego (zerowego), włączonego w punkt gwiazdowy dławika kompensacyjnego, tzw. NGR – *Neutral Grounding Reactor*. Pozwala to na zmianę częstotliwości rezonansowej, a przez to – uniknięcie eskalacji rezonansowych napięcia. Drugim jego zastosowaniem jest redukcja prądu zwarciovego wtórnego podczas Samoczynnego Ponownego Załączenia (SPZ) [5-9], co wspomaga skuteczne ponowne załączenie linii po wyłączeniu zwarcia (*reclosing*).

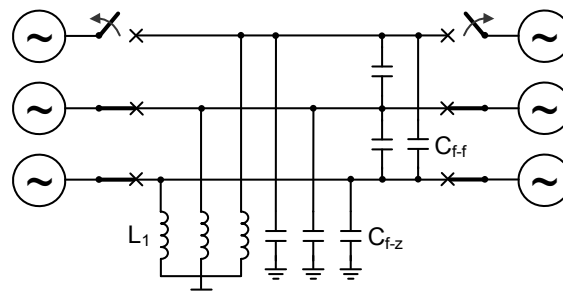
Układy rezonansowe

Najczęstszymi przypadkami wystąpienia rezonansu w wyżej opisanych układach są sytuacje, w których stosowane są schematy łączy SPZ. Wykorzystanie SPZ

jest bardzo korzystne z punktu widzenia przesyłu mocy, gdyż nawet po wyłączeniu jednej fazy, wciąż około 50% mocy może być przesyłane przez zdrowe linie (fazy) [7]. Jednakże, w skutek sprzężenia pojemnościowego i indukcyjnego z wciąż zasilanymi fazami, napięcie na fazy odłączonej może drastycznie wzrosnąć, powodując uszkodzenie pracujących urządzeń. Ponadto, po obustronnym wyłączeniu zwartej fazy linii przesyłowej, w miejscu zwarcia łukowego płynie tzw. prąd wtórny (*secondary arc current*). Podtrzymuje on palenie się łuku [10-13], a co za tym idzie, utrudnia skuteczne wyłączenie zwarcia oraz wydłuża czas do ponownego zamknięcia wyłączzonej fazy. Długie podtrzymywanie otwarcia fazy może skutkować niezbalansowanym stanem sieci i doprowadzić do wcześniej wspomnianym oscylacji rezonansowych. Podobna sytuacja może również wystąpić podczas awarii wyłącznika, w wyniku której nie zostanie otwarty jeden lub dwa bieguny. Dotyczy to jednakże tylko wyłączników, które są wyposażone w osobne napędy i mechanizmy dla każdego z biegunów osobno. Aby mogło dojść do wystąpienia rezonansowych oscylacji napięcia, musi zostać spełnionych kilka podstawowych warunków [5]:

- linia napowietrzna jest skompensowana przez dławik,
- stopień kompensacji zawiera się pomiędzy 60% a 100%,
- przynajmniej jedna faza jest podłączona do sieci,
- przynajmniej jedna faza jest odłączona od sieci.

Wyżej wymienione założenia zaprezentowano na schemacie ideowym na rysunku 1.



Rys.1. Schemat ideowy sieci podczas obustronnego wyłączenia jednej fazy w cyklu SPZ: L_1 – indukcyjność fazy dławika, C_{f-z} – pojemność doziemna przewodu linii, C_{f-f} – pojemność międzyfazowa linii

Powstanie oscylacji rezonansowych jest możliwe dla pewnego zakresu stopnia kompensacji k , który jest zależny od indukcyjności fazowej dławika L_1 oraz pojemności linii C_1 dla składowej zgodnej (1):

$$(1) \quad k = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1}$$

Pojemności linii napowietrznej dla składowej zgodnej C_1 oraz składowej zerowej C_0 można określić według (2) i (3):

$$(2) \quad C_1 = C_{f-z} + 3 \cdot C_{f-f}$$

$$(3) \quad C_0 = C_{f-z}$$

Na podstawie parametrów linii napowietrznych oraz dławików można obliczyć stopnie kompensacji k_1 i k_2 , dla których może wystąpić rezonans podczas otwierania jednej (4) lub dwóch (5) faz wyłącznika. Do takich obliczeń należy przyjąć następujące założenia [5]:

