

PRZEPIĘCIA WYSTĘPUJĄCE W STANACH ŁĄCZENIOWYCH DLA LINII PRZESYŁOWEJ WSPÓLPRACUJĄCEJ Z PODSYSTEMEM LOKALNYM

Daria MACHA¹, Paweł SOWA²

1. Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
tel.: 694-704-185 e-mail: daria.macha@polsl.pl
2. Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
tel.: 608-574-638 e-mail: pawel.sowa@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przeprowadzono badania dotyczące przebiegów występujących podczas stanów łączeniowych dla linii współpracującej z podsystemem lokalnym. Przeanalizowano przebiegi pojawiające się w linii połączonej z podsystemem lokalnym podczas operacji łączeniowych, wymuszanych przez zmianę warunków pracy sieci. Badane były elektromagnetyczne przebiegi przejściowe w nieobciążonej linii po jej nagłym odłączeniu od zasilania. W badaniach szczególną uwagę zwrócono na warunki wyłączania linii (moment oraz niejednoczesność odłączania), wpływ urządzeń przeciwprzebiegowych, rodzaj przekładnika oraz moc zwarciovą podsystemów zasilających.

Słowa kluczowe: przebiegi, stany łączeniowe, stany przejściowe, lokalne podsystemy.

1. WSTĘP

Pod koniec ubiegłego wieku w liniach 400 kV odnotowywano dość często występowanie zbyt wysokich poziomów napięcia. Podstawowymi przyczynami były: słabe obciążenie sieci i relatywnie długie ciągi przesyłowe. Linie, szczególnie w stanach słabego obciążenia, są źródłem mocy biernej, a wskutek tego podwyższają poziom napięcia. Z upływem lat linie uległy skróceniu, a sieć 400 kV stopniowo była coraz bardziej dociążana. Jednak następująca ostatnio rozbudowa lokalnych źródeł wytwórczych powoduje odciążenie sieci przesyłowej. Sieci lokalne zasilane z tych źródeł mają dodatkowe połączenie z systemem elektroenergetycznym za pomocą linii WN. Może to powodować zmiany w obciążeniu linii, a co za tym idzie prawdopodobieństwo wystąpienia (wskutek nagłego odłączenia od systemu lokalnego) przekroczeń dopuszczalnych wartości napięcia na końcu nieobciążonej lub słabo obciążonej linii. Sytuację dodatkowo komplikuje to, że w rzeczywistości, w stanach normalnych, w większości lokalizacji są utrzymywane napięcia wyraźnie wyższe, co jest podyktowane przede wszystkim chęcią zmniejszenia strat przesyłowych, a częściowo dążeniem do stworzenia lepszych warunków równowagi (silniejsze wzbudzenie generatorów). W rezultacie przewidywany margines wzrostu napięcia jest znacznie zredukowany. Nagłe zmiany warunków pracy w lokalnym systemie mogą powodować powstawanie stanów podwyższonego napięcia w sieci – przebieg trwałych. W artykule przeprowadzono analizę warunków powstawania przebiegów na końcu linii

podczas zakłóceń w zasilanym systemie lokalnym. Analiza obejmowała wiele zmiennych czynników wpływających na wielkości przebiegów: moment wyłączania linii, niejednoczesność odłączania, wpływ urządzeń przeciwprzebiegowych, rodzaj przekładnika oraz wielkość mocy zwarciovą podsystemów zasilających.

2. CEL ANALIZY

Artykuł zawiera analizę przebiegów zjawisk, jakie występują w linii 400 kV (nieobciążonej lub słabo obciążonej) po jej jednostronnym wyłączeniu. Na podstawie analiz stwierdzono, że w modelowanej linii występują typowe zjawiska zachodzące w odłączanych liniach przesyłowych 400 kV pracujących w takich warunkach. Moc bierna generowana przez pojemności linii przesyłowych jest znacznie mniejsza niż tracona na indukcyjnościach wzdłużnych. Linie przesyłowe stanowią więc w systemie elektroenergetycznym impedancję o wypadkowym charakterze pojemnościowym. Jednostronne wyłączenie linii napowietrznej o znacznej długości może spowodować duży wzrost wartości napięcia, znacznie przekraczający dopuszczalne napięcie robocze.

