



**RESEARCH AND PROTECTION OF ENERGY TRANSMISSION LINES  
FROM THE FERRORESONANCE OVERVOLTAGES**

**Ahmet NAYIR\***

*Fatih Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Büyükdere-İSTANBUL*

**Received/Geliş: 07.09.2010 Revised/Düzeltilme: 14.12.2010 Accepted/Kabul: 28.02.2011**

---

**ABSTRACT**

This paper focuses on ferroresonance overvoltage in energy transmission lines. Ferroresonance is an oscillation in a non-linear series resonance circuit, which shows overvoltage and overcurrent waveforms with significant distortion. The high voltage equipments may be damaged due to dielectric and thermal problems of Ferroresonance. One of the problems of energy transmission lines is that they need to be protected from ferroresonance overvoltage. In this article, the overvoltage of energy transmission lines is investigated. In order to abolish the overvoltage the ways of using reactors in the beginning and at the end of energy transmission lines are shown. A very comprehensive analysis is performed using time domain simulations with ATP (Alternative Transient Program). Simulation results reproduced satisfactorily the ferroresonant events recorded during the field tests in the 500 kV. energy transmission lines. A number of mitigation options are discussed.

**Keywords:** Ferroresonance, EMTP/ATP, power system modeling, energy transmission lines, protection.

**ENERJİ İLETİM HATLARINDA FERROREZONANS AŞIRI GERİLİMLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI VE KORUNMA**

**ÖZET**

Bu makalede enerji iletim hatlarında ferrozonans aşırı gerilimlerine odaklanılmıştır. Ferrozonans; dalga şeklini önemli oranda saptırarak aşırı gerilim ve aşırı akım şeklinde dalgalanarak, doğrusal olmayan seri rezonans devresinde dalgalanma şeklinde hareket etmektedir. Ferrozonansın ısınma problemleri ve dielektrikten dolayı yüksek gerilim donanımları zarar görebilir. Enerji iletim hatları problemlerinden biri de sistemi ferrozonans aşırı gerilimlerden korumaktır. Bu makalede, ferrozonans aşırı gerilimleri incelenmiş ve ortadan kaldırmak için enerji iletim hattının başında ve sonunda reaktörlerden yararlanmanın yolları gösterilmiştir. Geniş kapsamlı analizler zaman domeninde simülasyonlar kullanılarak ATP'yle gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları 500 kV. enerji iletim hattında, ferrozonans olayı ilgili alan testleriyle alakalı olarak kayıtlar alınarak yeterince tekrarlanmıştır. Azaltılan seçenekler arasından biri detaylandırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Ferrozonans, EMTP/ATP, güç sistem modeli, enerji iletim hatları, koruma.

---

\* e-mail/e-ileti: anayir@fatih.edu.tr, tel: (212) 866 33 00 / 2438

## 1. GİRİŞ

Güç kalitesini bozucu etkiler; elektrik arzının güvenilirliği, kalitesi ve sürekliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Elektrik sistemi'nin zaafiyetleri, yüklerin bozucu etkileri, atmosfer ve doğa olayları gibi kontrol edilemeyen etkenler nedeniyle de azalmaktadır. Amaç, ekonomik olarak yapılabilir arz güvenilirliği ve güç kalitesini en üst düzeye getirmektir.

Güç kalitesini belirleyen belli başlı temel bileşenler; elektrik enerjisi arzının sürekliliği, frekans, gerilimin etkin değeri, gerilimde geçici süre için oluşan çukur (sağ) ve tepeler (swell), ani gerilim değişimleri, fazlar arası dengesizlik, gerilim ve akım dalga şekillerinde oluşan harmonik bileşenler ve kırpışma (flicker) olarak sıralanabilir. Bu bileşenlerin sürekli olarak anma değerlerinde sabit kalması, veya tedarik sürekliliğinin %100 olması ideal durum olup, dünyada mevcut hiç bir elektrik sistemi için geçerli değildir. Bu bileşenlerin pek çoğunun anma değerlerinden ne kadar sapabileceği değişik ulusal ve uluslararası standartlarda belirtilmiştir. Teknoloji ilerledikçe, anma değerlerine bağlı olarak izin verilen sapmaların daha da küçüleceği beklenmektedir. Herhangi bir ölçüm noktasında güç kalitesi bileşenlerinin nasıl ölçüleceği IEC 61000-4-30 standardında tanımlanmış olup, gece/gündüz, puant, hafta içi ve hafta sonunu kapsaması amacıyla en az bir haftalık ölçüm yapmayı gerektirmektedir[1].