- linia jest transponowana – układ idealnie symetryczny,
- straty w liniach i w dławiku zostały pominięte,
- impedancja szeregową linii została pominięta,
- reakcja wzajemna dławika jest pomijalnie mała,
- punkt neutralny dławika jest skutecznie uziemiony

$$(4) \quad k_1 = \frac{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_1}{C_0} - 1 \right)}{\frac{C_1}{C_0}}$$

$$(5) \quad k_2 = \frac{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{C_1}{C_0} - 1 \right)}{\frac{C_1}{C_0}}$$

Napięcia indukowane na otwartych fazach podczas wyłączania 1-fazowego lub 2-fazowego (odpowiednio U_1 oraz U_2) zależą wprost od stopnia kompensacji k , a także stosunku pojemności linii dla składowej zgodnej C_1 i zerowej C_0 ((6) i (7)).

$$(6) \quad U_1 = \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot (1-k)}{1 - \frac{C_0}{C_1}} \right) - 1}$$

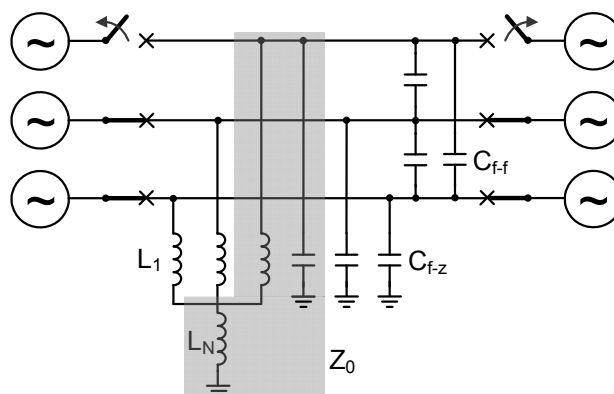
$$(7) \quad U_2 = \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot (1-k)}{1 - \frac{C_0}{C_1}} \right) - 2}$$

Teoretycznie, napięcia indukowane na otwartych fazach w stanie rezonansu mogą sięgać nawet kilkudziesięciu wartości znamionowych. W układach rzeczywistych napięcia te rzadko przekraczają 2 p.u. z uwagi na nasycenie się rdzeni magnetycznych dławików, przekładników napięciowych, transformatorów, a także nieliniowych charakterystyk ograniczników przepięć [5].

Dławik zerowy – NGR

Dławiki, które instalowane są w punkcie neutralnym dławików kompensacyjnych (Rys.2), są zazwyczaj wykonane w technologii suchej, bezrdzeniowej (dławiki

powietrzne). Ich zadaniem jest redukcja prądu zwarciego wtórnego w trakcie SPZ, a także zmiana częstotliwości rezonansowej układu poprzez zwiększenie zastępczej impedancji składowej zerowej.



Rys.2. Schemat ideowy sieci podczas obustronnego wyłączania jednej fazy z zainstalowanym dławikiem zerowym: L_1 – indukcyjność fazy dławika kompensacyjnego, L_N – indukcyjność dławika zerowego (NGR), C_{f-z} – pojemność doziemna przewodu linii, C_{f-f} – pojemność międzyfazowa linii, Z_0 – impedancja zastępcza dla składowej zerowej

Impedancja zastępcza dla składowej zerowej w tym przypadku jest opisana wzorem (8):

$$(8) \quad Z_0 = \frac{j \cdot \omega \cdot (L_1 + 3 \cdot L_N)}{1 - \omega^2 \cdot (L_1 + 3 \cdot L_N) \cdot C_0}$$

