

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖZEL MIKNATISLAYICI TASARIMI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Y. Müh. Artun İstepan ŞABCIYAN**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2007

ÖZEL MIKNATISLAYICI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Y. Müh. Artun İstapan ŞABCIYAN
(50401103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN
Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Levent OVACIK
Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYRAK

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Sürekli mıknatıslı malzemelerin son yıllarda gelişen teknolojiye paralel olarak kullanım alanları gittikçe artmaktadır. Bu çalışmada sürekli mıknatıslar genel olarak incelenmekte ve günümüz sürekli mıknatıslı malzemeleri olan nadir-toprak sürekli mıknatıs malzemelerden biri olan NdFeB ile darbe akımlı kondansatör boşalmalı özel bir mıknatıslayıcı devre tasarımı sunulmaktadır. İleri teknoloji ürünleri olan sürekli mıknatıslı malzemelerin her geçen gün bilgisayar, elektrik, elektronik, otomotiv vb. sektörlerde daha fazla kullanılmaya başlanacağı ise açıkça gözükmektedir.

Bana bu konuda çalışma fırsatı sağlayan ve çalışmalarım sırasında benden ilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN'e, çalışmalarım boyunca iş hayatımda imkan ve zaman yaratan Mikrohost Sistem Genel Müdürü sayın Y. Elektrik-Elektronik Mühendisi Teoman Küpeli'ye ve tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

Mayıs, 2007

Artun İstapan ŞABCIYAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SİSTEMLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE GÜNÜMÜZ SÜREKLİ MIKNATIS MALZEMELERİ	3
2.1. Sürekli Miknatslı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi	3
2.2. Sürekli Miknatsların Karakteristiğini Belirleyen Büyüklükler	5
2.3. Sürekli Miknats Malzemeleri	6
2.3.1. AlNiCo sürekli miknats malzemeleri	6
2.3.2. Ferrit sürekli miknats malzemeleri	6
2.3.3. Nadir-Toprak sürekli miknats malzemeleri	7
3. SÜREKLİ MIKNATISLARIN TANIMI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ	9
3.1. Sürekli Miknatsların Tanımı	9
3.2. Ferromagnetik Malzemeler	9
3.3. Magnetik Alan Şiddeti	12
3.4. Miknatslandırma Eğrisi ve Histerezis Çevrimi	14
3.5. Sürekli Miknatslarda Demagnetizasyon	20
3.6. Sürekli Miknatsların İşletme Bölgesi Magnetik Enerjisi	21
3.7. Magnetik Geçirgenlik	22
3.8. Miknatslandırma İçin Gereken Magnetik Enerji	24
4. SÜREKLİ MIKNATISLI SİSTEMİN İNCELENMESİ	26
4.1. Basit Sürekli Miknatslı Sistem, Relüktans ve Kaçak Akı Katsayısı	26
5. MIKNATISLAYICILAR	28
5.1. Miknatslayıcı Bobini ve Kafası	28
5.2. Miknatslayıcı Enerji Besleme Devreleri	29
5.2.1. Doğru akımlı miknatslayıcılar	29
5.2.2. Darbe akımlı miknatslayıcılar	30
5.2.2.1. Kısa süreli miknatslandırma	32
5.2.2.2. Uzun süreli miknatslandırma	34
5.2.3. Ters miknatslandırma	35
5.3. Miknatslayıcı Çeşitleri	35

5.3.1. DC mıknatıslayıcılar	35
5.3.2. Yarı çevrimli mıknatıslayıcılar	36
5.3.3. Yüksek endüktanslı C tipi mıknatıslayıcılar	38
5.3.4. Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcılar	39
6. KONDANSATÖR BOŞALMALI MIKNATISLAYICI TASARIMI	45
6.1. Devrenin Çalışma Şekli	45
6.2. Tetikleme Devresi	47
6.3. Mıknatıslama Sargıları ve Magnetik Devre	48
6.4. Magnetik Parametrelerin Belirlenmesi ve Sargı Akımının Hesaplanması	49
6.5. Deneyin Yapılması	50
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53
KAYNAKLAR	55
EK A. Silikon Kontrollü Doğrultucunun Özellikleri	57
EK B. Silikon Güç Diyodu Özellikleri	63
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
AlNiCo	: Alüminyum-Nikel-Kobalt
DC	: Direct Current
DIN	: Deutsches Institut für Normung
NdFeB	: Neodim-Demir-Bor
PTC	: Positive Temperature Coefficient
SmCo	: Samaryum-Kobalt
SCR	: Silicon Controlled Rectifier

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Dört farklı tipteki sürekli mıknatısların temel özellikleri	8
Tablo 3.1. Günümüz sürekli mıknatıs malzemeleri için gerekli H_s magnetik alan şiddeti ve w_m magnetik enerji yoğunluğu	25
Tablo 5.1. Mıknatıslandırma veriminin $\omega\tau$ katsayısı ile değişimi	34

