İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TRANSFORMATÖRLERDE DEVREYE GİRME ANINDA OLUŞAN DARBE AKIMLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. H. Gökhan KÜÇÜKÖMER

504921324

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Emin TACER**
Diğer Jüri Üyeleri **Prof. Dr. Faik MERGEN**
Prof. Dr. Oktay AYBAR (Y.T.Ü)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana yol gösteren ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın danışmanım Prof. Dr. Emin TACER' e teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2006 H. Gökhan KÜÇÜKÖMER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
KISALTMALAR v
ŞEKİL LİSTESİ vi
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ 1
1.1. Problemin Tanımı 1
1.2. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar 2
1.3. Tez Çalışmasının İçeriği 2

2. DEVREYE GİRME AKIMLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ 4
2.1. Olayın Teorik Açıklaması 4
2.2. Akının Geçici ve Sürekli Hal Bileşeni 8
2.3. Devreye Girme Akımının Tepe Değeri 9
2.4. Devreye Girme Akımının Zaman Sabiti 10
2.5. Artık Akı Yoğunluğunun Genliği 14

3. DEVREYE GİRME AKIMLARININ HESABI İÇİN YAKLAŞIK MATEMATİK MODEL 16
3.1. Kapama Anında Oluşan Geçici Olay, Yaklaşık Matematik Model 16
3.2. Yaklaşık Matematik Modelden Çıkarılan Sonuçlar 20
3.3. Ayrı Kaçak Akılı Modelin Sayısal Yöntemlerle Analizi 22
3.3.1.Sayısal örnek 25
3.3.1.1. Artık akının etkisi 26
3.3.1.2. Devreye girme anının etkisi 30

4. DEVREYE GİRME AKIMLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ 35
4.1. Kontrollü Kapama Yöntemleri 36
4.1.1. Transformatör modeli 37
4.1.2. Tek fazlı transformatörlerin kesicisinin kontrollü kapatılması 37
4.1.3. Üç fazlı transformatörlerde artık akının olmadığı durumda kesicilerin kontrollü kapatılması 41
4.1.4. Artık akı 45
4.1.5. Üç fazlı transformatörlerde artık akının olduğu durumda kesicilerin kontrollü kapatılması 46
4.1.6. Kontrollü kapama yöntemlerinin değerlendirilmesi 53
4.1.6.1. Hızlı kapama yöntemi 54
4.1.6.2. Geciktirilmiş kapama yöntemi 54
4.1.6.3. Eşzamanlı kapama yöntemi 54
4.2. Öndirenç Ekleme Yöntemi 54

5. DEVREYE GİRME AKIMLARININ DİFERANSİYEL RÖLE ÜZERİNE ETKİSİ **57**
5.1. Saha Örnekleri ve Sayısal Çözümler 57
5.2. Harmonik İçeriğinin Değerlendirilmesi 66

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **67**

KAYNAKLAR **69**

ÖZGEÇMİŞ **70**

KISALTMALAR

AC	**:**	Alternatif Akım
DC	**:**	Doğru Akım
MYU	**:**	Manyetik Yolun Uzunluğu
EMTP	**:**	Electromagnetik Transient Program
BPA	**:**	Bonneville Power Administration
IEEE	**:**	Institute of Electrical and Electronics Engineers

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Histerisis eğrisi…..…….. 5
Şekil 2.2 : Modern bir transformatör sacının mıknatıslanma eğrisi ve manyetik geçirgenliğin tipik değişmesi ……. 6
Şekil 2.3 : Kalıcı akı yoğunluğu ve devreye girme olayı……... 7
Şekil 2.4.a : Geçici ve normal halde akı değişimi……. 8
Şekil 2.4.b : Devreye girme akımının geçici (DC) ve sürekli hal (AC) bileşeni…..... 8
Şekil 2.5.a : Devreye girme akımının tipik bir osilogramı, tek fazlı……. 9
Şekil 2.5.b : Devreye girme akımının tipik bir osilogramı, üç fazlı…….. 9
Şekil 2.6 : Mıknatıslanma akımının, akının geçici ve sürekli haline göre ikiye ayrılmış hali……. 11
Şekil 2.7 : Akım ve akı devresinin karşılaştırılması……12
Şekil 2.8 : Düşük kayıplı sac (kesikli eğri) ile normal sacın (kesiksiz eğri) histerisis eğrilerinin karşılaştırılması……14
Şekil 2.9 : R, S, T fazları için kesicilerin açma açılarına bağlı olarak hesaplanan artık akılara ait test sonuçları…… 15
Şekil 3.1 : Gerilim denklemlerinin kurulmasında kullanılan transformatör 17
Şekil 3.2 : Boşta devreye girme anında oluşan darbe akımlarının hesabında kullanılan eşdeğer devre……... 17
Şekil 3.3 : Doyma özellikli transformatör modelinde kullanılan eşdeğer devre…….. 22
Şekil 3.4 : Parça parça doğrusallaştırma ile akı-akım eğrisinin oluşturulması. a) Artık akı yoğunluğunun olmadığı durum, b) Artık akı yoğunluğunun 2 ve -2 noktaları ile belirlendiği durum.. 23
Şekil 3.5 : Sayısal analizi yapılacak örnek transformatörün bulunduğu devre…….. 25
Şekil 3.6 : Artık akının 0 p.u. olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir……... 27
Şekil 3.7 : Artık akının 0.5 p.u. olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir……... 28
Şekil 3.8 : Artık akının 0.8 p.u. olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir……... 29
Şekil 3.9 : Devreye girme anının, sinüzoidal beslemenin 0 derecede olduğu anda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir…….. 31

Şekil 3.10 : Devreye girme anının, sinüzoidal beslemenin 45 derecede (0.0021 saniye) olduğu anda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir……... 32
Şekil 3.11 : Devreye girme anının, sinüzoidal beslemenin 90 derecede (0.0042 saniye) olduğu anda; akım, akı ve gerilim değişimi. " Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir…….. 33
Şekil 4.1 : Çekirdeğin doyma etkisine bağlı olarak akı-akım eğrisi. a) Simetrik akı, b) Asimetrik akı……..... 36
Şekil 4.2 : Tek fazlı transformatörler için uygun devreye girme anları, 1 ve 2 nolu anlardır……..... 38
Şekil 4.3 : Artık akı değeri (1 p.u.) iken, devreye girme anı olarak, gerilim dalgasının 180 derecede (0.0081 saniye) olduğu an seçildiğinde; akım, akı ve gerilimin değişimi……. 39
Şekil 4.4 : Devreye girme için uygun andan, 3 ms yapılarak kesicilerin kapandığı durumda; akım, akı ve gerilimin değişimi……... 40
Şekil 4.5 : Tek fazlı transformatörlerden oluşan, üç fazlı transformatör bankında, fazlar arasında akı-gerilim ilişkisi (Vektör grubu : YNd). Oklar çekirdeklerdeki akıları göstermektedir…… 41
Şekil 4.6 : Artık akının bulunmadığı durumda üç fazlı tranformatör bankında devreye alma için en uygun anlar…..…… 42
Şekil 4.7 : Üç fazlı transformatörün devreye girme akımlarını belirlemek için MATLAB' de kullanılan örnek devre…… 43
Şekil 4.8 : Artık akının olmadığı üç fazlı transformatörde devreye girme anı olarak, rasgele bir an (sinüzoidal gerilimin 0 derecede olduğu an) seçildiğinde oluşan devreye girme akımları…….. 44
Şekil 4.9 : Artık akının olmadığı üç fazlı transformatörü devreye almak için Şekil 4.6' da gösterilen yöntem uygulandığında devreye girme akımları önlenmiş olur……. 45
Şekil 4.10 : Başlangıçta artık akının bulunduğu üç fazlı transformatörde, devreye girme anında akıların değişimi……. 46
Şekil 4.11 : Artık akılı üç fazlı transformatörler için beklenen ve dinamik çekirdek akıları…….. 47
Şekil 4.12 : Çekirdeğinde artık akı bulunan üç fazlı transformatör rasgele bir anda devreye alındığında oluşan akımlar…….. 49
Şekil 4.13 : Üç fazlı, artık akılı transformatörde, kesicilerin Şekil 4.11' de tanımlanan A ve B anlarında kapanması sonucu oluşan devreye girme akımları…… 50
Şekil 4.14 : Üç fazlı artık akılı transformatörde, kesicilerin Şekil 4.11' de tanımlanan A anında kapanması sonucu oluşan devreye girme akımları..... 51
Şekil 4.15 : Üçgen sargılı, üç bacaklı bir transformatörün "geciktirilmiş kapama" yöntemi ile devreye alınmasına ait test sonuçları…….. 52
Şekil 4.16 : Üçgen sargılı, bir transformatörün "geciktirilmiş kapama" yöntemi ile devreye alınmasında oluşan akımlar……... 53
Şekil 4.17 : Öndirenç ekleme yöntemi için MATLAB' de oluşturulan örnek devre……..... 55

Şekil 4.18 : Öndirenç olması ve olmaması durumunda devreye girme akımının değişimi…….. 56
Şekil 5.1 : Üç fazlı transformatörde devreye girme anında oluşan akımlardaki ikinci harmonik içeriği…….. 58
Şekil 5.2 : İkinci harmoniğin temel bileşene oranını bulmak için kullanılan MATLAB modeli…….. 59
Şekil 5.3 : Alttaki grafik devreye girme akımını, üstteki grafik ise ikinci harmonik bileşeninin nasıl değiştiğini göstermekte. Artık akı 0.85 p.u., kapama anı sinüs formuna göre 0 derece……... 60
Şekil 5.4 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 0. ms' de…….. 62
Şekil 5.5 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 2. ms' de…….. 63
Şekil 5.6 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 4. ms' de…….. 64
Şekil 5.7 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 6. ms' de…….. 65

SEMBOL LİSTESİ

B	**:**	Manyetik akı yoğunluğu
$\mathbf{B}_{maks}$	**:**	Manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri
$\mathbf{B}_{r}$	**:**	Artık manyetik akı yoğunluğu
$\mathbf{B}_{s}$	**:**	Hava çekirdekli bobinin akı yoğunluğu
H	**:**	Manyetik alan şiddeti
μ	**:**	Manyetik geçirgenlik
μ_0	**:**	Mutlak geçirgenlik
μ_r	**:**	Malzemenin manyetik geçirgenliği
$\mathbf{A}_{c}$	**:**	Manyetik çekirdeğin kesiti
A *s*	**:**	Hava çekirdeğin kesiti
I	**:**	Akımın anlık değeri
$\mathbf{I}_{p}$	**:**	Devreye girme akımının tepe değeri
$\mathbf{I}_{pu}$	**:**	Akımın birim sisteme (per-unit) göre değeri
$\mathbf{I}_{mag}$ (A, B, C)	**:**	Devreye girme anındaki mıknatıslanma akımı (A, B veya C fazında)
I1	**:**	Akımın temel bileşeni
I2	**:**	Akımın ikinci harmonik bileşeni
h	**:**	Bobinin boyu
N	**:**	Sarım sayısı
p.u	**:**	Birim sistemi
R	**:**	Bobinin direnci
L	**:**	Bobinin indüktansı
$\mathbf{L}_{sat}$	**:**	Doyuma giden indüktans
$\mathbf{R}_{m}$	**:**	Manyetik devrenin relüktansı
ϕ	**:**	Manyetik akı
U	**:**	Gerilimin anlık değeri
ω	**:**	Açısal frekans
θ	**:**	Sinüzoidal gerilim dalgasına göre devrenin enerjilendirildiği anı belirleyen açı
t	**:**	Zaman
i(s)	**:**	Akımın Laplace Formu
$\mathbf{P}_{N}$	**:**	Anma gücü

TRANSFORMATÖRLERDE DEVREYE GİRME ANINDA OLUŞAN DARBE AKIMLARI

ÖZET

Bir transformatörün enerjilendirildiği anda oluşan darbe karakteristikli mıknatıslanma akımlarının sebebi transformatörün çekirdeğindeki geçici aşırı akılardır. Bu olay, eğer besleme kaynağının empedansı büyük ise gerilim çökmelerine ve set değerleri sınırlara çok yakın yapılmış ise aşırı yük veya diferansiyel rölelerin açmasına sebebiyet verebilir. Yapılan incelemeler devreye girme akımının şu faktörlerden etkilendiğini göstermiştir : Enerjilenme anında gerilim dalgasının hangi noktada olduğu, enerjilenme anında çekirdekteki artık akının genliği ve kutbu, birincil sargı devresinin toplam direnci, güç kaynağının indüktansı, enerjilenen sargı ile transformatörün çekirdeği arasındaki hava çekirdekli indüktans, transformatör çekirdeğinin geometrisi ve çekirdek malzemelerinin taşıyabileceği en yüksek akı kapasitesi.

Kontrollü kapama ve öndirenç ekleme yöntemlerinin bu akımları önleme imkanı vereceği görülmüştür. Kontrollü kapama yönteminde, uygun kapama, devreye girme akımlarını teorik olarak tamamen yok edilebilecektir. Öndirenç ekleme yöntemi ise iyi bilinen diğer bir metottur ve uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Diferansiyel röleler devreye girme akımını bir iç arıza olarak algıladığı için, arıza akımları ile devreye girme akımlarını ayırt etmeye yarayacak yöntemlere ihtiyaç vardır. Devreye girme akımları asimetrik bir yapıya sahip olduğundan dolayı, harmonik spektrumunda çift harmonikler baskındır, özellikle ikinci harmonik. Bu özel karakteristikten dolayı, temel ve ikinci harmonik bileşenleri baz alınarak devreye girme akımları iç arızalardan ayırt edilebilir.

Çalışmada, yukarıda yazılanlar ışığında, devreye girme akımlarının analitik ve nümerik analizi değerlendirilmiştir. MATLAB kullanılarak yapılan nümerik analiz ile analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve pratikte kullanılabilecek bir takım değerlendirmeler yapılmıştır.

INRUSH CURRENTS WHICH OCCUR WHEN SWITCHING ON TRANSFORMERS

SUMMARY

The magnetizing inrush currents which occur at the time of energization of a transformer is due to temporary overfluxing in the transformer core. It may cause a momentary dip in the voltage if the impedance of the source of excitation is considerable, and it may also trip overload or common differential relays, if these have been set too close. The investigations show that, the inrush current can be affected by the following factors : The point-on-voltage wave at the instant of energization, the magnitude and the polarity of the remanent flux in the core at the instant of energization, the total resistance of the primary winding circuit, the power source inductance, the inductance of the air core in between the energizing winding and the transformer core, the geometry of the transformer core, the maximum flux carrying capability of the core materials.

It is obtained that, controlled switching and preinsertion resistor methods can potentially eliminate these currents. In controlled switching method, optimal closing can theoretically result in the complete elimination of inrush currents. Preinsertion resistors is another well know method and it is being used for several years.

Since the differential relays see the inrush current as an internal fault, some method of distinguishing between fault and inrush current is necessary. Due to the asymmetrical nature of the inrush currents, even harmonics appear to be dominant ones in the harmonic spectrum, in particular the second harmonic. Because of this distinct characteristic, any internal fault and inrush current can be distinguished on the basis of fundamental and the second harmonic components.

In this study, analytical and numeric analysis of the inrush currents have been evaluated in regard with above written aspects. Numerical analysis computed by MATLAB has compared with results of analytical methods and some practical evaluations are obtained.

1. GİRİŞ

Transformatörlerin devreye girme anında sıklıkla, darbe karakteristikli yüksek genlikli mıknatıslanma akımı[1] oluşur. Devreye girme akımları kaynağın empedansına bağlı olarak, gerilim çökmelerine, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin açmasına sebebiyet verebilmektedir.

Devreye girme akımlarının bağlı olduğu başlıca değişkenler şunlardır; çekirdekteki artık akı yoğunluğu, devreye girme anı, bir önceki devreden çıkma anı, çekirdeği oluşturan sacın tipi, çekirdeğin geometrisi, bobinlerin boyutları ve anma akısıdır.

Devreye girme akımlarının önlenmesi için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Başlıca iki yöntem üzerinde araştırmacılar yoğunlaşmıştır : 1. Kontrollü kapama, 2. Öndirenç ekleme.

Koruma röleleri devreye girme akımlarını arıza akımları olarak algılayabilir. Devreye girme akımlarının, arıza akımlarında en büyük farkı ikinci harmonik bileşeninin oldukça belirgin olmasıdır. Bu özellik kullanılarak, koruma röleleri arıza akımlarını, devreye girme akımlarından ayırt edebilir.

1.1 Problemin Tanımı

Transformatörler enerjilendirildiğinde yüksek genlikli darbe akımları çekebilirler. Koruma devrelerinde bulunan diferansiyel rölelerin bir içi arıza gibi algıladığı bu akımlar, anma akımının 8 ila 30 katına ulaştığı durumlar olabilir.

[1] Tez çalışmasında buradan sonra " Devreye Girme Akımları" olarak geçecektir.

Devreye girme akımlarının zaman sabitini ve genliğini belirleyen başlıca unsurlar şunlardır :

- Transformatör indüktansı ve sargıların dirençleri
- Transformatörün bağlı olduğu sistemin devre elemanları
- Transformatörde kullanılan çekirdek sacının cinsi ve doyma noktası
- Transformatör çekirdeğinin artık akı seviyesi
- Transformatörün enerjilendiği an

1.2 Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Literatür incelendiğinde, transformatörlerin devreye girme akımları üzerine yapılan en eski çalışmanın J.A Fleming' e ait olduğu gözükmektedir [1].

A . Boyajian ve G. Camilli konuyu kapsamlı olarak ele almışlar ve devreye girme akımının tepe değeri için bir formül ortaya koymuşlardır [2]. B. Holmgren, R.S. Jenkins, J. Riubrugent devreye girme akımını belirlemeye yönelik kapsamlı saha testleri yapmış ve bilgisayar hesaplamalarına temel teşkil edecek akış diagramını belirlemişlerdir [3].

Kontrollü kapama, günümüzde devreye girme akımlarını önleme yönelik üzerinde en çok araştırma yapılan yöntemlerden biridir. Bu konuda J. H. Brunke, K. J. Fröhlich referans bir çalışma sunmuşlardır [4].

P. C. Y. Ling ve A. Basak tek fazlı transformatörlerde devreye girme akımlarının incelenmesi ve harmonik içeriğinin belirlenmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır[5].

W. A. Elmore devreye girme akımlarının diferansiyel röleler üzerindeki etkisi ve alınacak önlemler konusunda incelemeler yapmıştır [6].

1.3 Tez Çalışmasının İçeriği

Devreye girme anında oluşan darbe akımları teorik olarak ele alınacaktır. Teorik incelemede, çekirdek sacının doymasının, olayın önemli etkenlerinden biri olduğu gösterilecektir.

Olayın genel anlamda doğasını anlayabilmek için yaklaşık matematiksel bir model çıkartılarak, devreye girme akımlarına etki eden değişkenler MATLAB' e inşa edilmiş olan transformatör modeli yardımıyla incelenecektir.

Devreye girme akımlarını önlemeye yönelik iki yöntem üzerinde durulacaktır: Kontrollü kapama ve öndirenç bağlama yöntemi.

Devreye girme akımlarının diferansiyel röleye etkileri anlatılarak, harmonik analizi yapılacak ve diferansiyel rölelerin set değerlerinin nasıl yapılması gerektiğine dair uygun bir yol aranacaktır.

Sonuç bölümünde devreye girme akımlarını önleme yöntemleri karşılaştırılacak, diferansiyel röleler seçilirken ve set değerleri yapılırken nelere dikkat edilmesi özetlenecektir.

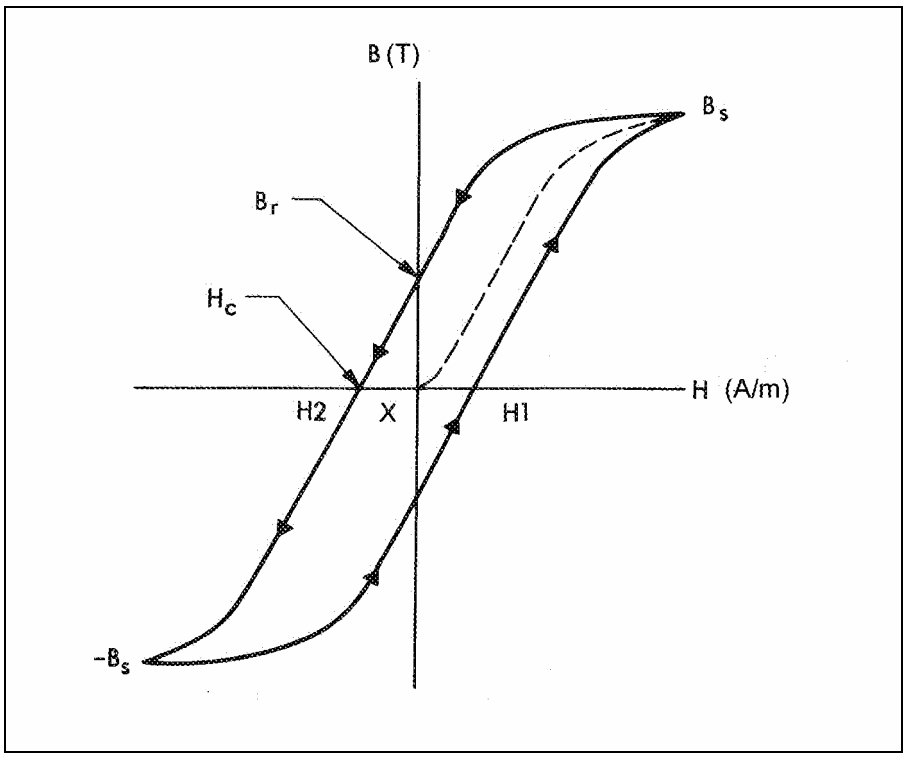
2. DEVREYE GİRME AKIMLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

2.1 Olayın Teorik Açıklaması

Transformatörlerin devreye girmesi esnasında sıklıkla oluşan darbe akımları, geçici durumları inceleme yöntemleri ile araştırılabilir. Bu olay, kaynağın empedansına bağlı olarak, gerilim çökmelerine, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin açmasına neden olabilir [2].

Bir manyetik malzemenin, mıknatıslanma sürecinde bir çevrim sonucu elde edilen histerisis eğrisi Şekil 2.1' deki gibidir. Başlangıçta nötr olan manyetik malzemenin (B) akı yoğunluğunun, (H) manyetik alan şiddetine bağlı değişimi, X noktasından başlar. H arttıkça, akı yoğunluğu kesikli çizgiyi takip ederek Bs noktasına ulaşır. H azalmaya başladığında B de azalarak eğrinin yönünü, Br noktasına doğru terse çevirir . H' nin sıfır olduğu bu noktada, çekirdekte halen Br kalıcı akı yoğunluğu vardır.

Bu noktadan sonra H negatif değerler alarak, mıknatıslanma akısını sıfır noktasına getirecek değere, Hc' ye gelir. İlk mıknatıslanma eğrisi (X noktasından geçen kesikli çizgi) boyunca, B doğrusal olmayan bir eğri izleyerek H ile beraber doyma noktasına kadar artar. Gerçekte hiçbir manyetik çekirdekli transformatörde, eğrinin başlangıç noktası sıfırdan geçmez. Her zaman için, başlangıçta, önceki operasyonlardan dolayı bir artık akı mevcuttur.



Şekil 2.1 : Histerisis Eğrisi

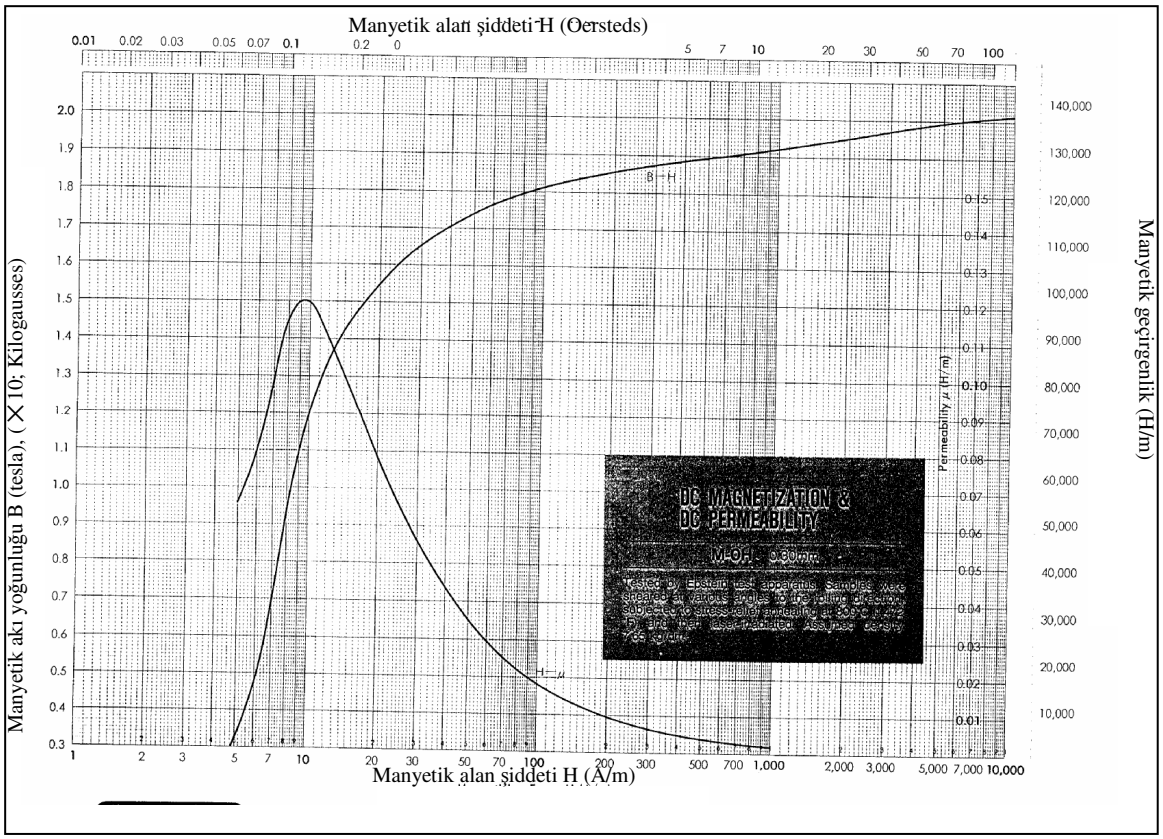
Manyetik malzemelerde geçirgenlik, malzemenin manyetik akı iletkenliğini belirler. Geçirgenlik, μ, akı yoğunluğu B' nin, manyetik alan şiddeti H' ye oranı olarak tanımlanır.

$$\text{Geçirgenlik} = \mu = \frac{B}{H} \tag{2.1}$$

Mutlak geçirgenlik μ_0, eski birim sistemi, cgs' de birim "1" olarak kabul edilirdi. SI birim sisteminde ise :

$$\mu_0 = 0.4\pi 10^{-8}\left[\frac{H}{m}\right] \tag{2.2}$$

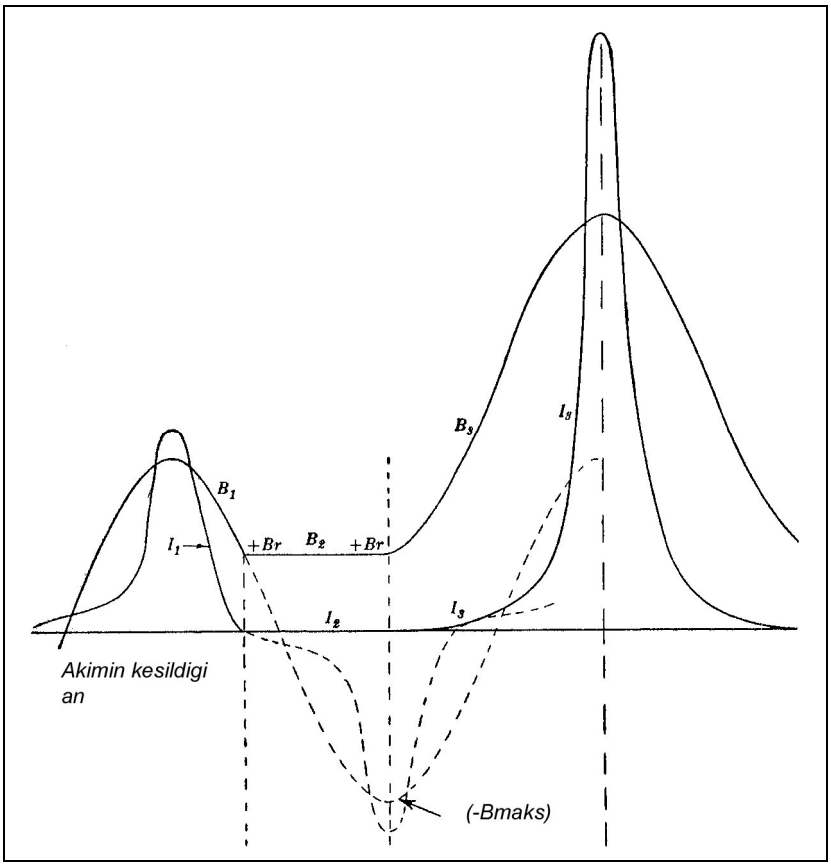
Geçirgenlik, manyetik alan şiddetine bağlı olarak değişir ve bu değişimi gösteren eğri genellikle B-H eğrisi ile birlikte verilir. B-H eğrisinde doyma noktası aşıldıktan sonra geçirgenlik çok azalır. Bu durum, Şekil 2.2' de verilen modern bir sacın karakteristik eğrilerinde açıkca gözükmektedir [7]. Doyma noktası aşıldıktan sonra geçirgenlik 50 ila 100 kat düşebilmektedir.



