

## ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS OLAYLARI

Fatih Akça

**Özet** - Ferrorezonans lineer olmayan bir rezonans olayıdır ve güç şebekelerini etkiler. Harmoniklerdeki anormal değerlere geçici yada sürekli hal aşırı gerilimlerine ve aşırı akımlarına yol açar ve bunlar genellikle elektrik malzemelerine zarar verir. Bazı açıklanamayan olaylara ferrorezonansın sebep olduğu sanılmaktadır. Ferrorezonansın meydana geleceği baştan tahmin edilemez ve çok tehlikeli olabilir. Ancak buna karşın ferrorezonansa sebep olabilecek bazı konfigürasyonlar tanımlanabilir. Ve bu konfigürasyonlar üzerinde belirli önlemler alınarak ferrorezonans önlenir. Güç sistem davranışını tarif eden matematiksel eşitlikler ve sistemin çözümü bilgisayarların kullanımını gerektirir. Çalışmalar masraflıdır ve herbir kombinasyon için ayrı bir çalışma yapılmalıdır.

**Anahtar kelimeler** – Ferrorezonans, Güç sistemleri Nonlinear, Harmonikler, Konfigürasyonlar, Aşırı gerilimler, Aşırı akımlar

**Abstract** – Ferroresonance is a nonlinear resonance event that effects power networks. Abnormal values in the harmonics cause transient or permanent state overvoltages and overcurrents. and this often cause malfunction in the electrical equipment, some unexplained events are thought to be caused by ferroresonance. Ferroresonance can not be predicted and may be very dangerous. But some configurations that cause ferroresonance may be defined. Ferroresonance can be avoided by taking some precautions on this configurations. The equations that define power system behavior, and the solutions of the system require the use of computers. The studies on ferroresonance are expensive and each combination requires a separate study.

**Key words** – Ferroresonance, power systems, Nonlinear, Harmonics, Configurations, Overvoltages, Overcurrents

### I.GİRİŞ

Ferrorezonans karmaşık bir elektrik olayıdır. 1920' lerin başından itibaren hiç değişmeden günümüze kadar gelmiştir. Yüksek gerilimde birdenbire ortaya çıkan ve yüksek seviyeli harmonik distorsiyonuna yardımcı olan olay olarak tanımlanmıştır. İlk defa 1920 lerde ortaya çıkan ferrorezonans terimi en az aşağıdaki elemanları barındıran bütün devrelerdeki osilasyon olaylarını çağırır.

1. Nonlineer indüktans
2. Bir kapasite
3. Bir gerilim kaynağı
4. Düşük kayıplar

Güç şebekeleri yüksek sayıda doyabilir indüktanslardan (güç transformatörleri, gerilim ölçüm indüktif transformatörleri ( VT ), şönt reaktörler ) olduğu gibi kapasitörlerden ( kablolar, uzun hatlar, CVT ler seri yada şönt kapasitör bankaları, devre kesicilerdeki gerilim ayarlama kapasitörleri metal kaplama alt istasyonları) oluşur.

Bunlar böylece ferrorezonansın ortaya çıkabileceği muhtemel senaryoları gösterirler bu olayın temel özelliği aynı çeşit şebeke parametreleri için birden fazla kararlı sürekli durum cevabının varlığıdır. Yıldırım düşmesiyle oluşan yüksek gerilimler, trafoların yada yüklerin enerji verilmesi ve kesilmesi, hataların ortaya çıkması yada temizlenmesi v.s. gibi geçici durumlarda yada çalışma esnasında ferrorezonans tetiklenebilir.

Sistemin cevabı kaynakla aynı sinüsoidal frekansta normal bir kararlı hal durumundan yüksek bir gerilim ve harmonik seviyesi ile karakterize edilebilecek ve malzemelerde ciddi zararlara yol açabilecek ferrorezonans kaynaklı kararlı duruma atlayabilir. Bu çeşit davranışın pratik bir örneği bir devre açıcısının açılması ile bir gerilim trafosunun enerjisinin kesilmesidir.

Ferrorezonansın meydana getirdiği koruma cihazlarının zamansız devre dışı kalmaları, güç trafoları yada gerilim trafoları gibi cihazların zarar görmesi, üretim kayıpları gibi durumlardan korunmak için olayı anlamak tahmin etmek olayı belirlemek, olaydan kaçınmak yada onu elimine etmek önemlidir.

Bu kompleks olay hakkında çok az şey bilinmektedir bunun sebebi çok az görülmesi ve elektrik mühendisleri tarafından lineer yaklaşıma dayalı hesaplama metodları ile analiz edilememesi ve tahmin edilememesidir. Bu bilgi yokluğu ferrorezonansın birçok açıklanamamış zararlar yada hasarlardan sorumlu olduğu kanısını doğurmaktadır.

Ferrorezonans lineer olmayan bir rezonans olayıdır ve güç şebekelerini etkiler. Harmoniklerdeki anormal değerler geçici yada kalıcı durum aşırı gerilimlere ve aşırı akımlara yol açar ve bunlarda genellikle elektrikli elemanlara zarar verir. Bazı açıklanamayan arızalara ferrorezonansın sebep olduğu sanılmaktadır.

Ferrorezonans, direnç, kapasitans ve doğrusal olmayan indüktanstan oluşan sistemde kararsız bir çalışmadır bir elektrik devresinde elektriksiz öğelerden birinin değerinin değişmesi ile diğer öğelerin uçları arasındaki akım ve gerilim değerlerinde ani bir yükselme olur.

Ferrorezonansın ekipmanlar üzerindeki etkisinin maliyet açısından bilinmesi gerekir ferrorezonansın analizi zordur çünkü muntazam olarak meydana gelmez ve meydana gelecek olayların önceden kestirilmesi mümkün değildir. Kararlı bir sürekli hal cevabı daha çok başlangıçta kurulan devre parametrelerinden meydana gelebilir. Geçici voltaj cevabı faz nötr hatalarının devreye zarar vererek açması, enerjili veya enerjisiz ekipmanlarda hatlara yıldırım düşmesi sonucunda indüklenen yüksek gerilimler veya birdenbire ortaya çıkan ufak değişimlerde meydana gelir. Ferrorezonans sistemin nonlineer atlamalardan dolayı ani değişiklikler ile aldığı normal sürekli hal cevabıdır. Sürekli hal durumuna kadar şiddetli harmonik distorsiyonunun ve yüksek gerilimlerin güç sistemi ekipmanları üzerinde zararları bulunur.

Gelecekteki elektrik sistemlerinde ferrorezonansa daha çok rastlanacağı söylenebilir. İletim ve dağıtım gerilimlerinin giderek arttırılması hat kapasitansı ile transformatörlerin manyetik doyma eğrileri arasında bu günden daha değişik bir ilişki yaratacaktır. Bu değişiklik ferrorezonans olasılığının artışı yönündedir.

