

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAŞLANGIÇ MANYETİK GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ  
ARIZA AKIMI SINIRLAYICI TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur GÜNEY**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2016**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAŞLANGIÇ MANYETİK GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ  
ARIZA AKIMI SINIRLAYICI TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur GÜNEY  
(504111060)**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet CANSIZ**

**HAZİRAN 2016**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111060 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Onur GÜNEY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BAŞLANGIÇ MANYETİK GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ ARIZA AKIMI SINIRLAYICI TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Ahmet CANSIZ** .....

**İstanbul Teknik Üniversitesi**

**Jüri Üyeleri :** **Yard. Doç. Dr. Fuat KÜÇÜK** .....

**İstanbul Teknik Üniversitesi**

**Yard. Doç. Dr. Metin AYDIN** .....

**Kocaeli Üniversitesi**

**Teslim Tarihi** : **02 Mayıs 2016**

**Savunma Tarihi** : **06 Haziran 2016**





*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Mühendislik disiplinini oluşturmada kültür edinmemi sağlayan İstanbul Teknik Üniversite'sine ve tezimin oluşmasında değerleri katkıları için danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet CANSIZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2016

Onur GÜNEY  
(Elektrik Mühendisi)





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Arıza Akımına Karşı Koruma Kavramı .....	4
1.1.1 Kesicilerin kapasite artışı .....	5
1.1.2 Bara ayırma işlemi .....	5
1.1.3 Ardışık kesici açması .....	6
1.2 Arıza Akımına Karşı Alınan Geleneksel Önlemler ve Tipik Uygulamalar .....	6
1.3 Arıza Akımını Sınırlama (AAS) Kavramı .....	6
1.3.1 Arıza akımı sınırlayıcılardan beklenen özellikler .....	8
1.4 Arıza Akımı Sınırlayıcı Tasarım Motivasyonu ve Tezin Amacı .....	8
<b>2. ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR (AAS) .....</b>	<b>11</b>
2.1 Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcılar.....	11
2.1.1 Direnç içeren süperiletken arıza akım sınırlayıcı.....	13
2.1.2 Endüktif süperiletken arıza akım sınırlayıcı .....	14
2.1.3 Anahtarlamalı süperiletken arıza akım sınırlayıcı.....	15
2.1.3.1 Hibrit anahtarlamalı süperiletken arıza akım sınırlayıcı .....	15
2.1.4 Akı-kilitleme tipi süperiletken arıza akımı sınırlayıcı .....	16
2.1.5 Doymuş nüveli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı.....	20
2.2 Süperiletken Olmayan Arıza Akımı Sınırlayıcılar .....	23
2.2.1 Anahtarlamalı arıza akım sınırlayıcı .....	23
2.2.1.1 Katı-hal anahtarlamalı arıza akım sınırlayıcı .....	23
2.2.1.2 Mekanik anahtarlamalı arıza akımı sınırlayıcı.....	24
2.2.2 Manyetikliği giderilmiş mıknatıslı arıza akım sınırlayıcı .....	26
<b>3. ARIZA AKIMI SINIRLAMA TEKNOLOJİLERİNİN</b>	
<b>    KARŞILAŞTIRILMASI .....</b>	<b>29</b>
<b>4. BAŞLANGIÇ GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ ARIZA AKIMI</b>	
<b>    SINIRLAYICI TASARIMI.....</b>	<b>33</b>
4.1 Kullanılan Malzemeler .....	35
4.1.1 Düşük karbonlu çelik SAE 1020.....	35
4.2 Tasarım Parametreleri ve Modelleme .....	36
4.2.1 Tasarım parametrelerinin hesaplanması.....	36
4.2.2 Modelleme .....	39
4.3 Performans ve Uygulanabilirlik Açısından İnceleme .....	40
4.3.1 Manyetostatik analiz .....	40

4.3.2 Normal çalışma durumu .....	41
4.3.3 Arıza akımı sınırlaması .....	42
4.3.4 Nüve malzemelerinin performans karşılaştırması .....	43
4.4 Optimum Tasarım ve Nüve Parametrelerinin Belirlenmesi .....	44
4.4.1 Hava boşluğu eklenmiş nüve yaklaşımı .....	44
4.4.1.1 Akı saçaklama etkisinin incelenmesi .....	48
4.4.1.2 Manyetostatik akı dağılımının incelenmesi.....	49
4.4.1.3 Gerilim düşümünün incelenmesi.....	50
4.4.1.4 Arıza akımı sınırlaması .....	51
4.4.1.5 Çeşitli nüve malzemeleri ile gerilim düşümü ve arıza akımı sınırlaması analizlerinin yapılması.....	51
4.4.1.6 Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS tasarımı ile doymuş nüveli AAS'nın performans karşılaştırması .....	52
4.4.1.7 Şebekenin gün içerisindeki yük değişimine göre AAS üzerindeki gerilim düşümlerinin incelenmesi .....	55
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>63</b>

## **KISALTMALAR**

<b>YSS</b>	: Yüksek Sıcaklık Süperiletken
<b>YBCO</b>	: Yttrium Barium Copper Oxide
<b>AAS</b>	: Arıza Akım Sınırlayıcı
<b>AAD</b>	: Arızalı akım durumu
<b>ND</b>	: Normal (arızasız) şebeke çalışması durumu
<b>SAAS</b>	: Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcı
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>MMK</b>	: Manyetomotor Kuvvet (Magnetomotive Force)
<b>SMAAS</b>	: Sürekli Miknatıslı Arıza Akım Sınırlayıcı
<b>ZnO</b>	: Aşırı Gerilim Koruma Baypası (Zinc Oxide)



## SEMBOLLER

$\mu$	: Manyetik Geçirgenlik
$\mu_{normal}$	: Normal şebeke çalışmasında nüve manyetik geçirgenliği
$\mu_0$	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\mu_{AA}$	: Arızalı akım oluştuğunda nüve manyetik geçirgenliği
$\mu_r(ND)$	: Normal şebeke çalışmasında bağlı manyetik geçirgenlik
$\mu_r(AAD)$	: Arızalı akım oluştuğunda bağlı manyetik geçirgenlik
$V_s$	: Şebeke gerilimi
$R_s$	: Şebeke direnci
$X_s$	: Şebeke reaktansı
$I_{kr}$	: Süperiletken kritik akımı
$I_{hat}$	: Şebeke akımı
$V_{AAS}$	: Arıza akımı sınırlayıcı (AAS) üzerine düşen gerilim
$B_d$	: Doyum manyetik akı yoğunluğu
$I_{maks}$	: Arıza akımı ilk tepe değeri
$I_{z(k-h)}$	: Arıza akımı kararlı-hal tepe değeri
$A$	: Arıza oluştuğu andaki arıza akımı DA bileşeni
$I_n$	: Nominal şebeke akımı
$t_{AAD}$	: Arıza süresi
$I_{maks(AAD)}$	: Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değeri
$I_{z(AAD)}$	: Sınırlanmış arıza akımı kararlı-hal tepe değeri
$t_h$	: Bir sonraki arızaya hazırlık süresi
$I_{AA}$	: Arıza akımı
$I_{AAS}$	: Arıza akımı sınırlayıcı (AAS) akımı
$S_{ss}$	: İki yönlü kontrollü yarı iletken anahtar
$S_{bp}$	: Normal şebeke çalışması baypası
$Z_{AA}$	: Arızalı akım durumu baypası
$X_a$	: Arızanın oluştuğu noktada görülen sistem reaktansı
$R_a$	: Arızanın oluştuğu noktada görülen sistem direnci
$B_d$	: Nüvenin doyuma ulaştığındaki manyetik akı yoğunluğu
$B_a$	: Nüvenin doğru akım ile ikaz edilmesi sonucunda ulaşılan manyetik akı yoğunluğu
$H_a$	: Nüvenin doğru akım ile ikazına karşılık gelen manyetik alan şiddeti



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Açıklamaları ile birlikte arıza akımı sınırlayıcı karakteristikleri.	30
Çizelge 3.2 : AAS teknolojilerinin Genel karakteristiklerinin karşılaştırılması (EPRI Technology Watch 2009).	31
Çizelge 4.1 : Şebeke modeli parametreleri.	38
Çizelge 4.2 : Kapalı nüveli başlangıç geçirgenlikli AAS model parametreleri.	39
Çizelge 4.3 : Nüve malzemelerinin performans karşılaştırması.	43
Çizelge 4.4 : Hava boşluklu başlangıç geçirgenlikli AAS model parametreleri.	48
Çizelge 4.5 : Nüve malzemesine bağlı olarak gerilim düşümü ve sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri.	52
Çizelge 4.6 : Doymuş nüveli AAS boyutları (Knott ve Moscrop, 2013).	53
Çizelge 4.7 : R <sub>yük</sub> değerinin gün içerisindeki döneme göre değişimi	56



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Basitleştirilmiş Güç Devresi. ....	2
Şekil 1.2 : Genelleştirilmiş akım dalga şekilleri: Normal durum (yeşil eğri), arıza akımı durumu (kırmızı eğri). ....	2
Şekil 1.3: Arıza akımını oluşturan bileşenlerin incelenmesi (IEC, 2001). ....	3
Şekil 1.4 : Arıza akımı sınırlayıcı (AAS) şebeke bağlantısı. ....	7
Şekil 1.5 : Genelleştirilmiş akım dalga şekilleri: Normal durum(ND), AAS olmadığında arıza akımı ve AAS mevcut iken arıza akımı. ....	7
Şekil 2.1 : YSS elemanı üzerinden geçen akım değerine bağlı olarak gerilim düşümü değişimi. ....	12
Şekil 2.2 : Süperiletkenin kritik parametrelerini içeren faz diyagramı. ....	12
Şekil 2.3 : Şebekeye doğrudan bağlı “direnç içeren” SAAS devre modeli. ....	13
Şekil 2.4 : Paralel bağlı olduğu direnç üzerinden şebekeye bağlı “Direnç içeren” SAAS devre modeli. ....	14
Şekil 2.5 : Endüktif Arıza Akım Sınırlayıcısı. ....	14
Şekil 2.6 : Arıza Akım Sınırlama Matrisi. ....	15
Şekil 2.7 : Süperiletken modül içeren hibrit arıza akım sınırlayıcı (Lee ve diğ, 2008a). ....	15
Şekil 2.8 : Hibrit arıza akımı sınırlayıcıda arıza akımının paralel hatta transferi ve açma kontağının açması işlemlerinin gösterimi (Lee ve diğ, 2008b). ....	16
Şekil 2.9 : Temel akı-kilitleme tipi SAAS konfigürasyonu. ....	17
Şekil 2.10 : Sarımların birbirlerine seri bağlı olduğu akı-kilitleme tipi SAAS. .	18
Şekil 2.11 : Hava nüveli akı-kilitleme tipi Süperiletken AAS (a) Paralel tip, (b) Transformator tipi. ....	19
Şekil 2.12 : Seri Rezonans yöntemi kullanılan akı-kilitleme tipi SAAS. ....	20
Şekil 2.13 : Doymuş nüveli AAS kavramsal diyagramı (Vilhena ve diğ, 2015)..	21
Şekil 2.14 : Normal çalışma durumunda doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı nüvesi <i>B-H</i> eğrisi. ....	21
Şekil 2.15 : Arıza akımı durumunda doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı nüvesi <i>B-H</i> eğrisi. ....	22
Şekil 2.16 : Doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcısının şebekeye elektriksel olarak bağlantı şeması. ....	23
Şekil 2.17 : Genel katı-hal anahtarlama topolojileri. (a) Seri anahtarlama tipi, (b) Köprü tipi, (c) Rezonans tipi (Abramovitz ve Smedley, 2012). ....	24
Şekil 2.18 : Hibrit tipi anahtarlama arıza akım sınırlayıcı (Lee ve diğ, 2008).	25
Şekil 2.19 : Rezonans tipi anahtarlama arıza akım sınırlayıcı (Tahiliani ve Porter, 1980). ....	26
Şekil 2.20 : Manyetikliği giderilmiş mıknatıslı AAS. ....	26
Şekil 2.21 : Mıknatıs <i>B-H</i> eğrisi. ....	27
Şekil 4.1 : Manyetik akı yoğunluğu ( <i>B</i> ) ile manyetik alan şiddeti ( <i>H</i> ) arasındaki ilişkinin birbirine bağlılığı ve bölgeler. ....	33

Şekil 4.2 : Başlangıç geçirgenliği düşük nüveli AAS adını verdiğimiz birinci çalışma bölgesinde çalışması tasarlanan tasarım. ....	34
Şekil 4.3 : Birinci çalışma bölgesinde çalışan arıza akımı sınırlayıcının arıza akımı durumunda gerilim düşümü.....	35
Şekil 4.4 : Düşük karbonlu çelik SAE 1020 <i>B-H</i> eğrisi. ....	35
Şekil 4.5 : Düşük karbonlu çelik SAE 1020 $\mu_r$ - <i>H</i> eğrisi. ....	36
Şekil 4.6 : AAS'nın kullanılacağı şebeke modeli. ....	38
Şekil 4.7 : Kapalı nüveli tasarıma sahip başlangıç geçirgenlikli arıza akımı sınırlayıcı.....	40
Şekil 4.8 : Normal çalışma durumunda, şebeke akımı tepe değerinde nüve boyunca manyetik alan şiddetinin dağılımı. ....	41
Şekil 4.9 : Kapalı nüveli tasarımın normal çalışma durumunda, (a) nüve kesit düzlemi ve (b) bu düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu (B) genliği dağılımı.....	41
Şekil 4.10 : Kapalı nüveli tasarımın gerilim düşümü analizi için Maxwell programında kurulması.....	42
Şekil 4.11 : Kapalı nüveli başlangıç geçirgenlikli tasarım ve hava nüveli bobin gerilim düşümleri karşılaştırması.....	42
Şekil 4.12 : Kapalı nüveli tasarım için arıza akımlarının karşılaştırılması. ....	43
Şekil 4.13 : Nüveye eklenen hava boşluk miktarına bağlı olarak <i>B-H</i> eğrisinin değişimi.....	44
Şekil 4.14 : Nüvede hava boşluğunun fiziksel görünümü. ....	44
Şekil 4.15 : Nüvede akı saçaklama etkisi.....	48
Şekil 4.16 : Parçalı hava boşluğuna sahip nüve geometrisi. ....	49
Şekil 4.17 : Parçalı hava boşlukları. ....	49
Şekil 4.18 : Hava boşluklu tasarımın normal çalışma durumunda, (a) nüve kesit düzlemi ve (b) bu düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu (B) genliği dağılımı.....	50
Şekil 4.19 : Hava boşluklu nüve gerilim düşümü değeri. ....	50
Şekil 4.20 : Hava boşluklu nüveli ve kapalı nüveli AAS arıza akımı sınırlaması karşılaştırması. ....	51
Şekil 4.21 : Doymuş nüveli AAS (Knott ve Moscrop, 2013) ....	53
Şekil 4.22 : Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS ile doymuş nüveli AAS gerilim düşümü karşılaştırması.....	54
Şekil 4.23 : Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS ile doymuş nüveli AAS arıza akımı sınırlaması karşılaştırması. ....	54
Şekil 4.24 : Örnek bir gün için, gün içerisinde saate bağlı tüketim değerinin değişim eğrisi (Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı, 2012) ....	55
Şekil 4.25 : Gün içindeki dönemlere göre gerilim düşüm miktarının değişim eğrileri .....	56

## BAŞLANGIÇ MANYETİK GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ ARIZA AKIMI SINIRLAYICI TASARIMI

### ÖZET

Elektrik tüketiminin artışı ve elektrik güç şebekesinin sürekli olarak büyümesi arıza akımlarının artmasını da beraberinde getirmektedir. Bu arızaları gidermek amacıyla kullanılan mevcut kesiciler ve koruma elemanları yeterli olmamakta ve şebekenin sağlıklı işleyişine devam edebilmesi için, oluşan bu arıza akımlarının koruma elemanlarının giderebileceği seviyeye sınırlandırılması gerekmektedir.

Arıza akımı sınırlandırıcılarının (AAS) arızanın oluşmadığı normal çalışma durumlarında (ND), görünmez olmaları gerekmele birlikte minimum güç tüketmeleri de beklenir. Bu şartları sağlamak için, arıza akımını sınırlaması istenen cihazın içerdiği nüvenin sürekli olarak doyuma olması gerekliliği söz konusudur. Böylece, bu tür AAS'lar doymuş bölge içerisinde görünmez olmakla birlikte bağlı oldukları şebekeden çektikleri güç miktarı da minimum seviyede kalmaktadır. Bu tez çalışmasında, özellikle doymuş nüveli arıza akımı sınırlayıcı tasarımı ele alınarak bu tasarımda karşılaşılan soruna argüman üretilme yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda öncelikle, nüvenin hiçbir şekilde doyuma ulaştırılmayarak veya doyuma ulaşmamış bölgede çalıştırıldığı halde şebekeye karşı görünmez olup olamayacağı sorusunun cevabı araştırılmıştır. Bunun başarılması durumunda, nüvenin doyuma ulaşmasına gerek kalmayacak ve böylelikle bu görevi gören sürekli mıknatıslara ve/veya bobinin doğru akım (DA) ile sürekli olarak ikaz edilmesine gerek kalmayacaktır.

Literatür araştırmaları sonucunda, doymamış bölge içerisinde başlangıç geçirgenliği olarak bilinen, manyetik alan şiddeti değerinin düşük miktarda olduğu bir bölgede düşük manyetik geçirgenliğe sahip düşük karbonlu çelik SAE 1020 vb. malzemelerin varlığı tespit edilmiş ve bu tez çalışması için ortaya konan argümanı destekleyecek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu malzemelerin başlangıç manyetik geçirgenlikleri aynı zamanda hemen hemen sabit kabul edilebilir değerlere sahiptir. Bunun sonucunda, tespit edilen nüve malzemelerinin normal çalışma durumunda başlangıç geçirgenliği bölgesinde çalıştırılıp çalıştırılmayacağı konusu üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, başlangıç manyetik geçirgenliğine sahip nüveli arıza akımı sınırlayıcı tasarımının şekli, boyutları ve ilgili parametreleri hesaba katılarak Maxwell sonlu elemanlar programında benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde benzetimlerin ortaya konan argümanı destekleyici nitelikte olduğu görülmüştür. Başlangıçta gerçekleştirilen benzetimlerde girilen değerlere bağlı olarak tasarımların boyutları böyle bir arıza akımı sınırlayıcının uygulanabilirliğini pratik açıdan kısıtlayıcı nitelikte olmuştur. Bunun üstesinden gelmek için, tasarımda ve parametreler üzerinde değişikliklere gidilerek boyutların küçültülmesine çalışılmıştır. Boyutları küçültmek amacıyla nüveye hava boşluğu eklenmesi değerlendirilmiştir. Hava boşluğunun eklenmesi, nüvenin boyutlarını azaltmakla birlikte, arıza akımı sınırlama performansını da kötüleştirdiği ortaya çıkmıştır. Ancak,

yapılan tasarımlarda hava ve nüve bileşenlerinden oluşan nüvenin sadece havadan oluşan nüveye göre daha iyi bir performans sergilediği gözlenmiştir.



## **DESIGN OF FAULT CURRENT LIMITER USING CORE WITH LOW INITIAL PERMEABILITY**

### **SUMMARY**

To meet the need of increase in electrical energy consumption and generation, setting parallel transmission lines up and existing of complex system as a result of addition of distributed generation sources to grid concludes increase in fault current levels. The increase of fault currents in this way causes the problems of the need to increase of withstand values of power electronics components, the danger occurred on power system hardware caused by higher mechanical forces and excess heating of transformer and the other components. In the case of clearing these increased faults, circuit breakers and similar protection devices are not providing the demanded limitation. Several types of solutions are proposed for this. These solutions are increasing capacity of circuit breakers, bus splitting and sequential breaker opening etc. The solution of increasing capacity of circuit breakers is not feasible because it requires so many of breakers to be changed.

Bus splitting causes the loads not to be feeded by power sources in normal case of operation and requires developing additional control methods. Sequential breaker opening increases the total time to clear the fault current. Because of these problems, the fault current limiter usage motivation has been formed.

Fault current limiters are expected to be activated so fast so that they can limit first peak of fault current. To make this happen, fault current limiters (FCL) using superconducting material naturally and hysterically passes into normal resistive mode fastly. Some FCL types which uses some switching elements uses magnetic field that is generated by parallel coil connected to them. This type of FCLs can use superconducting module which is missioned to switch the fault current to parallel coil line. Thanks to this method, superconducting material's recovery period is so small that makes it available for other fault current. Also, superconducting element cooling capacity has been decreased by this method.