Şekil 2.2 : Modern bir transformatör sacının mıknatıslanma eğrisi ve manyetik geçirgenliğin tipik değişmesi.

Histerisis eğrisi ve manyetik geçirgenlikten bahsettikten sonra devreye girme akımlarının oluşumuna yönelik incelemeye başlanabilir.

Enerjilendirilmiş bir transformatörün beslemesi kesildiğinde, mıknatıslanma akımı histerisis eğrisini takip ederek sıfıra giderken, manyetik akı ise çekirdekte kalıcı B_r değerini alır, Şekil 2.3. Eğer transformatör devreden çıkartılmasaydı akım ve akı yoğunluğu kendi kesikli çizgilerini takip edeceklerdi. Ancak transformatörün devreden çıkartıldığını düşündüğümüzde, akı yoğunluğu eğrisi yatay bir seyir izlerken , akım eğrisi bir sonraki devreye girmeye kadar sıfır değerinde kalacaktır.



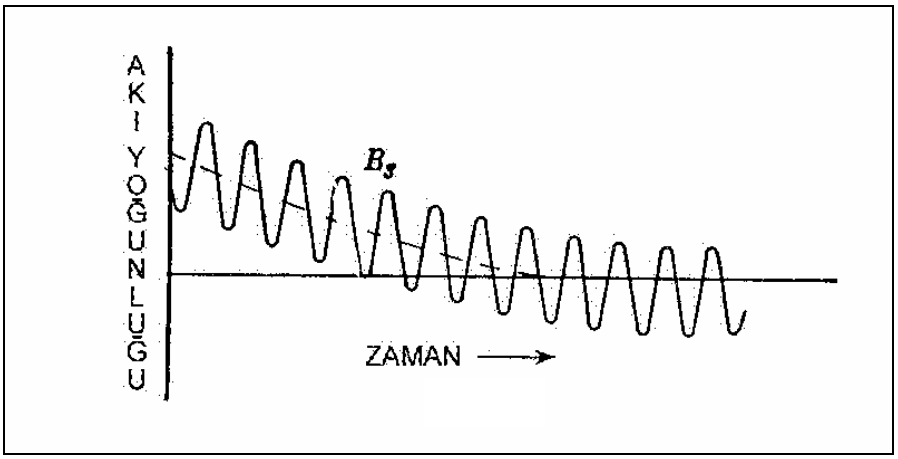
Şekil 2.3 : Kalıcı akı yoğunluğu ve devreye girme olayı

Devreye girme akımının en yüksek değerini bulmak için, transformatörün tekrar devreye girdiği anı, aynı şekildeki ikinci dikey kesikli çizgi olarak seçmemiz gerekir. Bu anda akı yoğunluğu negatif olarak en yüksek değerindedir. Manyetik akı birdenbire oluşup birdenbire yok olamayacağı için, akı yoğunluğu, eğrisine normalde başlaması gereken yerden, $(-B_{maks})$' dan değil, bir önceki B_2 eğrisinin sonundan, $+B_r$ değerinden başlayacak, yükselerek B_3 eğrisini takip edecektir. B_3 eğrisi, manyetik devrenin doyma karakteristiğinden bağımsız olarak sinüzoidal bir eğri olacaktır. Zira uygulanan gerilim sinüzoidal olduğu için manyetik akı yoğunluğu da sinüzoidaldir.

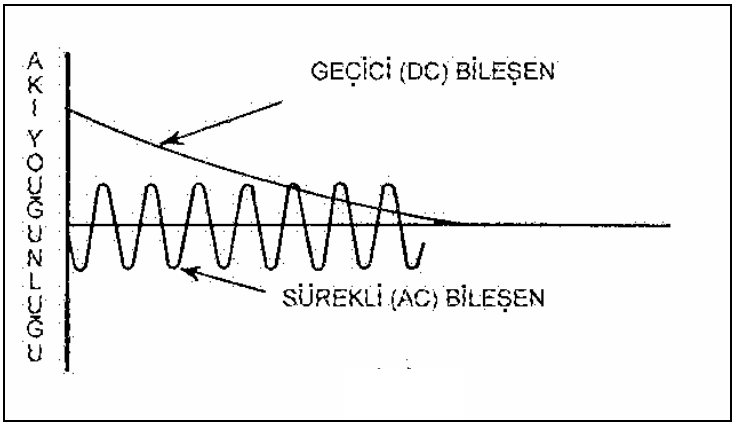
B_3 akı yoğunluğu eğrisine bağlı olarak akım eğrisi I_3 olarak gösterilmiştir. B_3 eğrisinin teorik olarak en yüksek değeri $(B_r + 2B_{maks})$ olacaktır. B_3 eğrisinin tepe noktasında aşırı doyuma gidecek olan manyetik devre çok yüksek akımlar oluşturacaktır.

2.2 Akının Geçici ve Sürekli Hal Bileşeni

Şekil 2.4' de, Şekil 2.3' deki B_3 dalgasının, birkaç periyottaki değişimi gözükmektedir. Akı yada akı yoğunluğunun alternatif bileşeninin ekseni için çizilen kesikli çizgi normal bir sinüzoidal eğriden ne kadar sapıldığını gösterir, Şekil 2.4.a. Başka bir deyişle, kesikli çizgi geçici durum bileşeni, sinüzoidal olanda sürekli hal bileşenini göstermektedir. Her iki bileşen Şekil 2.4.b' de ayrı ayrı gösterilmiştir.



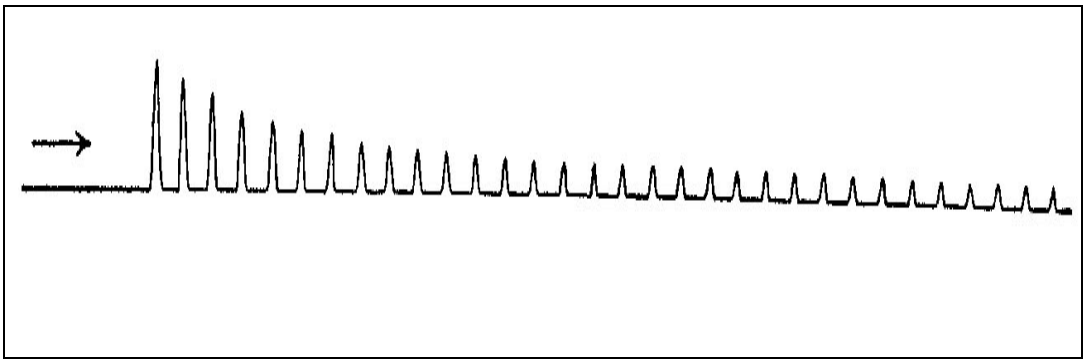
Şekil 2.4.a : Geçici ve normal halde akı değişimi



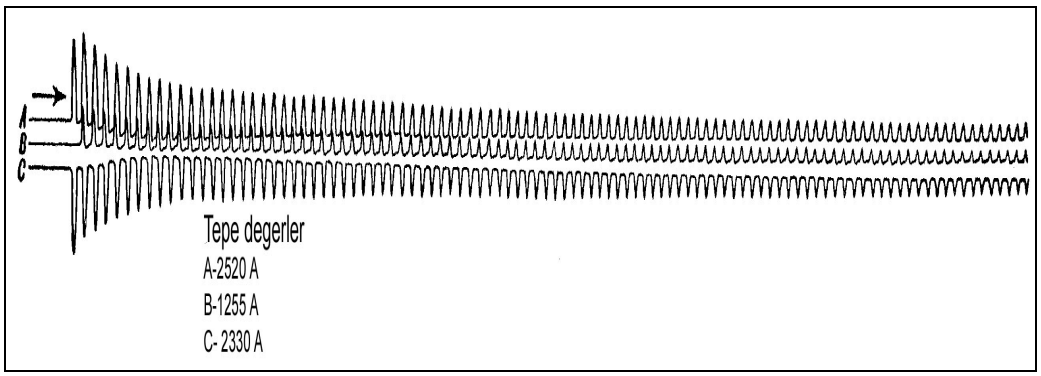
Şekil 2.4.b : Devreye girme akımının geçici (DC) ve sürekli hal (AC) bileşeni

Teorik olarak, geçici hal bileşeni, indüktansın her periyotta değişiminden dolayı, yukarıda bahsedilen şekillerdeki gibi düzgün bir çizgi izlemez. Devreye girme akımının genliği ve dalga şeklide bu akı dalgalarını takip edecektir.

Tipik devreye girme akımlarının osilogram çıktıları Şekil 2.5.a ve b' deki gibidir.



Şekil 2.5.a : Devreye girme akımının tipik bir osilogramı, tek fazlı



Şekil 2.5.b : Devreye girme akımının tipik bir osilogramı, üç fazlı

2.3 Devreye Girme Akımının Tepe Değeri

Teorik olarak, akı dalgası ile akıya orantılı akım dalgası, çekirdeğin histerisis eğrisi yardımıyla hesaplanabilir. Fakat histerisis eğrisi veya mıknatıslanma eğrisi her zaman kolaylıkla elde edilemez. Özellikle bu eğrilerinin yüksek akı yoğunluklarındaki kısımları çoğu zaman bulunamaz.

Demir moleküllerinin bir manyetik alana eklediği en yüksek akı yoğunluğu yaklaşık 2.02 T (2.02 Wb/m^2) kadardır. A_C çekirdeğin kesidi olmak üzere, çekirdekte oluşacak en yüksek akı $(B_r + 2B_{maks})A_c$ olur. Bu akının yaklaşık olarak $2.02\,A_C$' lik bölümünü demir moleküllerinin taşıdığını düşünürsek, geri kalan kısmını, $(B_r + 2B_{\max} - 2.02)A_C$' yi, bobin tarafında uyarılan A_S kesitli hava taşıyacaktır.

Hava çekirdekli bobinde $(B_r + 2B_{maks} - 2.02)A_C / A_S$' lik akı yoğunluğunu oluşturmak için gerekli olan ampersarım, bobinin hemen paralelindeki demir çekirdekli kısmında 2.02 T' lık akı yoğunluğuna ulaşmak için gerekli olan ampersarımdan çok çok büyük olacaktır. Dolayısıyla, aşırı doyuma ulaşmış çekirdeklerde devreye girme anında oluşan darbe akımlarının hesabı için hava çekirdekli bobinin indüktansı kullanılabilir. Bu durumda hava çekirdekli bobinin akı yoğunluğu olan B_S denklem 2.3'te görülmektedir .

$$B_S = (B_r + 2B_{maks} - 2.02)A_C / A_S \tag{2.3}$$

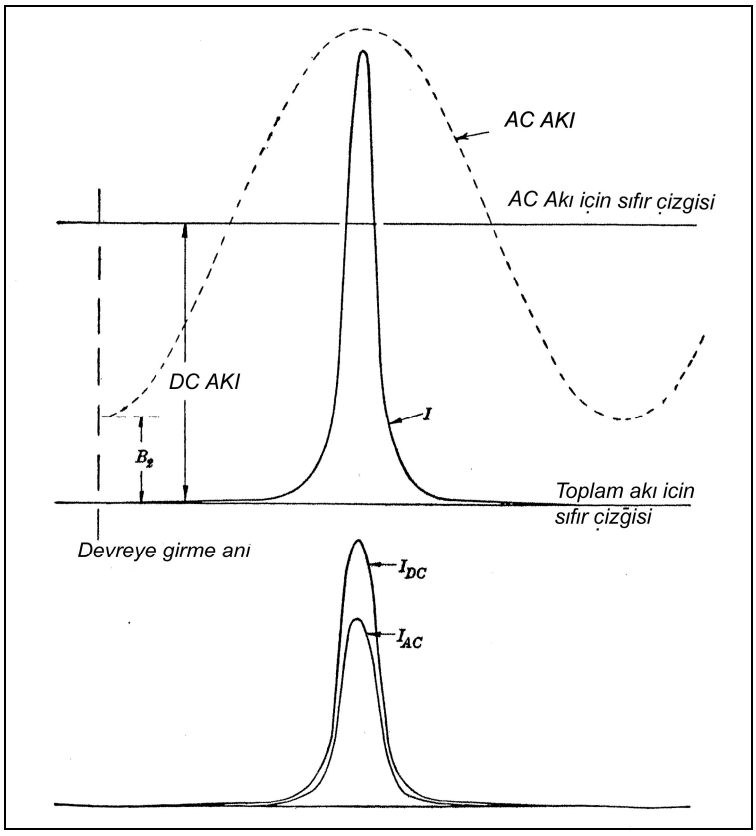
Bobinin boyuna h (m), sarım sayısına N denirse, en yüksek akımın tepe değeri 2.4 denklemindeki gibidir.

$$I_p = \frac{B_S h}{N\mu_0} = \frac{h10^7 A_C}{4\pi N A_S}(B_r + 2B_{maks} - 2.02) \tag{2.4}$$

Bu formül, akım dalgasının hesabı için değil, sadece en yüksek değerinin bulunması için kullanılabilir. Akı yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, formülün gerçeğe yakınsaklığı o kadar artacaktır.

2.4 Devreye Girme Akımının Zaman Sabiti

Şekil 2.5' den görüleceği üzere, devreye girme akımı ilk periyotlarda çok hızlı bir şekilde azalırken daha sonraki periyotlarda daha yavaş bir azalma olur.

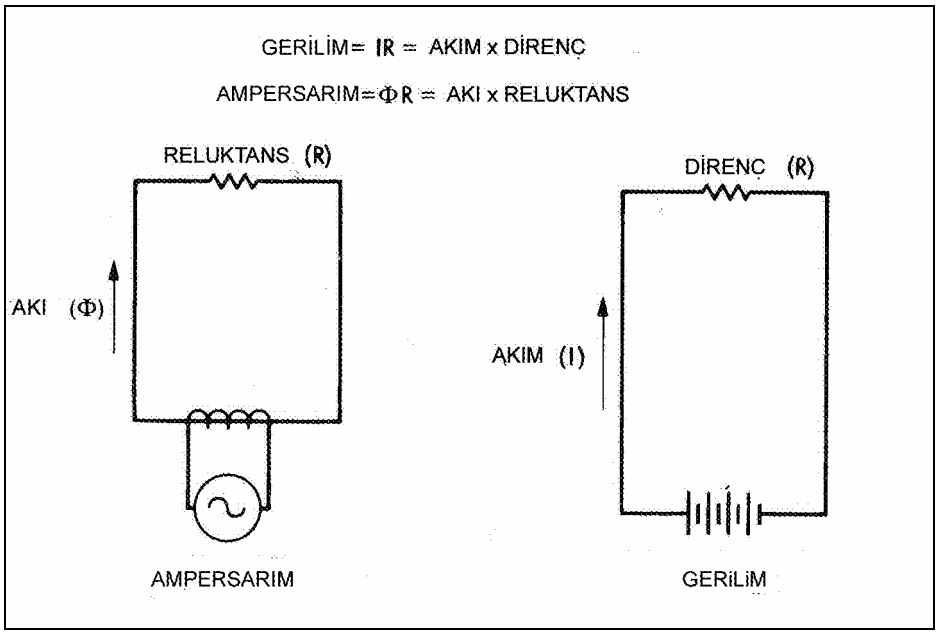


Şekil 2.6 : Mıknatıslanma akımının, akının geçici ve sürekli haline göre ikiye ayrılmış hali.

Akımın dalga formunu oluştururken, keskin bir şekilde geçici ve sürekli hal formuna ayırmak kolay değildir.Akım DC ve AC bileşenlere ayrılabilir. Ancak, AC bileşenin ilk periyotlardaki değeri ile daha sonraki değerleri arasında çok fark olduğundan, AC bileşen için sürekli hal çözümüdür demek doğru değildir. Akımın ilk periyottaki değerini, anlık olarak iki parçaya bölüp; birinin geçici akıya, diğerinin alternatif akıya bağlı olduğunu düşündüğümüzde, Şekil 2.7' deki grafik elde edilir.

Lineer bir bobinde, akımın geçici bileşenin zaman sabiti (R/L)' ile karakterize edilir. Bobinin direncinin sabit kabul edersek, zaman sabitine etki eden diğer parametre, L indüktansı ayrıntılı olarak incelenmelidir.

Transformatörlerde akı dağılımı için çizilen manyetik bir devre ile temel bir elektrik devresinin karşılaştırılması Şekil 2.7' deki gibidir.



Şekil 2.7 : Akım ve akı devresinin karşılaştırılması.

Manyetik devrenin relüktansı R_m aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$R_m = \frac{MYU}{\mu_r \mu_0 A_C} \tag{2.5}$$

MYU= Manyetik yolun uzunluğu

μ_r =Malzemenin manyetik geçirgenliği

μ_0 =Mutlak geçirgenliği

$$IN = R_m \phi \tag{2.6}$$

IN = Ampersarım

Bir devrede, indüktif gerilim düşümü, Δu , devreden geçen akımın zamana bağlı olarak değişimi ile oluşur ;

$$\Delta u = L\frac{di}{dt} \tag{2.7}$$

Manyetik akı ile ilişkili olan L indüktansının tanımı ise aşağıdaki gibi verilir :

$$L(i) = N\frac{d\phi}{di} \tag{2.8}$$

N= Sarım sayısı

Akının akım ile sabit bir oranda değiştiği lineer devrelerde bu denklemi şu şekilde yazılır ;

$$L = N\frac{\phi}{i} \tag{2.9}$$

Daha önce de belirtildiği üzere ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği sabit değildir. Ancak, belirli bir yaklaşıklıkla 2.9 formülü ferromagnetik malzemeli çekirdeklerin doyma noktasına kadar kullanılabilir. Doyma noktasından sonra, manyetik geçirgenlik çok düşeceği için artık indüktans lineer olmaktan uzaklaşır. İndüktans, çekirdek doyuma ulaşırken çok küçülür. Çekirdek tam doyduktan sonra da artık büyük bir yaklaşıklıkla tekrar lineer bir hal alır.

2.6 nolu denklemden akıyı çekersek ;

$$\phi = \frac{IN}{R_m} \tag{2.10}$$

2.10 ve 2.9 nolu denklemlerden L indüktansını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz :

$$L = \frac{N^2}{R_m} \tag{2.11}$$

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 A_C N^2}{MYU} \tag{2.12}$$

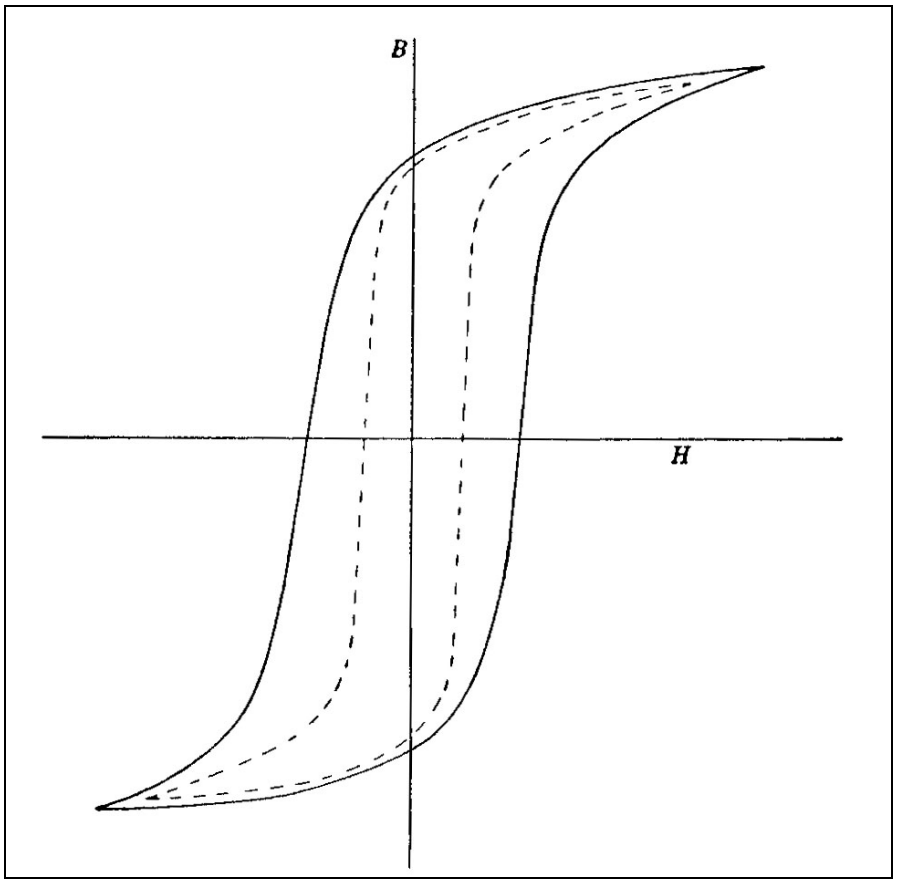
2.11 nolu denklemden kolayca anlaşılacağı üzere, eğer relüktans biliniyorsa indüktansın hesaplanması çok basittir.

Ancak doyma etkisine maruz kalmış bir çekirdeğin geçirgenliği sabit olmadığı için, indüktansı da sabit olmayacaktır. İndüktansın sabit olmaması zaman sabitininde değişken olduğunu gösterir. Devreye girme akımı, indüktansın dolayısıyla zaman sabitinin değişimine bağlı olarak adım adım hesaplanmalıdır.

2.5 Artık Akı Yoğunluğunun Genliği

Literatürde artık akı yoğunluğu için tipik olarak % 60...85 (B_{maks}) değerleri geçmektedir [2, 4].

Düşük kayıplı olarak üretilen silisli sacların, artık akı yoğunluğu değeri biraz daha iyi olmakla beraber normal saclarla hemen hemen aynıdır. Yüksek kaliteli sacların histerisis kayıpları normallere oranla daha küçüktür, Şekil 2.8.



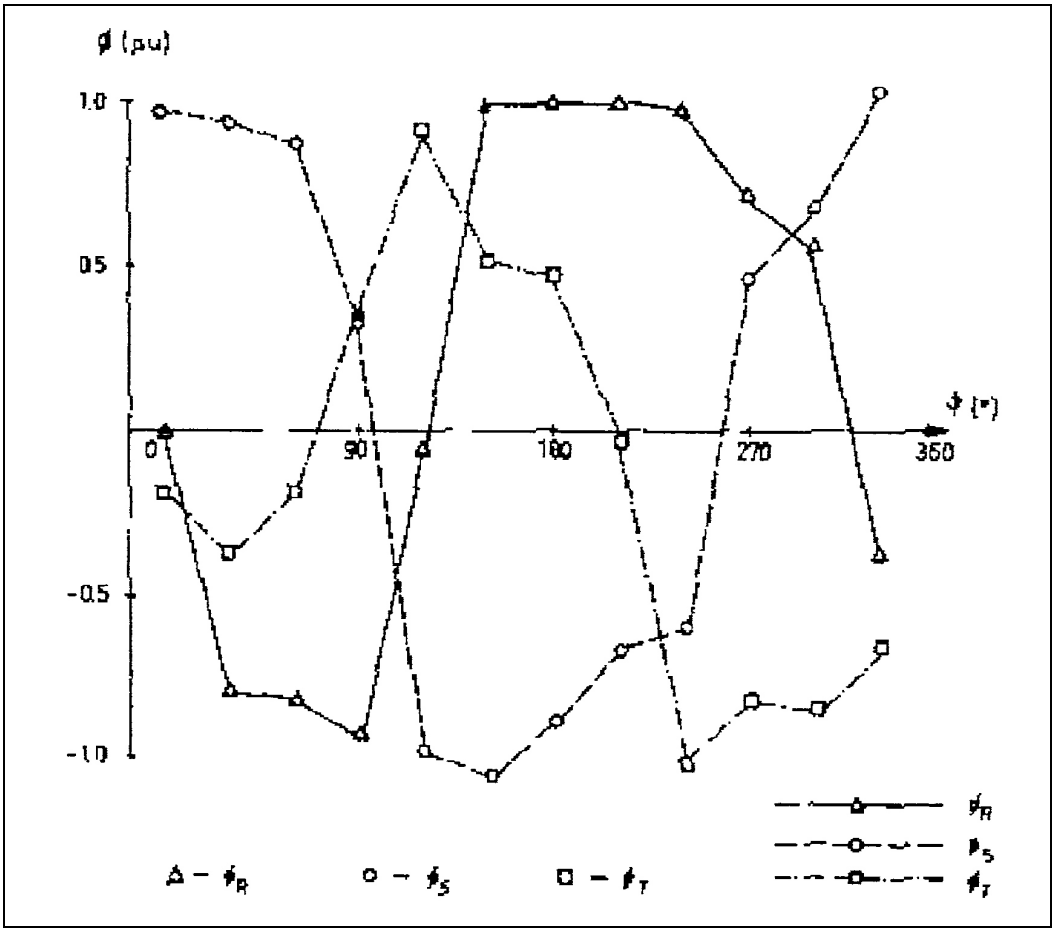
Şekil 2.8 : Düşük kayıplı sac (kesikli eğri) ile normal sacın (kesiksiz eğri) histerisis eğrilerinin karşılaştırılması

Artık akı yoğunluğu devreye girme akımının genliğini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Ancak artık akının genliğini tam olarak belirlemek oldukça güçtür.

