



Ferrorezonans Modellemesi ile Kaotik Durum Davranışının Analizi ve Gerilim İyileştirmesi

Chaotic State Analysis and Voltage Correction with Ferroresonance Modeling

Mehmet Taciddin Akçay¹ , Aysel Ersoy² 

¹Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE

²İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/02/2023

Kabul / Accepted: 07/06/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2023

Öz

Transformatör sistemlerinde kısa devreler, yanmalar, patlamalar, çeşitli arızalar, tehlikeli olaylar ve ekipman kayıpları gibi bir çok istenmeyen riskli durumlar meydana gelebilmektedir. Bu tip arızalar dış kaynaklı hususlardan dolayı oluşabilirken bazı durumlarda ise devreye bağlı elektriksel yükün karakteristiğinden kaynaklanabilmektedir. Yük karakteristiğinden kaynaklı arızaların en önemli nedenlerinden biri de transformatör sistemlerinde gerçekleşen Ferrerozonans olayıdır. Ferrerozonans lineer olmayan rezonans olarak tanımlanmakta olup sistem için kritik seviyede tehlike oluşturabilmektedir. Bu çalışmada elektrik güç sistemlerinde kaos teorisi anlatılarak ferrerozonans devresi üzerinden uygulama yapılmıştır. Ferrerozonans devresinin analizi yapılarak matematiksel modeli verilmiştir. Nonlineer devre elmanları kullanılırken ilgili eşdeğer devre üzerinden sistem incelenmiştir. Nonlineer dinamik sisteme ait verilen matematiksel model ile ferrerozonans durumundaki koşulların ve gerilim kaynağının etkisi gösterilmiştir. Transformatör kayıplarının neden olduğu ferrerozonans durum davranışları incelenerek farklı durumlara ait benzetimler yapılmıştır. Bu durumlar normal durum, temel frekans ferrerozonans durumu, altharmonik ferrerozonans durumu ve kaotik durum ferrerozonans durumlarını içermektedir. Çalışmanın sonunda kaotik duruma ait yük tarafında meydana gelen gerilim osilasyonun düzeltilmesi için gerilim iyileştirici önerimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“ferrerozonans, harmonik, kaos, kayıp, nonlineer”

Abstract

Many undesirable hazardous situations such as short circuits, burns, explosions, various malfunctions, dangerous events and equipment losses can occur in transformer systems. While such faults may occur due to external factors, in some cases, they may be caused by the characteristics of the electrical load connected to the circuit. One of the most important causes of faults arising from the load characteristics is the Ferroresonance phenomenon that occurs in transformer systems. Ferroresonance is defined as non-linear resonance and can pose a critical level of danger to the system. In this study, the theory of chaos in electrical power systems is explained and a solution is made over the ferroresonance circuit. The mathematical model of the ferroresonance circuit is given by analyzing it. While using nonlinear circuit elements, the system was analyzed over the related equivalent circuit. With the given mathematical model of the nonlinear dynamic system, the effects of the conditions in the ferroresonance state and the voltage source are shown. By examining the ferroresonance state behaviors caused by transformer losses, simulations of different states are made. These states include the normal state, the fundamental frequency ferroresonance state, the subharmonic ferroresonance state, and the chaotic state ferroresonance state. At the end of the study, voltage correction was made to correct the voltage oscillation occurring on the load side of the chaotic state.

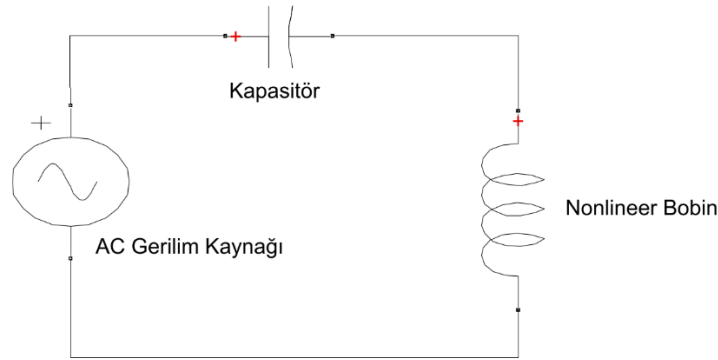
Key Words

“chaos, ferroresonance, harmonic, loss, nonlineer”