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Çinlilerin Gobi çölünü geçerken kullandığı pusula	3
Şekil 2.2 : Sürekli mıknatısların tarihsel gelişimi	5
Şekil 2.3 : Çeşitli sürekli mıknatıs malzemelerinin demagnetizasyon eğrileri	7
Şekil 3.1.1 : Ferromagnetik malzeme	11
Şekil 3.1.2 : Antiferromagnetik malzeme	11
Şekil 3.2 : Mıknatıslanma eğrisi	12
Şekil 3.3 : Ferromagnetik bir çekirdeğin mıknatıslandırılması	13
Şekil 3.4 : Maksimum magnetik geçirgenlik	14
Şekil 3.5 : Başlangıç mıknatıslandırma eğrisi	15
Şekil 3.6 : Histerezis çevriminin birinci bölgesi	16
Şekil 3.7 : Temel histerezis çevrimi	16
Şekil 3.8 : Ölçülen ve doğal gideren alan şiddeti arasındaki fark	17
Şekil 3.9 : Histerezis eğrisi	19
Şekil 3.10 : Demagnetizasyon eğrileri	20
Şekil 3.11 : (BH)max noktasının belirlenmesine ilişkin grafiksel anlatım	22
Şekil 3.12 : Sürekli mıknatıs malzemelerinde magnetik geçirgenlik kavramı	23
Şekil 4.1 : Sürekli mıknatıslı magnetik devre	27
Şekil 4.2 : Farklı relüktans değerlerindeki magnetik devreler	27
Şekil 5.1 : Doğru akım mıknatıslayıcı eşdeğer devresi	29
Şekil 5.2 : Mıknatıslayıcı bobininden akan akımın dalga şekli	30
Şekil 5.3 : Darbe akımlı mıknatıslayıcıların prensip şeması	31
Şekil 5.4 : Kısa darbeli mıknatıslandırma eşdeğer devresi	32
Şekil 5.5 : Mıknatıslandırma akımının farklı işletme biçimlerinde dalga şekli	33
Şekil 5.6 : DC mıknatıslayıcı devre	36
Şekil 5.7 : Yarı çevrimli mıknatıslayıcı	37
Şekil 5.8 : Yarı çevrimli mıknatıslayıcıda akım-gerilim eğrisi.....	37
Şekil 5.9 : C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcı	38
Şekil 5.10 : C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcıda akım eğrisi	39
Şekil 5.11 : 1944 yılına ait kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi	39
Şekil 5.12 : 1944 yılına ait kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresinin akım-gerilim eğrisi	40
Şekil 5.13 : Gelişmiş ateşlemeli mıknatıslayıcı devresi	41
Şekil 5.14 : Silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi	41
Şekil 5.15 : Çıkış transformatörü kullanılan mıknatıslayıcı devresi	42
Şekil 5.16 : Gelişmiş silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi.....	43
Şekil 5.17 : İki kutuplu kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi.....	44
Şekil 6.1 : Deney devresi	46
Şekil 6.2 : Tetikleme devresi	47
Şekil 6.3 : Tetikleme baskı devresi	48
Şekil 6.4 : Mıknatıslama sargıları	48

Şekil 6.5 : Mıknatıslayıcı magnetik devresi	49
Şekil 6.6 : N28 materyal için sargı akımının zamanla değişimi	50
Şekil 6.7 : N45 materyal için sargı akımının zamanla değişimi	51
Şekil 6.8 : Mıknatıslanmış mıknatısın çekici havada asılı tutma anı	51
Şekil 6.9 : Yumuşak çeliğin basitleştirilmiş BH eğrisi ..	52
Şekil 7.1 : Tasarlanan devre	54
Şekil 7.2 : N45 mıknatısın histografı (demagnetizasyon eğrisi).....	54

SEMBOL LİSTESİ

A_g	: Hava aralığı kesit alanı
A_m	: Mıknatısın kesit alanı
B	: Magnetik akı yoğunluğu
B_d	: Artık magnetik akı yoğunluğu
B_g	: Hava aralığındaki magnetik akı yoğunluğu
B_i	: Doğal akı yoğunluğu
B_{is}	: Doyma akı yoğunluğu
B_m	: Mıknatısın akı yoğunluğu
$(BH)_{max}$: Maksimum enerji
B_r	: Artık akı yoğunluğu
C	: Kondansatör
D	: Diyot
H_c	: Gideren alan şiddeti
H_{ci}	: Doğal gideren alan şiddeti
H_g	: Hava aralığındaki magnetik alan şiddeti
H_m	: Mıknatıs magnetik alan şiddeti
H_s	: Doyma magnetik alan şiddeti
l_g	: Hava aralığı uzunluğu
l_m	: Mıknatıs uzunluğu
i	: Akım
M	: Mıknatıslanma bobini
N	: Sarım sayısı
P_c	: Magnetik geçirgenlik katsayısı
R_d	: Boşalma direnci
S	: Şönt direnci
S_d	: Anahtar
T	: Sıcaklık
T_c	: Curie sıcaklığı
t	: Zaman
V	: Hacim
μ	: Magnetik geçirgenlik
μ_0	: Mutlak magnetik geçirgenlik
μ_d	: En büyük fark magnetik geçirgenlik
μ_i	: Başlangıç magnetik geçirgenlik
μ_r	: Bağlı magnetik geçirgenlik
μ_{max}	: Maksimum magnetik geçirgenlik
μ_{rec}	: Geritepki magnetik geçirgenliği
ω	: Açılmal hız

