

MODELOWANIE ZJAWISKA FERROREZONANSU W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Konrad KOCHANOWICZ¹, Wiesław NOWAK², Rafał TARKO³

1. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studia doktoranckie
tel.: +48 694 018 743, e-mail: kochanowiczkonrad@wp.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: +48 12 617 28 24, e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl
3. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: +48 12 617 36 53, e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Streszczenie: Zjawisko występowania drgań ferreorezonansowych w systemie elektroenergetycznym jest istotnym problemem w elektroenergetyce. W artykule przedstawiono badania symulacyjne możliwości wystąpienia ferreorezonansu w sieci 110 kV.

Słowa kluczowe: ferreorezonans, EMTP-ATP.

1. WPROWADZENIE

Urządzenia elektroenergetyczne z nieliniowymi obwodami magnetycznymi, takie jak transformatory przekładniki napięciowe czy dławiki, mogą wraz z pojemnościami innych elementów sieci elektroenergetycznych tworzyć układy, w których może wystąpić zjawisko ferreorezonansu [1].

Ferreorezonans inicjowany jest najczęściej przez nagłą zmianę napięcia (głównie przepięcia), zmianę konfiguracji sieci (czynności łączeniowe) lub zmianę obciążenia. Powstają wówczas drgania nieliniowe napięć i prądów, które mogą ustalić się i trwać stosunkowo długo w postaci drgań o częstotliwości podstawowej, wyższych harmonicznym lub subharmonicznym. Drgania napięć powodują występowanie przepięć dorywczych, które mogą osiągać znaczne wartości, niebezpieczne dla izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Nie mniej ważne jest nasycanie rdzeni przekładników napięciowych i transformatorów z przyczyn których powstał ferreorezonans, co najczęściej prowadzi do cieplnego zniszczenia izolacji ich uzwojeń.

Można wyróżnić dwie podstawowe formy ferreorezonansu:

- ferreorezonans szeregowy – przy szeregowym połączeniu nieliniowej indukcyjności z liniową pojemnością,
- ferreorezonans równoległy – przy równoległym połączeniu nieliniowej indukcyjności z liniową pojemnością.

W sieciach średnich napięć (SN) najczęściej występuje ferreorezonans prądów, natomiast w sieciach wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN) występuje ferreorezonans napięć. Różnica ta spowodowana jest odmiennym sposobem połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią. W sieciach SN punkt neutralny jest izolowany bądź uziemiony przez rezystor albo dławika, a sieci WN i NN pracują z bezpośrednio (skutecznie) uziemionym punktem neutralnym.

Zaistnieniu zjawiska ferreorezonansu w systemie elektroenergetycznym sprzyjają pewne specyficzne

konfiguracje sieci. Publikacja CIGRE nr 569 *Resonance and Ferroresonance in Power Networks* [2] wymienia następujące sytuacje, w których może wystąpić to zjawisko:

- 1) wyłączenie indukcyjnych przekładników napięciowych wyłącznikami z kondensatorami sterującymi,
- 2) wystąpienie połączenia indukcyjnych przekładników napięciowych lub nieobciążonych (nieznacznie obciążonych) transformatorów z szeregową pojemnością pomiędzy torami linii wielotorowych oraz pomiędzy liniami biegnącymi w zbliżeniu na pewnej długości,
- 3) załączenie nieznacznie obciążonych transformatorów poprzez linię o znacznej długości z systemu o małej mocy zwarciowej,
- 4) załączanie jedno- lub dwufazowe transformatorów energetycznych,
- 5) transformatory energetyczne przyłączone do linii z kompensacją szeregową.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza przypadków 1) i 2) możliwości wystąpienia ferreorezonansu w wybranej rozdzielni 110 kV.

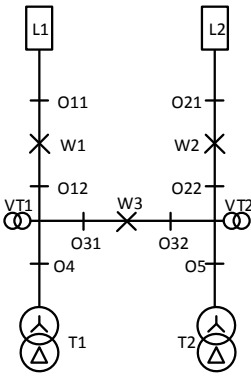
2. ANALIZOWANY SIEĆ 110 kV

Przedmiotem rozważań jest rozdzielnia 110 kV w układzie H3, której uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1a. Jest ona zasilana napowietrznymi liniami 110 kV L1 i L2 z systemów elektroenergetycznych o mocach zwarciowych 1550 MVA oraz 2100 MVA (rys. 1b).

