

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TRANSFORMATÖRLERİN GEÇİCİ REJİM
AKIMLARININ İNCELENMESİ

Elektrik Müh. Duygu ESERDAĞ

FBE Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniğı Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yrd. Doç. Salih TACİ Yıldız Teknik Üniversitesi

İSTANBUL 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ	1
2. GEÇİCİ REJİM AKIMLARININ İNCELENMESİ.....	2
2.1 Transformatör Geçici Rejim Akımının Nedeni	2
2.2 Transformatörlerde Akı ve Mıknatıslanma Akımı Arasındaki İlişki.....	4
2.3 Geçici Rejim Akımının Devre Üzerindeki Etkisi	5
2.4 Geçici Rejim Akımının Matematiksel İfadesi	6
2.4.1 Transformatör Gerilim Maksimumken Bağlanır	10
2.4.2 Transformatör Gerilim Sıfırken Bağlanır	12
2.4.3 Transformatör Nüvesinde Kalıcı Akı Bulunması Hali	14
2.5 Mıknatıslanma Geçici Rejim Akımından Kaynaklanan Güç Kalitesi Problemleri.....	17
2.5.1 Dengesiz.....	17
2.5.2 Harmonikler	17
2.6 Geçici Rejim Akımın Bağlı Olduğu Faktörler.....	18
2.6.1 Transformatörün Boyutları	18
2.6.2 Transformatöre Enerji Veren Sistemin Empedansı	18
2.6.3 Nüve Maddesinin Manyetik Özellikleri.....	18
2.6.4 Nüvedeki Kalıcı Akı	18
2.6.5 Transformatörün Anahtarlandığı An.....	18
2.6.6 Transformatörün Anahtarlanmasının Yöntemi	19
2.6 Karşılıklı Geçici Rejim	19
3. KONTROLLÜ ANAHTARLAMA ile TRANSFORMATÖR ANİ DEŞARJ AKIMLARININ ELENMESİ.....	21
3.1 Transformatör Modellemesi.....	21
3.2 Tek Fazlı Transformatörlerin Kontrollü Anahtarlanması	22
3.3. Çok Fazlı Trnasformatörlerde Kalıcı Akı Olmadan Kontrollü Anahtarlama	23
3.4 Kalıcı Akı Bulunan Üç Fazlı Transformatörlerde Kontrollü Anahtarlama	24

4.	GEÇİCİ REJİM AKIMINI AZALTMAK için ÖNERİLEN YAKLAŞIM	28
4.1	Simülasyon Değerleri.....	28
4.2	Devre Kesicinin Üç Fazının Eş Zamanlı Kapatılması	28
4.3	Şekil 4.2 için Pspice Simülasyon Parametrelerinin Dosyası	30
4.4	Voltaj Doruk Değerinde iken Transformatörün Eş Zamanlı Anahtarlanması	34
4.5	Voltajın Doruk Değerinde Anahtarlanan Transformatör için Simülasyon Dosyası.....	34
4.6	Fazlar Arası Gecikme ile Kapanan Devre Kesici	38
4.7	Fazlar Arası Gecikme ile Anahtarlanan Transformatör için Simülasyon Dosyası.....	38
4.8	Geçici Rejim Akımının Yıldız-Yıldız Bağlı Transformatörde Ortadan Kaldırılması.....	44
4.9	Yıldız – Yıldız Bağlı Transformatör Modeli için Simülasyon Dosyası.....	44
4.10	Voltaj Doruk Değerinde iken Transformatörün Eş Zamanlı Anahtarlanması	49
4.11	Voltajın Doruk Değerinde Anahtarlanan Yıldız- Yıldız Bağlı Transformatör İçin Simülasyon Dosyası.....	49
4.12	Voltaj Doruk Değerinde iken Transformatörün Ardıl Anahtarlanması	52
4.13	Voltajın Doruk Değerinde Ardıl Anahtarlanan Yıldız – Yıldız Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası.....	52
4.14	Geçici Rejim Akımının Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörde Ortadan Kaldırılması.....	57
4.15	Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörün Simülasyon Dosyası.....	57
4.16	Voltaj Doruk Değerinde iken Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörün Eş Zamanlı Anahtarlanması	62
4.17	Voltajın Doruk Değerinde Anahtarlanan Yıldız- Üçgen Bağlı Transformatör İçin Simülasyon Dosyası.....	62
4.18	Voltaj Doruk Değerinde iken Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörün Ardıl Anahtarlanması	66
4.19	Voltajın Doruk Değerinde Ardıl Anahtarlanan Yıldız- Üçgen Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası.....	66
5.	SONUÇLAR	71
	KAYNAKLAR	72
	ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGE LİSTESİ

$v(t)$	Transformatörün birincil tarafına eklenen voltaj
$\lambda(t)$	Sargının karşılıklı akısı
Φ	Akı
B	Kalıcı akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
X_s	Self empedans
X_m	Karşılıklı empedans
R_N	Nötre bağlı direnç
N_1	Primer sarım sayısı
ϕ_t	Herhangi bir t anındaki çekirdek akısı
i_ϕ	Mıknatıslanma akımını
V_{m1}	Uygulanan gerilim dalgasının maksimum değeri
θ_0	Gerilim dalgasının açısı
L_1	Primer sargı endüktansı
r_1	Primer direnci
ϕ_R	Artık nüve akısı
mmf	Elektromotor kuvvet
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
rms	Temel Bileşen

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Transformatörün mıknatıslanma karakteri.....2
Şekil 2.2	Voltaj, akı yoğunluğu ve akımın enerjilenmesi.3
Şekil 2.3	Demir nüveli transformatörün tipik mıknatıslanma eğrisi.....4
Şekil 2.4	Geçici rejim akımı ve voltajın dalga şekli5
Şekil 2.5	Geçici rejim akımının grafiksel tanımı8
Şekil 2.6	Voltaj, akı, akım dalga şekilleri8
Şekil 2.7	Eklenen voltaj ob konumunda iken yüksüz transformatörün anahtarlamamanın etkisi9
Şekil 2.8	Voltaj dalga şekli10
Şekil 2.9	V_1 pozitifte maksimum ve ϕ sıfırken anahtarlamamanın yüksüz transformatör üstündeki etkisi11
Şekil 2.10	V_1 sıfır ve ϕ maksimum negatif değerinde iken yüksüz transformatörün anahtarlamamanın etkisi11
Şekil 2.11	2.4 denklemine ait şekil13
Şekil 2.12	Voltajın sıfır olduğu an için akı – akım ilişkisi.....13
Şekil 2.13	Voltaj sıfırken ve kalıcı akı ϕ_r mevcutken dengesiz transformatörün anahtarlanmasının etkisi.....14
Şekil 2.14	Transformatörün histerisiz döngüleri ve mıknatıslanma akımı dalga şekilleri.....15
Şekil 2.15	Geçici rejim akımının kalıcı akıyı da içeren grafiksel açıklaması16
Şekil 2.16	Primer rezistansın geçici rejim akımı üzerindeki etkisi.....16
Şekil 2.17	Karşılıklı geçici rejimi tetikleyen durumlar.....20
Şekil 3.1	Tek fazlı transformatörün eşitlik devresi21
Şekil 3.2	Tek – faz transformatör için en uygun enerji verme gösterilmiştir22
Şekil 3.3	Üç bacak nüveli transformatörde A fazı için eklenen voltaj ve akılar arasındaki etkileşim23
Şekil 3.4	Üç fazlı transformatörün kalıcı akı olmadan enerjilenmesi.24
Şekil 3.5	Akı – akım nüve karakteristikleri.25
Şekil 3.6	Kalıcı akılı üç faz transformatör için beklenen ve dinamik nüve akıları26
Şekil 3.7	Gecikmeli kapama stratejisi ile enerjilenen transformatör için akı dalga şekli27
Şekil 4.1	Kullanılan simülasyon şeması Yg tarafı enerjili Yg-Delta28
Şekil 4.2	Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan modeli29
Şekil 4.3	Transformatörün eş zamanlı anahtarlanması durumunda akımın dalga şekli.....32
Şekil 4.4	A fazı için akımın rms değeri.....33
Şekil 4.5	B fazı için akımın rms değeri.....33
Şekil 4.6	C fazı için akımın rms değeri.....33
Şekil 4.7	Voltajın doruk değerinde olduğu anda eş zamanlı enerjilenen üç faz transformatör için akımın dalga şekli.....36
Şekil 4.8	A fazı için akımın rms değeri.....37
Şekil 4.9	B fazı için akımın rms değeri.....37
Şekil 4.10	C fazı için akımın rms değeri.....37
Şekil 4.11	Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan modeli41
Şekil 4.12	Fazlar arası gecikme ile kapanan transformatörün primerindeki akım dalga şekli42
Şekil 4.13	A fazı için akımın rms değeri.....43
Şekil 4.14	B fazı için akımın rms değeri.....43
Şekil 4.15	C fazı için akımın rms değeri.....43

Şekil 4.16	Üç faz yıldız-yıldız bağlı transformatör modeli.....	46
Şekil 4.17	Yıldız – yıldız bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli.....	47
Şekil 4.18	A fazı için akımın rms değeri.....	48
Şekil 4.19	B fazı için akımın rms değeri.....	48
Şekil 4.20	C fazı için akımın rms değeri.....	48
Şekil 4.21	Voltajın doruk değerinde anahtarlanan yıldız – yıldız bağlı transformatör için primer akımın dalga şekli.....	50
Şekil 4.22	A fazı için akımın rms değeri.....	51
Şekil 4.23	B fazı için akımın rms değeri.....	51
Şekil 4.24	C fazı için akımın rms değeri.....	51
Şekil 4.25	Voltajın doruk değerinde ardıl anahtarlanan yıldız – yıldız bağlı transformatör için kullanılan simülasyon modeli	54
Şekil 4.26	Voltajın doruk değerinde ardıl anahtarlanan yıldız – yıldız bağlı transformatörün primerindeki akım dalga şekli.....	55
Şekil 4.27	A fazı için akımın rms değeri.....	56
Şekil 4.28	B fazı için akımın dalga şekli.....	56
Şekil 4.29	C fazı için akımın rms değeri.....	56
Şekil 4.30	Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan modeli	59
Şekil 4.31	Yıldız – Üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli	60
Şekil 4.32	A fazı için akımın rms değeri.....	61
Şekil 4.33	B fazı için akımın rms değeri.....	61
Şekil 4.34	C fazı için akımın rms değeri.....	61
Şekil 4.35	Voltaj doruk değerinde iken anahtarlanan yıldız – üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli.....	64
Şekil 4.36	A fazı için akımın rms değeri.....	65
Şekil 4.37	B fazı için akımın rms değeri.....	65
Şekil 4.38	C fazı için akımın rms değeri.....	65
Şekil 4.39	Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan ardıl anahtarlama modeli	68
Şekil 4.40	Voltaj doruk değerinde iken anahtarlanan yıldız – üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli.....	69
Şekil 4.41	A fazı için akımın rms değeri.....	70
Şekil 4.42	B fazı için akımın rms değeri.....	70
Şekil 4.43	C fazı için akımın rms değeri.....	70

ÖNSÖZ

Bu tezde transformatörlere enerji verirken yaşanan sorunların nedenleri araştırılmış ve bu sorunların ortadan kaldırılması için uygulanabilecek yöntemler sunulmuştur. Sunulan yöntemlerin geçerliliği simülasyonlarla kanıtlanmıştır.

Tez çalışmamda bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Salih Taci Beye ve hayatımın her döneminde yanımda bulunup bana cesaret veren anneme teşekkür ederim

Eylül 2007

Elektrik Mühendisi
Duygu Eserdağ

ÖZET

Transformatör ilk enerjilendiği anda oluşan geçici rejim akımının nedeni araştırılmış ve matematiksel ifadesi verilmiştir. Voltaj ve akı dalga şekli arasındaki ilişkiden yola çıkarak transformatör anahtarlama anı ve geçici rejim akımı arasındaki bağlantı anlatım ve şekillerle ele alınmıştır. Bu akımın ortadan kaldırılması için uygulanabilecek teknikler sunulmuştur.

Pspice programı kullanılarak üç – fazlı, yıldız – üçgen bağlı transformatör ve üç – fazlı, yıldız – yıldız bağlı transformatör modellenmiş ve her iki modelin de üzerinde eş zamanlı anahtarlama ve ardışık anahtarlama yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Her iki durum için akım dalga şekli incelenmiş ve gözlemlenen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca transformatör anahtarlamasının AC voltaj kaynağının sıfır değerinde ve maksimum değerinde olduğu anlarda gerçekleştirilmesi durumunda faz akımlarının dalga şekillerinde oluşan değişim her iki model üzerinde de simülasyon aracılığı ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, geçici rejim akımı, güç kalitesi

ABSTRACT

The reason of inrush current which is formed when power transformer is energised was searched and the mathematical equation of inrush current was given. By using the relationship between the waveform of voltage and flux, the connection between the instant of switching and inrush current was explained. The technics, which can mitigate this current was represented.

Three phase star – delta connected and three phase star – star connected transformers were modelled and by using pspice program and simultaneous closing strategy and delayed close among phases was tried. For both situation the waveform of primer current was examined and the results were compared.

Keywords: Transformer, Inrush current, power quality

1 GİRİŞ

Transformatör öncelikle AC voltaj kaynağına bağlandığında birincil sargı etrafında devreye girme akımı adı verilen büyük genlikli bir akım dalgası oluşabilir. Bu durumun sebebi transformatör demir nüvesinin lineer olmayan mıknatıslanma karakteridir. Rastgele transformatör enerjilenmesi, geniş akı asimetrisi ve transformatörün bir ya da daha fazla nüvesinde doyum yaratır.

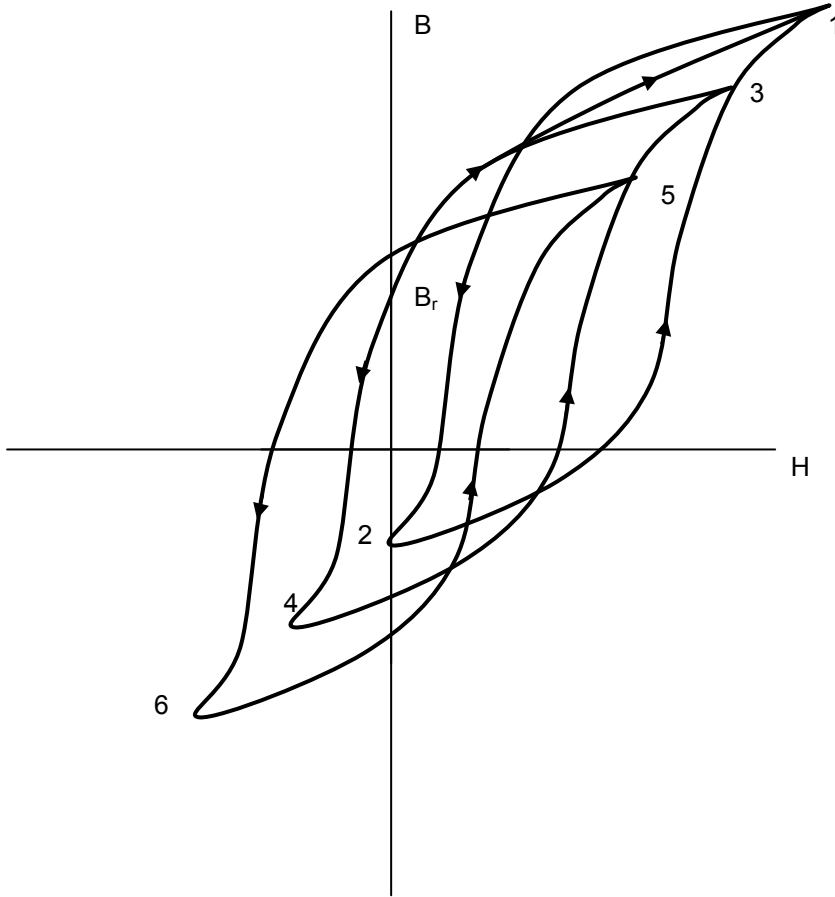
Bu durum ilk olarak 1892’de gözlemlenmiştir, ancak 1944’e kadar geçici rejim akımlarının hangi parametrelerden etkilendiğine dair bir bilgiye ulaşılamamıştır. Başlangıçta tek fazlı transformatör geçici rejim akımının ilk doruğunu hesaplama çalışmaları yapılmıştır. A. Boyajian ve G. Camili devreye girme akımının tepe değeri için bir formül ortaya koymuşlardır. J. H. Brunke ve K.J. Fröhlich kontrollü kapama yöntemi ile ilgili bir çalışma sunmuşlardır. P. C. Y. Ling ve A. Basak tek fazlı transformatörlerde geçici rejim akımını incelemişlerdir.

Bu çalışmada bu akımların meydana geliş nedenleri, yapısı ve farklı transformatör tiplerinde önlenmesi için uygulanabilecek yöntemler araştırılmaktadır. Kontrollü kapama tekniğinin geçici rejim akımlarının ortadan kaldırılması için geçerliliği Pspice programında yapılan simülasyon çalışması ile gösterilmektedir.

2. GEÇİCİ REJİM AKIMLARININ İNCELENMESİ

1.1 Transformatör Geçici Rejim Akımının Nedeni

Transformatör geçici rejim akımını daha iyi anlayabilmek için transformatörün temel karakterini incelemek gerekir. Transformatörün görevi voltajın ve akımın değerlerini yükseltip azaltmak ve transformatörün sargılarının kısımları arasında elektriksel yalıtım sağlamaktır. Kalıcı halde bu görev etkin bir şekilde yerine getirilir ve voltajlar ile akımlar arasındaki oran transformatörün sarım oranına oldukça yakındır. Ancak transient durumu oldukça farklıdır. Bunu görmenin en iyi yolu transformatörün mıknatıslanma karakterine bakmaktır. Bu durum şekil 2.1 de gösterilmiştir.

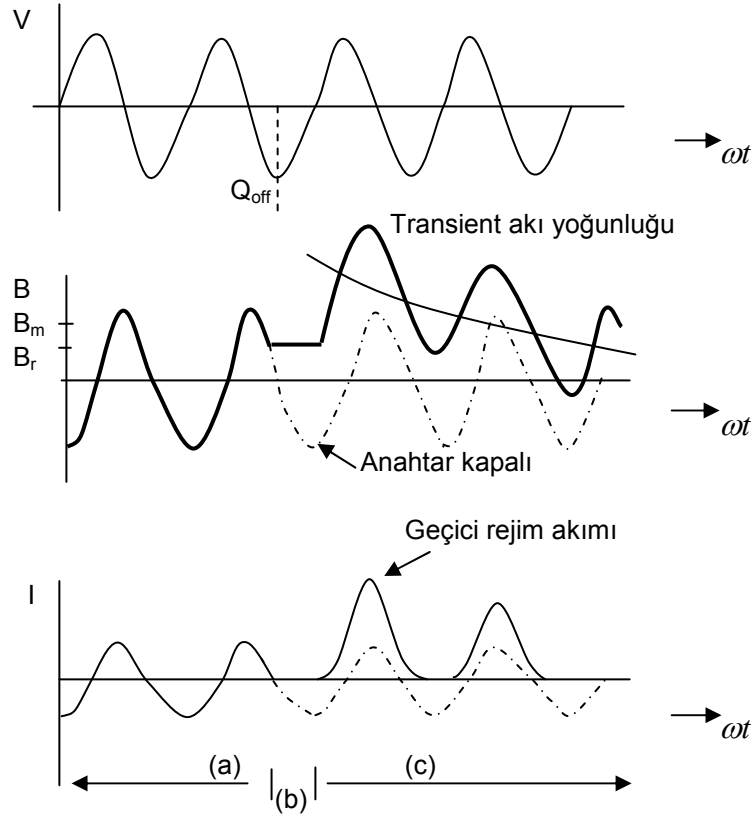


Şekil 2.1 Transformatörün mıknatıslanma karakteri

B'nin seviyesi, akı Φ ile ve H, mıknatıslanma akımı i ile orantılıdır. Transformatörün enerjilendiği anda nasıl davranacağını anlamak için transformatörün enerjisinin kesildiği ana bakmak gerekir. Transformatörün enerjisi kesildiğinde mıknatıslanma akımı sıfıra giderken B değeri ile bağlantılı olan kalıcı akı yoğunluğu yerleşir. Bu değer şekilde B_r olarak gösterilmiştir. Transformatör tekrar enerjilendiğinde, şekil 2.1 de gösterilen eğriyi takip edecektir. Uyarım akımının, transformatör nüvesindeki mıknatıslanmaya B_r 'nin bıraktığı izle

aynı doğrultuda başladığı varsayılırsa, nüve tam doyum moduna şekildeki 1 noktasıyla uyumlu şekilde ulaşacaktır. Uyartım voltajı uygun negatif değerine geri döndüğünde nüve doymamış olacaktır ve akım akı ile birlikte 2 ile gösterilen sona erme noktasına doğru azalacaktır. Uyartım voltajı tekrar pozitif olacak ve nüveyi doyuma götürecektir ve akım tekrar artmaya başlayacak ancak bu sefer biraz daha az bir değerle artacak çünkü akı yoğunluğu B-H eğrisinde daha düşük bir değere inmiştir. Transformatör bu tip uyartıma transientler tamamen sönene dek devam edecektir. Akımda her biri bir öncekinden daha düşük olan pek çok doruk noktası oluşacaktır.

Bu durumu incelemenin diğer bir yöntemi akı yoğunluğu, voltaj, akım gibi değerleri gözden geçirmektir. Enerji kesilmesi ve tekrar enerjilenme sırasında oluşan dalga şekilleri şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Voltaj, akı yoğunluğu ve akımın enerjilenmesi (a) kalıcı halde (b) enerji kesildiğinde (c) geri enerjilemede

Burada transformatör kalıcı hal çalışmasına başlar. Akı yoğunluğu ve enerjilenme voltajı dalga şekilleri arasında 90° fark ile oransal bir değer olduğu görülebilir. Transformatörün enerjisi kesildiğinde, transformatörde yerleşen kalıcı akı ile kalıcı akı yoğunluğu B , uyum halindedir. Transformatör tekrar enerjilendiğinde bu kalıcı akı hala yerleşiktir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, voltaj bu noktada en düşük değerindedir ve bu yüzden nüveyi tamamen doyuma sürükleyen doruk mesafesi boyunca tüm doruğu takip edecektir. Bu durum şeklin c

bölümü ile bağlantılı olan geri enerjileme sonrası akı yoğunluğu eğrisinden görülebilir. Bu anlatım enerji kesilmesi sırasında transformatörün kalıcı akısının işareti ile değeri arasındaki bağlantıyı gösterir. Transformatör geri enerjilendiğinde akı yoğunluğu ve voltaj dalga şekli enerjinin kesildiği noktadaki ile işaret ve değer olarak özdeş olursa, kalıcı akı yoğunluğunu normal yolu boyunca ilerletecek değerde olacaktır ve teorik olarak geçici rejim akımı gerçekleşmeyecektir.

2.2 Transformatörlerde Akı ile Mıknatıslanma Akımı Arasındaki İlişki

Tipik demir nüve mıknatıslanma eğrisi şekil 2.3’de gösterilmiştir. Genelde transformatörler, maksimum çalışma manyetik akısı, mıknatıslanma eğrisinin dirseği çevresinde olacak şekilde tasarlanır. Normal operasyon koşullarında akı $\lambda_{\max}$ ile $\lambda_{\min}$ arasında dalgalanır. İhtiyaç duyulan mıknatıslanma akımı oldukça küçüktür. Ancak enerjilenme sırasında transientler manyetik akıda endüklenir. Akının maksimum çalışma akısının iki katı değerine çıkma ihtimali vardır. Manyetik akı transientlerinin, demir nüvenin lineer olmayan mıknatıslanma karakteri tarafından büyütülen mıknatıslanma akım transientlerine dönüşebilir.

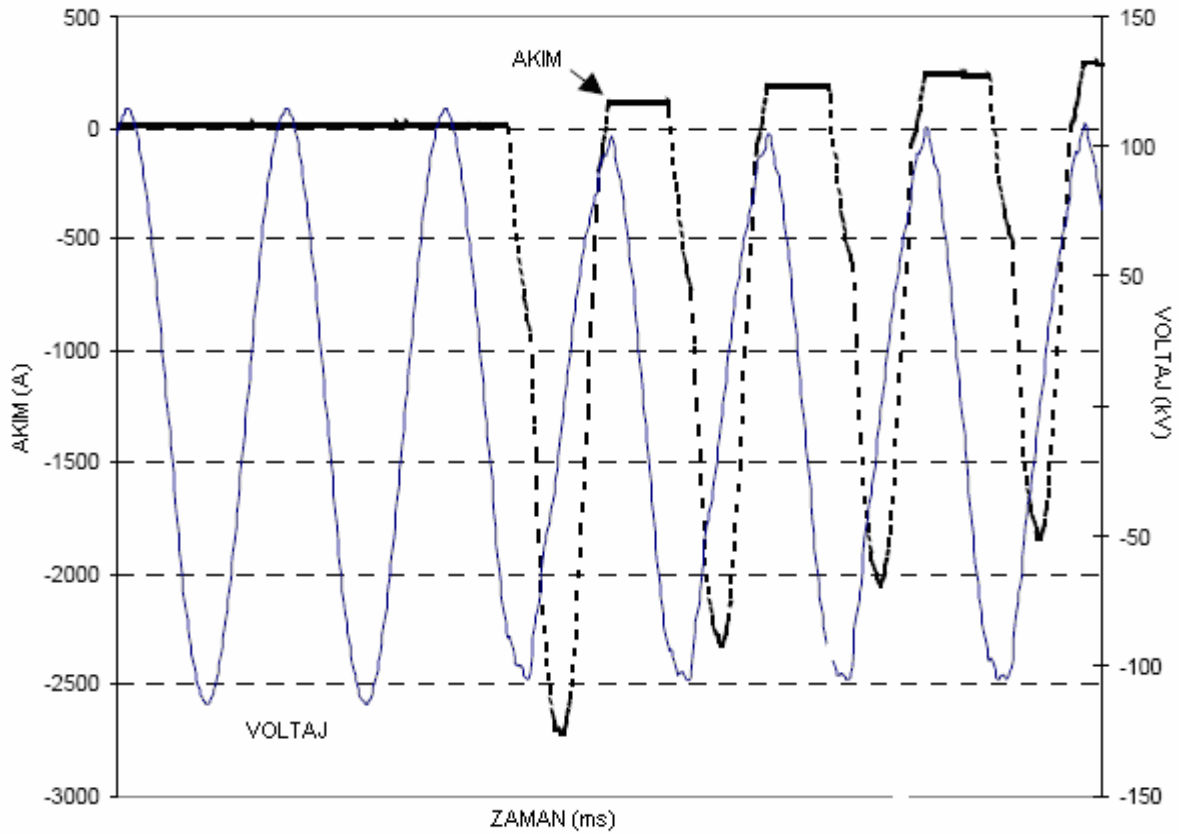


Şekil 2.3 Demir nüveli transformatörün tipik mıknatıslanma eğrisi

2.3 Geçici Rejim Akımının Devre Üzerindeki Etkisi

Geçici rejim akımının sistem kaynağında ve etrafındaki faaliyetlerde belirgin etkisi vardır. Bazı temel durumlar aşağıda listelenmiştir.