ÖZEL MİKNATISLAYICI TASARIMI

ÖZET

Gelişen teknolojinin ürünü olarak ortaya çıkan nadir toprak elementi sürekli mıknatıslar, sürekli mıknatıs teknolojisinin değişmesinde etkili olmuş ve özellikle, elektromekanik aygıtların gelişimine çok büyük bir etki yapmıştır. Bilindiği gibi sürekli mıknatıslar, mıknatıslanarak kazandıkları magnetik alan oluşturma yeteneğini belli koşullar altında sürdürebilen malzemelerdir. Nadir toprak elementi içeren sürekli mıknatıs malzemelerin bulunması ise, bu alanda büyük bir çığır açmıştır. Bu malzemeler sayesinde, daha küçük, daha hafif, daha yüksek kuvvet ya da moment üreten elektromekanik düzenekler yapmak olanaklı hale gelmiştir. Bu tezde, bu tip malzemelerin mıknatıslanması için kullanılan bir sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tezde öncelikle nadir toprak elementi mıknatısların özellikleri ve teknolojiye kapladıkları yer anlatılmıştır. Daha sonra günümüz teknolojisini kullanan mıknatıslayıcı sistemler incelenmiş ve tasarım parametreleri ve ölçütleri üzerinde durulmuştur. Bu sistemlerin, öncelikle oluşturdukları magnetik akı yoğunluğu ve mıknatıslama enerjisi incelenmiş ve daha sonra bu istenen değerleri sağlayacak güç elektroniği düzenekleri incelenmiştir.

Tez kapsamında, pratik bir kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi tasarlanmıştır. Güç elektroniği devresi doğrultucu, gerilim katlayıcı, kondansatörler ve kontrollü anahtardan oluşmaktadır. Mıknatıslayıcının magnetik devresi de ayrıca tasarlanmış ve üretilmiştir. Özel bir yumuşak demirden imal edilen magnetik devre, değişik küçük boyutlu mıknatısları mıknatıslayacak biçimde yapılmıştır. Sistemin çalışma değerlerini belirlemek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler ve alınan sonuçlar, tasarlanan mıknatıslayıcının, öngörülen işlevleri yerine getirdiğini göstermiştir.

DESIGN OF SPECIAL MAGNETIZER

SUMMARY

Rare earth elements, come into being as a result of improving technology, effected the technology of permanent magnet change and especially development of electromechanical devices. It is obvious that, permanent magnets are materials having the ability to keep up their effect to magnetize under the certain conditions. Discovery of the permanent magnet materials including rare earth material has opened a new era. By means of these materials, it is facilitated to make up smaller, lighter, higher force or torque electromechanic designs. In this thesis, it has been aimed to improve a system that magnetizes this type of materials.

Initially, the specifications of rear earth magnets and their place in technology has been put forward. After that, the magnetizers using recent technology has been studied and design parameters and measurements have been focussed on. In this systems, the first interest has been on magnetic flux density and magnetizing energy and later on the focus has been to make targeted values on power electronic devices.

Practical capacitor discharge magnetizer has been designed in the content of this thesis. It is consistent of power electronic circuit, rectifier, voltage doubler, capacitors and controlled switch. Magnetic circuit of magnetizer has been also produced and designed. The magnetic circuit produced by a special soft iron has been made to magnetize different magnets with small dimensions. Different experiments have been carried out to figure out the operating values of the system. Experiments and the results of them have manifested that the designed have fullfilled their expected functions.

1. GİRİŞ

Sürekli mıknatısların, günümüz teknolojisinin oluşmasında oldukça önemli bir katkısı vardır. Bu katkı sayesinde, özellikle elektrik motorları bugünkü ileri seviyesine ulaşmıştır.

Sürekli mıknatıslı motorlar diğer sargılı motorlara göre daha performanslı, uzun ömürlü, çok daha küçük ve hafiftir. Sürekli mıknatıslı motorlar şekil ve boyut açısından diğer motorlara göre daha esnektir. Bu özellik sürekli mıknatısların uzay ve otomotiv sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmasına neden olmaktadır.

Yukarıda saydığımız üstün özellikleri sayesinde sürekli mıknatıslı motorlar gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Günümüz sürekli mıknatıs malzemeleri ve bu malzemelerin mıknatıslandırılmasında kullanılan araçların önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemiz endüstrisine sürekli mıknatıslı sistemleri tanıtmak, sürekli mıknatıslı malzeme için pratik bir kondansatör boşalmalı darbe akımlı mıknatıslayıcı devresi tasarlamak ve tasarlanan mıknatıslayıcının imalatını gerçekleştirerek, bu devrenin uygun mıknatıslama enerjisi üretmesini sağlamaktır.