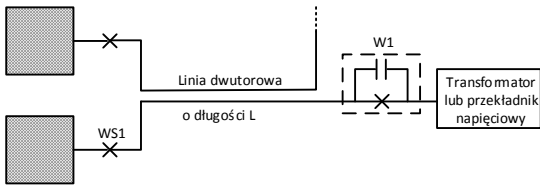
Z punktu widzenia możliwości wystąpienia ferreorezonansu, w rozdzielni tej można wyodrębnić dwa rodzaje urządzeń, które stanowią indukcyjności o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych. Są nimi przekładniki napięciowe indukcyjne VT1 i VT2 oraz nieobciążone transformatory 110 kV/SN (T1 i T2) – rysunek 2a i 2b.

Przeprowadzona analiza obejmowała badanie możliwości wystąpienia ferreorezonansu szeregowego, który może być inicjowany podczas wyłączania szyn zbiorczych (stanowiących węzeł połączenia pół liniowego i transformatorowego z poprzeczką wyłącznikową układu H) obciążonych tylko przekładnikami napięciowymi, albo nieobciążonym lub słabo obciążonym transformatorem.

a)

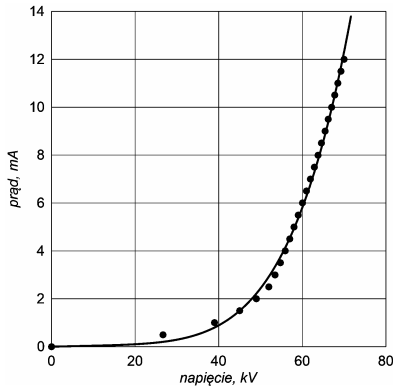


b)

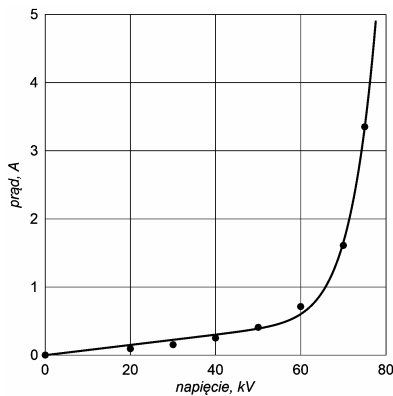


Rys. 1. Uproszczony schemat analizowanego układu: a) rozdzielni 110 kV, b) sieci 110 kV.

a)



b)



Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa:

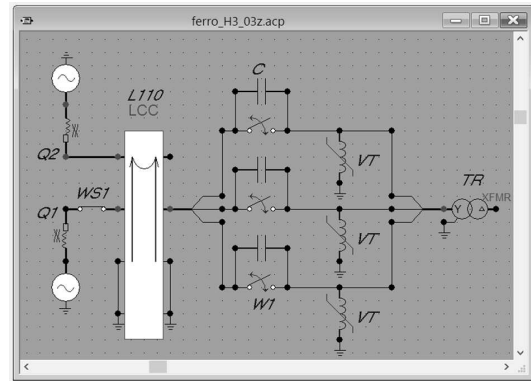
- a) przekładnika napięciowego 110 kV,
b) nieobciążonego transformatora 110/15 kV, 16 MVA

Przeanalizowano dwa przypadki. Pierwszy z nich dotyczy wyłączania szyn wyłącznikiem W1 wyposażonym w kondensatory sterujące (bocznikujące komory gaszeniowe), natomiast drugi, szyn wyłączanych wyłącznikiem WS1 w stacji sąsiedniej. Operacja łączeniowa analizowana w drugim przypadku prowadzi do sprzężenia pojemnościowego w dwutorowej linii zasilającej rozpatrywaną rozdzielnię.