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımını profesyonel anlamıyla yüksek teknoloji kullanmayı gerektirmektedir. Enerji iletim hattında; jeneratörler, transformatörler, kapasitörler, koruma elemanları ve yükler bulunmaktadır. Böyle bir iletim sisteminde bu tür elemanların bulunması devrenin farklı çalışma durumlarında veya bazı arıza hallerinde çeşitli fiziksel olaylara yol açabilir [2]. Bir güç sisteminde, transformatörlerinde bulunduğu hatta yük gruplarından bazılarının devre dışı kalmasıyla yada çok az yüklenmesiyle ferreazonans oluşabilir[3]. Elektrik güç sistemlerinde ferreazonansın olduğu uzun yıllardır bilinmektedir. Ferreazonansı anlamak ve analiz etmek için çeşitli modeller kullanılmıştır. Hayashi [4] doğrusal olmayan diferansiyel denklemin yaklaşık periyodik çözümünü yapmak için harmonik balans metodunu kullanmıştır. Frekansın içeriğine bağlı olarak ferreazonans dalgalanmaları normal olarak harmonik, temel, alt harmonik, quasi periyodik, düzensiz ferreazonans şeklinde sınıflandırılabilir[5].

Güç sistemlerinde ferreazonans'ın etkisi transformatörler, iletim hatları ve tüm ekipmanlar üzerinde yıkıcı olabilir [6]. Çünkü ferreazonansta sistem üzerindeki gerilim nominal gerilimin yaklaşık olarak (1,5-3) katı olabilmektedir [2]. Ferreazonans sonucu oluşan arızalar zaman zaman bilimsel yayınların ana konusu olmuştur[7,8].

[9] Haşimov A. M., Nayir A., Dimitriyev Y. V. Çalışmalarında uzun enerji iletim hatlarında yüksek harmonikli ferreazonans aşırı gerilimlerinden korunma konusunu incelemişlerdir. Daha sonra açık bir şekilde, "Gelecekte hangi durumda ve neden B fazındaki boşaltıcıların devreden çıktığının sebeplerini araştırmak gerekecektir. Bunun için ayrı ayrı her bir fazın devreden çıkmalarına ilişkin istatistiksel bilgilerin toplanmasına gereksinim vardır" ifadesi kullanılmıştır. Özet olarak bu çalışma [9] nolu çalışmanın devamıdır.

Ferreazonans doğrusal olmayan bir olaydır ve çeşitli yöntemlerle analiz edilebilir. Bu çalışmada üç fazlı, 500 kV.'luk sistem geriliminde ferreazonans olayı ATP paket programı ile modellenerek genel bir yaklaşım elde edilmiştir. Sistem üzerinde analiz edilmiş, sonuçlar yorumlanmış ve ferreazonans etkilerinin oluşturduğu çeşitli akım, gerilim dalga formları incelenmiştir. İncelenen şebeke; jeneratör ve iletim sisteminden meydana gelmektedir. Şebekede kullanılan transformatörlerden birinin yıldız noktası topraklanmıştır. Modellenen sistemde oluşan harmoniklerin analizleri yapılmış ayrıca bu analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Ferreazonansın önlenmesine yönelik tedbirlere değinilmiştir. Aşırı gerilimleri ortadan kaldırmak için enerji iletim hattının başında ve sonunda reaktörlerden yararlanmanın yolları gösterilmiştir. Bu reaktörler, hattın devreye alınmasına kadar devrede kalır, hattın devreden alınmasından sonra devreden çıkarılır. Problemin çözümünde, daha önce yazılmış olan makalelerde verilen [2,10,11] dalga olaylarının analizi için geliştirilmiş sayısal yöntemden yararlanılmıştır.

## 2. AŞIRI GERİLİMLER

Aşırı gerilimlerin genlikleri, şebekenin yapısına ve ortaya çıkmalarına yol açan olaylara bağlı olarak, normal işletme geriliminin birkaç katına kadar çıkabilmektedirler. Aşırı gerilimlerin ortak özellikleri, yalnızca ortaya çıktıkları bölümlerde değil; tüm sistem üzerinde yürüyen dalgalar biçiminde, ışık hızı düzeyindeki hızlarla yayılarak, sistemde yer alan tüm aygıtların yalıtımlarının zorlanmasına yol açabilmeleridir. Güç sistemlerinde ortaya çıkan aşırı gerilimler, gerilim yükselmeleri, iç aşırı gerilimler ve dış aşırı gerilimler biçiminde sınıflandırılabilirler. İç aşırı gerilimler, genel olarak devre açma-kapama, sonucunda oluşan aşırı gerilimlerdir. Dış aşırı gerilimler, atmosferik etkilerle ortaya çıkan gerilimlerdir [12].