1. Giriş

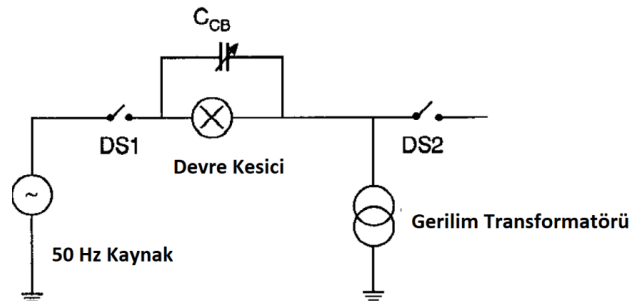
Elektrik sistemlerinde sisteme bağlı devre elemanlarının karakteristiğine bağlı olarak devrenin karakteristiği etkilenebilmektedir. Bu nedenle devrenin davranışının analizi devre elemanlarının doğru analiz edilmesi ile mümkün olmaktadır (AI Zahawi vd., 1998; Mork & Stuehm, 1994; Mozaffari vd., 1995). Elektrik güç sistemlerinde devrede bulunan lineer olmayan elemanlardan dolayı bir takım istenmeyen tehlike durumlar meydana gelebilmektedir. Bunlardan bir tanesi de ferrezonans olayıdır. Ferrezonans olayı aşırı gerilim, aşırı akım durumlarında ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle nonlineer davranan devre elemanlarının sisteme bağlı oluşundan dolayı nonlineer durumların olduğu zamanlarda oluşmaktadır. Nonlineer gerilim transformatörleri, kapasitörler bu etkileri oluşturabilmektedir. Kararlı hal durumu sistem parametrelerine ve başlangıç koşullarına bağlı olarak sağlanmaktadır (Bashar vd., 2001; Araujo vd., 1993; Stojkovska vd., 2001; Huawei & Yu, 2007). 1980'lerin sonlarından itibaren kaosun elektronikte gerçek bir fenomen olduğu tespit edilmiştir (Lei vd., 2005). Bu durumun ilerleyen zamanlarda elektronik cihazların performanslarını etkileyen bir husus olduğu gözlemlenmeye başlanmıştır. Doğrusal olmama durumunun etkisini azaltmak için çeşitli önerilen teknikler geliştirilmiştir (Crotti vd., 2021). Bu olayın dağıtım sistemlerinde sık görülmesinin nedeni transformatörlerin doyumu ve hatlardaki kapasitif etkilerdir (Valverde vd., 2013). Enerji kalitesini bozucu ekipmanların varlığı ile bozulma seviyelerinin sürekli artması modern güç sistemlerinde harmonik ölçümünü çok önemli hale getirmektedir (Cataliotti vd., 2018). Çeşitli nonlineer ekipmanların sistemde kullanılması enerji kalitesi problemlerini doğurabilmektedir. Güç elektroniğinin yaygın kullanımı güç kalitesi için ciddi sonuçlar doğurmaktadır (Toscani vd., 2020). Tüm bu durumlar sonucunda doğrusal olmayan çekirdek kayıpları sistemin davranışını değiştirmeye başlayarak sistem ve davranışı tamamen kaotik bölgelere gidebilir (Radmanesh vd., 2012). Ekipmanların kapasitif ve endüktif elemanlarında depolanan enerji, uzun süre devam edebilen düşük frekanslı aperiodik karakterde geçici olaylar üretir (Jalmuzny, 2013).

Ferrezonans devresinin en basit elektriksel gösterimi gerilim kaynağı, seri kapasitör ve nonlineer bir bobin olarak Şekil 1 ile gösterilmektedir. Doğrusal olmayan bir direnç, doğrusal olmayan bir indüktör ve karışık frekanslı gerilime tabi doğrusal olmayan bir kapasitörden oluşan bir RLC serisi devrenin doğrusal olmayan parametrik salınımlarını incelemek için, bir doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler sınıfı üretilir (Kpomahou vd., 2018). Milicevic ve arkadaşları (2011) ferrezonansın başlamasının ne ölçüde başlangıç koşullarına ve faz kaymasına bağlı olduğunu belirlemek için bir ferrezonans devresi üzerinde yürütülen deneysel ve sayısal bir araştırma sunmuştur. Ferrezonansın meydana gelmesini önlemek için, dc reaktör tabanlı koruma cihazları kullanılabilir (Heidary vd., 2020).