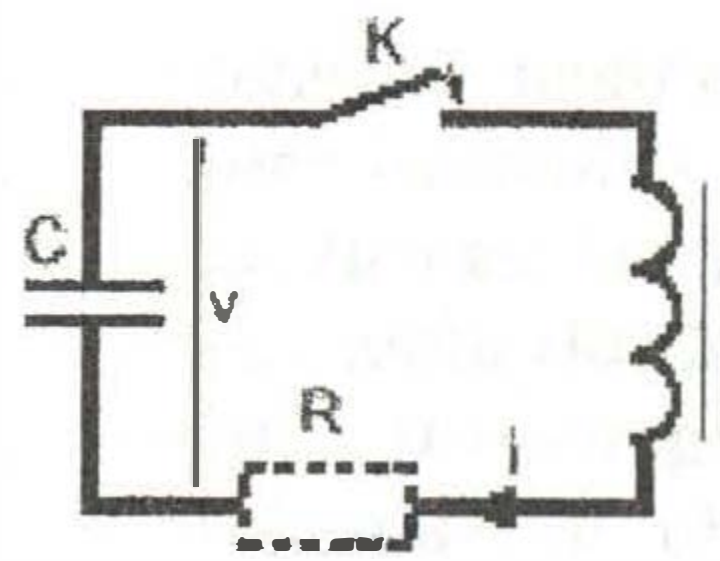
Bununla birlikte ekipmanların zarar görmemesi için aktif güç sistemleri mühendisleri ferrorezonans hakkında meydana gelebilecek problemlerin azaltılması bertaraf edilmesi ve dizayn sistemleri ile ilgili yeterli bilgiye sahip olmalıdırlar.

## II.FERROREZONANS

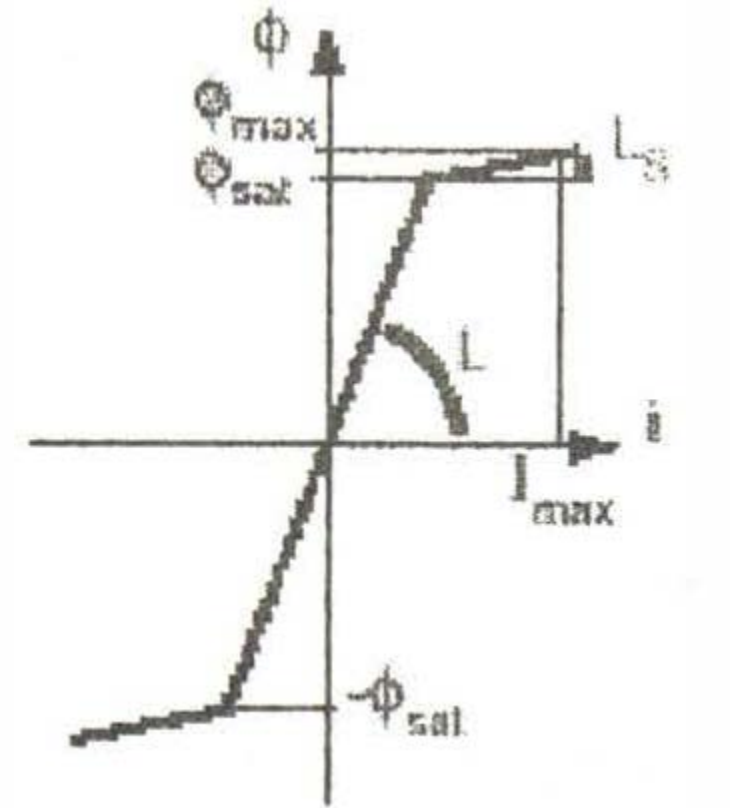
Verilen bir açısal hız ( $\omega$ ) için bir ferrorezonans devresinin bir lineer rezonans devresinden temel farkları şunlardır :

1. Lineer rezonans geniş bir alandaki C değerlerinin rezonans ihtimali vardır.
2. Ferrorezonans sinüsoidal gerilim kaynağından farklı olabilecek gerilim frekansı ve akım dalgası mevcuttur.
3. Ferrorezonans vermiş bir konfigürasyon ve parametre değerleri için birkaç kararlı sürekli hal cevabı vardır. Bu durumlardan biri beklenen normal bir durumdur ( lineer varsayım ) oysa beklenmeyen diğer anormal durumlar ekipmanlar için çoğu zaman tehlikelidir.

İlk durumlarla (kondansatörlerin başlangıçtaki şarjı, transformatörlerin nüvesindeki artık akı, ani anahtarlama) kararlı sürekli hal cevabının sonucu belirlenir.



a - Şematik diyagram



b - Basitleştirilmiş karakteristik

Şekill(a,b) Ferrorezonans devresi şematik diyagramı ve temel karakteristiği

### II.1 Fiziksel Yaklaşım

Eğer enerji kayıpları ( joule kaybı , nüve kaybı ) sistemi besleyen gerilim kaynağı tarafından karşılanırsa, frekans salınımı düştükçe baştaki frekans güç frekansından büyükse kaynağın frekansını, baştaki frekans güç frekansından küçükse kaynak frekansının birçok alt frekansını kilitleyebilir.

Bu lineer rezonans ile ferrorezonansın birbirine benzemediğini gösterir. Verilmiş bir indüktans için meydana gelen lineer rezonans belirli C değeri için değil, geniş bir C değerleri alanında ortaya çıkar.

## II. 2. Ferrorezonans Modlarının Sınıflandırılması

Güç sistemlerinde görülen dalga şekilleri deneyimleri azaltılmış sistem modellerine bağlı deneyler nümerik simülasyonlarla birlikte ferrorezonans durumlarının dört değişik tipte sınıflandırılmasını mümkün kılar.

Bir ferrorezonans devresi için normal geçici durumu ferrorezonans geçici durumundan ayırmak zor olduğundan bu sınıflandırma kararlı hal durumuna bağlıdır (yani geçici hal durumu bittiğinde). Bununla beraber geçici ferrorezonans olayı elektrik ekipmanları için bir risk oluşturmadığı anlamına gelmez.

Tehlikeli geçici yüksek gerilimlerle belirli sistem periyotlarında ardışık olaylar meydana gelebilir (örnek olarak yüksüz transformatörlerin enerjilendirilmesi) ve birkaç güç sistem periyodunda devam edebilir. Dört çeşit ferrorezonans modu vardır.

- 1-) Temel mod (fundamental)
- 2-) Alt harmonik modu (subharmonik)
- 3-) Yarı periyodik mod (quasi periyodik)
- 4-) Karmaşık mod (kaotik)