Gerilim yükselmelerine ilişkin karakteristik büyüklükler, gerilimlerin genlikleri ve etki süreleridir. Genel olarak işletme sırasında ortaya çıkan olaylardan kaynaklanırlar. Örneğin jeneratör yükünün kalkması, jeneratörün kapasitif yüklenmesi, bir hava hattının yükünün kalkması, kapasitif devrenin açılması, faz toprak kısa devresi gibi olaylar sonucunda veya rezonans- ferorezonans nedeniyle oluşabilirler. Rezonans ve ferorezonans olaylarından kaynaklanan gerilim yükselmeleri, genel olarak, iletim hatları, kablolar gibi büyük kapasiteli ve transformatör, şönt reaktör gibi doğrusal olmayan mıknatıslanma karakteristiklerine sahip büyük endüktanslı elemanların enerjilendirilmeleri veya ani yük değişimleri sırasında oluşurlar. Hattın enerjilendirilmesi rezonans koşullarını tetiklediğinden, faz geriliminin 1,5 katına kadar gerilim yükselmeleri ortaya çıkabilmektedir. Manyetik gerilim ölçme transformatörleri de ferorezonans koşullarını tetikleyebilirler. Ferorezonans, üçüncü harmoniğin ortaya çıkmasına yol açmakla birlikte gerilim, işletme gerilimi düzeyinde kalır. Ancak, buna bağlı olarak, gerilim transformatörünün birincil sargı akımı, nominal değerinin birkaç katına kadar yükselip, sargıda aşırı ısınmalara yol açabilir. Sistemde yer alan aygıtların yalıtım düzeyleri, genel olarak bu gerilimlere dayanabilecek biçimde boyutlandırılır. Koruma aygıtlarının, bu gerilimlerde devreye girmeleri beklenmez. Ancak; bu gerilimler, bazı tip parafudrlarda kaçak akımın ohmik bileşeninin büyümesine ve uzun sürmeleri durumunda, aşırı ısınma sonucunda parafudrların arızalanmasına yol açabilirler. Bu bakımdan gerilim yükselmeleri, sistemde kullanılacak koruma aygıtlarının nominal değerlerinin belirlenmesinde göz önüne alınmalıdır. Geçmişte yüksek gerilim sistemlerinde açma kapama aşırı gerilimlerini sınırlamak amacıyla, kapama anında kesiciye seri direnç eklemek, faz gerilim açısını kontrol ederek kapama gibi yöntemlere başvurulurken; günümüzde bu amaca yönelik olarak metal-oksit parafudrların kullanılması tercih edilmektedir [13]. Ferorezonans aşırı gerilimi detaylı olarak araştırılarak, bu gibi aşırı gerilimlerin sınırlandırılması için değişik yöntemler teklif edilmiş ve uygun devreler önerilmiştir. Bu devreler Gerilim Transformatörü (GT)'nin hem alçak, hem de yüksek gerilim taraflarına bağlamak için dikkate alınmıştır [14]. Bu devrelerden en etkilisi GT'nin alçak gerilim tarafına balast direncinin bağlanması ve bu sargısına dağıtım şebekesinden zıt gerilim vermektedir. GT'nin alçak gerilim uçlarına zıt yönde gerilim uygulanması transformatörün manyetik devresinde söndürücü etki gösterir.

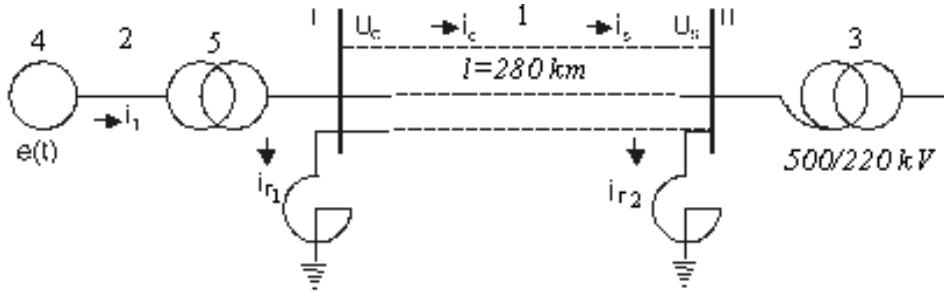
Ferorezonansın sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir. Ferorezonans;

- Yıldız Noktası topraklanmış şebekelerde sistemin boşa çalışması yada çok az yükte çalışması
- Gerilim Transformatörü'nün aşırı yüklenmesi veya boşa çalışması durumu
- Fazlardan birinin veya ikisinin kesilmesiyle veya açılıp kapanması
- Transformatör veya Kondansatörün anahtarlanması
- Bağlama hatası sonucunda oluşan simetrisizler
- Az yüklü güç transformatörlerinin kısa devre yüküyle şebekeye bağlanması,
- İletim hattına yıldırım düşmesi

sonucunda, oluşabilir.

