

FERROREZONANSIN ANLAŞILMASI VE TRANSFORMATÖR MERKEZLERİNDE YAPILAN KOMPANZASYONUN FERROREZONANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ömer KARA¹

e-mail: omer.kara@siemens.com

Mustafa BAĞRIYANIK²

e-mail: bagriy@itu.edu.tr

¹Siemens Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yakaçık Caddesi, No:111, 34870 Kartal, İSTANBUL

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

Anahtar kelimeler: ferrerezonans, kompanzasyon, dağıtım sistemleri

ÖZET

Ferrerezonans, sistemden temizlenmesi diğer geçici olaylara oranla daha uzun zaman gerektiren karmaşık bir enerji sistemi olgusudur. Güç ve gerilim ölçü transformatörlerinin hasar almasından kaybına kadar pek çok zarara yol açabilmektedir. Günümüz alternatif akım, elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemleri sahip oldukları yapılar gereği, ferrerezonansa her an yatkındırlar. Farklı sistem parametreleri ve başlangıç koşulları için bu yatkınlığın derecesi artabilir veya azalabilirken, uygun önlemlerin alınması ile sistemin ferrerezonanstaki uzak tutulması mümkün olabilir.

Bu çalışmada, ferrerezonans olgusu tanımlanmış ve meydana gelmesi için gerekli koşullar verilmiştir. Olgunun oluşması ve oluşmasına neden olacağı sonuçların boyutları üzerinde etkili olan faktörler değerlendirilerek, ferrerezonansı engellemek için alınabilecek önlemlere değinilmiştir. Örnek sistem olarak ünitelerinde kompanzasyon ünitesi bulunan transformatör istasyonu göz önüne alınarak gerçekleştirilen benzetim incelemeleri ile bu tip sistemlerde yapılan kompanzasyonlar sonucunda sistemin ferrerezonansa olan yatkınlığı incelenmiştir.

I. GİRİŞ

Ferrerezonans, genel olarak doyabilen demir çekirdekli bobinler ile kondansatörler arasında meydana gelen lineer olmayan rezonans durumlarına ilişkin olayları ifade eder ve bir çok çeşide sahiptir [1]. Meydana gelmesi sonucunda, aşırı gerilimler ve çok düzensiz dalga şekilleri ortaya çıkaran bu olgu, bir ya da daha fazla doyabilen endüktansın seri halde birlikte buldukları devrelerin kapasitif sığalar tarafından uyarılması ile ortaya çıkar [2]. Güç transformatörleri, reaktörler ve elektromagnetik gerilim ölçü transformatörleri ile sistem yapısı gereği etkili olabilecek kadar yakın mesafede sisteme dâhil olan kapasitif elemanlar arasında yaşanır[3]. Sistemde doğrusal olmayan endüktansın kaynağı bir demir çekirdek içeren her hangi bir transformatör ya da reaktör iken; sığa kaynağı, şönt kondansatör grupları, seri kondansatör grupları, kablo devreleri, havai hatlar ile transformatörlerin ve diğer ekipmanların kendilerine ait kapasitif yapılarıdır [2]. Potansiyel olarak bir elektrik sisteminde ferrerezonans olgusunun başlayabilmesi için

gerekli olan durumlar arasında; kondansatör ya da transformatör anahtarlamalarında üç fazın uygun şekilde anahtarlanmaması sonucunda devrede bir ya da iki fazın enerjili olması, yalıtım hataları ve yıldırım darbeleri sayılabilir [4]. Yeterli sönümün olmadığı durumlarda ferrerezonansın meydana gelmesi olasılığı daha da yükselir [5]. Ferrerezonans, anma gerilim seviyesinin birkaç katı mertebesine kadar yükselebilen aşırı gerilimlerin ve anahtarlama elemanlarının anma kesme akımlarının katları mertebesinde aşırı akımların oluşması sonuçlarını doğuran elektrik sistemi için tehlikeli bir olaydır [3]. Yüksüz ya da çok düşük yüklü transformatörlerin aşırı ısınmaları ve olağan dışı derecede yüksek, derin ve uğultulu sesler çıkarmaları ferrerezonans halinin tipik göstergelerindedir [2].

