

ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE
DEMİR ÇEKİRDEKTEKİ
MANYETİK DOYMA DOLAYISIYLA
HASIL OLAN GERİLİMLER
(FERROREZONANS)

YURDAKUL ALPARSLAN

UDK: 621.3.013.1 : 621.3.011.2

ÖZET

Ferrorezonans; direnç, kapasitans ve doğrusal olmayan endüktanstan oluşan sistemde kararsız bir çalışmadır. Bu devrede elektriksel öğelerden birinin değerinin değişmesiyle diğer öğelerin uçları arasındaki **akım** ve gerilim değerlerinde ani bir yükselme **olur**.

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

SUMMARY

Ferroresonance is a phenomenon in a circuit consisting of an ohmic resistor, a capacitor and a nonlinear inductor. The change in the value of any one of the elements in this circuit causes sudden increases in voltage and current values at the terminals of other elements.

The continuing increase in the voltage values used in the transmission and distribution of electrical energy will gradually make the relationships between the line capacitance and the magnetic saturation curves of transformers different than those which exist today. This difference in the relationships is in the direction of increased occurrence of ferroresonance.

Yurdakul Alparslan, TEK

6. teknik kongre

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi, alternatif akımda L, R ve C den oluşan doğrusal devrelerdeki L ve C nin doğal frekansı kaynak frekansına eşit olduğunda; L ve C ögelerinin uçları arasında çok yüksek aşırı gerilimler doğabilir. Doğrusal sistemlerde bu olayın doğacağı önceden saptanarak ona göre tedbir alınabilir.

Ancak elektrik sistemlerinde bir çok ögeler içindeki demir çekirdeğin doymasıyla doğrusal olmayan endüktans karakteristiğine sahiptirler. Bu gibi durumlarda endüktansın değeri, devredeki akım değerinden bağımsız olmaz ve akım arttıkça azalır. Sonuç olarak doğrusal olmayan seri L, R, C devresinde doyma nedeniyle kararlı ve geçici rejimdeki elektriksel olaylar çok değişir ve bunların saptanması da aşırı derecede zorlaşır. Çok ciddi aşırı gerilimlerin belirlediği bu olayı aynı ciddiyetle incelemek gerekir.

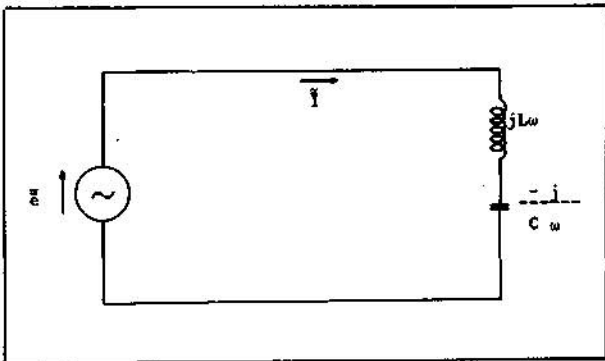
Genel olarak ferrezonans deyimi, doyan demir çekirdekli sargılarla paralel ya da seri bağlı bir kapasitanstan oluşan devredeki olayları tanımlar. Demirdeki doymanın derecesine göre devredeki elektriksel salınımların doğal frekansları değişir. Kuşkusuz endüktansın doyma eğrisinin biçimi ve en üst değeri değiştirilerek de ferrezonans yaratılabileceğinden olayın incelenmesinde gerçek karakteristiklerin kullanılması önem taşır. Bu devrelerde 50 Hz'in altında ve üstündeki harmonik frekanslarında işletme değerleri belirebilir.

2. DOĞRUSAL L, R ve C DEVRESİNİN ANALİZİ

Doğrusal olmayan sistemlerde grafik inceleme, olayların anlaşılmasında, matematiksel yaklaşımlardan daha çok kolaylık sağlar. Doğrusal olmayan sistemlerin incelenmesine hazırlık olarak önce doğrusal sistemlerde grafik yaklaşım ele alınacaktır.

2.1 Kayıpsız Devre

Şekil 1'de kayıpsız devre gösterilmiştir. Kararlı



Şekil 1. Kayıpsız devre

işletme koşullarında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\tilde{e} = \tilde{I} jL\omega - \tilde{I} (j / C\omega)$$

Burada \tilde{e} ve \tilde{I} düzlem vektörlerini (fazörleri) göstermektedir. Şekil 2 ve 3'de gösterildiği gibi $L\omega$ nin değeri $1 / C\omega$ den büyük ise \tilde{e} den 90° geride; $L\omega$ nin değeri $1 / C\omega$ den küçük ise \tilde{e} den 90° ileride bir faz farkına sahip olacaktır.