### 3. EŞDEĞER DEVRE MODELİ

Bir iletim sisteminde ferrezonans meydana geldiğinde, sistemin çalışma frekansı, yükleri ve iletim hatlarının uzunluğuna göre farklılıklar gösterebilir. Sistemde, uzunluğu 280 km. olan 1 enerji iletim hattı 2 ve 3 nolu dağıtım istasyonlarını birbirine bağlamaktadır. Enerji iletim hattı, 4 jeneratör ile 5 nolu transformatör üzerinden beslenmektedir. 3 dağıtım istasyonuna gücü 450MVA olan 500/220 kV. luk bir transformatör bağlıdır. Gösterilen sistemde ferrezonans olayını açıklamak için aşağıdaki denklem sistemi kullanılmıştır. Bu da [2,9]deki sayısal yöntemin varlığını gösterir. Sonuç olarak bulunmuş formülleri I, II düğüm noktaları ve enerji iletim hattı için ayrı ayrı gösterelim.



Şekil 1. Yüksek harmonikli ferrezonans aşırı gerilimlerinden korunma devre şeması

I.düğüm noktası için;

$$\frac{d i_{i_1}}{d t} = L_b^{-1} \left[ (t) - r_b i_1 - U_e \right] \quad \frac{d i_{r_1}}{d t} = L_{r_1}^{-1} \cdot U_1; i_{l=i_c} + i_{r_1}; U_e = (z + z_n) \cdot (i_1 - i_{r_1}) - V_q \quad (1)$$

Burada  $L_b$ ,  $r_b$ ,  $L_{r_1}$  blokun ve reaktörün parametreleridir. Buradaki  $L_T$ ,  $L_g$ ,  $r_r$ ,  $r_g$  jeneratöre ve transformatöre ilişkin parametrelerdir. Fazlar açılmaya başladığında transformatörün mıknatıslanma eğrisini dikkate almak gerekir ki, o zaman aşağıdaki formüller kullanılır.

$$L_b = \begin{bmatrix} L_T + \frac{2}{3} L_g & -\frac{1}{3} L_g & -\frac{1}{3} L_g \\ -\frac{1}{3} L_g & L_T + \frac{2}{3} L_g & -\frac{1}{3} L_g \\ -\frac{1}{3} L_g & -\frac{1}{3} L_g & L_T + \frac{2}{3} L_g \end{bmatrix} \quad r_b = \begin{bmatrix} r_T + \frac{2}{3} r_g & -\frac{1}{3} r_g & -\frac{1}{3} r_g \\ -\frac{1}{3} r_g & r_T + \frac{2}{3} r_g & -\frac{1}{3} r_g \\ -\frac{1}{3} r_g & -\frac{1}{3} r_g & r_T + \frac{2}{3} r_g \end{bmatrix}$$

Bu değişkenler aşağıda matris olarak verilmiştir.

$$i_1 = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad i_{r_1} = \begin{bmatrix} i_{rA} \\ i_{rB} \\ i_{rC} \end{bmatrix}; \quad i_e = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad U_e = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}; \quad V_q = \begin{bmatrix} V_{qA} \\ V_{qB} \\ V_{qC} \end{bmatrix}$$

Buradaki  $V_q$  elektrik iletim hattı büyüklükleri belirlenir[2].

Eğer 5 transformatörünün mıknatıslanma akımı dikkate alınsa I düğüm noktasının denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 - L_1 F(\Psi_A) + L_{b1} L_{b2}^{-1} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} \\ -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -1 - L_1 F(\Psi_A) + L_{b1} L_{b2}^{-1} \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} \\ -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -1 - L_{B1} F(\Psi_A) + L_{b1} L_{b2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{eA} \\ U_{eB} \\ U_{eC} \end{bmatrix}$$

$$\frac{di_{eA}}{dt} = L_{b1}^{-1} \left( \frac{d\Psi_A}{dt} - U_{eA} \right), \quad \frac{di_{eB}}{dt} = L_{b1}^{-1} \left( \frac{d\Psi_B}{dt} - U_{eB} \right), \quad \frac{di_{eC}}{dt} = L_{b1}^{-1} \left( \frac{d\Psi_C}{dt} - U_{eC} \right) \quad (2)$$

Mıknatıslanma akımının yaklaşık olarak ifadesi aşağıda verilmiştir. Aynı zamanda  $F(\psi)$  için aşağıdaki ifade kullanılacaktır [10].