Dobór indukcyjności dławika zerowego musi uwzględniać trzy różne założenia. Podstawowym kryterium jest minimalna wartość indukcyjności $L_{N,min}$, która zapobiega powstaniu oscylacji rezonansowych przy częstotliwości sieciowej (9):

$$(9) \quad L_{N,min} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\omega^2 \cdot C_0} - L_1 \right)$$

Pozostałe dwa kryteria służą do optymalizacji parametrów dławika zerowego pod kątem pełnej kompensacji składowej zgodnej i zerowej pojemności linii napowietrznej ($L_{N,c}$ – (10)), a także minimalizacji prądu zwarciego wtórnego ($L_{N,i,min}$ – (11)). Dla praktycznych zastosowań wszystkie kryteria muszą zostać uwzględnione i przeanalizowane celem wybrania optymalnego rozwiązania, które zapewni eliminację oscylacji rezonansowych napięcia, a także skuteczny SPZ poprzez redukcję prądu zwarciego wtórnego.

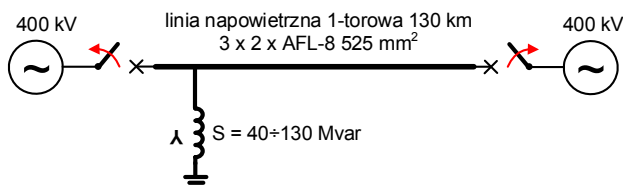
$$(10) \quad L_{N,c} = \frac{L_1}{3} \left(\frac{C_1}{C_0} - 1 \right)$$

$$(11) \quad L_{N,i,min} = \frac{L_1}{3} \cdot \left(\frac{\frac{C_1 - C_0}{C_1}}{k - \frac{C_1 - C_0}{C_1}} \right)$$

Przykład obliczeniowy

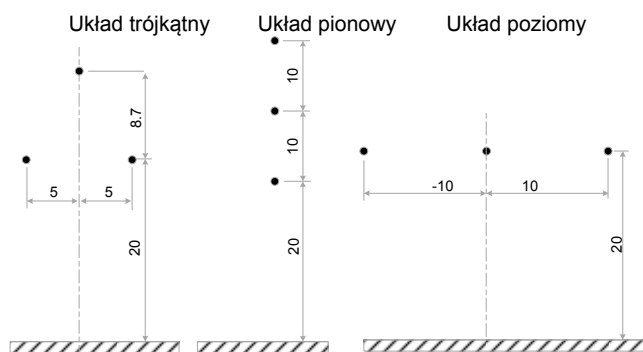
Bazując na powyższych zależnościach pomiędzy pojemnością linii a indukcyjnościami dławika kompensacyjnego oraz dławika zerowego, przeprowadzono obliczenia dla przykładowej sieci. Jej parametry zostały obliczone na podstawie typowych układów linii napowietrznych, jakie stosowane są w polskim systemie przesyłowym o napięciu znamionowym $U_N = 400$ kV. Arbitralnie przyjęte wartości długości linii napowietrznych,

indukcyjności dławików kompensacyjnych oraz wynikające z nich parametry dławików zerowych mają na celu ilustrację zjawiska rezonansu w sieciach wysokich napięć, a także możliwość jego eliminacji. Przenalizowano również efektywność gaszenia prądu zwarciovego wtórnego. Wykonano obliczenia analityczne za pomocą metody przedstawionej w powyższych rozdziałach, które poparto wynikami symulacji komputerowych w programie EMTP-ATP v.6.0. Układy, jakie wykorzystano do analizy przedstawiono na rysunku 3. Badana sieć 400 kV (50 Hz) składa się z trójfazowej linii napowietrznej jedno-torowej o długości 130 km oraz dławika, którego moc zmieniało w zakresie od 40 Mvar do 130 Mvar.



Rys.3. Schemat poglądowy analizowanej sieci

Do obliczeń przyjęto trzy często wykorzystywane układy przewodów fazowych na liniach przesyłowych: trójkątny, pionowy oraz poziomy (Rys. 4). Ma to na celu ilustrację ich wpływu na pojemność linii napowietrznej oraz możliwość wystąpienia rezonansu w sieci.