- Büyük geçici rejim akımı sistem kaynağında gerilim çökmelerine neden olur, bu da duyarlı elektronik aksamda hataya sebebiyet verir, bu hatalar üretimi sekteye uğratır.
- Üç fazlı transformatör enerjilendiği anda geçici rejim akımı üç fazda dengesiz olacaktır. Motorların koruma röleleri dengesiz üç fazlı akıma karşı oldukça duyarlıdır.
- Geçici rejim akımının DC bileşeni motorlarda artan motor titreşimi ve yaşlanmasına neden olabilir.
- Geçici rejim akımları koruma röleleri tarafından arıza akımı olarak algılanabilir ve diferansiyel rölelerin açılmasına neden olabilir.



Şekil 2.4 Geçici rejim akımı ve voltajın dalga şekli

2.4 Geçici Rejim Akımının Matematiksel İfadesi

Yüksüz bir transformatörün primerine bir gerilim uygulandığında, primer devrenin elektromotor kuvveti denklemi Kirchoff gerilim kanununa göre

$$v_i = V_{m1} \cdot \sin(\omega t + \theta_0) = i_\phi \cdot r_1 + N_1 \frac{d\phi_t}{dt} \quad (2.1)$$

şeklinde olur. Burada

v_i = Anahtarın kapatıldığı anda primere uygulanan gerilimi,

ϕ_t = Herhangi bir t anındaki çekirdek akısını,

i_ϕ = Mıknatıslanma akımını,

N_1 = Primer sarım sayısını,

V_{m1} = Uygulanan gerilim dalgasının maksimum değerini,

θ_0 = Şekil 2.8'de gösterilen orijin noktasına göre gerilim dalgasının açısını gösterir.

Çekirdek akısı ϕ_t 'nin bütün primer sarımlarla bağlantılı olduğu düşünülürse primer sargı endüktansı L_1 ;

$$L_1 = \frac{N_1 \cdot \phi_t}{i_\phi} \text{ şeklinde olur.}$$

Transformatörün mıknatıslanma (B – H) eğrisindeki doyumdan dolayı L_1 değeri sabit değildir fakat burada ϕ_t ile i_ϕ arasında lineer bir ilişki vardır.

$$i_\phi = \frac{N_1 \cdot \phi_t}{L_1}$$

Bu i_ϕ değerini (2.1) denkleminde yerine koyarsak;

$$\frac{N_1 \cdot \phi_t}{L_1} r_1 + N_1 \frac{d\phi_t}{dt} = V_{m1} \sin(\omega t + \theta_0) \text{ veya}$$

$$\left(\frac{r_1}{L_1} + p \right) \phi_t = \frac{V_{m1}}{N_1} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (2.2)$$

olur. Bu denklemin çözümü $\phi_t = C.F. + P.I.$ olur.

C.F. : Çözümün geçici kısmının tamamlayıcı fonksiyonu olup $\left(\frac{r_1}{L_1} + p \right) \phi_t = 0$ kısmını içerir.

Buradan da $p = -\frac{r_1}{L_1}$ bulunur.

C.F.=C. $e^{\frac{r_1}{L_1}t}$ olur. Burada C sabittir.

P.I.:Sürekli hal çözümünü veren kısmi integraldır ve 2.2 denkleminde $p = j\omega$ konularak;

$$P.I. = \frac{V_{m1}}{N_1 \sqrt{\left(\frac{r_1}{L_1}\right)^2 + \omega^2}} \sin\left(\omega t + \theta_0 - \tan^{-1} \frac{\omega L_1}{r_1}\right) \text{ olarak bulunur.}$$

Eğer $r_1 = 0$ ise

$$P.I. = \frac{V_{m1}}{N_1 \omega} \sin(\omega t + \theta_0 - \tan^{-1} \infty) = \phi_m \sin(\omega t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}) = -\phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \text{ olur.}$$

Böylece ϕ_t ;

$$\phi_t = C.F. + P.I. = C e^{\frac{r_1}{L_1}t} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \text{ olarak bulunur.}$$

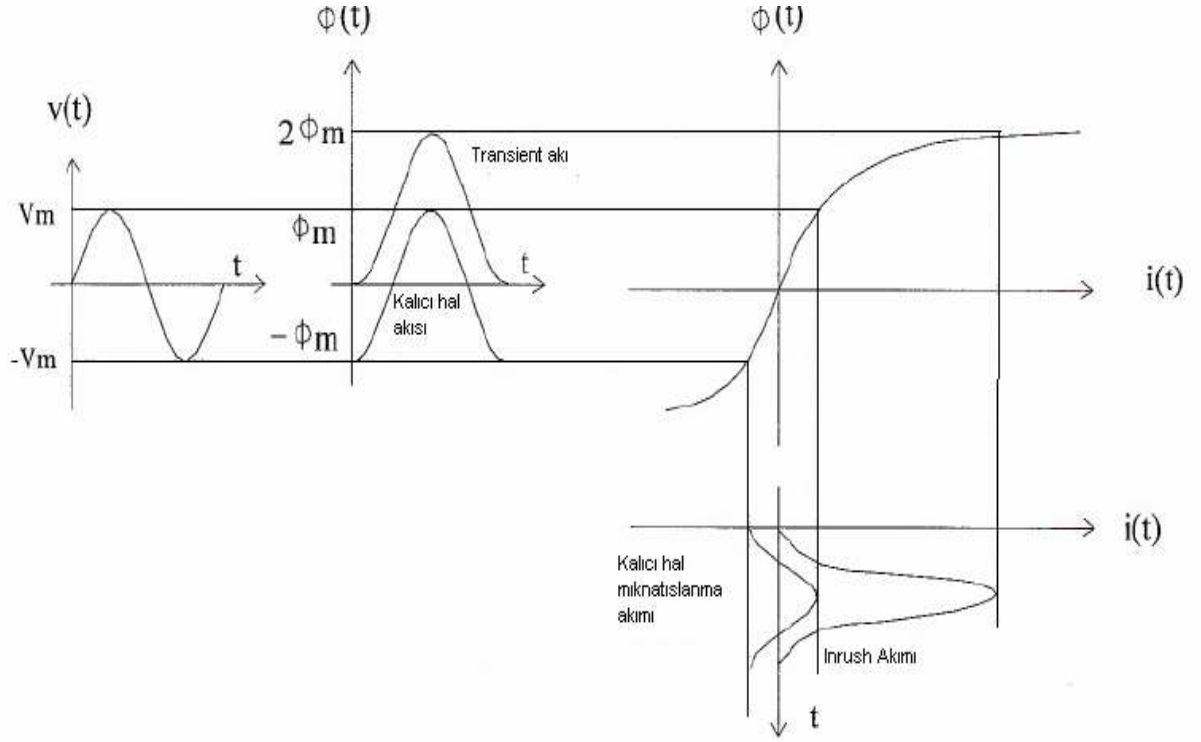
C sabitinin değeri ilk koşullardan bulunabilir. Anahtarın kapatıldığı andaki ϕ_1 akısının değeri $\pm \phi_R$ olabilir. Burada ϕ_R artık nüve akısıdır.

$t = 0$ anında $\phi_t = \pm \phi_R$ ve $\pm \phi_R = C - \phi_m \cos \theta_0$ veya $C = \pm \phi_R + \phi_m \cos \theta_0$ olur.

$$\phi_t = (\phi_m \cos \theta_0 \pm \phi_R) e^{\frac{r_1}{L_1}t} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \quad (2.3)$$

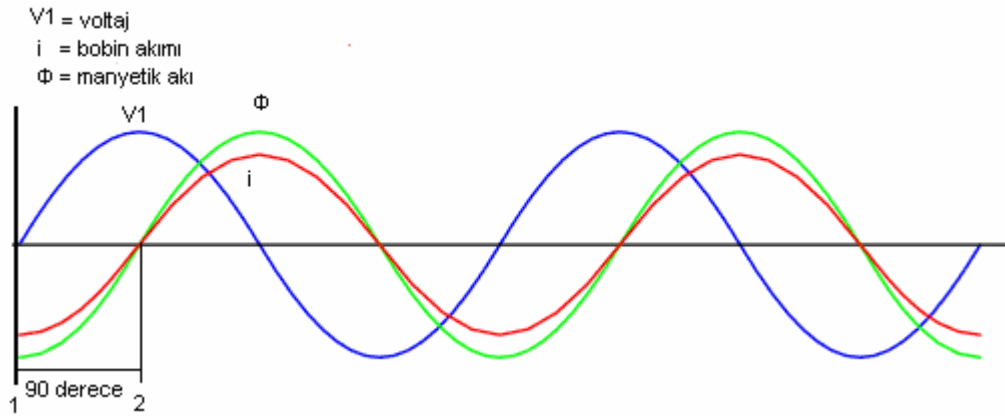
2.3 denkleminde parantez içindeki ilk terim, zamanla üstel olarak azalan sabit bir dc akıyı ($\phi_{dc} \pm \phi_R$) belirtir. Burada $\phi_{dc} = \phi_m \cos \theta_0$ 'dır. $\cos(\omega t + \theta_0)$ 'ı içeren ikinci terim w ise, temel frekanstaki sürekli hal alternatif akısını belirtir.

Şekil 2.5'de geçici rejim akımının grafiksel açıklaması görülebilir.

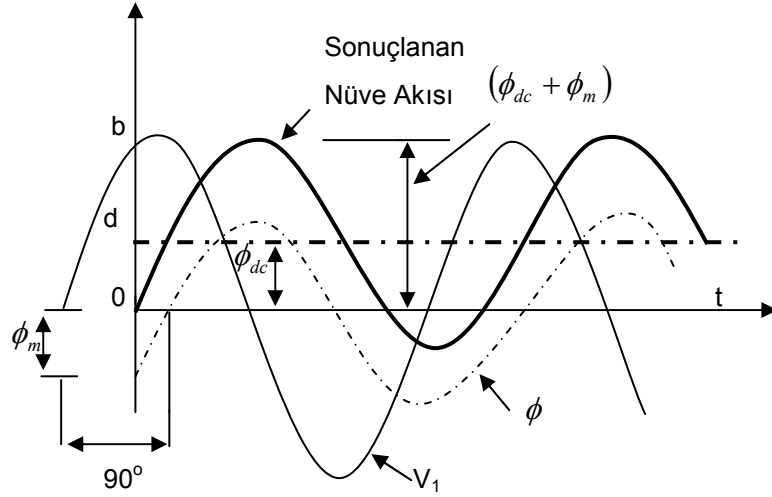


Şekil 2.5 Geçici rejim akımının grafiksel tanımı

Biliyoruz ki ani akının transformatör üzerindeki değişim oranı, primer sargının etrafındaki ani voltajın düşüşü ile orantılıdır. Veya daha önce belirtildiği gibi, voltaj dalga şekli akı dalga şeklinden türetilir ve akı dalga şekli voltaj dalga şeklinin integralidir. Devamlı çalışan transformatörde, bu iki dalga şekli 90° lik faz kaymasına sahiptir. Akım dalga şekli akı dalga şekli ile aynı fazdadır ve voltaj dalga şekli ile aralarında 90° faz farkı vardır.



Şekil 2.6 Voltaj, akı, akım dalga şekilleri.



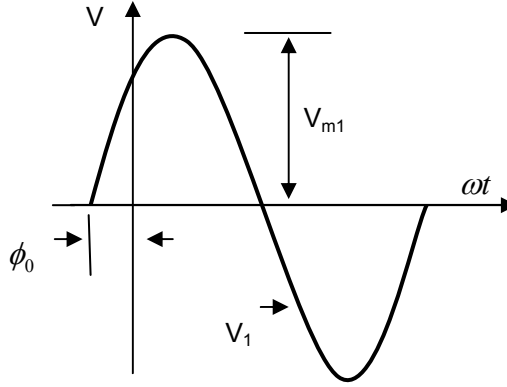
Şekil 2.7 Eklenen voltaj ob konumunda iken yüksüz transformatörü anahtarlamamanın etkisi Sürekli çalışma koşullarında uygulanan gerilim V_1 ve çekirdek akısı ϕ 'ye ait dalga şekilleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. 1 anında V_1 sıfır ve ϕ negatifte maksimum, 2 anında V_1 pozitifte maksimum ve akı sıfırdır. Geçici rejim durumunda niteliksel yaklaşım için sabit akı bağlantı teoremini incelemek gerekir. Bu teoreme göre endüktif devredeki manyetik akı aniden değişmez. Anahtarı kapattıktan hemen sonraki ($t = 0+$) akı, kapatmadan hemen önceki ($t = 0-$) akıya eşit olmalıdır.

Şekil 2.7'de gösterildiği gibi 1 ile 2 anları arasındaki bir anı ele alalım. Şimdi anahtarlama gerilimi ob , sürekli hal akısı oa olur. Fakat V_1 gerilimi sıfır olduğu için anahtarı kapatmadan önceki ($t = 0-$) anında akı sıfırdır ve sabit akı bağıntı teoremine göre, ($t = 0+$) anında da sıfır olmalıdır. Bu yüzden Şekil 2.7'de gösterilen anda transformatör enerjilendiğinde transformatör çekirdeğinde $\phi_{dc} = od = oa$ olan bir akı oluşur ve ($t = 0+$) anında çekirdekteki toplam akı da sıfır olur. Bu ϕ_{dc} akısı sabit akı veya dc akısı olarak adlandırılır ve primer sargının direnci ihmal edilirse büyüklük olarak sabit kalır. dc akı sürekli çalışmada alternatif akı ile toplanır ve sonuçta oluşan nüve akı dalgası Şekil 2.11'de kalın çizgi ile gösterilmiştir. Nüve akısının maksimum değeri $\phi_{dc} + \phi_m$ 'dir.

Geçici rejim akımının şiddeti, güç kaynağına bağlı olan transformatörün o anki gerilim dalgasına bağlıdır. Nüvesi ilk durumda mıknatıslanmamış bir transformatör düşünün. Transformatör primer sargısı, şimdi bir kaynak gerilimine bağlansın. Şu iki durumu inceleyelim:

2.4.1 Transformatör Gerilim Maksimumken Bağlanır

Transformatörün primer sargısının, voltajın pozitif tepe değerinde olduğu 2 anında AC voltaj kaynağına bağlandığını varsayalım. Burada hem ($t = 0^-$) hem de ($t = 0^+$) anlarında akı sıfırdır ve böylece $\phi = 0$ olup geçici olaylar meydana gelmez. Çekirdek akısının şekli Şekil 2.9'daki gibi olur. Bu da, uygulanan gerilim tepe noktasına ulaştığı anda bir transformatör iletime sokulursa, primer enerjilendikten sonra çekirdek akısı ϕ 'nin sürekli çalışma değerine çabucak ulaştığını ve bu yüzden geçici olayların olmadığını gösterir.



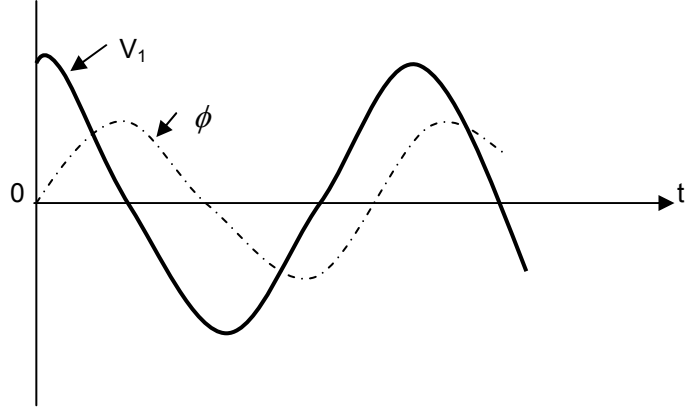
Şekil 2.8 Voltaj dalga şekli

Bu durumda Şekil 2.8'de $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ olur ve $\phi_r = 0$ olursa

$$V_1 = V_{m1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = V_m \cos \omega t \text{ olur ve 2.3 denkleminde;}$$

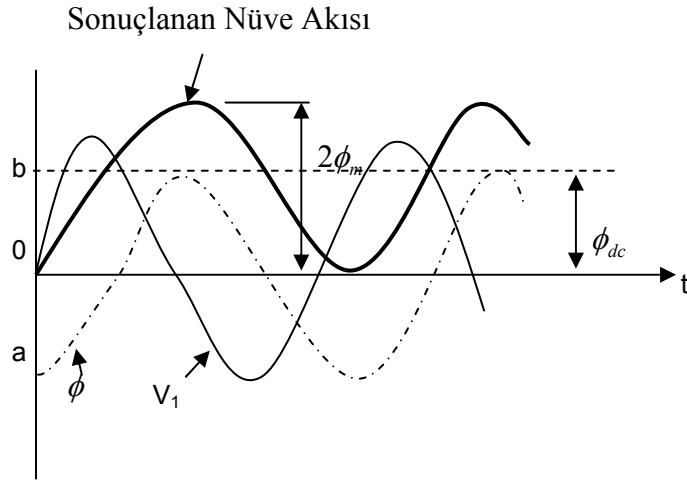
$$\phi_t = \left(\phi_m \cos \frac{\pi}{2}\right) e^{\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \phi_m \sin \omega t = \text{sürekli hal alternatif akısı.}$$

$t = 0$ anında $V_m = V_{m1}$ ve $\phi_t = 0$ 'dır. Bu da, sürekli çalışmadaki akının; transformatör uygulanan gerilimin maksimum değerinde iletime sokulduğunda gerçekleştiğini gösterir. Bu yüzden bu durum transformatörün primer anahtarının kapatılmasında en çok tercih edilen durumdur. Bu avantajlar ve sonuçları Şekil 2.10'da niteliksel olarak verilmiştir.



Şekil 2.9 V_1 pozitifte maksimum ve ϕ sıfırken anahtarlamamanın yüksüz transformatör üstündeki etkisi.

Akı ve nüve akımı sıfırdan başlamış ve devam eden operasyon boyunca aynı doruk değerini oluşturmuşlardır. Bu yüzden inrush meydana gelmemiştir. Bu durum için gerilim ve akı değişimleri şekilde gösterilmiştir. Akıda transient oluşmamış olması dikkat edilmesi gereken husustur.



Şekil 2.10 V_1 sıfır ve ϕ maksimum negatif değerinde iken yüksüz transformatörü anahtarlamamanın etkisi

2.4.2 Transformatör Gerilim Sıfırken Bağlanır

Alternatif olarak transformatörün, voltajın sıfırdan geçtiği 1 anında ilettime sokulduğunu düşünelim. Bu durumda akı ($t = 0^-$)’de sıfır ve ($t = 0^+$) iken Şekil 2.10’da gösterildiği gibi $o_a = -\phi_m$ ’dir. Fakat sabit akı teoremine göre ($t = 0^+$) iken akının sıfır olması gerekiyor. Bu durumda çekirdekte $\phi_{dc} = o_b = o_a = \phi_m$ şeklinde bir akı oluşur ve böylece ($t = 0^+$) iken akı sıfır olur. Sabit ϕ_{dc} akısı sürekli olan alternatif akıya eklendiğinde oluşan toplam çekirdek akısı şekil 2.13’de kalın çizgi ile gösterildiği gibi olur. Şekil 2.10’da $t = 0$ anında anahtarın kapatıldığı göz önüne alınırsa toplam çekirdek akısının genel denklemi

$$\phi_{dc} - \phi_m \cdot \cos wt = \phi_m \cdot (1 - \cos wt) \text{ şeklinde olur.}$$

Yarım periyot geçince ($wt = 180^\circ$) çekirdek akısı maksimum akının iki katı değerine ulaşır. Buna çifte katlanma etkisi denir. Bu çifte katlanma etkisi çekirdeği büyük ölçüde doyurur. Nominal akımın 5%’i kadar olan mıknatıslanma akımı, çifte katlanma etkisinde nominal akımın 4 ila 6 katı oluşur.

Bu durumda $\theta_0 = 0$ ve ϕ_r pozitif ise $V_1 = V_{m1} \sin wt$ olur ve 2.3 denkleminde;

$$\phi_t = (\phi_m + \phi_R) e^{\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos wt \quad (2.4)$$

elde edilir.

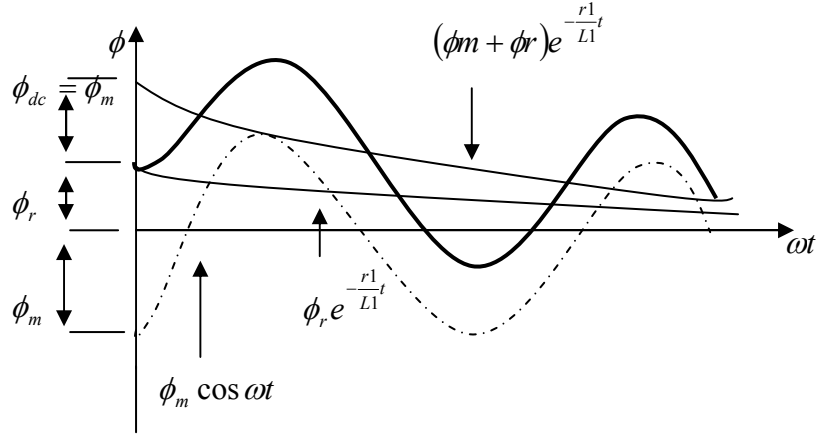
Yarı periyot sonra yani anahtar kapatıldıktan $wt = \pi$ süre sonra 2.4 denklemini;

$$\phi_t = (\phi_m + \phi_R) e^{\frac{\pi r_1}{L_1 w}} - \phi_m \cos \pi \text{ olur.}$$

Genellikle $wL_1 \gg \pi r_1$ olduğundan $e^{\frac{\pi r_1}{wL_1}}$ (Burada $wt = \pi$ ve $t = \frac{\pi}{w}$) ifadesi sonuçta $e^0 = 1$ ’e yaklaşır. Böylece 2.4’te anahtar kapatıldıktan yarı periyot sonraki toplam çekirdek akısı aşağıdaki gibi olur.

$$\phi_{t,m} = 2\phi_m + \phi_R \quad (2.5)$$

2.5 denkleminin sonuçları niteliksel olarak verilmiştir. 2.4’e ait çizim, şekil 2.11’de verilmiştir.



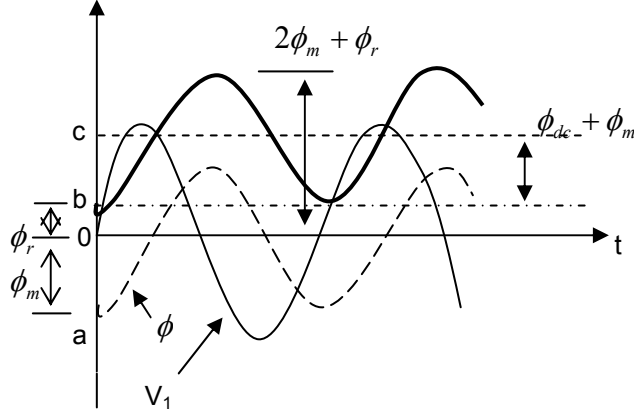
Şekil 2.11 2.4 denklemine ait şekil



Şekil 2.12 Voltajın sıfır olduğu an için akı – akım ilişkisi

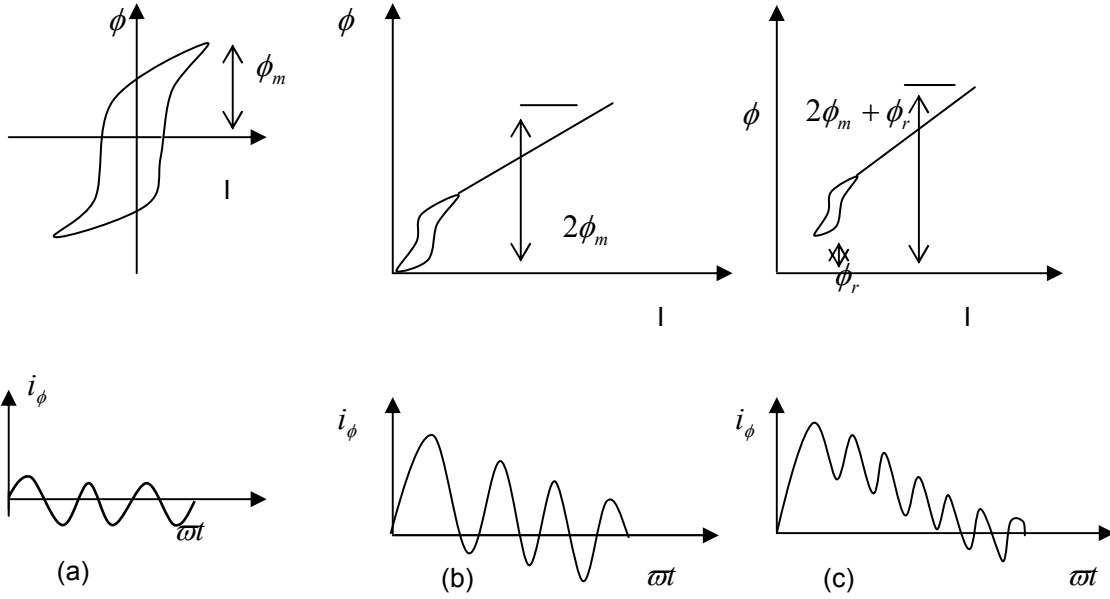
Bu, AC voltaj kaynağına bağlandığında transformatörün birincil sargısında geçici rejim akımına neden olan mekanizmadır. Görebileceğiniz gibi geçici rejim akımının değeri kaynağa yapılan elektriksel bağlantının zamanına bağlıdır. Eğer transformatör kaynağa bağlandığı anda nüvesinde kalıcı mıknatıslanma varsa, geçici rejim çok daha sert gerçekleşir.