Ferrerezonans, elektrik enerji sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar içerisinde görece olarak yavaş fakat karmaşık bir karakteristiğe sahiptir [5]. Ayrıca sistemden temizlenmesi uzun süreler gerektirebilir. Teorik olarak doyabilen, lineer olmayan endüktanslar ile kapasite kaynağı olabilecek kondansatör etkisine sahip yapıların bir arada bulunduğu tüm sistemlerde meydana gelebilir. Bu özellikler ise elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinin hemen hemen hepsinde mevcuttur. Diğer bir adı da lineer olmayan rezonans olan ferrerezonans, en yaygın olarak güç transformatörlerinin uzun havai hatlarla veya yer altı kablo şebekeleriyle beslendiği sistemlerde ya da herhangi bir şekilde izole edilmiş bara kısımlarında kalan gerilim ölçü transformatörlerini içeren sistem parçalarında meydana gelir [6]. Ferrerezonansın meydana geldiği sistemlerde ortaya çıkan aşırı gerilimler açısından sistemde yer alan cihazların yalıtımları, aşırı akımlarda sistemde yer alan cihazların termik dayanımları üzerinde zorlanmalar yaratır ve bu cihazların zarar görmelerine neden olabilir.

Bu çalışma meydana gelmesi halinde güç sistem elemanları üzerinde bozucu etkilere yol açabilen Ferrerezonans olayının özelliklerini ve kompanzasyon ünitesi bulunan transformatör istasyonlarında yaşanması durumunda oluşacak etkileri irdelemeyi amaçlamıştır. Bu açıdan çalışmanın 2. ve 3. bölümlerinde sırasıyla ferrerezonansın özellikleri ve etkileri açıklanmış, 4. bölümde örnek sistem üzerinde kompanzasyon ünitesi bulunan transformatör istasyonlarındaki ferrerezonans olayı incelenmiştir.

II. FERROREZONANSIN ÖZELLİKLERİ

Ferrorezonans olgusu sık sık karıştırıldığı lineer rezonans (ya da “rezonans”) durumundan aşağıdaki farklar ile ayrılır:

- Devreyi ferrorezonans haline sürükleyebilecek kapasitans değerlerinin ait olduğu aralık, rezonans haline oranla çok daha geniştir [2, 4-5].
- Ferrorezonans sonucunda sistemin cevabına ait gerilim ve akım dalgalarının frekansları, sistemin sinüsoidal gerilim kaynağının frekansından farklı olabilir [3-5].
- Verilen bir devre topolojisi ve eleman değerleri için ferrorezonans halinde birden fazla kararlı çalışma hali mevcut olur [5]. Bunlardan biri lineer yaklaşım ile bulunabilecek, beklenen normal çalışma noktası iken; diğerleri, genellikle tehlikeli haller içeren ve normal olmayan kararlı çalışma noktalarıdır[4].

Ferrorezonans olgusunun her hangi bir sistemde var olabilmesi için aşağıdaki koşulların mutlaka bir arada olması gerekmektedir.

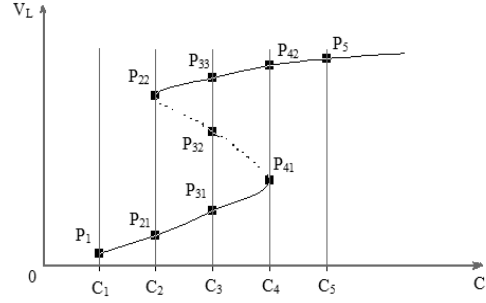
- Kondansatörler (kondansatör ya da benzer şekilde kapasitans kaynağı olan yapılar) ile lineer olmayan endüktansların bir arada bulunuyor olması,
- Sistemde potansiyeli sabit olmayan en az bir noktanın (izole edilmiş nötr noktası, tek fazlı sigorta çalışması, tek fazlı anahtarlama) bulunması,
- Az yüklenmiş sistem bileşenlerinin (boşta çalışan güç transformatörü ya da gerilim ölçü transformatörü) olması,

ferrorezonans olgusunun yaşanması için ön şartlardır [4].