Rys.4. Układy przewodów na liniach napowietrznych

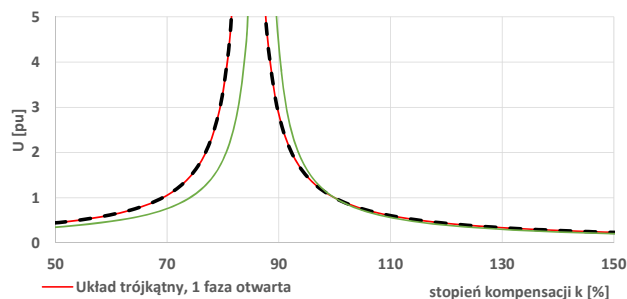
Powyższe układy przewodów zaimplementowano w programie EMTP-ATP v.6.0 w module LCC, zakładając zwis dla wszystkich przewodów fazowych równy 5 m. Na podstawie wymiarów geometrycznych linii oraz przewodów obliczono zastępczą pojemność dla składowej zerowej oraz zgodnej dla każdego układu przewodów (Tabela 1). Przyjęto, iż linia jest transponowana, co zapewnia symetrię pojemności doziemnych oraz międzyfazowych. Przedstawiono ponadto stopnie kompensacji k_1 i k_2 dla których może wystąpić rezonans podczas otwierania jednej lub dwóch faz wyłącznika (według (4) i (5)).

Tabela 1. Pojemności linii napowietrznej – wyniki EMTP-ATP

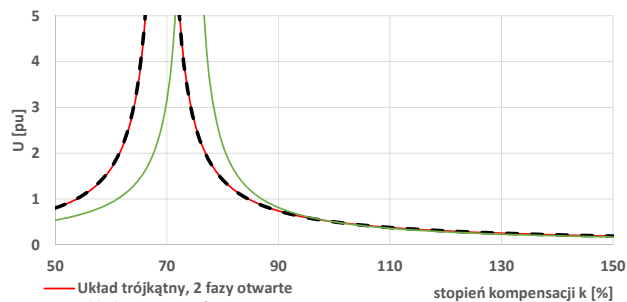
Układ	C_1 [nF/km]	C_0 [nF/km]	k_1 [%]	k_2 [%]
Trójkątny	11.6	6.2	84.6	69.2
Pionowy	11.2	6.0	84.6	69.2
Poziomy	11.2	6.8	87.0	74.1

Napięcia indukowane dla częstotliwości sieciowej podczas otwarcia jednej lub dwóch faz zostały obliczone według zależności (6) i (7) i przedstawione na Rys.5 oraz Rys.6. Napięcia te rosną gwałtownie wraz ze zbliżaniem się stopnia kompensacji k do stopni k_1 oraz k_2 (Tabela 1).

Można ponadto zauważyć, iż rosną one do wartości wielokrotnie przewyższających napięcie znamionowe sieci dla częstotliwości 50 Hz. Wynik ten jest spowodowany wcześniej wspomnianymi uproszczeniami oraz brakiem uwzględnienia nieliniowych właściwości komponentów systemu elektroenergetycznego, takich jak magnesowanie przekładników napięciowych, dławików, oraz nieliniowych charakterystyk ograniczników przepięć. W układach rzeczywistych, napięcia indukowane będą ograniczane do poziomu nie przekraczającego $2 U_N$. Takie wartości wciąż jednakże stanowią zagrożenie dla pracujących urządzeń, w szczególności ograniczników przepięć, których zdolność wytrzymałościowa względem przepięć dorywczych o częstotliwości sieciowej jest znacznie mniejsza i wynosi około $1.3\div 1.5 U_N$, w zależności od typu ogranicznika przepięć i jego napięcia znamionowego [14]. Należy również zwrócić uwagę na fakt niemal identycznych charakterystyk rezonansowych dla układów pionowych oraz trójkątnych. Spowodowane jest to tym samym stosunkiem C_1/C_0 . Wartości te w oczywisty sposób mogą się jednakże różnić, w zależności od umiejscowienia przewodów fazowych i odgromowych względem konstrukcji wsporczej linii napowietrznej oraz ziemi.