2.4.3 Transformatör Nüvesinde Kalıcı Akı Bulunması Hali

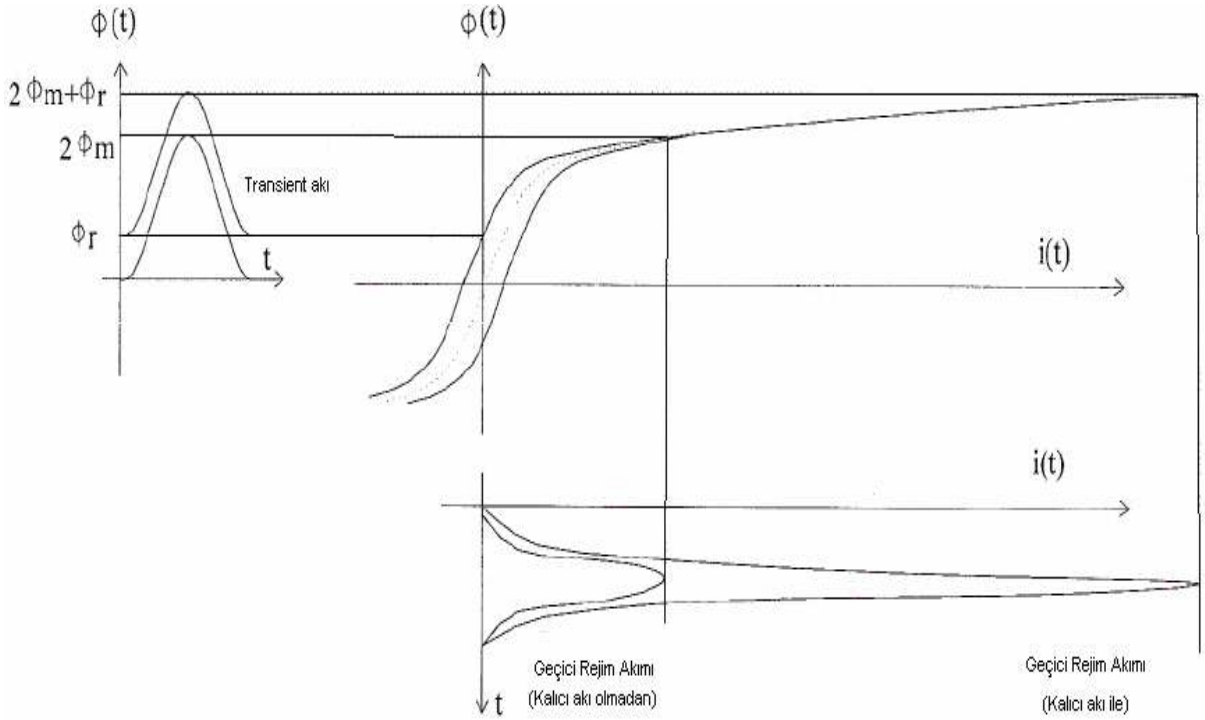


Şekil 2.13 Voltaj sıfırken ve kalıcı mıknatıslanma ϕ_r mevcutken dengesiz transformatörün anahtarlanmasının etkisi

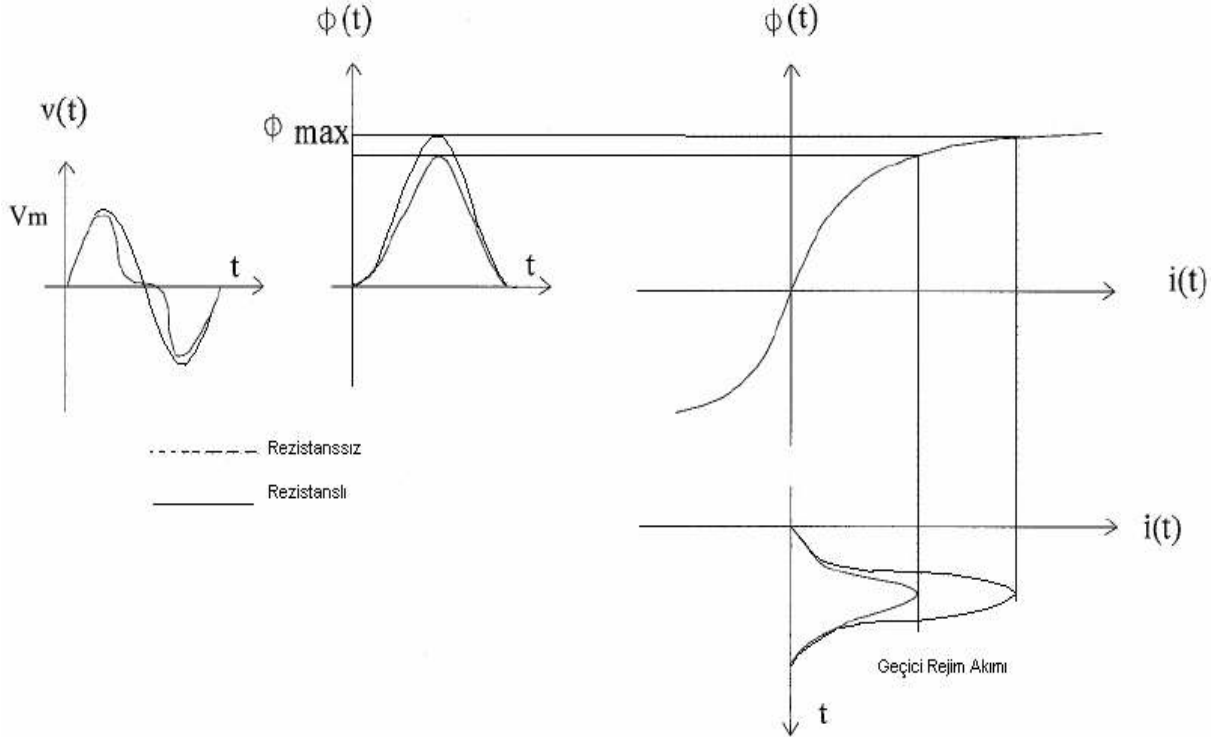
$\phi_R = ob$ akısının transformatör nüvesinde var olduğunu varsayalım. Primer, Şekil 2.13’de gösterildiği gibi sıfırdan geçip pozitif doğru artan bir gerilimle ilettime sokulduğunda, ($t = 0+$) anındaki akı ($t = 0-$) anındaki ϕ_R akısına eşit olacaktır. Bu durum ancak ve ancak $bc = \phi_{dc} = oa = \phi_m$ olan sabit bir akı oluştuğunda meydana gelecektir. r_1 primer direnci ihmal edilirse ϕ_R ve ϕ_{dc} akıları sürekli hal alternatif akısı ϕ ’ye eklendiğinde oluşan toplam nüve akısı Şekil 2.13’de kalın çizgi ile gösterilen eğri gibi olur. Kalıcı akının geçici rejim akımı üzerindeki etkisi Şekil 2.15’de gösterilmiştir. $t = 0$ anında anahtarın kapatılması ele alındığında toplam çekirdek akısı $\phi_R + \phi_{dc} - \phi_m \cdot \cos \omega t = \phi_R + \phi_m (1 - \cos \omega t)$ şeklinde olur. Anahtarın kapatılmasından yarım periyot sonra çekirdek akısı $\phi_R + 2\phi_m$ ’e eşit olur. Gerçekten de r_1 primer sargı direnci yüzünden hem ϕ_{dc} hem de ϕ_R zorunlu olarak sıfıra inerler ve çekirdek akısı bir sinüs dalgası şekline dönüşür.



Şekil 2.14 Transformatörün histerisiz döngüleri ve mıknatıslanma akımı dalga şekilleri. Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.13’deki durumlara ait histerisiz çevrimleri ve mıknatıslanma akımlarına ait dalga şekilleri sırası ile Şekil 2.14’de verilmiştir. Şekil 2.14(a)’da, histerisiz çevrimi ve i_ϕ mıknatıslanma akımı olması gereken değerdedir ve Şekil 2.9’daki ile simetriktir. Şekil 2.10 ve Şekil 2.13’de nüve akısı sıfırdan $2\phi_m$ ’e kadar değişir ve böylece histerisiz çevrimi azalır ve i_ϕ başlangıça oranla tek yönlü hale dönüşür. Şekil 2.14(c)’de nüve akısı Şekil 13’de olduğu gibi $+\phi_R$ ile $+(\phi_R + 2\phi_m)$ arasında değişir ve böylece çekirdek aşırı doyuma gider, histerisiz çevrim ihmal edilecek kadar küçük olur ve i_ϕ sıfırda tamamen dengeye gelir. Şekil 2.14(b) ve (c)’de mıknatıslanma akımlarının dalga şekilleri bir süre sonra $I^2 R$ kayıplarından dolayı simetrik olur.



Şekil 2.15 Geçici rejim akımının kalıcı akıyı da içeren grafiksel açıklaması
Sargının rezistansını ele alarak gördük ki tüm voltaj nüvede akı oluşturmaya gidiyor. Bir kısım voltaj birincil rezistansın üzerine düşüyor, bu sayede maksimum akıda azalma oluyor. Geçici rejim akımının düşen miktarı Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Transformatör tasarımında rezistans değeri çok fazla arttırılmaz çünkü ısınma problemi ile karşılaşılır.



Şekil 2.16 Primer rezistansın geçici rejim akımı üzerindeki etkisi

2.5 Mıknatıslanma Geçici Rejim Akımından Kaynaklanan Güç Kalitesi Problemleri

Güç kalitesi açısından bakıldığında mıknatıslanma geçici akımı, iki tip karışıklığa sahip olan bozulmuş bir dalga olarak ele alınabilir.

- Dengesiz
- Harmonikli

2.5.1 Dengesiz

Asimetrik yükler dengesiz akımlar üretirler. Benzer şekilde mıknatıslanma geçici rejim akımları, mıknatıslanma sırasında dengesiz akım üretirler.

2.5.2 Harmonikler

Mıknatıslanma sırasında transformatörün ihtiyaç duyduğu akım her dereceden harmonik içerir. Ancak sadece ikinci ve üçüncü harmonikler önemlidir. Ayrıca kalıcı akıya bağlı olarak ilk döngülerde dc bileşen de belirginleşir. En belirgin harmonikler aşağıdakilerdir

- **DC bileşen:** Geçici rejim akımı içerisinde hemen hemen her zaman üç fazlı sistemin her fazında farklı değerlerde olacak şekilde dc bileşen bulunur.
- **İkinci harmonik:** İkinci harmonik üç fazdaki tüm geçici rejim akımının içinde bulunur. İkinci harmoniğin değeri, doyum derecesine bağlıdır. Bu harmonik bileşenin minimum değeri, mıknatıslanma akımının %20'si civarındadır.
- **Yüksek harmonikler:** Daha yüksek dereceden harmoniklerin daha düşük değerleri vardır. Bu yüzden ihmal edilebilirler.

2.6 Geçici Rejim Akımının Bağlı Olduğu Faktörler

2.6.1 Transformatörün Boyutları

Mıknatıslanma geçici rejim akımının tepe değerleri ufak transformatörler için daha yüksektir, geniş transformatörlerde ise bu akımın süresi fazladır. Akımın gerileme zamanı ufak transformatörler için saniyenin onda biri kadardır (100kVA ve altı) ve daha geniş ünitelerde bir saniye civarındadır.

2.6.2 Transformatöre Enerji Veren Sistemin Empedansı

Eğer transformatör güçlü bir sistem tarafından enerjilenirse geçici rejim akımı daha yüksek olur. Dahası generatöre yakın bağlanan transformatörlerde görülen geçici rejim akımları daha uzak bağlananlara göre daha uzun sürmektedir.

2.6.3 Nüve Maddesinin Manyetik Özellikleri

Nüvenin doyum akı yoğunluğu düşük olduğunda mıknatıslanma geçici rejim akımı daha keskin oluşur. Tasarımcılar genelde 1.5 ile 1.75 tesla arasındaki değerlerle çalışırlar. Sonraki değere yakın çalışan transformatörler daha düşük inrush akımları sergilerler.

2.6.4 Nüvedeki Kalıcı Akı

Kalıcı akı voltaj kombinasyonu Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Yüksek kalıcı akı yüksek geçici rejim akımları ile sonuçlanır. Kalıcı akı yoğunlukları 1.3 ila 1.7 tesla gibi yüksek değerler olabilir.

2.6.5 Transformatörün Anahtarlandığı An

Mıknatıslanma akımının en yüksek değerleri transformatörün, sargı voltajının sıfırdan geçtiği anda enerjilenmesi ile meydana gelir ve buna ek olarak yeni zorlanmış akının nüvede daha önceden kalan akı ile aynı yönde olacağı tahmin edilir. Ancak, genel olarak geçici rejim akımının büyüklüğü rast gele bir değerdir ve anahtarın kapatıldığı andaki voltaj dalga şekli ile birlikte kalıcı akının değerine ve işaretine de bağlıdır. Transformatörün beşinci ya da altıncı anahtarlanmasının yüksek değerde geçici rejim akımları ile sonuçlandığı tahmin edilmektedir.

2.6.6 Transformatörün Anahtarlanmasının Yöntemi

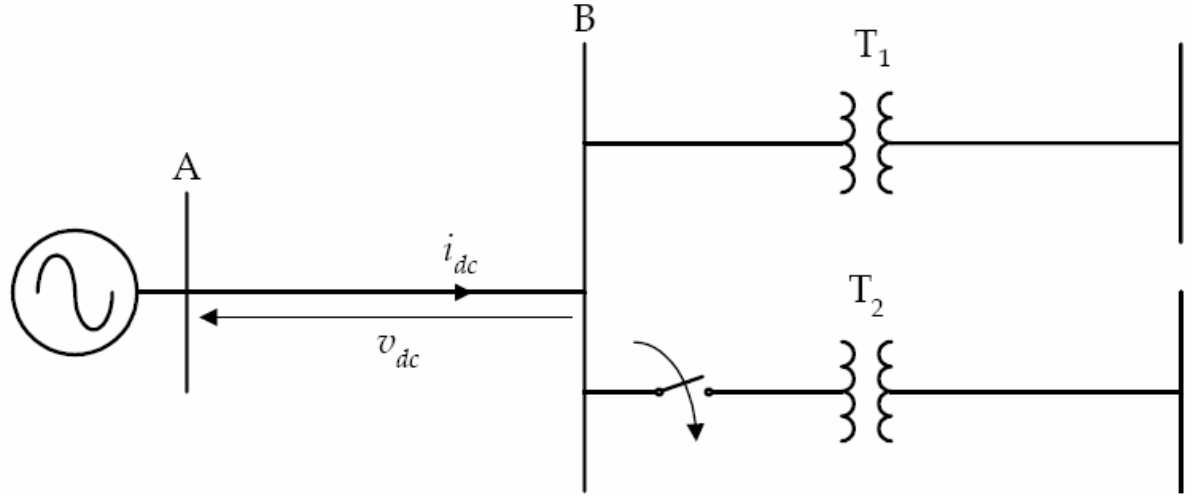
En yüksek geçici rejim akımı nüve ile sargı arasındaki çapraz – bölgesel alanda meydana gelir. Geçici rejim akımının yüksek değerleri daha düşük çapı olan iç sargı önce enerjilendiğinde gözlemlenmiştir. Bakır nüveli transformatörlerde dış sargı önce anahtarlandığında geçici rejim akımının nominal değer 5 - 10 katı olduğu, iç sargı önce anahtarlandığında ise bu değer 10 – 20 kata çıktığı tahmin edilmektedir. Düşük voltaj sargısı genelde nüveye daha yakındır ve bu yüzden düşük voltaj sargısını enerjilemek yüksek geçici rejim akımı üretir.

2.7 Karşılıklı Geçici Rejim

Bu durum bir transformatör diğerine paralelken oluşur. Daha önceden enerjilenmiş olan transformatör Şekil 2.17’de görüldüğü gibi baştan enerjilenir. Varsayalım ki T_2 transformatörünün geniş pozitif kalıcı akısı var ve tercih edilmeyen bir voltaj fazında anahtarlandı, bu transformatör tarafından geniş bir geçici rejim akımı sergilenecektir. Geçici rejim akımının yavaşça geciken dc bileşeni eşitlik güç sisteminin rezistansında belirgin voltaj düşüşüne neden olur. Gerçekleşen voltaj düşüşü bara B deki voltajı ani olarak değiştirir. B deki voltaj değişimi transformatör T_2 ’nin doyumunu düşürür ve T_2 ’deki geçici rejim akımını azaltır. T_2 transformatörü voltajın bu ani değişimine tepki gösterir ve ters yönde kendi geçici rejim akımını üretir. Başlangıçta sadece T_2 geçici rejim akımı oluşturur. Daha sonra T_2 akımını azaltırken, T_1 kendi geçici rejim akımını artırır. Sonuçta iki ünite de tam olarak enerjilendiğinde, iki akım da çöker. Karşılıklı geçici rejim çok uzun sürebilir.(Bazen dakikalarca)

Bu tip geçici rejim sırasında potansiyel olarak iki tip problem ortaya çıkar.

- Hali hazırda enerjilenmiş olan T_1 ’deki geçici rejim akımı transformatörün korunmasında problem yaratacak kadar belirgindir.
- Kaynak hattındaki akım iki geçici rejim akımının vektör toplamıdır ve paralel transformatörler aynı koruma sistemini kullandığında problem yaratır.



Şekil 2.17 Karşılıklı geçici rejimi tetikleyen durumlar

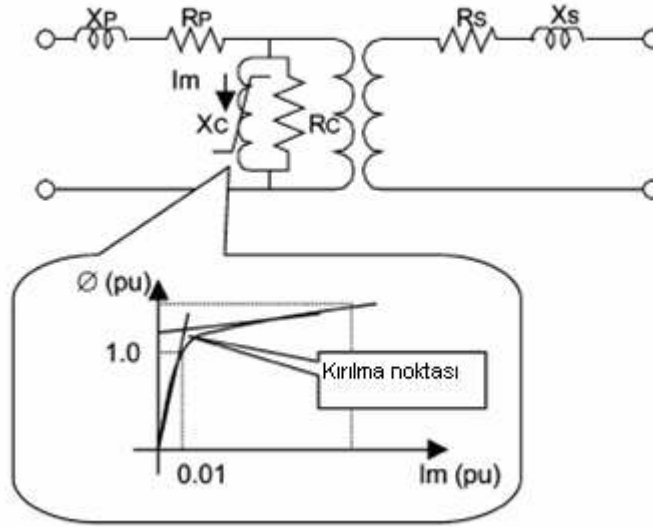
3 KONTROLLÜ ANAHTARLAMA ile TRANSFORMATÖR ANİ DEŞARJ AKIMLARININ ELENMESİ

Kontrollü transformatör anahtarlama potansiyel olarak bu transientleri eleyebilir. Bu kısımda nüve akı transientleri teorik olarak incelenecektir. Ani deşarj akımı olmadan kontrollü enerjilenmeye izin veren koşullar ele alınacaktır.

3.1 Transformatör Modellemesi

Transformatör nüvesindeki akı transientini araştırmak için teorik modele ihtiyaç vardır. Evrensel model bütün frekanslar için iyidir ve transformatörün her karakteri için modelleme mümkün değildir. Nüve akı/akım bağlantısı ve kalıcı nüve akısı modelleme kabiliyetine sahip olunmalıdır.

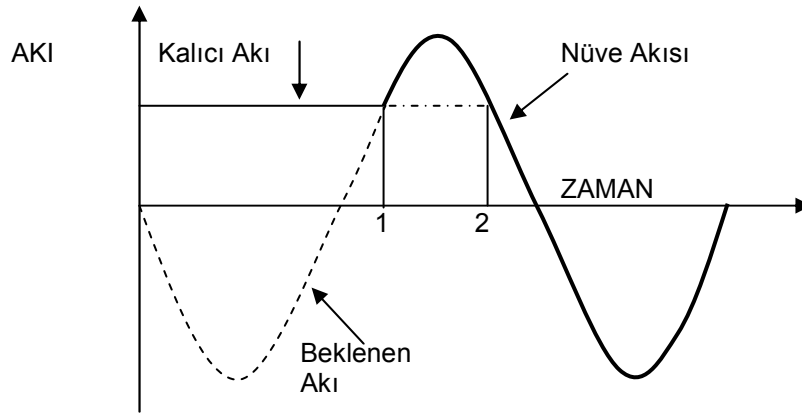
En çok kullanılan transformatör nüve modeli Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kayıpları göstermek için resistör kullanır, manyetizma akımını göstermek için paralelde endüktöre bağlanmıştır. Bu tip model kalıcı akıyı göstermez.



Şekil 3.1: Tek fazlı transformatörün eşitlik devresi, transformatör oranları p.u. değerlerle gösterilmiştir.

3.2 Tek Fazlı Transformatörlerin Kontrollü Anahtarlama

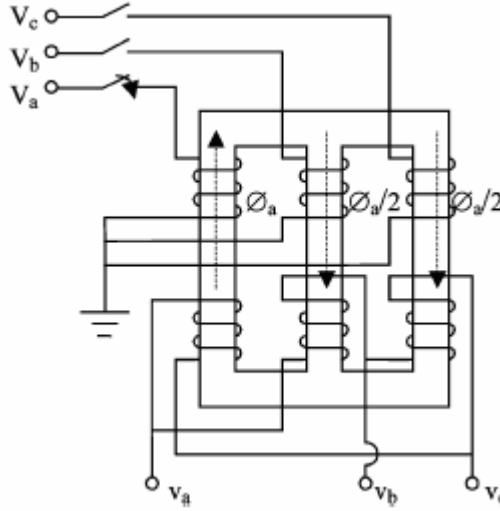
Transformatörlerin kontrollü kapatılması durumunda, tutulmuş şarj, kalıcı akı ile paraleldir. Nüve akı asimetrisini elemek için temel prensip enerjilenme anında indüklenen akının kalıcı akıya eşit olmasıdır. Enerjilenmeden önce indüklenen akı yoktur, ama kaynak voltajının indüklenen akı oluşturma ihtimali vardır. Eğer kaynak voltajı asıl akı kaynağı olarak göz önünde bulundurulursa o zaman transformatörü etkileyecek en uygun an beklenen akının kalıcı akıya eşit olduğu andır. Prensip Şekil 3.2’de görülebilir. Bu tek fazlı transformatörlerin, kontrollü kapaması için temel stratejiyi oluşturur.