W urządzeniach pierwotnych o napięciu znamionowym 400 kV, z zasady dopuszcza się długotrwałą wartość napięcia nie większą od 420 kV. Jeśli opisane zjawisko się powtarza, może stanowić jednak zagrożenie dla urządzeń pierwotnych.

Problem przebiegów łączeniowych, powstałych przy wyłączaniu nieobciążonej lub słabo obciążonej linii o znacznej długości, jest szeroko opisany w literaturze. Nagłe zmiany konfiguracji sieci skutkują wystąpieniem przebiegów łączeniowych, mających charakter silnie tłumionych szybkozmiennych przebiegów wyrównawczych. Czas trwania przebiegów wyrównawczych jest zawarty w przedziale od 10 ms do 100 ms. Wystąpienie przebiegów łączeniowych jest istotnym zagrożeniem dla izolacji urządzeń zainstalowanych w sieciach o napięciu znamionowym 400 kV, a ochrona przed tym zjawiskiem nie należy do zadań automatyki przeciwprzebiegowej.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Model linii

Właściwe odwzorowanie linii przesyłowej jest zagadnieniem podstawowym przed przystąpieniem do wykonania symulacyjnych przebiegów przejściowych. Zastosowany model musi spełniać wymagania uzyskiwania wyników o określonej dokładności. W rzeczywistości linia przesyłowa stanowi element układu elektroenergetycznego o równomiernie rozłożonych parametrach, należy zatem zastosować odpowiednie modele oraz metody numeryczne. Model linii opisuje podstawowe równanie macierzowe (1) zawierające macierze napięć u , prądów i , impedancji Z oraz admitancji Y .

$$\left. \begin{aligned} -\frac{du}{dx} &= Z \cdot i \\ -\frac{di}{dx} &= Y \cdot u \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Przy modelowaniu linii należy uwzględnić wymaganą dokładność – dla analizowanego zjawiska (wyjaśnienie tablica 1).

W badaniach stanów przejściowych podczas jednostronnego odłączania linii, w niniejszym artykule przyjęto model Martiego [1] jako odwzorowanie bazowe.

Tablica 1. Wymagania modelu linii przesyłowej w zależności od celu badań.

Analiza Parametr	Przebiegi zwiarcia i łączeniowe	Badanie sygnałów elektromagnetycznych wejściowych dla EAZ
Model bazowy	Parametry rozłożone	Parametry rozłożone
Zależność parametrów od f	Bardzo ważna	Bardzo ważna
Modele przekładników	Napięciowe pojemnościowe oraz indukcyjne	Napięciowe i prądowe z uwzględnieniem nieliniowego modelu nasycenia rdzenia

3.2. Modele aparatury pierwotnej

Dla uzyskania Aby uzyskać wiarygodne rezultaty badań elektromagnetycznych zjawisk przejściowych należy, oprócz zastosowania modelu linii napowietrznej, właściwie odwzorować elementy aparatury oraz urządzeń pierwotnych, tj. przekładniki napięciowe i ograniczniki prądów.

Podczas stanów przejściowych przekładniki napięciowe dokładnie przenoszą sygnał napięciowy. Udział składowej nieokresowej w sygnale napięciowym jest niewielki – nie występuje groźba nasycenia przekładnika. Wszystkie znaczące harmoniczne są odwzorowywane dokładnie po stronie wtórnej, zaś udar prądów magnesujących, pojawiający się podczas załączania przekładników, jest bardzo szybko tłumiony. Błędy przenoszenia sygnałów mogą się pojawić tylko dla sygnałów o bardzo wysokich częstotliwościach.