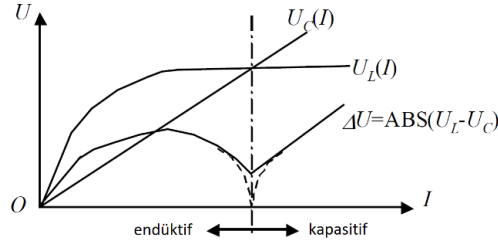
Şekil 1 .Temel Ferrezonans Devresi

Ferrezonans olayında sistem 4 farklı durumda incelenmektedir. Bunlar normal durum, temel frekans ferrezonans durumu, altharmonik ferrezonans durumu ve kaotik durum ferrezonans durumlarıdır. Elektrik güç sistemlerinde kaos teoremi genel olarak düzensizliğin düzeni olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2 ile daha gelişmiş bir ferrezonans devresi verilmektedir.



Şekil 2. Gelişmiş Ferrezonans Devresi (AI Zahawi vd., 1998)

Şekilde görüldüğü üzere gelişmiş ferrezonans devresi gerilim kaynağı, iki adet ayırıcı, devre kesici, paralel kapasitör ve gerilim transformatöründen oluşmaktadır. Bu devrede ferrezonans olayı gerilim kaynağına yakın ayırıcı ve devre kesici kapalı pozisyondayken meydana gelmektedir. Şekil 3’de nonlinear negatif direncin doygun durumdaki gerilim-akım değişimi verilmektedir.



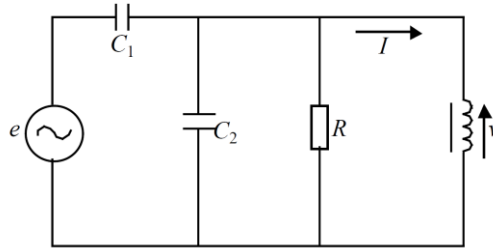
Şekil 3. Doygun Durumda Nonlinear Negatif Direnç

Elektrik güç sistemlerinde kaotik durumların oluşabilmesi için sistemde nonlinear negatif dirençlerin bulunması gerekmektedir. Negatif direnç literatürde akım ve gerilimin birbiriyle ters orantılı olarak davranış gösterdiği devre elemanları olarak tanımlanmaktadır (Shiming vd., 2022). Negatif endüktans fiziksel olarak olmasa da empedans yakınsama tekniği ile gerçekleştirilebilir. Kaos olayı için nonlinear negatif direnç çok önemlidir. Elektrik güç sistemlerinde transformatörde doymuş manyetik çekirdek endüktif gerilim U_L ile kapasitif gerilim U_C 'nin birbirine eşit olmasına neden olur. Bu eşitlik noktası ise rezonans noktası olarak adlandırılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Ferrezonans devresi nonlinear bobin, kapasitör ve direnç elemanlarından oluşmaktadır. Nonlinear karakteristiğe sahip yük burada ferrezonans olayına neden olmaktadır.

Modellemesi ve benzetimi yapılan ferrezonans devresine ait model şekil 4 ile verilmekte olup nonlinear devre elemanının olduğu bölgeye ait akım ve gerilim belirtilmiştir. Bu devre gerilim kaynağı, kapasitör, direnç ve endüktanstan oluşmaktadır.



Şekil 4. Ferrezonans Devresinin Modeli

Modellenen devre seri kapasitör, paralel kapasitör, gerilim kaynağı, paralel direnç ve paralel nonlinear devre elemanından oluşmaktadır. Devrenin çalışma frekansı 50 Hz'dir. Nonlinear devre elemanına ait akım ve gerilim değeri (1) ve (2) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$V = \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Bashar vd., 2001}) \quad (1)$$

$$I = a\varphi + b\varphi^7 \quad (\text{Bashar vd., 2001}) \quad (2)$$

φ Nonlinear elemanın akı değeri olup, akım hesabı yedinci dereceden polinom ile yapılmaktadır. A ile b ilgili katsayılar olup bu çalışmada a 3.42 b ise 0.41 alınmıştır.