The other method which uses flux-locking method also can have superconducting element or not. In this physical phenomenon, core that is used in design is "locked" by magnetic fluxes with opposite directions to each other and thus no magnetic flux can flow in the core material. As a result of that, the coil that is wounded to core "see" no reactance and becomes invisible to grid. At fault current mode of operation, one of these opposite magnetic fluxes beat the other and no longer the equality of magnetic fluxes happen. Because this change activates so fast, triggering into high reactance mode becomes so quickly that first peak of fault current is limited. FCLs are also

expected to consume minimum energy and to drop minimum voltage across its terminal during the normal operation so that they become invisible in the grid.

To ensure that, for example saturated core fault current limiters needs to be in saturated condition continuously. In this way, they are invisible with little energy consumption in saturated region for normal mode of operation. However, continuously saturating the cores causes continuous energy consumption from a DC supply or need to have superconducting cables. These requirements cause operating and/or installation costs to increase. This thesis work aims to eliminate the need to saturate cores. In this context primarily, the answer to the question that if design could be invisible or not without saturating the core or by operating the core in unsaturated region is researched. In the case of succeeding this, the need to saturate the core will be unnecessary and thus there will be no need to use permanent magnets and/or to continuously excite DC coils.

From the literature search; some materials that have low magnetic permeability for low magnetic field intensity values which also named initial permeability region are identified. Initial magnetic permeability values of these materials would be accepted to have constant values for low magnetic induction. Firstly, low carbon SAE 1020 material is used and it is tried to be understood if this material could be operated in initial magnetic permeability region for normal mode of operation. For this purpose, shape, dimensions and related parameters of design are determined via calculation methods supporting the necessity of voltage drop to be in constraints and core operation curve to be in initial magnetic permeability region in normal mode of operation. This obtained design is simulated in MAXWELL program which uses finite element method.

When obtained results are evaluated, simulations are observed to support the argument we had in beginning. Then, different core materials that are projected or not to be used in initial magnetic permeability region for normal mode of operation have been simulated. When resulted voltage drop and fault current limiting values are considered, low carbon SAE 1020 material is decided to have the best simulation results that satisfies the argument.

At first simulations, design dimensions are observed to be useless from the point of practical usage. To overcome this, it was tried to reduce design on size by making definite changes on design and its parameters. In order to reduce the size of design, addition of some air gaps into core is evaluated. Adding some air gap reduced the size of core dimensions however this procedure worsened the fault current limiting performance. Although resulting this performance decrease in the FCL by introducing air gap, this core design shows better performance than air core coil. Same simulation studies are carried out using other some certain core materials without change on design parameters and as a result of air gap in core material dominating the core material, performance outputs on simulations are not significantly different than one another. In addition, the design with air gap is compared to saturated core FCL about fault current limiting device performance criterias and it has been observed that this design performance is worse than saturated type. Also, simulations are carried out to inspect the effect of power consumption in daily hours on same design. This change

on power consumption in daily hours is inspected to cause the voltage drop on FCL. As a result of this inspection, least voltage is observed to drop in night period and most voltage is observed to drop in peak period.





## 1. GİRİŞ

Elektrik şebekelerinde arıza akımlarının oluşması kaçınılmaz bir olay olup bunun çözümü için bir çok çalışma yapılmaktadır. Bu amaçla, elektrik şebekelerinde oluşan arıza akımlarını gidermek için bir çok yöntem uygulanmaktadır. Bunun yanında, artan enerji sarfiyatı oluşan arıza akımlarının da çeşitliliğini artırma yönündedir. Arıza akımı sınırlaması için ele alınan yöntemlere göre bir çok tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarımlara girmeden önce bazı temel kavramları gözden geçirmek bu tezde incelenen konu açısından faydalı olacaktır. Bu arızaları gidermek amacıyla kullanılan yöntemlerde arıza akımlarının koruma elemanlarının giderebileceği seviyeye indirgenmesi gerekmektedir.

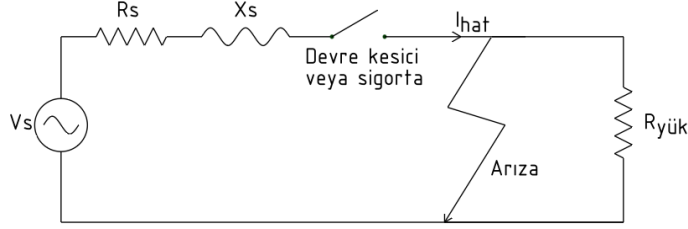
Arıza akımı sınırlandırıcılarının arızanın oluşmadığı normal çalışma durumlarında, görünmez olmaları gerekmektedir. Bu şartı sağlamak için, arıza akımını sınırlaması istenen cihazın içerdiği nüvenin sürekli olarak doyumda olması gerekliliği söz konusudur. Bu durumu temsil eden devre analizi aşağıda verilmiştir.

Şekil 1.1’de görülmekte olan basitleştirilmiş güç devresi için normal şebeke çalışması durumunda akan akım 1.1 denkleminde verildiği gibidir.

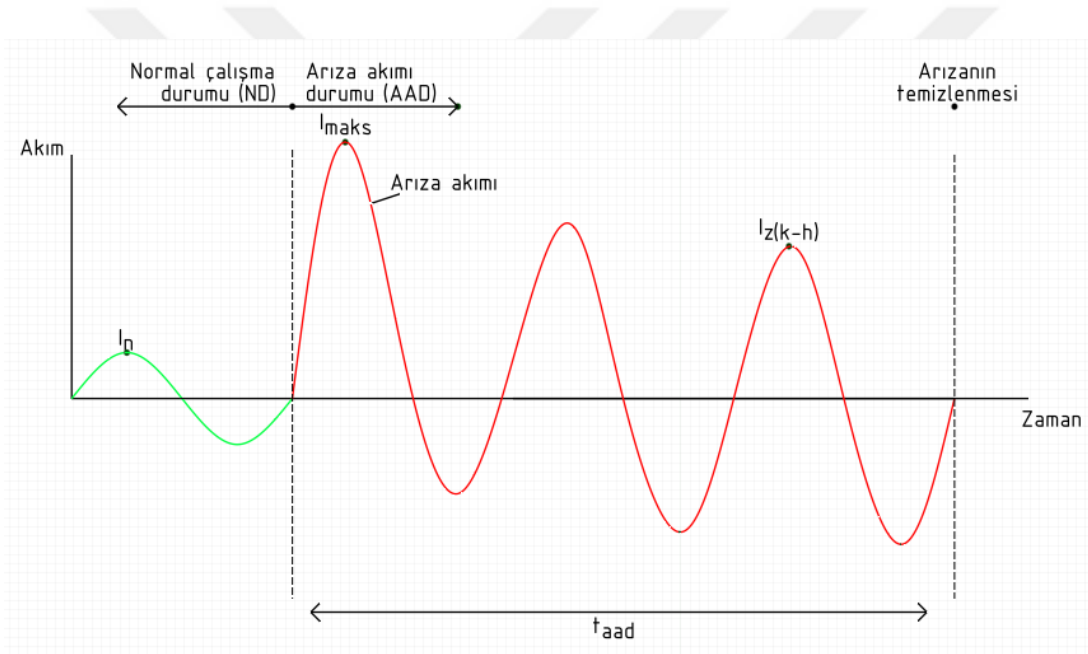
$$I_{hat} = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_{yük})^2 + X_s^2}} \quad (1.1)$$

Elektrik devrelerinde veya şebekelerinde iletim/dağıtım hattına yıldırım çarpması sonucu veya ağaç, elektrik direği vb. nesnelerin hattı devirerek toprağa kısa devre etmesi sonucu oluşan yüksek akım artışı (Kovalsky ve diğ, 2005) oluştuğunda ise arıza akımı durumu (AAD) meydana gelir. Arızanın oluşması Şekil 1.1’de görüldüğü üzere, tüketim yüklerinin kısa devre olmasıyla sonuçlanır. Bunun sonucunda, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi şebekede 1.2 denkleminde de ifade edildiği şekliyle yüksek akım artışı meydana gelir.

$$I_{hat} = \frac{V_s}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \quad (1.2)$$



Şekil 1.1: Basitleştirilmiş Güç Devresi.



Şekil 1.2 : Genelleştirilmiş akım dalga şekilleri: Normal durum (yeşil eğri), arıza akımı durumu (kırmızı eğri).

Arıza akımının alternatif akım (AA) bileşeni, arıza akımının kararlı hale ulaştığı andaki dalga şeklindedir. Arıza oluştuğundan sonra, arıza akımının kararlı hale ulaşmadığı geçiş (transient) durumunda simetrik özelliği olan bu bileşen üzerine arıza akımının doğru akım bileşeni de eklenir. Arıza meydana geldiğinde doğru akım (DA) bileşeninin miktarı; arıza akımının AA bileşeninin o ana denk değerinin tersine eşittir. Bunun sebebi; arızanın oluştuğu noktada görülen reaktans değerinin ( $X_a$ ), akımın ani



sistem bozucu durumlar meydana geldiğinde, yüksek arıza akımlarının (nominal akım değerinin 5-20 katı) oluşmasına sebebiyet vermektedir.

Yukarıda ifade edilen arıza akımı oluş sebeplerine ek olarak, sistemdeki maksimum arıza akımı birçok sebepten ötürü artma eğilimindedir. Bu sebepler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Elektrik tüketim taleplerinin artması ve üretimdeki artış (Abramovitz ve Smedley, 2012),
- Tüketimdeki artışı karşılamak için sağlanan paralel iletim hatlarının kurulması,
- Şebekedeki enterkonneksiyonun artması,
- Dağıtık üretim kaynaklarının sisteme ilavesiyle daha da karmaşık yapının oluşması (EPRI Technology Watch 2009).

Arıza akımı seviyelerindeki artış ise birçok problemi beraberinde getirmektedir. Örneğin, güç sistemi uygulamalarında kullanılan güç elektroniği elemanlarının dayanım değerlerinin artması gereksinimi, daha yüksek mekanik kuvvetlerin oluşumunun güç sistemi donanımının bütünlüğü üzerinde yarattığı tehlike ve transformatör ve diğer ekipmanların aşırı ısınması gibi problemlerle sıkça karşılaşılmaktadır (Mukhopadhyay ve diğ, 1999). Bununla birlikte, şebekede yer alan kabloların iletken ve yalıtkanlarını erittiği gibi yalıtım görevi gören yağ içeren ekipmanların patlamasına ve yanmasına sebep olabilmekte ve dahası, iletkenler ve destek parçaları üzerinde oluşan yüksek manyetik kuvvetler ekipmanlara ciddi zararlar verebilmektedir (Abramovitz ve Smedley, 2012).

### **1.1 Arıza Akımına Karşı Koruma Kavramı**

Her ne sebepten ötürü olursa olsun şebekede oluşabilecek tüm zararları önleyebilmek için oluşabilecek her türlü arıza akımını kesmek gerekmektedir. Dağıtım koruma sistemleri, güvenilirliği kanıtlanmış, sigorta ve kesiciler olarak bilinen iki tip koruma elemanı tarafından korunmaktadır. Sigortalar, basit, ucuz, küçük boyutlu olabilmektedirler ve 200 kA'e kadar arıza akımını periyodun ilk çeyreğinde açabilecek hıza ve güvenilirliğe sahip olmaları sebebiyle yaygın kullanım alanına sahiptirler. Fakat sigortalar, tek kullanımlık olmalarının yanında, manuel olarak değiştirilmeleri

uzun süreli hizmet kesintisine sebep vermekte ve bu durum ise beraberinde başka sorunlar getirmektedir.

Bir diğer koruma elemanı ise devre kesicidir. Yüksek akım kesme kapasitesine sahip devre kesiciler oldukça pahalı elektromekanik cihazlardır. Pahalı olmalarının yanında, devre kesiciler düzenli olarak bakım gerektirmekte ve kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Şebekenin gelecekteki tahmin edilen arıza akım değerinin mevcut devre kesicilerin kesme kapasitesini aşacağı öngörülmektedir. Arıza akım değerinin bu artışına paralel olarak şebekede hali hazırda kullanılmakta olan çok sayıdaki devre kesicilerin uygun kapasitedeki muadilleriyle değiştirilmesi mümkündür. Ancak, bu çok maliyetli bir işlem olup her kapasite artışında bu işlemin tekrarlanması gerekmektedir (Abramovitz ve Smedley, 2012).

Mevcut devre kesicilerin bu arıza akımını açamaması sonucunda, kesicilerin kapasite artışı, bara ayırma işlemi, ardışık kesici açması gibi farklı yöntemler denenmiştir. Bundan sonraki alt bölümlerde bu yöntemler ele alınmıştır.

### **1.1.1 Kesicilerin kapasite artışı**

Şebekede arıza akımı oluşması durumunda, çok sayıda kesici bundan etkilenmektedir. Bu amaçla oluşan arıza akım değerlerinin azaltılması ve dolayısıyla şebekede oluşacak hasarların önlenmesi için kesicilerin açma kapasitesinin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu da mevcut kesicilerin daha yüksek kapasiteli kesicilerle değiştirilmesini gerektirmektedir. Bu cihazların pahalı elektromekanik cihazlar olması ve bu değişimin çok sayıda devre kesicisinde uygulanmasını gerektiğinden dolayı yüksek bir maliyeti de beraberinde getirmektedir (Kovalsky ve diğ, 2005).

### **1.1.2 Bara ayırma işlemi**

Arıza akımını besleyen güç kaynaklarını şebekeden ayırmak için, şebekeye bağlandıkları noktalar olan baraları açma yoluna gidilir. Fakat bu yöntem, yüklerin normal çalışma durumunda güç kaynakları tarafından beslenememesi anlamına gelmektedir. Bunu önlemek için, şebekenin işletme şeklinde değişiklik yapmak ve ek kontrol metodolojileri geliştirmek gerekmektedir (Kovalsky ve diğ, 2005).

### **1.1.3 Ardışık kesici açması**

Bu yöntem, kesicilerin yüksek arıza akımını açmalarını önlemektedir. Arıza oluştuğunda, ilk olarak arıza kaynağına en yakın kesicinin açması sağlanır. Bunun sonucunda, arıza bölgesindeki kesicinin gördüğü arıza akım değeri azalmakta ve böylece kesici güvenli bir şekilde açma gerçekleştirmektedir. Fakat bu yöntem, arızanın temizlenmesi için gereken toplam süreyi arttırmaktadır (Kovalsky ve diğ, 2005).

## **1.2 Arıza Akımına Karşı Alınan Geleneksel Önlemler ve Tipik Uygulamalar**

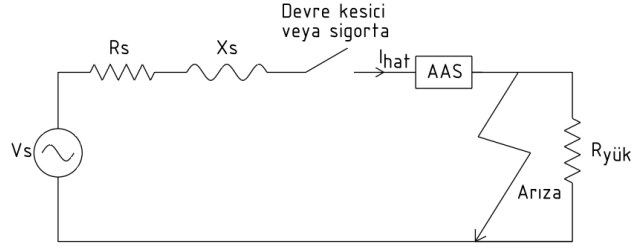
Şebekelerde oluşan arıza akımlarını önlemek için ilk başlarda, yüksek empedanslı transformatörler denenmiştir fakat bunlar verimsiz olmalarının yanında (Xin ve diğ, 2007) gerilim düzenlemesini olumsuz etkilemektedirler.

Arıza akımlarını önlemek için bir başka seçenek ise, dağıtım hattı üzerinde seri bağlı hava nüveli bobin kullanımınıdır. Bu yöntem ise, normal çalışma durumunda yüksek gerilim düşümü ve güç kaybını beraberinde getirmektedir (Abramovitz ve Smedley, 2012).

## **1.3 Arıza Akımını Sınırlama (AAS) Kavramı**

Mevcut devre kesicilerin arıza akımını açmadaki gecikmeleri birkaç şebeke akımı çevrimi ile birkaç saniye arasında değişmektedir (Ueda ve diğ, 1993). Bunun yanında, şebekede oluşan arıza akımlarını mevcut devre kesicilerin elverişli açma kapasitesine indirmeye çalışmaları literatürde mevcuttur (Hoshino ve diğ, 2001).

Arıza akımı sınırlayıcının şebekeye bağlantısı Şekil 1.4'te görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere, arıza akımına karşı koruma sağlayan devre kesicilere, arıza akımını sınırlayacak olan AAS seri olarak bağlanmıştır.

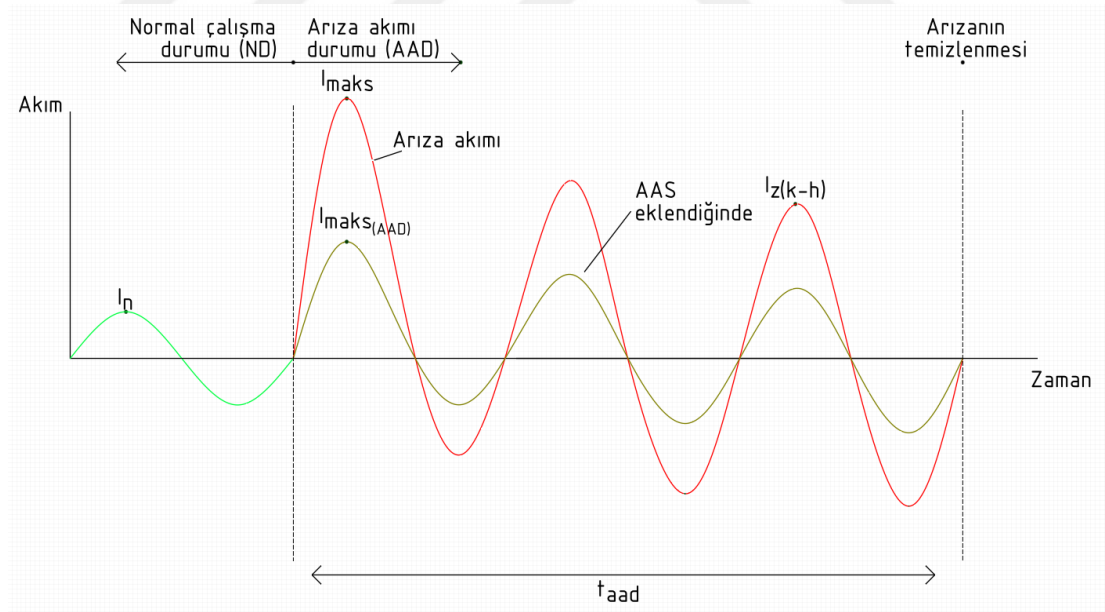


Şekil 1.4 : Arıza akımı sınırlayıcı (AAS) şebeke bağlantısı.

Arıza akımı sınırlayıcının şebekeye bağlanması neticesinde, arıza durumunda oluşan akım şebeke empedansına ek olarak Denklem 1.6’da verildiği gibi AAS empedansı tarafından sınırlanır. Bu durumda şebeke empedansı ve hat akımı sırasıyla aşağıdaki denklemlerle verilir. Sınırlanılan arıza akımı Şekil 1.5’te verilmiştir.

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \quad (1.5)$$

$$I_{hat} = \frac{V_s}{Z_s + Z_{AAS}} \quad (1.6)$$



Şekil 1.5 : Genelleştirilmiş akım dalga şekilleri: Normal durum(ND), AAS olmadığı arıza akımı ve AAS mevcut iken arıza akımı.

### 1.3.1 Arıza akımı sınırlayıcılardan beklenen özellikler

Şebekede oluşabilecek arıza akımını önlemek açısından değerlendirildiğinde tipik bir arıza akımı sınırlayıcısından beklenen özellikler,

- Arıza akımının ilk tepe (peak) değerini sınırlandırması (5 ms'den daha kısa sürede devreye girmek),
- Arıza akımının oluşmadığı normal durumlarda düşük empedans göstermesi ve düşük enerji kayıplarına sahip olması,
- Normal çalışma durumunda kabul edilebilir olmayan oranlarda harmonik oluşturmaması,
- Sistemin bütünsel güvenilirliğini artırmak için sensör ve kontrol cihazlarından büyük ölçüde arındırılmış olması, bir başka deyişle akım sınırlandırma görevini bu tür sistemlere ihtiyaç olmadan başarabilmesi (Fransen, 1997),
- Normal çalışma durumundan arıza akımı durumuna ve arıza akımı durumundan normal çalışma durumuna geçişlerde, düzgün ve kademeli olarak empedans değişimi göstermesi,
- Mümkün olduğu kadar taşınabilir, hafif ve küçük hacimli olması,
- Arızalanma sıklığının çok az olduğu, güvenilir bir çalışma şekline sahip olması,
- Bir arıza akımı sınırlandıktan sonra bir başka arıza akımı sınırlandırmaya anında hazır olma kapasitesine sahip olması şeklinde sıralanabilir (Mukhopadhyay ve diğ, 1999).