## II. 3. Ferrorezonans Tipinin Teşhisi

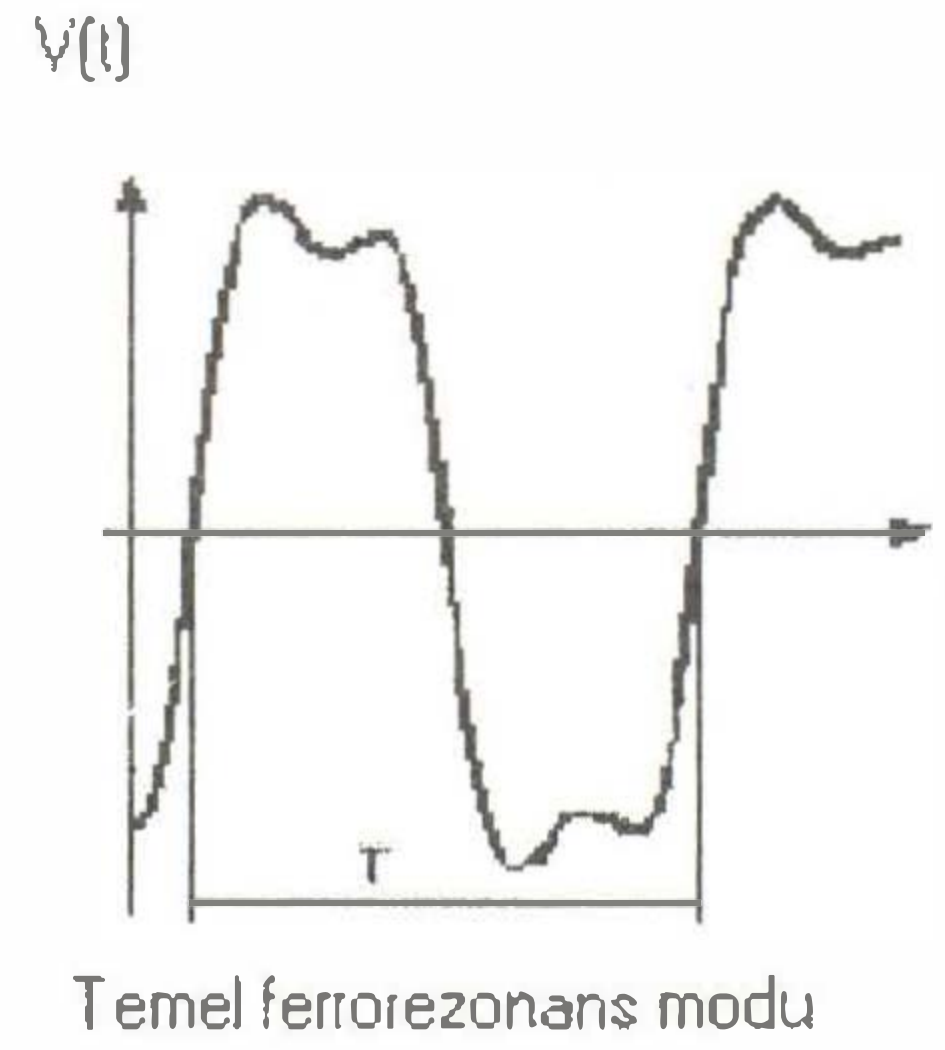
Dört farklı ferrorezonans tipi :

Akım ve gerilim sinyallerinin her ikisinin spektrumu, sistemin muayyen belirli bir noktasındaki V gerilimi serileri ve I akımının ölçülmesiyle elde edilen stroboskopik görüntü ve bir sistem periyodu ile ayrılmış I anlık değerlerinin V düzleminde çizilmesiyle teşhis edilebilir.

## II. 4. Temel Mod

Sistem periyoduna eşit bir T periyodu ile gerilimler ve akımlar periyodiktir ve değişen harmonik değerini ihtiva edebilir ( Şekil 2 ) sinyal spektrumu güç sistemlerinde  $f_0$  ana harmonik ve (  $2f_0$  ,  $3f_0$  ) kendi harmoniklerinden oluşan aralıklı bir spektrumdur.

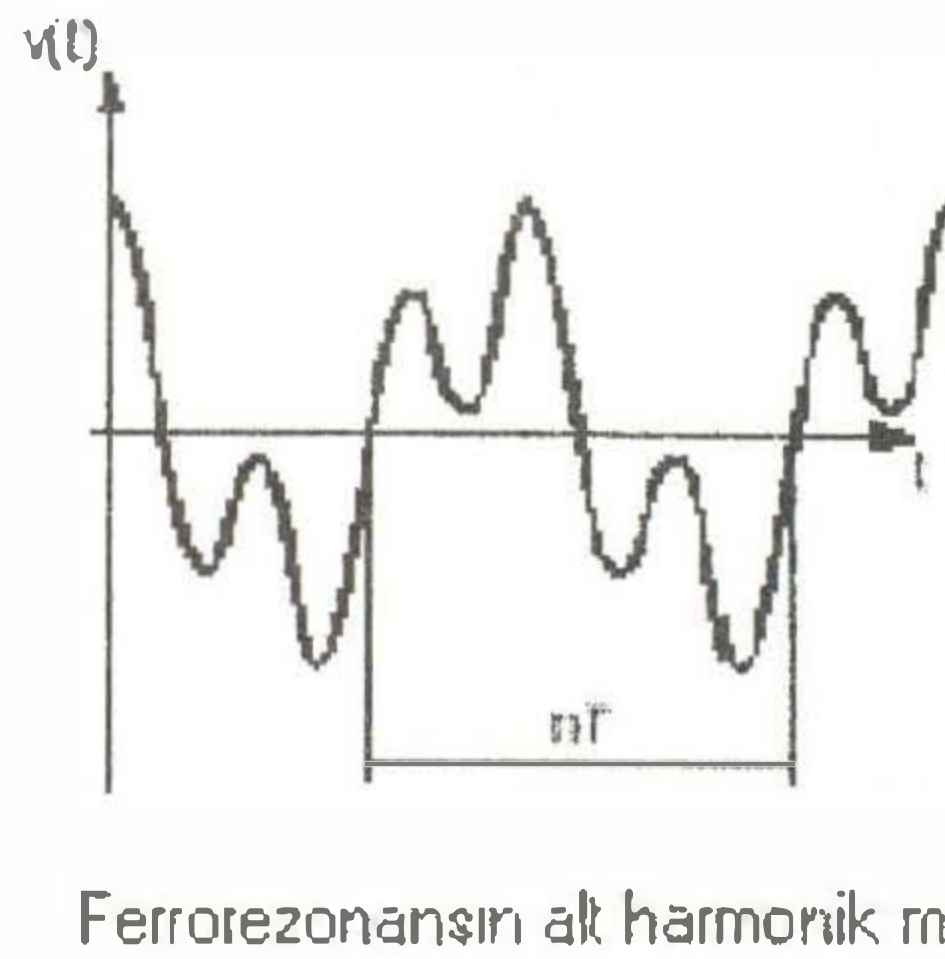
Stroboskopik görüntü V-I grafiğinde normal nokta ve ferrorezonans durumunu gösteren nokta olmak üzere iki nokta ile görülür.



Şekil 2. Ferrorezonansın temel modunda V-t grafiği

## II. 5. Alt Harmonik Modu ( Subharmonik Modu )

Sinyaller güç periyodunun çoğaltılmışı olan bir  $nT$  periyodu ile periyodiktir. Bu durum alt harmonik  $1/n$  veya harmonik  $1/n$  olarak bilinir. Spektrum burada  $f_0/n$  'e eşit bir temel frekansı ( burada  $f_0$  kaynağın frekansı ve  $n$  bir tamsayıdır.) ve onun harmoniklerini gösterir. Dolayısıyla  $f_0$  frekansı spektrumun bir parçasıdır. V-I grafiğinde stroboskopik  $n$  noktalı bir çizim ortaya çıkar.