Şekil 3.2 Tek – faz transformatör için en uygun enerji verme gösterilmiştir. En uygun enerjilenme anı zaman içerisinde (1) ve alternatif uygun zaman (2)

3.3 Çok Fazlı Transformatörlerde Kalıcı Akı Olmadan Kontrollü Anahtarlama

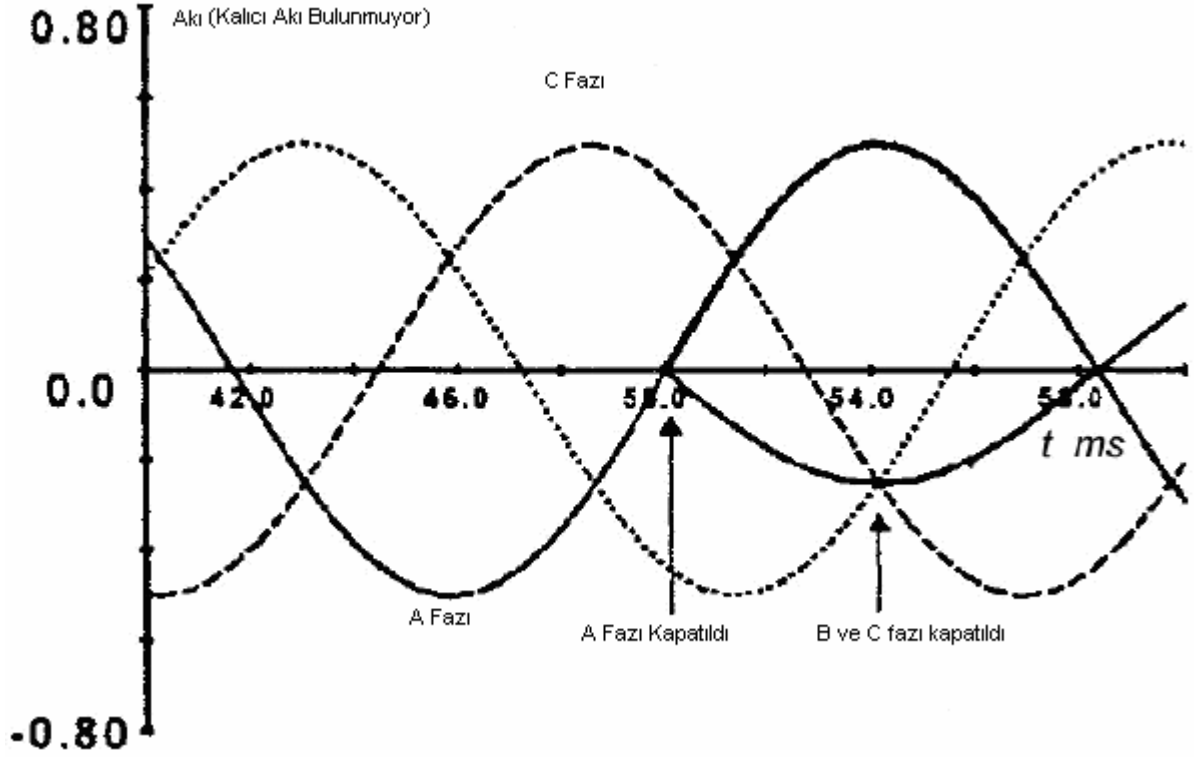
Sadece tek fazlı nüveleri ve topraklanmış sargıları olan transformatörler tek fazlı transformatör olarak değerlendirilir, ancak güç sistemlerindeki çoğu transformatörün fazlar arası etkileşimi vardır. Bu öteki tip transformatörlerde, bir faz enerjilendiğinde, diğer nüvelerdeki ya da nüvedeki akı statik kalıcı akı değildir burada devam eden transient akıya “dinamik” nüve akısı denir. Başlangıçta üç fazda kalıcı akının sıfır olduğunu varsayalım, böylece ilk fazı kapatmak için en uygun an beklenen akının sıfıra eşit olduğu andır. Bu an voltajın doruk noktasındadır. İlk faz kapatıldığında, delta sargının diğer iki fazında da voltaj üretilir. Bu voltajların her birinin değeri enerjilenen fazdaki voltaj değerinin yarısıdır ve açıları ilk fazdaki voltajın açısının 180° dışındadır. Bu iki fazın nüvelerinde üretilen akı dinamik akıdır.



Şekil 3.3 Üç bacak nüveli transformatörde A fazı için eklenen voltaj ve akılar arasındaki etkileşim.

Üç fazdaki nüve akıları da benzer bir ilişkiye sahiptir. Değerleri tam enerjilenmiş fazın akı değerinin yarısıdır ve açıları bu faza göre 180° dışındadır. Böyle durumlarda en uygun enerjilenmeye son iki fazı, ilk faz enerjilendikten bir döngü sonra enerjileyerek ulaşılır. Burada beklenen akı ve dinamik nüve akısı her fazda eşittir. Durum Şekil 3.4’de görülebilir.

Bu üç fazlı transformatör için en uygun enerjilenmenin anlatımıdır. Enerjilenmiş faz tarafından üretilen akı diğer iki fazda doğrudan dinamik akı yaratacaktır. Bu dinamik akılar yukarıda anlatılan delta sargılar tarafından meydana getirilenle aynı karaktere sahip olacaktır.



Şekil 3.4 Üç fazlı transformatörün kalıcı akı olmadan enerjilenmesi. Her faz için beklenen akı ve dinamik nüve akısı gösterilmiştir.

3.4 Kalıcı Akı Bulunan Üç Fazlı Transformatörlerde Kontrollü Anahtarlama

Transformatörde kalıcı akı bulunduğunda öteki fazlardaki sonuçlanan dinamik nüve akısı düzgün olarak bölünemez. Şekil 3.5'deki dinamik akılar, kalıcı akı seviyelerinden başlarlar ve histerisis düğümleri etrafında aynı yönde hareket ederler. Faz "C" doyum karakterinin kırılma noktasına ulaşırken, faz "B" hala lineer durumdadır. Bu noktada şekillerin karakterleri belirgin biçimde farklıyken iki sargının endüktansları da belirgin biçimde farklı olur. Bundan dolayı sargılardaki voltaj düzgün bölünemez. Yüksek voltaj, yüksek endüktans seviyesi üretir. B faz akısını C faz akısının değerine göre yükseltir. Sonuç olarak B ve C fazlarındaki akı hızlı bir şekilde eşitlenir ve kalıcı akı etkisini eler. Bu durum "nüve akı eşitlenmesi" olarak belirtilir.

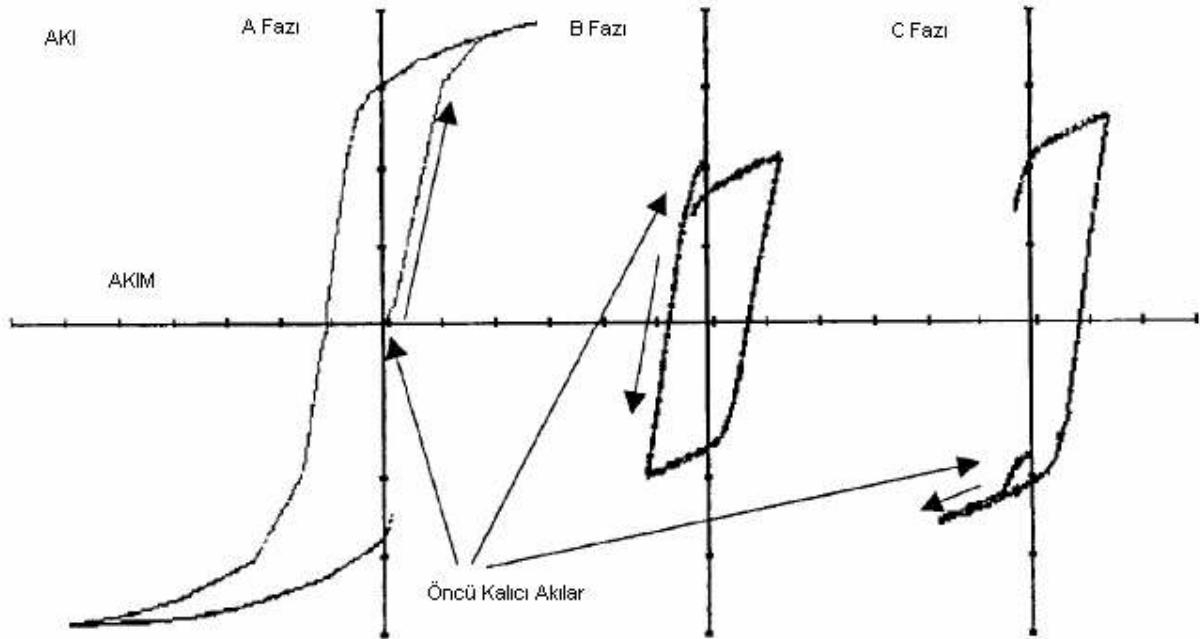
Çoğu üç fazlı transformatörde ana nüve ayaklarındaki akı toplamı sıfırdır. Bu durum üç ayak nüveli transformatörler ve delta sargı için geçerlidir. Bu durum delta bağı olmayan tek fazlı, beş bacaklı yada manto tipi transformatörler için geçerli değildir.

Beklenen akılar ile nüve akılarının toplamının sıfır olması gerektiğinden meydana gelen nüve akıları, her döngüde beklenen akıların iki katına eşit olmalıdır. Bu Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Kalıcı akının polaritesine bağlı olarak dinamik nüve akısı ve beklenen akı "B" veya "C" ile işaretlenmiş noktalarda eşit olacaktır. Bu noktalar diğer iki fazı nüvede doyum olmadan

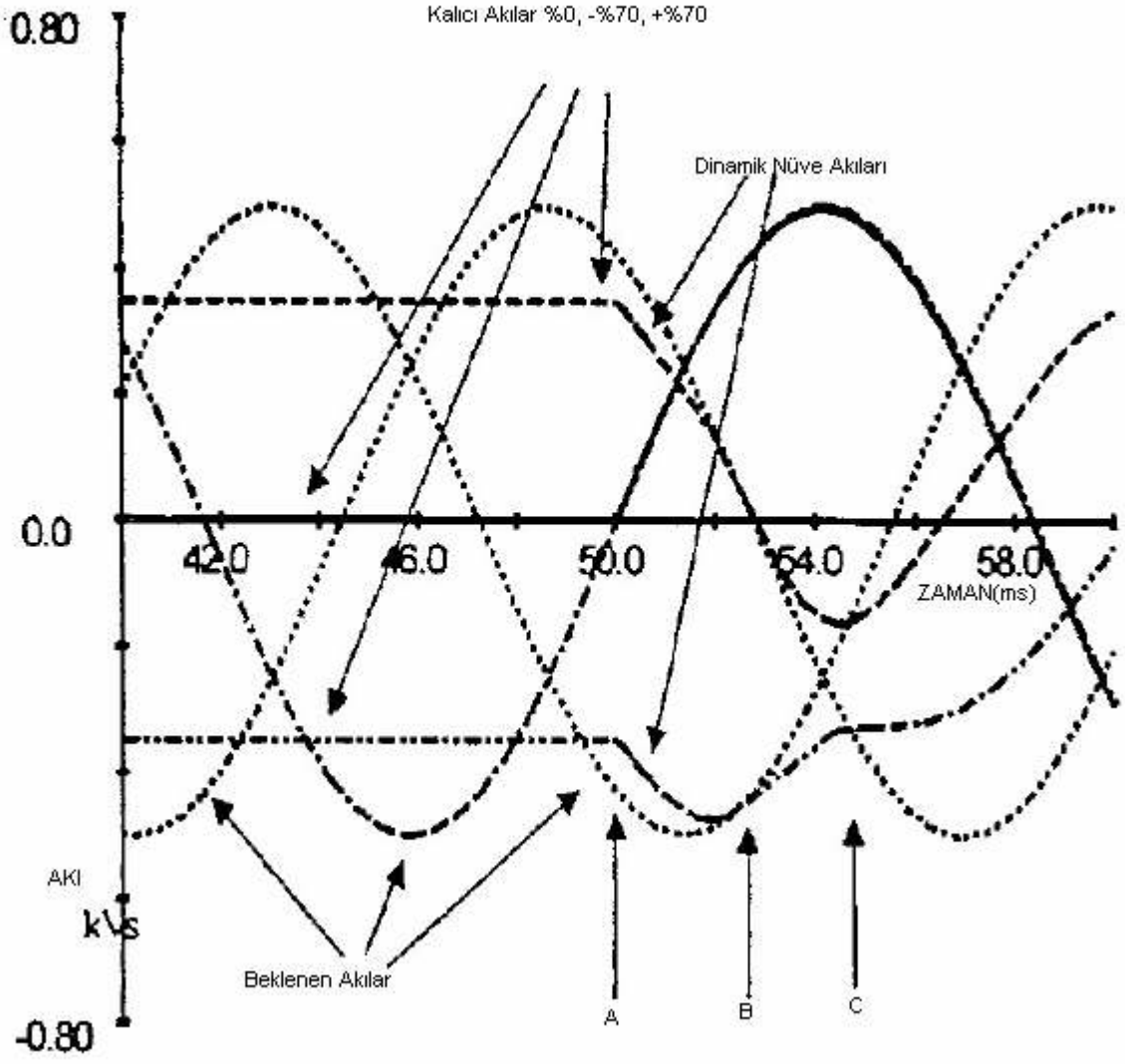
enerjileme imkânı tanır. Bu kapama stratejisine “hızlı kapama” denir. “B” olarak işaretlenmiş nokta kapatma zamanlama hatası konusunda “C” olarak belirlenmiş noktadan daha toleranslıdır. Beklenen ve dinamik akı periyot boyunca milisaniye mertebesinde birbirine eşittir. Bu durum “C” noktasında geçerli değildir.

Başka bir kapama seçeneği de Şekil 3.6’da elde edilebilir. “A” noktasında ilk faz kapatılır, diğer iki fazdaki dinamik ve beklenen akılar aşağı yukarı eşittir. Bu yüzden bu kalıcı akı şekli için en uygundur. Eğer kalıcı akılar bu iki fazda biraz fazla olursa, “A” noktası üç fazın anlık kapaması için en uygun nokta olur. Bu durum bazı düşük voltaj sistemleri için avantaj sunar. Buna eşzamanlı kapama stratejisi denir.

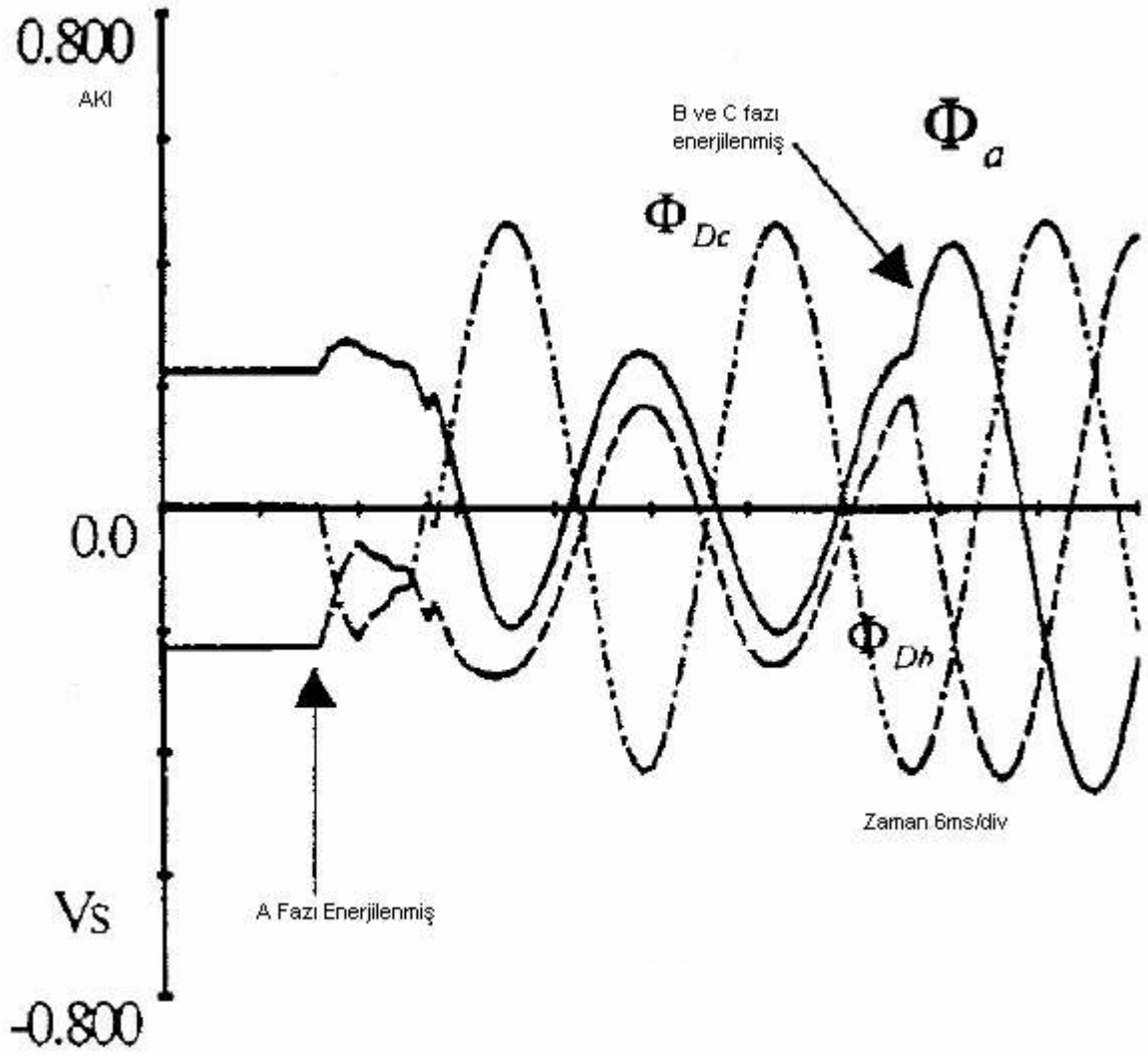
Önceden ifade edildi gibi bir faz enerjilendikten sonra diğer fazlardaki kalıcı akı “nüve akı eşitlenmesi” tarafından hızlıca elenir. Bu demektir ki kalıcı ve beklenen nüve akıları eşitken ve son iki fazın kapaması birkaç döngü gecikmişken, bu iki fazdaki kalıcı akı ihmal edilebilir. Buna “gecikme kapama stratejisi denir”. Bu strateji laboratuvar transformatörünün test enerjilenmesi ile Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Akı – akım nüve karakteristikleri. A fazı enerjilendikten sonra, diğer iki fazdaki dinamik akı, hızlı nüve akı eşitlenmesine neden olan endüktans farkına neden olur.



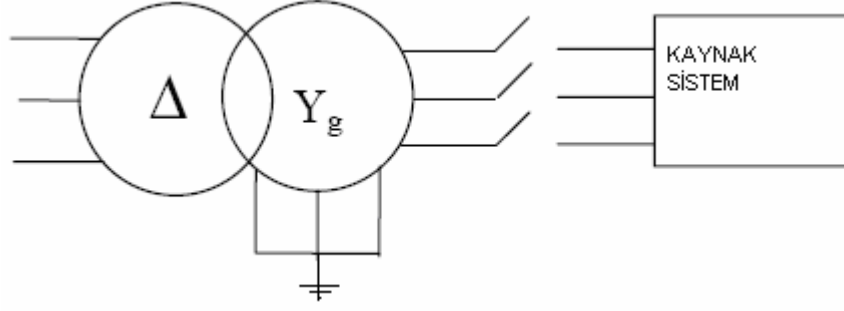
Şekil 3.6 Kalıcı akılı üç faz transformator için beklenen ve dinamik nüve akıları.



Şekil 3.7 Gecikmeli kapama stratejisi ile enerjilenen transformatör için akı dalga şekli

4. GEÇİCİ REJİM AKIMINI AZALTMAK İÇİN ÖNERİLEN YAKLAŞIM

Önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi geçici rejim akımı transformatörün anahtarlandığı anın doğru seçilmesi ile azaltılabilir. Bu kısımda transformatörün enerjilendiği anın geçici rejim akımına olan etkisi simülasyon üzerinde incelenecek, ayrıca en uygun anahtarlama anı da araştırılacaktır. Kullanılan simülasyon şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Kullanılan simülasyon şeması Yg tarafı enerjili Yg-Delta

4.1 Simülasyon Değerleri

Simülasyon sonuçlarına ulaşmak için Pspice programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon modeli Yg tarafı enerjili Yg – Delta’dır.

Pspice simülasyonu kullanılarak güç sisteminin transientleri çalışılmıştır. Simülasyonlar anahtarlama biçiminin etkilerini kararlaştırmak için kullanılmıştır. Güç sisteminin davranışına ulaşmak için test konfigürasyonları üretilmiştir.

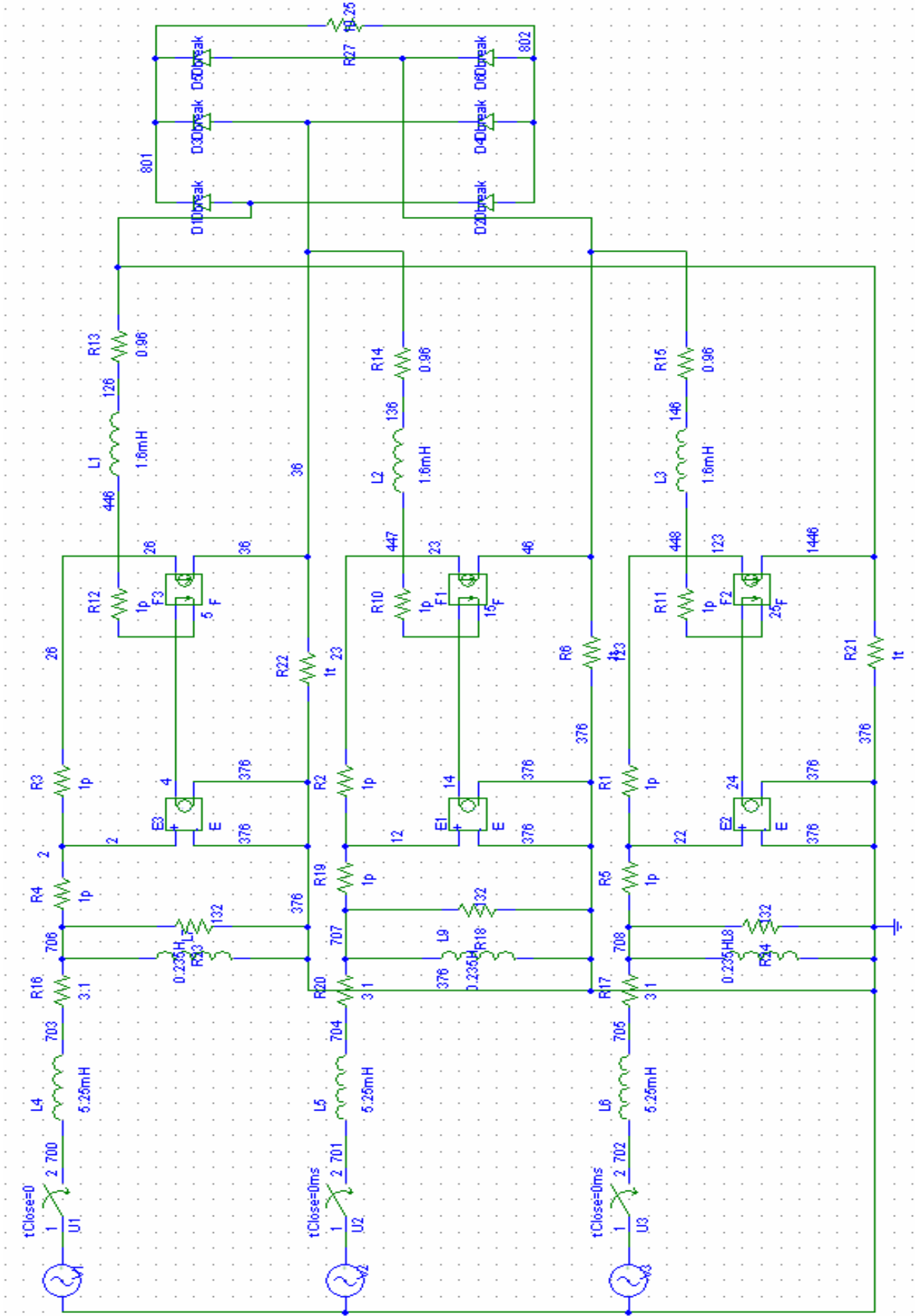
- Voltaj değerinin sıfırdan geçtiği anda yapılan anahtarlamanın akım üzerindeki etkisi.
- Voltajın doruk değerinde yapılan anahtarlamanın akım üzerindeki etkisi.
- Transformatörün ardıl anahtarlanması ile geçici rejim akımının azaltılması

Simülasyonlar sekonder sargıya doğrultucu bağlı ve transformatör yüklü iken gerçekleştirilmiştir.

Modellemede 1 KVA kapasiteli 240V Wye / 120V Delta transformatör kullanılmıştır.

4.2 Devre Kesicinin Üç Fazının Eş Zamanlı Kapatılması

Öncelikle devre kesicinin üç fazının eş zamanlı kapatıldığı konfigürasyon yapılandırıldı. Anahtarlama voltaj değeri sıfırken ve akı maksimum değerinde iken gerçekleştirildi. Kullanılan model Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatorün pspice programında kullanılan modeli (Model üzerinde eş zamanlı anahtarlama gerçekleştirilmiştir.)