Przebiegi powstające podczas wyłączenia nieobciążonej linii napowietrznej mogą spowodować zniszczenie izolacji i innych elementów sieci. Do ochrony aparatury elektrycznej przed przejściowymi przebiegami służą ograniczniki prądów (odgromniki), ograniczające czas trwania i częstotliwość prądu następczego. W większości oprogramowań komputerowych gotowe modele odgromników są do dyspozycji użytkownika. Model ogranicznika prądów musiał być uwzględniany w obliczeniach prowadzonych w ramach prezentowanych

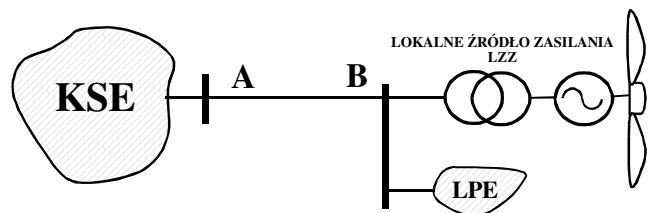
badań. W tym artykule opisano symulacje komputerowe przeprowadzone za pomocą oprogramowania MicroTran z University of British Columbia w kanadyjskim Vancouver [2].

3.3. Ekwiwalentowanie struktur systemu

Określenie schematu zastępczego rozległego systemu elektroenergetycznego jest bardzo trudne, biorąc pod uwagę złożoność układu, nieliniowe właściwości poszczególnych obiektów, rozłożenie przestrzenne parametrów w modelu linii, jak również zależność parametrów linii, transformatorów, generatorów oraz wielu innych elementów od częstotliwości. Określenie schematu zastępczego za pomocą tradycyjnych metod jest niemożliwe.

Najczęściej nie znamy topologii systemu zewnętrznego, niezbędne parametry określone są na podstawie pomiarów lub szacowania. Wykorzystuje się także systemy eksperckie. Aby zminimalizować błędy wynikające z założonej struktury zastępczej, należy w kolejnym etapie dokonać identyfikacji parametrów występujących w tych strukturach [3].

W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) częstym rozwiązaniem jest połączenie lokalnego podsystemu z KSE linią (liniami) sprzęgającą. Na rys. 1 pokazano możliwy układ pracy lokalnych źródeł generacji zdecentralizowanej względem KSE, który może mieć wpływ na zmianę topologii systemu w sensie poszukiwania schematu zastępczego.



Rys. 1. Możliwy układ pracy lokalnych źródeł generacji zdecentralizowanej względem KSE

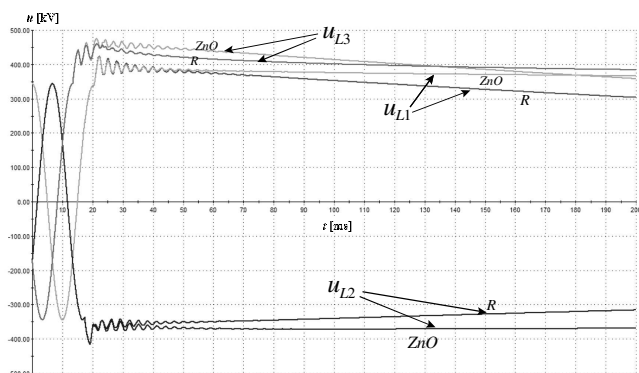
4. ANALIZA WARUNKÓW POWSTAWANIA PRZEPIĘĆ

Dla zbadania warunków powstania prądów wykonano symulację odłączania linii przesyłowej (rys. 1) nieobciążonej - pomiary dokonywano w stacji A. Skupiono się na warunkach, podczas których mogą występować maksymalne wartości współczynników prądów. Dokonano weryfikacji otrzymanych badań symulacyjnych za pomocą programu Netomac (ang. *Network Torsion Machine Control*) [4].