Şekil 3. Ferrorezonansın altharmonik modunda V-t grafiği

## II. 6. Yarı Periyodik Mod

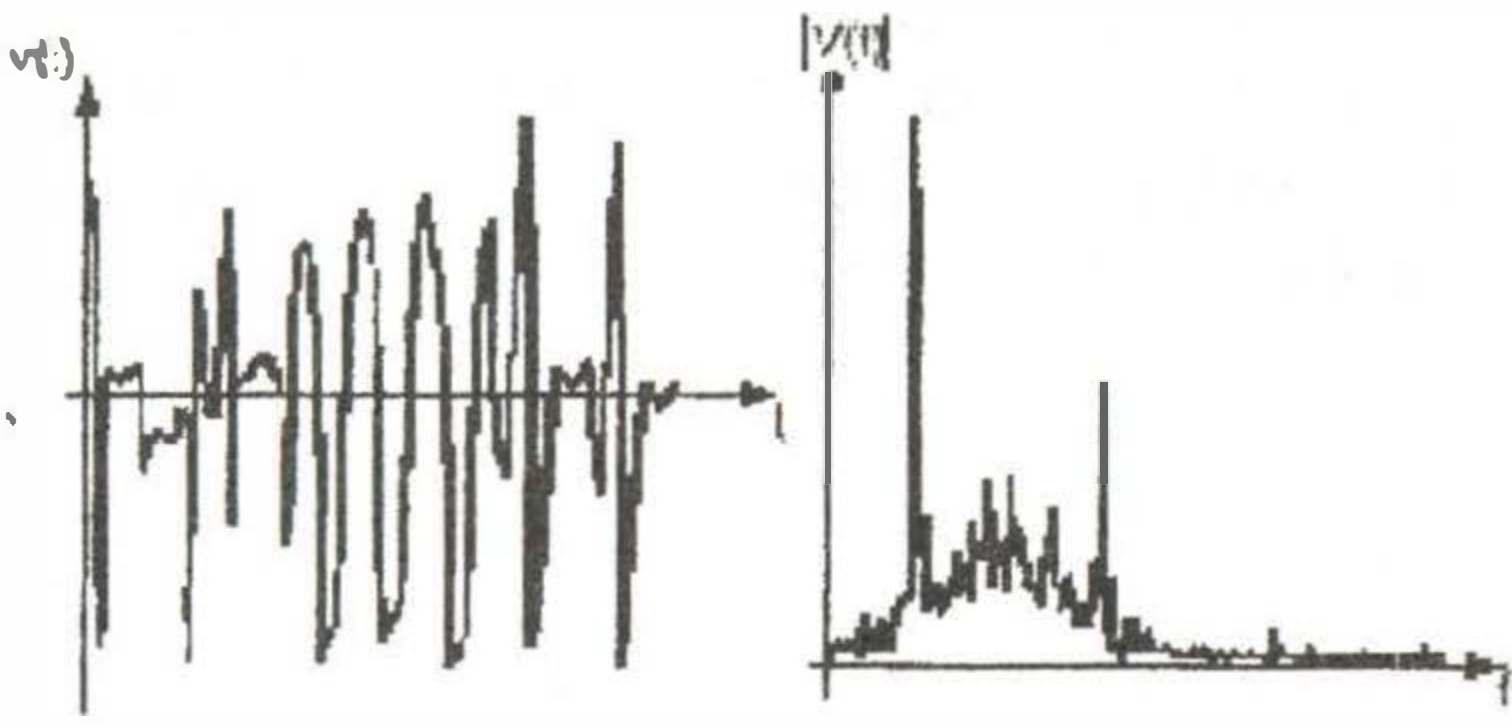
Bu ferrorezonans moduna yalancı periyodik de denir yani periyodik değildir. Bu spektrum aralıklı bir spektrumdur. Frekans formunun tanımı  $n_1 f_1 + m_2 f_2$  (  $n$  ve  $m$  ' tam-sayı ve  $f_1 / f_2$  irrasyonel reel sayı ) bu stroboskopik görüntü kapalı bir eğriyi gösterir.



Şekil 4. Ferrerozonansın yarı periyodik modunda V-t grafiği

## II. 7. Karmaşık Mod

Karmaşık modun karşılığı olan spektrum düzenli devamlıdır yani her bir gerilim değerine farklı frekans değeri karşılık gelir. V-I grafiği de ilginç cazibeli olarak bilinir.



Şekil 5. Ferrerozonansın kaotik modunda V-t, V-f grafikleri

Sonuç olarak ferrerozonans çok karmaşık bir olaydır çünkü :

1. Verilmiş bir devre için birkaç çeşit kararlı hal vardır
2. Bu durumun meydana gelmesi sistem parametrelerinin değerlerine çok duyarlıdır.
3. Bu durumun meydana gelmesi başlangıçtaki duruma çok duyarlıdır.
4. Sistem parametrelerindeki küçük değişimler veya geçici bir iki çok farklı kararlı halde ani atlamalara sebebiyet verebilir ve dört ferrerozonans tipinden birine yol açabilir burada en fazla temel ve subharmonik modlarından biri ile karşılaşılır.
5. Ferrerozonansın yol açtığı geçici yada kararlı salınımlar anormal harmonik değerleri yüksek gerilim ve akımlar. elektrik ekipmanları için sık sık rol oynayan bir risktir
6. Kararlı halde ferrerozonans güç sistem enerjisi kaynaklarının gerilimi tarafından desteklenir.

## II. 8. Ferrerozonansın Teşhis Edilmesi

Elementlerin teşhisi (tetkiki) : Ferrerozonans sık sık aşağıda tarif edilen bazı belirtilerin rehberliğinde oluşur.

1. Sürekli yüksek gerilimler farklı modda (faz - faz) ve/veya ortak (genel) mod (faz-toprak)
2. Sürekli yüksek akımlar
3. Sürekli yüksek distorsiyonlu gerilim ve akım dalga formu
4. Nötr noktası geriliminin yerinden çıkması yüksüz transformatörlerin ısınması
5. Fazla yüklü transformatör ve reaktörlerin sürekli gürültüleri
6. Elektrik ekipmanlarının ısınma etkisi ile zarar görmesi (kapasite gurubu VT,CVT) veya izolasyon bozulması VT nin ferrerozonansla harap olmasının en bariz örneği. primer sargının harap olması ve bozulmamış sekonder sargısıdır
7. Kolayca zamansız hızlı çalışan koruma cihazları

Bu belirtilerin ortaya çıkması ferrerozonans durumundan kaynaklanmayabilir. Mesela topraklanmamış nötr sisteminin nötr noktasının potansiyelinin değişmesi tek faz toprak hatasından kaynaklanıyor olabilir. Bu ön teşhis en basit şekilde tipik ferrerozonans dalga formlarının kaydedilmiş eğrilerini karşılaştırmakla yapılabilir.

Teşhis zorluğu çekildiğinde, kayıt olmadığında, belirtilerin birkaç olası yorumu olduğunda yapılacak şey semptomların bulunduğu durumlarda bu olaya yol açabilecek sistem konfigürasyonunun ve bunlara yol açıcı transformatör enerjilendirme, bir endüstriyel işlemde fazın spesifik etkisi, yük reddetme gibi olayların analiz edilmesidir.

Bir sonraki adımdaki yapılacak iş ferrerozonansın gerçekleşmesi için gerekli fakat yeterli olmayan üç durumun tespit edilmesidir.

1. Kapasite ile nonlineer indüktansın aynı devrede bulunması.
2. Potansiyeli eşit olmayan en az bir sistem noktasının bulunması ( Nötr izolasyonu, tek sigorta atması, tek faz anahtarlaması )
3. Hafif yüklü sistemin elemanları ( yüksüz güç veya voltaj transformatörü, generatör vb. )

Eğer bu durumlardan herhangi biri mevcut değilse ferrerozonansın olasılığı yüksek değildir. Aksi takdirde çok geniş araştırmaya muhtaçtır.