Symulacje zjawisk ferorezonansowych przeprowadzono w programie *EMTP-ATP* (rys. 3). W tym celu

opracowano model analizowanego fragmentu sieci 110 kV, który odwzorowuje jej istotne elementy:

- 1) systemy elektroenergetyczne Q1 (1550 MVA) i Q2 (2100 MVA) o napięciu 110 kV,
- 2) wyłącznik WS1,
- 3) model L110 dwutorowej linii 110 kV o długości l ,
- 4) wyłączniki W1 z kondensatorami bocznikującymi o pojemności C ,
- 5) nieliniowe indukcyjności VT (przekładniki napięciowe 110 kV) o charakterystyce prądowo-napięciowej przedstawionej na rysunku 2a,
- 6) model TR transformatora 110/15 kV, 16 MVA o charakterystyce prądowo-napięciowej biegu jałowego, przedstawionej na rysunku 2b.

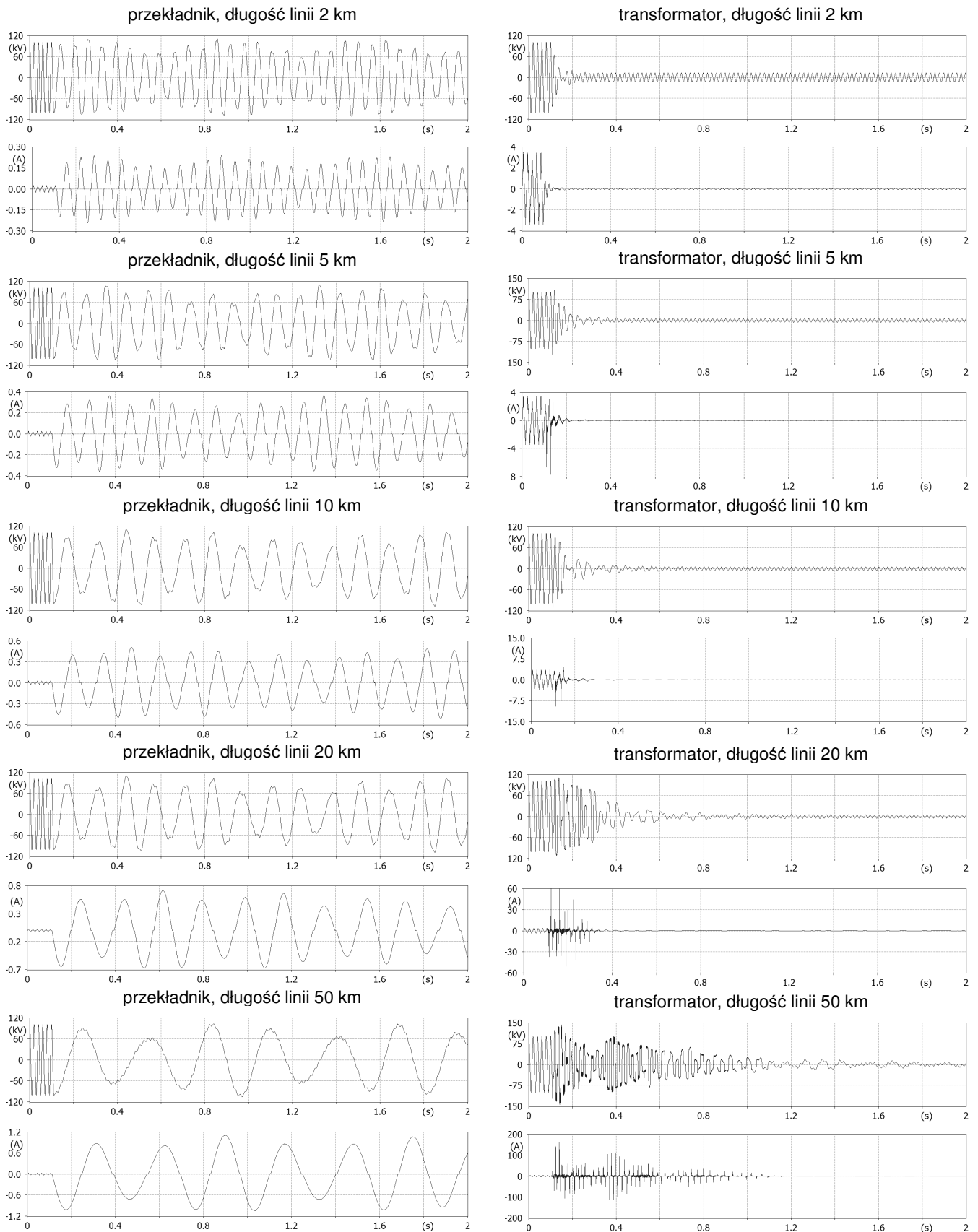


Rys. 3. Model analizowanego układu w programie *EMTP-ATP*.