Bir saha testinde elde edilen sonuçlar Şekil 2.9'daki gibidir, Oeverby transformatörü, İsveç, 1967 [3]. Saha testi yapılan transformatör üç fazlı, üç bacaklı, 200 MVA, 210 kV ve üçgen sargılıdır. Enerjili transformatörün kesicisi bir zaman kontrol cihazı ile kontrol edilmiştir. 0^0 ile 360^0 arasında 30^0 aralıklarla açma verilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Yapılan onüç tane açmanın onunda, bir fazda, pozitif yüksek kalıcı akı (> 0.7 p.u.),
- Diğer fazda bir tane yüksek negatif kalıcı akı
- Üçüncü fazda da göreceli olarak düşük bir akı (< 0.5 p.u.),

bulunmuştur.



Şekil 2.9 : R, S, T fazları için kesicilerin açma açılarına bağlı olarak hesaplanan artık akılara ait test sonuçları

3. DEVREYE GİRME AKIMLARININ HESABI İÇİN YAKLAŞIK MATEMATİK MODEL

Devrelerdeki geçici olaylar genellikle açma-kapama anlarında oluşur .Bu tip olaylar : Kesicinin kapanarak bir yükü devreye alması anında oluşabilecek aşırı akımlar, yada, kesicinin açarak, bir yükü devreden çıkarırken oluşabilecek aşırı gerilimlerdir.

Sıklıkla gerçekleşebilecek olan bu iki olaydan, transformatörlerin devreye alınması ile ilgili olduğu için ilki üzerinde durulacaktır.

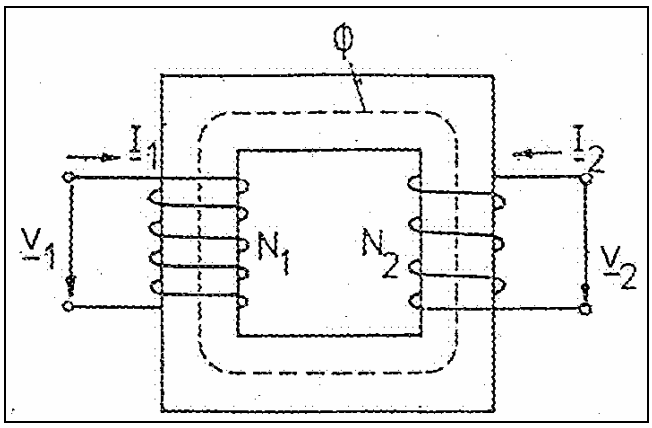
3.1 Kapama Anında Oluşan Geçici Olay, Yaklaşık Matematik Model

Şekil 3.1 deki gibi gösterilen transformatöre ilişkin gerilim denklemleri aşağıdaki gibidir :

$$V_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \tag{3.1}$$

$$V_2 = I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} \tag{3.2}$$

Bu denklemler transformatörün bütün sürekli ve geçici hallerini gösterirler.

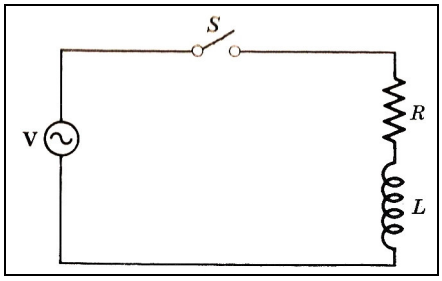


Şekil 3.1 : Gerilim denklemlerinin kurulmasında kullanılan transformatör.

Aşağıdaki hesaptan görüleceği üzere ikincil sargısı açık olan bir transformatörün birincil sargısı devreye bağlandığında oldukça büyük akım darbesi meydana gelebilir.

3.1 denkleminde $I_2 = 0$ olduğunda,

$V_1 = I_1 R_1 + L_1 \dfrac{dI_1}{dt}$ denklemini elde ederiz. Bu denkleme ilişkin devre Şekil 3.2' deki gibidir.



Şekil 3.2 : Boşta devreye girme anında oluşan darbe akımlarının hesabında kullanılan eşdeğer devre

Bu devrede birbirine seri olarak bağlı olan direnç ve indüktansın güç faktörü,

$$\cos\varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{\left(R^2 + \omega^2 L^2\right)^{1/2}} \tag{3.3}$$

İncelemeyi basitleştirmek amacı ile, kaynağın empedansını devreninkinin yanında ihmal edelim. Açısal frekans ω ile değişen gerilim kaynağının fazörünü, **V** ile gösterirsek ; S anahtarı kapandığında devreden geçen akım için şu denklem yazabilir,

$$RI + L\frac{dI}{dt} = \mathbf{V} = V_m \sin(\omega t + \theta) \tag{3.4}$$

Eklenen θ terimi, gerilim dalgasının herhangi bir noktasında S anahtarının kapandığı durumu gösterir.

3.4 denklemini çözmeye başlamadan önce bu devre hakkında şunları söyleyebiliriz: Devreden geçen akım, sürekli halde, kabaca V/Z değerine ulaşacak olup, akım ile gerilim arasında 3.3 denklemi ile belirlenen, φ açısı olacaktır. Akım sürekli haldeki değerine, devrenin indüktansından dolayı bir anda ulaşamayacaktır. Akımın sabit bir değere ulaşıncaya kadar gelişen geçici olayın incelenmesinde devrenin zaman sabiti önemli bir yer tutacaktır.

3.4 denklemini tekrar yazılırsa,

$$RI + L\frac{dI}{dt} = V_m \{\sin \omega t \cos\theta + \cos \omega t \sin\theta\}$$

Her iki tarafın Laplace dönüşümünü alındığında,

$$Ri(s) + Lsi(s) - LI(0) = V_m \left\{ \frac{\omega \cos\theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \sin\theta}{s^2 + \omega^2} \right\} \tag{3.5}$$

θ için bir değer atandığında, $\sin\theta$ ve $\cos\theta$' nın sabit bir değer olacağını ve I(0)' ın da bu devre için sıfır olduğu gözönüne alındığında, denklemin çözümü aşağıdaki gibidir,

$$i(s) = \frac{V_m}{L} \frac{1}{(s + R/L)} \left\{ \frac{\omega \cos\theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \sin\theta}{s^2 + \omega^2} \right\} \tag{3.6}$$

İncelemeyi kolaylaştırmak için,

$$A = \frac{V_m}{L}\omega\cos\theta,$$

$$B = \frac{V_m}{L}\sin\theta$$

ve

$$\alpha = \frac{R}{L}$$

dönüşümleri yapılabilir.

3.6 denklemi bu döşümler yardımı ile şu şekilde tekrar yazılabilir,

$$i(s) = \frac{A}{(s+\alpha)(s^2+\omega^2)} + \frac{Bs}{(s+\alpha)(s^2+\omega^2)} \tag{3.7}$$

Denklemdeki terimler parçalara ayırma yöntemi ve tablolar kullanılarak çözümlenebilir,

$$\frac{1}{(s+\alpha)(s^2+\omega^2)} \equiv \frac{1}{(\alpha^2+\omega^2)}\left\{\frac{1}{s+\alpha} - \frac{s}{s^2+\omega^2} + \frac{\alpha}{s^2+\omega^2}\right\} \tag{3.8}$$

Böylece,

$$£^{-1}\frac{1}{(s+\alpha)(s^2+\omega^2)} = \frac{1}{(\alpha^2+\omega^2)}\left\{e^{-\alpha t} - \cos\omega t + \frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t\right\} \tag{3.9}$$

3.7' deki diğer terim, $Bs/(s+\alpha)(s^2+\omega^2)$ benzer şekilde değerlendirilebilir. Bundan sonra ters Laplace dönüşümünün aşağıdaki özelliği kullanılırsa,

$$£F'(t) = s£F(t) - F(0) \tag{3.10}$$

3.10 denkleminde, 3.9 denkleminin diferansiyeli ve ikinci terimin ters Laplace dönüşümü alınabilir,

$$£^{-1}\frac{s}{(s+\alpha)(s^2+\omega^2)}=\frac{1}{(\alpha^2+\omega^2)}\left\{-\alpha e^{-\alpha t}+\omega\sin\omega t+\alpha\cos\omega t+1-1+0\right\} \qquad (3.11)$$

3.5 nolu denklemi, 3.9 ve 3.10 nolu denklemler ile tekrar değerlendirildiğinde,

$$I(t)=\frac{V_m}{L(\alpha^2+\omega^2)}\left\{\omega\cos\theta\left[e^{-\alpha t}-\cos\omega t+\frac{\alpha}{\omega}\sin\omega t\right]+\sin\theta\left[\alpha\cos\omega t+\omega\sin\omega t-\alpha e^{-\alpha t}\right]\right\}$$

$$=\frac{V_m}{L(\alpha^2+\omega^2)}\left\{\left[\omega\cos\theta-\alpha\sin\theta\right]e^{-\alpha t}+\left[\omega\cos\theta-\alpha\sin\theta\right]\cos\omega t+\left(\alpha\cos\theta+\omega\sin\theta\right)\sin\omega t\right\} \qquad (3.12)$$

3.3 nolu denklemden, $\tan\varphi=\omega L/R=\omega/\alpha \Rightarrow \sin\varphi=\omega/(\alpha^2+\omega^2)^{1/2}$ ve $\cos\varphi=\alpha/(\alpha^2+\omega^2)^{1/2}$ ifadeleri 3.12 denkleminde kullanıldığında akım için aşağıdaki denklem elde edilir [8],

$$I(t)=\frac{V_m}{L(\alpha^2+\omega^2)^{1/2}}\left\{-\sin(\theta-\varphi)e^{-\alpha t}+\sin(\omega t+\theta-\varphi)\right\}$$

$$I(t)=\frac{V_m}{(R^2+\omega^2L^2)^{1/2}}\left\{\sin(\omega t+\theta-\varphi)-\sin(\theta-\varphi)e^{-\alpha t}\right\} \qquad (3.13)$$

3.2 Yaklaşık Matematik Modelden Çıkarılan Sonuçlar

3.13 denkleminden şu sonuçları çıkarabiliriz : Devreye girme akımlarına etki eden etkenlerin bir kısmı transformatörün dışındaki devre elemanlarından, bir kısmı ise transformatör tasarımından gelmektedir.

Transformatörün dışından gelen etkenler :

- Denklemde geçen R değişkeni transformatörün direnci ifade etmektedir ve transformatörün tasarımından gelen bir etkendir. Ancak, gerçekte transformatör sisteme bağlanırken bu dirence seri olarak, kaynağın ve iletim hattının direnci eklenecektir. Dolayısıyla seri olarak bağlanan bu dirençler devreye girme akımını düşürücü etki yapacaklardır. Devreye girme akımlarını önleme yöntemleri bölümünde bu etkiden yararlanarak, devreye, sadece devreye girme anında bağlanan dirençler vasıtasıyla aşırı akımların nasıl düşürüldüğü gösterilecektir.

- Devreye girme anını belirleyen θ açısı da devreye girme akımlarını etkilemektedir. Bu açının uygun seçilmesi devreye girme akımlarını azaltmaya imkan verebilecektir. Devreye girme akımlarını önleme yöntemleri bölümünde kesicilerin kontrollü kapanması ile bu imkandan nasıl faydalanılabileceği gösterilecektir.

Transformatörün tasarımından gelen etkenler :

Artık akı yoğunluğuna ve çekirdek sacının tipine bağlı olarak, doyma etkisi ile değişken bir yapıya sahip olan transformatörün indüktansı, devreye girme anında oluşan darbe akımının başlıca nedenlerinden biridir.

Sargının indüktansı, fiziksel özelliklerine bağlıdır. İndüktansın bağlı olduğu etkenlerden biri ise 2.12 denkleminde görüldüğü üzere manyetik geçirgenliktir. 3.13 denkleminde, indüktans sabit gibi gözükse de, doyma noktasından itibaren manyetik geçirgenlikle birlikte, azalan yönde büyük ölçüde değişmektedir. L indüktansı 3.13 denkleminde paydada yer aldığı ve doyma noktasından sonra çok çok küçüldüğü için, devreye girme anında yüksek darbe akımlarının meydan gelmesine neden olur. Devreye girme akımının hesaplanabilmesi için, çekirdeğin doyma etkisi ile değişen manyetik geçirgenliğene bağlı L indüktansının her t anı için hesaplanması gerekmektedir.

L indüktansının 2.12 denklemine göre bağlı olduğu diğer etkenler ise sargının iç çapı ile orantılı olan sargı iç kesiti ve manyetik yoldur. 3.13 denkleminde açıkça görüldüğü üzere L indüktansını arttırmak akımı azaltıcı yönde etki yapacaktır. Ancak sadece indüktansı büyütmek için sargı iç kesitini büyütecek yada manyetik yolu arttıracak tasarımlar yapmak ekonomiklikten uzaklaşmak anlamına gelir. Bununla

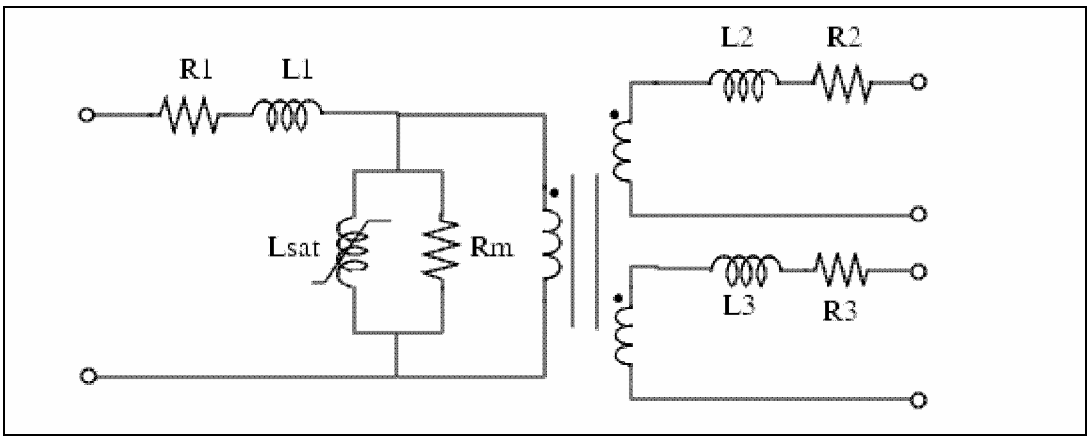
birlikte, sargının iç kesitini büyütmek ekonomik olmasa da, iç kesiti daha büyük olan sargının bulunduğu taraftan transformatörü devreye almak mümkündür. Bir çok çekirdek tipi transformatörde, çekirdeğe göre, yüksek gerilim sargısı alçak gerilim sargısında sonra yerleştirilir. Dolayısıyla iç çapı daha büyük olan yüksek gerilim sargısının yaratacağı hava çekirdekli indüktans daha büyük olacağından, transformatörlerin yüksek gerilim tarafından devreye alınması devreye girme akımlarını azaltıcı etki yapacaktır.

İncelemenin bundan sonraki bölümünde, bu bölümde ele alınanlar ışığında, daha ayrıntılı bir transformatör modelinin sayısal yöntemlerle analizi yapılacaktır.

3.3 Ayrı Kaçak Akılı Modelin Sayısal Yöntemlerle Analizi

Bu bölümde, MATLAB kullanılarak, transformatörün devreye girme anında oluşan darbe akımlarının, çekirdekteki artık akı yoğunluğuna ve devreye girme anına bağlı olarak nasıl değiştiği incelenecektir.

MATLAB' de inşa edilmiş olan "Doyma Özellikli Transformatör" (Saturable Transformer), transformatör modeli olarak kullanılacaktır [9]. Bu model ile birincil, ikincil ve üçüncül sargısı olan transformatörler incelenebilir. Devre modeli Şekil 3.3' deki gibidir.

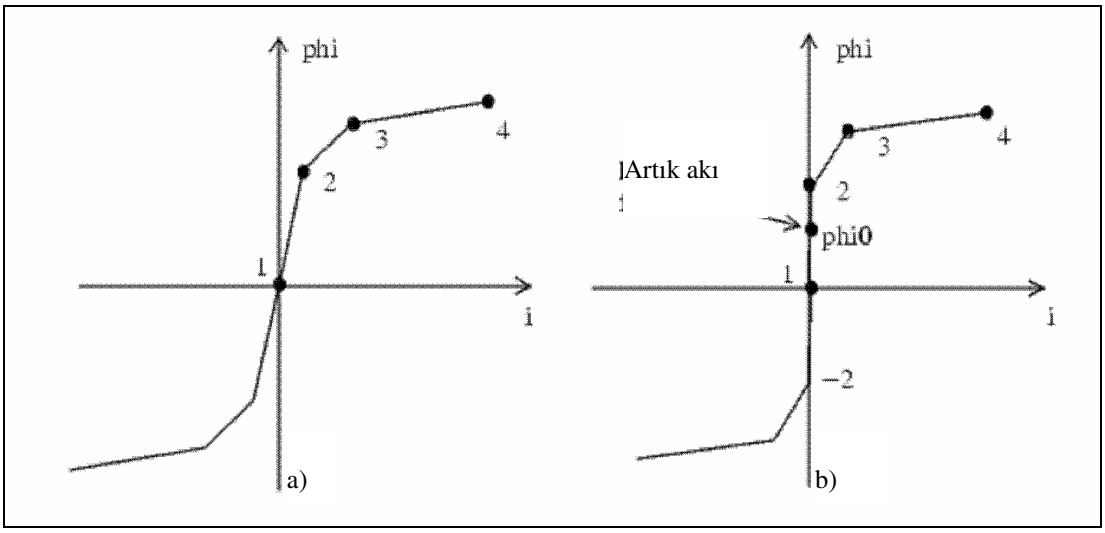


Şekil 3.3 : Doyma özellikli transformatör modelinde kullanılan eşdeğer devre.

Bu model R1, R2, R3 sargı dirençlerini , L1, L2, L3 kaçak indüktansları, Lsat ise doyuma giden indüktansı göstermektedir.

Burada ele aldığımız modelde demir kayıpları (girdap akımı ve histerisis kayıpları) lineer bir direnç, Rm ile ifade edilmiştir. Analizin temelini lineer olmayan akı-akım ilişkisinin modellenmesi oluşturmaktadır. Yapıyı karmaşık bir halden uzaklaştırmak için histerisis etkisi hesaba katılmamıştır.

Histerisis etkisi çıkartıldığında, modelin doyma karakteristiği, mıknatıslanma akımı-akı ilişkisi, parça parça doğrusallaştırma ile Şekil 3.4 teki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.4 : Parça parça doğrusallaştırma ile akı-akım eğrisinin oluşturulması. a) Artık akı yoğunluğunun olmadığı durum, b) Artık akı yoğunluğunun 2 ve -2 noktaları ile belirlendiği durum.

Bir artık akı tanımlamak istersek, phi0, doyma eğrisinin ikinci noktası akımın ihmal edilebilir bir değeri ile belirlenir, Şekil 3.4.b.

Doyma karakteristikleri programa birim sisteme (per unit) göre akı -akım çifti (i, phi) olarak girilir ve (0,0) değeri ile başlar. Program birim değerlere göre girilen akı ve akım vektörlerini standart değerlere çevirmektedir. Doyma özellikli transformatörde akı ve akım için;

$$\phi = \phi_{pu}\phi_{baz} \tag{3.14}$$

$$I = I_{pu}I_{baz} \tag{3.15}$$

İfadeleri tanımlanır. Bu ifadelerdeki kaçak akı ve akımın baz değerleri anma gerilim ve frekansında gözlenen tepe değerlerdir.

$$I_{baz} = \frac{P_N}{V_1}\sqrt{2} \tag{3.16}$$

$$\phi_{baz} = \frac{V_1}{2\pi f_n}\sqrt{2} \text{ (Vs olarak kaçak akı)} \tag{3.17}$$

1 nolu sargı 1p.u' lik sinüzoidal gerilim kaynağına bağlandığında akının baz değeri, sinüzoidal akının tepe değeri olarak tanımlanır. Yukarıda tanımlanan ϕ_{baz} değeri kaçak akının baz değerini, Volt-saniye cinsinden simgelemekte olup akının baz değeri ile arasındaki ilişki şu şekildedir :

ϕ_{baz} =Baz akı x 1 nolu sargının sarım sayısı

Endüstri pratiklerine uymak için direnç ve indüktans değerlerini de p.u. olarak tanımlamalıyız. Bu değerler transformatörün anma gerilimine, frekansına ve gücüne bağlıdır.

$$R_{p.u.} = \frac{R(\Omega)}{R_{baz}} \tag{3.18}$$

$$L_{p.u.} = \frac{L(\Omega)}{L_{baz}} \tag{3.19}$$

Her bir sargının baz direnci ve indüktansı ;

$$R_{baz} = \frac{(V_n)^2}{P_n} \tag{3.20}$$

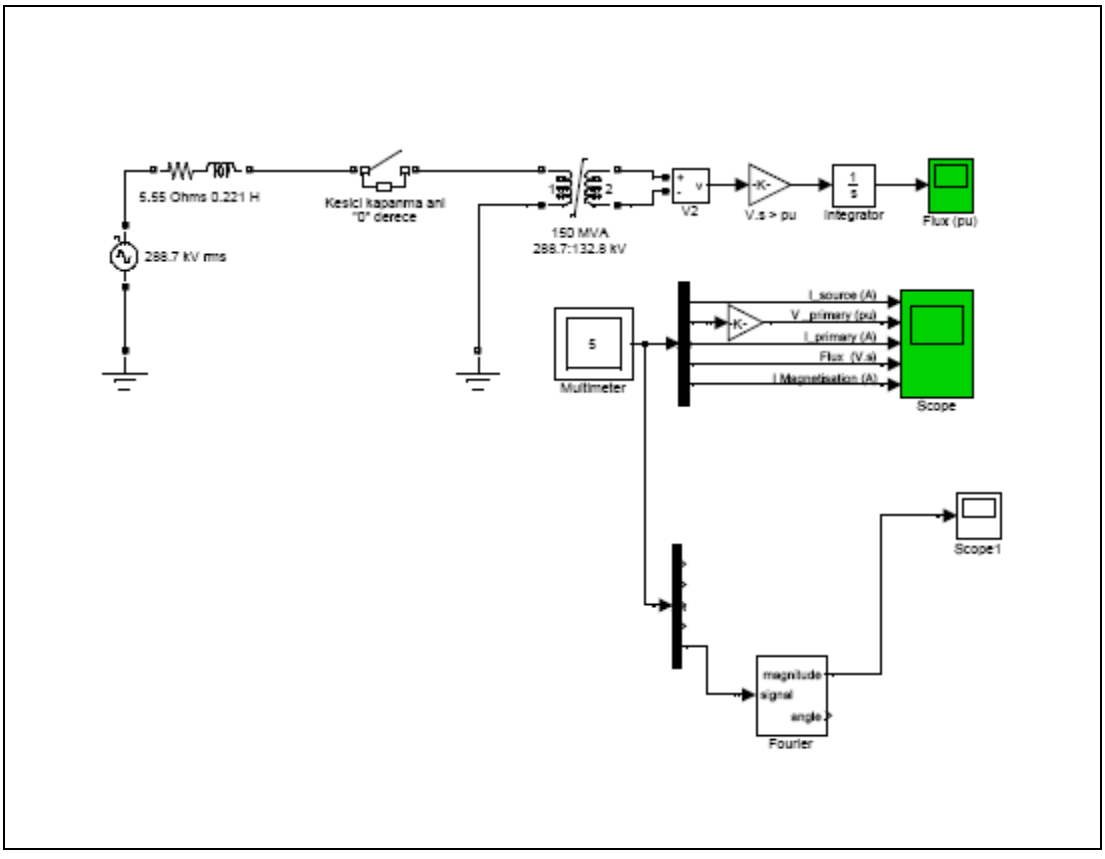
$$L_{baz} = \frac{R_{baz}}{2\pi f_n} \tag{3.21}$$

3.3.1 Sayısal Örnek

Bir generatörün beslediğini varsaydığımız örnek olarak ele alınan tek fazlı transformatörün karakteristik değerleri aşağıdaki gibi varsayılmıştır :

Güç : 150000 VA, Frekans : 60 Hz	
Birincil sargı gerilimi : 500000 V/$\sqrt{3}$,	R1=0.002 p.u. , L1=0.08 p.u.
İkincil sargı gerilimi : 230000 V/$\sqrt{3}$,	R2=0.002 p.u. , L2=0.08 p.u.
Doyma karakteristiği : [0 0, 0.0 1.2, 1.0 1.52]	
Çekirdek kayıp direnci : Rm= 500 p.u.	

Daha önce yaklaşık matematik modelden elde edilen sonuçlardan, kapama anının ve artık akı yoğunluğunun etkisi, sayısal analizi yapılacak transformatör modelinde daha belirgin bir şekilde gösterilecektir. Şekil 3.5' de örnek olarak kullanılan devre görülmektedir.



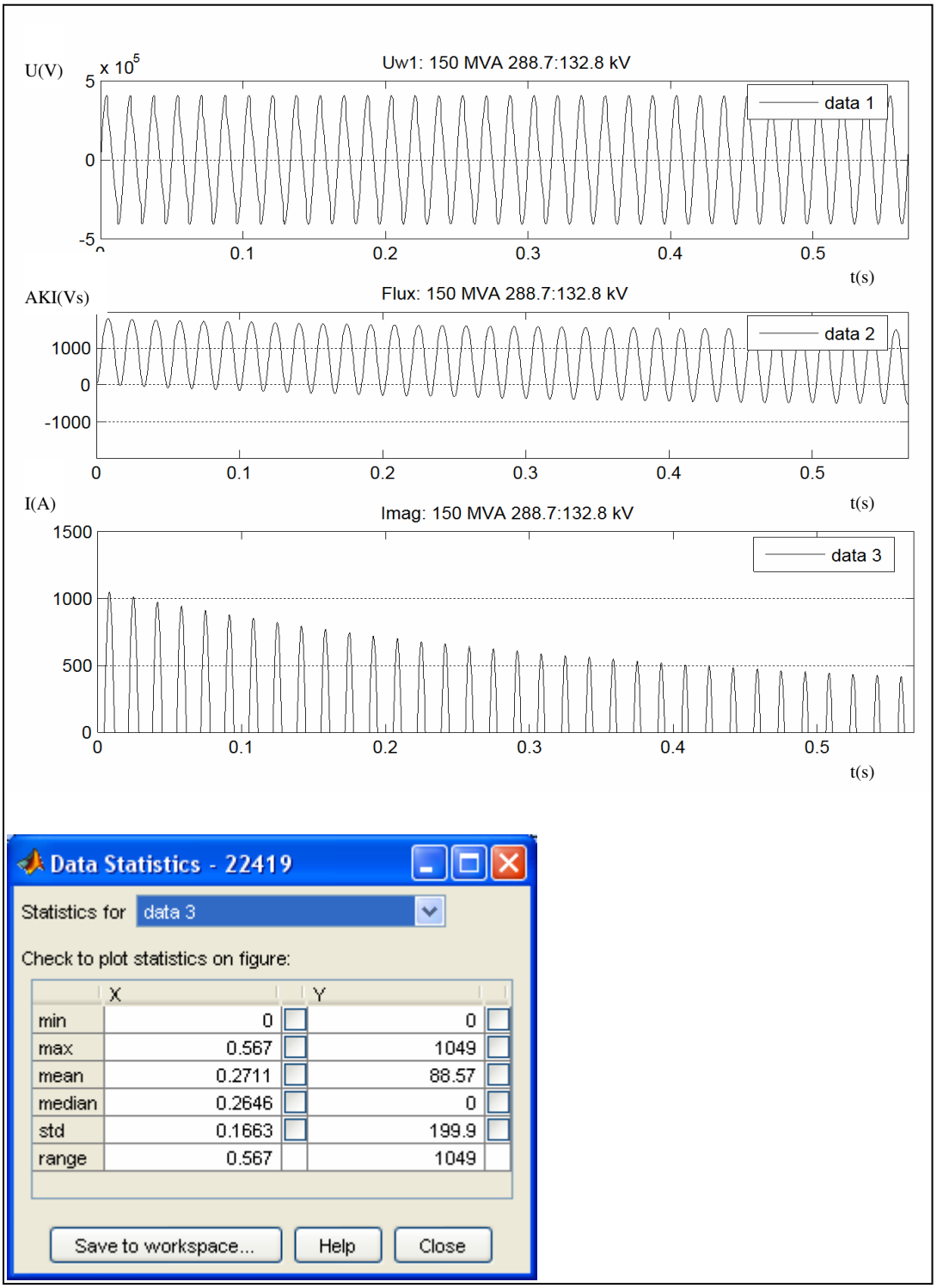
Şekil 3.5 : Sayısal analizi yapılacak örnek transformatörün bulunduğu devre.