Net endüktif devre için aşağıdakiler yazılabilir:

$$\tilde{e} = \tilde{I} jL\omega - \tilde{I} (j / C\omega) \text{ dan}$$

$$L\omega = V_L ; I / C\omega = V_C \text{ ise}$$

$$e = I L\omega - (I / C\omega) ; e = V_L - (I / C\omega)$$

$$V_L = e + I / C\omega \quad (1)$$

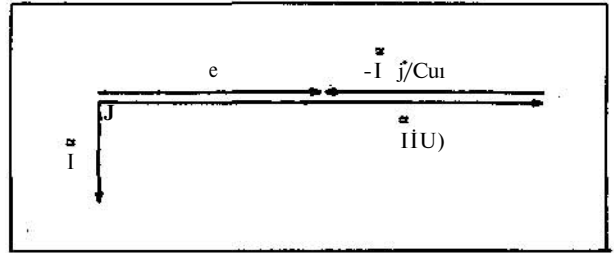
Net kapasitif devre için ise:

$$e = (I / C\omega) - I L\omega$$

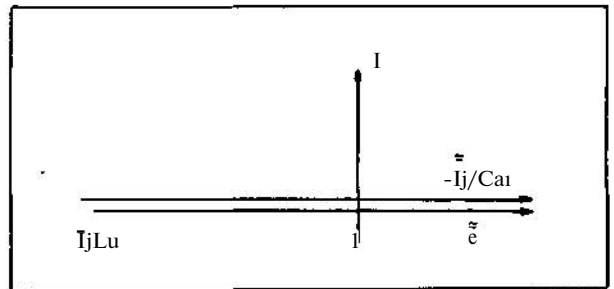
$$e = (I / C\omega) - V_L$$

$$-V_L = e - (I / C\omega) \quad (2)$$

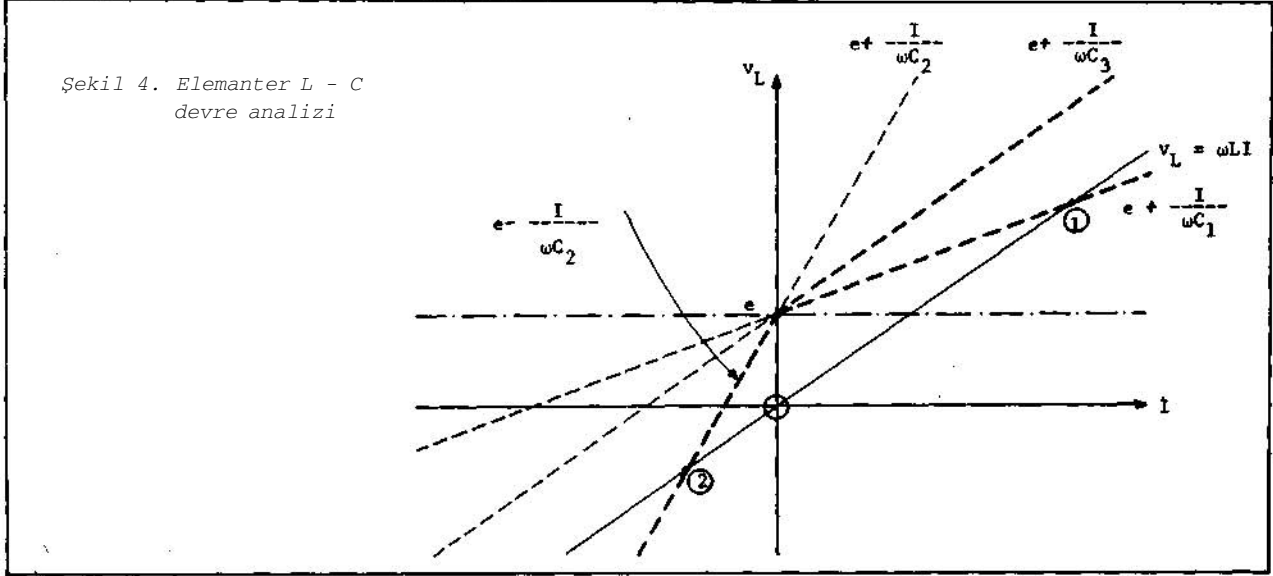
Yukarıdaki bağıntılarda V_L endüktansdaki gerilim düşümünü göstermektedir.