Bu şartlardan her hangi birinin sağlanmaması halinde araştırmacılar sistemde var olan anormalliğin kaynağının ferrorezonans olmadığından emin olabilirken; bu durumların üçünün de bir arada bulunması sistemin ferrorezonansa girmesini kaçınılmaz kılmamaktadır.

Ferrorezonans olgusuna ait en önemli özelliklerden ikisi, sistem parametrelerine ve başlangıç koşullarına olan aşırı hassasiyettir. Bu hassasiyetler sistemin ferrorezonansa karşı korunabilmesi için alınabilecek önlemlerin de temelini oluşturmaktadır.

Her iki hassasiyet neticesinde gözlemlenen ve diğer bir karakteristik nitelik olan zıplama olgusunun varlığı ferrorezonansın yaşandığı bir sistemde kaçınılmazdır.



Şekil 1: Sistem parametrelerine olan aşırı hassasiyet ve zıplama olgusu

Sistem parametrelerine olan aşırı hassasiyet ve zıplama olgusu Şekil 1’ de verilmiştir C nin kapasiteyi ve V nin gerilimi gösterdiği bu şekil incelendiğinde;

- $C=C_1$ iken, sistem çözümü tek noktaya karşılık olur (P_1). Bu çözüm lineer varsayım ile elde edilebilecek normal çalışma koşuluna denk düşmektedir.
- $C=C_3$ iken, üç çözüm (P_{31} , P_{32} , P_{33} ,) vardır. P_{31} normal çalışma koşullarına denk gelirken, P_{33} sistemin ferrorezonans içerisinde olduğu hale denk gelmektedir. Nokta nokta çizilmiş kısımdaki cevap ise, P_{32} , pratikte ulaşılamayan bir sonuçtur.
- $C=C_2$ iken, sistemin kararlı çalışma noktası olan P_{21} ’den P_{22} noktasında zıplar. P_{21} bir limit değer olarak bilinir.
- $C=C_5$ iken, sadece ferrorezonans hali olan P_5 çalışma noktası olarak mevcuttur.
- Kapasitansın büyüklüğü olan C, C_3 seviyesinden düşmeye başlaması ile çalışma noktası P_{22} (ikinci sınır noktası) ‘den P_{21} noktasına sıçrar.

Bu şekildeki çalışma özelliğinin temelinde ferrorezonans olgusunun ayırt edici özelliklerinden olan zıplama olgusu yatar. Sistem parametrelerindeki ya da geçici olaylardan birindeki küçük bir değişiklik bir kararlı çalışma noktasından çok farklı bir kararlı çalışma noktasına ani sıçramalar yaratabilir [4].

Enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde meydana gelen pek çok farklı geçici olaya oranla ferrorezonans çok daha uzun süreli geçici ve sürekli çalışma halleri ile yavaş bir enerji sistemi arızası olarak sınıflandırılabilir.