Devredeki seri bağlı 5.55 ohm direnç ve 0.221 H indüktans ile kaynağın reaktansı basitçe modellenmiştir. Transformatörün ikincil tarafına bağlı integratör yardımı ile akı hesaplanmaktadır. Açma ve kapama anları kontrol edilebilir bir kesici ile transformatörün devreye girme anı ayarlanabilmekte, multimetre ile devredeki çeşitli parametreler ölçülebilmektedir. Ölçülen parametrelerden akım, gerilim ve akı eğrileri elde edilecektir.

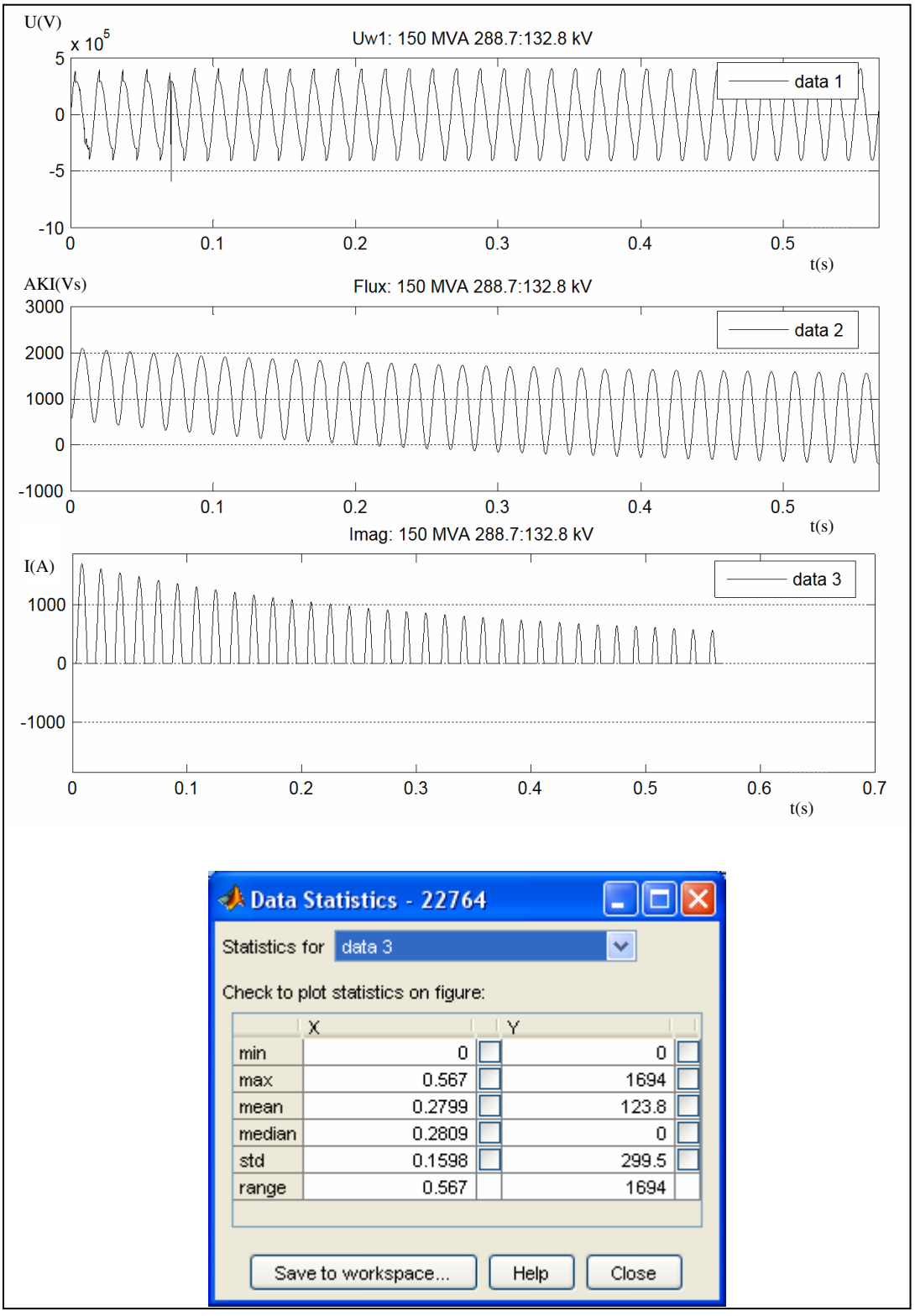
3.3.1.1 Artık Akının Etkisi

Artık akının devreye girme akımlarına etkisini gözlemlemek için üç ayrı artık akı değerinde (p.u. olarak, 0.0, 0.5, 0.8) devreye girme akımları incelenecektir.

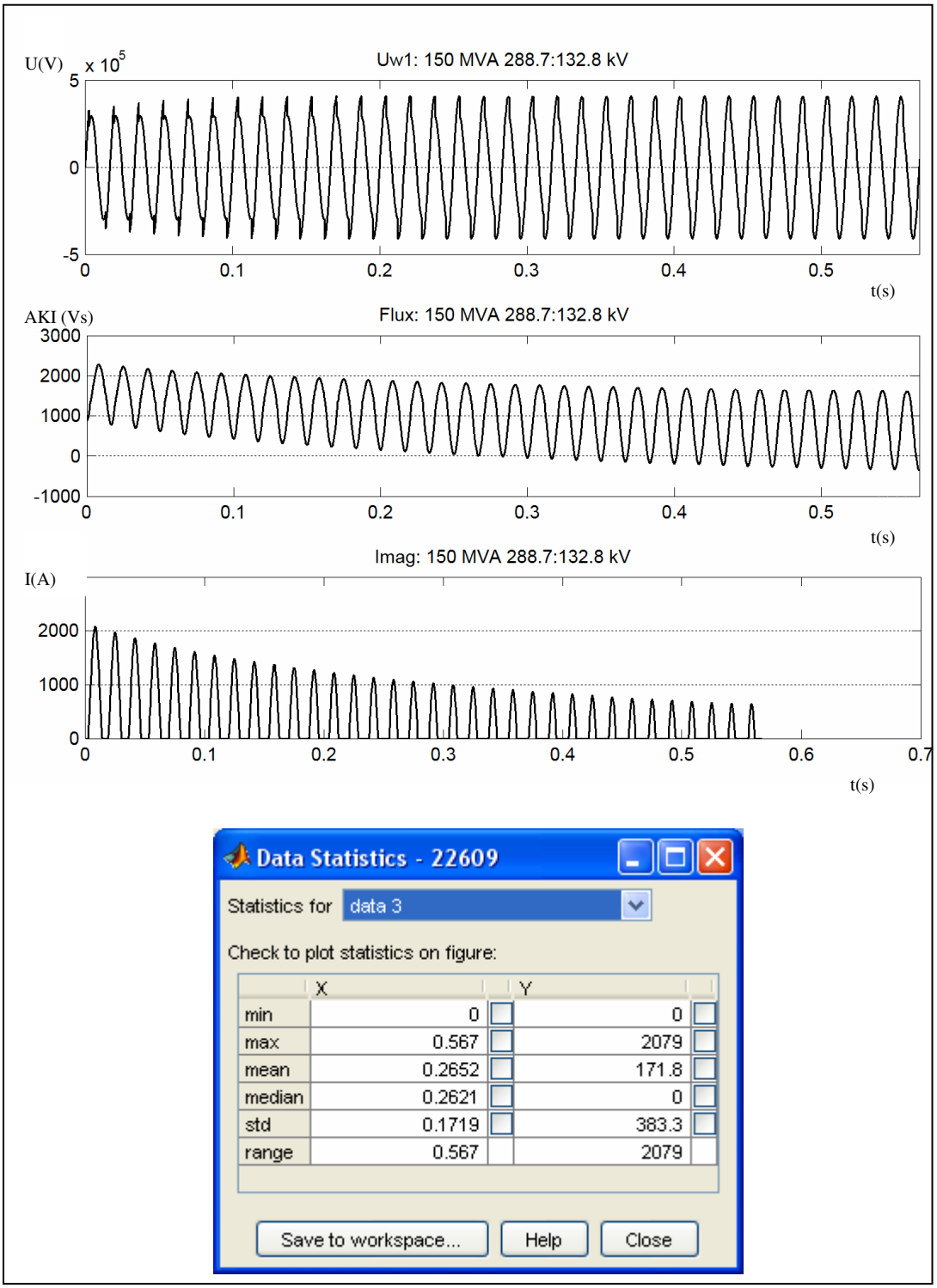
Her üç durumda da sinüzoidal gerilim dalgası 0 dereceden (0.0 s) geçerken kesici kapanmıştır.



Şekil 3.6 : Artık akının 0 p.u. olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi."Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.



Şekil 3.7 : Artık akının 0.5 p.u olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi.“Data Statistics” bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.



Şekil 3.8 : Artık akının 0.8 p.u. olduğu durumda; akım, akı ve gerilim değişimi. "Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.

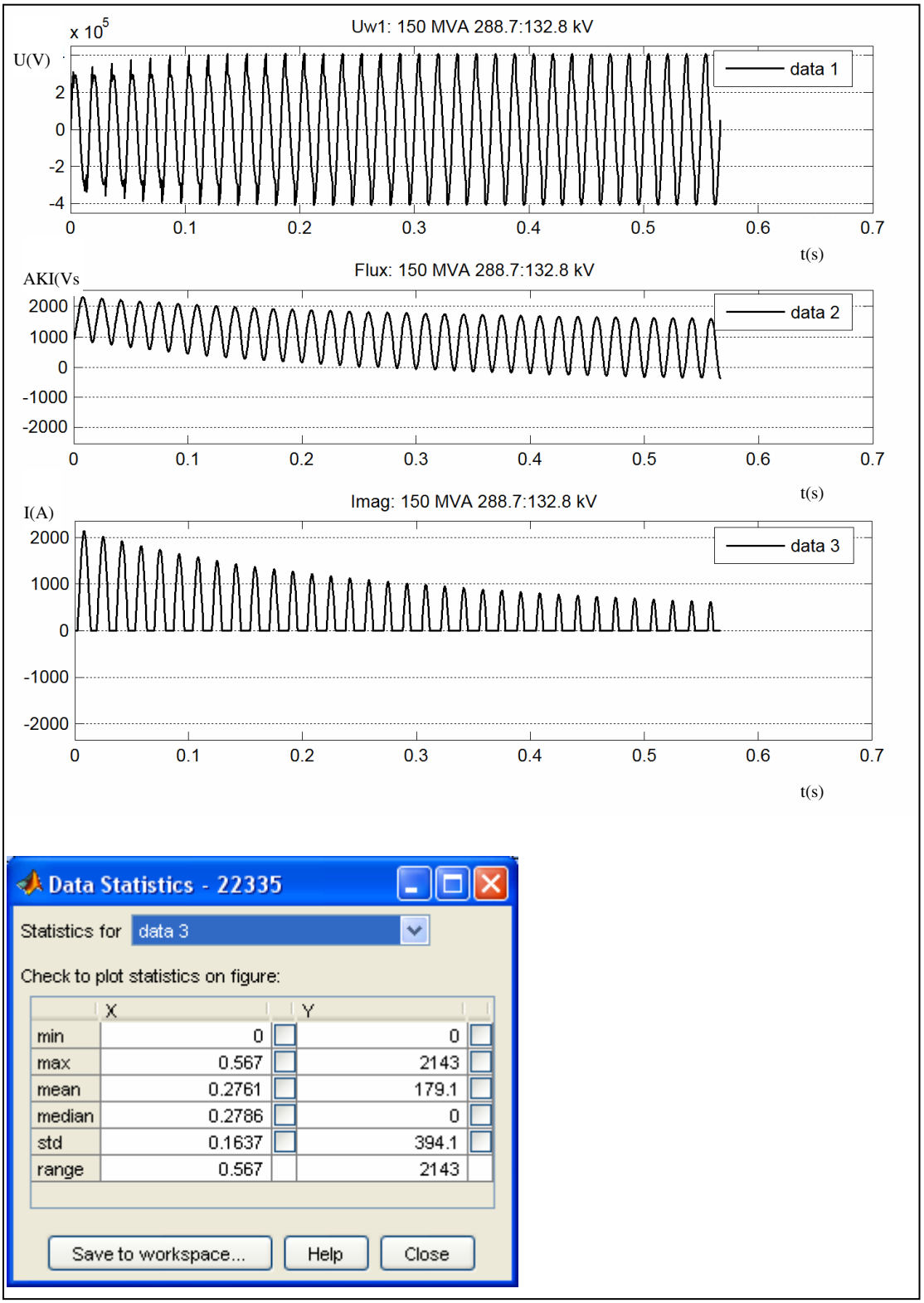
Artık akının 0, 0.5 ve 0.8 p.u. olması durumunda, devreye girme akımlarının tepe değeri ilk periyotta, Şekil 3.6…3.8' in Data statistics bölümlerinde gözüktüğü üzere, 1049 A, 1694 A ve 2079 A değerlerine ulaşmaktadır,. 0 ve 0.8 p.u artık akı değerleri karşılaştırıldığında, devreye girme akımlarının yaklaşık iki kat arttığı

görülmektedir.Sayısal çözüm, devreye girme akımlarının tepe değerinin, çekirdekteki artık akı ile yakından ilgili olduğunu göstermektedir.

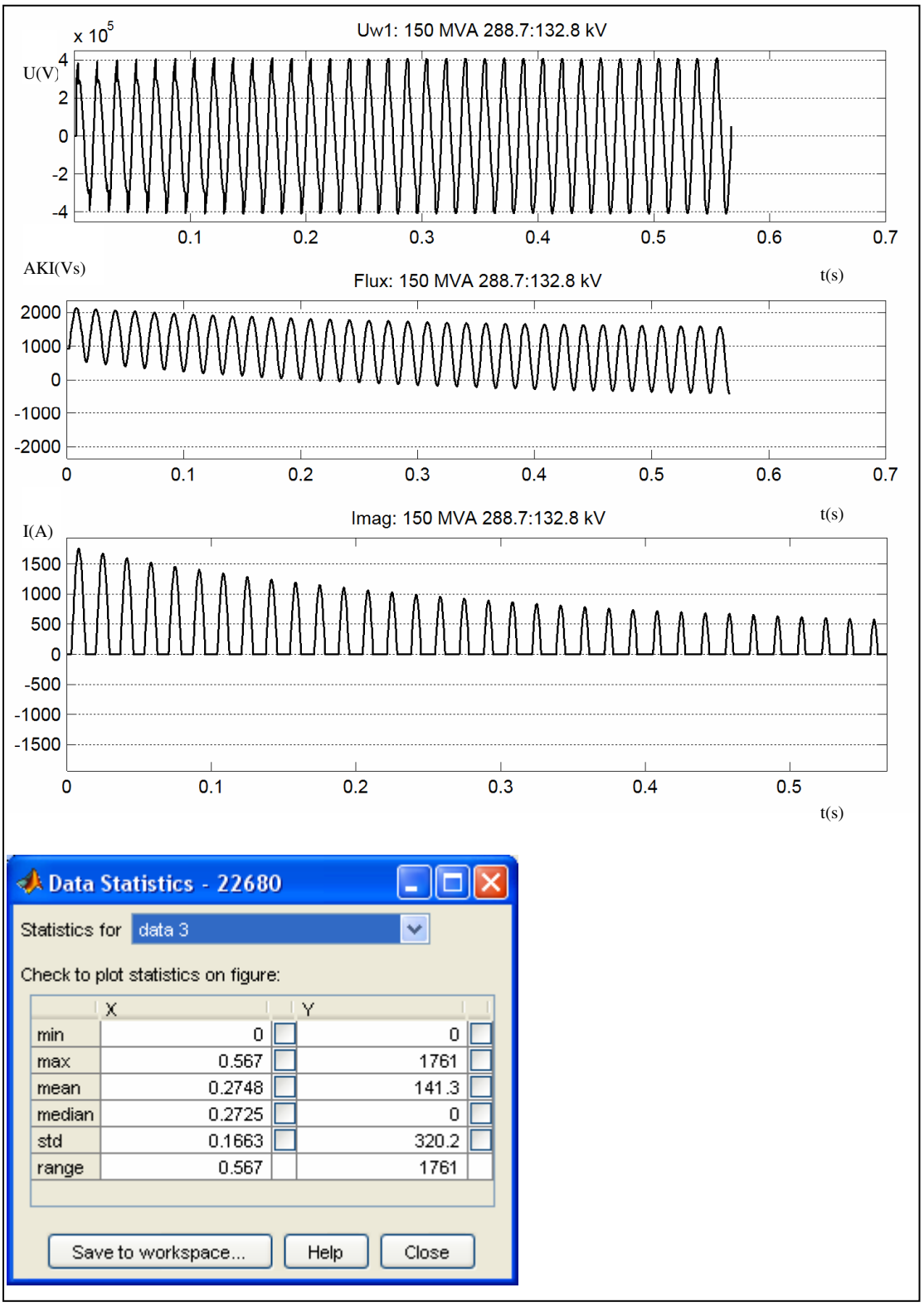
3.3.1.2 Devreye Girme Anının Etkisi

Devreye girme anının, devreye girme akımlarına etkisini gözlemlemek için sinüzoidal besleme geriliminin üç ayrı anında 0, 45, 90 derecelerde (0, 0.0021, 0.0042 saniyelerde), kesicinin kapandığı durumlar incelenecektir.

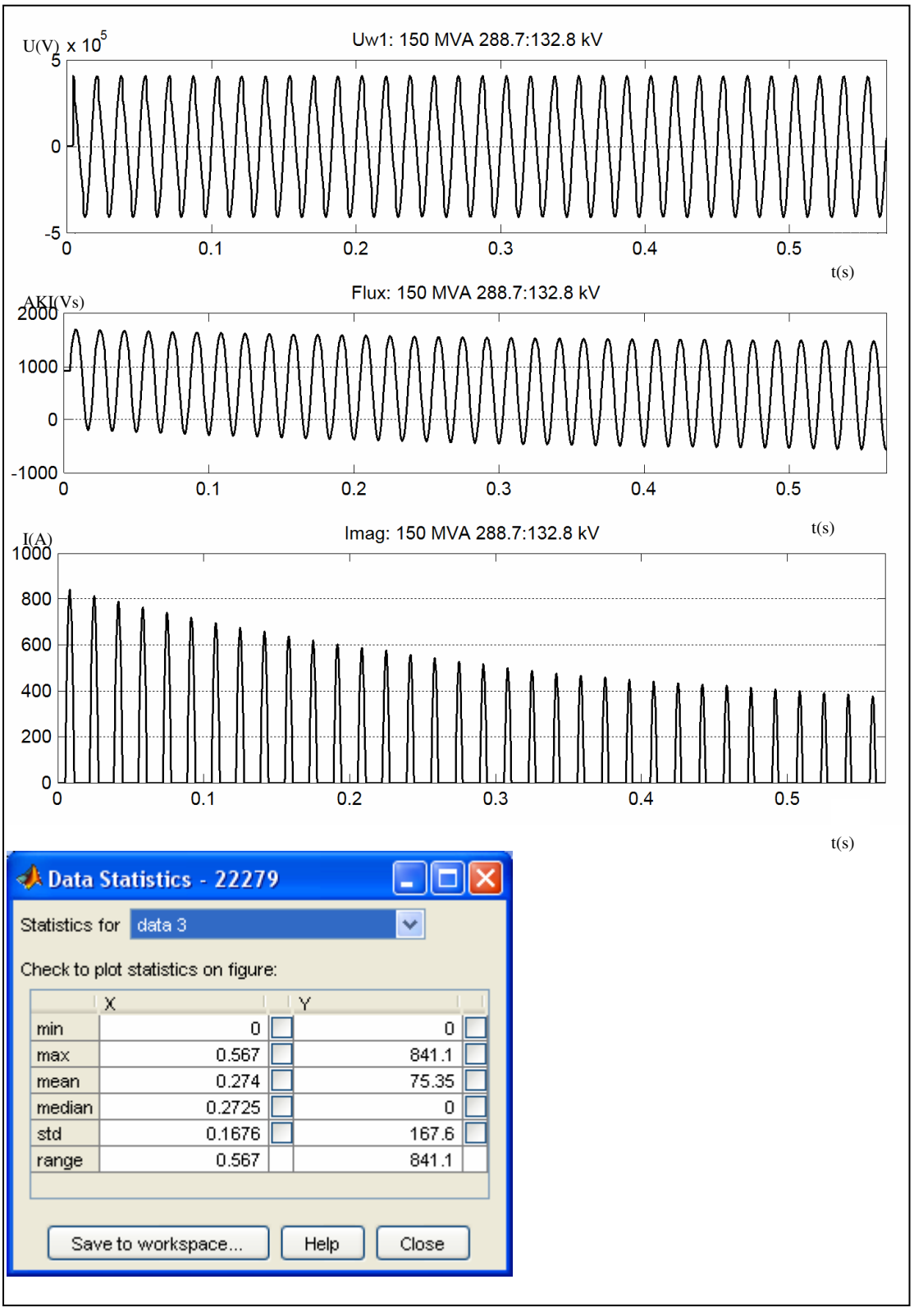
Her üç durumda da artık akı 0.85 p.u. olarak alınmıştır.



Şekil 3.9 : Devreye girme anının, sinüzoidal beslemenin 0 derecede olduğu anda; akım, akı ve gerilim değişimi. "Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.



Şekil 3.10 : Devreye girme anının, sinüzoidal beslemenin 45 derecede (0.0021 saniye) olduğu anda akım, akı ve gerilim değişimi. "Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.



Şekil 3.11 : Devreye girme anının sinüzoidal beslemenin 90 derecede (0.0042 saniye) olduğu anda akım, akı ve gerilim değişimi. "Data Statistics" bölümünde akımın çeşitli değerleri gözükmektedir.

Sinüzoidal dalga formuna sahip besleme geriliminin üç farklı anında devreye girme akımları incelendiğinde, tepe değer olarak, ilk periyotta bulunan değerler, Şekil 3.9…3.11' in Data statistics bölümlerinde gözüktüğü üzere, 0, 45 ve 90 derecelerde sırası ile ; 2143 A, 1761 A ve 841 A' dir. Devreye girme anı 0 derece ile 90 derece arasında değişirken devreye girme akımları yaklaşık 2.5 kat değişmektedir. Bu da açıkça göstermektedir ki, devreye girme anının uygun bir şekilde belirlenmesi, devreye girme akımlarını oldukça düşürebilecektir.

4. DEVREYE GİRME AKIMLARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ

Transformatörlerin devreye girme akımlarını azaltmak için bir takım önlemler almak mümkündür. Bu önlemler iki kategoriye ayrılabilir :

1) Transformatörün dışındaki elemanlar ile:
-Kesicileri kontrollü bir şekilde kapatarak,
- Devreye girme esnasında öndirenç bağlayarak,

2) Tasarım açısından :
-Anma akısını ekonomik kıstaslar elverdiği ölçüde küçük tutarak,
-Devreye girme anında indüktansı olabildiğince büyütebilmek için enerjilendirilen sargının iç çapı, ekonomik sınırlar çerçevesinde büyük tutularak,
-Doyma noktası yüksek sac seçilerek, devreye girme akımlarını azaltmak mümkün olabilir

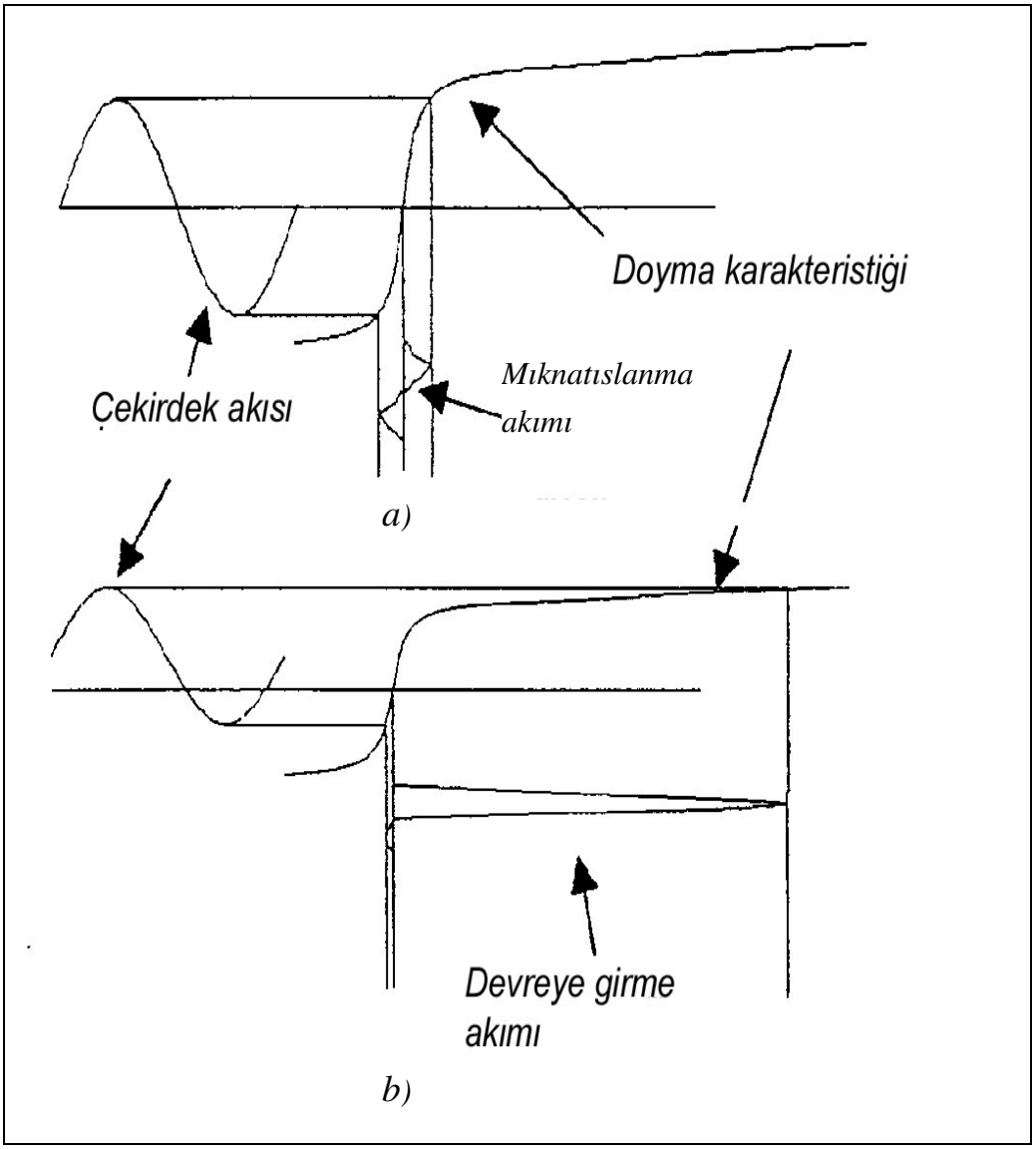
Tasarım esnasında alınacak tedbirler ekonomik kıstaslar gözönünde bulundurulduğunda belli bir noktada sınırlı kalmaktadır. Anma akısını düşürmek , normalden daha fazla çekirdek sacı, bobinlerin çapını arttırarak indüktansı büyütmek ise daha fazla bakır kullanmak anlamına gelecektir. Ancak devreye girme akımının indüktansa olan bağlılığını başka şekilde değerlendirmekte mümkündür : Yüksek gerilim sargısının iç çapı, dolayısıyla indüktansı, genelde alçak gerilim sargısından büyük olduğu için, transformatörün yüksek gerilim tarafından devreye alınması devreye girme akımlarını azaltıcı yönde etki yapacaktır.