Tipik güç sisteminin ferrerozonansa tercih edilebilecek durumu bir örnek ile karşılaştırılırsa riskli konfigürasyonların gruplanması basitleştirilir.

### III. NÖTR NOKTASININ KARARSIZLIĞI

Demir çekirdeklerdeki manyetik doyma ; akım ve gerilimlerde distorsiyon yaratır. Demir çekirdekli bir sargıya sinüsoidal gerilim uygulandığında , sinüsoidal olmayan bir mıknatıslama akımı doğar. Demir çekirdeğin doyma derecesi mıknatıslama akımındaki yüksek harmonikleri belirler. Bunlardan üç ve üçün katı harmonikler üç fazlı sistemlerde ayrı bir önem taşırlar.

Bilindiği gibi dengeli üç fazlı işletmede sıfır bileşen devresinde temel frekanslı bir kaynak gerilimi olmayacaktır. Ancak transformatörün demir çekirdeğinin doyması halinde üçüncü harmonik distorsiyonu bir eşdeğer üçüncü harmonik gerilimi (e3) ile ifade edilebilir.

Bu gerilimler nötr noktasının kaymasına ve böylece parafıdurlara uygulanan gerilimlerin aşırı biçimde büyümesine yol açar.

Nötr noktasının kararsızlığı konusunda daha tam bir analizle gösterilebilir ki nötr noktasını kaydıran gerilim saf bir üçüncü harmonik niteliğine sahip değildir. Bu gerilim devre parametreleri, doyma şartı, ve fazların enerjilenme zamanlarına bağlı olarak temel harmonik frekansının altındaki ve üstündeki değerlerde harmonikleri içeren karmaşık dalga biçimlerine sahip olabilir. Bu dalgaları gerçeğe yakın olarak saptayabilmek için TNA (geçici rejim şebeke analizörü ) üzerinden etüdlerin yapılması gerekir.

#### III.1. Enerjilemede Nötr Noktasının Kararsızlığı

Genel olarak nötr noktasının kararsızlığı aşağıdaki frekanslarda doğar

1. Temel frekans
2. Temel frekansın altındaki frekanslar

Yukarıdaki ikinci durum kararlı rejimde manyetik doyma halindeki işletme de yada kararlı durumda yüksek gerilimlere yol açan enerjilendirmelerde olabilir.

Şu halde bu olay sayesinde herhangi bir işletmede herhangi bir fazdaki faz nötr gerilimi normalin iki katı olmaktadır. Bu ise bu fazdaki parafıdurun parçalanmasına yol açabilir.

### IV. GÜÇ SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS

Bir güç sistemindeki Ferrerozonans aşağıdakilerin bir veya birkaçı ile kendini gösterir.

- 1.Fazlararası veya faz nötr gerilimlerinde aşırı yükselmeler
2. Aşırı akım yükselmeleri
- 3.Yüksek seviyedeki akım ve gerilimlerin dalga şeklinin bozulması
4. Transformatörlerde aşırı ısınmalar ve yüksek sesler
- 5.Elektrik ekipmanlarına zarar verir (ısınma ve izolasyon bozulması )
- 6.Koruyucu aletlerde kötü işlemler belirir.

Bu olaylar habersiz ve rastgele meydana gelirse düzeni ciddi şekilde bozar. Aşağıda tanımlanan bazı durumlarda ferrerozonans ortaya çıkabilir. Bununla birlikte hangi muhtemel ferrerozonansların ortaya çıkabileceği aşağıdaki elemanların bulunduğu devrelerde teşhis edilebilir.

Bir sinüsoidal gerilim kaynağı : Bir güç sistemleri generatörüdür.

Ferromanyetik indüktans : Bunlar güç transformatörleri ve ölçüm transformatörleridir

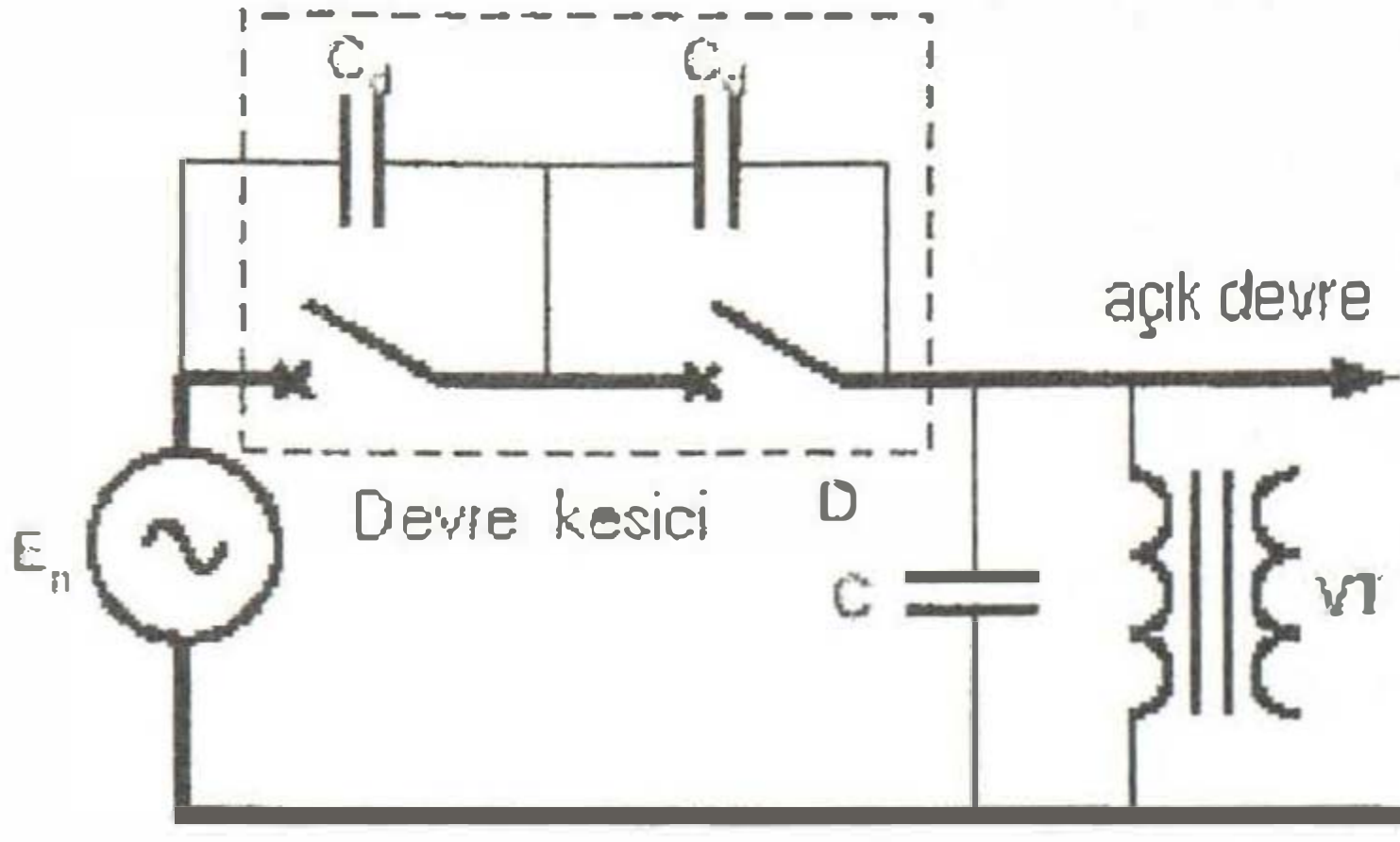
Kapasite : Bu yüklenmiş güç sistemlerinin kapasiteleri, iletim hatlarının toprağa göre kapasitesi, yer altı kablolarının yüksek kapasiteleri veya yer altı sistemlerinin toprağa göre kapasitelerinden oluşabilir.