Şekil 2. Net endüktif devre fazör diyagramı



Şekil 3. Net kapasitif devre fazör diyagramı



(1) ve (2) eşitlikleri Şekil 4'de grafik olarak gösterilmiştir. Buradan görüleceği gibi net endüktif devre için kararlı işletme şartı 1 noktasında net kapasitif devre için kararlı işletme şartı 2 noktasındadır. $\omega L = 1 / \omega C_j$ olduğunda V ve I nm sonlu değerleri için gerilim doğruları kesişmezler. Bu durum seri rezonans koşulunu belirler. Seri rezonans V ve I nin değerleri sonsuz büyüklüklere ulaşır.

2.2 Kayıplı Devre

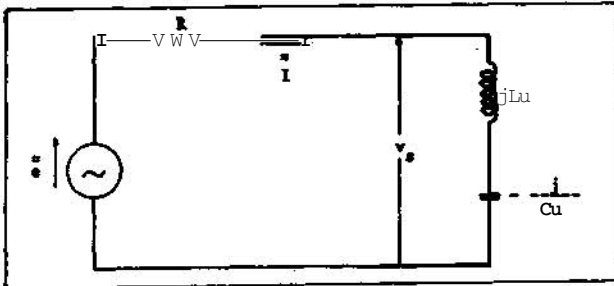
Kayıplı devre Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu devreye ait fazör diyagramı Şekil 6'da verilmiştir".

Şekil 6'dan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir :

$$[i - R \hat{i}] = \sqrt{i^2 - RI^2} = v_s \quad (3)$$

$v_s - /e^2 - W^2$ bir elips eşitliğidir.

$v_g e - RI$ yazılarak elips denklemi daha kolay görülebilir. Burada v_s devrenin L-C bölümüne



Şekil 5. Kayıplı devre

uygulanan gerilimi gösterir.

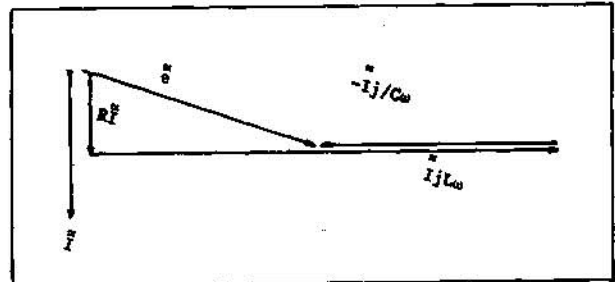
(1) ve (2) eşitliklerinde e nin yerine (3) eşitliğindeki v_s yi koyacak olursak Şekil 7'deki eğrileri elde ederiz. Burada 1 noktası endüktif, 2 noktası kapasitif işletmeyi gösterir. 3 noktası rezonans koşulunu belirler. Şekilden görüleceği gibi endüktansın uçlarındaki V_j , geriliminin değeri kaynak geriliminden bir kaç kat fazla olabilir. Rezonans durumunda V_L nin artışını sınırlayan L-R-C devresindeki dirençtir.

3. DOĞRUSAL OLMAYAN L-R ve C DEVRESİNİN ANALİZİ

Yukarıda 1 ve 2 inci bölümde yapılan hazırlıkların ışığında doğrusal olmayan devreler aşağıda incelenmiştir.

