

Identyfikacja zakłóceń w wielotorowych różnopoziomowych napięciowo liniach elektroenergetycznych

Streszczenie. W artykule omówione zostały skutki występowania zakłóceń zwarciowych niejednoczesnych w wielotorowych liniach przesyłowych. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników obliczeń otrzymanych dla układu pracującego w warunkach rzeczywistych - wykorzystanego w analizie weryfikacyjnej.

Abstract. In the paper are discussed effects of complex shortcuts in multilines transmission lines. The analysis is performed on the basis of calculation of results obtained in real conditions. **Identification of the disruptions in the coupled multi voltage transmission lines**

Słowa kluczowe: linie wielonapięciowe, identyfikacja, złożone zakłócenia zwarciowe, przebiegi przejściowe.

Keywords: coupled multi voltage transmission lines, identification, complex fault disruptions, transients.

doi:10.12915/pe.2014.08.27

Wstęp

Współczesne systemy elektroenergetyczne (SEE) charakteryzują się bardzo dużą złożonością, zarówno struktury, jak i sposobu powiązań (tak fizycznych jak i funkcyjnych) pomiędzy ich elementami składowymi. Nieustający wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wymusza zwiększenie liczby źródeł w sieci na różnych poziomach napięcia. Niezależnie od napięcia znamionowego źródeł, każde z nich wpływa w mniejszy lub większy sposób na pracę SEE. Zwiększona generacja i zapotrzebowanie na moc w sieci (szczególnie od SN wzwyż) skutkuje coraz większym obciążeniem sieci przesyłowej i rozdzielczej. Niestety, budowa nowych ciągów liniowych WN i NN jest w dzisiejszych czasach bardzo utrudniona - szczególnie z punktu widzenia uzyskania pozwolenia na budowę linii, co wiąże się z koniecznością spełnienia wielu wymagań prawnych. Ważne jest także zagwarantowanie odpowiedniego bezpieczeństwa ludzi, co realizowane jest między innymi poprzez:

- zachowanie bezpiecznych odległości linii od ziemi oraz obiektów znajdującej się w jej pobliżu,
- nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego (dla częstotliwości 50 Hz), wynoszących odpowiednio - 10 kV/m dla natężenia pola elektrycznego oraz 60 A/m dla natężenia pola magnetycznego.

Oba wymienione wyżej czynniki w znaczący sposób wydłużają czas budowy nowych linii elektroenergetycznych. Dlatego też bardzo ważne jest wykorzystanie w sposób jak najbardziej efektywny zdolności istniejących linii przesyłowych. Może to być realizowane na kilka sposobów. Pierwszą możliwością jest tzw. intensyfikacja zdolności przesyłowych linii, polegająca na wykorzystaniu dynamicznej obciążalności termicznej linii. Innym mniej znanym rozwiązaniem, jest prowadzenie linii o różnych poziomach napięć na tych samych konstrukcjach wsporczych. Pomimo że długość tego typu linii jest najczęściej znikoma w porównaniu do sumarycznej liczby tras ciągów liniowych WN i NN, we współczesnych systemach elektroenergetycznych, w niektórych przypadkach takie rozwiązanie jest jedynie możliwe. Prowadzenie linii o różnych napięciach znamionowych na jednej konstrukcji wsporczej, wiąże się jednak z niebezpieczeństwem wystąpienia złożonych zakłóceń, których konsekwencje mogą być bardzo niepożądane z punktu widzenia pracy SEE. Aktualnie bardzo mało wyników badań dotyczących zakłóceń w liniach wielonapięciowych można znaleźć w literaturze światowej. W niniejszym artykule podjęto próbę prezentacji

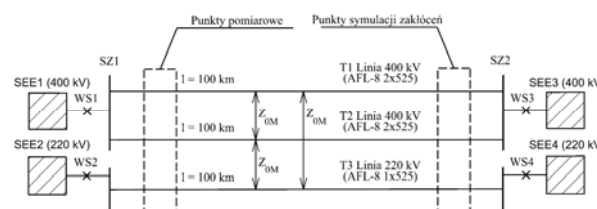
konsekwencji występowania zakłóceń zwarciowych dla przykładowej linii elektroenergetycznej.

Modelowanie i analiza zakłóceń w wybranej linii wielonapięciowej

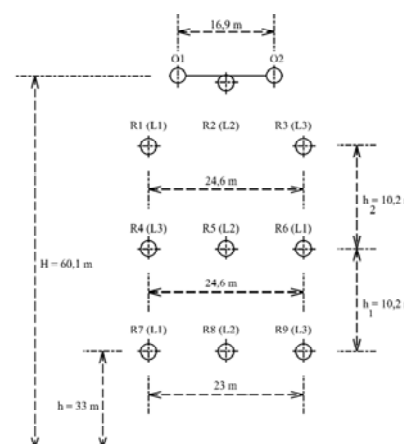
Modelowany układ sieciowy jest dwustronnie zasilany, przy czym moce zwarciowe systemów są takie same po obu stronach pręśla zastępczego a_z i wynoszą:

- dla linii 400 kV: $S_{kSEE1} = S_{kSEE3} = 15$ GVA,
- dla linii 220 kV: $S_{kSEE2} = S_{kSEE4} = 5$ GVA.