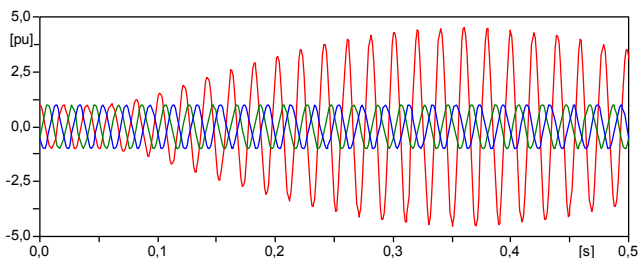
Rys.5. Napięcia indukowane względne w stanie ustalonym w funkcji stopnia kompensacji k podczas jednej fazy otwartej



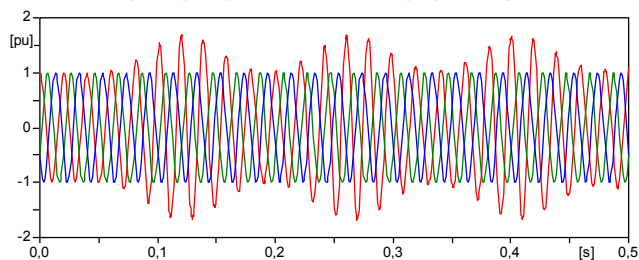
Rys.6. Napięcia indukowane względne w stanie ustalonym w funkcji stopnia kompensacji k podczas dwóch faz otwartych

Układ sieciowy opisany powyżej został zamodelowany w programie EMTP-ATP. Linia napowietrzna została zaprezentowana za pomocą komponentu zmiennoczęstotliwościowego typu JMarti, zaś moc dławika dobrano tak, aby stopień kompensacji k wynosił 93% ($S = 70$ Mvar). Jest to wartość zbliżona do współczynnika k_1 (Tabela 1). Zatem możliwe jest powstanie oscylacji rezonansowych podczas otwierania jednej fazy wyłącznika. Dławik zaprezentowano za pomocą charakterystyki magnesowania rdzenia, która jest liniowa do wartości $1.3 U_N$, zaś powyżej tej wartości jej nachylenie wynosi 30% [15]. Rysunki 7 oraz 8 ilustrują wyniki symulacji EMTP-ATP, podczas której zarejestrowano napięcia indukowane podczas jedno-fazowego otwierania wyłącznika. Asymetria systemu oraz stopień kompensacji k zbliżony do wartości k_1 prowadzą do

generacji oscylacji rezonansowych. Zaprezentowano wyniki dla dwóch modeli dławika - z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia charakterystyki magnesowania. Można zauważyć, iż nie ma ona wpływu na możliwość występowania rezonansu, a jedynie na amplitudę przepięć dorywczych. W przypadku całkowitej liniowej charakterystyki magnesowania, przepięcia dorywcze osiągają teoretyczne, nierealistycznie wysokie wartości (4.5 pu). W przypadku zastosowania modelu rzeczywistego, przepięcia te są ograniczane poprzez nieliniowość rdzenia dławika kompensacyjnego, do wartości 1.6 pu. Takie amplitudy przepięć są wciąż niebezpieczne dla pracujących urządzeń, w szczególności ograniczników przepięć, których awaria w takich warunkach pracy może nastąpić już po około 100÷200 ms [5].



Rys.7. Symulacja EMTP-ATP, napięcie indukowane podczas otwierania jednej fazy, liniowa charakterystyka magnesowania