III. FERROREZONANSI ETKİLEYEN FAKTÖRLER VE FERROREZONANSIN ÖNLENMESİ

Elektrik güç sisteminin ferrorezonansa maruz kalma yatınlığının veya yaşanan bir ferrorezonans durumunun etkilerinin ne yönde olabileceğinin bilinmesi, sistem işleticileri için önemlidir. Ferrorezonans olgusu üzerinde yükün, sistem geriliminin genliğinin, iletim hatları yapısının, transformatörlerin biçimlerinin ve kesicilerin etkileri vardır. Bu etkiler aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Sistemdeki kapasitif yapıların boyutlarına bağlı ve orantılı olarak yükün ohmik bileşeninin en az %10 ile %20 arasında tutulması ferrezonansın engellenmesinde ve sönümlenmesinde en büyük etkinin yaratılmasını sağlar. Ancak; yükün yapısı tüketicinin tercihleri ile değişebilir.
- Sistem geriliminin genliğinin büyümesi sistemin ferrezonansa girme ihtimalini artırır [2]. Amerika Birleşik Devletleri orta gerilim sistemleri içerisinde bildirilmiş ferrezonans durumu sayısı 34.5kV ve 25kV sistemlerinde, 15kV sistemine göre çok daha fazladır [8].
- Sistemde yer alan havai hatların boyunun uzaması ya da kablo şebekenin uzunluğunun artışı kapasitif etkiyi arttırmaya karşın, bu değişimin ferrezonans ihtimalini arttıracığına ilişkin bir kesinlik yoktur. Sistemde kapasitif değerin, sistem yapısına bağlı olarak alt ve üst sınırı değişecek olan bir aralığa düşmesi halinde ferrezonans görülebilmektedir [2].
- Transformator çekirdeklerinin yapısı, doyma karakteristiğini belirleyeceği gibi; çekirdek kayıpları sıfır dizi akılarına etkiyecek sönüm üzerinde de etkilidir. Aşırı doyma, ferrezonansın sonuçlarını daha kötü hale getirebilecekken; çekirdekte yaşanabilecek kayıpların sönüme katkısı olabilecektir. Bu nedenle, herhangi bir ferrezonans çalışmasının en kritik kısmı, transformatorün modellenmesidir [5].
- Tek kutuplu anahtarlama esnasında ferrezonansın oluşup oluşmayacağı üzerinde transformator sargılarının bağlantı şekilleri önemli etkiye sahiptirler [2]. Eğer faz-toprak arası kapasiteler mevcut ise sistemin bu tarafına denk gelen sargı tipinde, nötr noktasının topraklı olduğu bir tip seçilmelidir.
- Farklı güçte olan fakat çekirdek yapıları, sargı tipleri, gerilim seviyeleri ve çevirme oranı aynı olan transformatorler karşılaştırılırsa, anma gücü daha yüksek olan güç transformatorünün ferrezonansa olan yatkınlığı belirgin şekilde azdır. Transformator anma görünür gücünün artması ile bu transformatorün bulunduğu sistem parçasının ferrezonansa girme ihtimali düşmektedir [2].
- Kesiciler ile gerçekleştirilen hatalı anahtarlama sonucunda ferrezonansın meydana gelmesine neden olabilmektedir [7].
- Düşük kayıplı transformatorler sönümün azalması yönünde etki gösterdiğinden ferrezonansın sonuçlarının daha etkili olmasına neden olmaktadır.
- Sisteme eklenen yeni cihazlar, tüm cihazların yalıtım malzemelerine sahip olması nedeniyle sisteme ait toplam kapasitansın artmasına ve böylece ferrezonansı besleyen enerjinin kaynağının büyümesine destek olmaktadır.
- Sistemin kısa devre gücü arttıkça, ferrezonansa girme ihtimali düşmektedir.

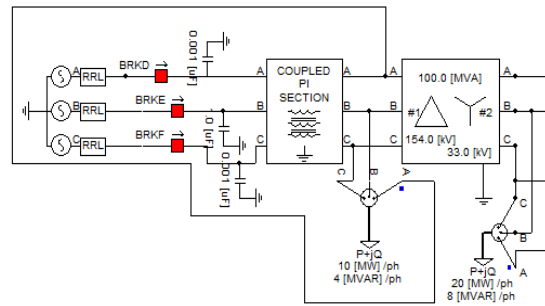
Üzerinde çalışmakta olan sistemin ferrezonansa yatkınlığının tespit edilebilmesi için ilk adım sisteme ait matematik modellerinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan

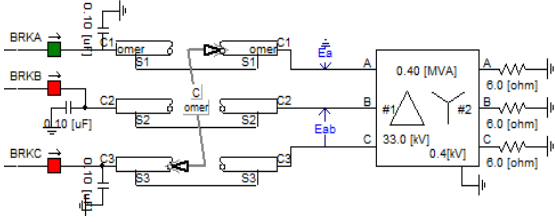
modellerden yararlanılarak sistem için tanımlanabilecek tüm çalışma durumları incelenmelidir. Bu incelemeler sonucunda ulaşılabilecek sonuçlarda elde edilebilecek ferrezonans verileri sadece sürekli hal için geçerlidir. Bu durum, sistemin ferrezonans hali için vereceği cevabın geçici halinin her hangi bir tehlike içermediği anlamına kesinlikle gelmez [4]. Çünkü geçici hal süresince de çok yüksek genlikli aşırı gerilimler oluşabilir ve bu gerilimler ferrezonansın sürekli hale geçmesinden önce sistem dâhilindeki bazı cihazlara ait yalıtımları delebilir. Bu amaçla geçici hallerin incelenmesi için ATP-EMTP, PSCAD-EMTDC, Matlab-Simulink gibi yazılımlar ile gerçekleştirilebilir. Geçici hal analizinin yapılabilmesi için de çalışmaya yine doğru modelleme ile başlamak gerekmektedir. Özellikle transformator modellemesi, sonuçları rahatlıkla değiştirebilmektedir.

III. TRANSFORMATÖR İSTASYONUNDA YAPILAN KOMPANZASYONUN FERREZONANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Ferrezonansın oluşması halinde lineer olmayan endüktansların üzerinden boşalacak enerjinin kaynağı, sistemdeki kapasitif yapılar üzerinde biriken yüküdür. Eğer, olgu doğrusal olsaydı sistem kapasitansının artışı ile ferrezonansın yaşanması ihtimalinin artması veya var olan ferrezonans durumunun sonuçlarının daha da vahim olması beklenirdi. Ferrezonansın lineer olmaktan oldukça uzak karakteristiği nedeniyle üzerinde çalışılan bir sistem ya da sistem parçası için, bu olgunun meydana gelmesinin gerek koşullarından biri, kapasitans değerinin sisteme özel alt ve üst sınır değerleri arasında yer almasıdır [4]. Alt sınırın altında kalmak ya da üst sınırın üzerine çıkmak sistemin ferrezonansa uğramasını engellemektedir [2].

Bu çalışmada 154/33 kV luk bir transformator istasyonunda yapılan kompanzasyonun etkilerinin gözlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla Şekil 3'teki verilen örnek sistem, Türkiye sistemi dâhilinde kullanılan gerilim seviyeleri temel alınarak oluşturulmuştur. İncelemeler PSCAD-EMTDC yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [9].

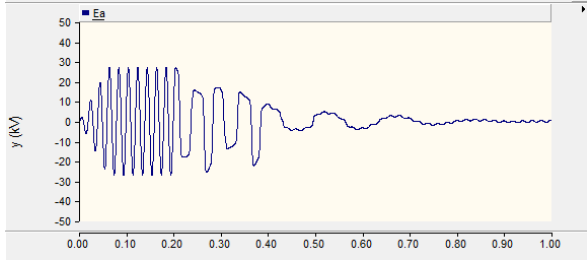




Şekil 3: Ferrerezonans benzetimi için kurulan EMTDC modeli

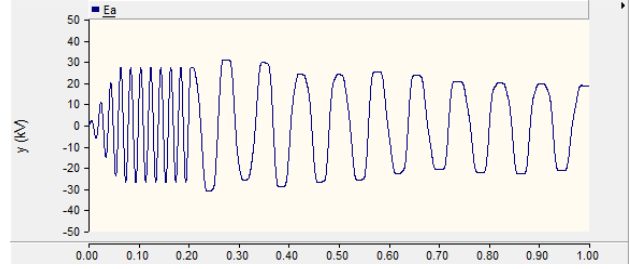
Örnek sistem transformatörün 154 kV barası enterkonnekte sistemi yansıtan şebeke modeli ve ona bağlı bir iletim hattına seri olarak konumlandırılmıştır. İndirici transformatörün gücü 100MVA olarak alınmıştır. Transformatörün sekonder tarafında bir kablo hat üzerinden orta gerilim sisteminin beslendiği varsayılmıştır. İndirici transformatörden kablo hatta geçiş kesici grubu üzerinden yapılmıştır. Ferrerezonans olgusunun yaşanabilmesi için gerek şartlardan birisi, potansiyelinin sabit olmadığı (kayan) bir noktanın var olmasıdır. Bu durumu yaratabilecek uygunsuz anahtarlamanın sağlanabilmesi amacıyla üç adet tek fazlı kesiciden oluşan bir kesici incelemede kullanılmıştır.