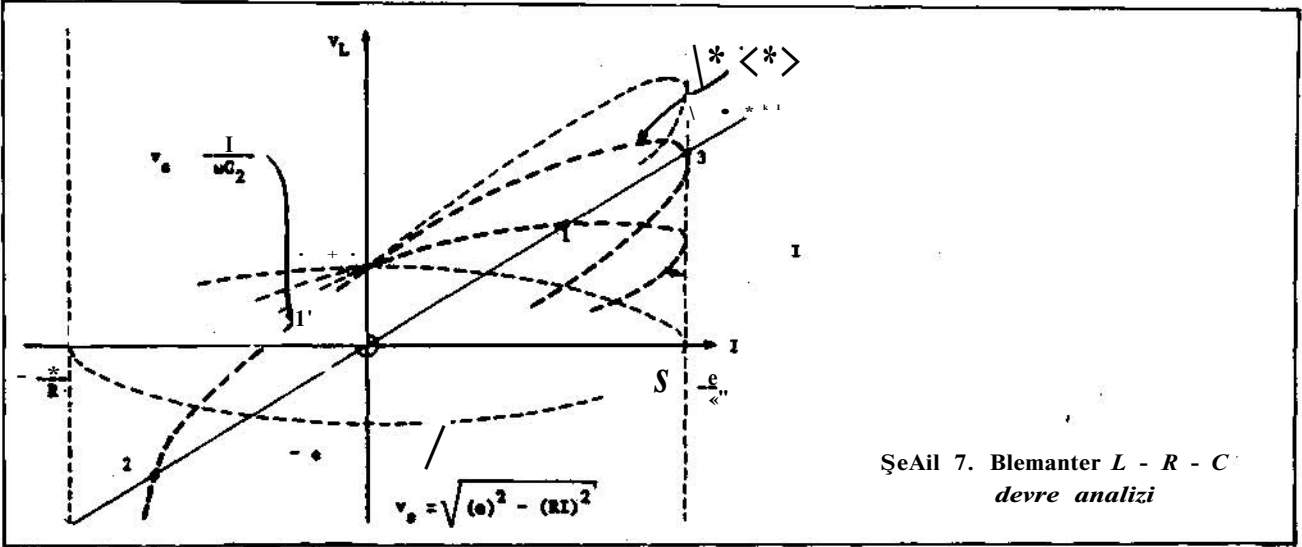
3.1 Doğrusal Olmayan L ve C Devresinin Analizi

Bu devredeki akım ve L nin uçlarındaki gerilim Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekilde 1 noktası net endüktif işletmeyi gösterir. Şekildeki gibi



Şekil 6. Kayıplı devrede fazör diyagramı

6. teknik kongre



1/ü)C₁ in eğimi VL nin eğiminden az olduğu sürece bir tane denge noktası vardır.

Şekil 9'da 1 noktası net endüktif, 3 noktası ise net kapasitif dengeyi gösterirler. Bu durumda 2 noktası kararsız bir noktadır. 2 noktasından başlayarak akım biraz azalsa 1 noktasına dönlür ; yine 2 den başlayarak akım biraz artsa bu artış kararlı bir noktaya gelinmeden sürer gider.

Şekil 6 ve 9 göz önüne alınarak Şekil 9'daki 2 noktasının kararsızlığı yandaki gibi açıklanabilir :

Akım biraz azalsa L çok büyür (mıknatıslanma eğrisi, üzerinde her noktada $L = \hat{A} / A_i$ den hesaplanır) bu halde Şekil 5 ve 6'dan görüleceği gibi V_0 in büyümesi gerekir bu ise fazör diyagramında aynı e değeri bulmak için akımın daha da düşmesine yol açar ve 1 noktasına gelinir.

2 noktasından başlayarak akım biraz artırıldığında, L çok azalır ; bu ise V_0 i azaltır. V_0 in azalması akımı tekrar artırarak 1 nin değerinin giderek yükselmesine yol açar.

3.2 Doğrusal Olmayan L-C ye R Devresinin Analizi

Pratik bir açıdan devreler incelendiğinde, gerek akımın, gerekse i ve C nin uçlarındaki gerilimlerin sınırlandırılmasına yarayacak bir seri direncin varlığı görülür. Şekil 10.'da bu koşul eğrilerle gösterilmiştir. Buradaki noktalar aşağıdaki işletme niteliklerini taşırlar :

Endüktif Devredekiler :