### 1.4 Arıza Akımı Sınırlayıcı Tasarım Motivasyonu ve Tezin Amacı

Arıza akımı sınırlama işlevinin akım sınırlayıcı sigortalar, korunaklı nüve, akı-kilitleme tipi süperiletken, doymuş nüve vb. prensiplerinin kullanılmasıyla sağlanabildiği bilinmektedir. Bunlar içerisinde doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcılar bilindiği üzere, normal çalışma durumunda doyurulmuş olmak zorundalar çünkü ancak böylelikle şebeke tarafından “görünmez” olabilmekte ve terminallerinde düşük gerilim düşümü göstermektedirler. Ancak, bu nüveleri doyuma götürmek için ek bir mıknatıs kullanılmakta ve/veya bu doyum; doğru akım ile ikaz

edilen sarımlar kullanılarak sağlanmaktadır. Bu ise, kurulum maliyetinin artmasının yanı sıra, işletme güç sarfiyatını da beraberinde getirmektedir. Bunu önlemek amacıyla, gözlemlerimiz neticesinde düşük manyetik alan şiddeti değerlerine karşılık manyetik akı yoğunluk değerleri düşük olan düşük karbonlu çelik SAE 1020, paslanmaz çelik-416 vb. malzemelerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu malzemeler ND'da, başlangıç geçirgenliği olarak adlandırılan; manyetik alan şiddeti ( $H$ ) değerlerine oranla düşük manyetik akı yoğunluk ( $B$ ) değerlerine sahip bölgede çalıştırılmak suretiyle, ek bir mıknatıs kullanımı gerektirmeden ve/veya YSS özelliğe sahip süperiletken malzeme veya geleneksel bakır malzeme özelliğinde ek bir DA ikaz bobini (ve bu bobini ikaz etmek için gerekli DA güç kaynağı) kullanımı gerektirmeden “görünmez” olabilmekte ve arıza akım durumunda ise doymamış bölge içerisinde çalışmak suretiyle, arıza akımını sınırlandırma kabiliyetine sahip olabilmektedirler.

Bu tez çalışmasının amacı, düşük karbonlu çelik SAE 1020 nüve malzemesinin kullanıldığı, tasarımın parametrelerinin belirlendiği ve bu malzemeye has düşük başlangıç geçirgenliği özelliği kullanılarak ek bir güç sarfiyatı oluşturmadan arıza akımı sınırlama görevini yerine getiren arıza akım sınırlayıcı tasarımının gerçekleştirilmesidir. Buna ek olarak, bu işlevi sağlayan tasarım boyutlarının mümkün olduğunca azaltılması için farklı fiziksel etkilerin eklenmesi ve iyileştirme çalışmaları tartışılmıştır.

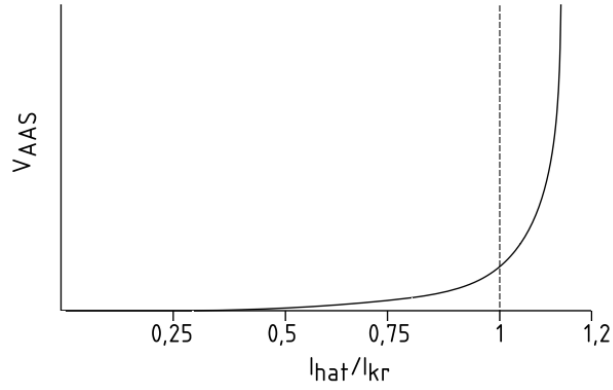


## 2. ARIZA AKIMI SINIRLAYICILAR (AAS)

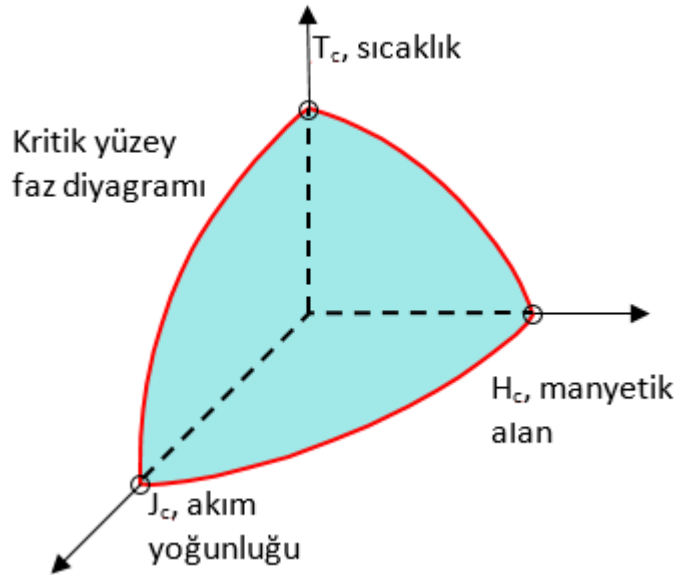
### 2.1 Süperiletken Arıza Akımı Sınırlayıcılar

Süperiletken arıza akımı sınırlayıcıları (SAAS) arıza akımını doğrudan sınırlandırmak veya doyuma ulaştırılabilir (saturated) demir nüvenin mıknatıslanma (magnetization) seviyesini etkilemek üzere doğru akım sapma akımını beslemek için süperiletken sarım kullanmaktadır. Son 20 yılda süperiletken malzemelerde büyük gelişmeler gerçekleşmiştir. 1986'da yüksek sıcaklık süperiletkenliğinin (YSS) keşfi birçok süperiletken cihazın ekonomik işletilmesi için potansiyel oluşturmuştur. Bu gelişmeler, YSS malzemelerinin sıvı Helyum sıcaklığı yerine 77 Kelvin olan sıvı Azot sıcaklığında süperiletken hale geçerek maliyeti daha düşük mühendislik uygulamalarına olanak tanımaktadır. Bir başka deyişle, süperiletken malzemenin yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesinin hem kurulum maliyeti açısından hem de işletme/bakımı maliyetlerinde önemli ölçüde düşüş beklenmektedir.

Süperiletkenlerin keşfinden ve yüksek oranda doğrusal-olmayan özelliklerinin fark edilmesinden bu yana süperiletkenleri arıza akımlarını sınırlamada kullanma fikri oluşmuştur. Süperiletken malzemelerin akımı sınırlama özelliği, soğutma sıcaklığına, uygulanan akıma ve manyetik alan değişimine verdikleri doğrusal olmayan tepkilere bağlıdır. Bunlar, süperiletkenin kritik parametreleri olup her hangi birinin kritik eşiği geçmesi durumunda malzemenin süperiletkenlikten normal iletkenlik haline geçmesine sebep olur. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, süperiletkenden akan akım ile direnç arasında doğrusal olmayan ilişki mevcuttur. Şebeke akımı ( $I_{hat}$ ) süperiletken malzemenin süperiletkenlik özelliğini yitirmeye başladığı kritik akım değerine yaklaşıp bu değeri geçtiğinde süperiletken malzemenin direnç değeri bir anda artış eğilimi göstermektedir. Süperiletken malzemenin üzerinden geçen akımın kritik akıma oranına bağlı direncinin gösterildiği bu eğri elde edilirken, süperiletken çalışmasını etkileyen diğer parametrelerden sıcaklık ve manyetik alan sabit bırakılmıştır. Gerçekte süperiletkenin soğutma sıcaklığına, manyetik alana ve akım yoğunluğuna bağlılığı Şekil 2.2'deki gibidir.



Şekil 2.1 : YSS elemanı üzerinden geçen akım değerine bağlı olarak gerilim düşümü değişimi.

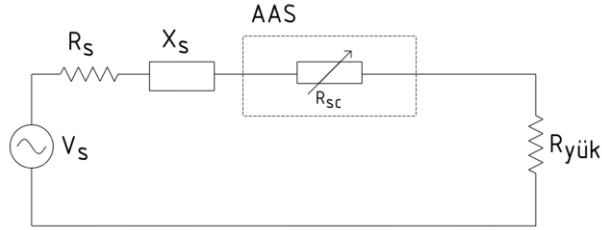


Şekil 2.2 : Süperiletkenin kritik parametrelerini içeren faz diyagramı.

Şekil 2.2’den de görüldüğü gibi süperiletken malzemenin arıza akımı sınırlayıcısında normal çalışma koşullarında kullanılabilmesi için süperiletken bölgede kalması gerekmektedir. Arıza akımı sınırlaması durumunda ise akım yoğunluğu, manyetik alan ve sıcaklık değerlerinden her hangi biri kendileri için mevcut kritik değerin üzerine çıkmaktadır. Tüm bu süperiletken arıza akımı sınırlayıcıları, üzerlerine düşen gerilimi arttırmak için “quench” geçişini kullanırken, her bir süperiletken direnç gösterir duruma geçtikten sonra arıza akımı sınırlandırma şeklini farklı yöntemlerle sağlamaktadırlar (EPRI Technology Watch 2009).

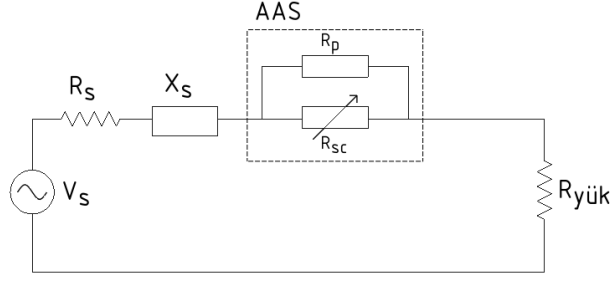
### 2.1.1 Direnç içeren süperiletken arıza akım sınırlayıcı

Şebekeye doğrudan bağlı yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanı Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Şebeke akımı arttıkça, süperiletken eleman üzerine düşen gerilim artmakta ve kritik akım değerinden sonra Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, YSS elemanı üzerine düşen gerilim, kritik akım değerinin üzerindeki birim akım artışına karşılık çok hızlı bir şekilde artmaktadır. YSS elemanı Noe ve diğ. (2003) ve Shimizu ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmalarda şebekeye Şekil 2.3'deki gibi bağlanmıştır.



Şekil 2.3 : Şebekeye doğrudan bağlı "direnç içeren" SAAS devre modeli.

Yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanı şebekeye doğrudan bağlanabildiği gibi, kendisine paralel olarak bağlı bir direnç üzerinden de bağlanabilmektedir. Böyle bir çalışmaya örnek Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şebeke akımı arttıkça, süperiletken elemanı üzerine düşen gerilim artmakta ve kritik akım değeri olarak adlandırılan akım değeri üzerinde akım, şönt direncini tercih etmeye başlamaktadır. Böylece şönt (paralel) direnç, süperiletken üzerine düşen gerilimi sınırlandırmaktadır. Şekil 2.1'deki eğri, süperiletken direnci üzerine düşen gerilimin şebeke akımının kritik akım oranına göre değişimini göstermektedir. Süperiletken, arıza akımını milisaniyeler içerisinde şönt empedansa transfer eden anahtar gibi davranmaktadır. Arıza akımı, değişken akımın ilk çevriminde (cycle) sınırlandırılmaktadır. Bununla birlikte, bazı direnç tipi süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarda, süperiletkene seri bağlı bir anahtar bulunmakta ve bu anahtar; akımın çoğu şönt dirence transfer edildikten sonra açılarak süperiletken üzerinde tepe sıcaklık değerlerinin oluşmasını önlemektedir ve böylece bir sonraki arızaya hazırlık (recovery) süresini de kısaltmaktadırlar (EPRI Technology Watch 2009).

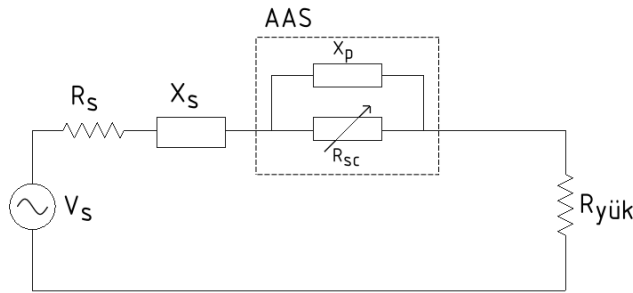


Şekil 2.4 : Paralel bağlı olduğu direnç üzerinden şebekeye bağlı “Direnç içeren” SAAS devre modeli.

### 2.1.2 Endüktif süperiletken arıza akım sınırlayıcı

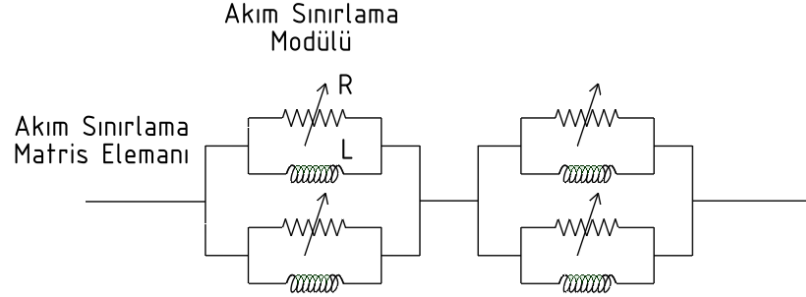
Endüktif arıza akımı sınırlayıcıları (EAAS), bir bobin ve bu bobine paralel bağlı olan yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanından oluşmaktadır. Normal çalışma durumunda, şebeke akımının tepe değeri, YSS elemanın kritik akım değerinden düşük olması sebebiyle, süperiletken üzerinde gerilim düşümü olmamakta ve böylelikle  $I^2R$  kaybı oluşmamakta ve sonuç olarak arıza akım sınırlayıcı şebekeye “görünmez” hale gelmektedir. Arıza akımı durumunda ise, akım değerinin süperiletken kritik akım değerini aşması sebebiyle, “quench” hadisesi meydana gelmekte ve süperiletken yüksek direnç moduna geçmektedir. Bu durumda akımın büyük bir kısmı, paralel bağlı olan bobine aktarılmakta ve bobin üzerinden akım sınırlaması yapılmaktadır (Kovalsky, 2005).

Süperiletken elemana paralel bağlı olan sadece endüktif eleman olması yönüyle bu tasarım; direnç tipi süperiletken arıza akımı sınırlayıcıdan ayrılmaktadır (Kovalsky, 2005). Şekil 2.5’de gösterilen arıza akım sınırlayıcının pratikte şebekeye uygulanması matris şeklinde bağlantı ve dizilim gerektirdiğinden ötürü AAS matrisi ortaya çıkmıştır. Şekil 2.5, bu bağlantı ve dizilimin basit bir gösterimini oluşturmaktadır.



Şekil 2.5 : Endüktif Arıza Akım Sınırlayıcısı.

Şekil 2.6’da ise, birbirine seri bağlı iki adet akım sınırlama modülünü göstermektedir. Her bir modül, birbirine paralel bağlı en az iki adet akım sınırlayıcı matris elemanı içermektedir (Yuan ve diğ, 2005).

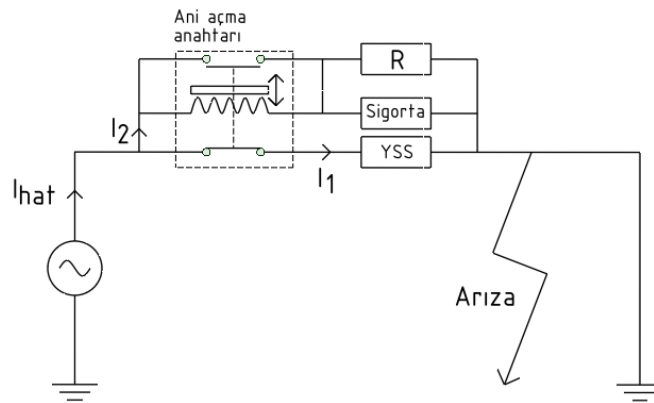


Şekil 2.6 : Arıza Akım Sınırlama Matrisi.

### 2.1.3 Anahtarlamalı süperiletken arıza akım sınırlayıcı

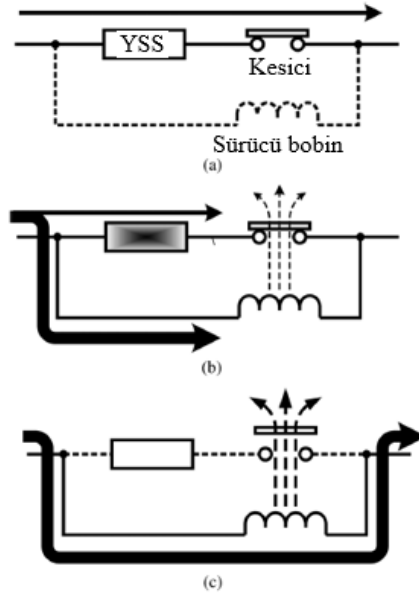
#### 2.1.3.1 Hibrit anahtarlamalı süperiletken arıza akım sınırlayıcı

Süperiletken modül içeren hibrit süperiletken arıza akım sınırlayıcılar, hızlı açma yapabilen anahtar ve akım sınırlayıcı dirençleri içermektedir. Şekil 2.7’de devre şeması verilen bu tip arıza akım sınırlayıcılarda süper iletken malzeme; akımı sınırlayıcı görev görmek yerine, arıza akımını algılama ve arıza akımının paralel hatta geçişini sağlayıcı ortam görevi görmektedir. Böylece, süperiletken kullanım miktarı büyük ölçüde azalmış ve bunun sonucunda, soğutma sistem kapasitesi azaltılabilmektedir (Lee ve diğ, 2008a).



Şekil 2.7 : Süperiletken modül içeren hibrit arıza akım sınırlayıcı (Lee ve diğ, 2008a).

Şekil 2.8’de, Şekil 2.7’de gösterilen anahtarın arıza akımı durumunda ani bir şekilde açmasını sağlayan komütasyon işlemi gösterilmektedir. Normal çalışma durumunda, tüm akım süperiletken ve ona seri bağlı kesici anahtar üzerinden akmaktadır. Arıza akımı durumunda, arıza akımı süperiletken üzerinden akmakta ve bu malzemeyi “quench” moduna sokmaktadır. "Quench" moduna giren süperiletken, arıza akımını ani açma anahtarı içerisindeki kontağın açması için gerekli olan manyetik kuvveti sağlama görevi bulunan bobinin bulunduğu paralel hatta aktarmak için yeteri kadar direnç üretmektedir. Süperiletken malzemenin direncinin yüksek olması sonucunda paralel hat üzerindeki sürücü bobini üzerine transfer edilen arıza akımı, bobin üzerinde yüksek miktarda manyetik alan üretmekte ve bu alan, ani açma anahtarının kontaklarını çok hızlı bir şekilde süperiletken hattından ayırmaktadır. Arıza akımının süperiletken hat üzerinden paralel hatta transfer edilmesi yani komütasyon toplamda birkaç ms’den daha az sürmektedir. Komütasyon işleminden sonra süperiletkene seri bağlı ani açma anahtarı açık kalmakta ve arıza akımı geleneksel yol olarak bilinen güç sigortası ve direnç ile sınırlandırılmaktadır (Lee ve diğ, 2008b).



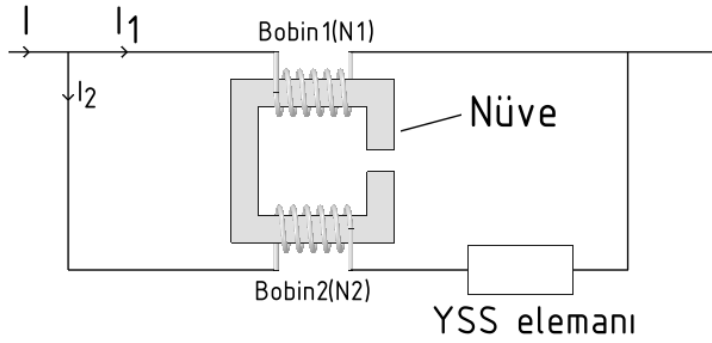
Şekil 2.8 : Hibrit arıza akımı sınırlayıcıda arıza akımının paralel hatta transferi ve açma kontağının açması işlemlerinin gösterimi (Lee ve diğ, 2008b).

#### 2.1.4 Akı-kilitleme tipi süperiletken arıza akımı sınırlayıcı

Yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanının maruz kaldığı güç yükünü hafifletmek için akı-kilitleme prensibi ele alınan yöntemlerden biridir. Buna ek olarak, akı-

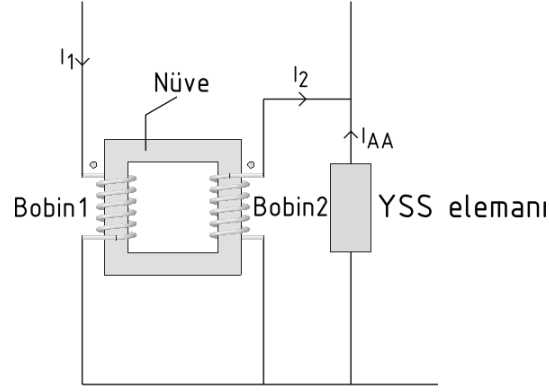
kilitlemeyi sağlayan ve aynı nüve üzerine sarılı bobinlerin sarım oranları ve/veya sarım yönleri değiştirilerek sınırlayıcı empedans ve işletme akımı değeri ayarlanabilmektedir (Lim, 2007).