Kablo hattının başında, kompanzasyonu modellemek amacıyla yıldız noktası topraklı kondansatör grubu bağlı olduğu kabul edilmiştir. Kablo hattın sonundaki dağıtım transformatörü ise 33/0.4 çevirme oranındadır. Bu dağıtım transformatörün çıkışında ise ohmik karakteristikli dengeli yükler sisteme dâhil edilmiştir. Bu tarz bir yükün eklenmesinin amacı dengesizliğin çalışmada incelenmek istenen parametreler üzerinde etkili olmasını engelleme gereksinimidir.



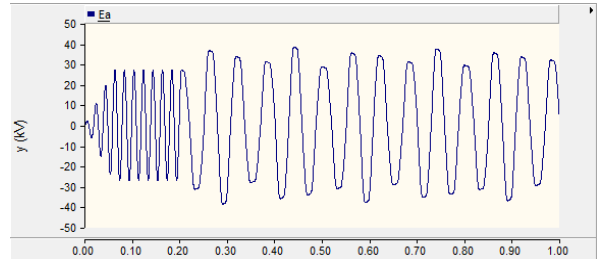
Şekil 4: Kompanzasyon amaçlı kondansatörlerin olmadığı durum

Kablo hattı ve sistem bileşenlerine ilişkin parametreler sabit tutularak, indirici transformatörün orta gerilim tarafında yerleştirilen kondansatör grubunun boyutunda yapılan değişiklikler neticesinde dağıtım transformatörünün primerindeki gerilim cevabındaki değişimler elde edilmiştir (Şekil 4-8). Şekil 4'te kompanzasyonun yapılmadığı ve ferrerezonans olgusunun yaşanmadığı duruma ilişkin sonuçları göstermektedir.

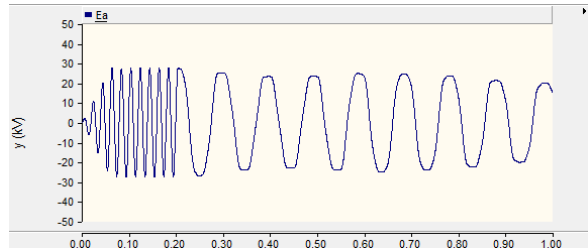


Şekil 5: 24MVAR gücünde kompanzasyonun mevcut olduğu hal

Şekil 5, şekil 6 ve şekil 7 deki sonuçlar, kompanzasyon grubunun gücü sırasıyla 24 MVAR, 12 MVAR ve 48 MVAR alınarak yapılan incelemelere ilişkindir. Şekil 7'de aşırı kompanzasyon yapılarak 48MVAR'lık bir grup kullanılmıştır.

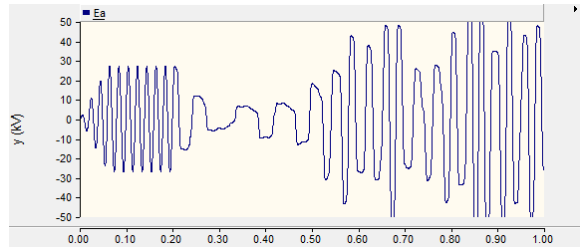


Şekil 6: 12MVAR gücünde kompanzasyonun mevcut olduğu hal



Şekil 7: 48MVAR gücünde kompanzasyonun mevcut olduğu hal

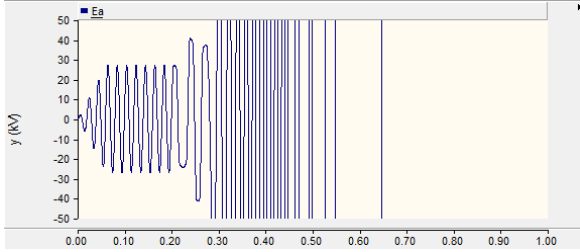
Sonuçlara göre, kondansatör grubunun gücü büyüdükçe yaşanan ferrerezonansın oluşturduğu aşırı gerilimin büyüklüğü düşmektedir. 0,5 MVAR değerindeki kompanzasyonun etkisi görmek amacıyla gerçekleştirilen benzetim incelemesi sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: 0.5MVAR gücünde kompanzasyonun mevcut olduğu hal