Tasarım açısında alınabilecek önlemler kısıtlı olduğu ve halihazırda çalışmakta olan transformatörlerde değişiklik yapılamıyacağı için, bu bölümde, kontrollü kapama ve öndirenç ekleme yöntemleri üzerinde durulacaktır. Yapılan incelemelerden elde edilen sonuçlar, tez çalışmasının sonuçlar bölümünde karşılaştırılacaktır.

4.1 Kontrollü Kapama Yöntemleri

Bu bölümde transformatörleri devreye alan kesicilerin, uygun bir anda kapatılması ile devreye girme akımlarının azaltılması incelenecektir [4].

Daha önceki bölümlerde gösterilen akı-akım ilişkisi Şekil 4.1' deki gibi de gösterilebilir.



Şekil 4.1 : Çekirdeğin doyma etkisine bağlı olarak akı-akım eğrisi. a) Simetrik akı, b) Asimetrik akı

Şekil 4.1 şu şekilde yorumlanabilir: Akı ile akım arasındaki ilişkiyi gösteren eğrinin herhangi bir noktasındaki eğim bize sargının o noktadaki indüktansını verecektir.

Akının doyma noktasını aştığı yerde çok yüksek devreye girme akımları oluşacak ve bu noktadaki eğim çok küçük olduğu için indüktans da çok küçük olacaktır.

4.1.1 Transformatör Modeli

Gerçekte bir çok parametreye bağlı olan akının geçici hal bileşenini öngörebilecek transformatör modelleri oldukça karışık olabilir. Transformatörün bütün karakteristiklerini, tüm frekans spektrumunda değerlendirebilecek evrensel geçerli bir model bulunmamaktadır. Transformatörlerdeki akının geçici durumunu incelemek için en azından, inceleme altındaki transformatör için doğru bir akı-akım eğrisi bilgisi ve çekirdekteki artık akı için iyi bir model gerekmektedir. En sık kullanılan çekirdek modeli : Çekirdek kayıplarını karşılamak için bir direnç ve mıknatıslanma akımı için bu dirence paralel bağlı indüktansdır.

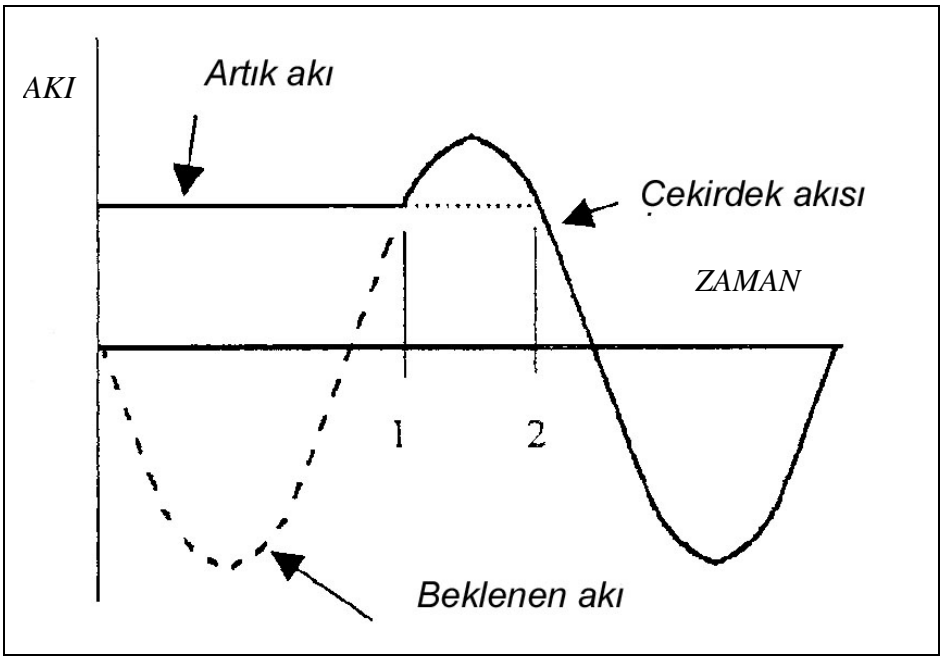
Bu bölümde ele alınan incelemede, EMTP' deki (Electromagnetic Transient Program) "Type 96 Hysteretical inductor", çekirdeğin modellenmesinde kullanılmıştır. Bu modelin elde edilmesi için Bonneville Power Administration (BPA) saha testleri yapmıştır. Model, yapılan test sonuçlarına göre elde edilmiş olsa da, bir takım sınırlamalar vardır : Frekans domeninde çekirdeğin değişik frekanslardaki davranışını bu model yansıtmamaktadır. Ancak, bu durum, incelemenin kabul edilebilir bir doğrulukta sonuçlar elde etmesini engellemeyecektir. Devreye girme akımlarını azaltmaya yönelik olarak aşağıda incelenen yöntemlerin geçerliliği, MATLAB kullanılarak örnek transformatörlerde denenecektir.

4.1.2 Tek Fazlı Transformatörlerin Kesicisinin Kontrollü Kapatılması

Trafoların devreye alınması için uygun kapama anını, başka bir devre elemanının, kapasitörün, devreye alınması için en uygun anı inceleyerek bulabiliriz.

Kapasitörler için en uygun devreye girme anı, şebeke gerilimin ani değeri ile kapasitörde bulunan artık gerilimin eşit olduğu andır. Bu anda şebeke gerilim ile kapasitör üzerindeki gerilim eşit olduğundan, akım veya gerilim dalgalanması yaşanmayacaktır. Söz konusu transformatörler olduğunda, kapasitörlerdeki artık gerilime koşut olan ifade artık akıdır. Dolayısıyla temel prensip olarak, transformatörler için kesicilerin en uygun kapanma anı, enerjilenme anında

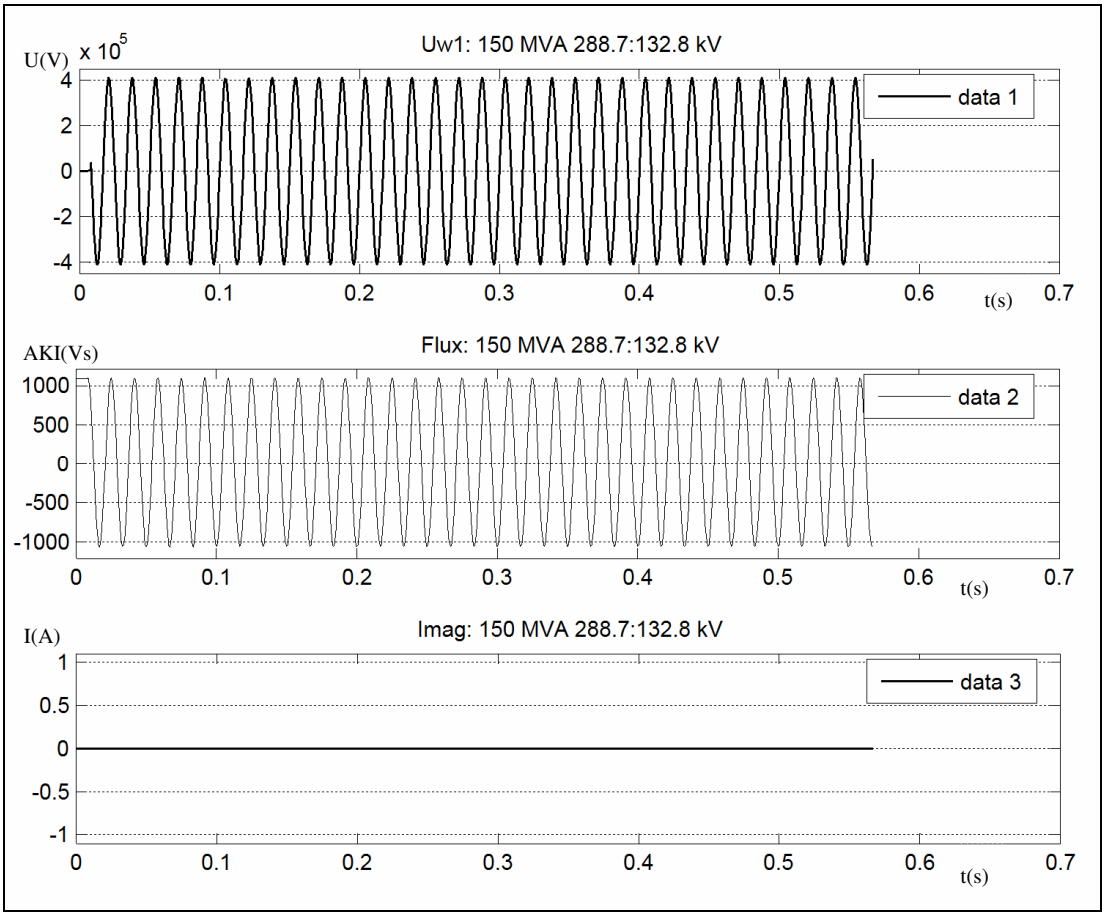
indüklenen akının (uygulanan gerilimin integrali), çekirdekteki artık akıya eşit olduğu andır. Bu prensip Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Tek fazlı transformatörler için uygun devreye girme anları, 1 ve 2 nolu anlardır.

Üçüncü bölümde, Şekil 3.4' de gösterilen devrede MATLAB kullanarak bu yöntemi inceleyebiliriz.

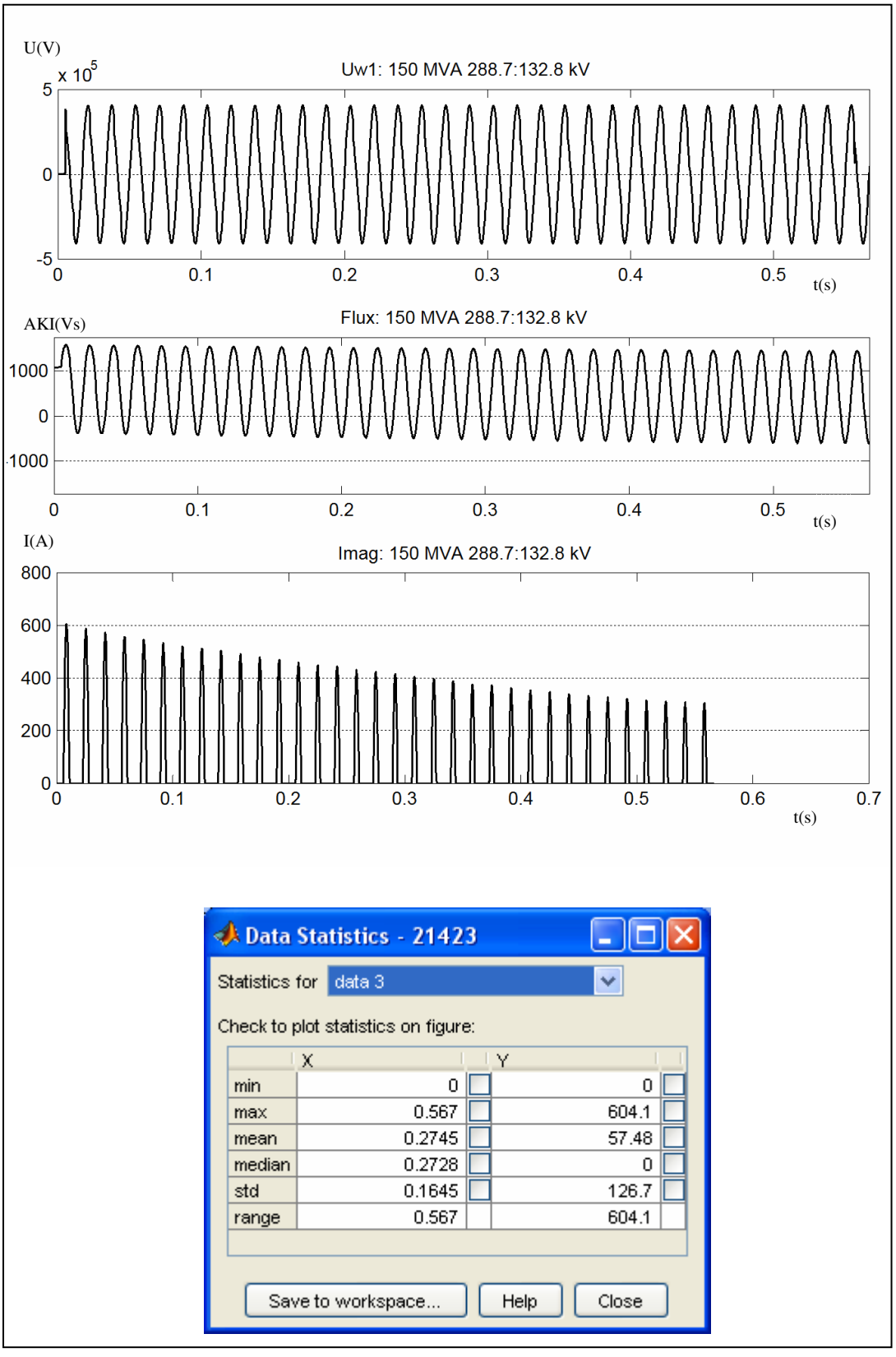
Artık akı olağan üstü derecede yüksek 1.0 p.u. seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen teori ışığında, gerilim dalgasının akı dalgasından 90 derece önde olduğu da gözönünde bulundurulduğunda, en uygun devreye girme anı gerilim dalgasının 180 derecede (0.0081 saniye) olduğu andır. Bu anda oluşan devreye girme akımları Şekil 4.3' deki gibidir.



Şekil 4.3 : Artık akı değeri (1 p.u.) iken , devreye girme anı olarak, gerilim dalgasının 180 derecede (0.0081 saniye) olduğu an seçildiğinde; akım, akı ve gerilimin değişimi

Artık akı 1p.u. gibi olağanüstü yüksek değerde de olsa, uygun an seçildiğinde, Şekil 4.2.1' de de görüldüğü üzere devreye girme akımları sıfır olmaktadır (Hatırlanacağı üzere modelde, parça parça doğrusallaştırılmış doyma eğrisi kullanılmaktadır, oysaki pratikte histerisis eğrisi olduğu için çok küçük de olsa bir mıknatıslanma akımı akacaktır). Bu yöntemin önemini anlamak için, bir önceki bölümde aynı transformatör için devreye girme akımının 1694 A değerlerine ulaştığı Şekil 3.7' daki durumun göz önüne almak yeterlidir.

Ancak, bu yöntem, kapama anının hassasiyet ile yapılmasını gerektirmektedir. 8.1. ms' de değilde örneğin 3 ms hata yaparak devreyi 5.1. ms' de kesici kapatılırsa sonuçlar çok farklı olacaktır, Şekil 4.4.

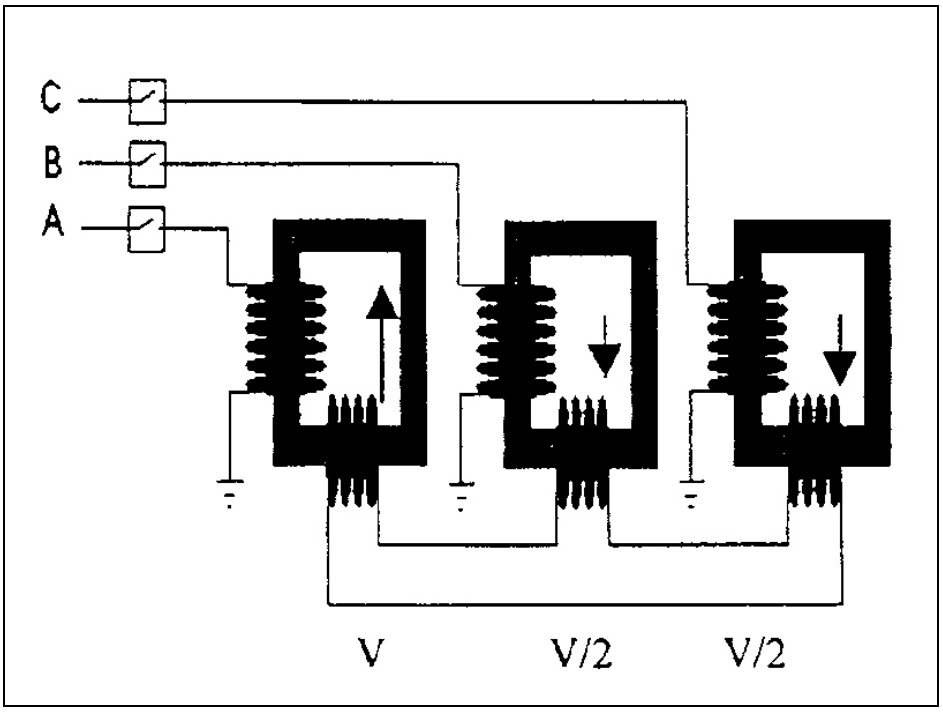


Şekil 4.4 : Devreye girme için uygun andan, 3 ms hata yapılarak kesicilerin kapandığı durumda; akım, akı ve gerilimin değişimi.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 karşılaştırıldığında, kontrollü kapama yönteminde hata payının ne kadar az olması gerektiği gözükmektedir. 3 ms' lik bir hata, devreye girme akımın birdenbire yükselmesine neden olmaktadır.

4.1.3 Üç Fazlı Transformatörlerde Artık Akının Olmadığı Durumda Kesicilerin Kontrollü Kapatılması

Örnek olarak, üçgen sargılı, tek fazlı transformatörlerden oluşan bir üçfazlı transformatör bankı ele alınmıştır, Şekil 4.5.



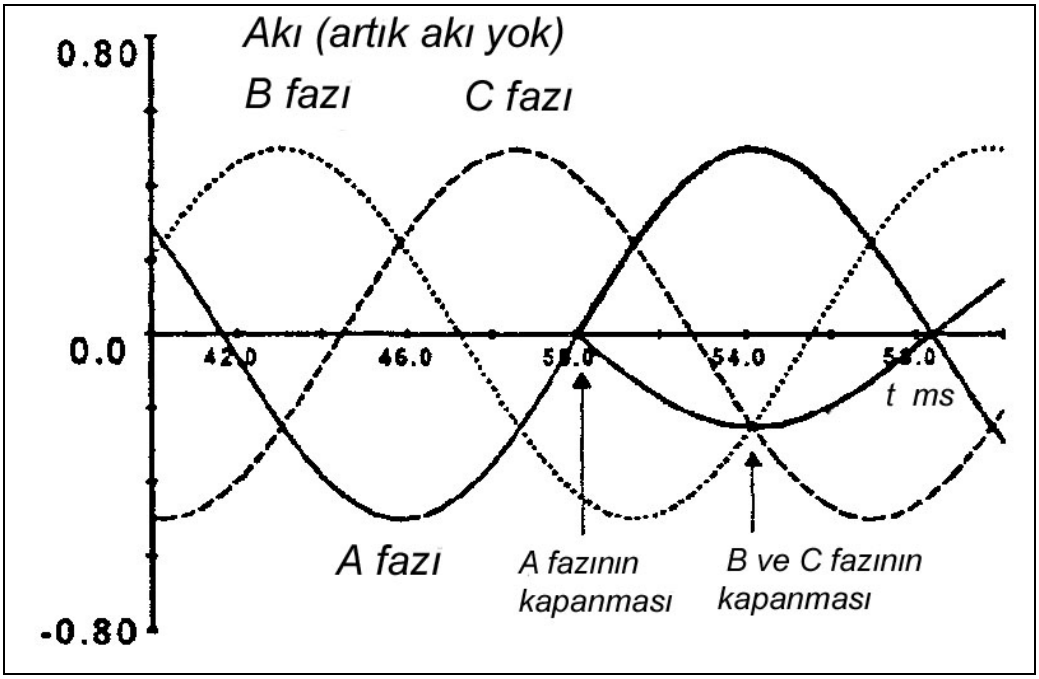
Şekil 4.5 : Tek fazlı transformatörlerden oluşan, üç fazlı transformatör bankında, fazlar arasında akı-gerilim ilişkisi (Vektör grubu : Ynd). Oklar çekirdeklerdeki akıları göstermektedir.

Her üç fazdaki kesicinin, besleme gerilimine bağlı beklenen akı değerlerinin, bacaklardaki akılara eşit olduğu noktada kapanması, bu yöntemin temelini oluşturacaktır.

Üç fazdaki artık akının sıfır iken, ilk fazdaki (A fazındaki) kesicinin, akının beklenen değerinin sıfıra yakın olduğu noktada kapatıldığını kabul edildiğinde : Üçgen sargının diğer iki fazında da gerilim oluşacaktır. Diğer iki fazda (B ve C fazlarında) oluşan gerilimlerin genliği, ilk fazdakinin yarısı kadardır ve 180 derece faz farkına sahiptir. Aynı zamanda bu iki fazda dinamik çekirdek akısı da

oluşacaktır. Oluşan dinamik akılar da, tıpkı gerilimler de olduğu gibi, ilk fazdaki akının yarısı kadardır ve 180 derece faz farkı vardır.

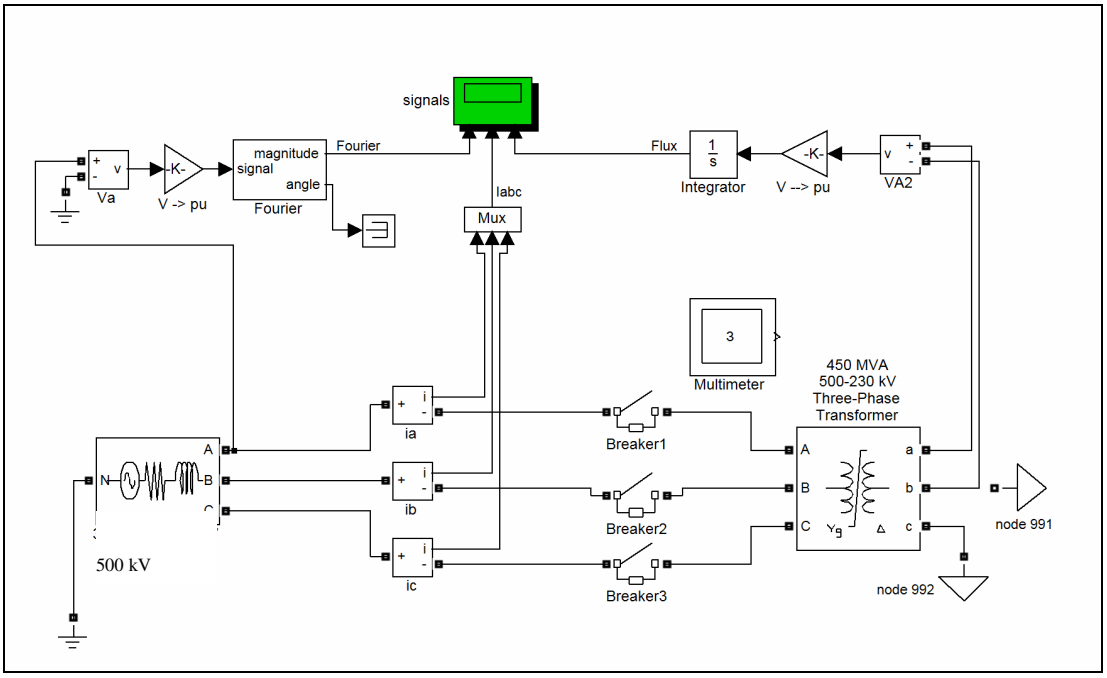
Diğer iki faz için en uygun kapama anı, akının beklenen değeri ile, dinamik akının eşit olduğu, ilk fazdaki kapamadan çeyrek periyot sonraki andır, Şekil 4.6.



Şekil 4.6 : Artık akının bulunmadığı üç fazlı transformatör bankında devreye alma için en uygun anlar.

Üç fazlı çekirdek tipi transformatörlerde de devreye alma için en uygun an benzer şekilde değerlendirilebilir. Bu durumda enerjilenen fazda üretilen akı, diğer iki fazda dinamik akı üretecektir. Bu dinamik akılar da Şekil 4.5' de gösterildiği gibi davranacaktır.

Üç fazlı transformatörler için geliştirilen bu yöntem MATLAB' de bir örnek üzerinde uygulanabilir, Şekil 4.7.

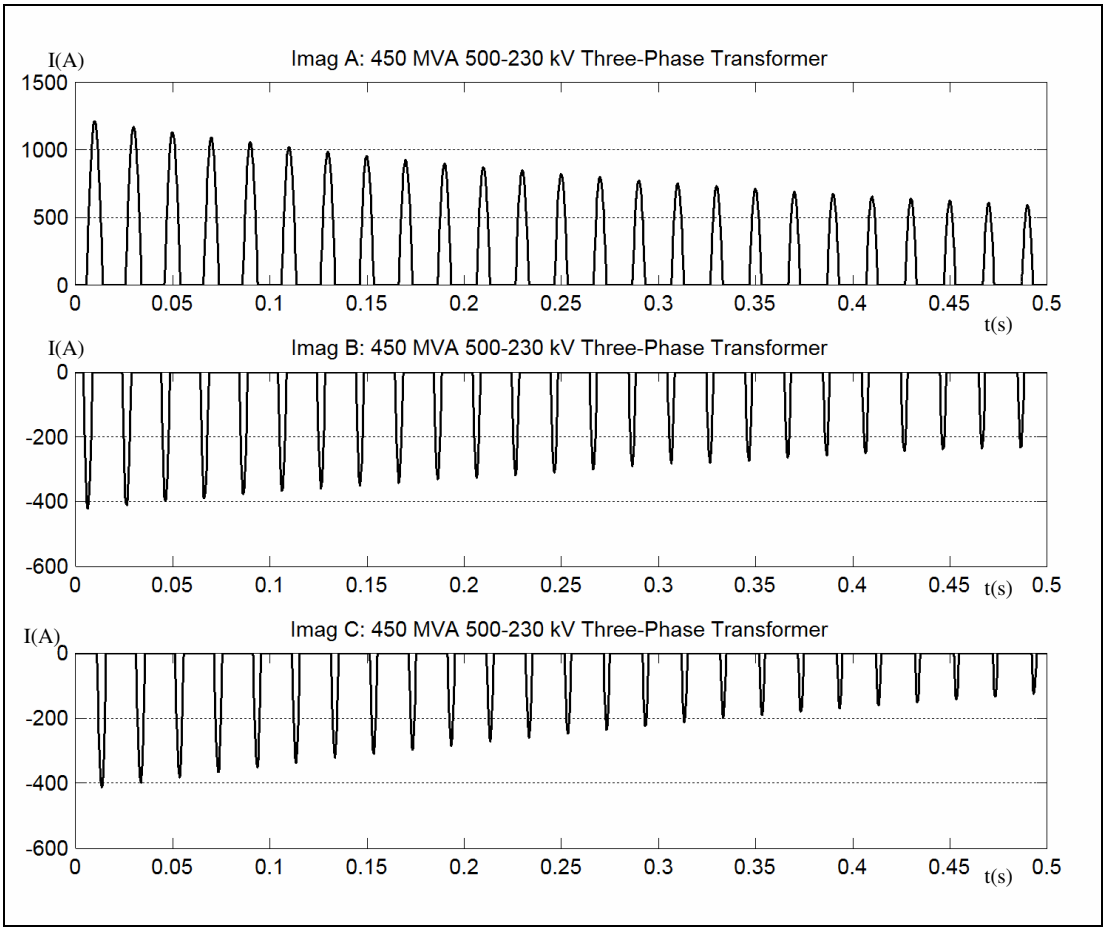


Şekil 4.7 : Üç fazlı transformatörün devreye girme akımlarını belirlemek için MATLAB' de kullanılan örnek devre.