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{1}{q} V + \frac{a\varphi + b\varphi^7}{w(C_1 + C_2)} = g \cdot \cos wt \quad (\text{AI Zahawi vd., 1998}) \quad (3)$$

(3) eşitliğinde açısal frekans (w) 3.14 alınmıştır. G sürücü genliği ve $1/q$ ise sönümlenme faktörüdür. G'nin ve $1/q$ 'nin açılımları (4) ve (5) denklemleri ile verilmektedir.

$$g = \sqrt{2}E \frac{C_1}{(C_1+C_2)} \quad (\text{AI Zahawi vd., 1998}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Rw(C_1+C_2)} \quad (\text{AI Zahawi vd., 1998}) \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitliklerle en son ferreazonans devresine ait matematiksel model (5) ifadesi ile elde edilmektedir.

$$\frac{1}{W} \cdot \varphi'' + \frac{1}{q} \varphi' + \frac{R}{q} (a\varphi + b\varphi^7) = g \cdot \cos wt \quad (\text{AI Zahawi vd., 1998}) \quad (6)$$

Benzetim için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Benzetim için dört farklı ferreazonans durumlarına ait veriler kullanılmıştır. Bu veriler Tablo 1 ile verilmektedir. Ferreazonans devresinin davranışı bu başlangıç koşullarına ait verilere bağlı olarak değişmektedir.

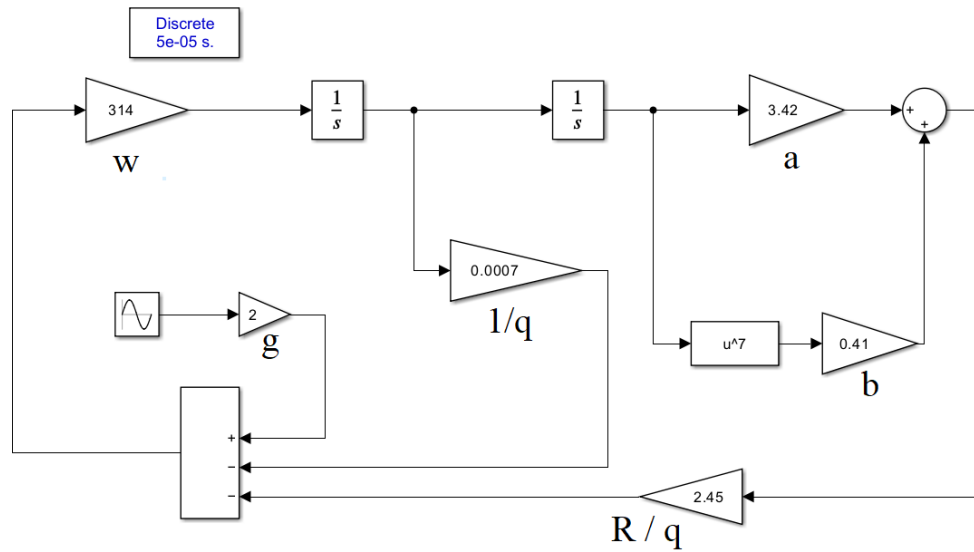
Tablo 1. Dört Farklı Ferreazonans Durumlarına ait Veriler

R	g	1/q	Transformatör Akı Yoğunluğu	Durumlar
125 MΩ	2	8	Kapalı Periyot Yörünge	Normal Durum
200 MΩ	2	1	Bozuk Periyot Yörünge	Temel Frekans Ferreazonans
270 MΩ	2	0.006	Çok yörüngeli Periyot Çatallanma	Altharmonik Ferreazonans
4083 MΩ	2	0.0006	Kaotik Osilasyon	Kaotik Ferreazonans

Devreye ait direnç, genlik, sönümlenme faktörü parametrelerinin değişimine göre transformatör akı yoğunluğunun gerilime bağlı değişim karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Birinci durum normal duruma ait parametreleri ifade ederken ikinci durum temel frekans durumuna ait parametreleri ifade etmektedir. Üçüncü ve dördüncü durumlarda ise altharmonik ve kaotik duruma ait parametrelere yer verilmiştir.

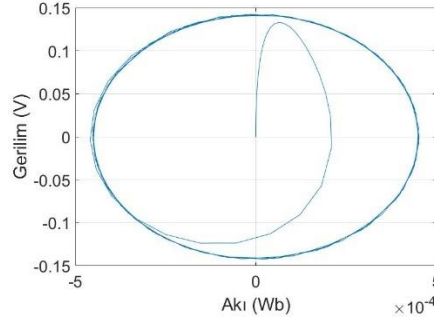
3. Bulgular

Benzetim yardımıyla normal duruma ait ferreazonans durumu, temel frekans ferreazonans durumu, altharmonik ferreazonans durumu ve kaotik duruma ait ferreazonans durumu analiz edilmiştir. Şekil 5 ile benzetim ekranına ait Simulink blok diyagramı verilmektedir. Örnekleme zamanı için yeterince hassas bir frekans seçilirken integratör için başlangıç koşulları sıfır kabul edilmiştir. Benzetim süresi için ise grafiklerin oluşturulması için optimum süreler dikkate alınmıştır.