Badana linia jest linią dwunapięciową, trójtorową: 2x400 kV (tory T1 i T2) + 1x220 (tor T3). Na całej długości pręśla zastępczego o długości $a_z = 100$ km linia jest dwunapięciowa, z płaskim układem przewodów roboczych (rys. 2). Schemat analizowanego układu przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat badanej linii dwunapięciowej



Rys. 2. Schemat badanej linii dwunapięciowej

Parametry geometryczne konstrukcji wsporczych zamieszono w tab.1, natomiast w tab.2 zestawiono dane przewodów roboczych i odgromowych. Zakłócenia w badanej linii symulowano na szynach SZ2, natomiast pomiarów prądów i napięć dokonano na początku linii

(szyny SZ1). Symulowano zakłócenia niejednoczesne z udziałem ziemi lub bez jej udziału, jako najczęściej występujące w liniach napowietrznych. Z uwagi na zwieranie faz o różnych poziomach napięć, mówi się w takich przypadkach o tzw. zwarciach międzysystemowych.

Tabela 1. Parametry konstrukcji wsporczych analizowanej linii dwunapięciowej

NP	RP	NTL	U_N , kV	x , m	h , m	h_z , m	n_{pw}	a_w , m
1	R	1	400	-12,3	53,4	50,4	2	0,4
2	R	1	400	0	53,4	50,4	2	0,4
3	R	1	400	12,3	53,4	50,4	2	0,4
4	R	2	400	-12,3	43,2	40,2	2	0,4
5	R	2	400	0	43,2	40,2	2	0,4
6	R	2	400	12,3	43,2	40,2	2	0,4
7	R	3	220	-11,5	33	30	-	-
8	R	3	220	0	33	30	-	-
9	R	3	220	11,5	33	30	-	-
10	O	-	-	-8,45	60,1	57,1	-	-
11	O	-	-	8,45	60,1	57,1	-	-

gdzie: NP - numer przewodu, RP - rodzaj przewodu: R - roboczy, O – odgromowy, NTL - numer toru linii, U_N - napięcie znamionowe linii, x - odległość przewodu od osi konstrukcji wsporczej, h - wysokość zawieszenia przewodu, h_z - wysokość zawieszenia przewodu z uwzględnieniem zwisu w środku przęsła, n_{pw} - liczba przewodów w wiązce, a_w - odległość między przewodami roboczymi w wiązce, "-" - oznacza, że parametr nie dotyczy danej pozycji w tabeli.

Tabela 2. Parametry przewodów roboczych oraz odgromowych analizowanej linii dwunapięciowej [2]

NP/RP	NTL	TP	S_{nAl} , mm ²	d_{oblP} , mm	R_{obl} , Ω	I_{dd} , A
(1...6)/R	1, 2	AFL-8	525	31,5	0,0564	1030
(7...9)/R	3	AFL-8	525	31,5	0,0564	1030
10,11/O	-	AFL-1,7	95	15,0	0,3451	345

gdzie: TP - typ przewodu, S_{nAl} - znamionowy przekrój części aluminiowej, d_{oblP} - średnica obliczeniowa przewodu, R_{obl} - rezystancja obliczeniowa 1 km przewody w temperaturze 20 °C, I_{dd} - obciążalność długotrwała przewodu.

Wiarygodna identyfikacja i analiza zakłóceń w systemach elektroenergetycznych jest możliwa tylko w przypadku prawidłowo wybranego modelu danego układu elektroenergetycznego. Złożone zjawiska zachodzące podczas zakłóceń systemowych, wymuszają dobór odpowiednich modeli elementów składowych badanego SEE: generatorów, systemów zastępczych, elementów nieliniowych (takich jak np. ograniczniki przepięć), a szczególnie linii napowietrznych lub kablowych [1]. Z punktu widzenia analizy stanów elektromagnetycznych o czasach rzędu milisekund konieczne jest zastosowanie modeli elementów systemu zależnych od częstotliwości. Zwarcia, jako zakłócenia szybkozmienne wymagają bardzo precyzyjnego odwzorowania przebiegów przejściowych oraz ich parametrów charakterystycznych, takich jak amplituda, czas trwania, czy kształt przebiegu. Oprócz prawidłowo dobranego modelu niezbędne jest również przewidywanie odpowiedniej częstotliwości składowych swobodnych występujących podczas zakłóceń.