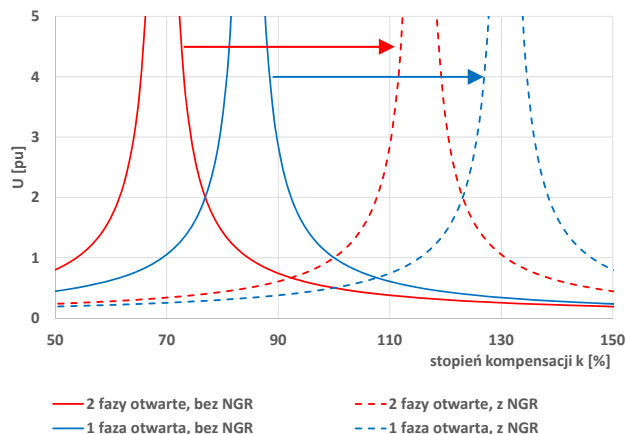


Rys.8. Symulacja EMTP-ATP, napięcie indukowane podczas otwierania jednej fazy, nieliniowa charakterystyka magnesowania

Zastosowanie dławika NGR

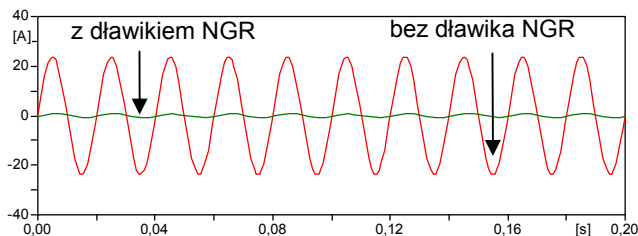
Istnieje kilka możliwych sposobów ograniczania przepięć rezonansowych powstałych podczas warunków pracy z jedną lub dwoma fazami otwartymi. Najbardziej oczywistym, jednakże nie zawsze możliwym do zrealizowania – jest wyznaczenie układów sieciowych zabronionych, w których możliwe jest wystąpienie oscylacji rezonansowych. Jednakże, ich eliminacja nie zawsze jest osiągalna z uwagi na stosowane sekwencje łączeniowe SPZ, dlatego też mogą zostać wykorzystane dławiki zerowe NGR celem zmiany impedancji układu. Dla przykładu obliczeniowego zawartego w niniejszym artykule wyznaczono wartość indukcyjności dławika zerowego zgodnie ze wzorem (11) i jest ona równa $L_N = 2.42$ H, co odpowiada 30% indukcyjności dławika kompensacyjnego (podobnie jak w podanym przykładzie [8]).

Porównanie charakterystyk rezonansowych dla badanych układów przedstawia Rys. 9. Jak można zauważyć, dzięki wtrąceniu indukcyjności dławika zerowego, punkty rezonansowe (k_1 i k_2) dla wszystkich układów zostały przesunięte w stronę wyższych wartości stopni kompensacji, znacznie powyżej $k = 93\%$, co w praktyce zapobiega powstaniu oscylacji rezonansowych napięcia podczas otwierania jedno- lub dwufazowego. Analogiczne zależności można wyznaczyć dla układu pionowego oraz poziomego.



Rys.9. Napięcia indukowane względne w stanie ustalonym, układ trójfazny, wpływ dławika zerowego NGR na rezonans

Drugim celem zastosowania dławika zerowego NGR jest minimalizacja prądu zwarciovego wtórnego. Podczas sekwencji SPZ-1, obustronnie wyłączana jest faza, w której wystąpiło zwarcie. Prąd zwarciovym może być wciąż podtrzymany na pewnym poziomie poprzez sprzężenia pojemnościowo-indukcyjne od zdrowych faz. Minimalizacja tego prądu jest istotna z punktu widzenia procesu poprawnego ponownego załączenia fazy. Zasymlowano scenariusz, w którym zwarcie doziemne występuje w jednej z faz, pośrodku linii napowietrznej (układ z Rys. 3). Parametry łuku zwarciovego zostały w tym przypadku pominięte tj. doziemienie następuje przez stałą rezystancję [13]. Obliczony prąd zwarciovym wtórny prezentuje Rysunek 10. Dzięki zastosowaniu dławika zerowego NGR, amplituda prądu zwarciovego wtórnego została obniżona z 23.8 A do 0.8 A, co pozwala na skuteczne zrealizowanie ponownego załączenia fazy w cyklu SPZ-1. W celu uproszczenia analizy nie uwzględniono fizyki łuku zwarciovego. Do reprezentacji łuku posłużyła liniowa rezystancja [12].