Akı-kilitleme prensibini kullanan tasarımlardan ilki, aynı nüve üzerine sarılı ve birbirine paralel bağlı sarımlar (bobin 1 ve bobin 2) sırasıyla  $N_1$  ve  $N_2$  sarım sayısına sahiptir. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanı ikinci sarıma seri bağlıdır. Normal şebeke çalışması durumunda, iki sarımın sarım sayıları ve üzerlerinden geçen akım değeri; ürettikleri manyetik akı değerleri birbirlerini yok edecek şekilde belirlenir (Zhao ve diğ, 2014). Arıza akımı oluştuğunda, YSS elemanının “quench” moduna girmesi sonucunda direncinin artmasından ötürü ikinci sarım üzerinden geçen akımın azalmasıyla nüve üzerinde birinci sarımın üretmiş olduğu manyetik akı üstün gelir ve böylece ikinci sarımın endüktansı artmaya başlar.



Şekil 2.9 : Temel akı-kilitleme tipi SAAS konfigürasyonu.

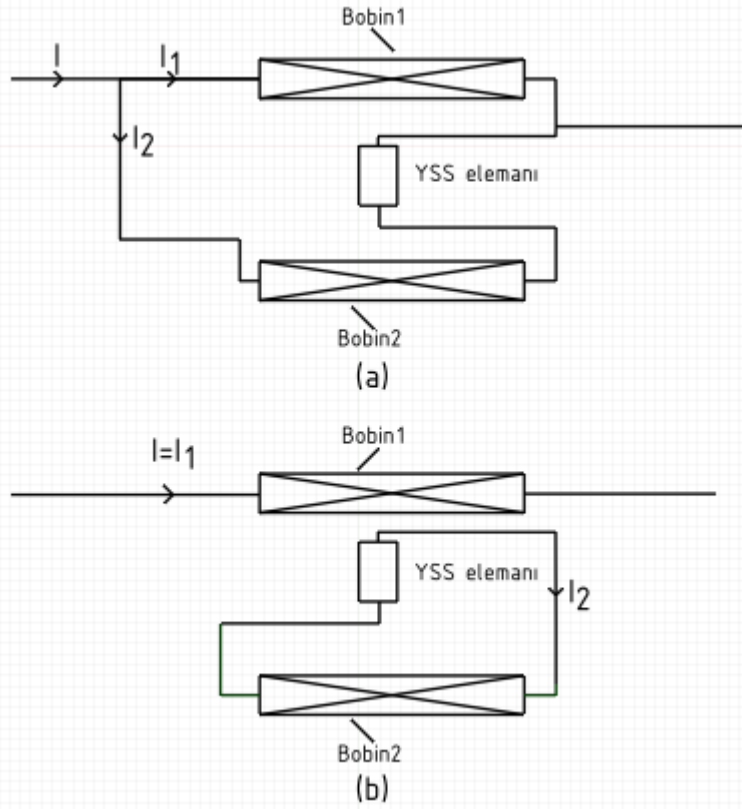
Sarımların birbirine seri bağlı olduğu başka bir tasarım ise Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanı ikinci sarıma paralel bağlıdır. Temel çalışma karakteristikleri, sarımların birbirine paralel bağlı olduğu Şekil 2.9’daki tasarım ile aynıdır (Lim ve diğ, 2004a ve 2004b). Normal çalışma durumunda, YSS elemanının direnci sıfır olduğundan ikinci sarımın gerilimi de sıfırdır. Aynı zamanda, iki sarımın üretmiş olduğu manyetik akı değerleri birbirini yok ettiği için birinci sarım üzerindeki gerilim de sıfırdır. Böylece sınırlama empedans değeri sıfırlanmış olur (Lim, 2007).



Şekil 2.10 : Sarımların birbirlerine seri bağlı olduğu akı-kilitleme tipi SAAS.

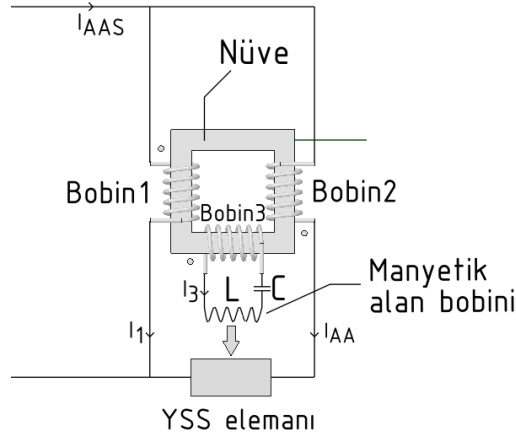
Bununla birlikte, yukarıda ifade edilen arıza akımı sınırlayıcılara ek olarak hava nüveli çalışmalar da mevcuttur. Bu tasarımlara örnek olarak, Shimizu ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışma verilebilir. Bu çalışmalarda paralel ve transformatör tipi olmak üzere iki tip mevcuttur. Paralel tipte ikinci bobin yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanı üzerinden birinci bobine paralel olarak bağlanmıştır. Normal çalışmada, süperiletken üzerinden geçen akımı “quench” olayının gerçekleştiği kritik akımından düşük olduğu için, süperiletken direnci sıfıra yakındır. Bu durumda, her iki bobin (bobin 1 ve bobin 2) paralel bağlıdır ve birbirlerinin ürettikleri manyetik akıları yok ederler (Şekil 2.11a). Bundan ötürü, bobinler üzerinde herhangi bir gerilim oluşmaz ve empedansları sıfıra yakındır. Arıza akımı oluştuğunda ise, arıza akımı süperiletkenin kritik akımını ( $I_c$ ) aştığı için YSS elemanı direnç üretir. Bunun sonucunda daha az dirençli olan birinci bobinden ikinci bobine göre daha yüksek miktarda akım akmaya başlar ve böylelikle, birinci bobinin ürettiği manyetik akının baskın çıkması neticesinde, manyetik akı sıfırlaması sona erer. Bunun sonucunda, sınırlama empedansı üretilmiş olur ve arıza akımı sınırlanmış olur (Shimizu ve diğ, 2004; Matsumura ve diğ, 2003).

Transformatör tipi arızalı akım sınırlamada ise (Şekil 2.11b), bobinlerin manyetik açıdan dizilişi aynı olmakla birlikte, elektriksel bağlantı açısından farklılık mevcuttur. Bu çeşitte, birinci bobin güç sistemine bağlı iken, ikinci bobin süperiletkene bağlıdır. Çalışma prensibi paralel tip ile aynıdır (Shimizu ve diğ, 2004; Hatta ve diğ, 2003)



Şekil 2.11 : Hava nüveli akı-kilitleme tipi Süperiletken AAS (a) Paralel tip, (b) Transformatör tipi.

Yukarıda ifade edilen çalışmalara ek olarak, seri rezonans kullanılan akı-kilitleme tipi SAAS'lar Lim ve diğ. (2004a) tarafından sunulmuştur. Arıza akımı durumunda, yüksek sıcaklık süperiletkenliği elemanın direncinin hızlı bir şekilde artışı sağlamak amacıyla bu eleman üzerine manyetik alan etkileyen sarımın üretmiş olduğu manyetik alanı ani bir şekilde arttırması amacıyla rezonans prensibi kullanılmıştır (Lim ve diğ, 2004a). Bu rezonans, Şekil 2.12'de görüldüğü gibi YSS elemanına etkileyen manyetik alanı üreten manyetik alan sarımına seri olarak kapasitör bağlanarak elde edilir.



Şekil 2.12 : Seri Rezonans yöntemi kullanılan akı-kilitleme tipi SAAS.

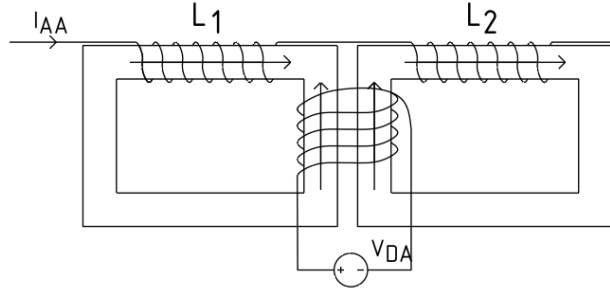
### 2.1.5 Doymuş nüveli süperiletken arıza akımı sınırlayıcı

Doymuş nüveli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılar (DNSAAS), manyetik nüvenin doğrusal olmayan davranışından yararlanmaktadırlar (Knott ve Moscrop, 2014).

Direnç içeren ve korunaklı nüveli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılardan farklı olarak, doymuş nüveli süperiletken arıza akımı sınırlayıcılarda süperiletken malzeme, “quench” geçişine maruz kalmamaktadır. Bu yönüyle, geri dönüşüm gerektirmeden ardı ardına birkaç arıza akımını başarıyla sınırlama özelliği bulunmaktadır (EPRI Technology Watch 2009).

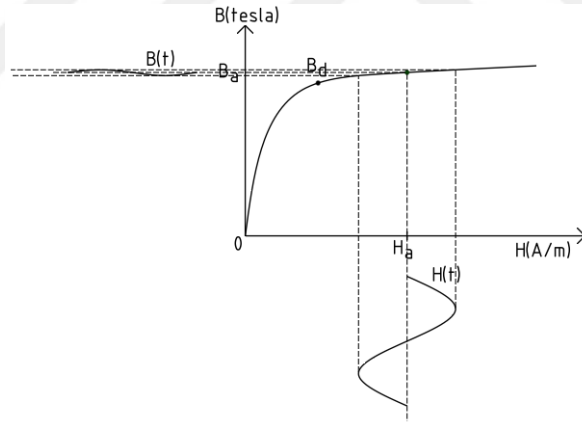
Doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı, temelde iki adet nüve, bu nüvelere sarılı şebeke kaynaklı alternatif akım (AA) ile ikaz edilen iki adet bobin ve yine bu nüvelere sarılı doğru akım ile ikaz edilen en az bir adet bobin ve bu bobine DA sağlayan DA kaynağından oluşur. AA ile ikaz edilen iki adet bobin, birbirlerine elektriksel olarak seri bağlanmanın yanı sıra ayrı nüvelere sarılmışlardır ve elektrik akımı herhangi bir çevrimde iken nüvelerde birbirlerine göre aynı yönde manyetik akı üretirler. Bu örnekteki DA ile ikaz edilen bobin ise nüvelerde birbirlerine göre ters yönde manyetik akı üretir (Şekil 2.13). DA ikazlı bobin, normal şebeke çalışmasında nüvenin doymasına sebep olurken, pozitif çevrimde soldaki nüveye bağlı olan AA ikazlı bobinin ( $L_1$ ) ürettiği manyetik akı yönü DA ikazlı bobininkine zıt olması sebebiyle doyumdan çıkarmaya çalışırken diğer AA ikazlı bobin ( $L_2$ ), DA ikazlı bobini destekleyecek yönde manyetik akı oluşturur. Negatif şebeke akım çevriminde ise tam tersi gerçekleşir. Normal çalışma durumunda AA ikazlı bobinlerden geçen akım

değeri, DA ikazlı bobinin sebep olduğu doyum modundan nüveyi çıkaracak büyüklükte olmadığı için nüveler doyumda çalışmasına devam eder.



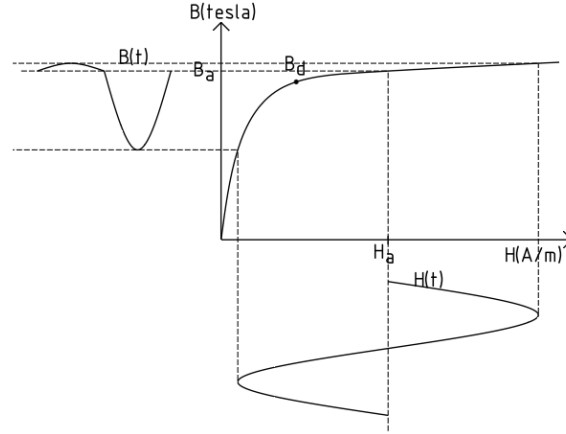
Şekil 2.13 : Doymuş nüveli AAS kavramsal diyagramı (Vilhena ve diğ, 2015).

Şebekenin normal çalışma durumunda, sürekli mıknatıs mıknatıslık değeri veya doğru akım ikaz bobininin ikaz değeri, ferromanyetik nüveyi doyum bölgesinde çalıştıracak miktarda ayarlanır (Şekil 2.14). Böylece, şebeke alternatif akım değeri, nüveyi doyumdan çıkaracak genliğe sahip olmadığından dolayı nüve, doyum bölgesinde çalışmayı sürdürecektir.



Şekil 2.14 : Normal çalışma durumunda doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı nüvesi *B-H* eğrisi.

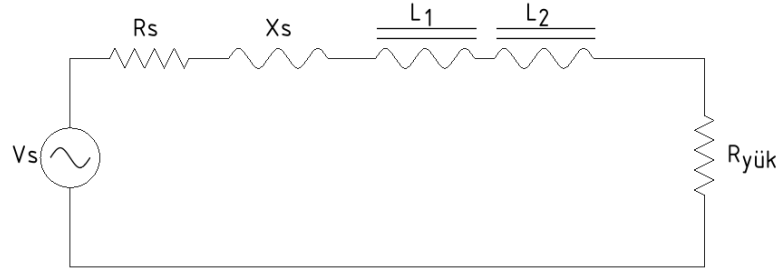
Arıza akımı meydana geldiğinde ise, Şekil 2.15'te görüldüğü üzere, şebeke alternatif akımı ferromanyetik nüveyi doyum bölgesinden çıkararak, bu nüveye sarılı bobin üzerinde yüksek gerilim düşümü oluşmasına sebep olur. Bu gerilim düşümü artışı, akım artışını yavaşlatmakla birlikte, arıza akımını sınırlama görevi görmektedir (Xin ve diğ, 2014).



Şekil 2.15 : Arıza akımı durumunda doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı nüvesi  $B-H$  eğrisi.

Şekil 2.14 ve 2.15'ten anlaşılacağı üzere, doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcı sahip olduğu bobinin içerisinde yer alan nüvenin  $B-H$  eğrisine bağlı olarak değişen endüktans değerine sahip bir bobin gibi çalışır (Moriconi ve diğ, 2010). Bu arıza akım sınırlayıcı çeşidi, yüksek oranda doğrusal olmayan bir manyetik geçirgenliğe sahip olan manyetik nüve içerir. Öyle ki; bunun sonucunda, içerisinde böyle bir nüveye sahip alternatif akım ikazlı bobin, normal çalışma koşullarında, düşük empedansa sahip iken, arıza akımı oluştuğunda görece olarak yüksek empedans oluşturur. Böylece arıza akımı sınırlandırılmış olur. Normal çalışma durumlarında, düşük empedansın oluşması için, AA ikazlı bobinden geçen AA'nın genliği, ferromanyetik nüveyi doyum modundan çıkarmaya yetmemelidir. Böylelikle, cihazın empedansı düşük ve nüvesi havadan oluşan bir bobinin empedansına eşit olmaktadır. Arıza akımı durumunda, AA ikazlı bobin üzerindeki akımın artışı, ferromanyetik nüve malzemesini doyumdan çıkararak, manyetik nüve geçirgenliğinde ( $\mu$ ) artışa sebep olmakta ve böylelikle bobin empedansını arttırmaktadır (Knott ve Moscrop, 2013).

Şekil 2.16'da doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcının şebekeye elektriksel olarak bağlantı şeması verilmiştir. Görüldüğü üzere, şebeke kaynaklı alternatif akım ile ikaz edilen iki adet bobin ( $L_1$  ve  $L_2$ ) şebekeye seri olarak bağlanmıştır.



Şekil 2.16 : Doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcının şebekeye elektriksel olarak bağlantı şeması.

## 2.2 Süperiletken Olmayan Arıza Akımı Sınırlayıcılar

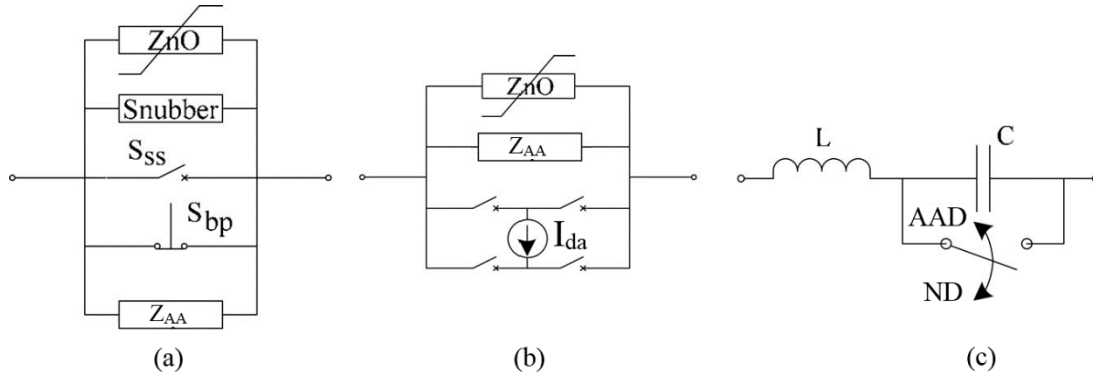
### 2.2.1 Anahtarlama arıza akım sınırlayıcı

#### 2.2.1.1 Katı-hal anahtarlama arıza akım sınırlayıcı

Katı-hal arıza akımı sınırlayıcıları arıza akımı oluştuğunda şebekedeki akımı yüksek empedanslı akım koluna transfer etmek için güç elektroniği kullanılır. Bu arıza akımı sınırlayıcıları diğer AAS'ların hiçbirisinin sunmadığı ek kontrol olanağı kazandırmaktadır. Bununla birlikte, küçük boyutlara sığdırılabilmeleri başka bir avantaj oluşturmaktadır. Bu tip AAS'ların üzerinde durulması gereken hususlar; anahtarlama elektroniğinin arıza akımı seviyesini ölçme ve buna uygun tepki verme güvenilirliği ve anahtarlamanın doğasından kaynaklanan akımı dalga şekline uğrattığı şekil bozukluğu gelmektedir (EPRI Technology Watch 2009).

Şekil 2.17a'da görülmekte olan seri anahtarlama tipi arıza akım sınırlayıcı iki yönlü kontrollü yarı iletken anahtar  $S_{ss}$  ve baypas devresinden oluşmaktadır. Baypas devresi, normal şebeke çalışması baypası ( $S_{bp}$ ), arızalı akım durumu baypası ( $Z_{AA}$ ), aşırı gerilim koruma baypası (ZnO) ve snubber devresinden oluşmaktadır. Normal durum baypası ( $S_{bp}$ ), genellikle elektromekanik anahtar içermekte ve görevi; normal şebeke çalışmasında, yarı iletken anahtar kayıpları ve dalga şekli bozulmasını önlemek amacıyla düşük direnç yolu oluşturmaktır.  $Z_{AA}$ 'nın görevi ise, arıza akımı oluştuğunda yarı iletken anahtarın açılması sonucunda akımın kesintiye uğramasını önlemek ve koruma sisteminin gerekli koruma hiyerarşisini yerine getirmesine ortam hazırlamaktır.  $Z_{AA}$  olarak endüktif veya rezistif eleman kullanılabilir. ZnO ise, yarı iletken anahtar açıldığında bu anahtar üzerine düşen gerilimi sınırlandırarak aşırı akımın geçeceği alternatif bir yol oluşturma işlevini görür.  $S_{bp}$  ve  $Z_{AA}$  tercihe dayalı

iken, ZnO'nun bu tip bir anahtarlama kullanılması bir zorunluluktur. Son olarak "snubber" devresi ise, yarı iletken elemanın açması esnasında üzerinde oluşan gerilim artışını sınırlandırmaktadır (Abramovitz ve Smedley, 2012).



Şekil 2.17 : Genel katı-hal anahtarlama topolojileri. (a) Seri anahtarlama tipi, (b) Köprü tipi, (c) Rezonans tipi (Abramovitz ve Smedley, 2012).

Köprü tipi anahtarlama (Şekil 2.17b), diyot kullanılabileceği gibi tristör de kullanılabilir. Bu tip anahtarlamalarda normal durum baypası bulunmaz iken, arıza durumu baypasının kullanılması tercih edilebilir ve aşırı gerilim koruma baypasının kullanılması zorunludur. Normal durumda, şebeke akımının çevrimine göre çapraz köprü elemanları "kapalı" konumdadır (Şekil 2.17b). Köprü tipi anahtarlama; köprü elemanlarının ortasında doğru akım kaynağı kullanılması prensibine göre çalışır.