$F(\psi) = a + nb \psi^{n-1} + mc \psi^{m-1}$ ; burada  $\psi$  - manyetik sel,  $i_1, i_2$  - birinci ve ikinci taraf akımları,  $i_\mu$  - manyetik akım,  $L_1, L_2, r_1, r_2$  - sargıların endüktifliği ve dirençleri,  $a, b, c, n, m$  - manyetik akımın manyetik selinden bağımlılığını yaklaşık olarak belirleyen fonksiyonu ifade etmektedir. Bu denklemler jeneratörün, yükün ve yüksüz çalışan transformatörün parametreleri ile birlikte jeneratör- transformatör, transformatör- yük düğüm noktalarını da matematik modellemeye imkan verir.

II. Düğüm noktası için:

Ototransformatör orta ve alçak gerilim tarafından açıldığı için bağlantı sistemi  $*/\Delta_x-11$  olan transformatör gibi modellenir[11]. Transformatördeki manyetik akıları ve yüksek gerilim tarafının akımlarını hesaplamak için denklem sistemi aşağıdaki şekildedir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + L_1 \varphi(\psi_A) - L_1 L_2^{-1} \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} \\ -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & 1 + L_1 \varphi(\psi_B) - L_1 L_2^{-1} \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} \\ -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & -\frac{1}{3} L_1 L_2^{-1} & 1 + L_1 \varphi(\psi_C) - L_1 L_2^{-1} \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{SA} \\ U_{SB} \\ U_{SC} \end{bmatrix}$$

$$\frac{di_{sA}}{dt} = L_1^{-1} \left( U_{SA} - \frac{d\psi_A}{dt} \right), \quad \frac{di_{sB}}{dt} = L_1^{-1} \left( U_{SB} - \frac{d\psi_B}{dt} \right), \quad \frac{di_{sC}}{dt} = L_1^{-1} \left( U_{SC} - \frac{d\psi_C}{dt} \right) \quad (3)$$

Mıknatıslanma akımlarını hesaplamak için aşağıdaki ifadelerden yararlanılacaktır [10];

$$i_{\mu A} = a\psi_A + b\psi_A^9 + c\psi_A^{11}$$

$$i_{\mu B} = a\psi_B + b\psi_B^9 + c\psi_B^{11}$$

$$i_{\mu C} = a\psi_C + b\psi_C^9 + c\psi_C^{11}$$

$$\frac{di_{\mu A}}{dt} = \varphi(\psi_A) \frac{d\psi_A}{dt}; \quad \frac{di_{\mu B}}{dt} = \varphi(\psi_B) \frac{d\psi_B}{dt}; \quad \frac{di_{\mu C}}{dt} = \varphi(\psi_C) \frac{d\psi_C}{dt}; \quad (4)$$

burada,

$$\varphi(\psi_1) = a + 9b\varphi_A^8 + 11c\varphi_A^{10}; \quad \varphi(\psi_2) = a + 9b\varphi_B^8 + 11c\varphi_B^{10}; \quad \varphi(\psi_3) = a + 9b\varphi_C^8 + 11c\varphi_C^{10} \text{ dir.}$$

Burada  $a=0,15$   $b=0,18$   $c=0,67$   $\varphi_{baz} = \frac{\sqrt{2}U_n}{\sqrt{3 \cdot 314}} I_{baz} = k_F \cdot I_0$   $U_{baz} = U_n \cdot I$

$I_0$ =Transformatörün akımının tepe değeridir.

$K_F$ =Kat sayıdır. Ototransformatörler için  $k_F=1,6 \div 1,7$  arasındadır.