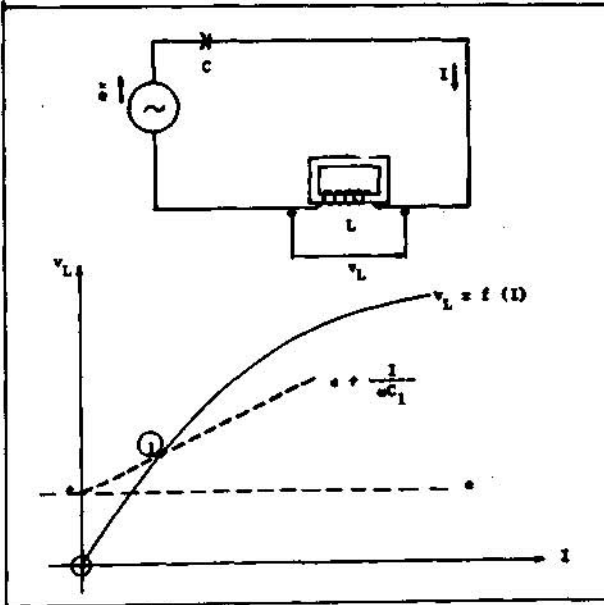
- 1 ve 3 (kararlı)
- 2 (kararsız)

Kapasitif Devredekiler :

- 1' ve 3' (kararlı)
- 2' (kararsız)

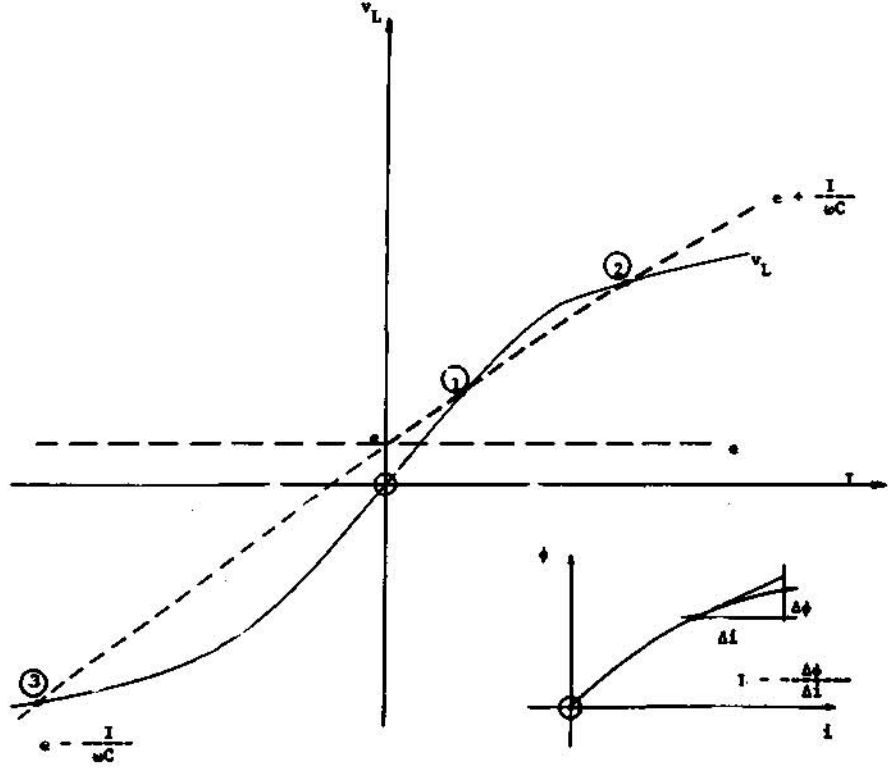
Eğer devredeki seri direncin değeri çok büyükse, yalnızca 1 ve/ya da 1* noktalarını elde edebiliriz.

Yalnızca boşa transformatör bağlı hatların ya da yüksüz hatların sonundaki transformatörlerin boşa enerjilenmesinde ferrezonansın önlenerek gerilimlerin sınırlandırılmasını sağlamak için kesicilerde yüksek değerli kapama dirençlerinin kullanılması yararlı olur.