Kuşkusuz ki tasarlanan mıknatıslayıcı yalnızca küçük hacimli mıknatıslar için kullanılması gerektiği dikkate alınmalıdır. Beşinci bölümde anlatıldığı gibi mıknatıslama enerjisi mıknatısın hacmiyle doğru orantılıdır. Bu nedenle endüstriyel boyuttaki mıknatıslayıcıların daha büyük hacimli olması gerekir.

İkinci bölümde tarihsel süreç içerisinde, sürekli mıknatıslı malzemelerinde yaşanan gelişmeler, bu malzemelerin kullanım alanları, temel özellikleri ve karakteristiklerini belirleyen faktörler açıklanacaktır.

Üçüncü bölümde sürekli mıknatıslarla ilgili temel kavramlar ve sürekli mıknatısların özbüyükölük değerleri bakımından ulaşabileceği sınır değerleri açıklanacaktır.

Dördüncü bölümde sürekli mıknatıslı sistemler incelenecek, mıknatıs tipi ve boyutları belirlenirken dikkat edilecek hususlar açıklanacaktır.

Beşinci bölümde sürekli mıknatısların mıknatıslandırılmasında kullanılan, mıknatıslayıcı adı verilen araçlar ve çeşitleri incelenecektir. Günümüz sürekli mıknatıs malzemelerinin özbüyüklik değerleri bakımından oldukça yüksek değerlere ulaşmış olması, mıknatıslayıcıların imalatında ve tasarımında birtakım güçlüklerin oluşmasına neden olmuştur.

Altıncı bölümde NdFeB sürekli mıknatıs malzemesi kullanılarak kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi tasarlanarak magnetik alanı oluşturan darbe akımı ve magnetik enerji osiloskop vasıtasıyla gözlemlenecektir.

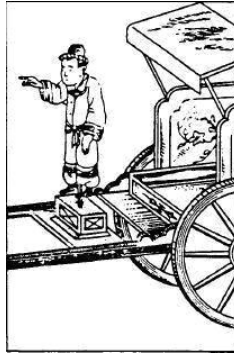
Yedinci ve son bölümde ise elde edilen veriler değerlendirilecektir.

2. SÜREKLİ MIKNATISLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ VE GÜNÜMÜZ SÜREKLİ MIKNATIS MALZEMELERİ

2.1 Sürekli Mıknatıslı Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Bilinen en eski doğal sürekli mıknatıs malzemesi Fe_3O_4 'ün bir çeşidi olan, "loadstone" adı verilen mıknatıs taşlarıdır. Zaman içerisinde bu malzeme ilk bulunduğu yer olan Thessalya'daki Magnesia (bugünkü Manisa yakınları) bölgesinin ismini alarak, mıknatıs şekline dönüşmüştür.

Sürekli mıknatıs özelliği gösteren malzemelerin ilk bulunması ve bu malzemelerin magnetik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili ilk bilimsel çalışmaların batı uygarlığında olmasına rağmen, bu malzemelerden yapılan ilk araçlar doğu uygarlığındadır. Bu araçların en çok bilineni Çinlilerin Gobi Çölünü geçerken yön bulmakta kullandıkları araçlardır [1].



Şekil 2.1 : Çinlilerin Gobi çölünü geçerken kullandığı pusula [1]

I.Ö.600 ve I.Ö.200 yılları arasında, birçok Yunan filozofu mıknatıs taşlarının birbirlerini çekme özelliğine sahip olduğunu belirtmiştir. Daha sonraları ise Lucetius "De Naturarum" adlı eserinde bu taşların birbirlerini itebildiğini de belirtmiştir [2].

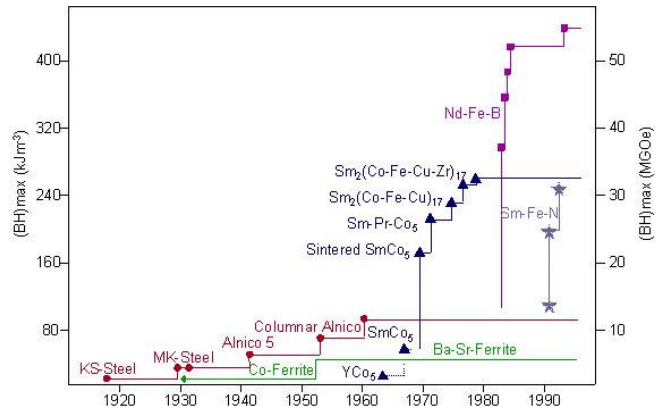
Sürekli mıknatıslarla ilgili ilk bilimsel incelemeyi William Gilbert yapmıştır, daha sonra onu Canton, Aepinus, Coulomb ve Jamin izlemiştir. William Gilbert, 1600 yılında yayınladığı "De Magnete Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physidogia Nova" adlı araştırmasında mıknatıs taşlarının özelliklerini incelemiş ve bu taşların demire magnetik özellik kazandırabileceğini belirlemiştir. Gilbert'in bu eseri, fizik çalışmalarının bilimsel verilerle desteklenmesi gerekliliğini gösteren ilk çalışma olması nedeniyle ayrı bir öneme sahiptir [2].