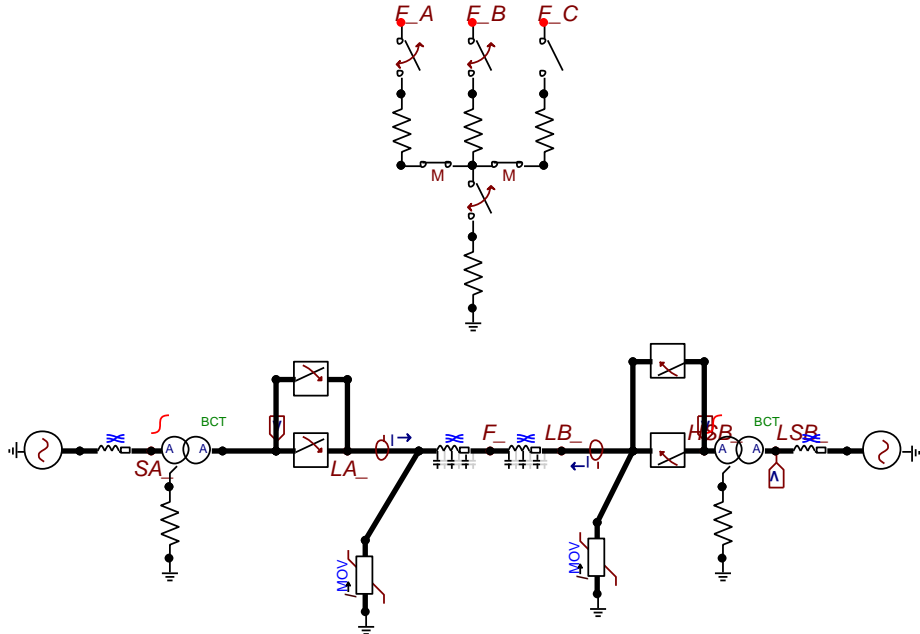
Elektrik iletim hattının denklemi ise şu şekilde olur [2,9,10,15]:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + f\left(\frac{\partial i}{\partial t}, i\right)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \varphi\left(\frac{\partial u}{\partial t}, u\right)$$
(5)

#### 4. SİSTEMİN ATP MODELİ

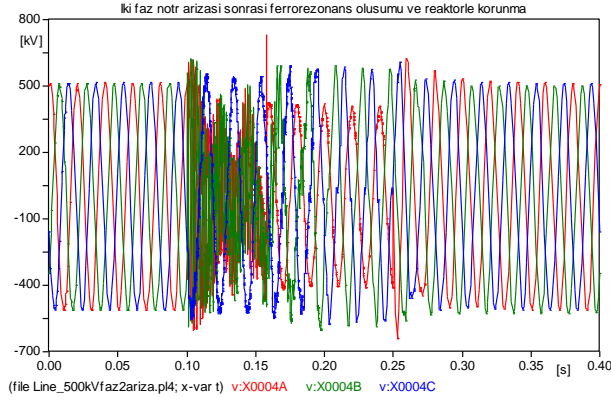
ATP (Alternative Transient Program) güç sistemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Değişik çalışmalarda ferrezonans prosesinin araştırılması amacıyla da kullanılmıştır [5,17,18,19]. Çalışmada ATP programı ferrezonans olayının simülasyonunda ve analiz edilmesinde kullanılmıştır. Bu program ile hem analizler başarı ile yapılabilmekte hem de ücretsiz kullanım ağına sahip olduğundan kolay erişilebilmektedir. Sistemin ATP ferrezonans modeli şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Devrenin ATP modeli

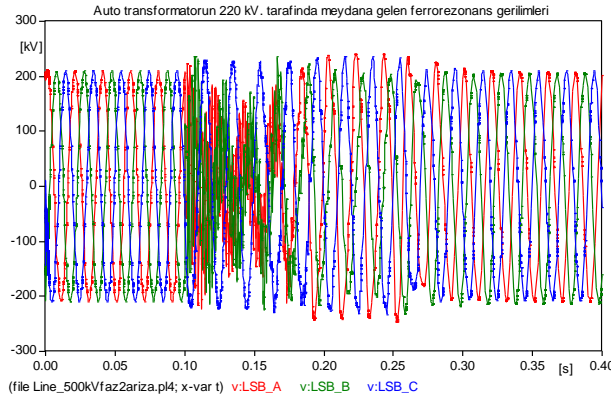
## 5. SİMÜLASYON SONUÇLARI ve ANALİZ

Makaledeki dalga formlarının tamamı 0.4 saniyelik ölçmedir. 0.1 saniyede A ve B fazlarıyla beraber toprak arızası oluşturulmuştur. 0.1. saniyeden itibaren gerilim değeri A ve B fazlarında oldukça fazla yükselmiş. C fazında da gerilim yükselmesi gözlenmiştir. Daha sonra reaktörün devreye bağlanması ile gerilim dalgalanmasının önü alınmıştır.