Na rys. 2 zaprezentowano przebiegi napięć w stacji A po odłączeniu linii od zasilania, gdy na początku linii podłączone są ograniczniki modelowane za pomocą dwóch dostępnych odwzorowań. W pierwszym stosuje się modelowanie nieliniowej rezystancji (linearyzacja odcinkowa), w drugim wykorzystuje się charakterystykę prądowo-napięciową warystorów ZnO. Zauważalne jest szybsze tłumienie w przypadku wykorzystania modelu rezystancyjnego, jednak nie ma większej różnicy w uzyskanych współczynnikach prądów.

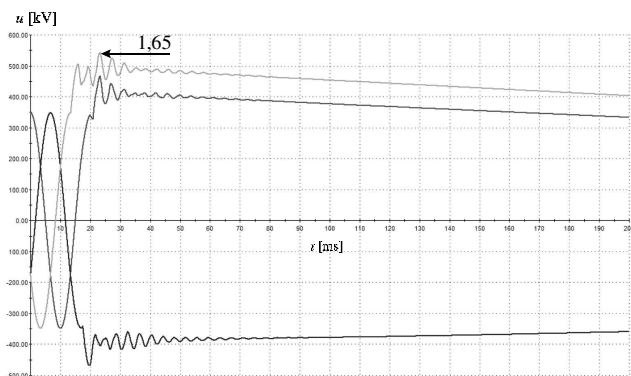
Przebiegi przejściowe, pojawiające się po stronie wtórnej przekładników napięciowych pojemnościowych, nie zmieniają swojego charakteru wraz ze zmianą sposobu odwzorowania ograniczników prądów w układzie przesyłowym po stronie pierwotnej. Przebiegi te w obu przypadkach są szybciej tłumione niż napięcie po stronie pierwotnej, pojawiają się jednak oscylacje będące

konsekwencją składowych swobodnych wyższych częstotliwości. Nakładanie się tych składowych powoduje występowanie dużych krotności napięć po stronie wtórnej przekładników napięciowych pojemnościowych. W ekstremalnych warunkach napięcie po stronie wtórnej nie przekraczało wartości 300 V.



Rys. 2. Przebiegi napięć na początku linii dla różnych modeli ograniczników przepięć

Wnioski dotyczące wzrostu wartości napięć po stronie wtórnej przekładników pojemnościowych nie są jednak tak optymistyczne dla strony pierwotnej, ponieważ ich reakcja na zjawiska przejściowe powoduje występowanie oscylacji w przebiegach pierwotnych, co może powodować powstawanie przepięć w linii przesyłowej 400 kV (rys. 3). Wartość szczytowa napięcia w linii może osiągnąć 1,65-krotną amplitudę napięcia w stanie ustalonym $= 326,6 \text{ kV} (\sqrt{2} * 400 / \sqrt{3})$, czyli prawie 539 kV.



Rys. 3. Przebiegi napięć po stronie pierwotnej przekładnika pojemnościowego zainstalowanego na początku linii

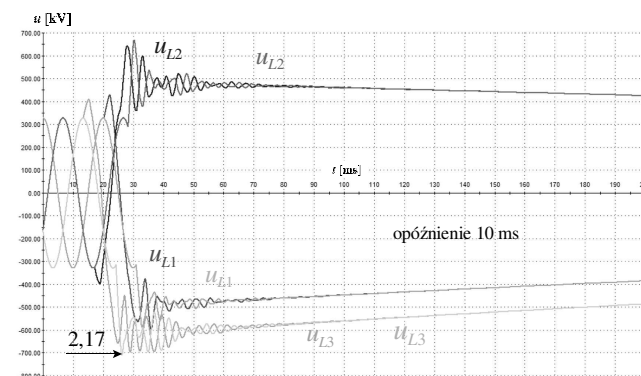
Składowe swobodne występujące podczas elektromagnetycznych stanów przejściowych są szczególnie ważne dla ultraszybkich układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej i zakłóceniowej oraz właściwego doboru aparatury i urządzeń wysokonapięciowych. Znajomość zjawisk związanych z przepięciami łączeniowymi wymaga znajomości amplitudy, częstotliwości i tłumienia składowych swobodnych wyższych częstotliwości, które w istotny sposób wpływają na możliwość występowania przepięć w układach przesyłowych.