Bir generatörün beslediğini varsaydığımız üç fazlı transformatörün karakteristik değerleri aşağıdaki gibidir :

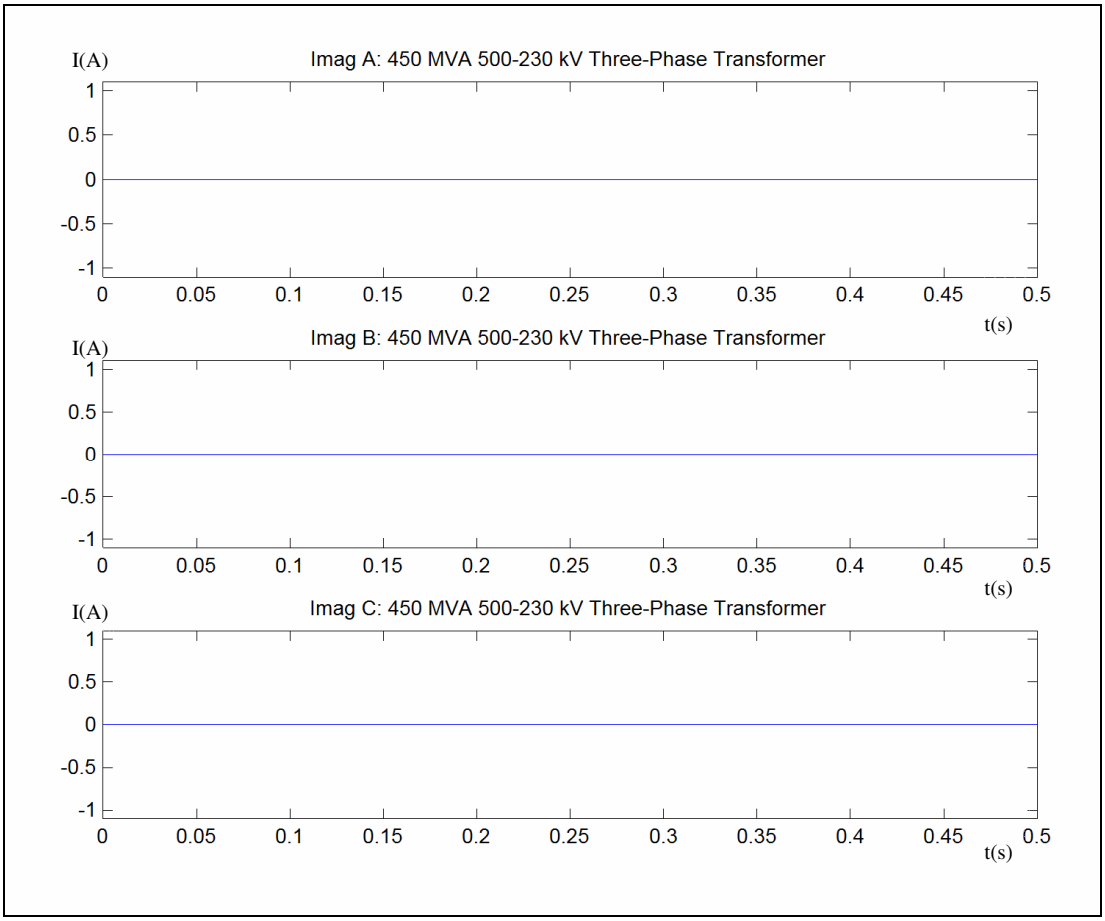
Güç : 450000 VA,		
Frekans : 50 Hz, Vektör Grubu : Yd		
Birincil sargı gerilimi : 500000 V	R1=0.002 p.u.	L1=0.08 p.u.
İkincil sargı gerilimi : 230000 V	R2=0.002 p.u.	L2=0.08 p.u.
Doyma karakteristiği : [0 0, 0.0 1.2, 1.0 1.52]		
Çekirdek kayıp direnci : Rm= 500 p.u.		

İnceleme için öncelikle her üç kesicinin aynı anda, rasgele bir t anında kapandığında oluşan akımlar gözlenecektir. Rasgele t anı için, sinüzoidal besleme geriliminde 0 dereceye karşılık gelen 0. saniye seçilmiştir , Şekil 4.8.



Şekil 4.8 : Artık akının olmadığı üç fazlı transformatörde devreye girme anı olarak, rasgele bir an (sinüzoidal gerilimin 0 derece olduğu an) seçildiğinde oluşan devreye girme akımları.

Şekil 4.6 baz alındığında en uygun anlar : A fazı için, 5. ms (Gerilim dalgası 90 derecede), B ve C fazı için, 10. ms' dir (Gerilim dalgası 180 derecede). Bu durumda oluşan akımlar Şekil 4.9' daki gibidir.



Şekil 4.9 : Artık akının olmadığı üç fazlı transformatörü devreye almak için Şekil 4.6' da gösterilen yöntem uygulandığında devreye girme akımları önlenmiş olur.

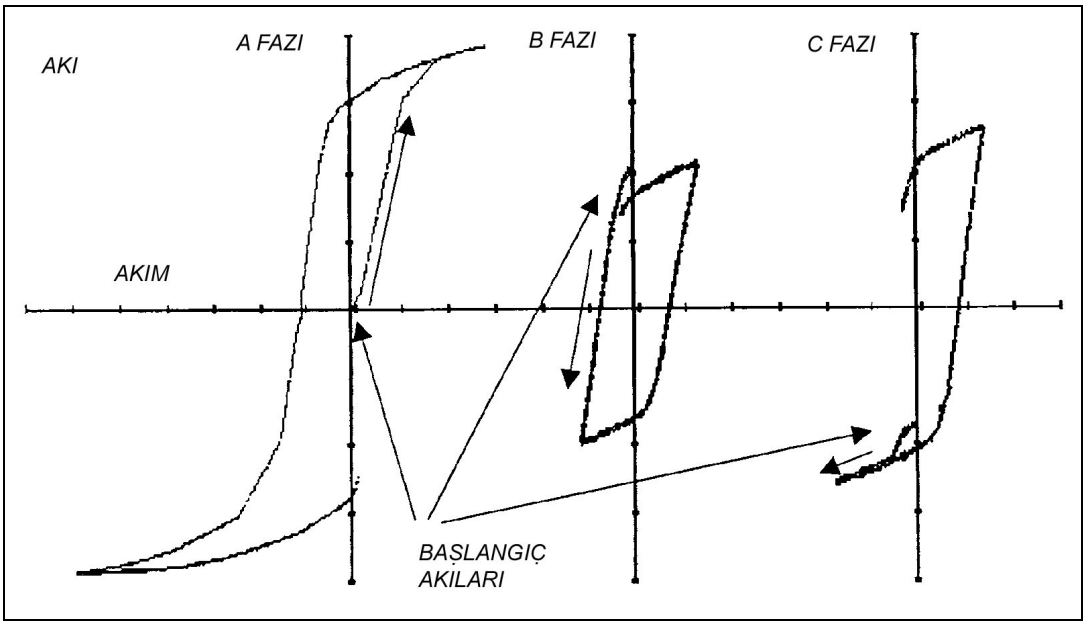
Şekil 4.8 ve 4.9 karşılaştırıldığında, uygun devreye girme anının etkisi kolayca gözükmektedir. Şekil 4.8' de 1300 A mertebelerinde olan akım, devreye girme için uygun an seçildiğinde Şekil 4.9' da gözüktüğü üzere sıfıra inecektir.

4.1.4 Artık Akı

Daha önce belirtildiği gibi transformatörlerde artık akı, normal akının %85' lerine kadar ulaşabilmektedir. İncelemede bu değere yakın değerler kullanılmıştır. Literatürde üç fazlı transformatörlerin çekirdeklerindeki toplam artık akının sıfır olduğu ve transformatörün bir fazında sıfıra yakın bir değerde iken diğer iki fazında negatif ve pozitif kutuplu değerlere sahip olduğu belirtilmektedir [3, 4].

4.1.5 Üç fazlı Transformatörlerde Artık Akının Olduğu Durumda Kesicilerin Kontrollü Kapatılması

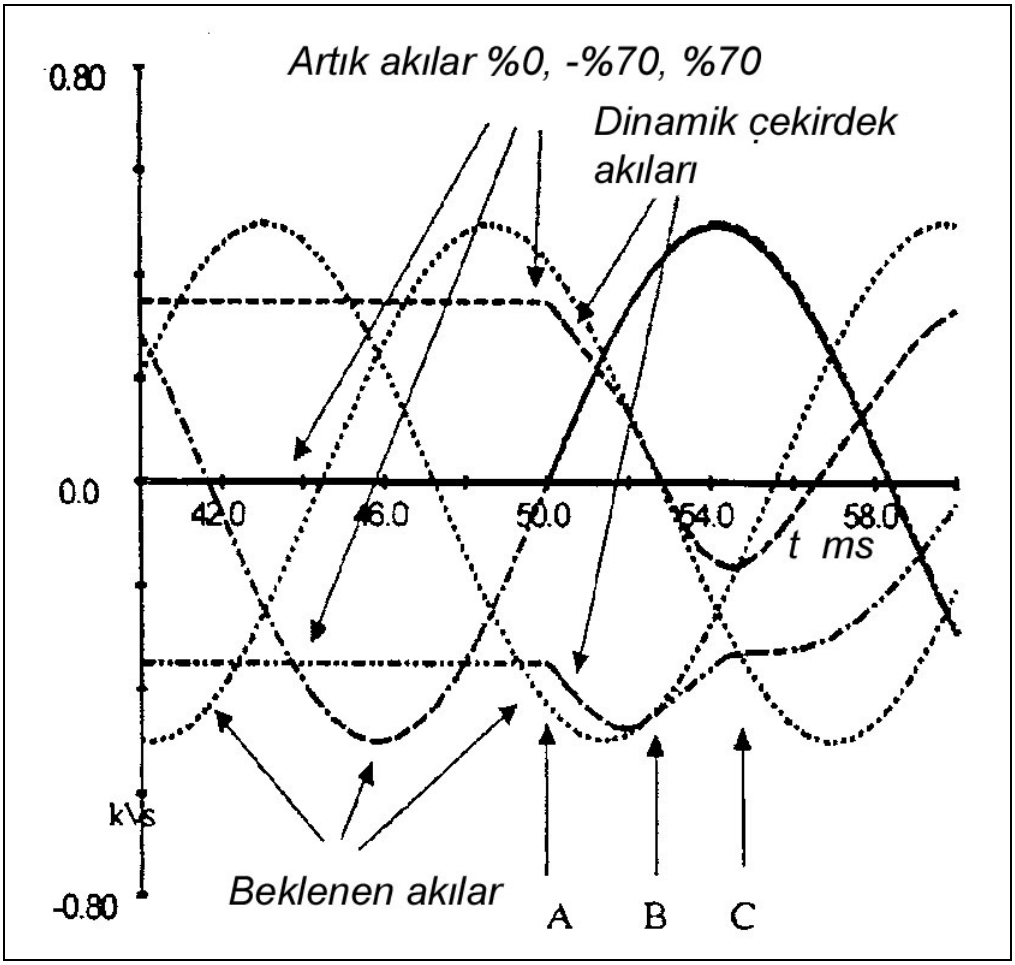
Şekil 4.5' deki transformatörde, başlangıçta artık akıların Şekil 4.10' daki gibi dağıldığı kabul edilecektir. Sıfır artık akılı A fazının, gerilimin tepe yaptığı, beklenen akının sıfır olduğu noktada enerjilendirildiğinde ; diğer iki fazda oluşan dinamik akılar eşit şekilde dağılmayacaktır. Dinamik akılar, kendi fazlarına ait artık akılardan başlayarak yine kendi fazlarının histerisis eğrilerinin belirlediği yolları izleyeceklerdir, Şekil 4.10. C fazı doyma noktasına yaklaşırken, B fazı halen eğrinin doğrusal bölümünde bulunacaktır. Bu iki noktadaki eğim birbirinden tamamen farklı olduğu için sargıların indüktansları da çok farkı olacaktır. Dolayısıyla, fazlardaki gerilimler eşit olmayacak, yüksek indüktansa sahip sargıda daha yüksek gerilim oluşakcaktır. Oluşan yüksek gerilim, B fazındaki akıyı yükselterek C fazındaki akıya yaklaştırmaya başlayacaktır. Bunun sonucu B ve C fazlarındaki akı hızlı bir şekilde eşitlenerek artık akı etkisini ortadan kaldıracaktır. Bu olay " çekirdekte akı dengelenmesi" olarak adlandırılır.



Şekil 4.10 : Başlangıçta artık akının bulunduğu üç fazlı transformatörde, devreye girme anında akıların değişimi.

Üç fazlı transformatörde ana bacaklardaki akıların toplamı sıfırdır. Bu durum üç bacaklı yada üçgen sargılı transformatörlerde geçerlidir. Üçgen bağlantısı olmayan tek fazlı, beş bacaklı yada manto tipi transformatörlerde geçerli değildir. Akıların

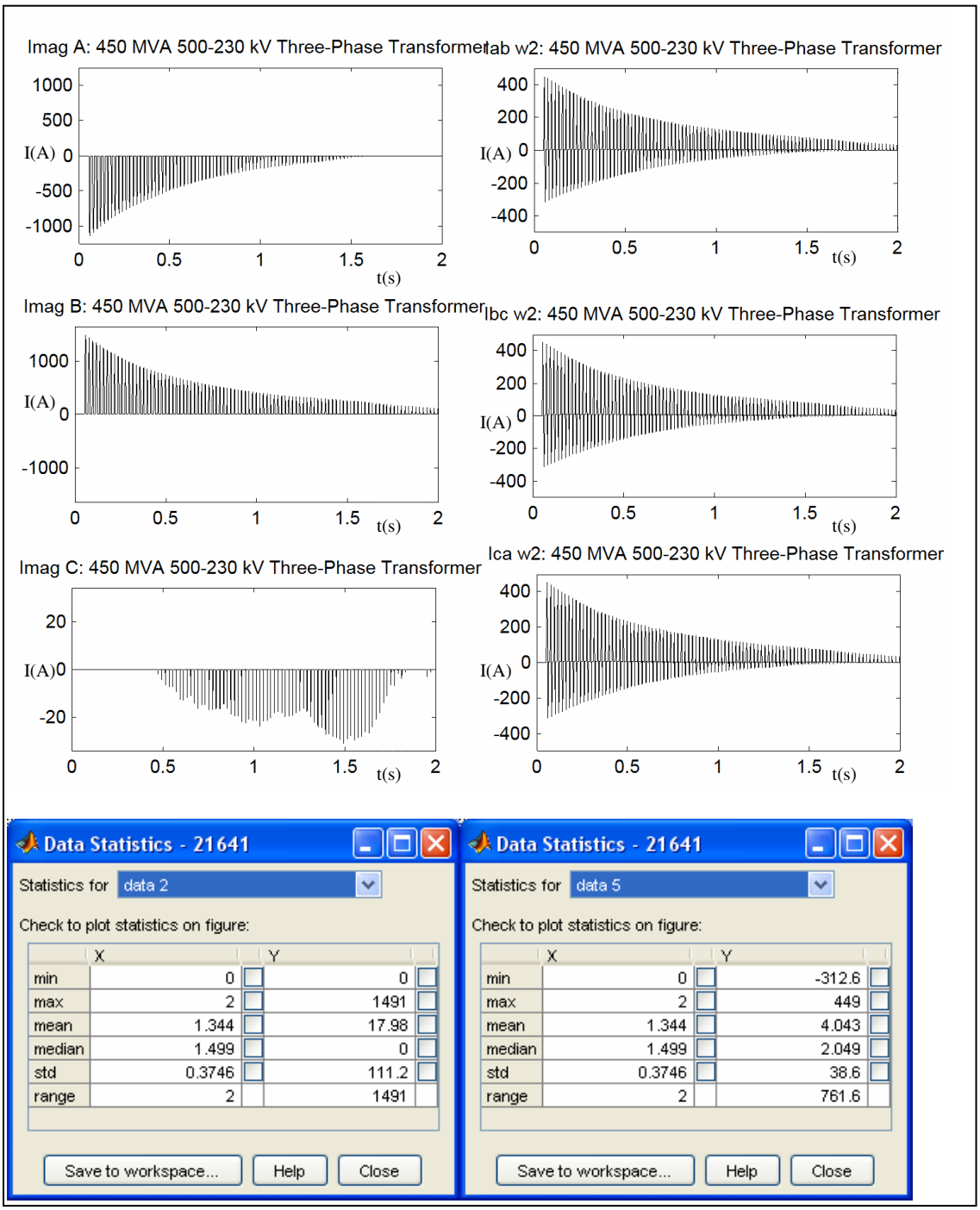
toplamının sıfır olduğu bir transformatör ele aldığımızda , doymaya gitmeyen bacaktaki akı her zaman için beklenen akı ile aynı olacaktır. Beklenen akıların ve çekirdekteki akıların toplamı sıfır olacağı için indüklenen dinamik çekirdek akıları ile beklenen akı değerleri her periyotta iki defa eşit olacaktır, Şekil 4.11. Sıfır artık akılı A fazının enerjilendirildiği A anından hemen sonra B ve C fazlarında dinamik akılar oluşacaktır.



Şekil 4.11 : Artık akılı üç fazlı transformatörler için beklenen ve dinamik çekirdek akıları

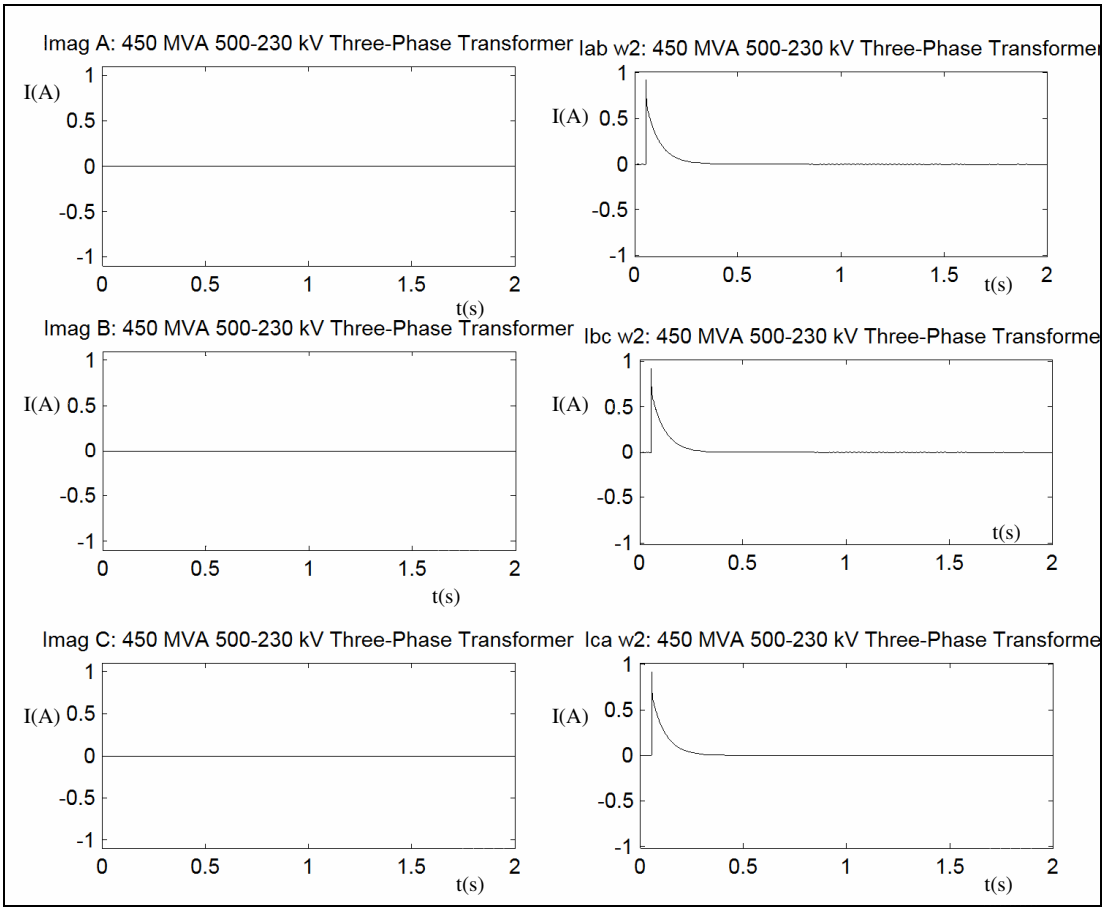
B ve C bacaklarındaki artık akıların kutuplarına bağlı olarak, dinamik ve beklenen akılar, Şekil 4.11' de görüldüğü üzere B veya C noktalarında eşit olacaklardır. Bu noktalar B ve C fazlarını, çekirdeği doymaya sokmadan devreye almak için en uygun anlardır. Bu yöntem " hızlı kapama" yöntemi olarak adlandırılmıştır. Beklenen akı ile dinamik akının eğimlerinin bir kaç milisaniye boyunca yaklaşık olarak birbirine yeşit olduğu B noktasındaki kapama anında oluşabilecek zamanlama hatasını tolere etmek, C noktasındaki kapamaya nazaran daha kolaydır.

Hızlı kapama yönteminin sayısal olarak incelenmesi için Şekil 4.7' deki örnek devre kullanılacaktır. Öncelikle rasgele bir t anında (50. ms' de), üç kesicinin de aynı anda kapatıldığı durumu ele alınacaktır. Fazlardaki artık akılar, A, B, C fazları için sırası ile 0, 0.7, -0.7 p.u seçilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.12' deki gibidir. Bu kapama anında yüksek gerilim tarafında 1491 A, alçak gerilim tarafında 449 A oluşmuştur.



Şekil 4.12 : Çekirdeğinde artık akı bulunan üç fazlı transformatör rasgele bir anda devreye alındığında oluşan akımlar. (Sol taraftaki grafikler yüksek gerilim sargısında, sağ taraftaki grafikler ise alçak gerilim sargısında oluşan akımları göstermektedir. Data 2, B fazının akımını, Data 5 ise üçgen sargıda dolaşan akımı göstermektedir.)

Aynı transformatörün ikinci ve üçüncü fazının Şekil 4.11' de gösterilen B anında kapandığı durumda oluşan akımlar, Şekil 4.13' deki gibidir. İlk fazın kapaması 55.ms' de, ikinci ve üçüncü fazın kapaması ise 57.5 ms' de yapılmıştır.



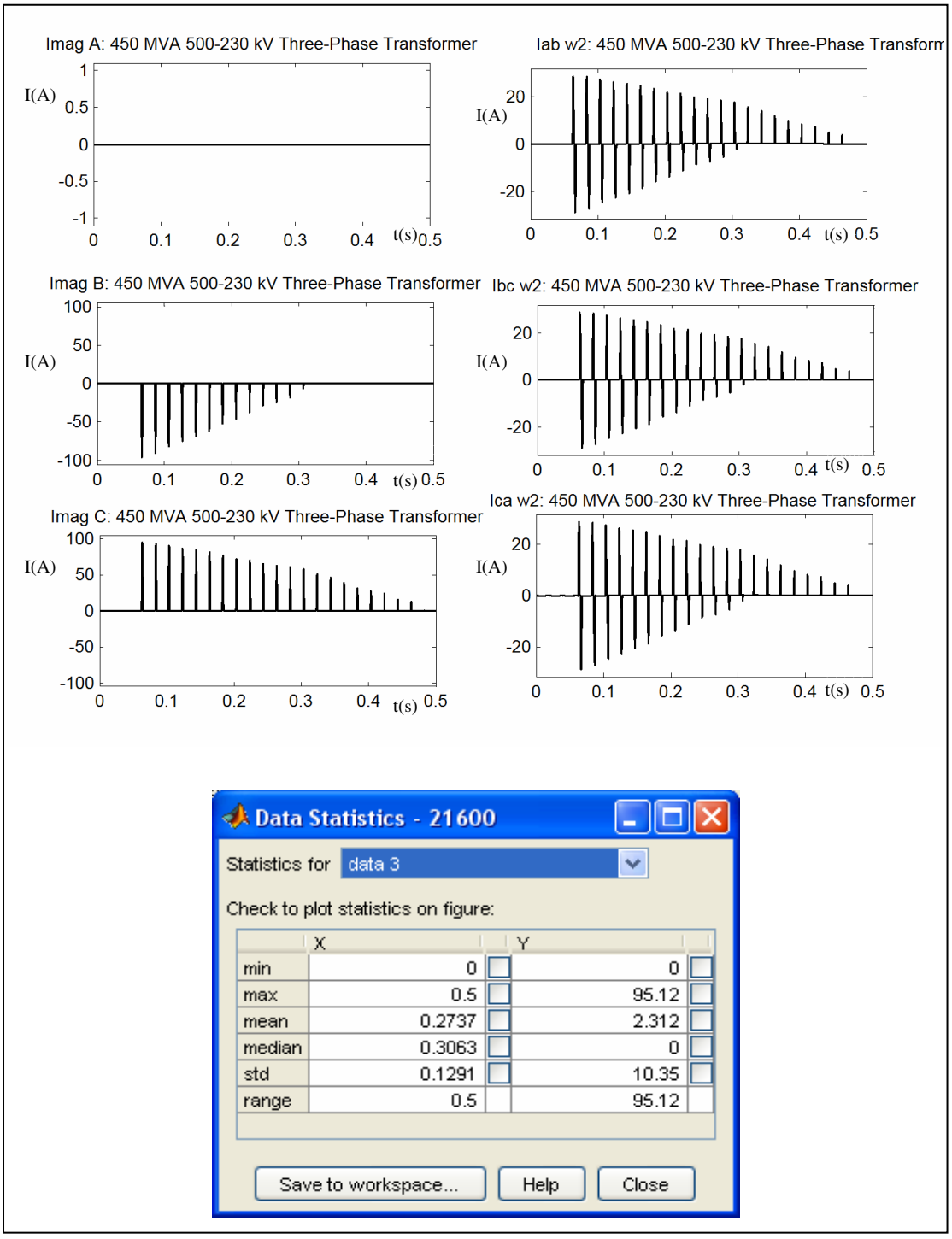
Şekil 4.13 : Üç fazlı, artık akılı transformatörde, kesicilerin Şekil 4.11' de tanımlanan A ve B anlarında kapanması sonucu oluşan devreye girme akımları.