1675 yılında Boyle mıknatıs malzemelerinin fiziksel özelliklerinin değiştirilmesiyle magnetik özelliklerinin değiştirilemeyeceğini, magnetik özelliklerin malzemenin iç yapısının bir sonucu olduğunu belirterek Gilbert'in gözlemlerini doğrulamıştır. Bu dönem içerisindeki diğer bir önemli gelişme ise 1831 yılında Faraday'ın elektrik motorlarının temelini oluşturan ünlü deneyinde kullandığı at nalı biçimli mıknatısın üretilmesi olmuştur.

1831 yılında ilk elektrik motorunun imal edilmesinden sonra, 19. yüzyılın sonlarında imal edilen tungsten, krom ve kobalt çeliği mıknatıslarının magnetik enerji yoğunluğunun olması nedeniyle ancak düşük güçlü sürekli mıknatıslı motorlar imal edilebilmiştir. 1930'lu yıllarda Tokyo Üniversitesinde yüksek akı yoğunluğu ve kabul edilebilir enerji düzeyindeki AlNiCo mıknatıslarının imal edilmesi ile Bell laboratuvarlarında birkaç HP gücündeki ticari amaçlı sürekli mıknatıslı motorların imalatına başlanmıştır. Uzay ve askeri amaçlı uygulamalar için ise birkaç kW gücünde sürekli mıknatıslı motorlar imal edilmiştir. Ancak AlNiCo malzemesinin yasak alan şiddetinin oldukça düşük olması, bu motorlar üzerine sınırlama getirmiştir.

1950'li yıllarda seramik veya sert Ferrit olarak adlandırılan sürekli mıknatıs malzemelerinin geliştirilmesiyle sürekli mıknatıslı makinaların hem ticari hem de özel amaçlı uygulamaları artmıştır. Ferrit sürekli mıknatıs malzemelerinin artık akı yoğunlunun AlNiCo'lara göre düşük olmasına rağmen gideren alan şiddetinin yüksek olması, AlNiCo mıknatıslı motorlarda yaşanan endüvi tepkisi sorunu ve değişik çevre koşullarına uyum sorununu çözümlenmiştir. Günümüz otomobil, uzay ve kontrol araçlarındaki elektrik motorlarının büyük bir kısmı Ferrit sürekli mıknatıslarından imal edilmektedir [3].

Sürekli mıknatıs malzemeleri ile ilgili bir sonraki gelişme ise 1960 yılında ticari amaçlı nadir toprak sürekli mıknatıslarının imal edilmesi olmuştur. İlk nadir toprak sürekli mıknatıslar samaryum - kobalt alaşımından oluşmaktaydı. Bu alaşımın artık akı yoğunluğu AlNiCo'lerden ve gideren alan şiddeti de sert Ferrit'ten daha yüksektir. Ancak kobalt madeninin stratejik öneme sahip bir malzeme olması nedeniyle bu alaşımlardan imal edilen sürekli mıknatıslar oldukça pahalıdır. Nadir-toprak sürekli mıknatıs malzemeleri ile ilgili en son gelişme en iyi samaryum-kobalt alaşımının özelliklerine sahip, ancak ondan çok daha ucuz olan neodim-demir-bor (NdFeB) alaşımının imal edilmesi olmuştur [3].



Şekil 2.2 : Sürekli mıknatısların tarihsel gelişimi [10]

2.2 Sürekli Mıknatısların Karakteristiğini Belirleyen Büyüklükler

Kalıcı magnetik akı yoğunluğu (B_r) : Sıfır magnetik alan şiddetine göre olan magnetik akı yoğunluğudur. B_r 'nin yüksek olması; mıknatısın, magnetik devrenin hava aralığındaki daha yüksek magnetik akı yoğunluğunu desteklemesini sağlar.

Gideren (coercive) alan şiddeti (H_c) : Daha önceden mıknatıslanmış malzemede magnetik akı yoğunluğunu sıfıra getirecek demagnetizasyon alan yoğunluğunun değeridir. Demagnetizasyon alanına yüksek H_c değerine sahip daha ince bir mıknatısla karşı konulabilir.

Geritepki magnetik geçirgenliği (μ_{rec}) : Magnetik akı yoğunluğunun herhangi bir demagnetizasyon eğrisi noktasındaki magnetik alan şiddetine oranıdır.

Maksimum magnetik enerji (BH_{max}) : Boşlukta bir daimi mıknatıs tarafından tek başına üretilen magnetik enerji, bir hacimdeki maksimum magnetik enerji yoğunluğuna eşittir.