Şekil 5. Benzetim Modeline ait Simulink Diyagramı

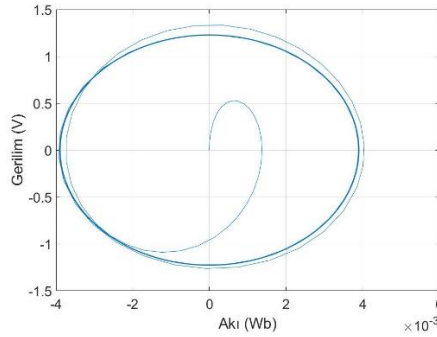
Normal durum ferrezonans durumunun benzetim sonucuna ait grafik şekil 6 ile gösterilmektedir. Bu grafik ile $\varphi - V$ karakteristiği verilmektedir. Bu benzerimde kapalı periyotlu bir yörünge şeklinde bir karakteristik ortaya çıkmıştır. Yaklaşık olarak periyodu belirlenebilen ve ilgili kısımlarda gerilim akı değişiminin nasıl bir yol izleyeceği net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil. 6: Normal Durum Ferrezonans

Kapalı periyotta bir yörüngeye sahip olması aslında davranışın kestirilebileceği bir durumu ifade etmektedir. Düzensizliğe bir geçiş durumu bu aşamada henüz gözlemlenmemiştir. Akı ve gerilim matematiksel olarak bir çember denklemi oluşturacak biçimde birbirleriyle bağlantılı bir değişim izlerken akının $-5e-4$ Wb ile $5e-4$ Wb değişimlerine karşı gerilim -0.15 V ile 0.15 V aralıklarında değişim göstermiştir.

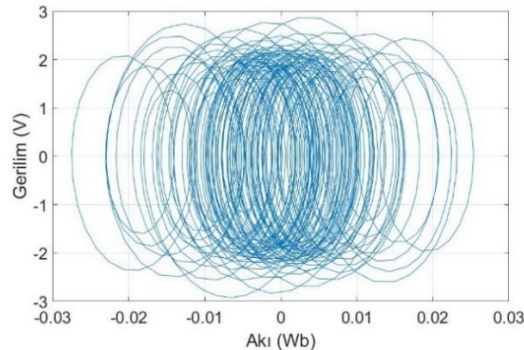
Şekil 7 ile temel frekans ferrezonans durumuna ait durumun $\varphi - V$ karakteristiği oluşturulmuştur. Bu durumda birinci duruma göre daha bozuk bir periyodik yörüngeye sahip bir durum elde edilmiştir. Akı ve gerilim matematiksel olarak birden fazla çember denklemi oluşturacak şekilde birbirleriyle ilintili bir değişim oluştururken akının $-4e-3$ Wb ile $4e-3$ Wb değişimlerine karşı gerilim -1.5 V ile 1.5 V aralıklarında değişim göstermiştir.



Şekil. 7: Temel Frekans Ferrezonans Durumu

Bu durum gerçekleşen bozuk periyotlu yörüngeye aslında düzensizliğe bir geçiş durumunu ifade etmektedir. Tam bir kaotik durumu ifade etmese de normal periyodik yörünge durumunun dışına çıktığı net bir şekilde anlaşılmaktadır.

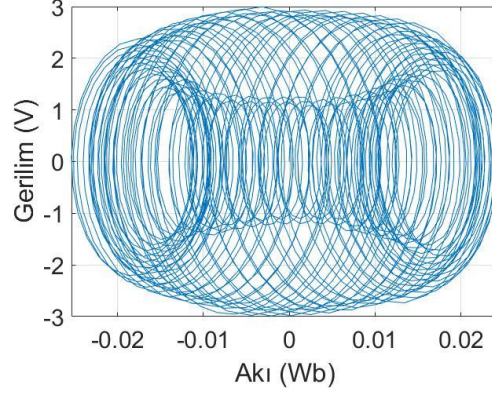
Altharmonik ferrezonans durumuna ait analiz sonuçları ise şekil 8'de gösterilmektedir. Bu durumda çok fazla ve birbirinden bağımsız periyodik çatalanmalar gözlemlenmiştir. Kaotik durumu tam olarak ifade etmese de ciddi seviyede düzensizlik olduğu şekilde net bir şekilde görülmektedir.