Rys.10. Symulacja EMTP-ATP, prąd zwarciovym wtórny po wyłączeniu zwartej fazy, liniowa reprezentacja łuku zwarciovego

Wyznaczenie parametrów dławika zerowego NGR wiąże się nie tylko z określeniem indukcyjności, jaka jest potrzebna do spełnienia wymogów eliminacji rezonansu oraz prądu zwarciovego wtórnego. Ważnymi aspektami są parametry związane z maksymalnym prądem pracy ciągłej, a także prądem przetężeniowym 10-cio sekundowym. Nieodłącznym jest również wyznaczenie wymaganego poziomu ochrony przepięciowej BIL (z ang. – *Basic Insulation Level*), aby określić maksymalny dopuszczalny poziom przepięć pochodzenia zarówno łączeniowego, jak i atmosferycznego [5, 8]. Standardowo w tym celu wykorzystuje się ogólny wzór (12), uzależniający poziom BIL_{NGR} dla dławika zerowego NGR od poziomu BIL dławika kompensacyjnego, a także impedancji obu dławików (X_N oraz X_1):

$$(12) \quad \frac{BIL_{NGR}}{BIL} = \frac{X_N}{X_1 + X_N}$$

Ostatnim, kluczowym aspektem jest odpowiedni dobór ogranicznika przepięć, który zostanie zainstalowany równolegle do dławika zerowego NGR. Celem jest obniżanie wartości szczytowych przepięć szybkozmiennych (wysokoczęstotliwościowych), które mogą zostać wygenerowane na zaciskach tego dławika podczas operacji łączeniowych, a także podczas zwarców oraz wyładowań atmosferycznych.

Przykładowy dobór parametrów dławika zerowego NGR, jaki został dokonany bazując na wyżej zaprezentowanym przykładzie obliczeniowym, ilustruje Tabela 2. Wartości parametrów dobrano na podstawie podanych w artykule zależności oraz symulacji w programie EMTP-ATP.

Tabela 2. Parametry dławika zerowego NGR

Parametr	Wartość
Impedancja znamionowa	760 Ω
Indukcyjność znamionowa	2.42 H
Prąd znamionowy ciągły	10 A
Prąd znamionowy 10 sekundowy	70 A
Napięcie pracy ciągłej	110 kV
Napięcie piorunowe wytrzymałwane dławika kompensacyjnego – BIL	1425 kV
Napięcie piorunowe wytrzymałwane dławika zerowego – BIL _{NGR}	350 kV
Ilość faz	1
Typ izolacji	Powietrzna

Podsumowanie

W artykule przedstawiono w sposób kompleksowy problematykę rezonansu z udziałem dławików kompensacyjnych w sieciach przesyłowych najwyższych napięć. W przeglądzie literatury wskazano, iż z punktu widzenia rozwoju polskiej sieci przesyłowej tematyka jest nowa, gdyż po raz pierwszy dopiero w roku 2015 zastosowano dławiki kompensacyjne na poziomie 400 kV. Dalszy rozwój sieci jest nieunikniony, a co za tym idzie konieczność instalacji dławików kompensacyjnych będzie wymagała uwzględnienia zjawiska rezonansu już na etapie projektowania. Biorąc pod uwagę aktualność problematyki, zaprezentowane zależności matematyczne mogą być pomocne w określeniu parametrów oraz umiejscowienia nowych dławików. W sposób klarowny zweryfikowano poprawność obliczeń przy użyciu symulacji w programie EMTP-ATP. Symulacje pozwoliły także zobrazować wpływ nieliniowej charakterystyki magnesowania dławików na możliwość wystąpienia rezonansu. Uwzględnienie ich w modelu poskutkowało znacznym obniżeniem amplitud tychże przepięć, potwierdzając jednocześnie informacje dostępne w literaturze.