Şekil 3. 500 kV. luk hattın gerilim dalga formu

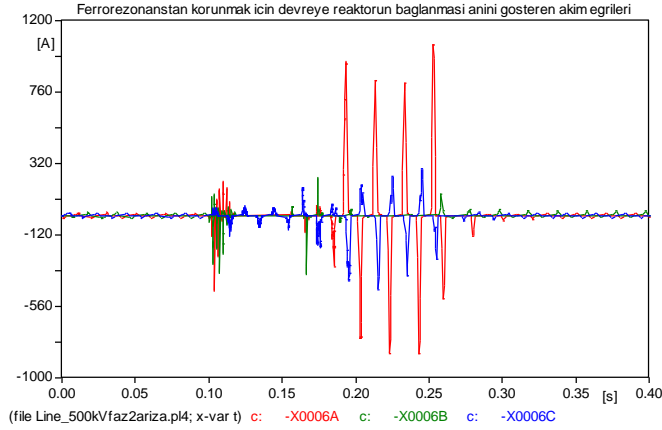
Şekil 3'de 500 kV.'luk sisteme ait gerilim zaman grafiği görülmektedir. Grafikte gerilimin değeri olan 500 kV. dan fazla gözlenmiştir. Kayıplar dikkate alındığında bu fazla gerilim gereklidir. Şekil 4 de oto transformatörünün 220 kV. tarafının gerilim dalga formunda gerilim değeri yaklaşık olarak 220 kV. tur.



Şekil 4. Ototransformatörün 220 kV. tarafının gerilim dalga formu

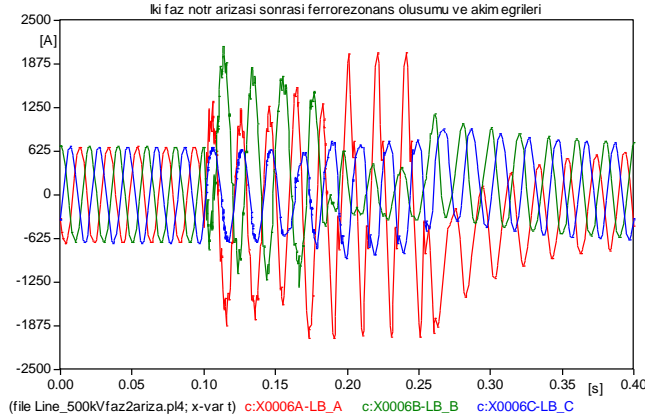
Şekil 5 de reaktörden akan akımın dalga formu görülmektedir. Kaza öncesi akım akmamaktadır. 0.1 saniyede kazanın oluşması ile reaktör devreye alınmıştır, akım değeri artmıştır. Hesap sonucunda güvenlik önlemi olarak reaktörün bağlanması için yeni bir teknik vermek mümkündür. İzlenen gerilimin içinde 5. harmonik görüldüğü anda hattın her iki ucunda reaktörler

devreye bağlanır. Bu tekniğin uygulanabilirliğini denemek için bir çok hesap yapılmıştır. Sonunda bu yolla ferrezonans aşırı geriliminden korunmanın mümkün olacağı görülmüştür.



**Şekil 5.** Reaktörden akan akımın dalga formu

Şekil 6 da 500 kV.luk hattın akım dalga formundan da görüleceği gibi kaza ile birlikte akım değerleri oldukça fazla artış göstermiştir. Reaktörün devreye girmesi ile birlikte akım dalga formu normale dönüşmüştür.



**Şekil 6.** 500 kV.luk hattın akım dalga formu

## 6. SONUÇ

Enerji iletim hatlarında yıkıcı etkilere sahip olan ferrezonans olayının üç fazlı bir sistemde etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada 500 kV'luk bir iletim sisteminde ferrezonans olayı şekil 1. de gösterilen yüksek harmonikli ferrezonans aşırı gerilimlerinden korunma devre şeması ATP/EMTP paket programı ile modellenerek genel bir yaklaşım elde edilmiştir. Modellenen sistemde oluşan harmoniklerin analizleri yapılmış ayrıca bu analizler ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde iletim hattı üzerinde ferrezonansın oluşmasıyla birlikte yüksek frekanslı bileşenler ortaya çıkmıştır. Ferrerzonansın oluşmasıyla birlikte sistem üzerinde



50 Hz frekansı dışında yüksek frekans bileşenleri olmaktadır. Bu gerilim ve yüksek frekans değişimleri sistem için yıkıcı olmaktadır. Bu çalışma aynı zamanda pratik eğrilerle simülasyon eğrilerinin karşılaştırılması için örnek olabilir.