Analiza badań symulacyjnych wykazała ogromną liczbę czynników wpływających na współczynniki przepięć.

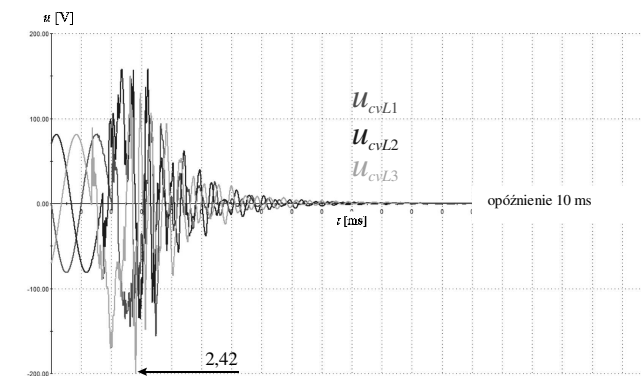
Maksymalne amplitudy składowych swobodnych występują w fazie, której napięcie w momencie wyłączenia osiąga wartość maksymalną. Z krańcowo odmiennych

warunków występowania maksymalnych wartości przejściowych napięć wynika, że praktycznie zawsze podczas zakłóceń pojawiają się składowe swobodne o zróżnicowanych amplitudach i czasach tłumienia. Uwzględnienie zjawiska nakładania się składowych swobodnych podczas zakłóceń niejednoczesnych powoduje wzrost wartości szczytowych oraz czasów tłumienia w stosunku do wartości obliczonych dla zakłóceń jednoczesnych. Niejednoczesność zakłóceń łączeniowych powoduje znaczny wzrost współczynników przepięć w stosunku do maksymalnie występujących podczas zakłóceń jednoczesnych.

Na rys. 4-5 przedstawiono przebiegi przejściowe po stronie pierwotnej oraz wtórnej przekładników pojemnościowych, zainstalowanych na początku linii, podczas wyłączania niejednoczesnego w linii przesyłowej.



Rys. 4. Przebiegi napięć po stronie pierwotnej przekładnika pojemnościowego zainstalowanego na początku linii przy 10 ms opóźnieniu wyłączenia drugiego systemu



Rys. 5. Przebiegi napięć po stronie wtórnej przekładnika pojemnościowego zainstalowanego na początku linii przy 10 ms opóźnieniu wyłączenia drugiego systemu

W przepięciach trwałych oraz dorywczych stosuje się tzw. znamionowy współczynnik napięciowy. Zgodnie ze standardami PSE-Operator [6] dla przekładników napięciowych 400 kV współczynnik ten wynosi (dla ciągłego oraz 30-sekundowego trybu pracy) odpowiednio 1,2 oraz 1,5 [7].

Współczynniki przepięć otrzymane podczas niejednoczesnego wyłączania znacznie przekraczają te wartości. Występujące przepięcia mają charakter przejściowy, jednak powtarzalność tego zjawiska może stanowić zagrożenie dla aparatury pierwotnej. Wśród innych czynników wpływających na wartości współczynników przepięć, niezależnych od uwzględnienia niejednoczesności

zakłóceń, należy wyróżnić strukturę układu i parametry linii przesyłowych, ale także układów zasilających [5].