Üzerinde çalışılan sistemde kompanzasyon yokken ferrerezonans yaşanmamış; yapılan diğer denemelere

oranla en küçük kompanzasyonda ise en ağır ferrezonans sonuçları elde edilmiştir. Bu durum ferrezonansın lineer olmayan karakterine uygun bir örnektir. Son durumdaki kompanzasyon değeri korunur ve kablo hattın boyu yarısına indirilirse sistem cevabı daha da kötüleşmekte ve ferrezonansın karakteristiği kaotikğe kaymaktadır. Şekil 9’da bu çalışmaya ait sonuç verilmiştir.



Şekil 9: 0.5MVAr gücünde kompanzasyonun mevcut, kablo hattın kısa olduğu hal

Sonuç olarak, modellenen sistem için ferrezonans ihtimalinin var olduğu kapasitans değerlerini barındıran zarfın alt sınırının, kolaylıkla aşılabildiği ancak, üst sınırın da aşılmasını sağlayacak boyuttaki kapasitans değerlerine yaklaştıkça ferrezonans etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.

VI. SONUÇ

Ferrezonans başlangıç koşullarına ve sistem parametrelerine karşı çok hassas, yavaş ve tehlikeli bir geçici olgudur. Bu çalışmada ferrezonans olgusu tanımlanmış, hassasiyetleri ve engellenebilmesi için çözümler irdelenmiştir.

Örnek sistem durumu olarak bir transformatör merkezinde yapılacak kompanzasyonun etkileri benzetim incelemeleri gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Her sistemin kendine özel olan ferrezonans ihtimalli kapasitans zarfının dışına çıkılması halinde ferrezonanstan kaçınılabileceği görülmektedir. Sisteme özel ferrezonans durumunun hesaplanabilmesi ya da bu ihtimalin varlığının öngörülebilmesi doğru modelleme ile yapılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Santosa, S., Dugan, R. C., Grebe, T. E., ve Nedwick, P., Modelling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System, *The International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Rio de Janeiro, Brazil on June 24-28, 2001.
- [2] IEEE-standard C57.105-1978, *IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution System*, s. 20-27.

- [3] Emin, Z., Al Zahawi ,B. A. T., Auckland, D. W., ve Tong, Y. K., Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics Ferroresonance in a High Voltage Power Sistem. *IEE Proc. Gener. Transm Distrib.*, Vol. 144, No:4, s.383-387, 1997.
- [4] Ferracci, P., 1998: Ferroresonance. *Cahier Technique Schneider*, Vol. 190 . www.schneiderelectric.com. Alıntılama Tarihi: 15. Haziran. 2010
- [5] Irvani, M. R., ve arkadaşları, Modelling and Analysis Guidelines for Slow Transients – Part: The Study of Ferroresonance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No.1, s.255- 265, 2000.
- [6] Tong Y.K., NGC Experience on Ferroresonance in Power Transformers on HV Transmission Systems. IEE, Savoy Place, *IEE Colloquium on Warning! Ferroresonance Can Damage Your Plant* Londra, 1997.
- [7] Jacobson D., 2003: Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, Toronto, Ontario, 2003*
- [8] Mozaffari S., Sameti M., ve Soudack A.C., Effect of Initial Conditions on Chaotic Ferroresonance in Power Transformers. *IEE Proceedings, General Transmission Distribution.*, Vol. 144, No:5, s.456-460, 1997.
- [9] PSCAD-EMTDC v4.2.1, The Manitoba HVDC Research Centre, <https://pscad.com/>