Niebagatelną rolę ogrywa także prawidłowo dobrany czas kolejnych iteracji w procesie obliczeniowym. Jego wartość jest pewnego rodzaju kompromisem - należy bowiem dobrać czas kilka rzędów mniejszy niż spodziewany interwał czasowy analizowanego zjawiska, ale jednocześnie nie może być on zbyt duży, ponieważ w takim przypadku następuje wydatne wydłużenie obliczeń. Z kolei zbyt mała wartość może skutkować "przekłamaniami" kształtu przebiegów chwilowych oraz pominięciem wartości maksymalnych prądów i napięć (lub innych obliczanych wielkości). Na potrzeby badania zwarć niejednoczesnych dobrano czas iteracji rzędu mikrosekund. Aktualnie dostępna jest liczna grupa programów do analiz stanów przejściowych, pozwalająca na spełnienie wszystkich powyższych wymagań. Uwzględniając dodatkowo wymóg możliwości zamodelowania linii wielonapięciowej, zbiór programów ogranicza się do:

- ATP-EMTP,
- PSS Netomac,

- PSCAD,
- Microtran.

Badania analizowanego układu przeprowadzono w programie Microtran v3.23 [2]. Z uwagi na bardzo dużą liczbę analizowanych przypadków zwarć, w artykule zamieszczono tylko wybrane z nich, odzwierciedlające w najbardziej widoczny sposób charakter zjawisk oraz charakteryzujące się największymi amplitudami z punktu widzenia przepięć. Na rys. 3 pokazano przebiegi chwilowe napięć w fazach dotkniętych zwarcie międzysystemowym dwufazowym bez udziału ziemi - symulowano zerwanie przewodu linii 400 kV i jego opadnięcie na jedną z faz 220 kV. Przebieg chwilowy napięcia w fazie linii 220 kV osiąga maksymalną amplitudę równą 496 kV. Jest to bardzo duża wartość dla linii o napięciu znamionowym 220 kV. Współczynnik przepięć w odniesieniu do napięcia międzyfazowego linii 220 kV wynosi:

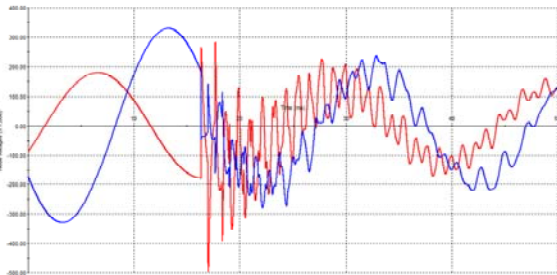
$$(1) \quad k_{zm(220)} = \frac{u_{zm \max}}{\sqrt{2}U_n} = \frac{496}{\sqrt{2}220} = 1,59 \approx 1,6$$

gdzie: $k_{zm(220)}$ - współczynnik przepięć dla zwarć międzysystemowych bez udziału ziemi, u_{zm} - maksymalna wartość chwilowa napięcia podczas zwarcia międzysystemowego (w kV), U_n - znamionowe napięcie w linii 220 kV.

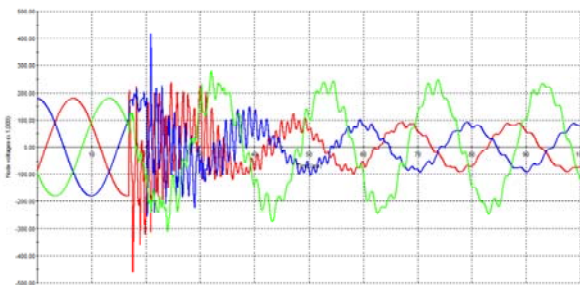
Dla badanej linii jest to wartość znacznie przekraczająca założenia sieci pracującej ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym. Z przebiegów faz dotkniętych zwarcie można zauważyć utrzymującą się znaczną wartość amplitud napięć, co w przypadku zwarć dwufazowych w liniach o jednym poziomie napięcia nie występuje. W układach sieciowych jednonapięciowych NN nawet w przypadku zasilania miejsca zwarcia z wielu źródeł, w fazach objętych zwarcie (niezależnie od rodzaju zwarcia) obserwuje się tzw. zapad napięcia do wartości znikomych, nierzadko bliskich zero. Jak widać w przypadku zwarć międzysystemowych, napięcia faz objętych

zakłóceniem osiągają znaczne wartości, utrzymujące się ponadto przez długi czas - czas nieustalony w układzie wielonapięciowym jest bowiem dłuższy niż w układach o jednym poziomie napięcia. Widać to bardzo dobrze na rys. 4 pokazującym przebiegi napięć dla najbardziej złożonego przypadku z punktu widzenia symulacji zwarć. Przebieg zakłócenia można opisać następująco:

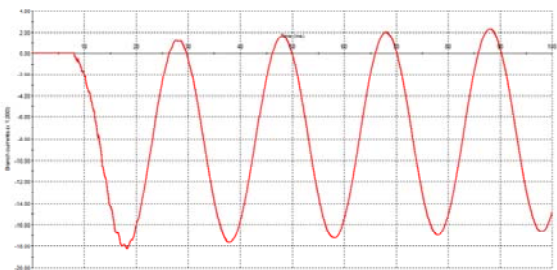
- w chwili $t_{z1} = 10$ ms następuje zerwanie fazy L3 linii 400 kV i w konsekwencji opadnięcie na fazę L2 linii 220 kV,
- w chwili $t_{z2} = 16,6$ ms powstaje zwarcie międzysystemowe w fazach L3₄₀₀ + L2₂₂₀,
- w chwili $t_{z3} = 20$ ms następuje zerwanie fazy L1 linii 220 kV,
- w chwili $t_{z4} = 30$ ms występuje zwarcie z ziemią przewodu fazy L1.



Rys.3. Zwarcie międzysystemowe fazy L3₄₀₀ + L2₂₂₀ po czasie 16 ms - napięcia w linii 220 kV



Rys.4. Zwarcie międzysystemowe fazy L3₄₀₀ + L2₂₂₀ po czasie 16,6 ms oraz zwarcie doziemne w fazie L2₂₂₀ po czasie 30 ms - napięcia w linii 220 kV



Rys.5. Przebieg prądu podczas zwarcia międzysystemowego z udziałem ziemi.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że w przypadku zwarć międzysystemowych oprócz znacznych wartości przepięć w linii o niższym poziomie napięcia znamionowego, jeszcze groźniejszym zakłóceniem dla obu zwartych torów linii wydaje się prąd zwarciovowy.

Dowodem na to jest wartość prądu uzyskana podczas zwarcia międzysystemowego z udziałem ziemi pomiędzy fazami L3₄₀₀ oraz L1₂₂₀, którego przebieg przedstawia rys. 5. Maksymalna wartość chwilowa prądu międzysystemowego przekroczyła w tym przypadku 18 kA. Analogicznie jak w przypadku przebiegów napięć można zauważyć długi czas trwania stanu nieustalonego - duża wartość i długi czas zanikania składowej nieokresowej.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych widać jak niebezpieczne konsekwencje wiążą się z wystąpieniem zwarć w liniach napowietrznych między systemami o różnych napięciach znamionowych. Z punktu widzenia wytrzymałości izolacji szczególnie niebezpieczne są przepięcia w linii o niższym napięciu. Ponadto dla wszystkich torów prądowych linii elektroenergetycznej, powstaje zagrożenie spowodowane znacznymi wartościami prądów zwarciovych. Wartości amplitud prądów i napięć podczas zwarć międzysystemowych uwarunkowane są wieloma czynnikami. Do najważniejszych z nich należą m.in.:

- moce zwarciovowe na szynach zbiorczych stacji elektroenergetycznych,
- rzeczywista długość ciągów liniowych zawierająca linie wielonapięciowe na tych samych konstrukcjach wsporczych,
- parametry geometryczne konstrukcji wsporczych.

Złożoność analizowanych zakłóceń zwarciovych wymaga opracowania wiarygodnego modelu analizowanego systemu, uwzględniającego charakter zjawisk przejściowych. Szczególne znaczenie ma w tym przypadku prawidłowy model linii elektroenergetycznej. Problematyka związana z analizą zakłóceń międzysystemowych powinna być podejmowana ze względu na brak opracowań tego typu w literaturze światowej, a co za tym idzie - deficytem wiedzy na temat zachowania się SEE w stanach złożonych zakłóceń zwarciovych. Nabiera to szczególnego znaczenia w układach przesyłowych, charakteryzujących się dużymi wartościami mocy zwarciovych.

LITERATURA

- [1] P. Sowa: *Representation of power system for electromagnetic transient calculation*, Proceedings of World Academy of Science, Engineering & Technology, Volume30,2008, s. 223-226, ISSN 1307-6884.
- [2] Hermann W. Dommel: *Introduction to the Use of MicroTran and other EMTP Versions*, University of British Columbia, Vancouver 1998
- [3] P. Sowa: *Overvoltage and overcurrent during non-simultaneous faults in transmission lines*, IPST '95 International Conference on Power Systems Transients, Lisbon, 1995, s. 161-166.
- [4] M Kielbon, P Sowa: *Electromagnetic Transient Components Induced by Faults in the Different Coupled Transmission Line*, Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients, 1999, s. 169-172

Autorzy: mgr inż. Rafał Kumala, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: rafal.kumala@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Paweł Sowa, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: pawel.sowa@polsl.pl.