Düşük direnç: Düşük yüklü güç sistemi ekipmanları (örnek olarak yüksüz transformatör) kısa devredeki güç kaynağı veya zararlı kısa devreler

Bir güç kaynağındaki farklı kapasitans kaynaklarının ve nonlinear indüktansların çokluğuna ve çok geniş bir alandaki işletim durumlarına bağlı olarak yukarıdaki tarif edilen durumları karşılayan ve bu yüzdende ferrerozonansı destekleyen güç devresi konfigürasyonu sayısı sonsuzdur. Bununla birlikte deneyimler vasıtasıyla ferrerozonansın ortaya çıkmasına sebep olduğu bilinen birkaç tipik devre konfigürasyonu tanımlanabilir.

Yüksek gerilimde bazı anahtarlama işlem hataları ( Kilitli hat bağlayıcı veya hat kesici anahtar ) faz toprak arasında bağlanmış gerilim trafosunu ferrerozonansa götürebilir. (şekil 6)

Gerilim trafosu enerjilendirilir. Bir veya birden çok açık devre anahtarının kapasitanslarının yükseltilmesi ile C kapasitesi VT yolu ile boşalır VT saturasyona yönelir. Kaynak salınımı sağlamak için Cd kapasitesini yükseltir. C kapasitesi VT ye bağlı bütün kapasitelere ve anahtarların açılması ile oluşan kapasitanslara karşılık gelir. Buradaki ferrerozonans altharmoniktir.



Şekil 6. Devre kesicisiyle seri bağlı VT nin ferrorezonansı .

Paralel ferrorezonans devresinde de bir veya iki gerilim trafosunun demir nüvesinin saturasyona sürüklenmesi ferrorezonansı başlatabilir. o zaman faz – nötr ve nötr noktası gerilimlerinin ( $V_n$ ) her ikisinde de ferrorezonans gözlenir. Nötr noktasının gerilimi yerinden çıkar ve bir veya iki fazın potansiyeli yükselir. Ve yönü nötr'e doğrudur. Sistemde kararlı hal durumunda yüksek gerilimin değeri normal faz – faz gerilim değerini geçebilir ve elektrik ekipmanlarının yıkımına neden olur.

Ferrorezonansın temel, subharmonik veya quazi periyodik olması gerilim trafosunun indüktansının magnetizasyonunun ve kapasitans  $C$  'nin nisbi değerlerine bağlıdır.

Ferrorezonansın oluşmasının sebebi ise

1. Düşük direnç: Gerilim trafosu sadece gerilime duyarlı aletleri besler gibi hafif yüküdür generatörde çok hafif yüklenmiş olabilir.

2. Potansiyeli sabit olmayan sistemdeki en az bir noktanın varlığıdır : Sistemin yetersiz topraklanmış yada hiç topraklanmamış bölümlerindeki nötr noktası nötr noktasının çalışmaması veya sistemin bazı bölümlerinde yetersiz çalışmasıdır.

## V. FERROREZONANSIN ÖNLENMESİ VEYA AZALTILMASI

Ferrorezonansı pratikte önleyen ve elimine eden birkaç türlü alternatif şu şekildedir :

1. Dizayn vasıtasıyla önlemek : Sekonderi üçgen bağlı bir gerilim trafosu kullanmak. bu pratik değildir çünkü gerilim trafosunun amaçlarından biride yıldız sekonderi kullanarak topraklama hatalarını kontrol etmektir.

2. Sistemi her şartta topraklamasız olmaktan kaçınarak dizayn etmek : Bu tamamen mümkün olmayabilir
3. Geçici dahi olsa sistem parametre değerlerinin risk bölgesinde bulunmadıklarından emin olmak ve mümkünse tehlikeli bölgelerini göz önünde tutarak bir güvenlik marjı sağlamak
4. Güç kaynağı tarafından sağlanan enerjinin olayı destekleyecek yeterlilikte olmamasından emin olmak bu teknik ferrorezonansın ortaya çıktığı anda azaltılmasını sağlayan güç kayıplarını içerir.
5. Saturasyon noktasında sistem geriliminin iki katına dayanacak çokdüşük indüksiyon dizaynı gerilim trafosu kullanmak :Bu pahalı bir alternatiftir.
6. Yük dirençleri yoluyla kayıpları öne sürmek : wye – wye bağlanmış gerilim trafolarında her biri ikincil devreye bağlanacak şekilde üç direnç bağlanabilir rezistörler sürekli güç çektikleri ve ölçü aletlerinin ölçümünü etkiledikleri için rezistör değerlerinin dikkatli alınması önemlidir.

Yıldız sekonderinin olduğu yerde yıldız noktasına tek rezistör konması tavsiye edilir bu gerilim trafosunun doğruluğuna etki etmediği ve normal çalışmada kayba neden olmadığından avantajlıdır sadece dengesiz bir durum süresince (ferrorezonansa neden olan durumlarda) zarara yol açar.

Ferrorezonansı önlemek için birkaç pratik tedbir alınabilir ferrorezonansın yüksek gerilim, yüksek akım ve dalga bozulmaları elektrik ekipmanlarında termal ve di elektrik bozulmalara yol açabilir (bozulma, performansta ve izolatörlerin ömründe azalma )

Standartlarda geçici ferrorezonans ve rezonansın yüksek gerilimleri yukarı da bahsedilen yöntemlerden biri ile önlenmesi yada sınırlandırılması istenmektedir. Eğer bu iyileştirici önlemler yeterli değilse bunlar gerilim değerlerinin aniden yükselmesini durdurmak için veya yalıtım dizaynı için kullanılamaz.

Bu demek olur ki izolasyon koordinasyon prosedürü ferrorezonansa bağlı yüksek gerilim seviyelerini normalde dikkate almaz ve buna bağlı yüksek gerilim seviyelerini durduran elemanlar teorik olarak ferrorezonanta, karşı bir koruma sağlamazlar. ( bu durdurucuların artık gerilimleri ferrorezonansa bağlı gerilim yükselmelerinden daha yüksektir.)

### V.1. Pratik Çözümler

Pratik çözümler şunlardır:

1. İzole nötr sistemlerde nötrü topraklı VT primerlerinin wye bağlantısından kaçınılır: Bu iki şekilde yapılır birincisi VT lerin nötrlerini topraksız bırakarak yada üçgen bağlayarak.

Eğer wye bağlantılı topraklı nötr primerleri ( örneğin sıfır - sıra gerilim ölçümü ) izole nötr bir sistemde yada hazırlıksız bir topraklama sistemine sahip bir sistemde kullanılacaksa bu yöntem kullanılır.