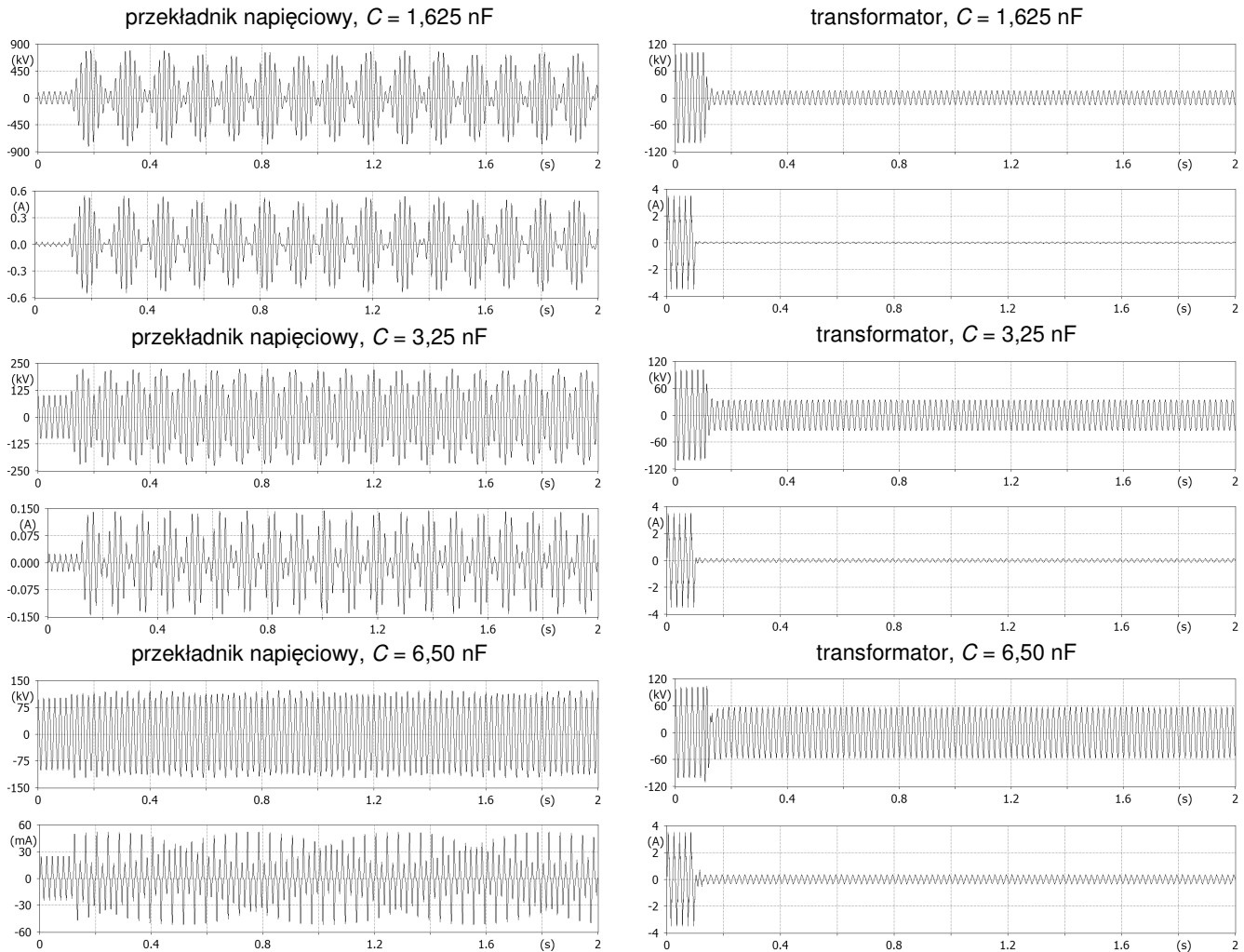
3. WYNIKI SYMULACJI

Otrzymane wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 4 i 5. Rysunek 4 dotyczy wyłączania szyn zbiorczych wyłącznikiem WS1 w stacji sąsiedniej, przy otwartym wyłączniku sekcyjnym W3. Zawiera on przebiegi napięć fazowych szyn zbiorczych oraz prądów płynących po stronie 110 kV w przekładnikach napięciowych oraz w transformatorze. Obliczenia przeprowadzono dla pięciu długości zbliżenia linii wyłączanej do sąsiedniego toru ($l = 2$ km, 5 km, 10 km, 20 km, 50 km). Długość l determinuje pojemność szeregową sprzężenia toru linii będącego pod napięciem z nieliniową indukcyjnością przekładnika albo transformatora. Z przedstawionych przebiegów wynika, że w analizowanej rozdzielni może dojść do trwałego ferorezonansu w przypadku obciążenia szyn zbiorczych tylko przekładnikami napięciowymi. Zjawisko to występuje dla każdej z rozpatrywanych długości l linii 110 kV, przy czym większym długościom odpowiadają większe wartości prądów w przekładnikach. Długotrwałe utrzymywanie się takiego stanu, może doprowadzić do uszkodzenia cieplnego uzwojeń przekładników. Dla szyn zbiorczych obciążonych transformatorem w stanie jałowym, nie stwierdzono możliwości wzbudzenia trwałych drgań ferorezonansowych.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi napięć i prądów przy wyłączaniu szyn wyłącznikiem W1 wyposażonym w kondensatory sterujące (bocznikujące komory gaszeniowe). Rozpatrzono trzy wartości pojemności kondensatorów wynoszących 1,625 nF, 3,25 nF i 6,50 nF. Podobnie jak w poprzednim przypadku zaobserwowano możliwość wzbudzenia ferorezonansu w układzie z przekładnikami napięciowymi, natomiast zjawisko to nie wystąpiło przy obciążeniu szyn zbiorczych transformatorem.



Rys.4. Przebiegi napięć fazowych szyn zbiorczych oraz prądów płynących po stronie 110 kV w przekładnikach napięciowych oraz w transformatorze, podczas wyłączania szyn zbiorczych wyłącznikiem WS1 w stacji sąsiedniej