4.3 Şekil 4.2 için Pspice Simülasyon Parametrelerinin Dosyası

* Schematics Netlist *

R_R1 22 123 1p

R_R2 12 23 1p

R_R3 2 26 1p

F_F1 23 46 VF_F1 0.5

VF_F1 14 15 0V

F_F2 123 1446 VF_F2 0.5

VF_F2 24 25 0V

X_U1 \$N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

F_F3 26 36 VF_F3 0.5

VF_F3 4 5 0V

R_R4 706 2 1p

R_R5 708 22 1p

R_R6 0 46 1t

E_E1 14 0 12 0 0.5

R_R10 15 447 1p

R_R11 25 448 1p

R_R12 5 446 1p

R_R19 707 12 1p

R_R21 0 1446 1t

E_E2 24 0 22 0 0.5

R_R22 0 36 1t

E_E3 4 0 2 0 0.5

D_D1 1446 801 Dbreak

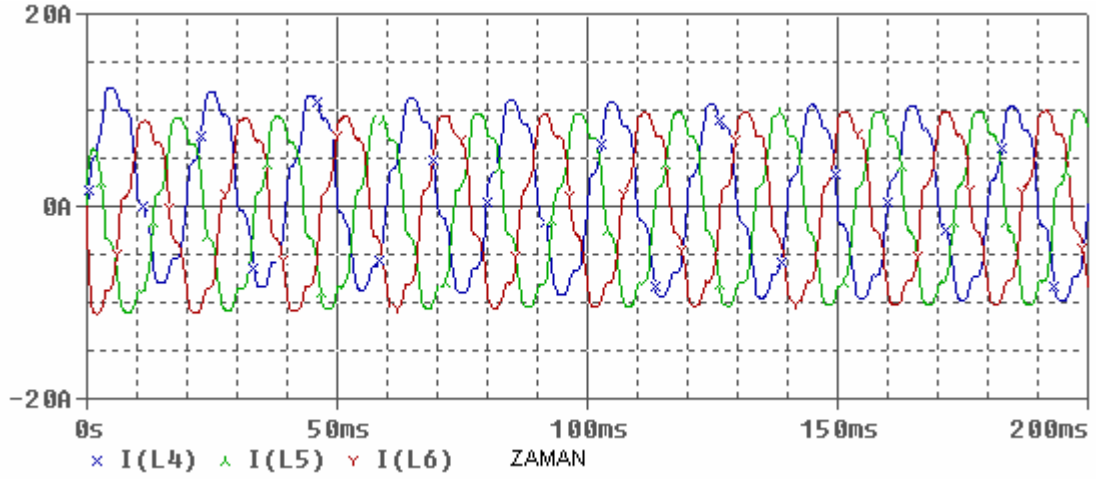
D_D2 802 1446 Dbreak
 D_D4 802 36 Dbreak
 D_D3 36 801 Dbreak
 D_D5 46 801 Dbreak
 D_D6 802 46 Dbreak
 L_L4 700 703 5.25mH
 L_L5 701 704 5.25mH
 L_L6 702 705 5.25mH
 L_L7 706 0 0.235H
 L_L9 707 0 0.235H
 L_L8 708 0 0.235H
 R_R23 0 706 132
 R_R18 0 707 132
 R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH
 L_L3 448 146 1.6mH
 R_R13 126 1446 0.96
 R_R14 136 36 0.96
 R_R15 146 46 0.96
 R_R27 802 801 10.25
 X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 +SIN 0 240V 50 0 0 0
 +SIN 0 240V 50 0 0 120

+SIN 0 240V 50 0 0 240

R_R16 703 706 3.1

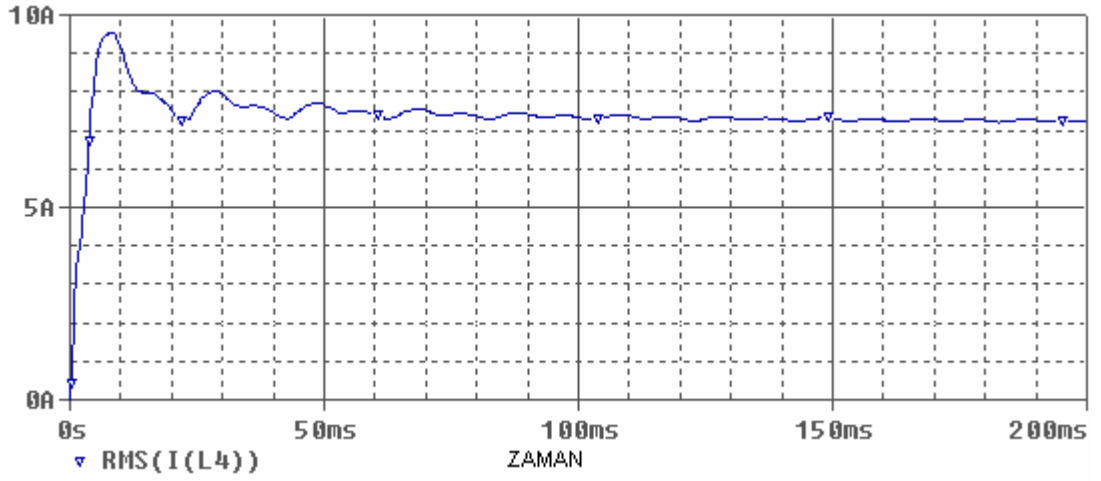
R_R20 704 707 3.1

R_R17 705 708 3.1

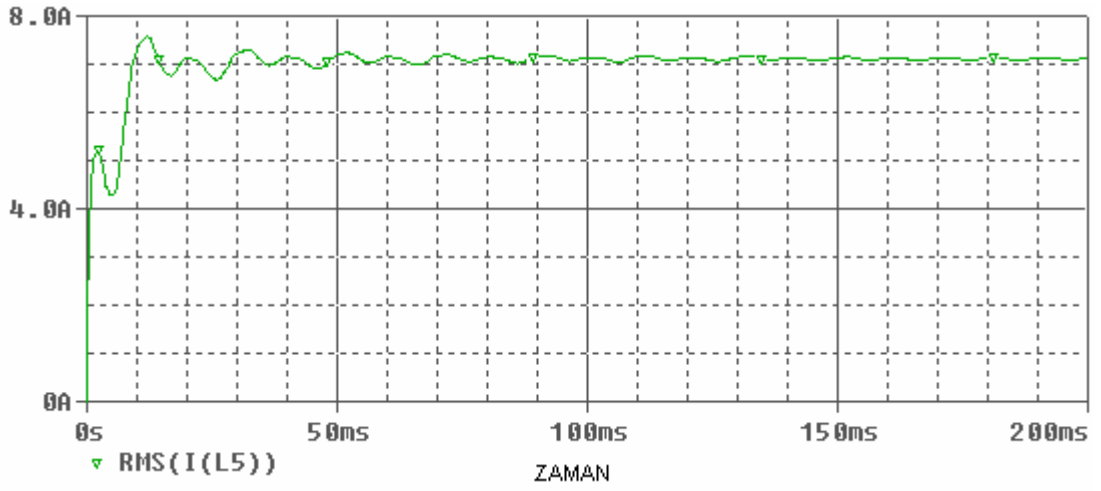


Şekil 4.3 Transformatörün eş zamanlı anahtarlanması durumunda akımın dalga şekli Şekil 4.3’de görüldüğü gibi voltajın sıfır olduğu anda yapılan eş zamanlı anahtarlama, akımın üç fazında da doruk değerinin yükselmesine neden oldu. Yükselme normal değerin %30’u civarında gerçekleşti. Akım anahtarlamadan yaklaşık 200ms sonra yerleşip normal döngüsünü sürdürdü.

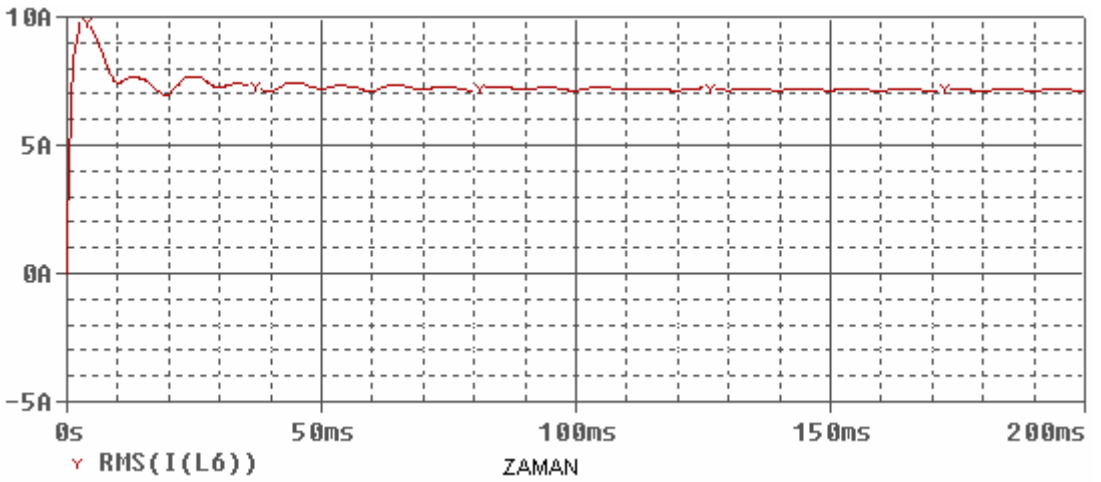
Anahtarlamanın hemen ardından oluşan geçici rejim akımının sebebi, anahtarlamanın akı değerinin doruk noktasında iken yapılmış olması ve anahtarlamanın senkronize olarak gerçekleştirilmemiş olmasıdır. Burada nüve doyumu oluşmuş ve doyum sırasında, akımın az miktardaki yükselişi akımda büyük yükselmelere neden olmuştur.



Şekil 4.4 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.5 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.6 C fazı için akımın rms değeri

4.4 Voltaj doruk değeri iken transformatörün eş zamanlı anahtarlanması

İkinci konfigürasyon voltaj doruk değeri iken yapılan anahtarlamamanın akım üzerindeki etkisini görmek için gerçekleştirildi. Bu durumda akı sıfırdan geçmektedir. Kullanılan modelin şekli (Şekil 4.2) ile aynıdır. Farklı olarak her fazdaki voltaj açısı 90° ileri alınmış böylece akı değerinin sıfır olduğu an anahtarlama gerçekleştirilmiştir.

4.5 Voltajın Doruk Değeri Anahtarlanan Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

R_R1 22 123 1p

R_R2 12 23 1p

R_R3 2 26 1p

F_F1 23 46 VF_F1 0.5

VF_F1 14 15 0V

F_F2 123 1446 VF_F2 0.5

VF_F2 24 25 0V

X_U1 \$N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

F_F3 26 36 VF_F3 0.5

VF_F3 4 5 0V

R_R4 706 2 1p

R_R5 708 22 1p

R_R6 0 46 1t

E_E1 14 0 12 0 0.5

R_R10 15 447 1p

R_R11 25 448 1p

R_R12 5 446 1p

R_R19 707 12 1p

R_R21 0 1446 1t
 E_E2 24 0 22 0 0.5
 R_R22 0 36 1t
 E_E3 4 0 2 0 0.5
 D_D1 1446 801 Dbreak
 D_D2 802 1446 Dbreak
 D_D4 802 36 Dbreak
 D_D3 36 801 Dbreak
 D_D5 46 801 Dbreak
 D_D6 802 46 Dbreak
 +SIN 0 240V 50 0 0 90
 +SIN 0 240V 50 0 0 210
 +SIN 0 240V 50 0 0 330
 L_L4 700 703 5.25mH
 L_L5 701 704 5.25mH
 L_L6 702 705 5.25mH
 L_L7 706 0 0.235H
 L_L9 707 0 0.235H
 L_L8 708 0 0.235H
 R_R23 0 706 132
 R_R18 0 707 132
 R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH
 L_L3 448 146 1.6mH
 R_R13 126 1446 0.96
 R_R14 136 36 0.96

R_R15 146 46 0.96

R_R27 802 801 10.25

X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

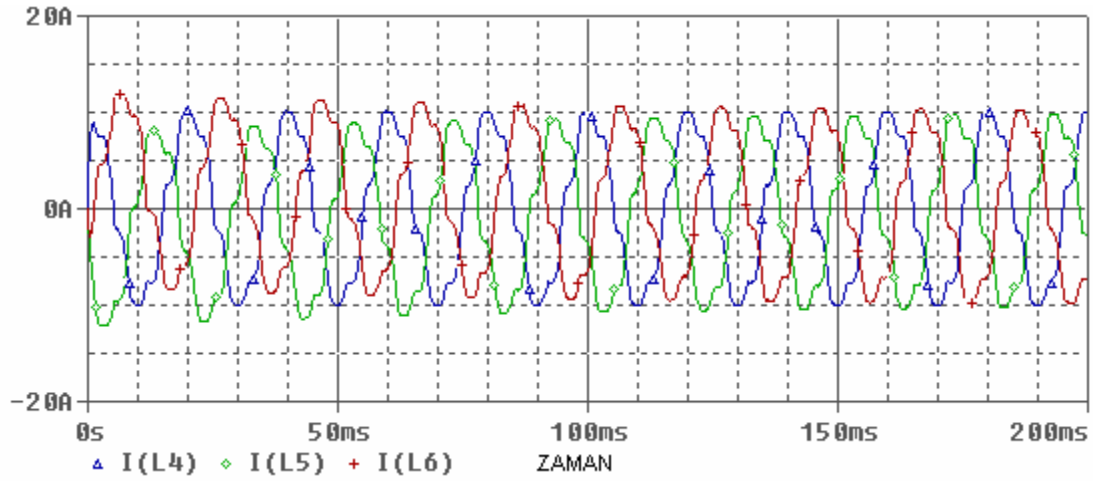
X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

R_R20 704 707 3.1

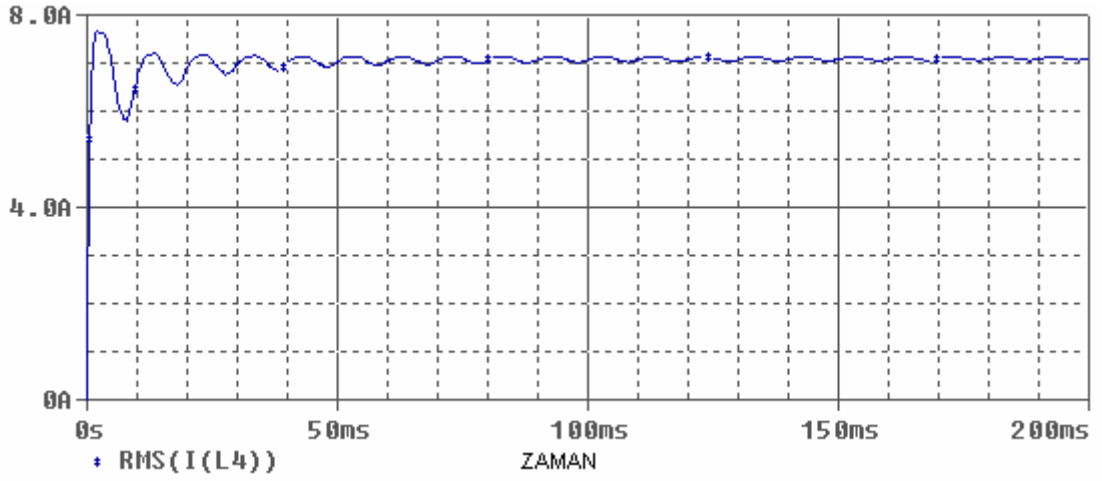
R_R16 703 706 3.1

R_R17 705 708 3.1

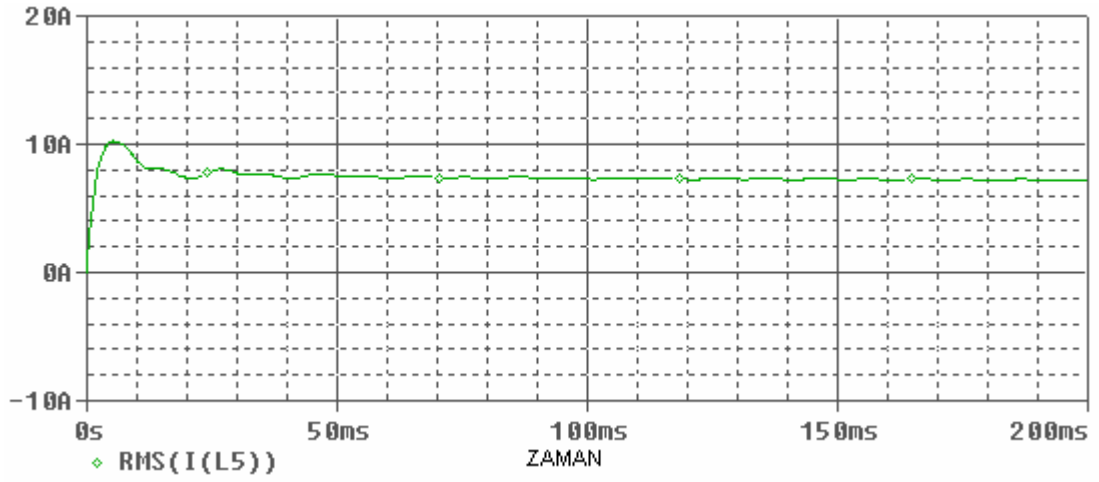


Şekil 4.7 Voltajın doruk değerinde olduğu anda eş zamanlı enerjilenen üç faz transformatör için akım dalga şekli.

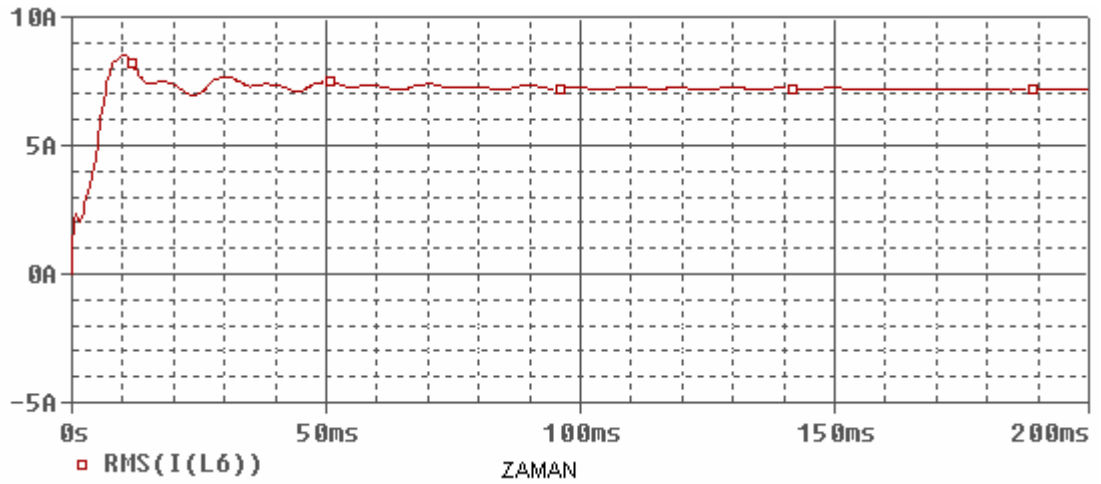
Şekil 4.7’de voltajın doruk değerinde olduğu anda üç fazı eş zamanlı kapatılan transformatör için A, B, ve C fazındaki akım dalga şekilleri görülebilir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi A fazındaki geçici rejim akımı neredeyse ortadan kalkmış akım dengelenmiştir. Çünkü bütün fazlardaki kalıcı akı sıfır iken sinüzoidal voltaj doruğu ilk faz için en uygun kapama anını oluşturur. İlk faz kapatıldıktan sonra diğer iki fazda dinamik nüve akısı oluşur. Bu yüzden B ve C fazlarında anahtarlamanın hemen ardından akımın doruk değerinin normal değerin %20 civarında üzerine çıktığı görülebilir.



Şekil 4.8 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.9 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.10 C fazı için akımın rms değeri

4.6 Fazlar Arası Gecikme ile Kapanan Devre Kesici

Önceki çalışmada eş zamanlı kapamanın tahmin edildiği kadar etkili olmadığı görüldü. Ancak eğer kesici kutuplarının farklı zamanlarda kapatırsak sonuçlar değişecektir. Bu sefer fazlar arasında gecikme olduğu varsayılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. (B fazı için 33ms, C fazı için 66ms) Kapama anı her kutup için ayrı olarak seçilebilir. Kullanılan simülasyon modeli Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

4.7 Fazlar Arası Gecikme ile Anahtarlanan Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

R_R1 22 123 1p

R_R2 12 23 1p

R_R3 2 26 1p

F_F1 23 46 VF_F1 0.5

VF_F1 14 15 0V

F_F2 123 1446 VF_F2 0.5

VF_F2 24 25 0V

X_U1 \$N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

F_F3 26 36 VF_F3 0.5

VF_F3 4 5 0V

R_R4 706 2 1p

R_R5 708 22 1p

R_R6 0 46 1t

E_E1 14 0 12 0 0.5

R_R10 15 447 1p

R_R11 25 448 1p

R_R12 5 446 1p

R_R19 707 12 1p

R_R21 0 1446 1t
 E_E2 24 0 22 0 0.5
 R_R22 0 36 1t
 E_E3 4 0 2 0 0.5
 D_D1 1446 801 Dbreak
 D_D2 802 1446 Dbreak
 D_D4 802 36 Dbreak
 D_D3 36 801 Dbreak
 D_D5 46 801 Dbreak
 D_D6 802 46 Dbreak
 V_V1 \$N_0001 0
 +SIN 0 240V 50 0 0 90
 V_V2 \$N_0002 0
 +SIN 0 240V 50 0 0 210
 V_V3 \$N_0003 0
 +SIN 0 240V 50 0 0 330
 L_L4 700 703 5.25mH
 L_L5 701 704 5.25mH
 L_L6 702 705 5.25mH
 L_L7 706 0 0.235H
 L_L9 707 0 0.235H
 L_L8 708 0 0.235H
 R_R23 0 706 132
 R_R18 0 707 132
 R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH

L_L3 448 146 1.6mH

R_R13 126 1446 0.96

R_R14 136 36 0.96

R_R15 146 46 0.96

R_R27 802 801 10.25

X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=33ms ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=66ms ttran=1u Rclosed=0.01

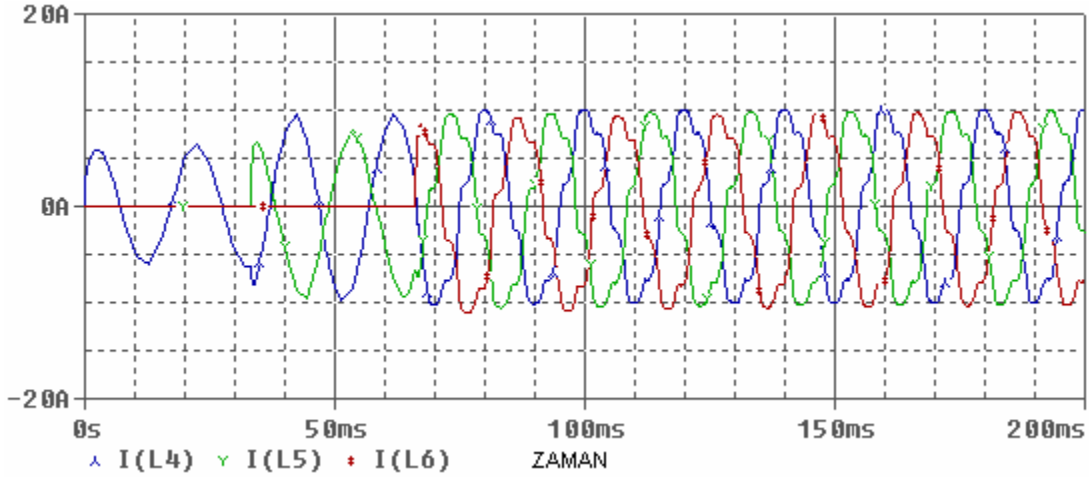
+ Ropen=1Meg

R_R16 703 706 3.1

R_R20 704 707 3.1

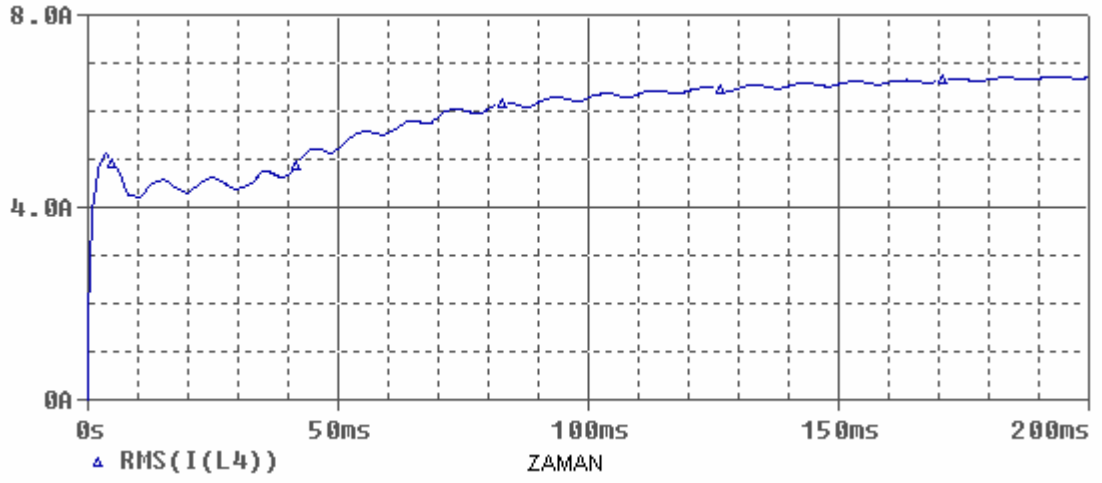
R_R17 705 708 3.1

Şekil 4.11 Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan modeli (Transformatör sekonderine üç faz doğrultucu bağlanmıştır ve transformatör yüklüdür.)