2.3 Sürekli Mıknatıs Malzemeleri

Doğada var olan maddeler magnetik geçirgenlik bakımından magnetik olan ve olmayan maddeler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Magnetik olmayan bütün maddelerin magnetik geçirgenliği boşluğun magnetik geçirgenliğine eşittir ve değeri $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$ H/m'dir. Magnetik malzemeler de kendi içlerinde ikiye ayrılarak ferromagnetik ve ferrimagnetik malzemeleri oluşturmaktadır. Ferrimagnetik malzemeler sert ferromagnetik malzemeler olarak da adlandırılır. Bu malzemeler doğal halde magnetik olan demir, nikel ve kobalt elementlerinden bir tanesini içermektedir. Ferromagnetik malzemeler ise bazen sert Ferrit olarak adlandırılır ve baryum veya stronsiyum içeren demir oksit malzemelerdir [4].

2.3.1 AlNiCo Sürekli Mıknatıs Malzemeleri

AlNiCo'nun en önemli özelliği yüksek kalıcı magnetik akı yoğunluğu ve düşük sıcaklık sabitidir. Bu özellikler biraz yüksek hava aralığı akı yoğunluğu ve yüksek çalışma sıcaklığı sağlar. (AlNiCo alaşımlarının Curie sıcaklığı oldukça yüksektir (700-800°C).

Curie sıcaklığı sürekli mıknatıs malzemesinin magnetik özelliklerini kaybetmeye başladığı en yüksek sıcaklık değeri olarak tanımlanmaktadır ve sürekli mıknatısın işletme koşullarının belirlenmesi bakımından önemlidir. Ancak gideren kuvvet çok düşüktür ve demagnetizasyon eğrisi aşırı derecede doğrusal değildir. Bu yüzden onu mıknatıslandırmak kadar demagnetize etmek de çok kolaydır. AlNiCo kısmen geniş hava aralıklı daimi mıknatıslı disk motorlarında kullanılır.

2.3.2 Ferrit Sürekli Mıknatıs Malzemeleri

Ferrit, AlNiCo'dan daha yüksek gideren kuvvete sahipken aynı zamanda düşük kalıcı magnetik akı yoğunluğuna sahiptir. Sıcaklık sabitleri de kısmen yüksektir. Ferrit'lerin en önemli özellikleri düşük maliyetleridir. Baryum Ferrit sürekli

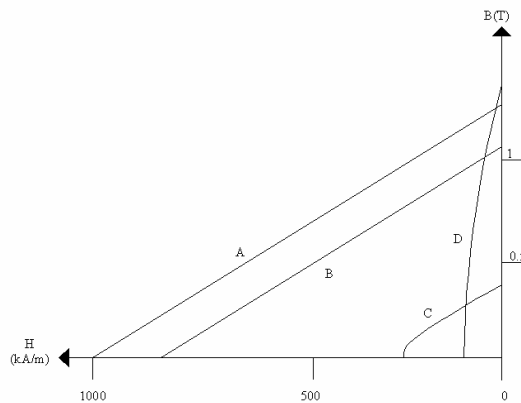
mıknatıslar otomotiv sektörü için küçük doğru akım kollektörlü fan motorlarında ve silecek motorlarında kullanılır.

Ferit'ler tozdan basım teknolojisi ile üretilirler. Kimyasal formülleri $MO_6Fe_2O_3$ olarak açıklanır. Burada M; Baryum, Stronsiyum ya da Kurşundur. Stronsiyum Ferrit, Baryum Ferrit' ten daha büyük gideren kuvvete sahiptir. Kurşun Ferrit'ler çevresel açıdan üretim dezavantajına sahiptir.

2.3.3 Nadir Toprak Sürekli Mıknatıs Malzemeleri

Nadir-toprak sürekli mıknatısların keşfedilmesi ile birlikte son yirmi yıl boyunca (BH)max enerji yoğunluğunda büyük gelişmeler yaşandı. Nadir-toprak malzemelerin ilk örnekleri samaryum-kobalt ($SmCo_5$) karışımına dayanıyordu. 1960'lı yıllarda keşfedilmiş ve ticari olarak üretimine 1970'li yılların başında başlanmıştır. $SmCo_5$, yüksek kalıcı akı yoğunluğu, yüksek gideren kuvvet, yüksek enerji, lineer demagnetizasyon eğrisi ve düşük sıcaklık katsayısı avantajına sahiptir. Küçük boyutta yüksek güç ve düşük eylemsizlik momenti istenen motorlarda kullanımı çok uygundur. Kaynak sıkıntısı nedeni ile malzemenin pahalı olması maliyeti olumsuz etkilemektedir.

Son yıllarda birleşimi fazla pahalı olmayan neodim (Nd) ve demir (Fe)'e dayanan ikinci jenerasyon nadir-toprak sürekli mıknatısın keşfedilmesi ile malzeme maliyetinin düşürülmesinde önemli bir adım atıldı. Nd, Sm'dan daha bol bulunan bir elementtir.