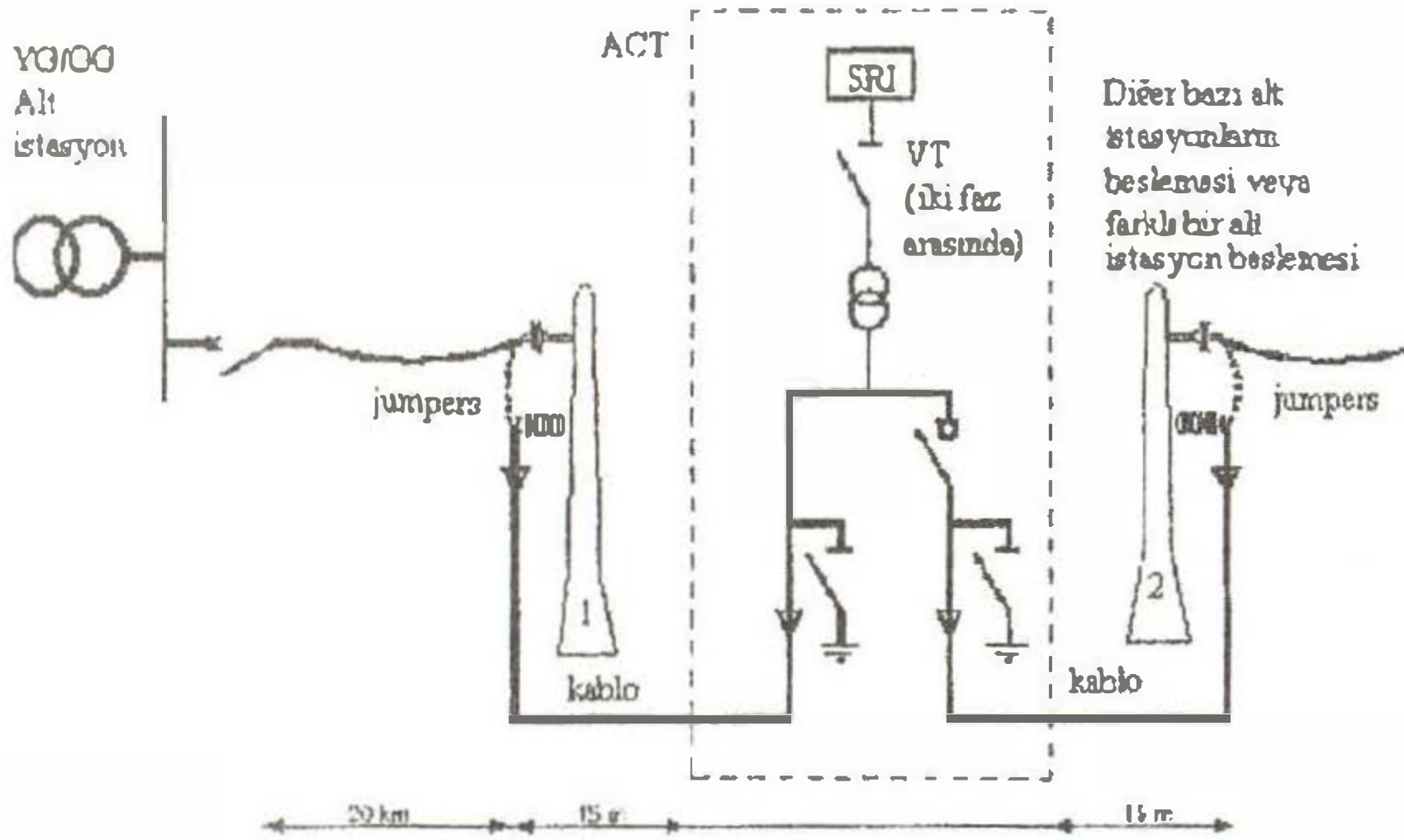
2. Manyetik nüveyi düşük indüksiyon değerlerinde çalıştırmak için dizayn tedbirleri alınır ( 0.4 – 0.7 T ) böylece yüksek gerilimler ferrorezonansı tetikleyemez. Saturasyon eğrisindeki gerilim ve gerilim değerleri arasın da en az ikilik oranında olmalıdır.

Bir yada daha fazla resistans yükü yoluyla kayıplar çoğaltılır bunların değeri olayı etkin bir şekilde azaltmaya yetmesede toplam güç tüketimi gereksinimi duyulan kesin durumlara uyduğundan emin olunmalıdır.

## V. 2. Örnek Bir Çalışma

Aşağıdaki örnekte ferrorezonansın meydana gelebileceği bir YG-OG sistemi incelenmiştir. Burada hatalı üretime bağlı olarak ortaya çıkan kesilme zamanlarını düşürmek için bir uzaktan kumanda ile ayırıcı anahtarları kontrol edilmektedir.

Şekil 7 de görülen örnekte uzaktan kumandalı kübik kesici (ACT ) serbest salımlı ve bir yerüstü orta gerilim sistemine yeraltı kablosu üzerinden bağlanmıştır.



Şekil 7. Uzaktan kumandalı kübik kesicinin (ACT) orta gerilim güç sistemindeki bağlantısı

Şekil 7 de bir gerilim trafosu iki faz arasına ( faz 1 ve faz 3 ) bağlanmıştır. Uzaktan kumandanın SRI tipi düşük gerilim bağımsız güç kaynağının gücünü sağlar ( SRI : switch remote control interface )

Bu çalışma VT lerin değişik yüklemelerdeki bazı hatalarla patlamasında harekete geçer. Bu durum VT ler çalışma esnasında enerjilendirildiklerinde ortaya çıkar. (Yerüstü hattının yeraltı kablosu ile ikisinden birinin (jumper) bağlantısı yapıldığı sırada )

Atlayıcıların 1 nolu kutbun 1.fazından yüklendikten sonra VT lerin patlaması 5 ile 55 dakika arasında gözlenmiştir. ( Bu zaman olaya bağlıdır ) (Anahtar ayırıcısı kapalı ve 2 nolu kutup atlayıcısı yüklenmemiştir.)