Şekil 4.12 ve 4.13 karşılaştırıldığında elde edilen sonuç açıktır : Kesiciler Şekil 4.11' deki uygun anlarda kapatıldığında, rasgele kapamada oluşan devreye girme akımları önlenmektedir. Böylece Şekil 4.11' de ele alınan teorik yaklaşım, MATLAB kullanılarak yapılan sayısal çözümleme ile de doğrulanmıştır.

Şekil 4.11' de kapama için bir başka alternatif daha gözükmektedir. İlk fazın enerjilendirildiği A noktasında, diğer iki fazın beklenen ve dinamik akıları yaklaşık olarak eşittir. Dolayısıyla bu nokta da devreye girme açısından uygun olarak değerlendirilebilir. Eğer artık akılar, B ve C fazlarında biraz yüksek ise, A noktası üç fazın aynı anda kapanması uygun bir nokta olacaktır. Böylece her faz için bağımsız kesicileri olmayan transformatörlerde kullanışlı bir çözüm elde edilir. Bu yöntem "eşzamanlı kapama" olarak adlandırılır.

Eş zamanlı kapama yönteminin yukarıda kullanılan devreye uygulanması ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.13' deki gididir. Kapama anı olarak Şekil 4.11 baz alınmış,

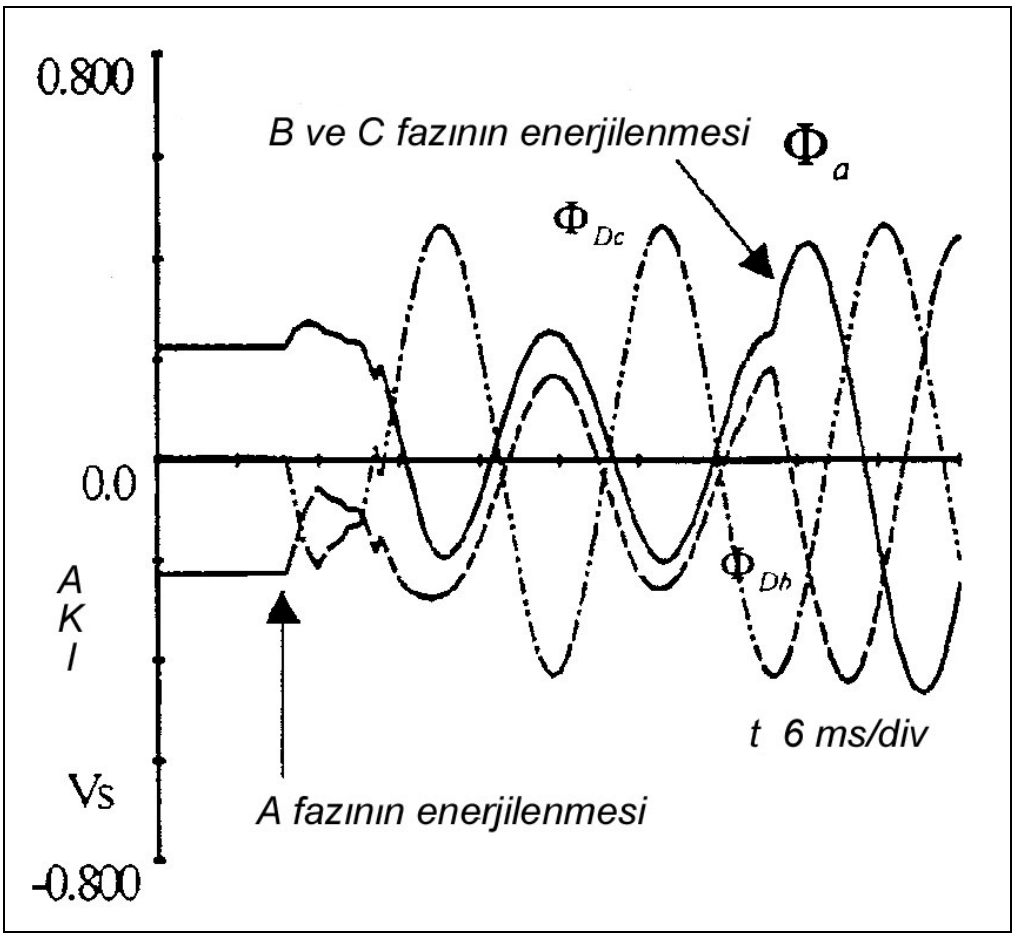
tüm fazlar için 55. ms seçilmiştir. Artık akılar faz sırasına göre 0, 0.6, -0.6 p.u. alınmıştır.



Şekil 4.14 : Üç fazlı artık akılı transformatörde, kesicilerin Şekil 4.11' de tanımlanan A anında kapanması sonucu oluşan devreye girme akımları. (Sol taraftaki grafikler yüksek gerilim tarafındaki, sağ taraftakiler ise alçak gerilim tarafındaki akımları göstermektedir.)

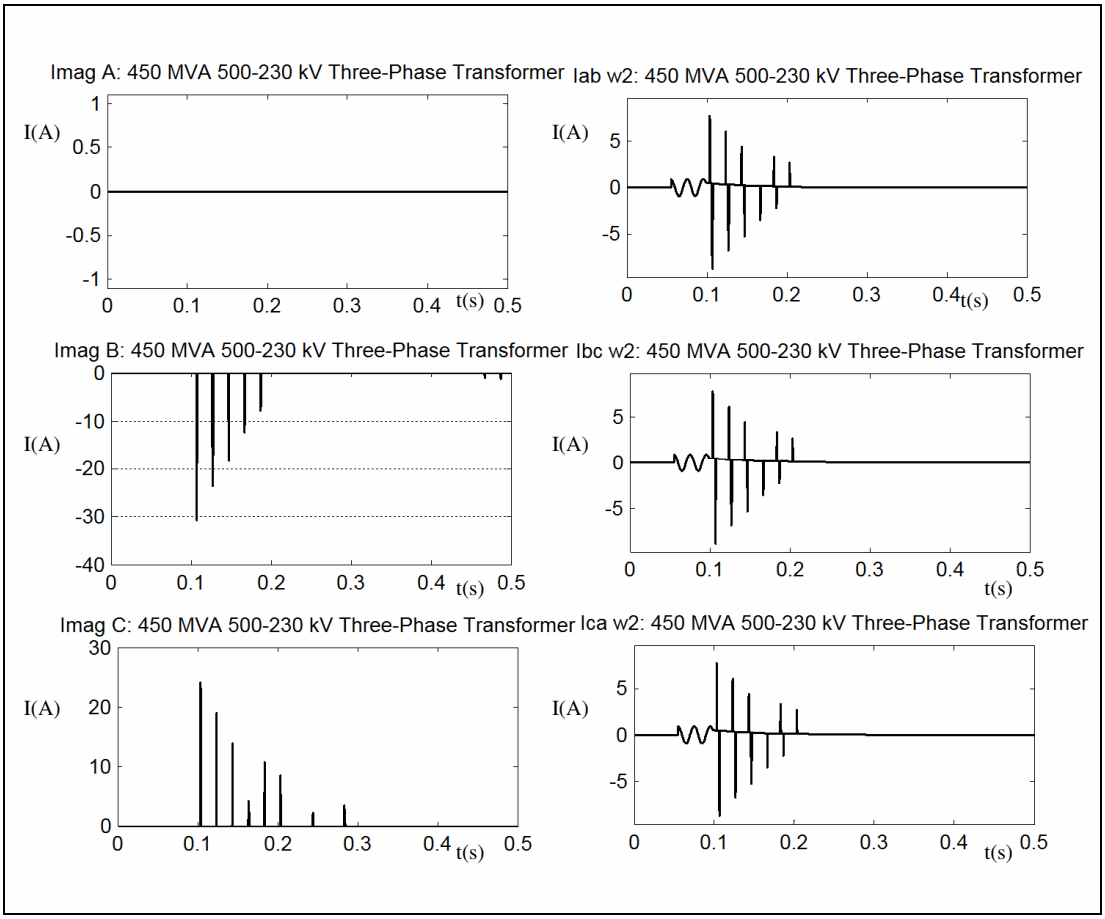
Şekil 4.14 incelendiğinde, eşzamanlı kapama yöntemi de rasgele kapamaya göre büyük avantajlar sağlamaktadır. Rasgele kapama anına göre yaklaşık ondört kat daha düşük devreye girme akımları oluşmuştur.

Daha önce bahsedildiği gibi, bir faz enerjilendirildikten sonra diğer fazlardaki artık akı "çekirdekteki akı dengelenmesi" suretiyle ortadan kalkacaktır. Eğer bir faz, beklenen akısı ile artık akısının eşit olduğu anda enerjilendirilirse ve diğer iki fazın enerjilendirilmesi bir kaç periyot sonra yapılırsa, bu fazlardaki artık akılar artık ihmal edilebilir. Bu yöntem "geciktirilmiş kapama" yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemin denendiği bir laboratuar testinin sonuçları Şekil 4.15' deki gibidir [4].



Şekil 4.15 : Üçgen sargılı, üç bacaklı bir transformatörün "geciktirilmiş kapama" yöntemi ile devreye alınmasına ait test sonuçları.

Geciktirilmiş kapama yöntemi için de Şekil 4.7' deki örnek devre kullanılmıştır. Sayısal çözümleme ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.16' daki gibidir.



Şekil 4.16 : Üçgen sargılı, bir transformatörün "geciktirilmiş kapama" yöntemi ile devreye alınmasında oluşan akımlar. (Sol taraftaki grafikler yüksek gerilim tarafındaki, sağ taraftakiler ise alçak gerilim tarafındaki akımları göstermektedir.)

Şekil 4.16 incelendiğinde geciktirilmiş kapama yönteminin de devreye girme akımlarını oldukça düşürdüğü görülmektedir.

4.1.6 Kontrollü Kapama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Birçok transformatörde artık akını ölçülmesi ve kontrolü kapama yapılması ile devreye girme akımlarının önlenmesi mümkündür. Üç fazlı transformatörler için üç yöntem ele alınmıştır.

Bu üç yöntemde de, fazların enerjilendirilme anı, çekirdeği doymaya götürmeyecek an olarak seçilmiştir. Her bir sargı için en uygun enerjilendirilme anı, dinamik akıların beklenen akılara eşit olduğu andır.

4.1.6.1 Hızlı Kapama Yöntemi

Bu yöntemde önce bir faz kapanır daha sonra bir çeyrek periyot içinde diğer iki faz kapanır. Uygulamada her faz için ayrı bir kesici ve kontrol ünitesi, fazlardaki artık akı bilgisi ve transformatörün geçici hal modeli gereklidir.

4.1.6.2 Geciktirilmiş Kapama Yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak bir faz kapatılır, diğer iki faz bir kaç periyot sonra kapatılır. Uygulama için, sadece bir fazdaki artık akı bilgisi, her faz için ayrı bir kesici ve kontrol ünitesi gereklidir. Transformatörün parametrik verilerine ihtiyaç yoktur.

4.1.6.3 Eşzamanlı Kapama Yöntemi

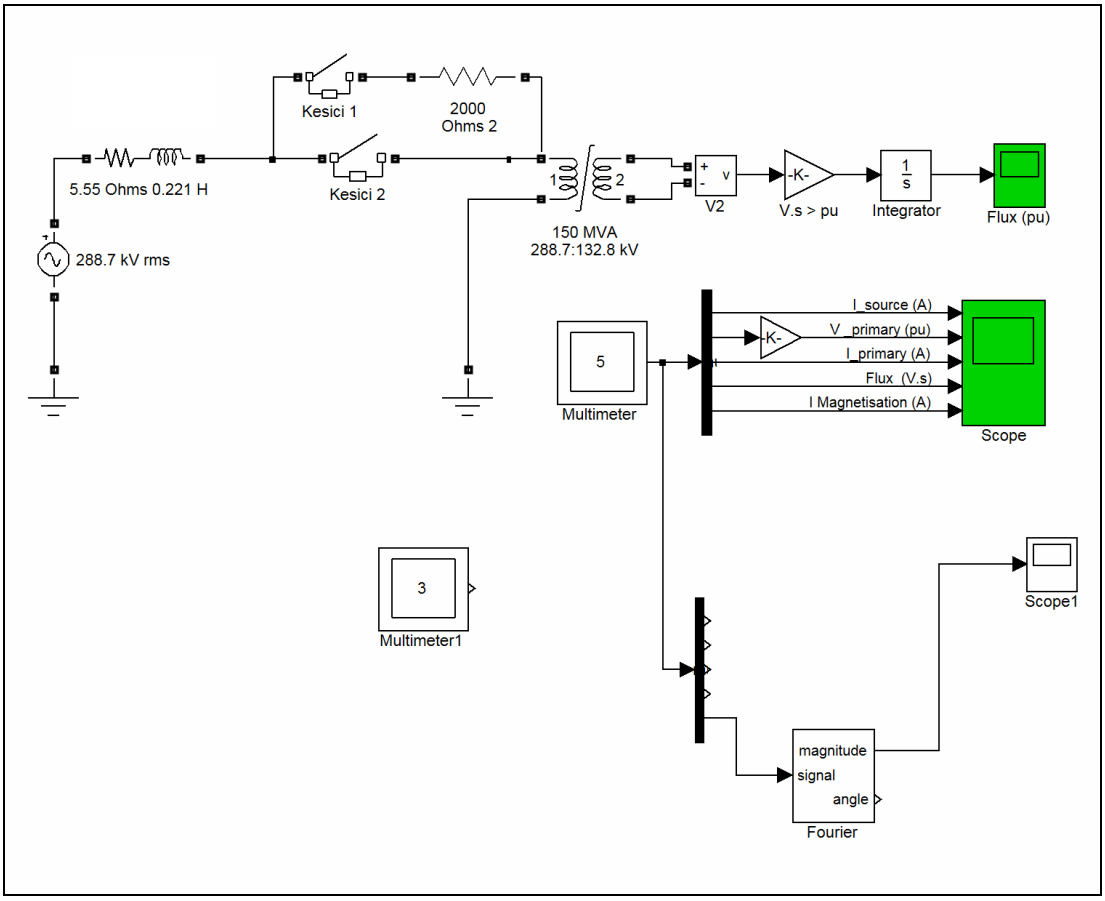
Bu yöntemde artık akılar değerlendirilerek, her üç faz aynı anda optimum bir noktada kapatılır. Bağımsız kesicilere ihtiyaç yoktur. Üç fazdaki artık akı bilgisine ihtiyaç vardır. Ayrıca bu artık akıların, tipik olarak kabul ettiğimiz şekilde iki fazda yüksek değerli ve ters kutuplu olduğu gözlenmelidir.

4.2 Öndirenç Ekleme Yöntemi

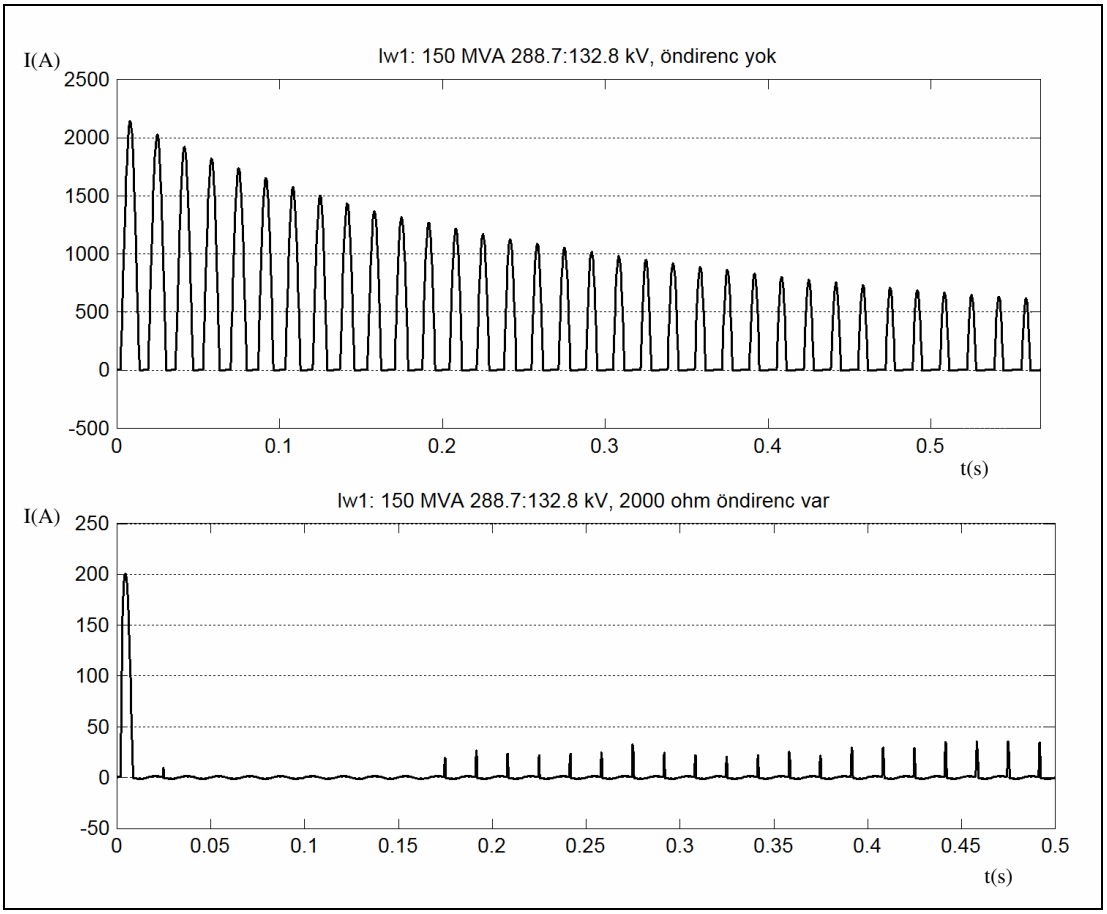
Öndirençler eklenerek devreye girme akımlarının düşürülmesi en eski yöntemlerden biridir [3]. Üçüncü bölümde elde edilen (3.13) denklemi gözönüne alındığında, devreye seri olarak eklenen direncin devreye girme akımlarını azaltacağı açıkça gözükmektedir.

Öndirençlerin etkisini daha net anlayabilmek için oluşturulan örnek bir devre sayısal olarak çözümlenecektir, Şekil 4.17.

Bölüm 3.3.1' de verilen, artık akı değeri 0.85 p.u olan örnek trafo kullanılacaktır. Devrede seri bağlı 2000 ohm'luk öndirenç "kesici 1" ile ilk on periyot devrede kalacak, daha sonra devreden çıkacaktır. Kesici 2, kesici 1 devreden çıktığı anda devreye girecektir. Devrenin çözümlenmesinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.18' deki gibidir.



Şekil 4.17 : Öndirenç ekleme yöntemi için MATLAB' de oluşturulan örnek devre



Şekil 4.18 : Öndirenç olması ve olmaması durumunda devreye girme akımının değişimi.

Şekil 4.18' de öndirenç olması ve olmaması durumunda devreye girme akımının ne şekilde değişti gözükmektedir. Öndirenç olmadığı durumda akım 2000 A değerlerinde iken, 2000 ohm' luk öndirenç bağlandıktan sonra 200 A değerlerine düşmüştür. Öndirenç değeri daha büyük seçildiğinde devreye girme akımları daha da düşecektir.

Sonuç olarak, öndirençler ile devreye alma yönteminin, devreye girme akımını etkin bir şekilde düşürdüğü belirlenmiştir.

5. DEVREYE GİRME AKIMLARININ DİFERANSİYEL RÖLE ÜZERİNE ETKİSİ

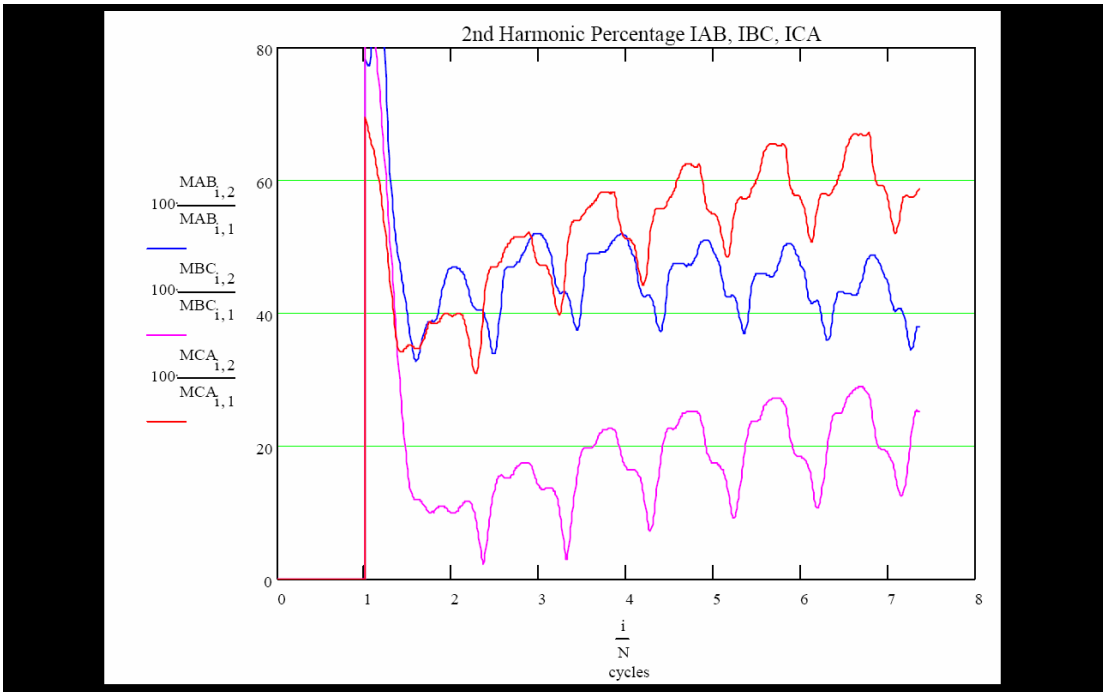
Devreye girme akımlarını önleyecek herhangi bir tedbirin olmadığı durumda, oluşan yüksek değerli akımlar, diferansiyel röleler tarafından arıza akımı gibi algılanabilir. Devreye girme akımlarının diferansiyel röle üzerindeki bu olumsuz etkisini bertaraf etmeye yönelik günümüzde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

Diferansiyel rölelerde, devreye girme anında oluşan yüksek değerli akımları, kısadevre akımlarından ayırmak için kullanılan en yaygın yöntem ikinci harmonik sınırlamasıdır. Devreye girme akımlarını, kısadevre akımlarından ayıran en önemli farklarından biri içerdiği ikinci harmonik bileşenidir. Klasik diferansiyel rölelerde ikinci harmonik için set değer %20 (ikinci harmoniğin temel bileşene oranı) olarak sabittir.

Ancak son yapılan çalışmalar, bu değerin yeterli olmadığını, transformatörün parametrelerine bağlı olarak ayarlanabilen röleler gerektiğini ve set değerlerinin %7' lere kadar çekilmesini gerektirebilecek örnekler olduğunu ortaya koymuştur [6].

5.1 Saha Örnekleri ve Sayısal Çözümler

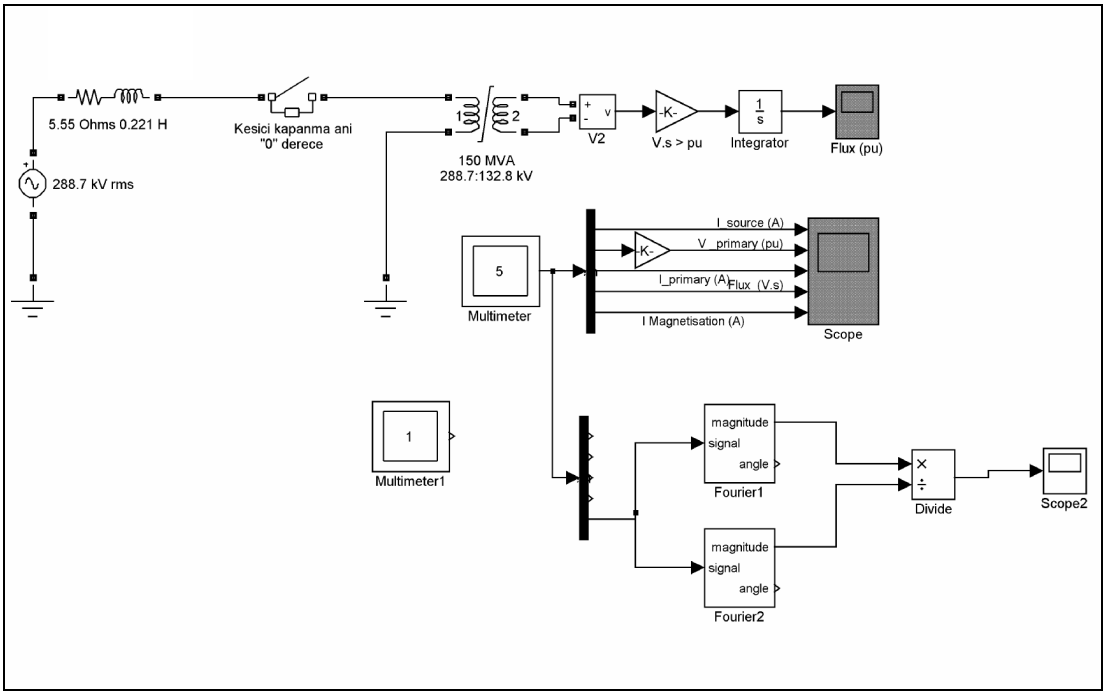
IEEE bünyesinde 2001 yılında ABD Orlando' da yapılan seminerde ortaya konan örnek saha testi sonuçları Şekil 5.1' deki gibidir [10].