Şekil 2.3 : Çeşitli sürekli mıknatısların demagnetizasyon eğrileri (A) Sinterlenmiş NdFeB, (B) SmCo, (C) Ferit, (D) AlNiCo

Günümüzde artan miktarda üretilen NdFeB mıknatıslar SmCo mıknatıslardan sadece oda sıcaklığı şartında daha iyi magnetik özelliklere sahiptir. Demagnetizasyon eğrisi, özellikle gideren kuvvet, sıcaklığa çok bağlıdır. Bunun yanısıra NdFeB mıknatıs korozyona karşı da duyarlıdır. Performans maliyet oranının gelişmesinde büyük bir potansiyel oluşturulacak olan NdFeB mıknatıs, gelecekte sürekli mıknatıs uygulamalarında önemli bir yer edinecektir.

Tablo 2.1: Dört farklı tipteki sürekli mıknatısların temel özellikleri

Malzeme	B_r (T)	H_c (A/m)	$(BH)_{\max}$ (J/m ³)	H_{ci} (A/m)	T_{\max} (°C)	T_{curie} (°C)
NdFeB	12800	12300	40	21000	150	310
SmCo	10500	9200	26	10000	300	750
AlNiCo	12500	640	5.5	640	540	860
Ferrit	3900	3200	3.5	3250	300	460

3. SÜREKLİ MIKNATISLARIN TANIMI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

3.1 Sürekli Mıknatısların Tanımı

Sürekli bir mıknatıs malzemesi, bir dış magnetik alan tarafından mıknatıslandırıldıktan sonra bu dış alanın kalkmasına rağmen, magnetik malzeme kendiliğinden bir magnetik alan oluşturmaya devam eder. Kısaca bir sürekli mıknatıs, elektrik akım kaynağından bağımsız bir magnetik alan kaynağı olarak düşünebilir.

Bir sürekli mıknatıs malzemesinin davranışının anlaşılabilmesi için malzemenin kimyasal yapısının ve etrafındaki magnetik alanın tam olarak belirlenmesi gerekir.

Faradayın temel akı yoğunluğu tanımına göre, bir sürekli mıknatıstaki magnetik akı yoğunluğu, iki bileşenin aritmetik toplamından oluşmaktadır. Bileşenlerden bir tanesi, bir dış magnetik alanın varlığı nedeni ile oluşmaktadır ve mıknatısa etki eden gerçek mıknatıslandırma kuvvetidir. Diğer bileşen ise mıknatısın ferromagnetik doğası gereği oluşan doğal bileşeni B_i 'dir. Bu bileşen magnetik malzemenin ortamdaki magnetik alana katkısıdır [2].

$$B = \mu_0 \times H + B_i \quad (3.1)$$

3.2 Ferromagnetik Malzemeler

Faraday, yaptığı araştırmalar sonunda tüm maddelerin, magnetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı maddelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir.

i) Diamagnetik Maddeler : Bağlı magnetik geçirgenlikleri $\mu_r < 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler.

Diamagnetizma, tek sayıda elektronlara sahip ve tamamlanmamış içi kabuğu olmayan maddelerde görünür. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamagnetik gruba girerler.

ii) Paramagnetik Maddeler : Bağıl magnetik geçirgenlikleri $\mu_r > 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler. Paramagnetizma çift sayıda elektronlara sahip maddelerde görülür. Hava, alüminyum ve silisyum paramagnetik gruba girer.

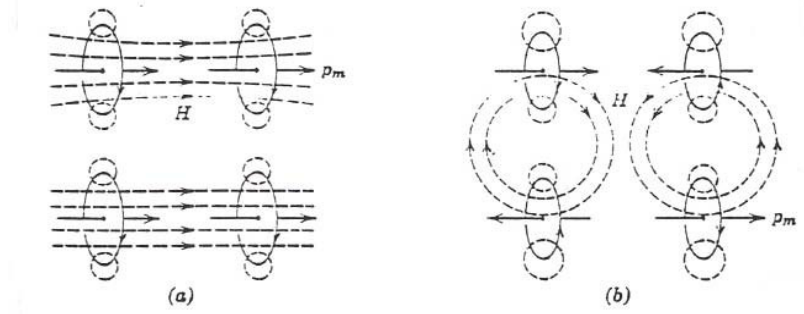
iii) Ferromagnetik Maddeler : Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren maddeler bu gruba girer.

Diamagnetik ve paramagnetik maddelerin bağıl magnetik geçirgenlikleri 1 civarındadır. Bu nedenle uygulama her iki maddeler için $\mu_r = 1$ alınır.

Yukarıda da belirtildiği gibi bir malzemenin atomları, çekirdekleri etrafında yaptıkları yörüngesel hareket yanında kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar. Bu hareketler malzemenin magnetik özelliklerini belirler. Elektrik alanı içinde bulunan duran ya da hareket eden bir elektrik yükü, elektriksel bir kuvvetin etkisi altında kalır. Buna karşın magnetik alan içinde bulunan bir yük, ancak hareket ettiği zaman bir magnetik kuvvetin etkisinde kalır. Bu nedenle her bir elektron kendi eksenini etrafında yaptığı dönme hareketi sonucunda bir magnetik moment meydana getirir. Çoğu atomda, elektronların simetrik olarak dizimi nedeniyle net magnetik moment sıfırdır. Sadece elektronların iç kabuğu tamamlanmamış atomlarda magnetik moment söz konusudur. Başka bir deyişle magnetik moment, kendi eksenleri etrafındaki dönme yönü ters olan elektronlarla birleşmeyen elektronların, kendi eksenleri etrafındaki hareketi sonucunda meydana gelir.