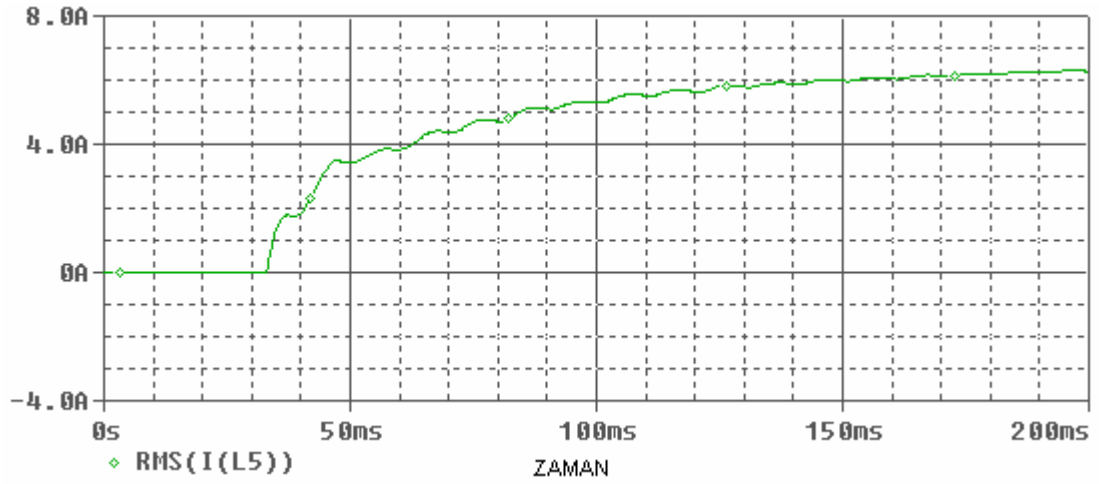


Şekil 4.12 Fazlar arası gecikme ile kapanan transformatörün primerindeki akım dalga şekli

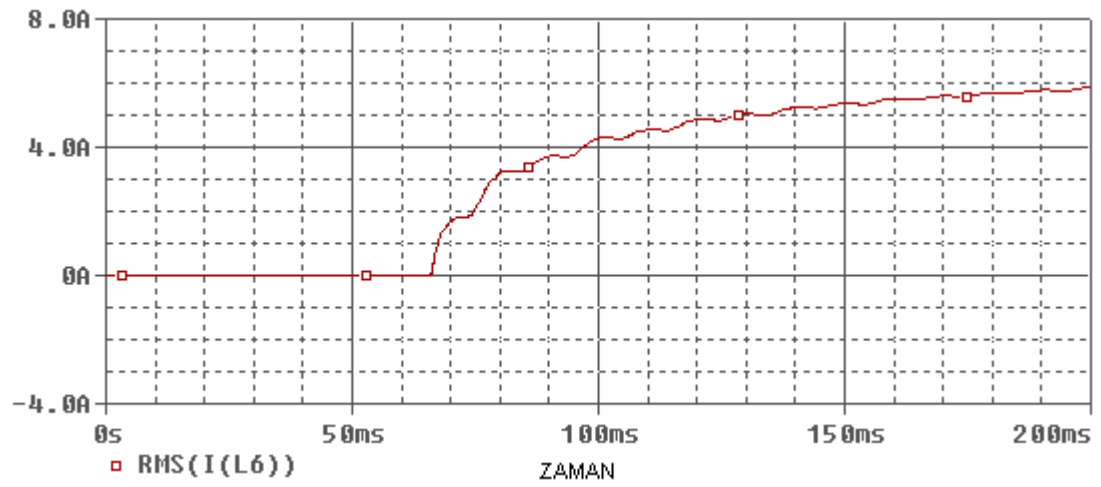
Bu uygulama sayesinde her fazdaki geçici rejim akımında belirgin bir düzelme olduğu gözlemlenebilir. Üç fazlı transformatör anahtarlamasında ideal zaman voltajın doruk değerinde olduğu, akının ise sıfır olduğu andır. Her fazın bir öncekinden bir periyot zaman geçtikten sonra anahtarlandığı ardıl kapama tekniği ile ideal transformatör anahtarlama sistemine ulaşılmıştır. Fazların enerjilendiği anda beklenen akı ile dinamik akının değeri birbirine eşittir. Bu sayede geçici rejim durumu elenmiştir.



Şekil 4.13: A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.14 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.15 C fazı için akımın rms değeri

4.8 Geçici Rejim Akımının Yıldız-Yıldız Bağlı Transformatörde Ortadan Kaldırılması

Aynı yöntem 1 KVA kapasiteli 224V Wye / 112V Wye transformatör üzerinde de denenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.9 Yıldız – Yıldız Bağlı Transformatör Modeli için Simülasyon Dosyası

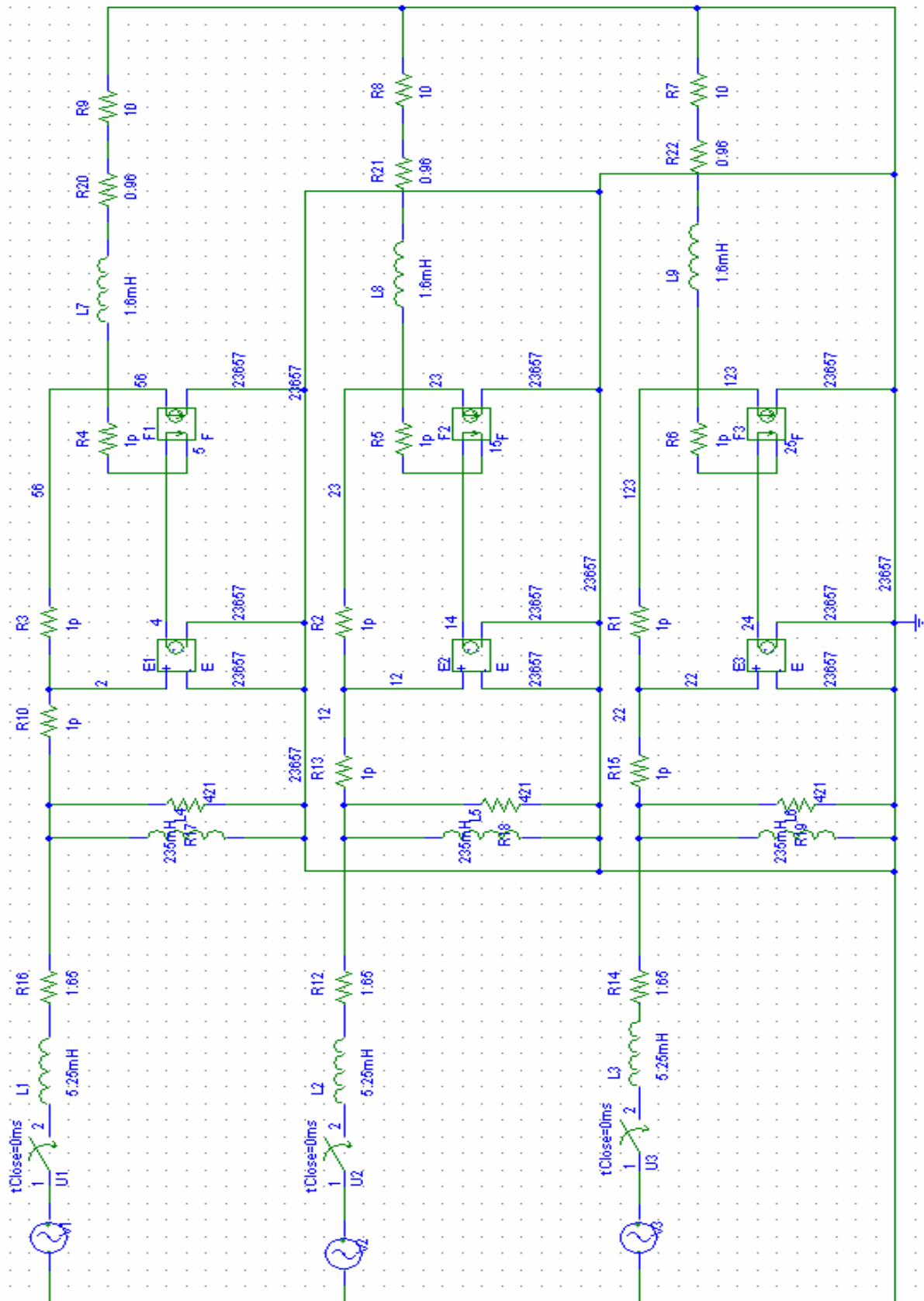
* Schematics Netlist *

```

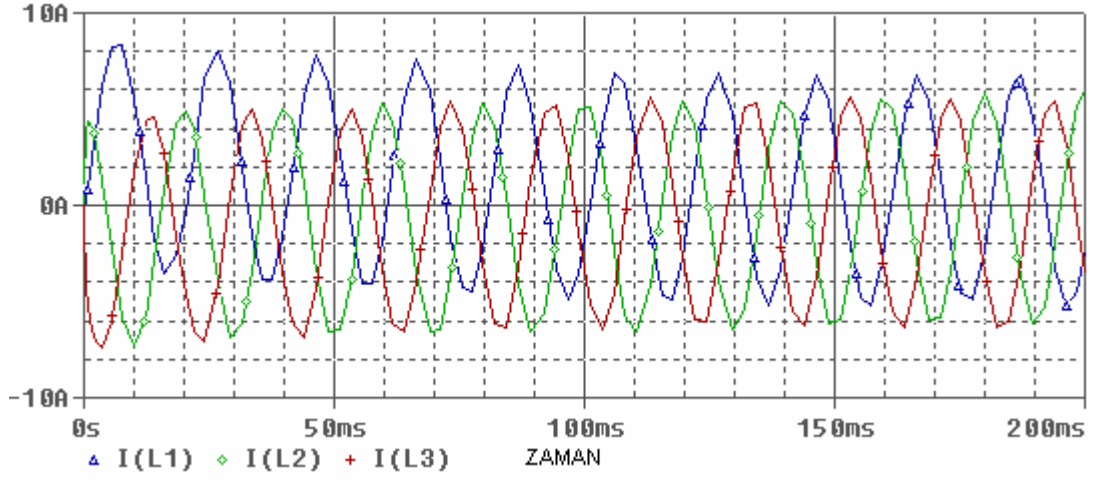
R_R1      22 123 1p
R_R2      12 23 1p
R_R3      2 56 1p
R_R10     $N_0001 2 1p
E_E1      4 0 2 0 0.5
E_E2      14 0 12 0 0.5
E_E3      24 0 22 0 0.5
F_F1      56 0 VF_F1 0.5
VF_F1     4 5 0V
F_F2      23 0 VF_F2 0.5
VF_F2     14 15 0V
F_F3      123 0 VF_F3 0.5
VF_F3     24 25 0V
R_R15     $N_0002 22 1p
R_R13     $N_0003 12 1p
R_R9      $N_0004 0 10
R_R4      5 $N_0005 1p
R_R5      15 $N_0006 1p
R_R7      $N_0007 0 10
R_R6      25 $N_0008 1p
R_R16     $N_0009 $N_0001 1.65
R_R12     $N_0010 $N_0003 1.65
R_R14     $N_0011 $N_0002 1.65
R_R17     0 $N_0001 421
R_R18     0 $N_0003 421
R_R19     0 $N_0002 421
X_U2      $N_0012 $N_0013 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
L_L4      $N_0001 0 235mH

```

L_L5 \$N_0003 0 235mH
 L_L6 \$N_0002 0 235mH
 L_L1 \$N_0014 \$N_0009 5.25mH
 L_L2 \$N_0013 \$N_0010 5.25mH
 L_L3 \$N_0015 \$N_0011 5.25mH
 L_L7 \$N_0005 \$N_0016 1.6mH
 L_L9 \$N_0008 \$N_0017 1.6mH
 R_R20 \$N_0016 \$N_0004 0.96
 R_R22 \$N_0017 \$N_0007 0.96
 X_U1 \$N_0018 \$N_0014 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 L_L8 \$N_0006 \$N_0019 1.6mH
 R_R8 \$N_0020 0 10
 R_R21 \$N_0019 \$N_0020 0.96
 V_V1 \$N_0018 0
 +SIN 0 224V 50 0 0 0
 +SIN 0 224V 50 0 0 120
 +SIN 0 224V 50 0 0 240
 X_U3 \$N_0021 \$N_0015 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 +
 Ropen=1Meg

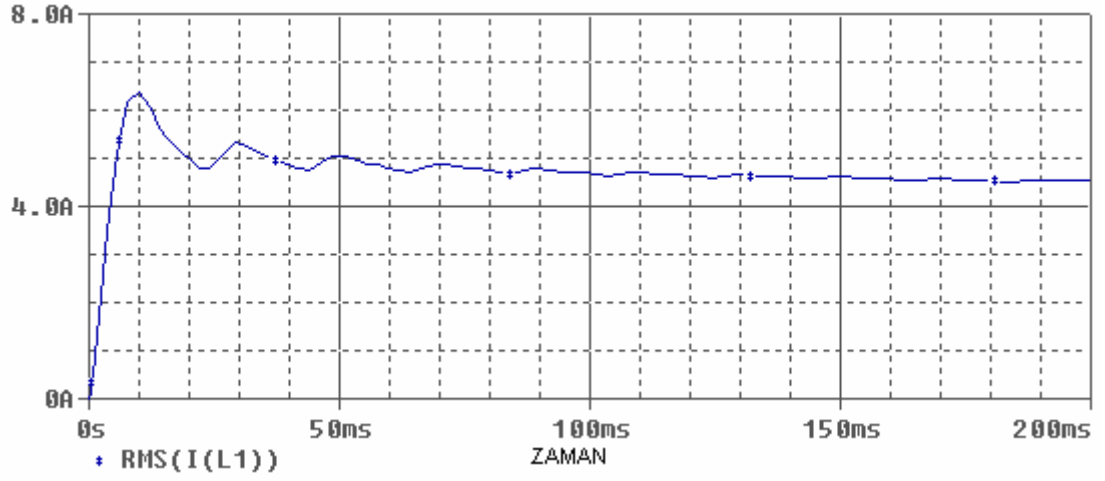


Şekil 4.16 Üç faz yıldız-yıldız bağlı transformatör modeli

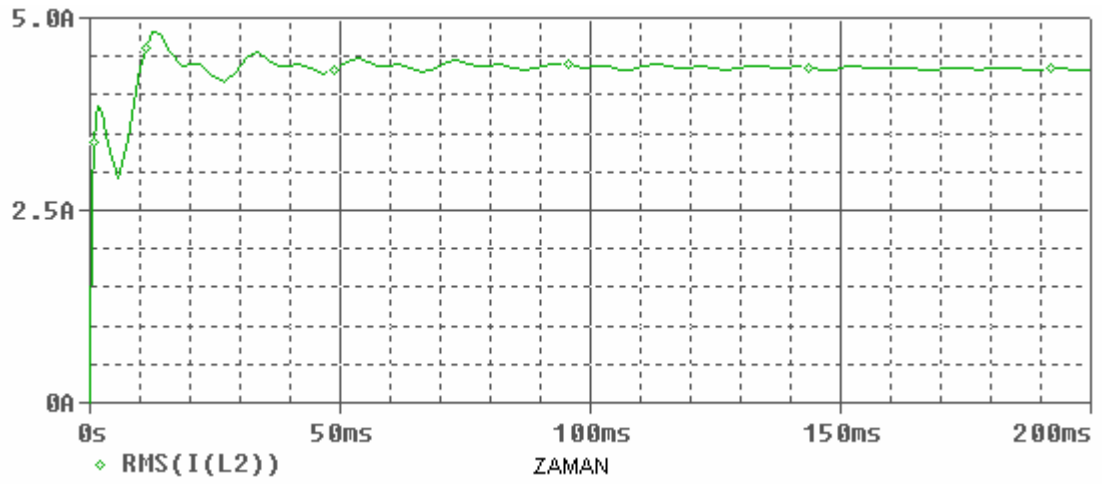


Şekil 4.17 Yıldız – yıldız bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli

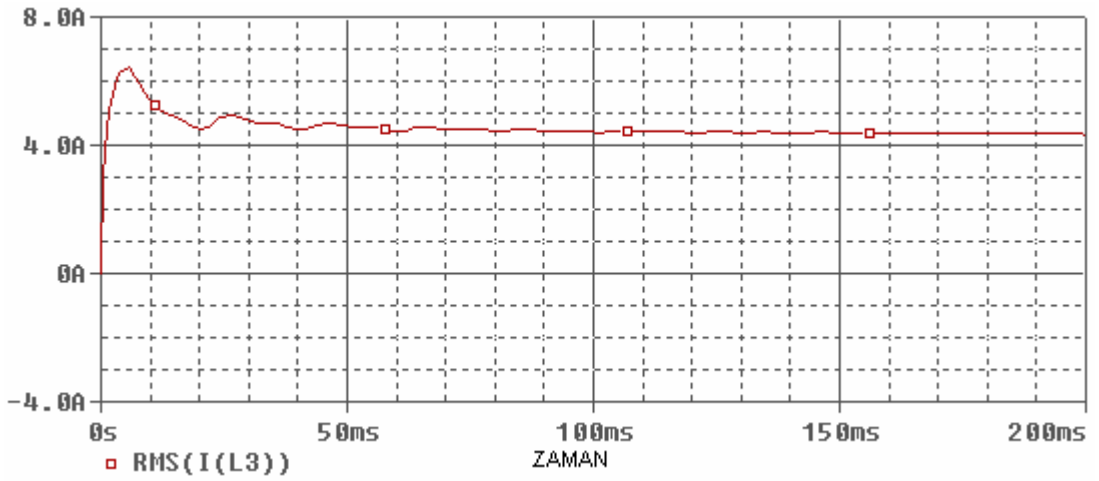
Anahtarlama voltaj dalga şeklinin sıfırdan geçtiği anda yapılmıştır. Akı ise maksimum değerinde bulunmaktadır. Kullanılan kapama yöntemi eş zamanlı kapamadır. Bu koşullar uygulandığında yıldız – yıldız bağlı transformatörün her üç fazında oluşan geçici rejim akımından kaynaklanan bozukluk açıkça görülebilir.(Şekil 4.17)



Şekil 4.18 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.19 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.20 C fazı için akımın rms değeri

4.10 Voltaj doruk değeri iken transformatörün eş zamanlı anahtarlanması

Alternatif olarak yıldız – yıldız bağlı transformatörü voltaj doruk değeri iken anahtarlayalım. Bunun için kullanılan transformatör modelinin şekli (Şekil 4.17) ile aynıdır. Ancak simülasyon dosyasında da görülebileceği gibi voltaj dalgasının değeri her fazda 90 derece ileri alınmıştır.

4.11 Voltajın Doruk Değeri Anahtarlanan Yıldız – Yıldız Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

```

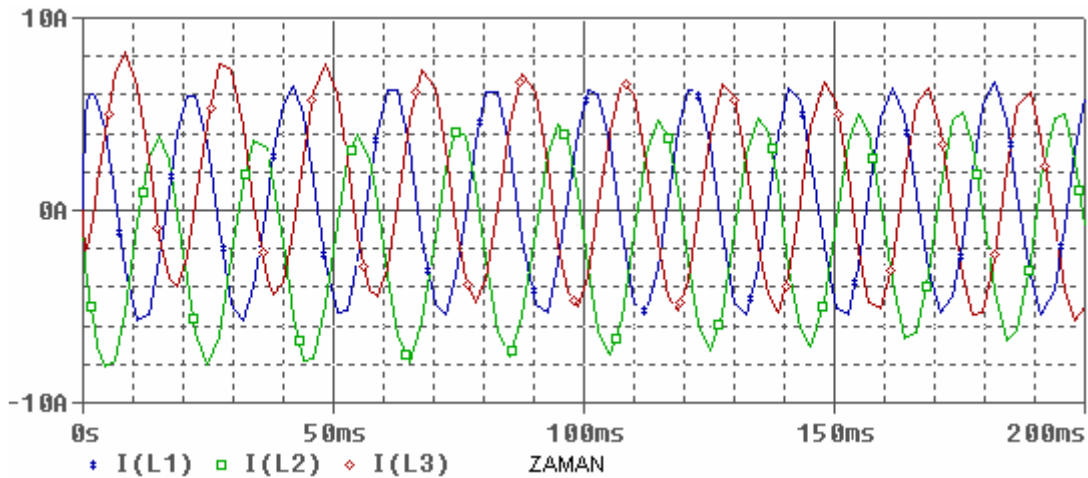
R_R1      22 123 1p
R_R2      12 23 1p
R_R3      2 56 1p
R_R10     $N_0001 2 1p
E_E1      4 0 2 0 0.5
E_E2      14 0 12 0 0.5
E_E3      24 0 22 0 0.5
F_F1      56 0 VF_F1 0.5
VF_F1     4 5 0V
F_F2      23 0 VF_F2 0.5
VF_F2     14 15 0V
F_F3      123 0 VF_F3 0.5
VF_F3     24 25 0V
R_R15     $N_0002 22 1p
R_R13     $N_0003 12 1p
R_R9      $N_0004 0 10
R_R4      5 $N_0005 1p
R_R5      15 $N_0006 1p
R_R7      $N_0007 0 10
R_R6      25 $N_0008 1p
R_R16     $N_0009 $N_0001 1.65
R_R12     $N_0010 $N_0003 1.65
R_R14     $N_0011 $N_0002 1.65
R_R17     0 $N_0001 421
R_R18     0 $N_0003 421

```

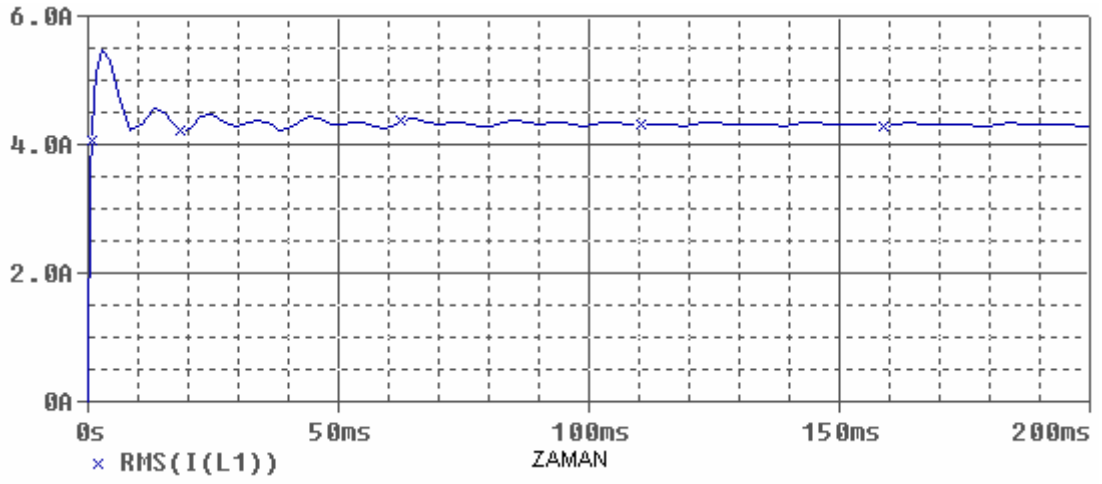
```

R_R19      0 $N_0002 421
+SIN 0 224V 50 0 0 90
+SIN 0 224V 50 0 0 210
+SIN 0 224V 50 0 0 330
X_U2      $N_0013 $N_0015 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
X_U3      $N_0014 $N_0016 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
L_L4      $N_0001 0 235mH
L_L5      $N_0003 0 235mH
L_L6      $N_0002 0 235mH
L_L1      $N_0017 $N_0009 5.25mH
L_L2      $N_0015 $N_0010 5.25mH
L_L3      $N_0016 $N_0011 5.25mH
L_L7      $N_0005 $N_0018 1.6mH
L_L9      $N_0008 $N_0019 1.6mH
R_R20      $N_0018 $N_0004 0.96
R_R22      $N_0019 $N_0007 0.96
X_U1      $N_0012 $N_0017 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
L_L8      $N_0006 $N_0020 1.6mH
R_R8      $N_0021 0 10
R_R21      $N_0020 $N_0021 0.96

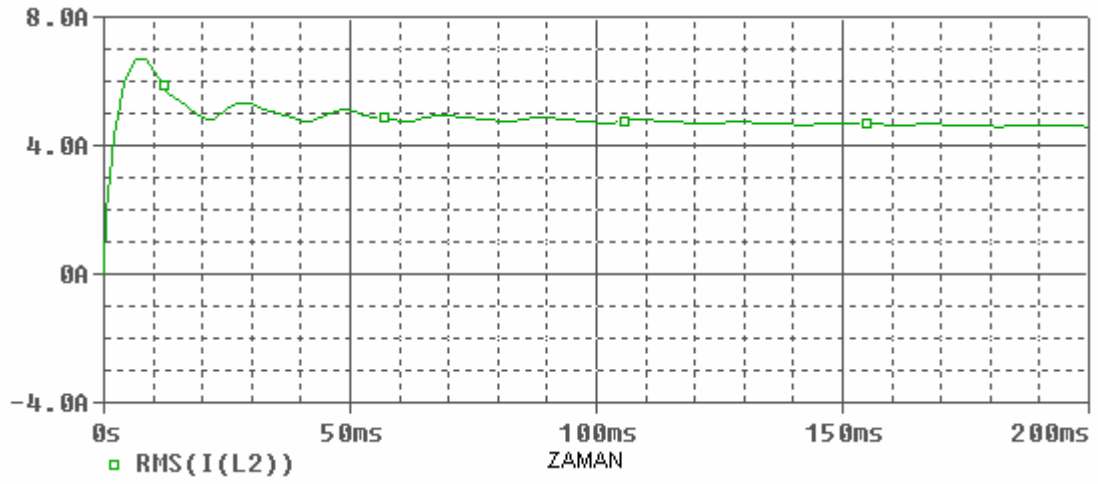
```



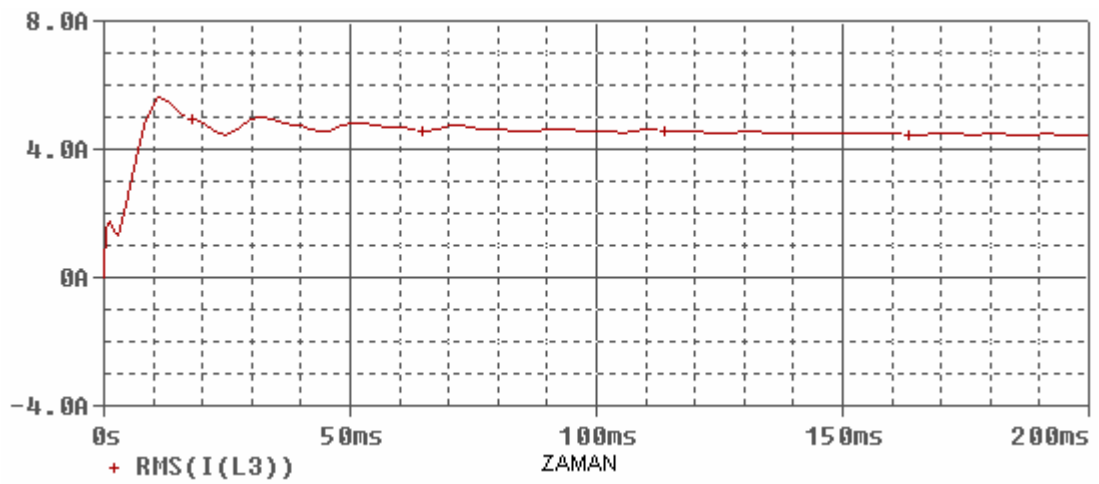
Şekil 4.21 Voltajın doruk değerinde anahtarlanan yıldız – yıldız bağlı transformatör için primer akımın dalga şekli



Şekil 4.22 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.23 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.24 C fazı için akımın rms değeri

4.12 Voltaj Doruk Değerinde iken Transformatörün Ardıl Anahtarlanması

Bu denememizde transformatörü voltaj doruk değerinde iken ardıl anahtarlayacağız.