Şekil. 8: Altharmonik Ferrezonans Durumu

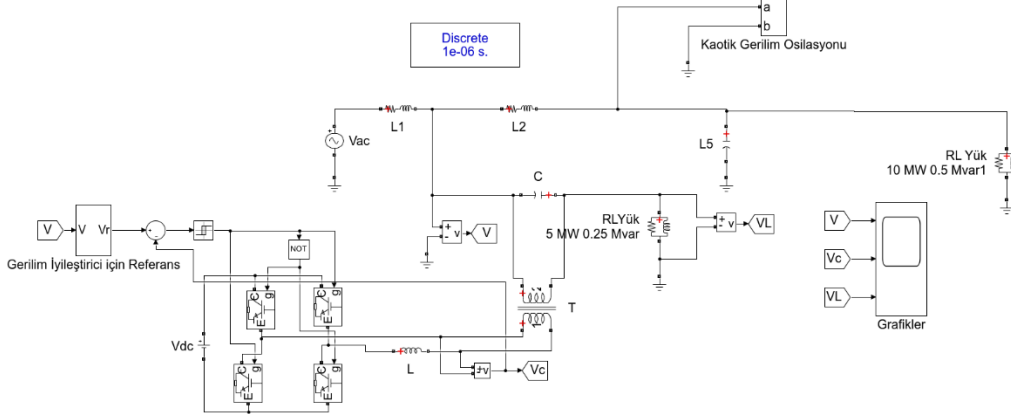
Çok yörüngeli çatalanmalardan dolayı akiya bağlı olarak gerilim değişimi için bir karakteristiğin belirlenmesinde güçlükler yaşanabilmektedir. -0.01 ile 0.01 aralığında dalgalar daha yoğun bir kümeyi oluştursa da ilgili yörüngeler -0.03 ile 0.03 arasında değişen aralıkta yerini almıştır.

Kaotik ferrezonans durumuna ait sonuç şekil 9 ile gösterilmektedir. Bu durumda kaotik osilasyon durumu tespit edilmiş olup yörüngelerin genişleyen daralan sonra tekrar genişleyen ölçekte bir periyoda göre dağıldığı gözlemlenmiştir.