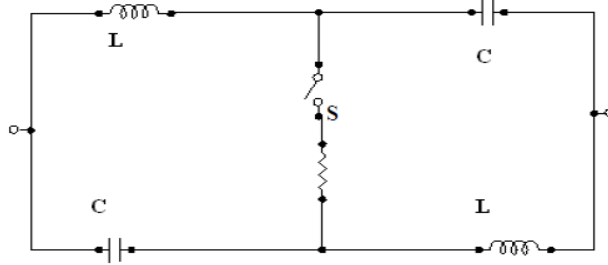
Rezonans tipi anahtarlama ise (Şekil 2.17c), normal şebeke çalışması durumunda seri tank devresi gibi çalışmaktadır. Normal çalışma durumunda şebekeye sıfıra yakın empedans göstermek için bu tip anahtarlamalarda indüktans ve kapasite değerleri, rezonans frekansı şebeke frekansına eşit olacak şekilde seçilmektedir. Arıza akımı durumunda ise, kapasite elemanına paralel bağlı olan anahtar kapanmak suretiyle arızalı akımın sadece indüktans elemanını görmesi sağlanarak arıza akımı sınırlandırılmış olmaktadır (Abramovitz ve Smedley, 2012).

### 2.2.1.2 Mekanik anahtarlama arıza akımı sınırlayıcı

Mekanik anahtarlama arıza akımı sınırlama yönteminde akım, anahtarın açılmasıyla bu anahtara paralel bağlı olan çok yüksek empedansa sahip elemanın üzerinden akmaya zorlanır.



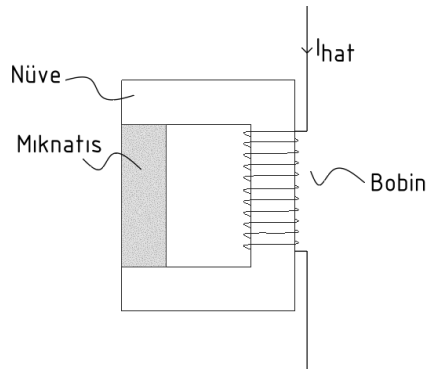
şebekeye toplamda minimum empedans göstermektedirler. Arıza akımı oluştuğunda S anahtarının kapanması sonucu rezonans bozulmakta ve S anahtarına seri bağlı direnç de hesaba katıldığında empedans artmaktadır. Böylece arıza akımı sınırlanmaktadır (Tahiliani ve Porter, 1980).



Şekil 2.19 : Rezonans tipi anahtarlama arıza akım sınırlayıcı (Tahiliani ve Porter, 1980).

### 2.2.2 Manyetikliği giderilmiş mıknatıslı arıza akım sınırlayıcı

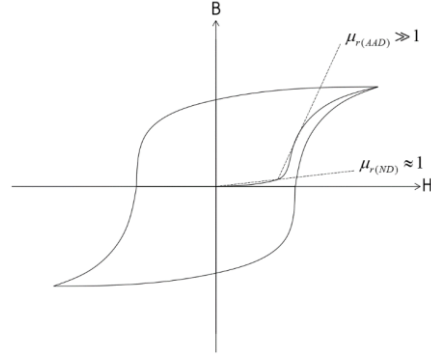
Şekil 2.20’de görüldüğü gibi, manyetikliği giderilmiş mıknatıslı arıza akımı sınırlayıcı, hava boşluğunda mıknatıs malzemesi olan C şeklindeki ferromanyetik nüveden oluşmaktadır (Chong ve diğ, 2006). Şebekeye bağlı olan bobin, nüveye sarılmış durumdadır.



Şekil 2.20 : Manyetikliği giderilmiş mıknatıslı AAS.

Normal şebeke çalışmasında, mıknatıs malzemesi manyetikliğini yitirmiş durumdadır. Bu durumda, manyetik geçirgenliği ( $\mu_{r(ND)}$ ) havaninkine yakındır ve böylelikle nüve-mıknatıs birleşimine sarılı bobinin endüktansı düşük olmaktadır (Şekil 2.21). Arıza akımı oluştuğunda ise; arıza akımı, mıknatıs zorlayıcı alan şiddetinin ötesine taşıdığından ötürü mıknatıs mıknatıslanmış (magnetized) olup, manyetik geçirgenliği

$(\mu_{r(AAD)})$  artmaktadır. Böylelikle arıza akımı sınırlandırılmaktadır (Chong ve diğ, 2006).



Şekil 2.21 : Mıknatıs  $B-H$  eğrisi.



### **3. ARIZA AKIMI SINIRLAMA TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Arıza akımı sınırlayıcı teknolojileri genel olarak Şekil 1.4'te görüldüğü üzere üç çalışma bölgesine sahiptir:

- Normal çalışma durumu,
- Arıza akımı durumu,
- Bir sonraki arızaya hazırlık aşaması

Daha önce de belirtildiği gibi arıza akım sınırlayıcılarından normal çalışma esnasında ideal olarak sıfır empedans, arıza durumunda ise yeterli büyüklükte empedans göstermeleri beklenir. Bunun yanında, arıza akım sınırlayıcılarının etkin olabilmesi için arıza durumunu belirlemede çok hızlı olmaları da karşılaştırma açısından önemli bir parametredir. Arızanın giderilmesinden hemen sonra ise normal çalışma koşullarına dönülebilmesi cihazın ne derece düzgün çalışma karakteristiğine sahip olmasının bir göstergesidir. Aşağıda verilen Çizelge 3.1'de arıza akımı sınırlayıcılarının karakteristiklerini ve açıklamaları açısından yeterli bir değerlendirme oluşturmaktadır.

Çizelge 3.1 : Açıklamaları ile birlikte arıza akımı sınırlayıcı karakteristikleri.

Karakteristik	Açıklama
Kayıplar	Normal çalışma durumunda tüketilen enerji miktarını belirtir.
Şebeke tarafından görünmezlik	Normal çalışma durumunda şebeke tarafından görülen empedans değerini belirtir.
Tetikleme	Arıza akımına karşı sınırlama tepkisinin başlama yöntemini anlatır. Aktif arıza akımı sınırlayıcıları sınırlama tepkisinin başlaması için sensör ve kontrol devreleri kullanırken, pasif arıza akımı sınırlayıcıları artan akım ile birlikte malzeme karakteristiğinde değişim meydana getirirler.
Bir sonraki arızaya hazırlık	Arıza akımı sınırlama durumundan, başka bir arıza akımı başlangıcına hazır hale gelene kadar geçen süre. Bazı süperiletken arıza akımı sınırlama yöntemlerinde yüksek sıcaklık süperiletkenliği malzemesini yeniden soğutmak için belirli bir süre gerekmektedir.
Boyut / Ağırlık	Sınırlayıcının fiziksel boyut ve ağırlığını belirtir.
Sinyal Bozulması	Alternatif akım dalga şeklinde, anahtarlama elektroniği ve manyetik nüvenin doğrusal olmayan manyetik karakteristikleri sebebiyle, bozulmalara işaret etmektedir. Sinyal bozulması konusu, arıza akımını sınırlama esnasında koruma cihazlarının performanslarını etkilemesi açısından önemlidir.

Çizelge 3.1’de arıza akım sınırlayıcıların tümünün sahip olacakları tipik karakteristik özellikler tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan yola çıkılarak Çizelge 3.2’de arıza akım sınırlayıcıların bu karakteristiklerin ne ölçüde olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.2 : AAS teknolojilerinin Genel karakteristiklerinin karşılaştırılması (EPRI Technology Watch 2009).

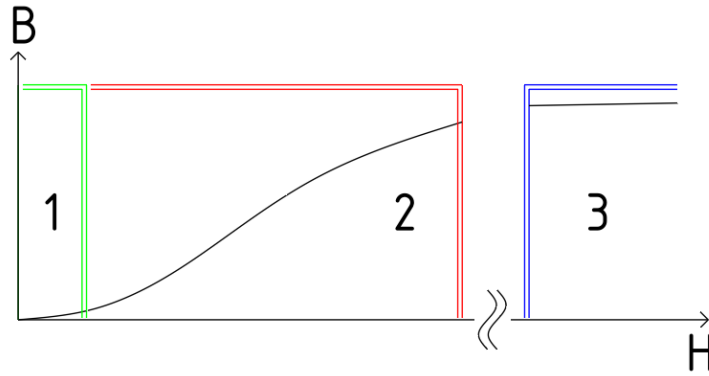
Teknoloji	Kayıplar	Tetikleme	Geri dönüşüm	Boyut / Ağırlık	Sinyal Bozulması
Sadece dirençli	Histeretik (YSS'den dolayı)	Pasif	YSS tekrar soğutulmalıdır YSS'de daha az enerji	Küçüktür	Sadece ilk sinyal periyodunda
Hibrit Dirençli SAAS	Histeretik (YSS'den dolayı)	Pasif veya Aktif	depolandığı için sadece dirençli SAAS'den daha hızlıdır	Küçüktür fakat boyutu artıran ek sistemler gerektirebilir	Sadece ilk sinyal periyodunda
Doymuş Nüveli SAAS	Demir nüvenin doyumu için sargıda gerekli DC güç Joule kayıpları oluşturur	Pasif	Anında	Demir nüveden ve sargılardan ötürü büyük ve ağırdır	Doğrusal olmayan manyetik özellikten ötürü sinyalde bozulma görülür
Korunaklı Nüveli SAAS	Histeretik (YSS'den dolayı)	Pasif	Sadece dirençli SAAS'den daha hızlı olmakla birlikte soğutma gerektirir.	Demir nüveden ve sargılardan ötürü büyük ve ağırdır	Sadece ilk sinyal periyodunda
Katı-Hal SAAS	Histeretik (YSS'den dolayı)	Aktif	Anında	Sadece dirençli AAS'ye benzer	Anahtarlama görevi gören elektronik elemanlar harmoniğe sebep olur



#### 4. BAŞLANGIÇ GEÇİRGENLİĞİ DÜŞÜK NÜVELİ ARIZA AKIMI SINIRLAYICI TASARIMI

Bu çalışmada başlangıç manyetik geçirgenliği; manyetik akı yoğunluk değerinin 0.1 T olana kadarki manyetik geçirgenlik olarak tarif edilmiştir. Başlangıç manyetik geçirgenliği genellikle bağıl olarak ifade edilir. Bağıl manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) mutlak manyetik geçirgenliğin ( $\mu$ ) boşluğun manyetik geçirgenliğine ( $\mu_0$ ) oranı olması sebebiyle birimsiz olarak ifade edilir. Mutlak manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ), manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) ve manyetik alan şiddeti ( $H$ ) arasındaki ilişki denklem 4.1 ile belirlenir ve Şekil 4.1 ile verilen yaklaşık bir grafikte ifade edilir.

$$B = \mu H \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 : Manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) ile manyetik alan şiddeti ( $H$ ) arasındaki ilişkinin birbirine bağlılığı ve bölgeler.

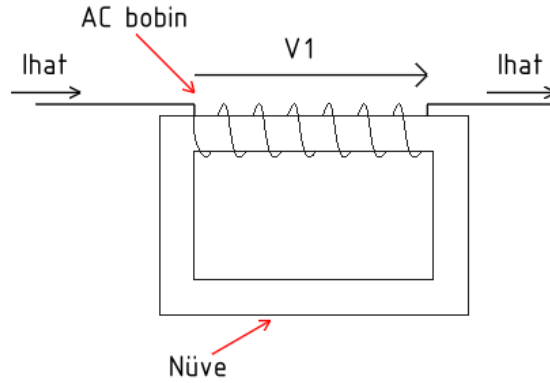
Tasarlanması düşünülen arıza akım sınırlayıcısının içereceği manyetik nüvede manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, üç bölgede incelenebilir:

1. Başlangıç manyetik geçirgenlik bölgesi,
2. Manyetik geçirgenliğin yüksek (doymamış) olduğu bölge,
3. Manyetik akının doyuma ulaştığı bölge.

Şekil 4.1’de düşük karbonlu çelik-1020 ve paslanmaz çelik-416 gibi nüve malzemelerinin sahip olduğu  $B-H$  eğrisine benzer bir eğri verilmiştir. Bu egride 1. bölge; başlangıç geçirgenlik bölgesidir. Başlangıç geçirgenliği düşük nüveli arıza akımı sınırlayıcıda, şebeke normal çalışması durumunda (arıza yok iken) şebeke akımı nüveyi 1. bölge içerisinde tutmaktadır. Arıza meydana geldiğinde ise, artan şebeke hat akımından ötürü nüve, manyetik geçirgenliğin yüksek olduğu 2. bölgeye girmektedir. İkinci bölgeye giren nüve, birim zamanda birim akım artışına karşı gerilim düşümünü ani bir şekilde arttırır. Bu gerilim düşümü artışı, kaynak gerilimine zıt yönde olması sebebiyle şebeke hat akımını sınırlandırıcı özelliğindedir.

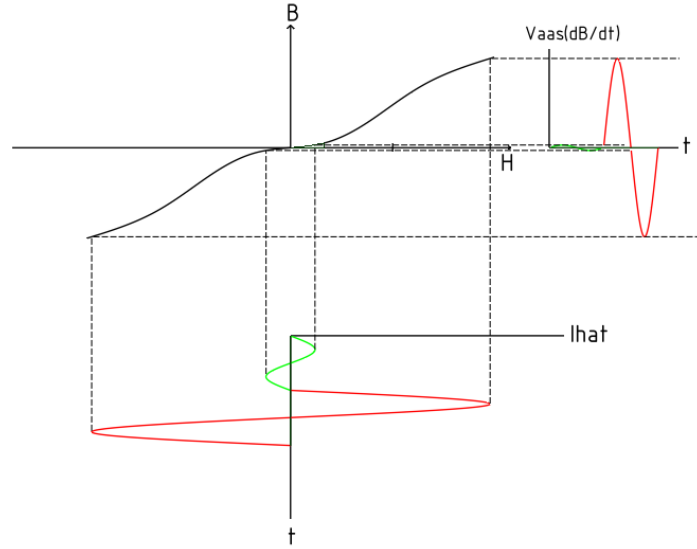
Arıza akımının çok fazla artması sebebiyle nüvenin 3. bölgesi olarak gösterilen doyum bölgesine girmesi, sarım endüktansının azalmaya başlaması ile birlikte, gerilim düşümünün artışının yavaşlamasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, arıza akımı sınırlandırıcı, doyum bölgesinde sınırlandırma işlevini icra etmeye devam etmektedir.

Başlangıç geçirgenliği düşük nüveli arıza akımı sınırlayıcı tasarımımızın basitleştirilmiş gösterimi ve şebeke bağlantısı Şekil 4.2’de görülmektedir. Görüldüğü üzere, söz konusu AAS manyetik olarak gövdesinde kapalı nüve olan ve elektriki olarak şebekeye seri bağlanan bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.2 : Başlangıç geçirgenliği düşük nüveli AAS adını verdiğimiz birinci çalışma bölgesinde çalışması tasarlanan tasarım.

Şekil 4.3’te ise, normal şebeke çalışması ve arıza akımı durumuna bağlı olarak şebeke akımının değişimi ve bu değişiminin arıza akımı sınırlayıcı üzerinde endüklenen gerilim değişimi gösterilmektedir.



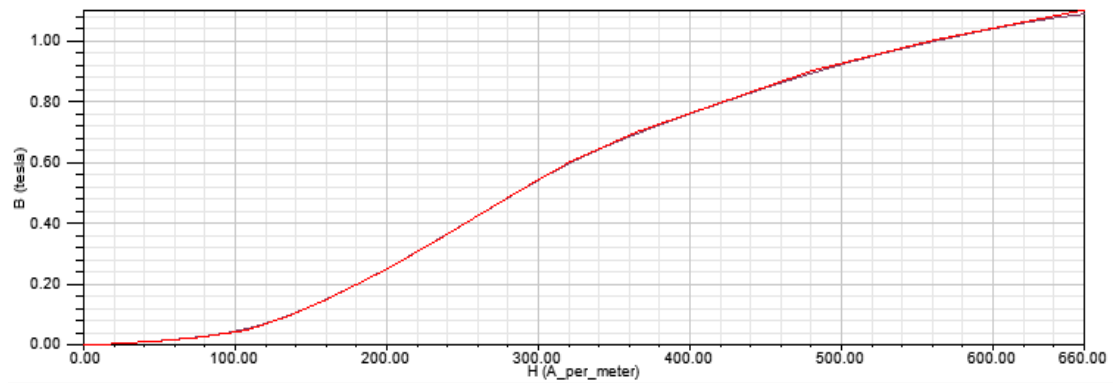
Şekil 4.3 : Birinci çalışma bölgesinde çalışan arıza akımı sınırlayıcının arıza akımı durumunda gerilim düşümü.

#### 4.1 Kullanılan Malzemeler

Arıza akım sınırlayıcı tasarımında kullanılacak olan manyetik nüve için düşük karbonlu çelik, bobin için ise bakır tel kullanılmıştır. Düşük karbonlu çelik SAE 1020, AISI 1020 ya da yalnızca 1020 koduyla isimlendirilmektedir.

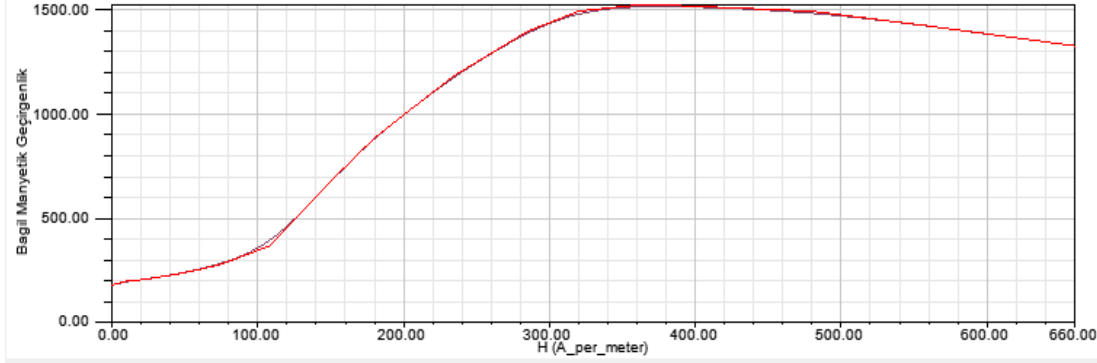
##### 4.1.1 Düşük karbonlu çelik SAE 1020

Magweb sitesinden sağlanan veriler ile düşük karbonlu çelik SAE 1020 nüve malzemesinin manyetik alan şiddetine ( $H$ ) göre manyetik akı yoğunluğunun ( $B$ ) ve bağıl manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir (Url-1, 2016).



Şekil 4.4 : Düşük karbonlu çelik SAE 1020  $B-H$  eğrisi.

Arıza akımı sınırlayıcının sahip olduğu endüktans ve böylelikle reaktansın değişimini doğrudan anlamamıza yardımcı olacak olan, manyetik alan yoğunluğuna ( $H$ ) bağlı değişen bağıl geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değeri Şekil 4.4'ten elde edildiği şekliyle Şekil 4.5'teki gibidir.



Şekil 4.5 : Düşük karbonlu çelik SAE 1020  $\mu_r$ - $H$  eğrisi.

Görüldüğü üzere, manyetik alan şiddeti 75 A/m değerine kadar bağıl manyetik geçirgenlik oldukça düşük kalmakta olup 280 değerine kadar çıkmakta iken, 75 A/m değerinden sonra hızlı bir şekilde artmaktadır.

## 4.2 Tasarım Parametreleri ve Modelleme

### 4.2.1 Tasarım parametrelerinin hesaplanması

Tasarım parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan kısıtlar şunlardır:

1. Gerilim düşümü kısıtı:

Gerilim düşümü değeri, kaynak geriliminin %5'ini aşmamalıdır. Buna göre;

$$V_{gd} \leq 0.05V_s \quad (4.2)$$

Arıza akımı sınırlayıcının üzerine düşen gerilim ise şebekenin normal çalışma akımı ( $I_{normal}$ ) ile arıza akımı sınırlayıcı reaktansının ( $X_L$ ) çarpımına eşittir.

$$V_{gd} = I_{normal} X_L \quad (4.3)$$

Reaktans ise AAS endüktansı ( $L$ ) değerinin şebeke radyan frekansı ile çarpımına eşittir.

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.4)$$

Endüktans formülü gereği;

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 A}{l_{nüve}} \quad (4.5)$$

olarak bulunur. Düşük karbonlu çelik SAE 1020 (sadece 1020 veya AISI 1020 olarak da yazılabilir) malzemesini normal çalışma durumunda başlangıç geçirgenliği bölgesinde yani  $H_{maks} = 75$  A/m değerinde çalıştırdığımızda bağıl geçirgenliği 280 olmaktadır. Havanın manyetik geçirgenliği ise bilindiği üzere,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m'dir. Böylece;

$$\frac{N^2 A}{l_{nüve}} = \frac{L}{\mu_r \mu_0} \quad (4.6)$$

olarak bulunur.