4.13 Voltajın Doruk Değerinde Ardıl Anahtarlanan Yıldız – Yıldız Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

```

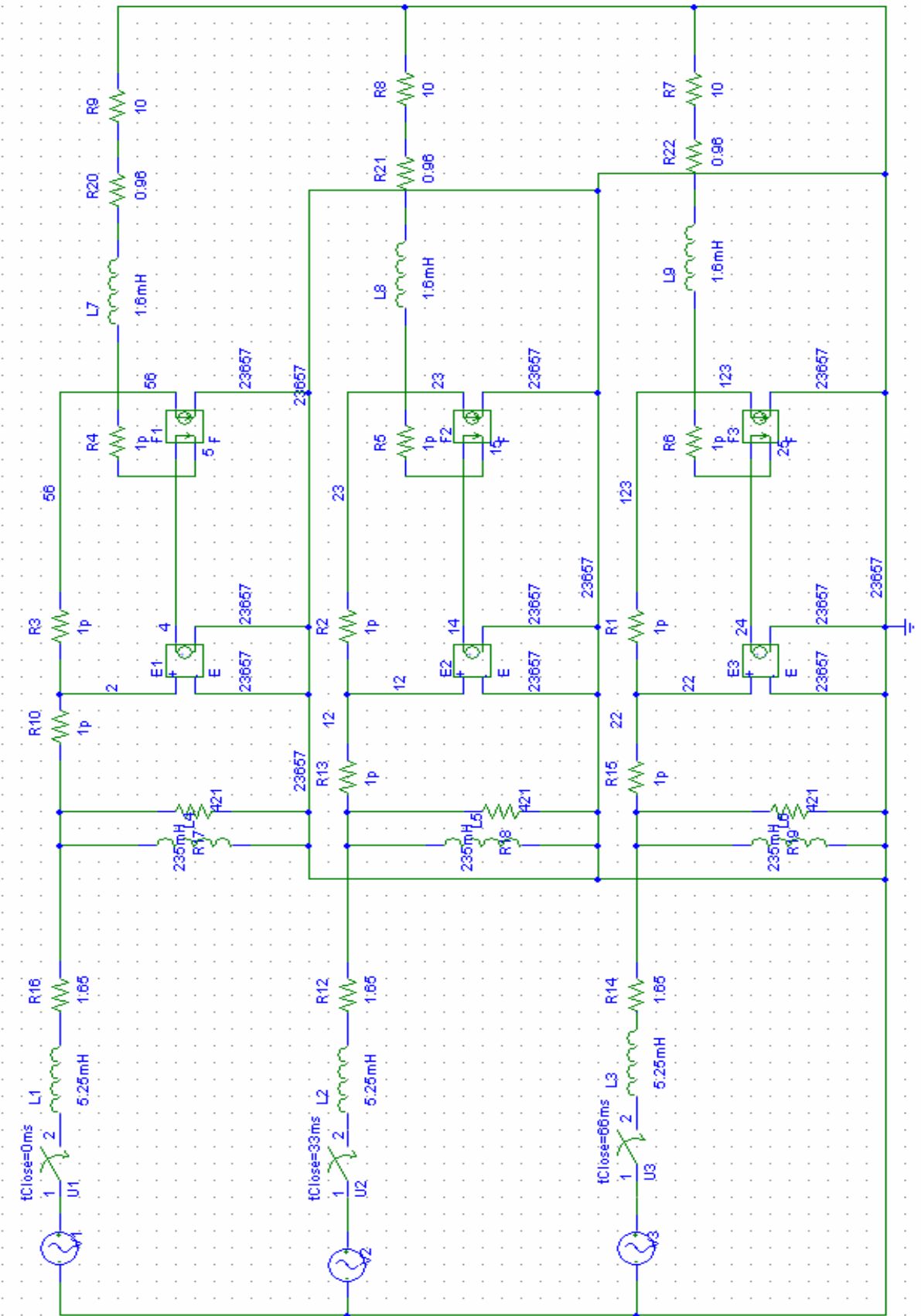
R_R1      22 123 1p
R_R2      12 23 1p
R_R3      2 56 1p
R_R10     $N_0001 2 1p
E_E1      4 0 2 0 0.5
E_E2      14 0 12 0 0.5
E_E3      24 0 22 0 0.5
F_F1      56 0 VF_F1 0.5
VF_F1     4 5 0V
F_F2      23 0 VF_F2 0.5
VF_F2     14 15 0V
F_F3      123 0 VF_F3 0.5
VF_F3     24 25 0V
R_R15     $N_0002 22 1p
R_R13     $N_0003 12 1p
R_R9      $N_0004 0 10
R_R4      5 $N_0005 1p
R_R5      15 $N_0006 1p
R_R7      $N_0007 0 10
R_R6      25 $N_0008 1p
R_R16     $N_0009 $N_0001 1.65
R_R12     $N_0010 $N_0003 1.65
R_R14     $N_0011 $N_0002 1.65
R_R17     0 $N_0001 421
R_R18     0 $N_0003 421
R_R19     0 $N_0002 421
V_V1      $N_0012 0
+SIN 0 224V 50 0 0 90

```

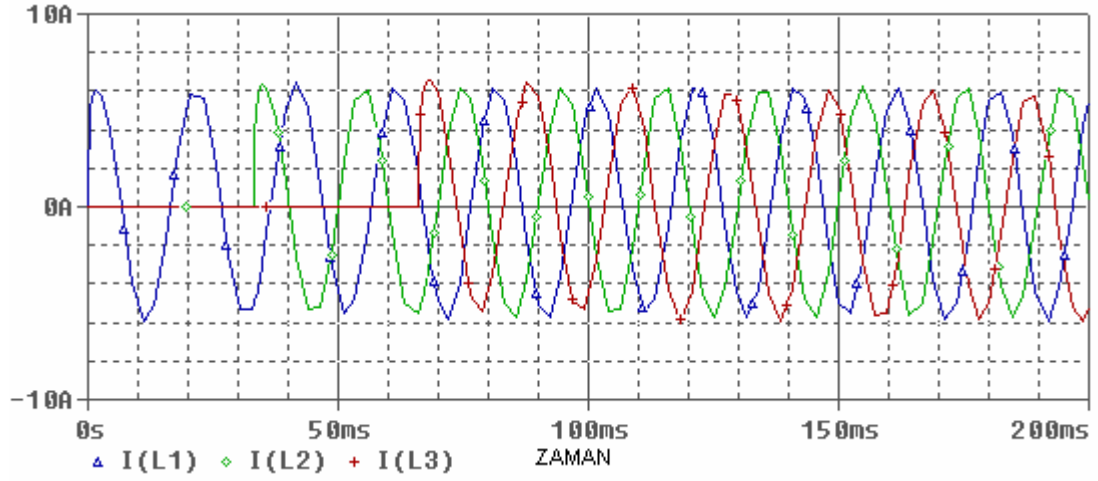
```

V_V2      $N_0013 0
+SIN 0 224V 50 0 0 210
V_V3      $N_0014 0
+SIN 0 224V 50 0 0 330
L_L4      $N_0001 0 235mH
L_L5      $N_0003 0 235mH
L_L6      $N_0002 0 235mH
L_L1      $N_0015 $N_0009 5.25mH
L_L2      $N_0016 $N_0010 5.25mH
L_L3      $N_0017 $N_0011 5.25mH
L_L7      $N_0005 $N_0018 1.6mH
L_L9      $N_0008 $N_0019 1.6mH
R_R20     $N_0018 $N_0004 0.96
R_R22     $N_0019 $N_0007 0.96
X_U1      $N_0012 $N_0015 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
L_L8      $N_0006 $N_0020 1.6mH
R_R8      $N_0021 0 10
R_R21     $N_0020 $N_0021 0.96
X_U2      $N_0013 $N_0016 Sw_tClose PARAMS: tClose=33ms ttran=1u
+ Rclosed=0.01 Ropen=1Meg
X_U3      $N_0014 $N_0017 Sw_tClose PARAMS: tClose=66ms ttran=1u
+ Rclosed=0.01 Ropen=1Meg

```

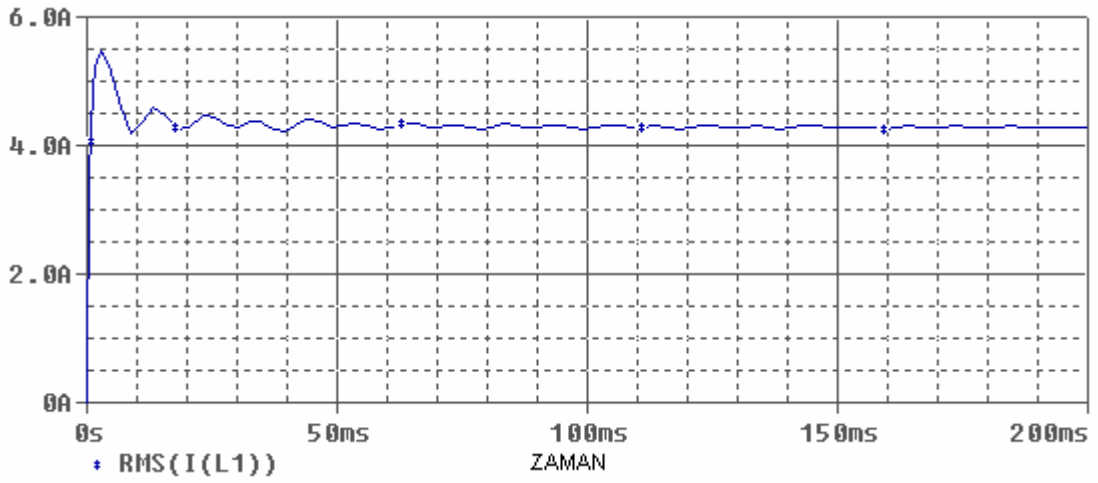


Şekil 4.25 Voltajın doruk değerinde ardıl anahtarlanan yıldız – yıldız transformatör için kullanılan simülasyon modeli

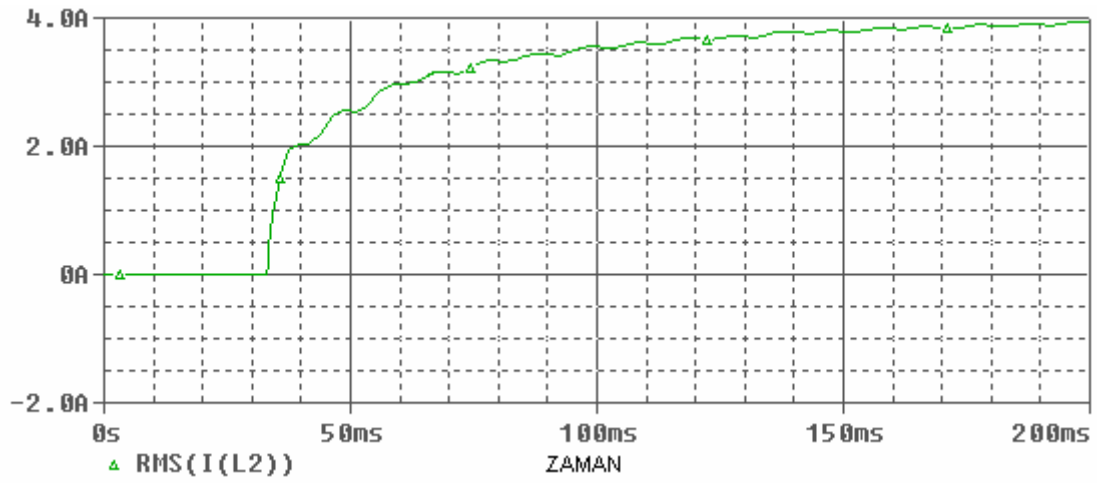


Şekil 4.26 Voltajın doruk değerinde ardıl anahtarlanan yıldız – yıldız bağlı transformatörün primerindeki akım dalga şekli

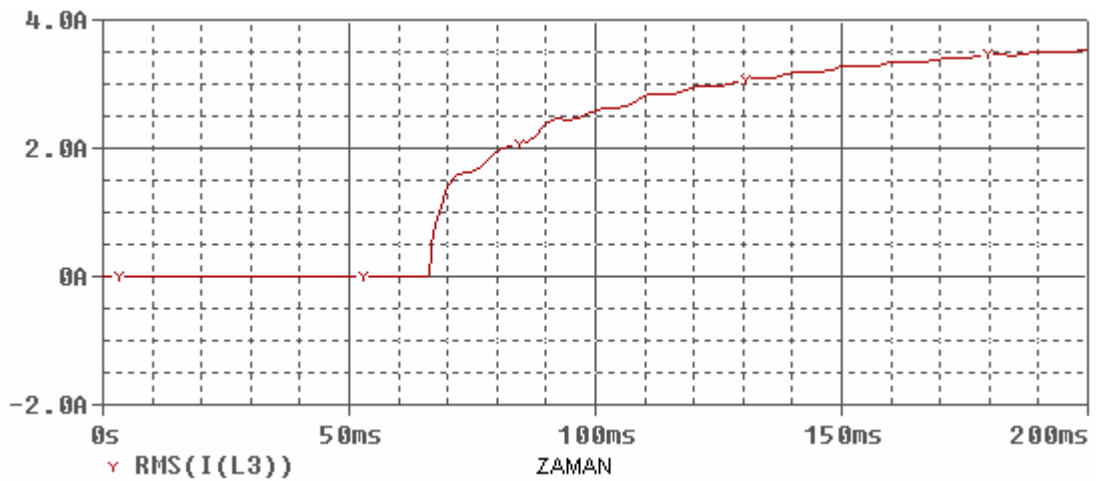
Ardıl anahtarlama tekniği ile geçici rejim akımı elenmiş. Her fazda düzgün akım dalga şekli elde edilmiştir.



Şekil 4.27 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.28 B fazı için akımın dalga şekli



Şekil 4.29 C fazı için akımın rms değeri

4.14 Geçici Rejim Akımının Yıldız-Üçgen Bağlı Transformatörde Ortadan Kaldırılması

Aynı denemeyi yıldız üçgen bağlı transformatörde gerçekleştirelim.

4.15 Yıldız Üçgen Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

R_R1 22 123 1p

R_R2 12 23 1p

R_R3 2 26 1p

F_F1 23 46 VF_F1 0.5

VF_F1 14 15 0V

F_F2 123 1446 VF_F2 0.5

VF_F2 24 25 0V

X_U1 \$N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

R_R4 706 2 1p

R_R5 708 22 1p

R_R6 0 46 1t

E_E1 14 0 12 0 0.5

R_R10 15 447 1p

R_R11 25 448 1p

R_R12 5 446 1p

R_R19 707 12 1p

R_R21 0 1446 1t

E_E2 24 0 22 0 0.5

E_E3 4 0 2 0 0.5

L_L4 700 703 5.25mH

L_L5 701 704 5.25mH

L_L6 702 705 5.25mH

L_L7 706 0 0.235H

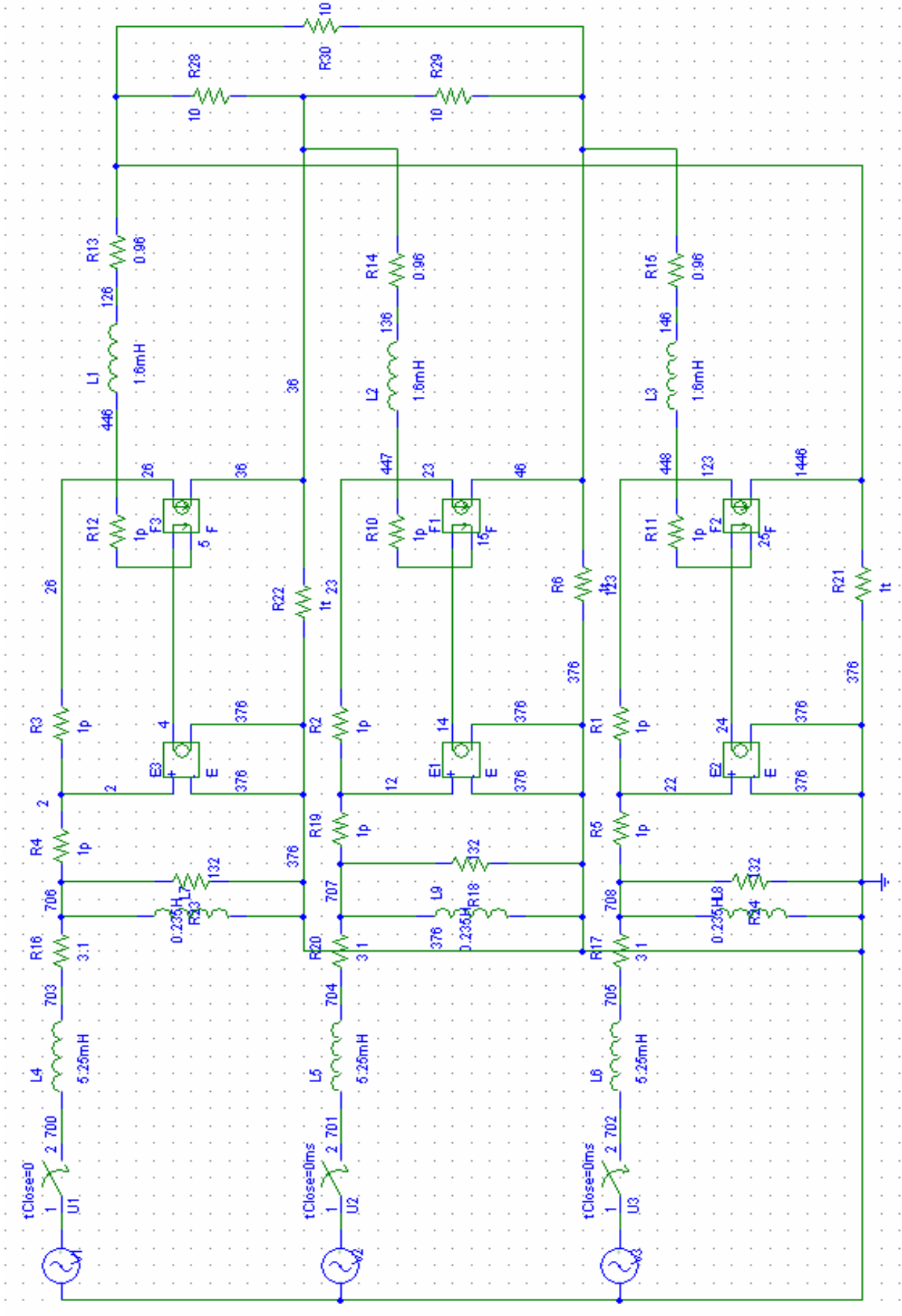
L_L9 707 0 0.235H

L_L8 708 0 0.235H

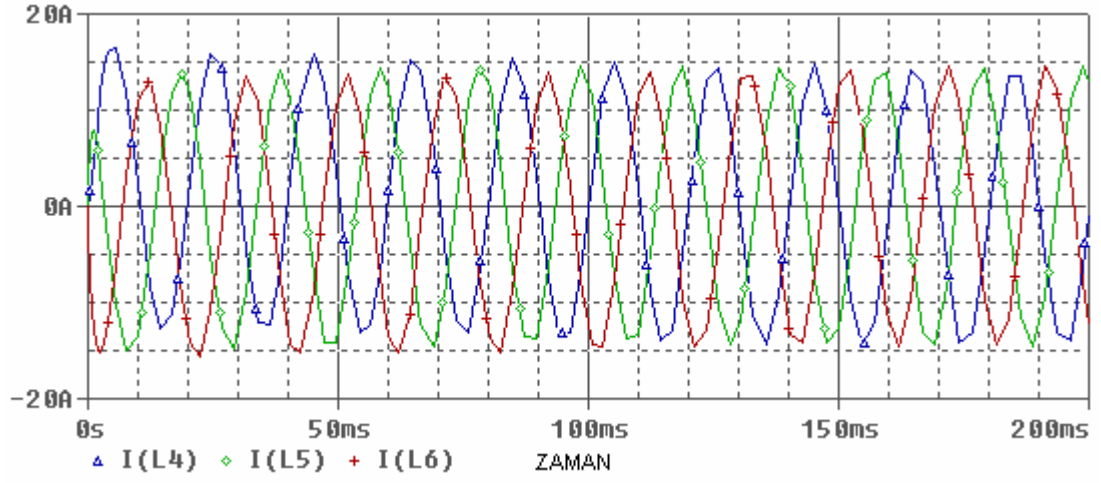
R_R23 0 706 132

R_R18 0 707 132

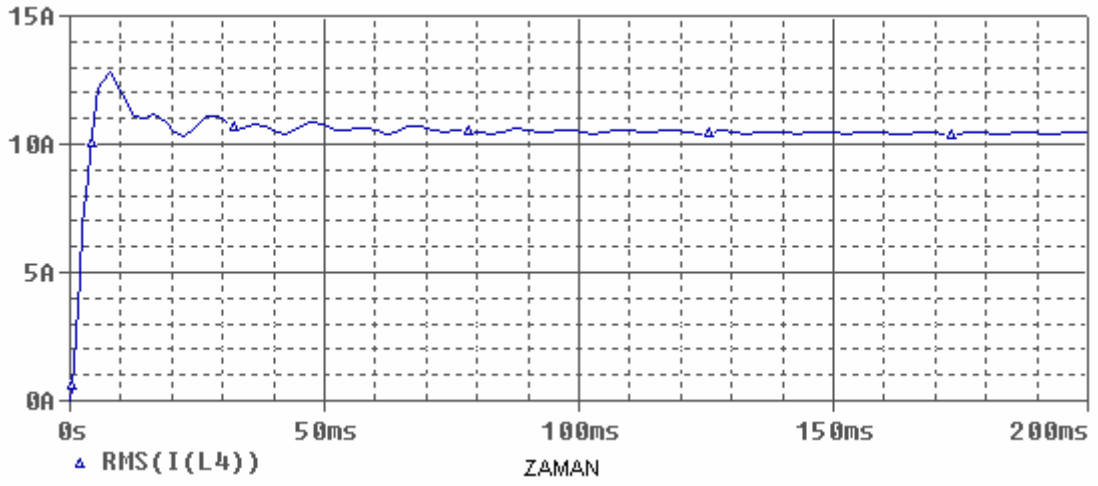
R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH
 L_L3 448 146 1.6mH
 R_R13 126 1446 0.96
 R_R15 146 46 0.96
 X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 +SIN 0 240V 50 0 0 0
 +SIN 0 240V 50 0 0 120
 +SIN 0 240V 50 0 0 240
 R_R16 703 706 3.1
 R_R20 704 707 3.1
 R_R17 705 708 3.1
 R_R28 1446 36 10
 F_F3 26 36 VF_F3 0.5
 VF_F3 4 5 0V
 R_R14 136 36 0.96
 R_R22 0 36 1t
 R_R29 36 46 10
 R_R30 46 1446 10



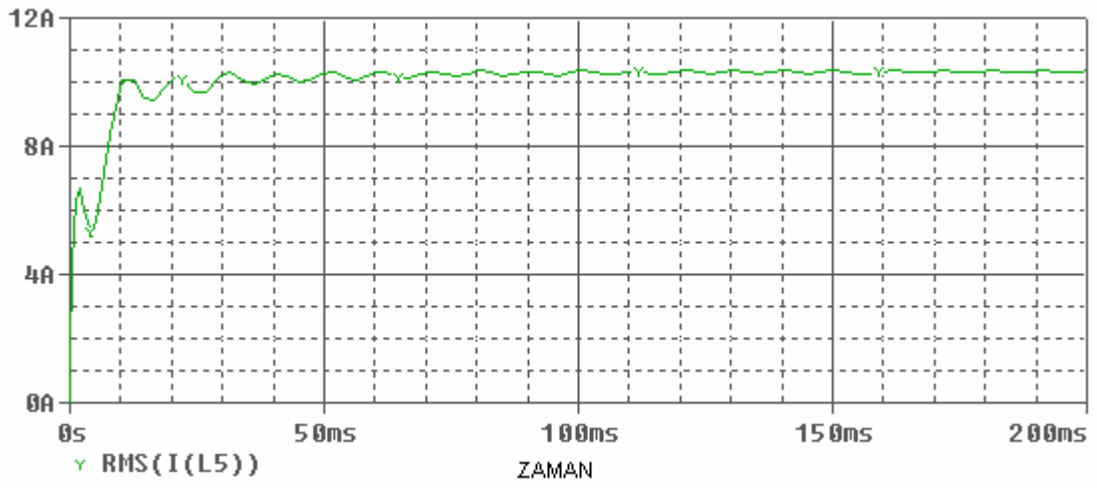
Şekil 4.30 Üç fazlı, yıldız üçgen bağlı transformatörün pspice programında kullanılan modeli