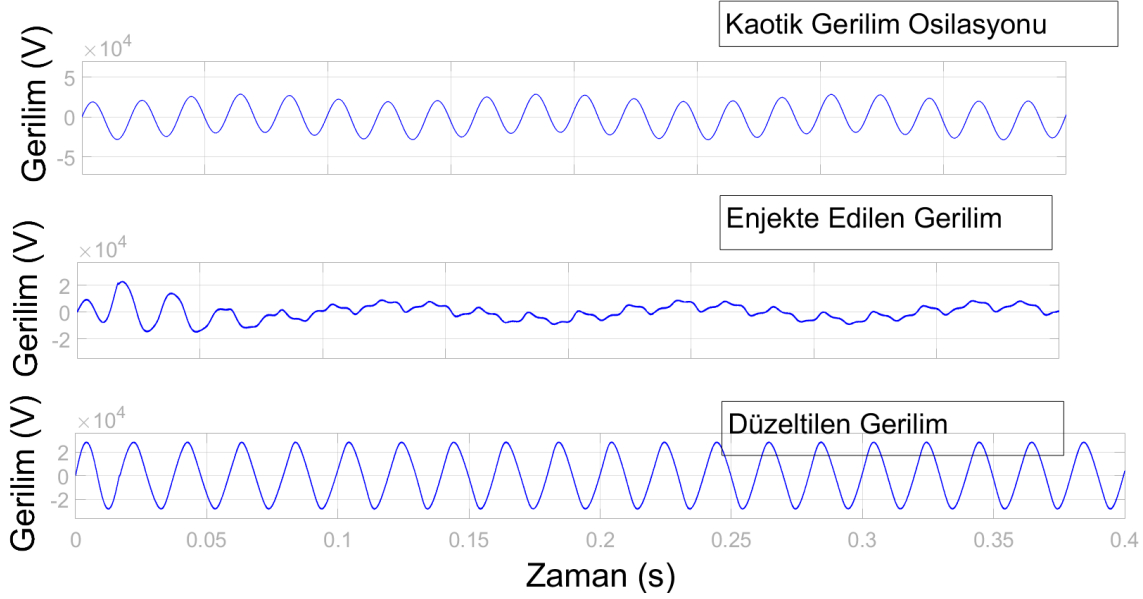
Şekil. 9: Kaotik Ferrezonans Durumu

Bu durumda görüldüğü üzere düzensizliğin düzeni şeklinde kaotik osilasyonların olduğu bir durum ortaya çıkmaktadır. Genişleme ve daralma bölgelerinin daha sonra tersi bir durumda bu eğilimlerini ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Kaotik ferrezonans durumunda ilgili yörüngeler -0.02 ile 0.02 aralıklarında öbeklenmiş şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 10 ile kaotik durumla ilgili ferrezonans osilasyonunun trafo merkezine bağlı yük tarafında gerçekleşmesi durumuna ait devre bağlantı şeması verilmektedir.



Şekil. 10: Kaotik Ferrezonans Durumu için Gerilim İyileştirici Devre Modeli

Faz-faz 34.5 kV üç faz şebekenin bir fazına ait bölüme bağlı yükler tarafında gerçekleşen kaotik ferrezonans durumuna ait inceleme yapılmıştır. Şekilde 11 ile gerilim iyileştirici devresinin sisteme bağlanması sonucunda elde edilen gerilim ölçümleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere gerilim düzeltici devre paralel devre bağlantısı üzerinden sisteme bağlanarak gerçekleşen kaotik ferrezonans osilasyon eğrisinin yük tarafındaki etkisi sönümlendirilmiştir.



Şekil. 11: Kaotik Ferrerezonans Durumu için Gerilim İyileştirici Sonrası Grafikler

Tablo 2 ile gerilim iyileştirici sonrası yük tarafında ölçülen gerilime ve kaotik osilasyonlu gerilime ait RMS değerleri verilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere gerilim iyileştirici ile şebeke gerilimi ile elde edilen gerilim arasındaki fark % 13'den %2'ye yükseltilmiştir.

Tablo 2. Gerilim İyileştirici Sonrası Elde Edilen Gerilim Değerleri

Ölçüm Noktaları	RMS Gerilim Değeri (kV)	Şebeke Gerilimi Arasındaki Yüzdeselel Fark
Osilasyonlu Gerilim	17.34 kV	% 13
Gerilim İyileştirici Sonrası	19.74 kV	% 2

4. Sonuç

Bu çalışmada kaos teoremi anlatılarak, ferrerezonans devrelerinin davranışları incelenmiştir. Ferrerezonans devresi matematiksel ifadeleri ile verilerek dört farklı duruma ait benzetim yapılmıştır. Normal duruma ait ferrerezonans, temel frekans durumunda ferrerezonans, altharmonik ferrerezonans ve kaotik durumda ferrerezonans durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Normal durumda düzenli yörüngeye sahip bir eğri ortaya çıkmakta olup temel frekans durumunda daha düzensiz yörünge oluşmaktadır. Altharmoik durumunda ise çok yörüngeli çatalanmaların olduğu bir durum ortaya çıkmaktadır. En kritik durum ise kaotik durumda ortaya çıkan ferrerezonans durumu olmaktadır. Bu durumda düzensizliğin düzeni şeklinde bir yapı ortaya çıkmakta olup kaotik osilasyonların meydana geldiği görülmektedir. Farklı parametrelere ait değerler tabloda verilerek bu durumun oluşturduğu etkilerin benzetimi yapılarak ortaya çıkan gerilim-akı değişimi grafikler üzerinden anlatılmıştır.

Elektik güç sistemlerinde kaotik durum devrede bulunan nonlineer devre elemanlarının davranışlarından oluşmakta olup sistem için çok tehlikeli bir durumdur. Bu nedenle sistem tasarlanırken devre elemanlarının analizi ve alınacak tedbirler öncesinde araştırılarak ve hesaplanarak gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu duruma ait bir kaotik gerilim osilasyonu meydana geldiğinde sisteme olan etkilerin azaltılması için bu çalışmada gerilim iyileştirici önerilmiştir. Gerilim iyileştirici ile şebeke gerilimi ile elde edilen gerilim arasındaki fark % 13'den %2'ye yükseltilerek yüksek performans elde edilmiştir. Gerilim iyileştirici yüksek frekanslı anahtarlama elemanlarından oluştuğu için gerçek zamanlı olarak sisteme paralel bağlantı yoluyla gerilim enjekte ederek gerilim düzeltmesi sağlamaktadır. Nonlineer yük davranışı sistemde istenmeyen elektriksel etkiler yaratacağı için bu etkilerin giderilmesi için çeşitli güç elektroniği ekipmanları, anahtarlama elemanları çeşitli yazılımlar ve filtreleme devreleri kullanılmakta olup bu tasarımların sistemin ihtiyacına yanıt verecek şekilde kullanılması, sisteme verimli bir şekilde kazandırılması büyük önem arz etmektedir.