Wzrost współczynników przebiegów występuje dla bardzo szerokiego zakresu opóźnień wyłączenia faz, ale także dla różnych kombinacji zakłóceń niejednoczesnych. Nakładające się składowe swobodne powodują zniekształcenie przebiegu napięciowego, którego wartość szczytowa jest zależna od ogromnej liczby parametrów oraz warunków panujących w układzie podczas zakłócenia.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Składowe swobodne wyższej częstotliwości, zanikające stosunkowo szybko, mają istotny wpływ na wartości szczytowe napięć chwilowych po obu stronach przekładników napięciowych pojemnościowych. Podczas stanu zakłócenia po stronie pierwotnej przekładnika pojemnościowego energia zmagazynowana w pojemnościach oraz indukcyjnościach powoduje powstanie oscylacji przejściowych po jego stronie wtórnej. Przebiegi przejściowe stanowią kombinację oscylacji sygnałów niskiej częstotliwości ($2 \div 15$) Hz oraz sygnałów oscylacyjnych wysokiej częstotliwości ($900 \div 4000$) Hz. Nakładanie się składowych swobodnych, powstałych po stronie pierwotnej przekładnika, oraz oscylacji własnych mogą spowodować zafałszowanie sygnałów odwzorowywanych po stronie wtórnej. Dotyczy to przede wszystkim składowych swobodnych wyższej częstotliwości decydujących o amplitudzie wywołanych przebiegów. Najgroźniejsze przebiegi na linii występują podczas wyłączeń niejednoczesnych linii nieobciążonej.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych dla wybranej linii pokazują, że maksymalne współczynniki przebiegów podczas wyłączenia linii nieobciążonej mogą osiągać wartość od 1,5 do 2,5-krotnej wartości szczytowej

napięcia chwilowego w stanie ustalonym. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na wartości szczytowe oraz zanikanie składowych może być możliwość pojawienia się zjawiska chaosu ferorezonansowego.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Marti J.R., Accurate modelling of frequency-dependent lines in electromagnetic transient simulations, *IEEE Trans. PAS-101*1982, s.147–157.
2. MicroTran, Transients Analysis Program for Personal Computers, MicroTran Power System Analysis Corporation, Published, Vancouver, B.C., Canada, June, 1991.
3. Sowa P., Search of Optimum Equivalent Representation for Transient Investigations during non-Simultaneous Faults, Proceedings of the IASTED, Int. Conference Modeling and Simulation, Pittsburgh, USA, 1998, IASTED/ACTA Press, s.466–470.
4. Kulicke B., Simulationsprogramm Netomac: Differenzen–Leitwertverfahren bei kontinuierlichen und diskontinuierlichen Systemen, *Siemens Forsch.– und Entwickl. Ber Bd.* 1981, Nr 5, s. 299–302.
5. Analiza możliwości wystąpienia zjawiska ferorezonansu na linii 400 kV Tucznawa– Rzeszów po wymianie przekładników na indukcyjne typu SVS 420, praca wykonana na zlecenie PSE Południe SA, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechnika Śląska, Gliwice 2013.
6. <http://raport.pse.pl/pl/pse#pse-jako-operator-systemu-przesylowego>, Polskie Sieci Elektroenergetyczne 2018
7. PRZEKŁADNIKI NAPIĘCIOWE 400 kV, 220 kV, 110 kV INDUKCYJNE I POJEMNOŚCIOWE, Departament Eksploatacji, PSE SA, 2014

OVERVOLTAGES OCCURRING IN SWITCHING STATES IN TRANSMISSION LINE COOPERATING WITH A LOCAL SUBSYSTEM

In the paper the overvoltages occurring during switching states in the line cooperating with a local subsystem were investigated. Overvoltages appearing in the line connected to the local subsystem during switching operations, were analyzed, forced by the change of network operation conditions. Electromagnetic transients in the unloaded line were tested after its sudden disconnection from the power supply. In the research, particular attention was paid to the conditions of switching off the line (moment and non-simultaneous disconnection), the influence of surge protection devices, the type of voltage transformer and the short-circuit power of the power subsystems.

Keywords: overvoltages, switching states, transient states, local subsystems.