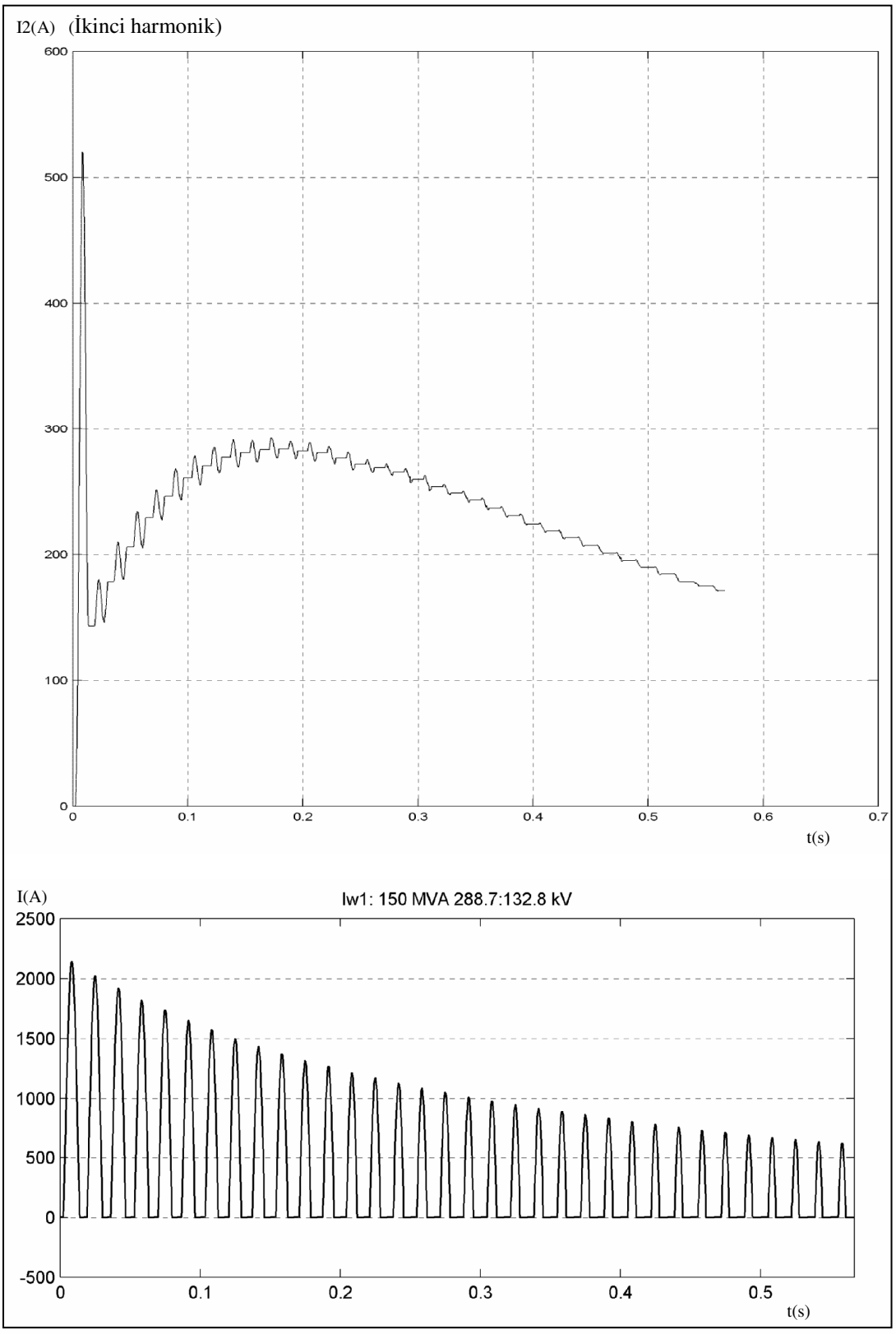
Şekil 5.1 : Üç fazlı transformatörde devreye girme anında oluşan akımlardaki ikinci harmonik içeriği.

Şekil 5.1 ; incelendiğinde devre girme anının ilk periyodunda ikinci harmonik bileşeninin hızla yükselmekte daha sonra düşmekte olduğu görülmektedir.

Saha testinden elde edilen ikinci harmoniğin formu ile bölüm 3.3.1' de verilen transformatörün devreye girme anında oluşan ikinci harmoniğin formu karşılaştırılacaktır. Sayısal çözümü zenginleştirmek amacı ile MATLAB' de kullanılan modele iki adet "Fast Fourier" dönüşüm modülü eklenmiştir. Bunlardan ilki akımın temel bileşenini ikincisi ise ikinci harmonik bileşenini hesaplayacaktır. Bölme modülü ile ikinci harmoniğin temel bileşene oranı hesaplanacaktır. Çözümleme yapılacak devre Şekil 5.2' deki gibidir. Şekil 5.3 ' de sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 5.2 : İkinci harmoniğin temel bileşene oranını bulmak için kullanılan MATLAB modeli.



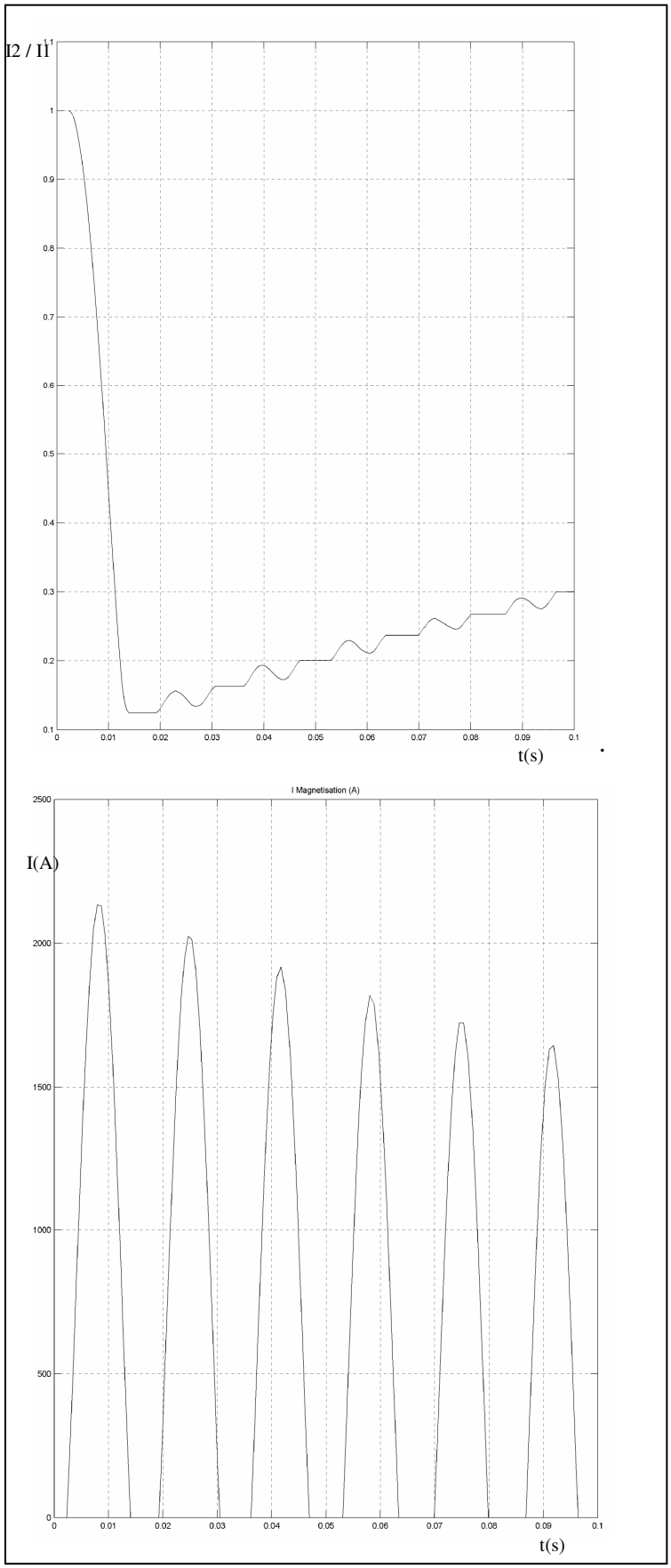
Şekil 5.3 : Alttaki grafik devreye girme akımını , üstteki grafik ise ikinci harmonik bileşeninin nasıl değiştiğini göstermekte. Artık akı 0.85 p.u, kapama anı sinüs formuna göre 0 derece.

Şekil 5.1' deki başka bir transformatöre ait saha testi sonuçları, ile sayısal çözümlemesi yapılan transformatörün devreye girme anında oluşan akımın ikinci harmoniklerine ait formlar karşılaştırıldığında, her iki formunda benzer olduğu görülmektedir. İkinci harmonik devreye girme anının başlangıcında hızla yükselmekte daha sonra düşüşe geçmektedir.

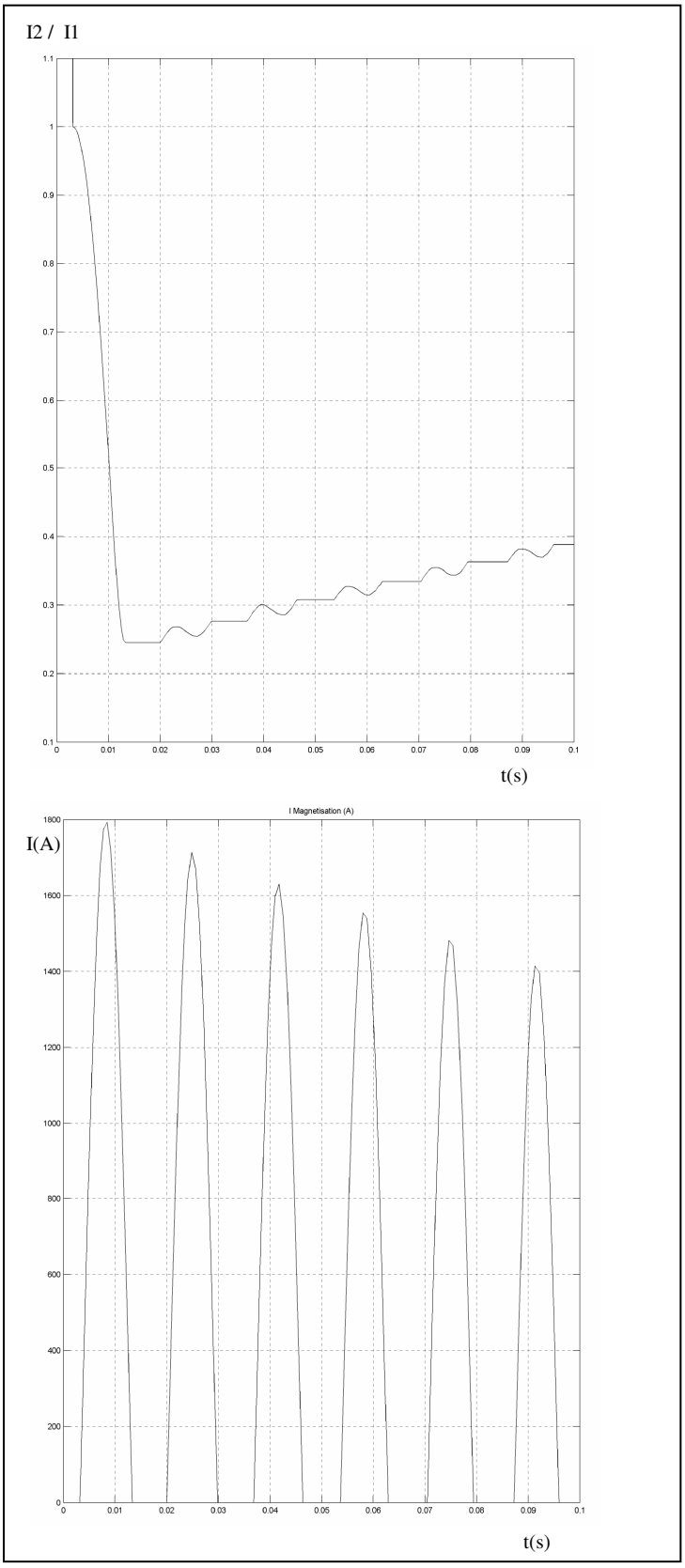
İkinci harmonik bileşeninin temel bileşene oranının devreye girme açısına göre değişimini incelemek amacı ile ; devreye girme anı olarak, gerilim dalgasının ilk periyodunun ilk yarısında, her 2 ms' ye denk gelen açılarda (yaklaşık 45 derecede bir) enerjilendirilme yapıldığı varsayılacaktır. Sonuçlar Şekil 5.4… 5.7' deki gibidir.

I2= İkinci harmonik bileşeni

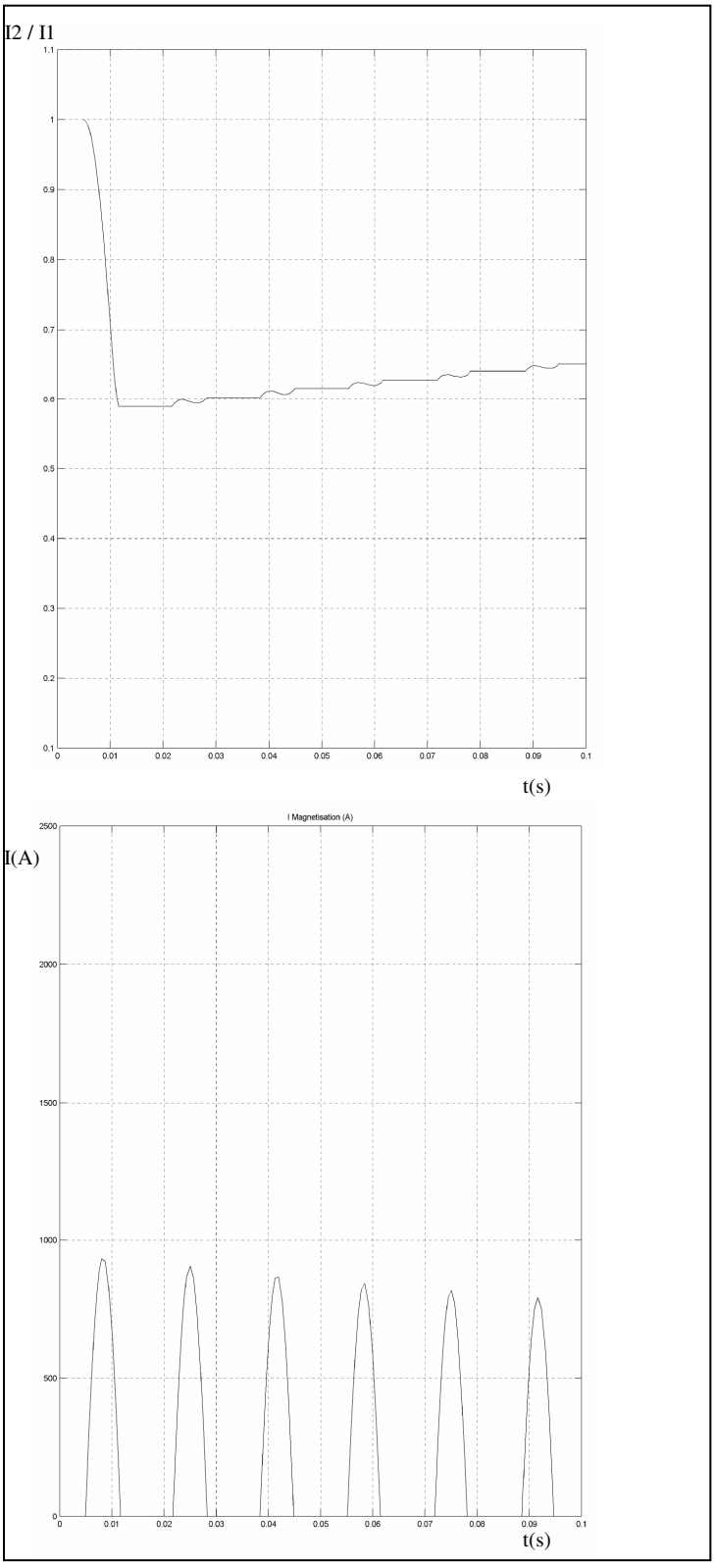
I1= Temel bileşen



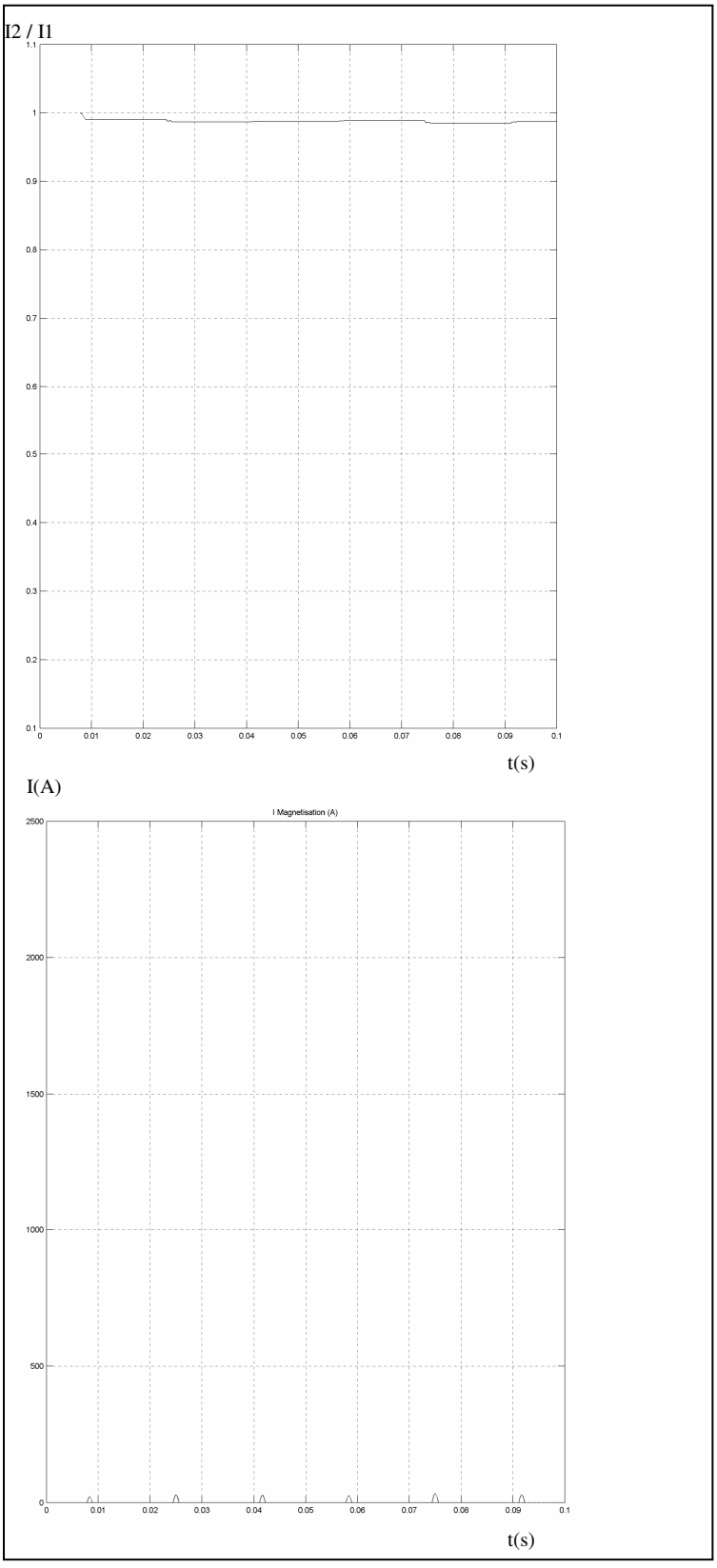
Şekil 5.4 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 0. ms' de.



Şekil 5.5 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 2. ms' de.



Şekil 5.6 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 4. ms' de.



Şekil 5.7 : Üst grafik ikinci harmoniğin temel bileşene oranını, alt grafik devreye girme akımını göstermektedir. Kapama 6. ms' de.

5.2 Harmonik İçeriğinin Değerlendirilmesi

İkinci harmonik bileşeni devreye girme akımlarının önemli karakteristik özelliklerinden biridir. Yukarıdaki Şekil 5.4…5.7 incelendiğinde açıkça gözükmektedir ki devreye girme anında belirgin bir ikinci harmonik bileşeni oluşmaktadır.

Transformatörün devreye girme akımlarını düşürecek devreye girme açılarına yaklaşıldığında, ikinci harmoniğin temel bileşene oranı artmaktadır. Şekil 5.4…5.7' incelendiğinde, devreye girme akımları azalırken, ikinci harmoniğin temel bileşene oranının minimum değeri artmaktadır. Tam tersi durumda; devreye girme akımlarını yükseltecek devreye girme açılarına yaklaşılırken, ikinci harmoniğin temel bileşene oranının minimum değeri azalmaktadır. Olayın doğası, diferansiyel rölelerin, ikinci harmoniği kullanarak devre girme akımlarını tespit etmesini zorlaştırıcı yöndedir : Yüksek devreye girme akımları oluşurken, ikinci harmoniğin temel bileşene oranının minimum değerinin azalması, diferansiyel rölelerin bu akımları arıza akımı gibi algılamasına neden olabilmektedir.

Şekil 5.4' ü ele aldığımızda ikinci harmonik bileşenin temel bileşene oranının %10' lar mertebelerini kadar düştüğünü görürüz. İkinci harmonik set değeri %20' ye sabitlenmiş bir diferansiyel röle, bu örnekteki devreye girme akımlarını ayırt edemeyebilecek, bu devreye girme akımını bir arıza gibi algılayabilecektir.

Diferansiyel rölelerin set değerlerinin ayarlanabilir olması, klasik olarak %20 gibi sabit bir değer seçilmemesi gereklidir. Ancak set değerinin gelişi güzel düşürülmesi de iç arızaların algılanmasını engelleyebilir. Set ayarları yapılırken transformatörün ve bağlı olduğu sistemin parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

Sayısal çözümlemelerden elde edilen diğer bir sonuçta şudur : Harmonik değerlendirilmesi, devreye girme anının ilk periyodunun içinde yapıldığı taktirde, ikinci harmonik bileşeni her zaman çok yüksek değerde olduğu için kolaylıkla arıza akımlarından ayırt edilebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üzerinde bir çok araştırma yapılmış olan transformatörlerde devreye girme akımlarının bir çok farklı değişkene bağlı olduğu belirlenmiştir: Devreye girme ve devreden çıkma anı, artık akı, vektör grubu, transformatörün geometrisi, bağlı olunan sistemin özellikleri, çekirdek sacının tipi ve anma akısı.

Transformatör tasarımında önemli konulardan biri malzemelerin ekonomik olarak kullanılmasıdır. Dolayısıyla, tasarım aşamasında devreye girme akımlarını düşürmeye yönelik alınabilecek önlemlerin genel anlamda sınırlı olduğu gözlenmiştir. Tasarım aşamasında alınabilecek başlıca önlemler şunlardır: Anma akısını düşük tutmak, doyma noktası yüksek çekirdek sacı seçmek, hava çekirdeği indüktansını mümkün olduğunca büyük yapmak . Ancak, anma akısını düşük tutmak çekirdeği büyütecek, doyma noktası yüksek malzeme daha pahalı bir sac tercihine neden olacak, hava çekirdeğini arttırmak ise daha geniş çaplı bobin daha fazla bakır kullanmak anlamına geleceği için, bu gibi tasarımsal önlemlerin maliyeti arttırıcı unsurlar haline dönüştüğü gözlenmiştir.

Harici elemanlar yardımı ile devreye girme akımlarını önleme yöntemleri iki ana başlıkta değerlendirilmiştir : Kontrollü kapama ve öndirenç bağlama yöntemleri.

Klasik bir yöntem olan öndirenç ekleme yönteminin etkin bir çözüm sağladığı gözlenmiştir. Yalıtım koordinasyonu açısından değerlendirildiğinde, öndirençlerin yalıtım seviyeleri, maliyeti yükselten bir etki olarak görülmüştür. Öndirençleri devreye alan ve devreden çıkaran kesiciler de maliyeti arttıran bir unsur olarak ortaya çıkmıştır. Tesis projelendirmelerinde öndirençler, bunlara ait kesiciler, kesiciler ile öndirençler arasındaki yüksek gerilim kabloları, koruma röleleri ve zamanlama röleleri hesaba katıldığında yüklü bir maliyet oluşacağı ortaya konmuştur. Öndirenç ekleme yönteminin büyük dezavantajlarından biri de, bütün bu ekipmanın sadece devreye girme anında kullanılması, diğer zamanlarda atıl olarak beklemesidir. Ekipmanın kullanımda kaldığı süre dikkate alındığında, bağlanan sermaye açısından verimin çok düşük olduğu görülmüştür.

Devreye girme akımlarını önlemek için günümüzde üzerinde en çok araştırma yapılan yöntemlerden birinin kontrollü kapama olduğu belirlenmiştir. Bu yöntem ile kesicilerin uygun anlar belirlenerek kapatılması sonucu, devreye girme akımlarının önlenebileceği ortaya konmuştur. Devrede atıl durumda bekleyen ekipman yoktur. Tüm kesiciler hem devreye girme anında hem de işletme esnasında devredirler. Ancak, bu yöntemde kullanılacak olan kesicilerin ve rölelerin hata payları çok düşük olmalıdır. Yüksek hassasiyet anlamına gelen bu durumun maliyeti de arttırıcı bir unsur olabileceği gözlenmiştir. Sistemdeki kesicilerin hem devreye girme anında hem de normal işletme anında devrede olması, bağlanan sermayenin verimli olarak kullanılmasına imkan vereceği belirlenmiştir.

Öndirenç yöntemindeki; dirençler, dirençlere ait kesiciler ve bunlar arasındaki kablo bağlantıları, ekipman, inşaat ve bakım masraflarını arttırıcı etki göstereceğinden, kontrollü kapama yönteminin öncelikli alternatif olduğu ortaya konmuştur.

Diferansiyel rölelerin devreye girme akımlarını zaman zaman arıza akımları gibi algıladığı tespit edilmiştir.

Yüksek oranda ikinci harmonik içeriği, devreye girme akımlarını, kısadevre akımlarında ayıran önemli özelliklerden biri olarak gözlenmiştir. Klasik diferansiyel rölelerde genellikle %20' ler mertebesinde sabit ikinci harmonik set değeri vardır. Ancak yapılan çalışmalar; devreye girme anında oluşan ikinci harmoniğin, temel bileşene oranının %7' lere kadar düşebileceğini göstermiştir. Bu gibi durumlarda, sabit set değerli diferansiyel rölelerin, devre girme akımlarını kısadevre akımları gibi algılayabileceği belirlenmiştir .

Transformatör ve sistem parametreleri ile olası iç arızalar da göz önünde bulundurularak; ayarlanabilir ikinci harmonik set değeri olan diferansiyel rölelerin tercih edilmesi ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **Fleming J.A.,** 1892. Experimental Researches on Alternate Current Transformers, *Journal of the IEE,* **21**, VIII, 677-685.

[2] **Blume L.F., Boyajian A., Camilli G., Lennox T.C., Minneci S., Montsinger V.M.,** 1951. Transformer Engineering, Newyork, pp. 20-38.

[3] **B. Holmgren, R.S. Jenkins, J. Riubrugent,** 1968. Transformer Inrush Current, *Cigre paper* 12-03, Paris, pp. 1-13.

[4] **J.H. Brunke, K.J. Fröhlich,** 2001. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – *Part I: Theoretical Considerations, IEEE Transactions on Power Delivery*, **16,** pp. 276-280.

[5] **P.C.Y. Ling, A. Basak,** 1988. Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer, *IEEE Transaction on Magnetics*, **24,** pp. 3217-3222.

[6] **Elmore, Walter A**., 1994. Protective Relaying Theory and Application, ABB, Newyork, pp. 145-153.

[7] **Nippon Steel Corporation,** 1988. Grain-Oriented Electrical Steel Sheets Catalog, Japan, p. 204.

[8] **Greenwood A.,** 1971. Electrical Transients in Power Systems, Newyork, pp. 32-37.

[9] **MATLAB 7.0.0 R14,** 2004. Saturable Transformer, Simpowersystems Help File

[10] **Kobet G.L.,** 2001. User's Perpective-Protection with Harmonic Restraint Setting, *IEEE Transformers Committee, Inrush Current Seminar,* Orlanda, USA.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında İstanbul' da doğan H. Gökhan Küçükömer evli ve iki çocuk babasıdır. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul' da tamamladıktan sonra, 1988-1992 yılları arasında İ.T.Ü.' nde Elektrik Mühendisliği eğitimi aldı.1992 yılında mezuniyetin ardından, aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı.

1993- 1998 yılları arasında İ.S.K.İ.' ye bağlı Ömerli Barajında görev yaptı.

1998' de ABB Güç Trafoları Mühendislik Müdürlüğüne, Elektrik Tasarımcı olarak girdi. Halen aynı görevde çalışmaktadır.