Referanslar

- Al Zahawi , B. A. T., Emin, Z. & Tong, Y. K. (1998). Chaos in ferroresonant wound voltage transformers: effect of core losses and universal circuit behaviour. *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, 145 (1), 39-43.
- Araujo, A. E. A., SOUDACK, A. C. & Marti. (1993). Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour. *IEE PROCEEDINGS-C*, 140 (3), 237-240.
- Bashar, Z. E., AL Zahawi, A. T., TONG, Y., K. & UGUR, M. (2001). Quantification of the Chaotic Behavior of Ferroresonant Voltage Transformer Circuits. *IEEE , Transactions On Circuits And Systems—I: Fundamental Theory And Applications*, 48 (6), 757-760.
- Cataliotti, A., Cosentiono, V., Crotti, G., Delle Femine, A., Di Cara, D., Gallo, D., Giordano, D., Landi, C., Luiso, M. & Modarres, M. et al. (2018). Compensation of Nonlinearity of Voltage and Current Instrument Transformers. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 68, 1322–1332.
- Crotti, G., D’Avanzo, G., Giordano, D., Letizia, P.S. & Luiso, M. (2021.) Extended SINDICOMP: Characterizing MV Voltage Transformers with Sine Waves. *Energies*, 14, 1715
- Heidary, A., Rouzbehi, K., Radmanesh, H. & Pou, J. (2020). Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(6), 2731-2733.
- Huawei, L. & Yu, F. (2007). Impact of Breaker Operations on Ferroresonance in Power Systems. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, China, 3, 680-682.
- Jałmuzny, W. (2013). Analysis of the properties of HV voltage transformers in abnormal operating conditions with particular consideration of ferroresonance oscillations. *Zesz. Naukowe. Rozpr. Nauk./Politech. Łódzka*, 454, 1–185.
- Kpomahou, Y., Miwadinou, C. & Hinvì, L. (2018). Mathematical modelling and parametric resonances of a nonlinear RLC series circuit. *Int. J. Nonlinear Dyn. Cont.*, 1, 133–153.
- Lei, Z. M., Liu, Z. J., Sun, H. X. & Liu, H., X. (2005). Control And Application Of Chaos In Electrical System. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 3, 1477-1481.
- Milicevic, K., Vinko, D. & Emin, Z. (2011). Identifying ferroresonance initiation for a range of initial conditions and parameters. *Nonlinear Dyn.*, 66, 755–762
- Mork, B. A. & Stuehm, D. L. (1994). Application Of Nonlinear Dynamics And Chaos To Ferroresonance In Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2), 1009-1017.
- Mozaffari, S., Henschel, S. & Soudack, A. C. (1995) Chaotic ferroresonance in power transformers. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 42(3), 247-250.
- Radmanesh, H., Rostami, M. & Khalilpour, J. (2012). Ferroresonance in Voltage Transformer Considering Linear and Nonlinear Core Losses Effect. *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, 4, 789–793.
- Stojkowska, B., Stefanovska, A., & Golob, R. (2001). Time-delay feedback control of ferroresonant chaotic oscillations. *IEEE Porto Power Tech Proceedings, Porto, Portugal*, 2, 1-6.
- Toscani, S., Faifer, M., Ferrero, A., Laurano, C., Ottoboni, R. & Zanoni, M. (2020). Compensating Nonlinearities in Voltage Transformers for Enhanced Harmonic Measurements: The Simplified Volterra Approach. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 36, 362–370.
- Valverde, V., Mazón, A. J., & Zamora, I. (2013). Buigues, G. Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Bilbao, Spain, 20–22 March*, 1 (5), 465-471.
- Shiming, X. , Yao, S., Jianheng, L. , Xing, L., Yonglu, L., Wenjing, X. & Mei, S., (2022). Stabilized Negative Resistance Emulating Control for Grid-Connected Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 8599-8603