2. Nüveyi başlangıç geçirgenliği bölgesinde çalıştıracak maksimum manyetik alan şiddeti ( $H_{maks}$ ) sınırlaması:

Düşük karbonlu çelik malzemesi kullanılarak tasarlanacak olan nüveyi, belirlemiş olduğumuz maksimum başlangıç geçirgenliği bölgesinde çalışmasını sağlamak için,  $H_{maks} = 75$  A/m sınırında çalıştırmamız gerekmektedir. Maksimum manyetik alan şiddeti aşağıdaki denklem ile verilir.

$$H_{maks} = \frac{NI_{normal}}{l_{nüve}} \quad (4.7)$$

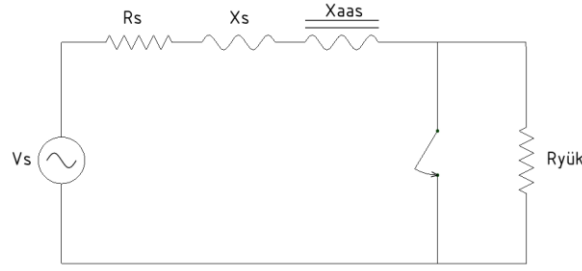
Burada normal çalışma akım değeri; normal çalışma durumunda şebeke akımının tepe değeridir. Normal çalışma durumunda arıza akımı sınırlayıcısının şebeke tarafından “görünmez” olduğunu varsayarsak, normal çalışma akımı,

$$I_{normal} = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_{load})^2 + X_s^2}} \quad (4.8)$$

olarak bulunur. Buna göre,

$$\frac{H_{maks}}{I_{normal}} = \frac{N}{l_{nüve}} \quad (4.9)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Bu bilgiler ışığında AAS tasarım parametrelerini hesaplayabilmek için bu tasarımın kullanılacağı şebeke modeline göz atalım (Şekil 4.6):



Şekil 4.6 : AAS'nın kullanılacağı şebeke modeli.

Şebeke modelinde kullanılan parametreler ve değerleri ise Çizelge 4.1'de gösterilmiştir (Knott ve Moscrop, 2013).

Çizelge 4.1 : Şebeke modeli parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
$V_s$	312	V (tepe)
$f$	50	Hz
$R_s$	0.068	$\Omega$
$X_s$	0.132	$\Omega$
$R_{yük}$	9.6	$\Omega$

Normal şebeke çalışması durumunda, arıza akımı sınırlayıcının şebeke tarafından görünmez olduğunu varsaydığımızda, Çizelge 4.1'de verilen  $V_s = 312$  V,  $R_s = 0.068$   $\Omega$ ,  $R_{yük} = 9.6$   $\Omega$  ve  $X_s = 0.312$   $\Omega$  değerleri Denklem 4.8'de yerine konulduğunda normal çalışma akımı 32.268 A olarak hesaplanır. Gerilim düşümünün izin verilen gerilim sınırında yani  $V_{gd} = 15$  V olduğu durumda normal çalışmada AAS'nın sahip olması gereken reaktans değeri,  $X_{aas} = 15/32.268 = 0.465$   $\Omega$  olarak bulunur.

Böylece arıza akımı sınırlayıcının normal şebeke çalışmasında endüktansı  $L = 0.465/2\pi 50 = 0.0015$  H olarak bulunur. Amacımız bobinin boyunu, sarım sayısını ve kesit alanını bulmak olduğundan bu değişkenleri yalnız bırakır isek, Denklem 4.6'dan  $N^2 A/l_{nüve}$  oranı 4.2618 m olarak bulunur.  $N$  ve  $l$  bilinmeyenlerinin bulunduğu bir diğer denklem, maksimum manyetik alan yoğunluk değeri üzerinden elde edilir.  $H_{maks}$  değerini 75 A/m ve  $I_{normal}$  değerini, yukarıda bulduğumuz üzere, 32.268 A olarak aldığımızda,  $N/l$  oranı 2.3243 1/m olarak belirlenmiş olur. Böylece, sarım sayısını bobin boyu cinsinden aşağıdaki denklem ile yazabiliriz.

$$N = 2.3243 \times l_{n\ddot{u}ve} \quad (4.10)$$

Elde ettiğimiz bu değeri bobin endüktans kısıt denkleminde yerine koyar isek, aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla istenilen değer elde edilir.

$$\frac{(2.3243l_{n\ddot{u}ve})^2 A}{l_{n\ddot{u}ve}} = 4.2618 \text{ m}^3 \quad (4.11)$$

Böylece,

$$A_{n\ddot{u}ve} \times l_{n\ddot{u}ve} = 0.789 \text{ m}^3 \quad (4.12)$$

olarak bulunur. Buradan çıkarılacak sonuç, kapalı nüveli tasarımda kullanılan nüvenin hacminin en az 0.789 m<sup>3</sup> olabileceğidir.

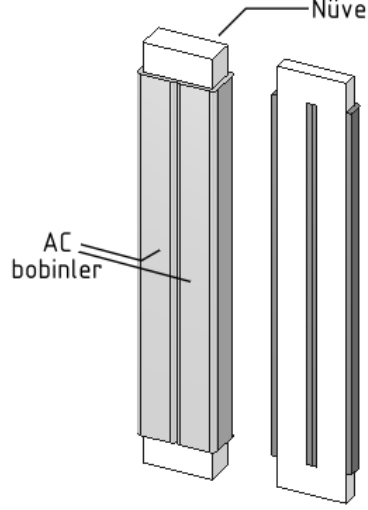
#### 4.2.2 Modelleme

Daha önce 4.2.1 bölümünde hesaplanan bobin boyu ve sarım sayısı değerleri tek bir bobin geometrisi içindir. Arıza akım sınırlayıcıdaki nüvenin kapalı geometride uygulanması sebebiyle nüve hacminin tamamının bobin olarak kullanılmasının yerinde olacağı açıktır. Bu durumda, dönüş nüve kısmında da bobin kullanılması suretiyle hesaplanan bobin iki eşit parçaya ayrılabilir. Böylece elde edilen tasarımın sahip olduğu parametrelerin değerleri aşağıda verilen Çizelge 4.2'deki gibi olur.

Çizelge 4.2 : Kapalı nüveli başlangıç gerçirgenlikli AAS model parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
Bobin boyu	3.87	m
Nüve boyu, $l_{n\ddot{u}ve}$	9.204	m
Nüve yerden yüksekliği (h), genişliği (w), derinliği (d)	4.572, 0.732, 0.316	m
Nüve (bobin) kesiti, $A_{n\ddot{u}ve}$	0.1	m <sup>2</sup>
Bobin sarım sayısı, N	18	-

Çizelge 4.2'de verilen parametrelere göre tasarlanan model ortadan kesilmiş hali ile birlikte Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Alternatif akım ikazlı bobinlerden (AC bobinler) geçen akımın üretmiş olduğu manyetik akı nüve üzerinde birbirlerini aynı yönde destekleyeci niteliktedir. Böylece 2 bobin, tek bir bobin gibi çalışmaktadır.



Şekil 4.7 : Kapalı nüveli tasarıma sahip başlangıç geçirgenlikli arıza akımı sınırlayıcı.

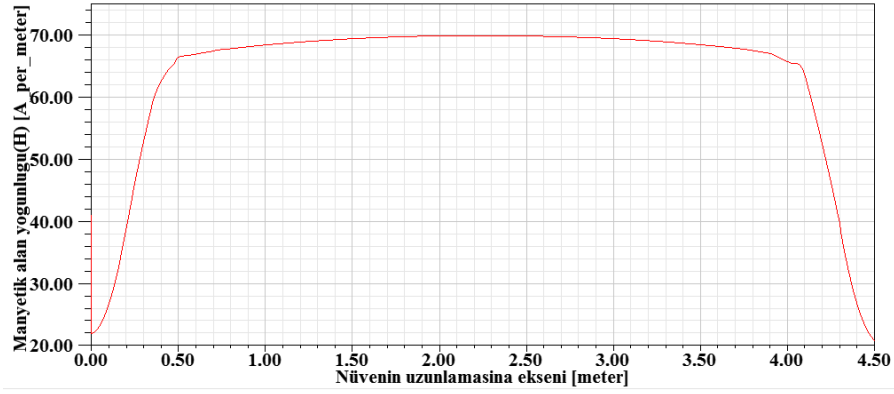
### 4.3 Performans ve Uygulanabilirlik Açısından İnceleme

Arıza akımı sınırlayıcı tasarımı için performans ile ilgili inceleme ilgili parametreler girilerek Maxwell programında simülasyonlar ile sağlanmıştır. Bu kapsamda, arıza akımı sınırlayıcı üzerine düşen gerilimin tespiti için normal çalışma durumunun incelenmesinde toplam simülasyon süresi 40 ms'dir ve her bir hesaplama 0.5 ms'de bir yapılmakta yani hesaplama adım süresi 0.5 ms olmaktadır. Normal çalışma durumunda şebeke akımı tepe değeri yaklaşık 32 A'dir. Arıza; yüke paralel bağlı bir anahtarın kapanması ile oluşmakta ve  $t = 40$  ms'de olacak şekildedir. Arıza akımı sınırlama kabiliyetinin tespit edildiği simülasyonda toplam simülasyon süresi 100 ms'dir.

#### 4.3.1 Manyetostatik analiz

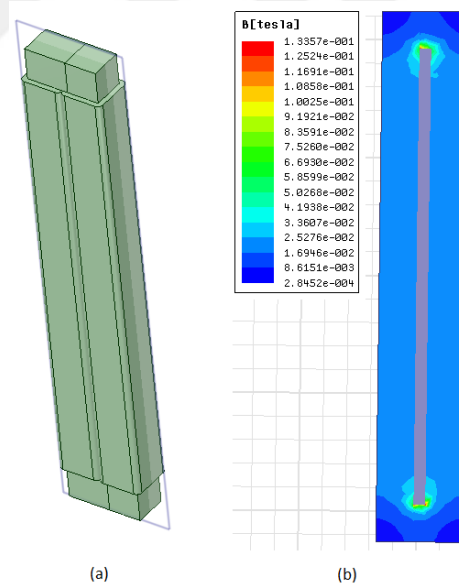
Normal çalışma durumunda, şebeke akımının 32 A olduğunu bir önceki bölümde belirtmiştik. Bu akım değerinin nüveyi, başlangıç geçirgenliği bölgesinde tutması gerekmektedir. Normal çalışma durumunda, bu bölge içerisinde kalındığının teyit edilmesi ve doğrulanması adına, Maxwell programıyla manyetostatik analiz yapılmıştır.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, maksimum manyetik alan şiddeti değeri 70 A/m olup bu değer başlangıç geçirgenliği bölgesi dahilindedir.



Şekil 4.8 : Normal çalışma durumunda, şebeke akımı tepe değerinde nüve boyunca manyetik alan şiddetinin dağılımı.

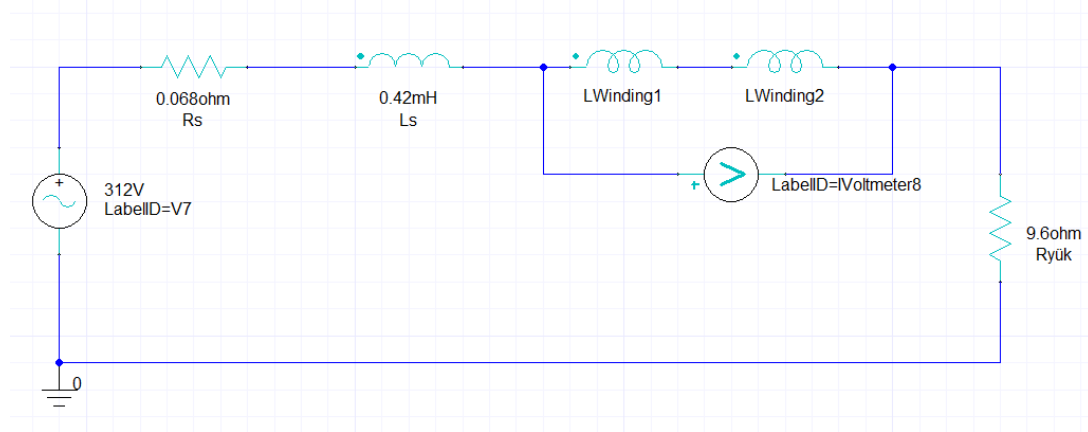
Şekil 4.9'da ise, nüve içerisindeki bir kesit düzlemi üzerinde manyetik akı dağılımı gösterilmektedir. Görüldüğü üzere nüvenin ortalama manyetik akı yoğunluk değeri, 70 A/m manyetik alan şiddeti ile uyarıldığında, yaklaşık olarak 25 mT'ya karşılık gelmektedir. Bu ise düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin manyetik karakteristiği ile birebir uyumludur.



Şekil 4.9 : Kapalı nüveli tasarımın normal çalışma durumunda, (a) nüve kesit düzlemi ve (b) bu düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu (B) genliği dağılımı

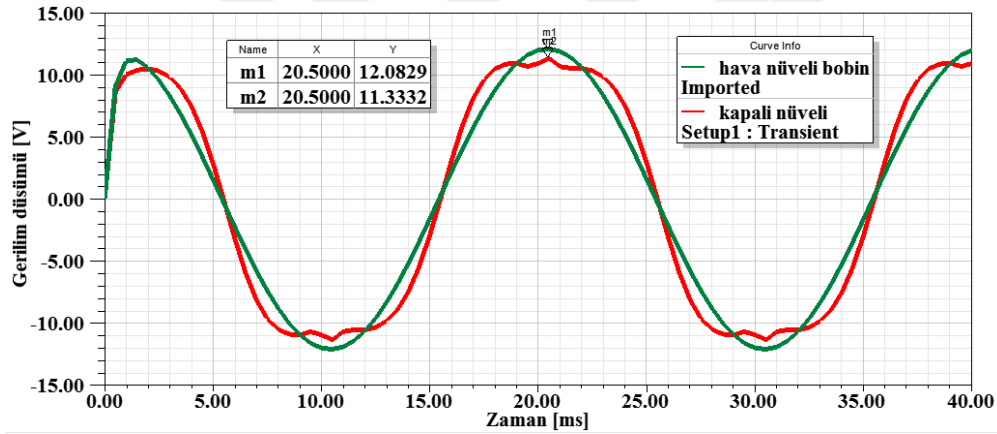
### 4.3.2 Normal çalışma durumu

Tasarımın şebeke modeline bağlantısı Şekil 4.10'daki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 : Kapalı nüveli tasarımın gerilim düşümü analizi için Maxwell programında kurulması.

Arıza akımı sınırlayıcı tasarımının, arıza akımı sınırlama performansını teşhis edebilmek adına, ayrı bir analizde hava nüveli bir bobin kullanılmış (Şekil 4.10) ve normal çalışma durumunda gerilim düşümleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

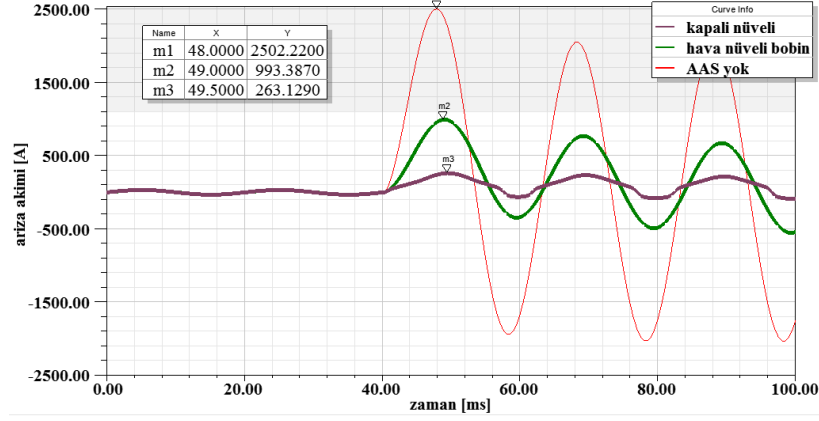


Şekil 4.11 : Kapalı nüveli başlangıç geçirgenlikli tasarım ve hava nüveli bobin gerilim düşümleri karşılaştırması.

Görüldüğü üzere, gerilim düşümü miktarları eşittir.

### 4.3.3 Arıza akımı sınırlaması

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere, arıza akım sınırlayıcı yok iken 2500 A değerine ulaşan arıza akımı, hava nüveli bobin kullanıldığında 993 A’ye kadar yükselmektedir. Kapalı nüveli tasarımı ise bu değeri 260 A’de sınırlamaktadır.



Şekil 4.12 : Kapalı nüveli tasarım için arıza akımlarının karşılaştırılması.

#### 4.3.4 Nüve malzemelerinin performans karşılaştırması

Tasarım değişmeksizin bu tasarımda kullanılan nüve malzemesi değiştirilerek her durumda simülasyonları Maxwell'de gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen Gerilim düşümü (V) ve Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri (A), düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin değerleri ile karşılaştırmalı şekilde, Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Nüve malzemelerinin performans karşılaştırması.

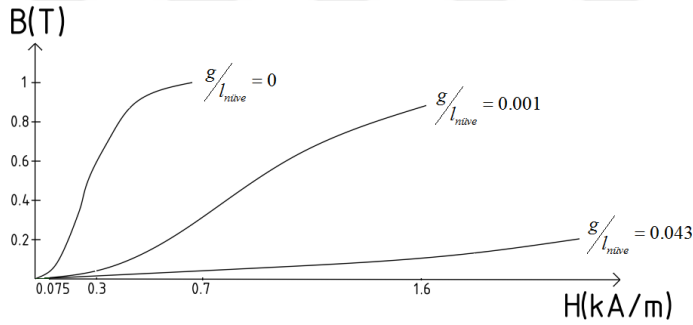
Nüve Malzemesi	Gerilim düşümü tepe değeri (V)	Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değeri, $I_{maks(AAD)}$ (A)
Düşük karbonlu çelik SAE 1020	11.33	263.12
Paslanmaz çelik - 416	13.23	494
Kobalt-Çelik-Hiperco 50	153.08	103.68
Çelik 1010	31.67	388.67
Alloy Powder Core	2.35	2129

Çizelge 4.3'te, gerilim düşümünün kaynak geriliminin %5'ini geçmemesi kısıtı dahilinde hareket edip, arıza akımını en çok sınırlayan nüve malzemesinin düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesi olduğu görülmektedir. Neticede, bu tasarımda kullanılacak en uygun nüve malzemesinin, bu nüve malzemeleri arasından, düşük karbonlu çelik SAE 1020 olduğu anlaşılmaktadır.

## 4.4 Optimum Tasarım ve Nüve Parametrelerinin Belirlenmesi

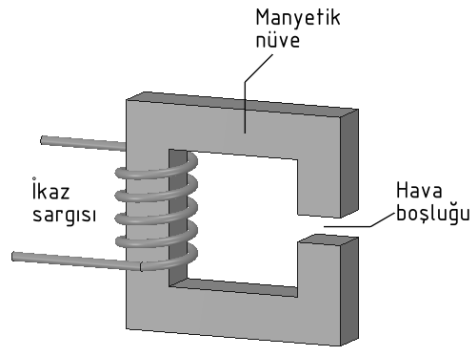
### 4.4.1 Hava boşluğu eklenmiş nüve yaklaşımı

Arıza akımı sınırlayıcı için kullanılan nüveye hava boşluğu eklenmesi durumunda  $B-H$  eğrisinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi, nüveye hava boşluğu eklendikçe nüvenin manyetikliği azalmaktadır. Bir başka deyişle,  $B-H$  eğrisindeki tüm manyetik akı yoğunluk ( $B$ ) değerlerinin sabit kalmasına karşılık, bu değerleri sağlayacak olan manyetik alan şiddeti ( $H$ ) değerleri artmaktadır. Bunun sonucunda, başlangıç geçirgenliğinin sona erdiği manyetik akı yoğunluk değerinin sabit kalması fakat bu değeri sağlayacak manyetik alan şiddetinin artması sağlanmaktadır. Aynı şeyi, nüveyi doyuma götürecek olan manyetik alan şiddeti için de söyleyebiliriz. Bunun sonucunda nüve karakteristiği, hava nüveli bobin karakteristiğine yaklaşmaktadır.



Şekil 4.13 : Nüveye eklenen hava boşluk miktarına bağlı olarak  $B-H$  eğrisinin değişimi.

Şekil 4.14’te ise, nüveye eklenen hava boşluğu fiziksel olarak gösterilmektedir. Burada hava boşluğunun tamamı, tek bir noktada nüveye eklenmiş durumdadır.



Şekil 4.14 : Nüvede hava boşluğunun fiziksel görünümü.