Dodatkowo zaprezentowano możliwość rozszerzenia funkcjonalności oraz uniknięcia rezonansu z udziałem dławików kompensacyjnych poprzez zastosowanie dławików zerowych. Rozwiązanie to nie tylko pozwala na zmianę częstotliwości oscylacji rezonansowych, lecz niesie za sobą także szereg korzyści. Wśród nich najistotniejszym jest wpływ na wartość prądu zwarcowego wtórnego, który stanowi przeszkodę w poprawnej realizacji schematów SPZ. Dzięki odpowiedniemu doborowi dławika zerowego NGR zainstalowanego w punkcie neutralnym dławika

kompensacyjnego można w sposób znaczący zmniejszyć wartość prądu zwarcowego wtórnego umożliwiając tym samym skuteczne ponowne załączenie linii. Własność tę zaprezentowano w oparciu o symulację przykładowego cyklu SPZ. Wśród innych pozytywnych skutków zastosowania dławika NGR można także wymienić spadek napięć indukowanych w liniach odłączonych (m.in. podczas zwarców).

Autorzy: dr inż. Tomasz Kuczek, mgr inż. Tomasz Chmielewski, Centrum Badawcze ABB w Krakowie, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, email: tomasz.kuczek@pl.abb.com, tomasz.chmielewski@pl.abb.com

LITERATURA

- [1] Machowski J., Kacejko P., Robak S., Miller P., Wancerz M., Analizy systemu elektroenergetycznego w średniookresowym planowaniu rozwoju, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 6, 2013
- [2] Lubośny Z., Klucznik J., Dobrzyński K., Wybrane problemy kompensacji mocy biernej linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 42, 2015
- [3] Flisowski, Z. Kosztaluk, R., Methods of overvoltage reduction in power networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 77, n. 11, 2001
- [4] Sulka T., Wilkosz K., Badanie zjawiska rezonansu w sieciach elektroenergetycznych. Przegląd metod, *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI*, V Konf. Naukowo-Techniczna, 2004
- [5] CIGRE WG C4.307, Resonance and Ferroresonance in Power Networks, 2014
- [6] Val Escudero M., Redfern M., Effects of Transmission Line Construction on Resonance in Shunt Compensated EHV Lines, *International Conference on Power Systems Transients*, Canada, 2005
- [7] Bielakow, N.N.; Kuzmiczewa, K.I.; Iwanowski, A., The effect of neutral grounding reactors on the effectiveness of single phase automatic reclosing of the 750 kV Chmielnicka-Rzeszow line, *Energetyka*, nr 1, 1985
- [8] Atmuri S. R., Thallam R. S., Gerlach D.W., Lundquist T.G., Selin D.A., Neutral Reactor on Shunt Compensated EHV Lines, *Transmission and Distribution Conference, Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society*, USA, 1994
- [9] Dadash Zadeh M.R., Sanaye-Pasand M., Kadivar A., Investigation of Neutral Reactor Performance in Reducing Secondary Arc Current, *IEEE Trans. on Pow. Del.*, vol. 23, no. 4, October 2008
- [10] Megahed A.I., Jabr H.M., Abouelenin F.M., Elbakry M.A., Arc Characteristics and a Single-Pole Auto-Reclosure Scheme for Alexandria HV Transmission System, *International Conference on Power Systems Transients*, USA, 2003
- [11] Montanari A. A., Tavares M. C., Portela C. M., Adaptive Single-Phase Autoreclosing Based on Secondary Arc Voltage Harmonic Signature, *International Conference on Power Systems Transients*, Japan, 2009
- [12] Ngamsanroaj K., Premrudeeprechacharn S., Transient Study for Single Phase Reclosing Using Arc Model on the Thailand 500 kV Transmission Lines from Mae Moh to Tha Ta Ko, *International Conference on Power Systems Transients*, Japan, 2009
- [13] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K., Czapp S., Secondary arc modelling for single pole reclosing analyses, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, (pp. 1-5), 2015
- [14] ABB Application Guidelines, Overvoltage protection: Metal oxide surge arresters in medium voltage systems, Switzerland, 2011
- [15] IEC 60071-4: Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks, 2004