#### Acknowledgments / Teşekkür

The author would like to acknowledgment to Poland Government, Ministry of Education of Turkey, Fatih University, Istanbul, Turkey, Wrocław University of Technology Institute of Electrical Power Engineering, Wrocław- Poland

#### REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Türkiye, 2011, <http://www.guckalitesi.gen.tr/tr/root/index.php>, [Erişim Tarihi: Ağustos 22, 2011].
- [2] Haşimov A.M. Nayır A., Elektrik İletim Hatlarında Dalga Proseslerinin Araştırılmasında Deri Olayı ve Koronanın Etkisinin Dikkate Alınması, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, No:2, s,37-46, 1998.
- [3] Al-Anbarri, K., Ramanujam, R., Rao, CH.S., Kuppusamy, K., Effect of Circuit Configurat On on Chaotic Ferroresonance in Power in a Power Transformer, Electric Power Components and Systems, 30:1015-1031, 2002.
- [4] Hayashi, C., Nonlinear Oscillations in Physical Systems, Newyork: McGraw-Hill, 1964.
- [5] Marta Val Escudero, Ivan Dudurych, Miles Redfem, Understanding Ferroresonance, 39th International Universities Power Engineering Conference UPEC 2004, Vol 3, Pp.1262-1266, 2004.
- [6] Kavasseri, R. G., Analytical Prediction of Subharmonic Oscilations in a Ferroresonant Circuit, *Proc. 35<sup>th</sup> North American Power Symposium*, Rolla, Missouri, 2003.
- [7] Ta-Peng Tsao and Chia-Ching Ning, Analysis of Ferroresonant Overvoltages at Maanshan Nuclear Power Station in Taiwan, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 2, Pp.1006-1012, April 2006.
- [8] D. A. Jacobson, D. R. Swatek, R. W. Mazur: Mitigating Potential Transformer Ferroresonance in a 230kV Converter Station, Computer Analysis of Electric Power System Transients: Selected Readings. IEEE Press. pp 359-365, 1997.
- [9] Haşimov A. M., Nayır A., Dimitriyev Y. V., Uzun Enerji İletim Hatlarında Yüksek Harmonikli Ferorezonans Aşırı Gerilimlerinden Korunma, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, No:2, s-19-24, 2001.
- [10] Haşimov A.M., Cuvanlı C.M., Nayır A., Çok İletkenli Dalga Proseslerinin Analizi Zamanı Seth Efektinin LEP’de Hesaplanması, Elektrofizik ve Elektroenerji sahasında makaleler mecmuası, Bakü-Elm, s-219-228, 1997.
- [11] Haşimov A.M. Dimitriyev Y.V. Rüstemov S.A. "Nötrü Non-Lineer Reaktörle Topraklanmış Transformatörün Modelleştirilmesi" Elektrofizik ve Elektroenerji sahasında makaleler mecmuası, Bakü, Elm, s-136-1441, 1994.
- [12] İsmailoğlu H., Aşırı Gerilimler, Oluşumları, Etkileri Ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, Ulusal elektrik tesisat kongresi- Yüksek gerilim çalıştay, 2009.
- [13] Ryan H.M., "High Voltage Engineering and Testing (2nd Ed.)", IEE The Institution of Electrical Engineers, London, 2001.
- [14] Klaus-Dieter D., Klaus H., Reinhard K., Ferroresonanz vor allem in Netzen mit Spannungs-wandler, ETZ: Elektrotechen. Z., No:17, pp.780-783, 1988.
- [15] Stakhiv P., Hoholyuk O., Simulation of Electrical Transmission Transient Processes Using MATLAB/Simulink, MEPS’06, Wrocław, Poland, pp-447-452, 2006.

- [16] Izykowski J., Bozek M., Distance Relaying Algorithm for Double-Circuit Transmission Line with Compensation for Reactance Effect under Standard Availability of Measurements, Turk J Elec Engin (TUBITAK), VOL.16, NO.3, pp 217-227, 2008.
- [17] Li Y., Shi W., Qin R., A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-Grounded Substations, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No 3, pp 1009-1014, 2003.
- [18] T. Ç. Akinci, G. Mokryani, G. Gökmen, N. Ekren, S. Seker, Bir Fazlı İletim Hattı Modeli Üzerinde Ferrorezonans Olayının İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), s-13-15, 2009.
- [19] Alternative transient program (ATP) rule book, Leuven K.U. EMTP Centre, 1987.