Denklem 4.7'nin hava boşluğu eklenmiş nüve yaklaşımı için yenilenmesiyle aşağıdaki denklem elde edilir.

$$NI = H_{nüve} l_{nüve} + H_g g \quad (4.13)$$

Sırasıyla nüve ve hava boşluğu üzerindeki manyetik alan şiddeti değerleri, manyetik akı yoğunluk ve manyetik geçirgenlik değeri cinsinden yazıldığında,

$$NI = \frac{B_{nüve}}{\mu_{nüve}} l_{nüve} + \frac{B_g}{\mu_0} g \quad (4.14)$$

denklemini elde edilir. Hava boşluğunun uzunluğu ( $g$ ) nüve kesitine ( $A_{nüve}$ ) oranla çok düşük olması durumunda, akı saçaklama etkisi (fringing effect) ihmal edilir ve böylelikle,

$$B_g \cong B_{nüve} = \frac{\theta_{nüve}}{A_{nüve}} \quad (4.15)$$

sonucu elde edilmiş olur. Bu yaklaşım, Denklem 4.14'te kullanıldığında aşağıdaki denklem edilir.

$$NI = \frac{\theta_{nüve}}{A_{nüve}} \left( \frac{1}{\mu_{nüve}} l_{nüve} + \frac{1}{\mu_0} g \right) \quad (4.16)$$

Yukarıda verilen denklemin ortak paranteze alınması sonucunda,

$$NI = \frac{\theta_{nüve}}{A_{nüve}} \left( \frac{l_{nüve}}{\mu_{nüve}} + \frac{g}{\mu_0} \right) \quad (4.17)$$

denklemini elde edilir. Nüve manyetik geçirgenlik değeri, havanın manyetik geçirgenlik değeri cinsinden yazıldığında,

$$\mu_{nüve} = \mu_r \mu_0 \quad (4.18)$$

denklemini elde edilmiş olur. Yukarıda elde edilen bu sonucun Denklem 4.17'de yerine konulmasıyla,

$$NI = \frac{\theta_{nüve}}{A_{nüve}} \left( \frac{l_{nüve} + \mu_r g}{\mu_r \mu_0} \right) \quad (4.19)$$

elde edilmiş olur. Manyetik akı değerinin yalnız bırakılmasıyla,

$$\theta_{n\ddot{u}ve} = \frac{NIA_{n\ddot{u}ve}\mu_r\mu_0}{l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g} \quad (4.20)$$

elde edilir. Buradan manyetik akı yoğunluk değeri ise,

$$B_g = B_{n\ddot{u}ve} = \frac{\theta_{n\ddot{u}ve}}{A_{n\ddot{u}ve}} = \frac{NI\mu_r\mu_0}{l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g} \quad (4.21)$$

olarak elde edilir. Görüldüğü üzere, hava boşluğu ve nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluk değerleri birbirine eşittir. Hava boşluğundaki manyetik alan şiddeti değeri, aşağıdaki denklemdeki gibidir.

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{NI\mu_r}{l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g} \quad (4.22)$$

4.22 denkleminde  $NI$  çarpımı yalnız bırakılır ise,

$$NI = H_{n\ddot{u}ve} (l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g) \quad (4.23)$$

elde edilir. Bir diğer denklem, bobin endüktans kısıtından,

$$L = \frac{N}{I} \theta \quad (4.24)$$

olarak elde edilir. Denklem 4.20'deki manyetik akı ifadesi Denklem 4.24'te yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir,

$$L = \frac{N}{I} \left( \frac{NIA_{n\ddot{u}ve}\mu_r\mu_0}{l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g} \right) \quad (4.25)$$

Denklem 4.25 tekrar düzenlendiğinde ise,

$$L = \frac{N^2 A_{n\ddot{u}ve} \mu_r \mu_0}{l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g} \quad (4.26)$$

denklemi elde edilir. Yukarıda verilen ifadede nüve ve hava boşluğu uzunluğu değerini içeren kısmın yalnız bırakılmasıyla,

$$l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g = \frac{N^2 A_{n\ddot{u}ve} \mu_r \mu_0}{L} \quad (4.27)$$

eşitliği elde edilir. Uzunluk değerleri  $NI/H_{n\ddot{u}ve}$  cinsinden yazıldığında,

$$NI = H_{n\ddot{u}ve} \left( \frac{N^2 A_{n\ddot{u}ve} \mu_r \mu_0}{L} \right) \quad (4.28)$$

elde edilir. Yukarıdaki eşitlikte  $N$  değeri yalnız bırakılır ise,

$$N = \frac{IL}{H_{n\ddot{u}ve} A_{n\ddot{u}ve} \mu_r \mu_0} \quad (4.29)$$

elde edilir. Tasarım parametrelerinin belirlenmesi için, öncelikle nüve ve hava boşluk değerlerini belirleme amacıyla sarım sayısı değeri yerine Denklem 4.29'dakine karşılık gelen ifadenin yazılmasıyla,

$$\left( \frac{IL}{H_{n\ddot{u}ve} A_{n\ddot{u}ve} \mu_r \mu_0} \right) I = H_{n\ddot{u}ve} (l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g) \quad (4.30)$$

elde edilir. Tasarım parametreleri olarak öncelikli bulmak istediğimiz değerler olan  $A_{n\ddot{u}ve}$ ,  $l_{n\ddot{u}ve}$  ve  $g$  değerlerini elde etmek için yukarıdaki denklemde aşağıdaki düzenlemeyi yaptığımızda,

$$A_{n\ddot{u}ve} (l_{n\ddot{u}ve} + \mu_r g) = \frac{I^2 L}{H_{n\ddot{u}ve}^2 \mu_r \mu_0} \quad (4.31)$$

elde edilir.  $I = 32$  A,  $L = 0.0015$  H,  $H_{n\ddot{u}ve} = 75$  A/m,  $\mu_r = 280$  ve  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m için,

$$A_{n\ddot{u}ve} (l_{n\ddot{u}ve} + 280g) = 0.776 \text{ m}^3 \quad (4.32)$$

bulunmaktadır. Dikkat edilirse bu değer, kapalı nüveli tasarımda;

$$A_{n\ddot{u}ve} l_{n\ddot{u}ve} = 0.776 \text{ m}^3 \quad (4.33)$$

olarak belirlenmişti. Aynı kesit alanı için, nüveye hava boşluğu ( $g$ ) eklendiğinde gerekli olan nüve uzunluğu,  $\mu_r$  oranında (bu durumda 280) azalmaktadır. Bu durumda  $g = 0.05$  m olur ise,  $A_{n\ddot{u}ve} = 0.04 \text{ m}^2$  için,

$$l_{n\ddot{u}ve} = \frac{0.776}{A_{n\ddot{u}ve}} - \mu_r g = 5.4 \text{ m} \quad (4.34)$$

olmaktadır.  $g = 0.064$  m olduğunda,

$$l_{n\ddot{u}ve} = \frac{0.776}{A_{n\ddot{u}ve}} - \mu_r g = 1.48 \text{ m} \quad (4.35)$$

olmaktadır. Bu değer yeteri kadar k\ddot{u}c\ddot{u}kt\ddot{u}r. Bobin sarım sayısı ise,

$$N = \frac{1.8187}{A_{n\ddot{u}ve}} \cong 45.5 \text{ m} \quad (4.36)$$

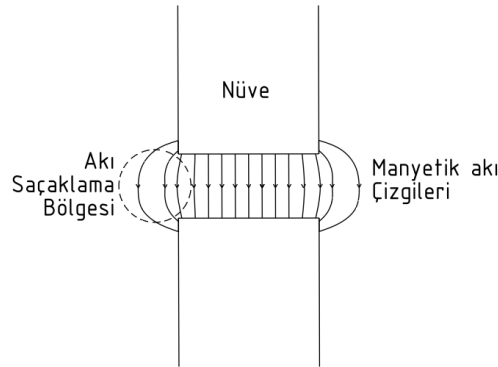
olmaktadır. Hesaplanan bu değerler, \u00c7izelge 4.4'te g\ddot{o}sterilmiřtir.

\u00c7izelge 4.4 : Hava boşluklu bařlangı\u00e7 ge\u00e7irgenlikli AAS model parametreleri.

Parametre	Değer	Birim
N\ddot{u}ve boyu, $(l_{n\ddot{u}ve} + g)$	$1.48 + 0.064 = 1.544$	m
N\ddot{u}ve yerden y\ddot{u}kseklilięi (h), genişliği (w), derinliği (d)	0.586, 0.586, 0.2	m
N\ddot{u}ve (bobin) kesiti, $A_{n\ddot{u}ve}$	0.04	m <sup>2</sup>
Bobin sarım sayısı, N	45.5	-

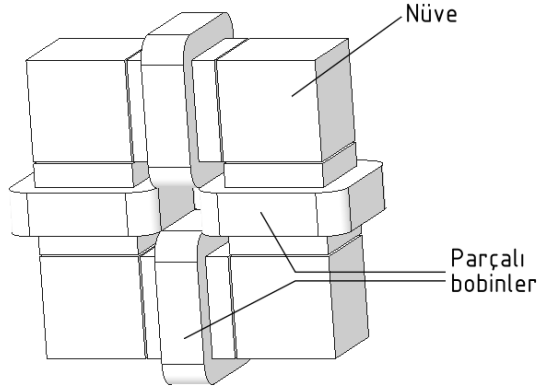
#### 4.4.1.1 Akı sa\u00e7aklama etkisinin incelenmesi

N\ddot{u}velerde akı sa\u00e7aklama etkisi, manyetik akının maruz kaldığı manyetik diren\u00e7 (rel\ddot{u}ktans) değerini azaltmak adına, etkin kesit alanının artmasını neticelendiren, fiziksel bir fenomendir (Fitzgerald, 6th Edition). Buna g\ddot{o}re hava boşluğunun tamamının tek bir noktada n\ddot{u}veye eklenmesi, manyetik direnci azaltacak şekilde, manyetik akının kesit alanından daha geniş bir koridora dağılmasına ve bunun sonucunda yukarıda yapmış olduğumuz hesapların ge\u00e7ersiz olmasına sebep olmaktadır (\şekil 4.15).

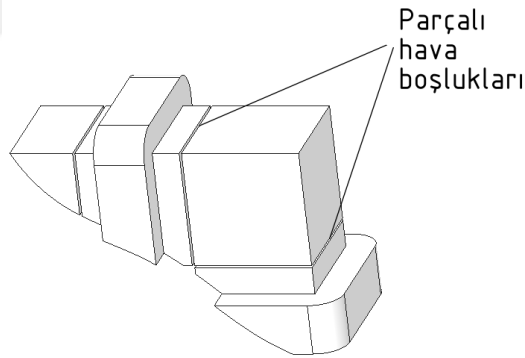


\şekil 4.15 : N\ddot{u}vede akı sa\u00e7aklama etkisi.

Bunu önlemek amacıyla, hava boşluğu tek bir noktada nüveye eklemek yerine, parçalara ayırmak suretiyle ve herbir parça küçük uzunluklara sahip olacak şekilde nüveye eklenmiştir. Bunun sonucunda, elde edilen geometri Şekil 4.16’da ve hava boşlukları daha yakından görünümü Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Hava boşluğu, sahip olduğu her bir hava boşluğu parçaları 4’er mm uzunlukta ve toplamda 16 adet olacak şekilde geometriye uygulanmıştır.



Şekil 4.16 : Parçalı hava boşluğuna sahip nüve geometrisi.

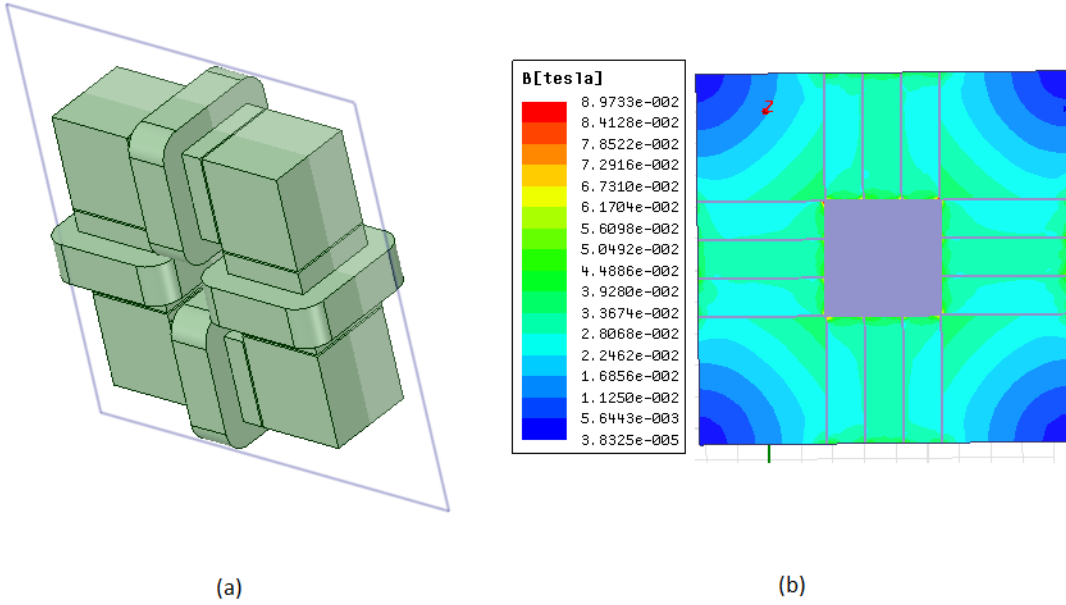


Şekil 4.17 : Parçalı hava boşlukları.

#### 4.4.1.2 Manyetostatik akı dağılımının incelenmesi

Hava boşluklu tasarımın normal çalışma durumunda, nüveyi manyetik olarak yükleyen, bu nüveye sarılı bobinleridir. Bu bobinler şebekeye bağlıdır. Manyetostatik analizde, normal çalışma durumundaki şebeke akımının tepe değerini bu bobinlere bir sabit olarak uygulandı. Bu durumda, Şekil 4.18a’da gösterilen yüzey boyunca kesit yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu Şekil 4.18b’de görülmektedir. Görüldüğü üzere, yine 4.3 bölümünde kapalı nüveli tasarım için yapılan benzer analizde olduğu gibi 70 A/m manyetik alan şiddetine karşılık olarak benzer manyetik

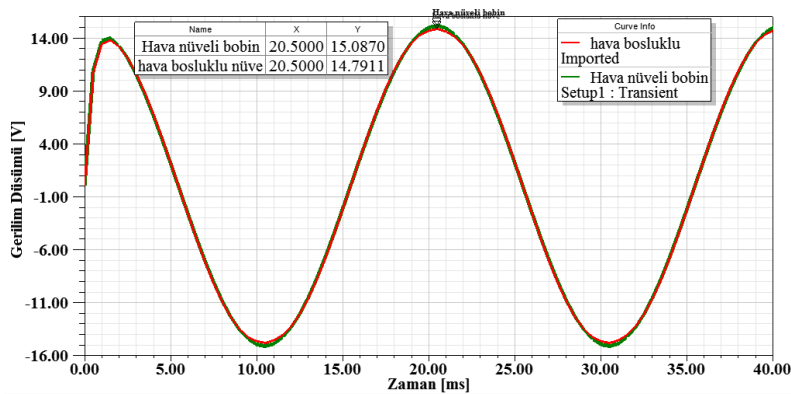
akı yoğunluk değerlerini görmekteyiz. Böylelikle, nüvenin başlangıç geçirgenliği bölgesinde çalıştığını teyit etmekteyiz.



Şekil 4.18 : Hava boşluklu tasarımın normal çalışma durumunda, (a) nüve kesit düzlemi ve (b) bu düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu (B) genliği dağılımı

#### 4.4.1.3 Gerilim düşümünün incelenmesi

Normal çalışma durumunda, gerilim düşümünün aynı olması amacıyla 1.5 mH değerinde hava nüveli bir bobin seçilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. Gerilim düşümü değerleri Şekil 4.19’da görüldüğü üzere aynıdır.

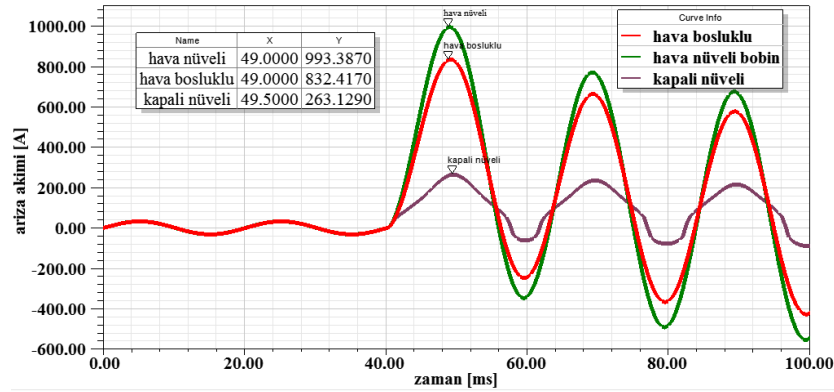


Şekil 4.19 : Hava boşluklu nüve gerilim düşümü değeri.

#### 4.4.1.4 Arıza akımı sınırlaması

$t = 40$  ms'de arıza meydana gelecek şekilde yüke paralel bir kısa devre işlevi gören anahtarlama yapılmıştır. Bunun sonucunda, akım artışları Şekil 4.20'de görülmektedir. Aynı şekilde görüldüğü üzere, normal çalışma durumunda gerilim düşümleri aynı olan hava nüveli bobin ve hava boşluğuna sahip tasarımı Şekil 4.20'deki eğride görüldüğü şekilde arıza akımını sınırlamışlardır. Boyutlarını azaltmaya çalıştığımız kapalı nüveli arıza akımı sınırlayıcı tasarımı da sınırlama kabiliyetinin karşılaştırılması açısından eklenmiştir. Hava nüveli bobin arıza akımının ilk tepe değerini 993 A değerine kadar sınırlamış iken hava boşluklu nüve tasarımı ilk tepe akımını 832 A değerine kadar sınırlamıştır. Sınırlanan değerler arasında küçük farkın olmasının sebebi, nüve tasarımı hava boşluklu olması sebebiyle hava nüveli bobin karakteristiğine yaklaşmış olması ve bunun sonucunda manyetik geçirgenlik değerinin ve böylelikle reaktans değerinin düşük olmasıdır.

Önceki kapalı nüve tasarımı ise arıza akımını 263 A değerinde sınırlandırmıştır. Gerekli olan nüve hacmi; nüveye hava boşluğu eklenmesi sayesinde, önceki tasarımı olan kapalı nüve tasarımı göre yaklaşık 13 kat azaltılarak  $0.06 \text{ m}^3$  değerine düşürülmüştür. Buna karşın arıza akımı sınırlama kabiliyeti de azalmıştır.



Şekil 4.20 : Hava boşluklu nüveli ve kapalı nüveli AAS arıza akımı sınırlaması karşılaştırması.

#### 4.4.1.5 Çeşitli nüve malzemeleri ile gerilim düşümü ve arıza akımı sınırlaması analizlerinin yapılması

Bu bölümde 4.3.4 bölümündeki çalışmaya benzer şekilde, hava boşluklu nüveli tasarım değişmeksizin bu tasarımda kullanılan nüve malzemesi değiştirilerek her durumda simülasyonları Maxwell'de gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen Gerilim

düşümü (V) ve Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri (A), düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin değerleri ile karşılaştırmalı şekilde, Çizelge 4.5'te verilmiştir.

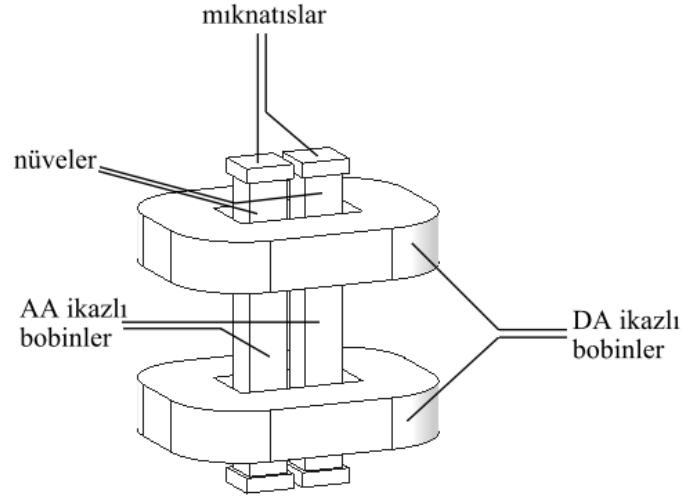
Çizelge 4.5 : Nüve malzemesine bağlı olarak gerilim düşümü ve sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri.

Nüve Malzemesi	Gerilim düşümü tepe değeri (V)	Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değeri, $I_{maks(AAD)}$ (A)
Düşük karbonlu çelik SAE 1020	15.01	824.24
Paslanmaz çelik - 416	15.12	834.67
Kobalt-Çelik-Hiperco 50	16.38	816.44
Çelik 1010	15.92	827.73
Alloy Powder Core	11.35	1217.68

Görüldüğü üzere, hava boşluklu nüve tasarımında farklı nüve malzemesi kullanılması; AAS performansı üzerinde ciddi bir farklılık oluşturmamaktadır. Bunun sebebi, nüve tasarımındaki hava boşluklarının nüve malzemesinin manyetik karakteristiğine göre daha baskın olmasıdır.