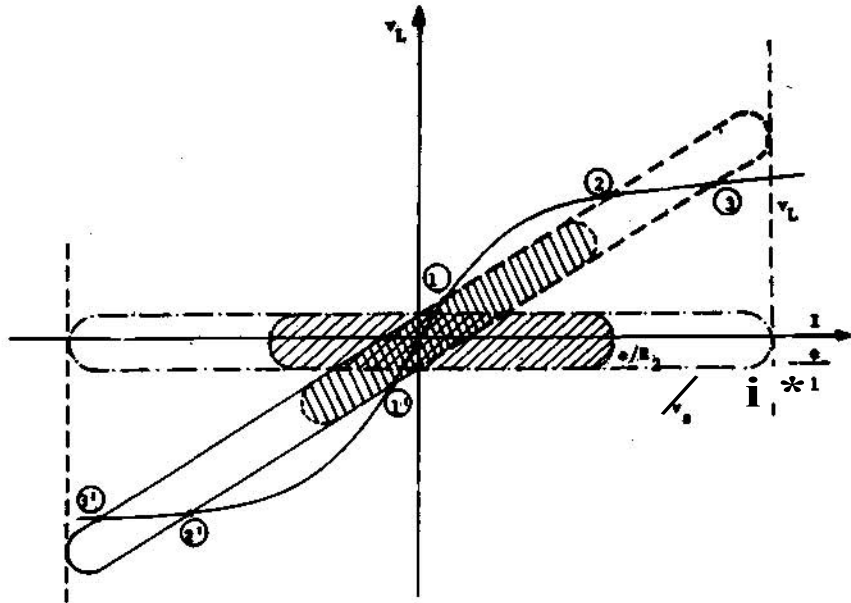
Şekil 9.

Kayıpsız,
doğrusal olmayan
L-C devresi
geliştirilmiş
analizi



Şekil 10.

Doğrusal olmayan
L, R ve C
devre analizi



6. feteilk k®[m\$]ff(\$

Ayrıca şu soruyla da karşılaşabiliriz: az kayıplı şebekelerde kararlı işletme noktalarından hangisinde işletme devam edecektir. Buradaki etkenler: (1) enerjilenmenin gerilim sinusoidinin hangi noktasında yapıldığı ve (2) şebekedeki öğelerin elektriksel parametreleridir.

Şebeke öğelerinin çalışma eğrilerinin, transformatörlerin enerjilenmesindeki ani mknatıslama akımı değerlerinin detaylı ve doğru bilinmesi ile ve ayrıca enerjilemede kesicinin kapama zamanını denetleyerek kararlı denge noktalarından hangilerinde işletmenin olacağını saptayabiliriz.

4. ÜÇÜNCÜ HARMONİK DİSTORSİYONU (Nötr Noktasının Kararsızlığı)

Bundan önceki bölümlerde akım ve gerilimlerin dalga biçimleri göz önüne alınmadan, doyan endüktansların temel frekanstaki nitelikleri incelenmişti.

Demir çekirdeklerdeki manyetik doyma; akım ve gerilimlerde distorsiyon yaratır. Demir çekirdekli bir sargıya sinusoidal gerilim uygulandığında, sinusoidal olmayan bir mknatıslama akımı doğar. Demir çekirdeğin doyma derecesi mknatıslama akımının

daki yüksek harmonikleri belirler. Bunlardan üç ve üçün katı harmonikler üç fazlı sistemlerde ayrı bir önem taşırlar.

Şekil 11 (a)'da üç fazlı bir üreteç, bunun uçlarında geçici aşırı gerilim dalgalarının dikliği için azaltmak için konulmuş üç fazlı kapasitör ve ayrıca, sekonderi boшта, nötr noktaları topraklı yıldız/yıldız sargılı bir transformatör gösterilmiştir. Şeklin (b) bölümünde ise açıklanan sistemin sıfır bileşen eşdeğer empedans devresi verilmiştir. Bilindiği şibi, dengeli üç fazlı işletmede sıfır bileşen devresinde temel frekanslı bir kaynak gerilimi olmayacaktır. Ancak transformatörün demir çekirdeğinin doyması halinde üçüncü harmonik distorsiyonu; 11 (b)'deki gibi bir eşdeğer üçüncü harmonik gerilimi (63) ile gösterilebilir. 11 (a)'da X_m : transformatörün mknatıslama reaktansı; X_t : transformatörün kaçak reaktansı; T_i : ideal transformatördür.

Yukarıda Bölüm 3'de açıklanan analize göre; üreticinin nötrü, izole ya da büyük değerli bir empedans üzerinden topraklandığında X_c ve X_m in değerlerine bağlı olarak yüksek V_0 gerilimleri doğabilir. Üçüncü harmonik gerilim, sistemde faz-nötr geriliminde ölçülebilir. Bu gerilimler nötr noktasının kaymasına ve böylece parafudrlara uygulanan gerilimlerin aşırı biçimde büyümesine yol açar.