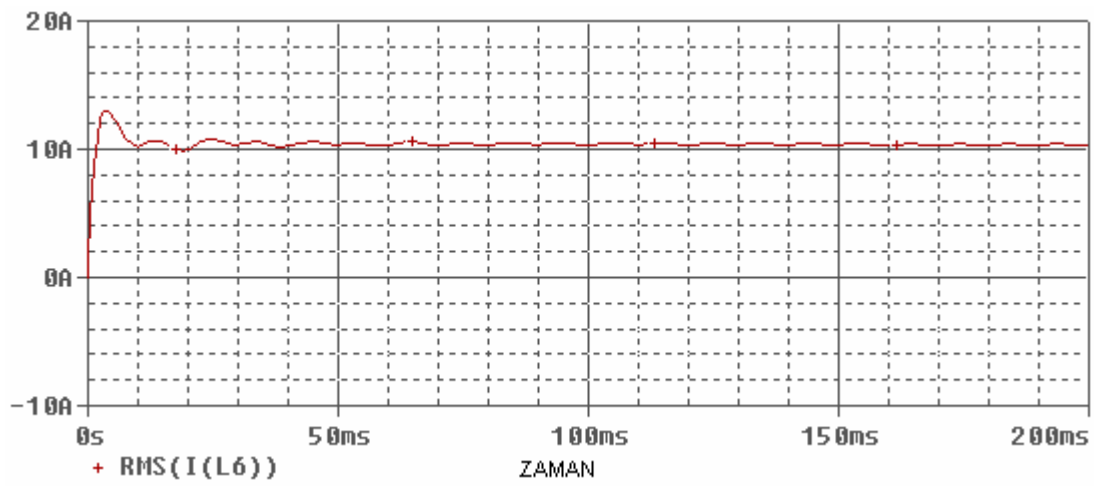
Şekil 4.31 Yıldız – Üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli



Şekil 4.32 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.33 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.34 C fazı için akımın rms değeri

4.16 Voltaj Doruk Değerinde iken Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörün Eş Zamanlı Anahtarlanması

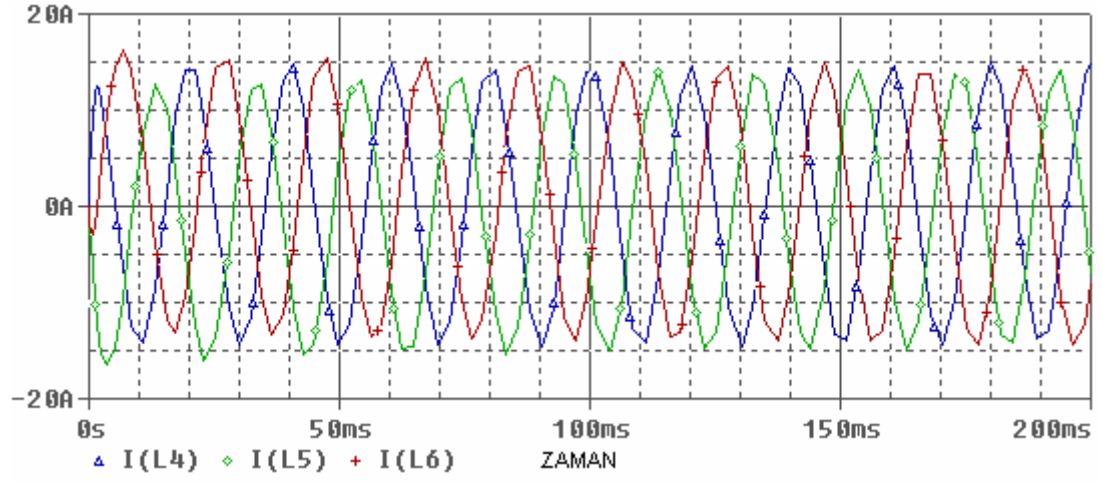
Alternatif olarak yıldız – üçgen bağlı transformatörü voltaj doruk değerinde iken anahtarlayalım. Bunun için kullanılan transformatör modelinin şekli (Şekil 4.30) ile aynıdır. Ancak simülasyon dosyasında da görülebileceği gibi voltaj dalgasının değeri her fazda 90 derece ileri alınmıştır.

4.17 Voltajın Doruk Değerinde Anahtarlanan Yıldız – Üçgen Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası

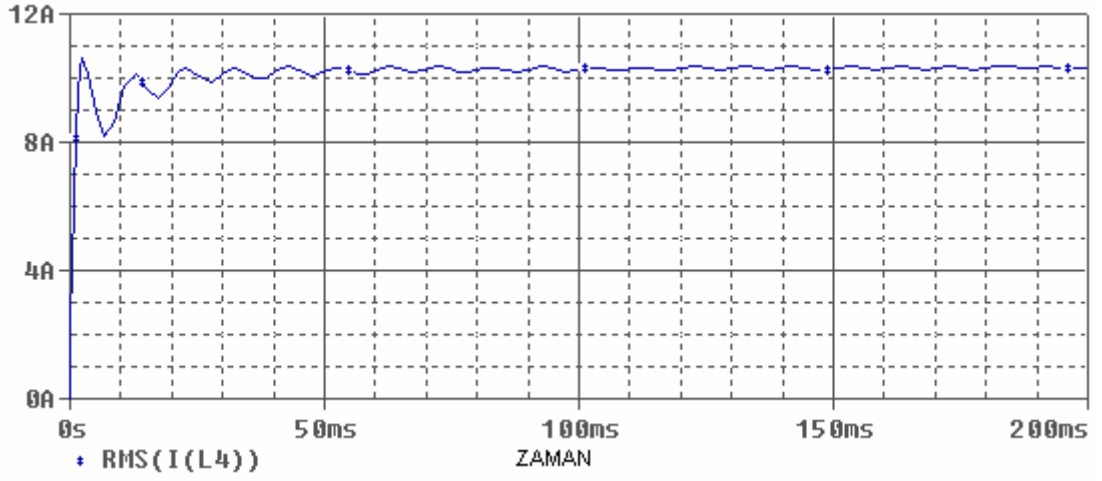
* Schematics Netlist *

```
R_R1      22 123 1p
R_R2      12 23 1p
R_R3      2 26 1p
F_F1      23 46 VF_F1 0.5
VF_F1     14 15 0V
F_F2      123 1446 VF_F2 0.5
VF_F2     24 25 0V
X_U1      $N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01
+ Ropen=1Meg
R_R4      706 2 1p
R_R5      708 22 1p
R_R6      0 46 1t
E_E1      14 0 12 0 0.5
R_R10     15 447 1p
R_R11     25 448 1p
R_R12     5 446 1p
R_R19     707 12 1p
R_R21     0 1446 1t
E_E2      24 0 22 0 0.5
E_E3      4 0 2 0 0.5
L_L4      700 703 5.25mH
L_L5      701 704 5.25mH
L_L6      702 705 5.25mH
L_L7      706 0 0.235H
L_L9      707 0 0.235H
L_L8      708 0 0.235H
```

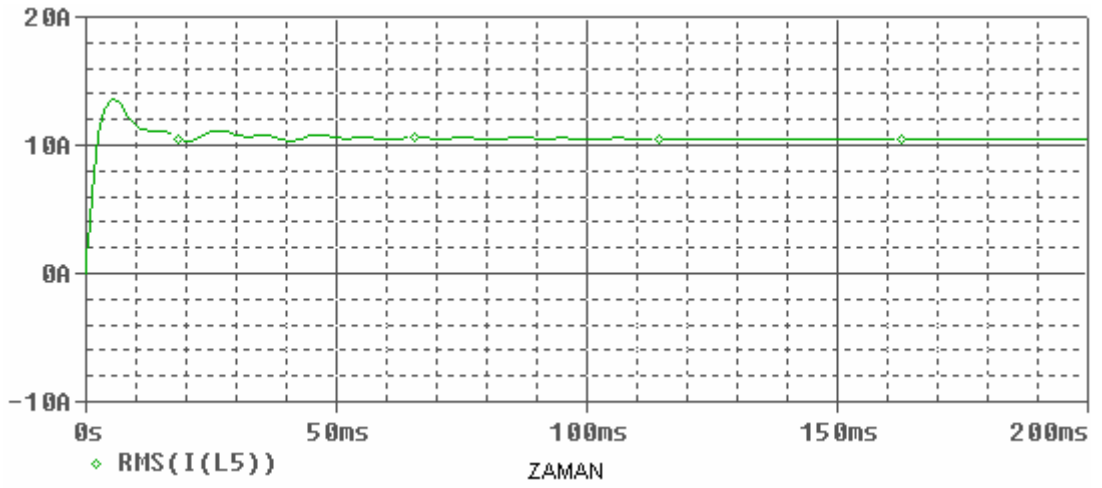
R_R23 0 706 132
 R_R18 0 707 132
 R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH
 L_L3 448 146 1.6mH
 R_R13 126 1446 0.96
 R_R15 146 46 0.96
 X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=0ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 R_R16 703 706 3.1
 R_R20 704 707 3.1
 R_R17 705 708 3.1
 R_R28 1446 36 10
 F_F3 26 36 VF_F3 0.5
 VF_F3 4 5 0V
 R_R14 136 36 0.96
 R_R22 0 36 1t
 R_R29 36 46 10
 R_R30 46 1446 10
 +SIN 0 240V 50 0 0 90
 +SIN 0 240V 50 0 0 210
 +SIN 0 240V 50 0 0 330



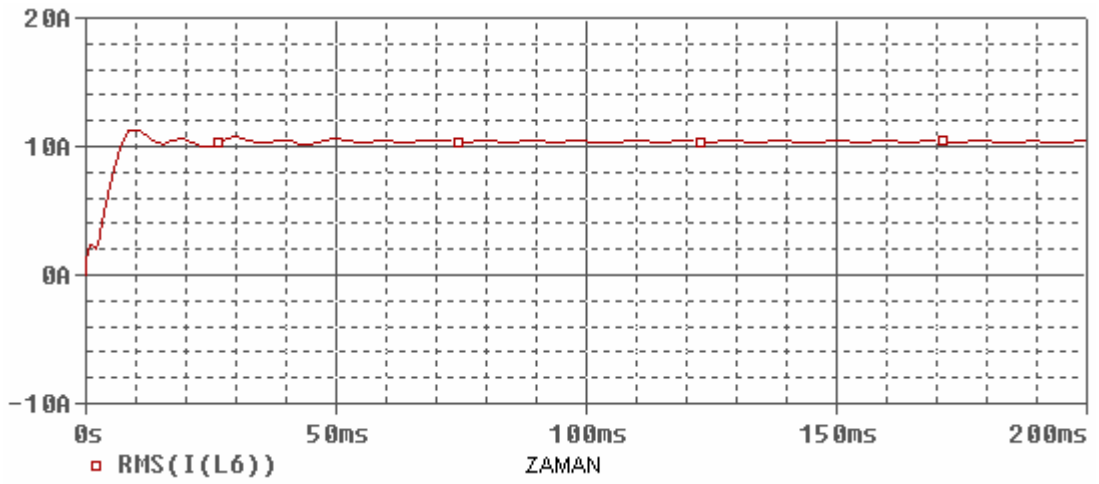
Şekil 4.35 Voltaj doruk değerinde iken anahtarlanan yıldız – üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli



Şekil 4.36 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.37 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.38 C fazı için akımın rms değeri

4.18 Voltaj Doruk Değerinde iken Yıldız Üçgen Bağlı Transformatörün Ardıl Anahtarlanması

Bu sefer yıldız üçgen bağlı transformatörü voltaj doruk değerinde iken ardıl anahtarlayacağız.

4.19 Voltajın Doruk Değerinde Ardıl Anahtarlanan Yıldız – Üçgen Bağlı Transformatör için Simülasyon Dosyası

* Schematics Netlist *

R_R1 22 123 1p

R_R2 12 23 1p

R_R3 2 26 1p

F_F1 23 46 VF_F1 0.5

VF_F1 14 15 0V

F_F2 123 1446 VF_F2 0.5

VF_F2 24 25 0V

X_U1 \$N_0001 700 Sw_tClose PARAMS: tClose=0 ttran=1u Rclosed=0.01

+ Ropen=1Meg

R_R4 706 2 1p

R_R5 708 22 1p

R_R6 0 46 1t

E_E1 14 0 12 0 0.5

R_R10 15 447 1p

R_R11 25 448 1p

R_R12 5 446 1p

R_R19 707 12 1p

R_R21 0 1446 1t

E_E2 24 0 22 0 0.5

E_E3 4 0 2 0 0.5

L_L4 700 703 5.25mH

L_L5 701 704 5.25mH

L_L6 702 705 5.25mH

L_L7 706 0 0.235H

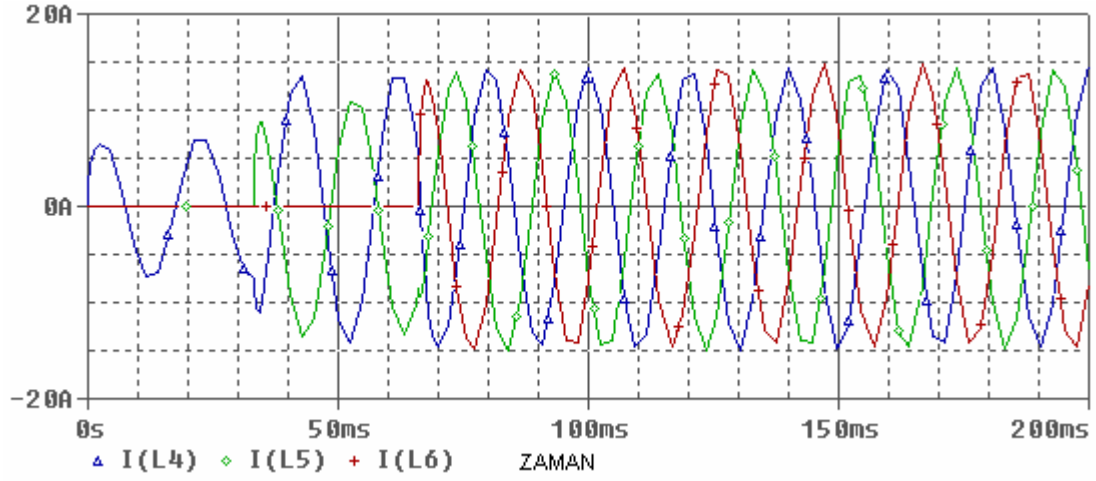
L_L9 707 0 0.235H

L_L8 708 0 0.235H

R_R23 0 706 132

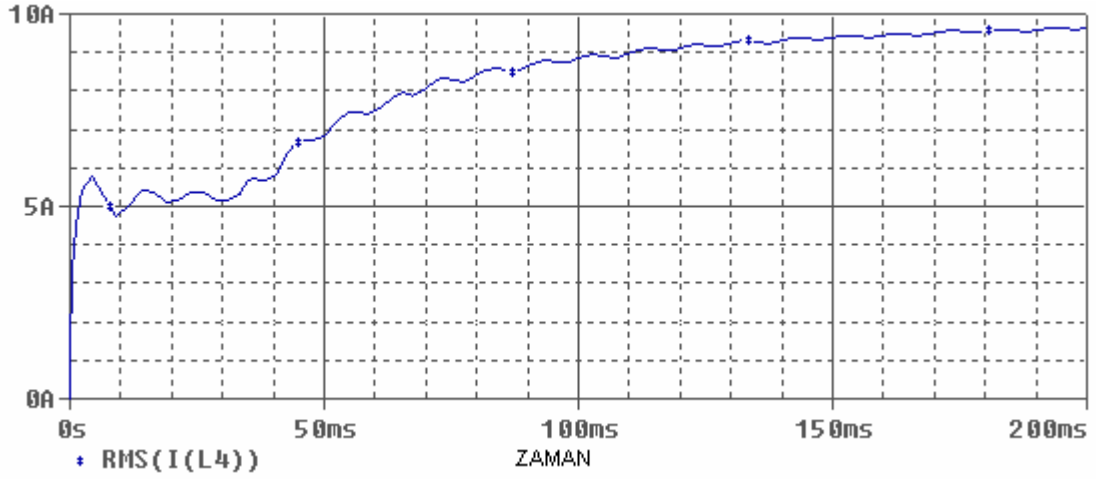
R_R18 0 707 132

R_R24 0 708 132
 L_L1 446 126 1.6mH
 L_L2 447 136 1.6mH
 L_L3 448 146 1.6mH
 R_R13 126 1446 0.96
 R_R15 146 46 0.96
 R_R16 703 706 3.1
 R_R20 704 707 3.1
 R_R17 705 708 3.1
 R_R28 1446 36 10
 F_F3 26 36 VF_F3 0.5
 VF_F3 4 5 0V
 R_R14 136 36 0.96
 R_R22 0 36 1t
 R_R29 36 46 10
 R_R30 46 1446 10
 +SIN 0 240V 50 0 0 90
 +SIN 0 240V 50 0 0 210
 +SIN 0 240V 50 0 0 330
 X_U2 \$N_0002 701 Sw_tClose PARAMS: tClose=33ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg
 X_U3 \$N_0003 702 Sw_tClose PARAMS: tClose=66ms ttran=1u Rclosed=0.01
 + Ropen=1Meg

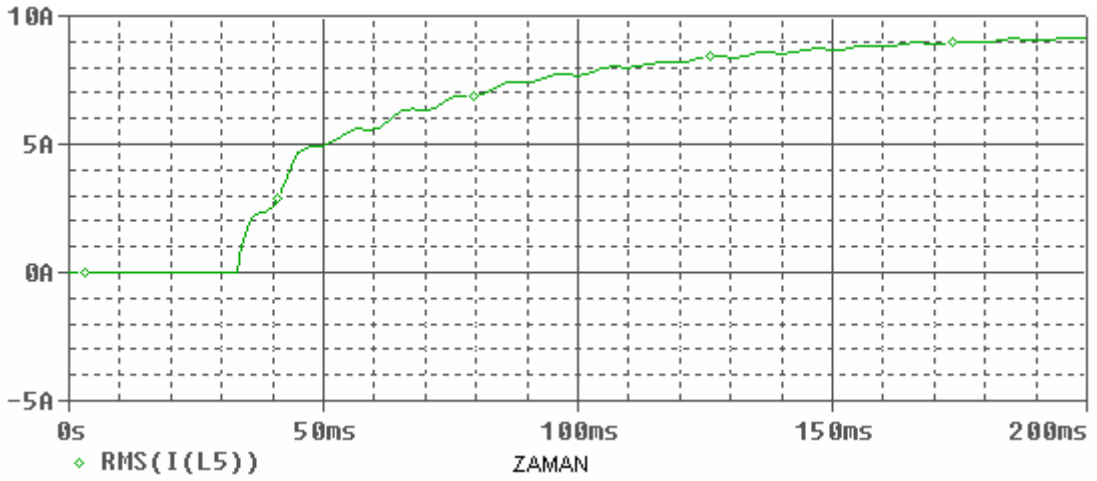


Şekil 4.40 Voltaj doruk değerinde iken anahtarlanan yıldız – üçgen bağlı transformatörün primerindeki akımın dalga şekli

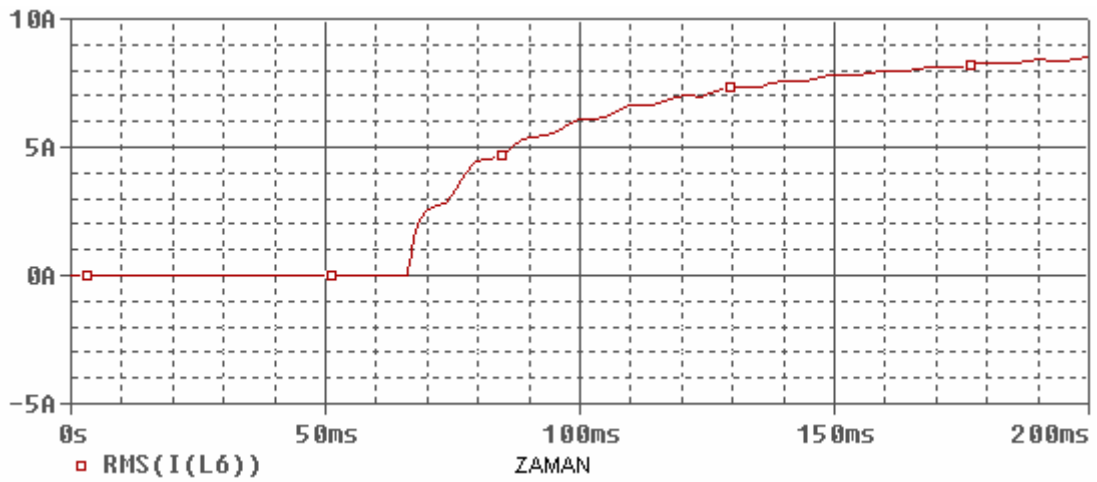
Ardıl anahtarlama tekniği ile geçici rejim akımı elenmiş. Her fazda düzgün akım dalga şekli elde edilmiştir.



Şekil 4.41 A fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.42 B fazı için akımın rms değeri



Şekil 4.43 C fazı için akımın rms değeri

5. SONUÇLAR

Geçici rejim akımının şiddeti güç kaynağına bağlı olan transformatörün o anki gerilim dalgasına bağlıdır. Uygulanan gerilim tepe noktasına ulaştığı anda bir transformatör iletime sokulursa anahtarlama anından önceki ve sonraki akı değerleri birbirine eşit ve sıfır olacağı için çekirdek akısı sürekli çalışma değerine çabucak ulaşır ve geçici olaylar meydana gelmez. Öte yandan transformatör uygulanan gerilim sıfırdan geçerken iletime sokulursa akı değeri voltajla aralarında bulunan 90° 'lik faz farkı nedeni ile maksimum değerinde olur ve sabit akı teoremine uygun olarak transformatör nüvesinde bu akıyı dengeleyecek aynı değere sahip bir akı endüklenir. Bu endüklenen akı alternatif akıya eklenerek sisteme zarar veren geçici rejim akımını oluşturur.

Üzerinde kalıcı akı bulunmayan tek fazlı bir transformatöre gerilim dalga şekli tepe değerinde iken enerji verilirse geçici rejim akımı oluşmaz.

Eğer transformatör üzerinde hali hazırda oluşmuş kalıcı akı varsa, transformatöre enerji verirken, bu kalıcı akı miktarının bilgisine ihtiyaç duyulur. Bu durumda transformatöre nüve akısı ile üzerindeki akı aynı değere sahip olduğu an enerji vermek gerekir.

Üç fazlı yıldız – yıldız bağlı ve yıldız – üçgen bağlı transformatörler için pspice programında oluşturulan simülasyonlarla yapılan gözlemlere göre geçici rejim akımını elemek için bu tip transformatörlere enerji verirken en uygun an B fazı için A fazının voltajın tepe noktasından geçtiği andır. A fazı tepe noktasında iken enerji verilen B fazı, ters yönde sıfırdan başlayarak kendi tepe noktasına ulaşır, ancak ulaştığı değer kalıcı halde iken alacağı değerden daha yüksek değildir. Voltajın tepe noktasından geçtiği anda A fazında akı değeri sıfırdır. Bu yüzden A fazı B fazı üzerinde dinamik nüve akısı oluşturmamaktadır. B fazının voltaj dalga şekli ise ters yönde tepe değerine ulaşmak üzeredir yani B fazında beklenen akının değeri sıfır olacak şekilde azalmaktadır. Sonuçta B fazında geçici rejim akımı oluşmamaktadır.

C fazı için en uygun enerji verme anı ise A ve B fazları voltaj dalga şeklinin C fazı voltaj dalga şeklinin tersi yönünde kesiştiği andır. Bu noktada C fazı üzerinde oluşan dinamik akı C fazı için beklenen akıya değer olarak eşittir. Bu yüzden geçici olaylar meydana gelmez.

Verilen örnekte bu an B fazının 33ms C fazının ise 66ms'de anahtarılandığı andır. Ancak voltaj dalga şekli gözlemlenerek yukarıdaki koşulları sağlayan alternatif ideal anahtarlama anları da hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

Bimbhra, T.S., (1997) Generalized Theory of Electrical Machines, Khanha Publisher,

Brunke, J.H., Fröchlich, KJ., (2001), “Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations”, IEEE Transactions on Power Delivery, 16, pp.276-280.

Kasztenny B., Kulidjian A (2000) “An Improved Transformer Inrush Restrain Algorithm Increases Security Maintaining Fault Response Performance”, 53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, April 11-13, Canada.

Leon F., Gladstone B., Veen, M., (2001) “Transformer Based Solutions to Power Quality Problems”, Powersystems World 2001 Conference, 12 Sept. 2001, Canada.

Xu, W., Chen, S., Sami, G.A., Cui, Y.,(2005), “A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction - Part I:Simulation and Experimental Results”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, no:2, pp. 943-949, Canada.

Xu, W., Xian L., Sami G.A., (2005), “A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction - Part II:Theoretical Analysis and Design Guide”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20, no:2, pp. 950-957, Canada.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 18.02.1981

Doğum yeri Kayseri

Lise 1996-1999 Kayseri Nuh Mehmet Küçükçalık Anadolu Lisesi

Lisans 1999-2003 Yıldız Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi.
Elektrik Mühendisliği Bölümü