İncelenen güç sisteminin parametreleri

TT = 20000 / 230 V , 100 VA

Alt istasyon: 63 Kv / 21 kV 10MVA YG / OG

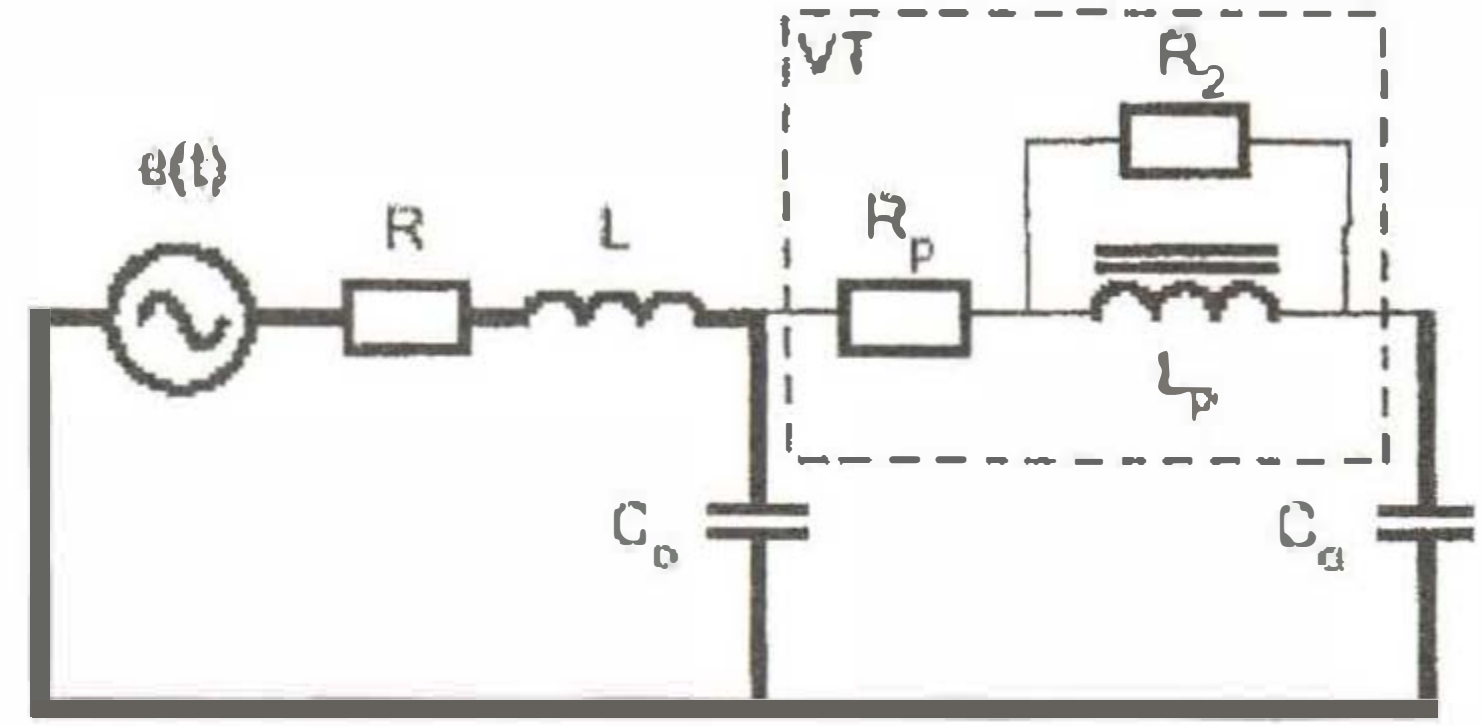
Nötrü topraklı rezistans : 40Ω

20 km yerüstü hattı : YG / OG alt istasyonu ile 1 nolu kutup arasında

ACT kutup bağlantıları : 15 mt kablo 150 mm<sup>2</sup> alüminyum

Çalışma frekansları : (50 hz ve alt harmonikler)

Yerüstü hattı boyuna empedans ile modellenenbilir. Eşitlik diyagramı şekil 8 deki gibidir.



Şekil 8. İncelenen örnek sistemin tek faz eşitlik diyagramı

Burada :

e (t) : Sinüsoidal gerilim kaynağı

$$e(t) = E \cos(100 \pi t)$$

$$e(t) = 2100 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 17000 \text{ volt}$$

R = Nötr topraklı rezistans + YG / OG transformatörünün resistansı + yer üstü kablosunun boyuna resistansı  
L = YG / OG transformatörünün self indüktansı + yerüstü hattının boyuna self indüktansı  
Co = 30 mt lik kablonun sıfır - sıra kapasitansı ( Co = 6.7 nF )

Lp = (Nonlinear ) Primerden görünen VT nin mıknatıslayıcı indüktansı bunun değeri yüksüz bir VT de alınmış gerilim - akım karakteristiği ile belirlenir. (Mağnetizasyon eğrisi )

Rp = Primer sargının rezistansı

R2 = Demir kayıplarına ve histeresiz kayıplarına eşit olan resistans R2 nin sabit olduğu ve remenans geriliminden ve tepe akısından bağımsız olduğu varsayılır

Bu devre şekil 8 deki gibi basitleştirilebilir. Ve bir ferrorezonans devre dizisidir.

Uygun metodların uygulanması ferrorezonansın VT ile VT nin serbest fazı arasına bağlı 30 m lik kablunun toprak kapasitansı arasında olayın incelenmesine imkan verir.

Bu sistemde yapılan analizler sonucunda termal etki ile VT hatasıyla sonuçlanan en az bir ferrorezonans durumunun varlığı tesbit edilmiştir ve özel önlemler alınmalıdır.

### V. 3. Çözümler

Bu olayda aşağıdaki arttırılmış ferrorezonans koruma önlemleri tavsiye edilir.

- 1.VT sekonder sargıları yüklenebilir: Uygun nümerik metodlar bu yükün değerinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır.
- 2.Güç sistemi elemanları enerjisiz iken anahtarlama yapılmalıdır.
- 3.Enerjilendirme prosedürü değiştirilmelidir: Özellikle iki numaralı kutbun anahtarlama yapılmalıdır anahtarlama yapılırken her üç fazda eşzamanlı olarak VT nin iki fazını destekleyecek şekilde yapılır. Birinci kutbun anahtarlama daha sonra yapılabilir.

## VI. SONUÇ

Herhangi bir elektrik güç sisteminin erken dizayn aşamasında ferrorezonans riski mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bu durum herhangi bir güç sisteminin tamir yada genişletilmesi durumunda da geçerlidir.

Temel olarak riskten kurtulmak için bu olayın meydana gelebileceği tehlikeli konfigürasyonların bilinmesi gereklidir. Eğer kritik bir konfigürasyon kaçınılmaz ise detaylı bir çalışma ile sadece riskli durumlar gözönüne alınır ve sağlanan çözümlerin etkinliği değerlendirilir.

Bu makalede hakkında fazla bir şey bilinmeyen ve çok tehlikeli olabilen ferrorezonans olayı hakkında D.G ve Y.G elektrik güç sistemlerinin dizayn edilmesinde ve ferrorezonans riskine karşı alınabilecek önlemler hakkında bilgiler bulunmaktadır. Böylece bilinmelidir ki elektrik güç sistemlerinde meydana gelen bazı anlaşılmasız olaylar ferrorezonansla ilintili olabilir.

Kısaca ferrorezonansı tetikleyen olaylar ve risk altındaki konfigürasyonlar şunlardır:

- 1.Kapasitelerin anahtarlama
- 2.Yalıtım hataları
- 3.Hatlara düşen yıldırımlar

### 4.Transformatörlerin anahtarlama

Risk oluşturan birkaç durumda şunlardır:

- 1.Nötr hattından izole edilmiş faz ve toprak arasına bağlı gerilim transformatörü
- 2.Bir transformatörü besleyen uzun ve/veya kapasitif kablolar yada hatlar
- 3.Çok kutuplu yapılamayan faz anahtarlama
- 4.Yüksüz yada az yüklü gerilim yada güç transformatörü
5. Doyma sınırındaki bir gerilim trafosu
6. Aşırı güçlü bir gerilim trafosu

## KAYNAKLAR

- [1] Chaiers techniques ( Philippe FERRACCI Group Schneider 1998 )
- [2] 6. Teknik kongre (Yurdakul ALPARSLAN T.E.K.)