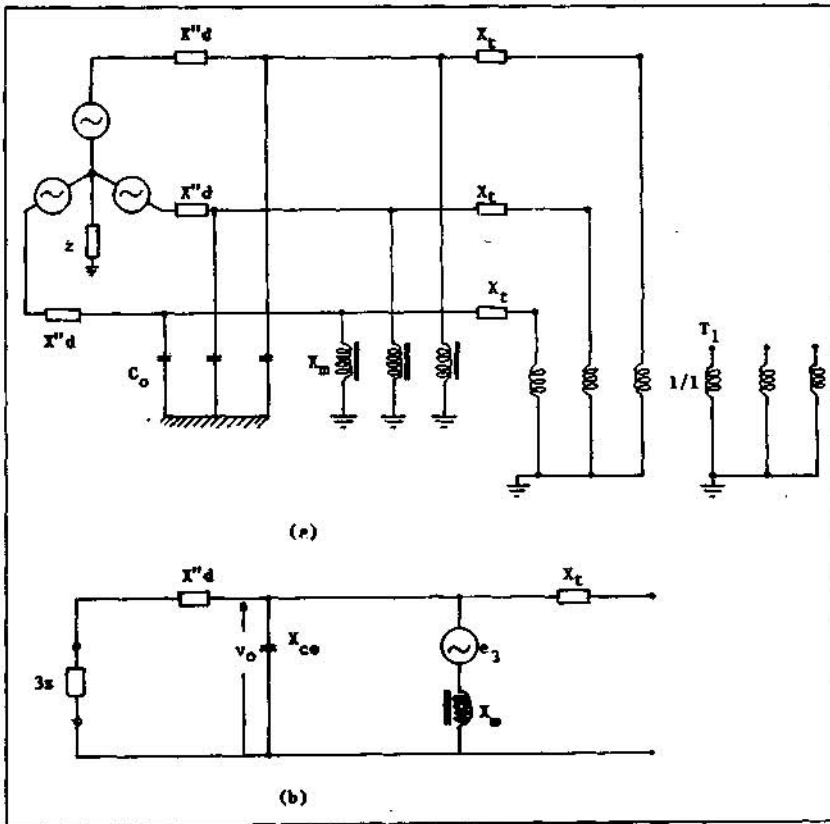
Nötr noktasının kararsızlığı konusunda daha tam bir analizle gösterilebilir ki, nötr noktasını kaydıran gerilim saf bir üçüncü harmonik niteliğine sahip değildir. Bu gerilim; devre parametreleri, doyma şartı ve fazların enerjilenme zamanlarına bağlı olarak temel harmonik frekansının altında ve üstündeki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

5. ENERJİLEMEDE NÖTR NOKTASININ KARARSIZLIĞI

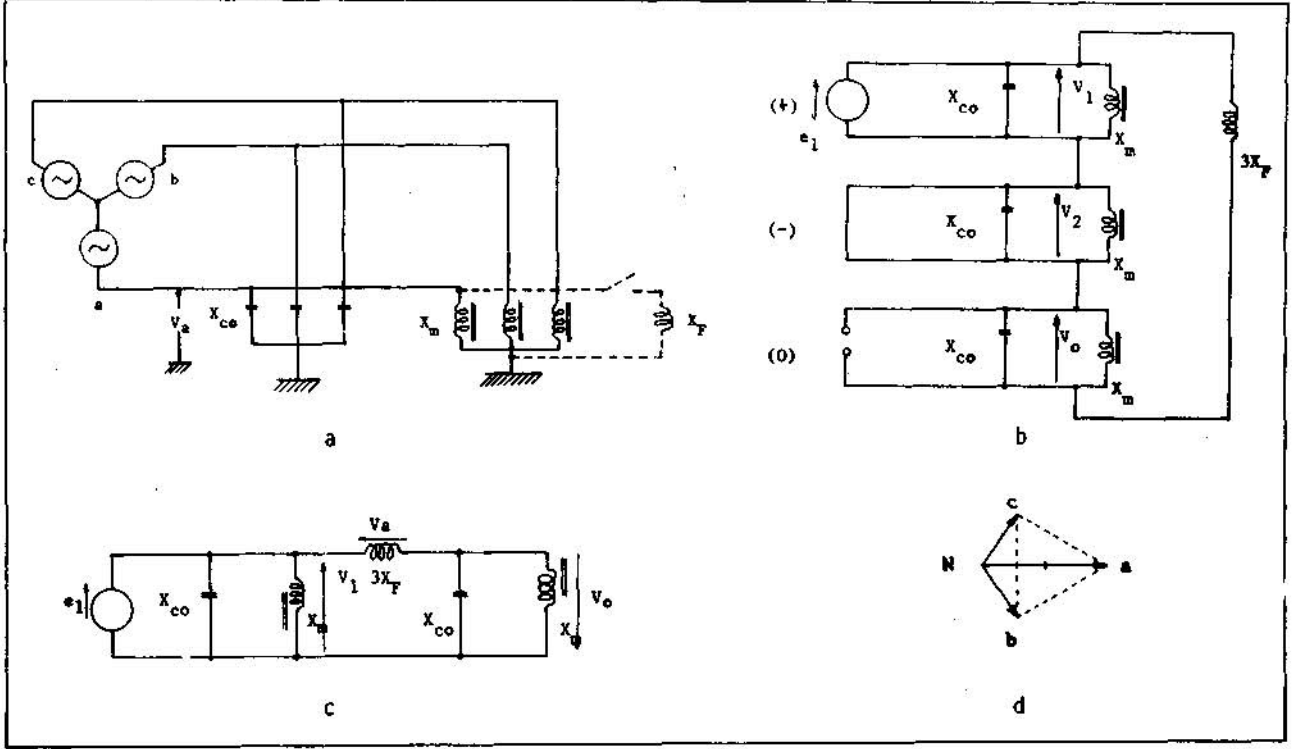
Genel olarak nötrün kararsızlığı aşağıdaki frekanslarda doğar:

- Temel frekans,
- Temel frekansın altındaki frekanslar.

Yukarıdaki ikinci durum, kararlı rejimde manyetik



Şekil 11. Bir generatörden beslenen sekonderi boшта yıldız/yıldız sargılı bir transformatör



Şekil 12. Nötr kararsızlığına örnek devre

doyma halindeki işletmede ya da kararlı rejimde yüksek gerilimlere yol açan enerjilemelerde olabilir.

Doğrusal olmayan L-C devresinin analizinde iki tür kararlı işletme noktasının olduğu görülmüştü. Buna göre bir sistem enerjilendiğinde bir ya da iki transformatörün kapasitif olarak yüklenebilir. Bu işletmeyi sağlayacak devreyi elde etmek için Şekil 12 (a)'daki gibi a fazında 5[^] e paralel bir X_p reaktansının yerleştirilmesi yeterlidir. Şekil 12 (b)'deki pozitif, negatif ve sıfır bileşen empedans devrelerinde V₂ = 0 ve V[^] = e₁ dir. Buna göre faz-nötr gerilimleri :

$$V_a = e_x + V_o$$

$$V_b = a^2 e_x + V_o$$

$$V_c = a e_x + V_o \quad \text{olur.}$$

Şekil 12 (b)'deki simetrik bileşen devresinde X_p nin üç katı alınmasına neden 3 X_p nin bulunduğu devrenin yalnızca I_o akımının geçmesini sağlamaktır.

Şekil 12 (c)'deki X_{co}, X_p ve X_{co} in değerlerinin değiştirilmesi ile aşırı gerilimler yaratılabilir.

V_o = e[^] e eşit olursa Şekil 12 (d)'deki koyu çizgilerle gösterilen faz-nötr gerilimleri elde edilir. Buna göre noktalı çizgilerle gösterilen faz arası gerilimleri değişmediği halde, N nötr noktası, gerilim üçgeninin dışına çıkmıştır. V_o = e[^] : olabilmesi için:

$$\frac{jX_m (-j) X_{co}}{jX_m - j X_{co}} = - \left[j 3X_p + \frac{jX_m (-j) X_{co}}{jX_m - j X_{co}} \right]$$

ya da

$$\frac{1}{X_m} - \frac{1}{X_{co}} = \frac{-2}{3X_p} \quad \text{olmalıdır.}$$

Şu halde yukarıdaki eşitliğe uyan bir işletmede a fazındaki faz nötr gerilimi normalin iki katı olmaktadır. Bu ise a fazındaki parafudrun parçalanmasına yol açabilir.

KAYNAKLAR :

1. Hesse, Harry ; Surge Phenomena, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, ABD
2. Summers, CM., Predicting the Behaviour of Ferroresonant Systems, Oklahoma State Univ., ABD