#### 4.4.1.6 Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS tasarımı ile doymuş nüveli AAS'nın performans karşılaştırması

4.4 bölümünün sahip olduğu boyutların düşürülmesi motivasyonu kapsamında, nüveye hava boşluğu eklenmesi ile tasarım boyutları Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere düşürülmüş durumdadır. Knott ve Moscrop, 2013 tarafından yapılan ve hava boşluklu nüve tasarımı ile benzer boyutlara sahip olan ve Çizelge 4.6'da tasarım parametreleri verilmiş olan çalışmadaki doymuş nüveli AAS tasarımı Şekil 4.21'de görülmektedir. Benzer boyutlara sahip bu 2 çalışmanın performans karşılaştırmasının yapılmasına gerek duyulmuştur.



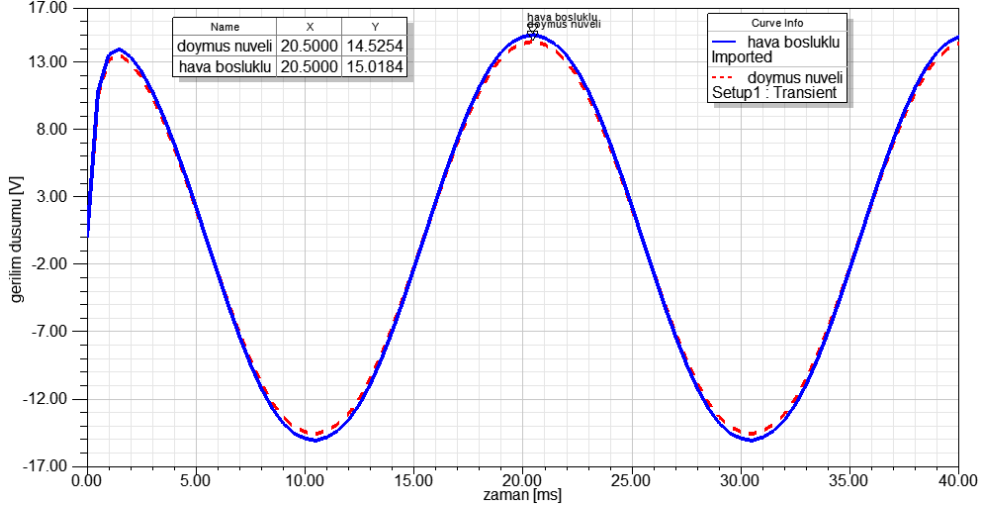
Şekil 4.21 : Doymuş nüveli AAS (Knott ve Moscrop, 2013)

Çizelge 4.6 : Doymuş nüveli AAS boyutları (Knott ve Moscrop, 2013).

Parametre	Değer	Birim
Nüve boyu, ( $l_{nüve} + g$ )	$2 \times 0.6 = 1.2$	m
Nüve yerden yüksekliği (h), genişliği (w), derinliği (d)	0.6	m
Nüve (bobin) kesiti, $A_{nüve}$	0.0064	$m^2$
Bobin sarım sayısı, N	60	-

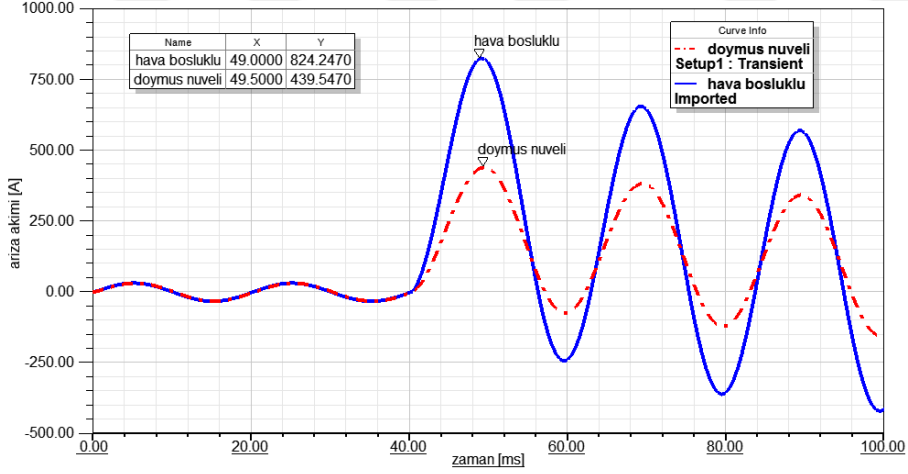
Burada, doymuş nüveli AAS ile ilgili olan eğriler Knott ve Moscrop, 2013 çalışmasından doğrudan alınmış olmakla birlikte sadece tepe değerleri dikkate alınarak oluşturulmuş eğrilerdir.

**Gerilim düşümü karşılaştırması:** Şekil 4.22’de görüldüğü üzere, hava boşluklu tasarımımız ile doymuş nüveli tasarımın gerilim düşümü değerleri aynıdır.



Şekil 4.22 : Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS ile doymuş nüveli AAS gerilim düşümü karşılaştırması.

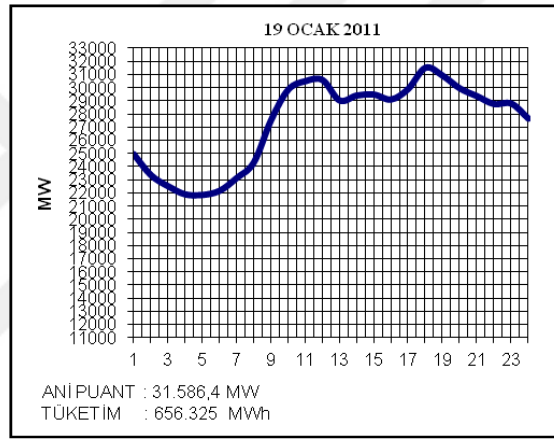
**Arıza akımı sınırlama performansı karşılaştırması:** Normal çalışma durumunda gerilim düşümü aynı olan iki tasarımın arıza akımı sınırlama performansları karşılaştırıldığında doymuş nüveli tasarımın üstünlüğü bariz bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 : Hava boşluklu nüveye sahip başlangıç geçirgenlikli AAS ile doymuş nüveli AAS arıza akımı sınırlaması karşılaştırması.

#### 4.4.1.7 Şebekenin gün içerisindeki yük değişimine göre AAS üzerindeki gerilim düşümlerinin incelenmesi

Şebekeden talep edilen güç değeri yani tüketim miktarı gün içerisinde değişkenlik göstermektedir. Bu değişim en çok tüketimin gerçekleştiği puant dönemde gündüz dönemine göre yaklaşık yüzde 25 artış göstermekte iken, gece döneminde bu tüketim değeri gündüz dönemine göre yaklaşık yüzde 20 azalmaktadır (Şekil 4.24) (Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı, 2012). Buna göre, tüketim gücünün gün içerisindeki bu değişimi esas alınarak, yük dirençleri (4.37), (4.38) ve (4.39) denklemleri üzerinden hesaplanmış ve çizelge 4.4'te, elde edilen bu değerler gösterilmiştir.



Şekil 4.24 : Örnek bir gün için, gün içerisinde saate bağlı tüketim değerinin değişim eğrisi (Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı, 2012)

$$R_{yük(gündüz)} = \frac{V_s^2}{P_{gündüz}} = 9.6 \Omega \quad (4.37)$$

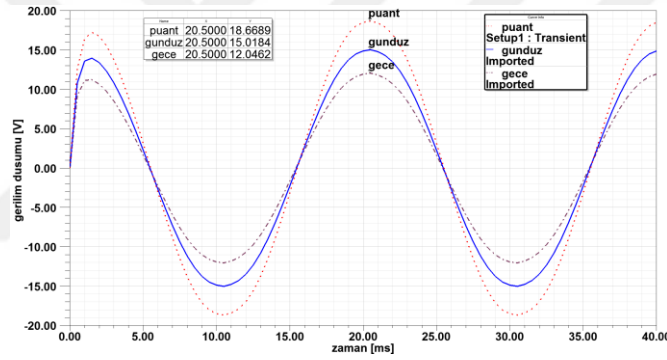
$$R_{yük(gece)} = \frac{V_s^2}{P_{gece}} = \frac{V_s^2}{0.8P_{gündüz}} = 12 \Omega \quad (4.38)$$

$$R_{yük(puant)} = \frac{V_s^2}{P_{puant}} = \frac{V_s^2}{1.25P_{gündüz}} = 7.7 \Omega \quad (4.39)$$

Çizelge 4.7'deki  $R_{yük}$  değerlerinin Şekil 1.4'teki şebeke modeline uygulanması neticesinde Şekil 4.25'de görülmekte olan gerilim düşümleri elde edilmiştir. Görüldüğü üzere, gece döneminde çekilen akımın düşmesinden ötürü arıza akım sınırlayıcısı üzerine düşen gerilim azalmakta iken, puant dönemde akımın artışından ötürü gerilim düşümü bir hayli artmaktadır.

Çizelge 4.7 :  $R_{yük}$  değerinin gün içerisindeki döneme göre değişimi

Gün İçerisindeki Dönem	$R_{yük}$ değeri	Birim
Gündüz	9.6	$\Omega$
Puant	7.7	$\Omega$
Gece	12	$\Omega$



Şekil 4.25 : Gün içindeki dönemlere göre gerilim düşüm miktarının değişim eğrileri

Puant döneminde bu gerilim düşümü artışı daha önceden hesaplamış olduğumuz 15 V'luk gerilim düşümü sınırını aştığından ötürü, bu değer 15 V ve daha düşük değere çekilmesi gerekmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezin dördüncü bölümünde detaylı bir şekilde incelenen arıza akımı sınırlayıcı tasarımı düşük karbonlu çelik-1020 malzemesinin özellikleri üzerine kurgulanmıştır. Bu kapsamda düşük karbonlu çelik-1020 malzemesinin başlangıç geçirgenliği ve mıknatıslanma eğrisi kullanılarak tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımın çalışma prensibine göre incelenen arıza akımı sınırlayıcı doymuş nüveli arıza akım sınırlayıcılardan farklı olarak, AA ikazlı bobinlerin dirençlerinin sebep olduğu güç kaybı dışında güç tüketimi yapmamaktadır. Şebekede oluşan arıza akımını sınırlandırma amacıyla kullanılan doymuş nüveli tasarımlarda normal çalışma koşullarında güç kaybının kabul edilebilir seviyeler üzerine çıkmaması için nüvenin doyumu doğru akım süperiletken veya bakır iletkenler vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu tür uygulamalarda sürekli mıknatıslar da destekleyici olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen, yüksek güç gerektiren uygulamalarda DA ikazlı bobinden de akım geçirilmesi gerekmekte ve geçen bu akım ve bakırın direncinden kaynaklanan ve beklenenden fazla miktarda aktif güç kaybı kaçınılmaz olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla normal çalışma koşullarında doyum bölgesinde çalışmaya zorlanmadan, yani nüvenin başlangıç geçirgenliğini kullanan özgün bir tasarım ortaya konmuştur. Bu çalışma şartının gerçekleşmesi aslında tasarımda kullanılan nüvenin özelliğinden kaynaklanmakta olup, normal çalışma durumunda düşük reaktans meydana getiren nüvenin başlangıç geçirgenliğinin düşük olması avantajı tarafından sağlanmaktadır. Böylece, malzeme özelliğinden faydalanılarak özgün bir tasarım olan başlangıç geçirgenliği özellikli arıza akımı sınırlayıcı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, tasarım değişmeksizin bu tasarımda kullanılan nüve malzemesi değiştirilerek her durumda simülasyonları Maxwell'de gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen Gerilim düşümü (V) ve Sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri (A), düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin kullanıldığı durumdaki performans değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçta düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin doğru bir malzeme seçimi olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen tasarımın değerlendirilmesi avantaj ve dezavantajları karşılaştırılarak yapılmıştır. Tasarımı yapılan arıza akımı sınırlayıcıda doyuma ulaştırılacak bir nüvenin olmaması sebebiyle güç kaybının olmayışı avantajına rağmen kurulum esnasında kullanılan malzeme miktarı açısından ise dezavantajı bulunmaktadır. Yani tasarlanan arıza akımı sınırlayıcı daha kompakt bir yapının kurgulanmasına izin vermemektedir. Bu kapsamda, analizi yapılmış olan arıza akımı sınırlayıcı tasarımı 4 metredir. Dezavantaj oluşturan bu durum için tasarımın boyutlarının küçültülmesi çerçevesinde, nüveye hava boşluğu eklenmiştir. Hava boşluklu nüve tasarımında, boyutlar azaltılmakla birlikte, arıza akımı sınırlama performansı da azalmaktadır. Bu kapsamda boyutların düşürülmesi ile tasarımın performansı arasında bir korelasyon kurularak boyutlar üzerinde optimum değer elde edilmesi yoluna gidilmiştir. Sonrasında, hava boşluğu eklenmiş tasarım değişmeksizin bu tasarımda kullanılan nüve malzemesi değiştirilerek her durumda simülasyonları Maxwell'de gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen gerilim düşümü (V) ve sınırlanmış arıza akımı ilk tepe değerleri (A), düşük karbonlu çelik SAE 1020 malzemesinin kullanıldığı durumdaki performans değerleri ile karşılaştırılmış fakat bu tasarımdaki hava boşluklarının nüve malzemesinin karakteristiğine göre çok daha baskın olması sebebiyle bariz bir performans farkı gözlenmemiştir. Yine bu tasarım üzerinde, gün içerisinde farklı saatlerdeki tüketim gücü değişiminin etkisinin incelenmesi amacıyla simülasyonlar yapılmıştır ve tüketim gücünün gün içerisinde değişiminin AAS üzerine düşen gerilimi de değiştirdiği gözlenmiştir.

Arıza akımı sınırlamada kullanılan ve bu tez içerisinde yer verilen literatüre konu olan tekniklerin yine bu tezde yer verilen başlangıç geçirgenliği düşük nüveli AAS tasarımımıza entegre edilmesi yolu ile düşük boyutlarda arıza akımı sınırlama performansının kötüleşmesi önlenabilir veya bu performansın daha da iyileştirilmesi sağlanabilir. Buna ek olarak, gün içerisindeki yük miktarının değişiminin ve bunun yol açtığı gerilim düşümünün şebeke gerilim kaynağının yüzde %5'ini aşmasını engelleyecek olan, tüketim gücünün artışı ve azalışına bağlı olarak bloklar halinde devreye girecek ve çıkacak çözümler üzerinde çalışılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abramovitz, A. & Smedley, K. M.** (2012). Survey of Solid-State Fault Current Limiters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No.6, June.
- Chong, E., Rasolonjanahary, J. L., Sturgess, J., Baker, A. & Sasse, C.** (2006) A Novel Concept for a Fault Current Limiter, *The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission*, pp. 251-255
- Falcone, C. A., Beehler, J. E., Mekolites, W. E. & Grzan, J.** (1973). Current limiting device – a utility’s need, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 93 1768-75
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, J. & Umans, S. D.** (6th Edition). *Electric Machinery*, Mc Graw Hill
- Fransen, P.** (1997). Case History: electronically controlled fault current limiters allow inplant switchgear to be connected, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 33, (2), pp. 319-332
- Hatta, H., Nitta, T., Muroya, S., Oide, T., Shirai, Y., Yaguchi, M. & Miyato, Y.** (2003). Study on recovery current of transformer type superconducting fault current limiter, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 2096–2099, June
- Hoshino, T., Salim, K. M., Nishikawa, M. Muta, I. & Nakamura, T.** (2001). DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, March
- Knott, J. C., Moscrop, J. W.** (2014). Design Considerations in MgB<sub>2</sub>-Based Superconducting Coils for use in Saturated-Core Fault Current Limiters, *IEEE Trans. On Applied Superconductivity*, Vol. 24, No. 5 October
- Knott, J. C., Moscrop, J. W.** (2013). Increasing Energy Efficiency of Saturated-Core Fault Current Limiters With Permanent Magnets, *IEEE Trans. On Magnetism*, Vol. 49, No. 7 July
- Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock, J. & Breuer, F.** (2005). Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 15, pp. 2130-2133
- IEC** (2001). Short-circuit currents in three-phase a.c. systems (IEC 60909-0), Part 0: Calculation of currents
- Lee, B. W., Sim, J., Park, K. B. & Oh, I. S.** (2008). Practical Application Issues of Superconducting Fault Current Limiters for Electric Power Systems, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 18, No.2, June

- Lee, B. W., Sim, J., Park, K. B., Oh, I. S., Lee, H. G., Kim, H. R. & Hyun, O. B.** (2008). Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 18, No. 2, June
- Lim, S. H.** (2007). Operational Characteristics of Flux-Lock Type SFCL With Series Connection of Two Coils, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, June
- Lim, S. H., Choi, H. S. & Han, B. S.** (2004). The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-TC superconducting fault current limiter using a series resonance *Cryogenics*, Vol. 44, pp. 249-254, April
- Lim, S. H., Choi, H. S. & Han, B. S.** (2004). Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL, *Phys. C*, Vol. 416, pp. 34-42, November.
- Matsumura, T., Kimura, A., Shimizu, H., Yokomizu, Y. & Goto, M.** (2003). Fundamental performance of flux-lock type fault current limiter with two air-core coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 2024–2027, June
- Moriconi, F., Rosa, F. D. L., Singh, A., Chen, B., Levitskaya, M. & Nelson, A.** (2010). An Innovative Compact Saturable-Core HTS Fault Current Limiter – Development, Testing and Application to Transmission Class Networks, *IEEE 978-1-4244-6551-4/10*
- Mukhopadhyay, S. C., Iwahara, M., Yamada, S. & Dawson, F. P.** (1998). Investigation of the Performances of a Permanent Magnet Biased Fault Current Limiting Reactor With a Steel Core, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, July
- Mukhopadhyay, S. C., Dawson, F. P., Iwahara, M. & Yamada, S.** (1999). Analysis, design and experimental results for a passive current limiting device, *IEEE Proceedings: Electric Power Applications*. 146(3): pp. 309-316.
- Noe, M., Juengst, K. P., Werfel, F. N., Elschner, S., Bock, J., Breuer, F. & Kreutz, R.** (2003). Testing Bulk HTS Modules for Resistive Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 1976-1979 June
- Noe, M. & Oswald, B. R.** (1999). Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9 1347-50
- Shimizu, H., Yokomizu, Y., Goto, M., Matsumura, T. & Murayama, N.** (2003). A Study on Required Volume of Superconducting Element for Flux Flow Resistance Type Fault Current Limiter, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 2052-2055 June
- Shimizu, H., Yokomizu, Y. & Matsumura, T.** (2004). Comparison of Fundamental Performance of Different Type of Fault Current Limiters With Two Air Core Coils, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 14, No. 2, pp. 807-810 June

**Tahiliani, V. H. & Porter, J. W.** (1980). Fault Current Limiters – An Overview of EPRI Research, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, no. 5, pp. 1964-1969

**Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı** (2012). *Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2012 - 2021)* (s.6-7). Türkiye Elektrik İletim A.Ş Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı.

**Ueda, T., Morita, M. et al**, (1993). Solid-state Current Limiter for Power Distribution System, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, pp. 1796-1801, Oct.

**Xin, Y., Gong, W. Z., Niu, X. Y., Cao, Z., Zhang, J., Tian, B., Xi, H., Wang, Y., Hong, H., Zhang, Y., Hou, B., & Yang, X.** (2007). Development of Saturated Iron Core HTS Fault Current Limiters, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, June

**Xin, Y., Gong, W. Z., Hong, H., Niu, X. Y., Zhang, J., Ren, A. R. & Tian, B.** (2014). Saturated Iron-Core Superconductive Fault Current Limiter, *AIP Conf. Proc.* 1573 pp. 1042-1048

**Vilhena, N., Arsenio, P., Murta, P. J. & Pronto, A.** (2015). A Methodology for Modeling and Simulation of Saturated Cores Fault Current Limiters, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 25, No. 3, June

**Yuan, X., Tekletsadik, K., Kovalsky, L., Bock, J., Breuer, F. & Elschner, S.** (2005). Proof-of-Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, June

**Zhao, Y., Krause, O., Saha, T. K. & Li, Y.** (2014). Performance Analysis of Flux-Lock Type SFCL Influenced by Characteristics of Two Coils, *IEEE* 978-1-4799-6415-4/14

**Url-1** < <http://magweb.us/free-bh-curves/>>, erişim tarihi 04.03.2016.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Onur GÜNEY  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 28 Nisan 1987, İstanbul  
**E-posta** : onurguney@anadolu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** :2005, Kartal Yakacık Anadolu Teknik Lisesi, Elektrik Bölümü
- **Lisans** :2011, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Lisans (İkinci dal)** :2011, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik Elektronik Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Altınay Robot Teknolojileri A.Ş., 2012 :Elektrik Proje Mühendisi
- Kesir Mühendislik Ltd. Şti, 2012 – 2014 :Elektrik Mühendisi
- Anadolu Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 2014 - Halen :Araştırma Görevlisi

### DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Bu tezde yapılan optimizasyon çalışması ve elde edilen sonuçların bir kısmı ISTEC 2016 konferansında sunulmuştur ve yine aynı konferansa tam metin halinde makale haline getirilerek gönderilmiştir.