Rys.5. Przebiegi napięć fazowych szyn zbiorczych oraz prądów płynących po stronie 110 kV w przekładnikach napięciowych oraz w transformatorze, podczas wyłączania szyn zbiorczych wyłącznikiem W1 wyposażonym w kondensatory sterujące

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wykazała możliwość wystąpienia ferrezonansu szeregowego w sieciach wysokich napięć. Należy wskazać, że urządzeniami szczególnie narażonymi na negatywne skutki tego zjawiska są przekładniki napięciowe, przyłączone do nieobciążonych szyn zbiorczych rozdzielni. O wystąpieniu ferrezonansu w rzeczywistej sieci decyduje charakterystyka prądowo-napięciowa nieliniowego elementu indukcyjnego oraz wartość pojemności sprzęgającej.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Nowak W.: Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 22, Issue 4, Oct. 2007, pp. 2362 - 2369
2. CIGRE, CIGRE No. 569 – Resonance and Ferroresonance in Power Networks, February 2014

MODELING AND ANALYSIS OF THE FERRORESONANCE PHENOMENA IN THE ELECTRICAL GRID

The ferroresonance phenomena in the power system is a significant problem in electric grid. The nonlinear vibration of the current and the voltage present a risk to the electrical apparatus. Due to the nonlinearity of that phenomena a classical analysis method are not applicable and digital methods of analysis are necessary. The article presents application of the EMTP-ATP program to determine simulation results. EMTP-ATP is a universal program system for digital simulation of transient phenomenon of electromagnetic. To analysis was subjected the 110kV double-circuit overhead lines with two different nonlinear elements – power transformer and voltage transformer. That types of circuit is one of the susceptible to ferroresonance oscillations. Computer simulations confirmed that theory. The oscillation were observed for the given configuration. The results of the simulation shows that a voltage transformer are particularly vulnerable to ferroresonance phenomenon.

Keywords: ferroresonance, EMTP-ATP.