Atomik sayıları 21 ile 28, 39 ile 45, 57 ile 78 arasında ve 89 ve büyük olan malzemelerde magnetik moment söz konusudur. En önemli aralık 21 ile 28 arasında olup, bu aralıkta bulunan vanadyum, krom, manganez, demir, nikel, kobalt ve bunların alaşımlarında net magnetik moment sıfırdan farklıdır. Bu malzemelere ferromagnetik malzemeler adı verilir. Bu gibi malzemelerde birbirine komşu atomların dizilimleri Şekil 3.1.1'deki gibi olup, yapıları nedeniyle elektronlarının döngü eksenleri hep aynı yönde olduğundan net magnetik moment sıfırdan farklıdır. Bunun yanında magnetik momentleri, Şekil 3.1.2'deki gibi birbirine ters olan

malzemelerde net magnetik moment sıfır olup, bu malzemelere antiferromagnetik malzeme adı verilir. Ferromagnetik malzemelerde magnetik akı, atomların sıralanma yönü doğrultusu boyunca bir süreklilik içindedir. Buna karşın antiferromagnetik malzemelerde, akı sadece komşu magnetik momentleri halkalar (Şekil 3.1.2) ve akım taşıyan diğer bobinleri (atomları) halkalamaz [6].



Şekil 3.1.1 : Ferromagnetik malzeme **Şekil 3.1.2 :** Antiferromagnetik malzeme

Ferromagnetik maddeler magnetik özellik bakımından, diamagnetik ve paramagnetik maddelere göre ayrıcalık gösterir.

1-Bağıl magnetik geçirgenlikleri 1'den çok büyüktür.

2-Bağıl magnetik geçirgenlikleri, malzemenin cinsine, malzemeye daha önce uygulanan magnetik işlemlere ve magnetik alan şiddetinin değerine bağlı olarak değişkendir.

3-Paramagnetik ve diamagnetik maddelerde B magnetik akı yoğunluğu (endüksiyon)

ile H alan şiddeti arasında doğrusal bir ilişki varken, ferromagnetik malzemelerde

bu ilişki doğrusal değildir.

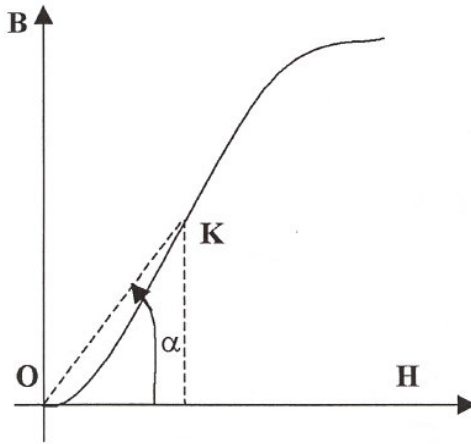
4-Magnetik histerezise sahiptirler.

5-Ferromagnetik maddeler Curie sıcaklığı üzerinde paramagnetik malzeme durumuna geçerler [8].

3.3 Magnetik Alan Şiddeti

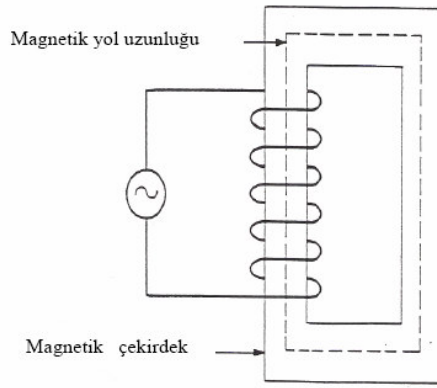
Elektrik akımı taşıyan bir iletkenin bulunduğu ortamda meydana gelen magnetik alan ile bu akım arasındaki fiziksel ilişki, magnetik alan şiddeti olarak adlandırılan H ile belirlenir. Uluslararası birim sisteminde, $[A/m]$ simgesi ile gösterilen amper/m ile ölçülür. Bir sistemde i akımının varlığı, magnetik akı yoğunluğunun oluşmasına yol açan magnetik alan şiddetine neden olur. Herhangi bir noktadaki magnetik akı yoğunluğu, H magnetik alan şiddeti yanında ortama da bağlıdır. Ortam, magnetik geçirgenlik ya da permeabilite olarak adlandırılan fiziksel bir büyüklükle belirlenir. Magnetik geçirgenlik (permeability), malzemenin akıyı iletme yeteneğidir. Belli bir akı yoğunluğundaki (endüksiyondaki) magnetik geçirgenliğin genliği, bu noktadaki kolay mıknatıslanmanın bir ölçütüdür. Yukarıda da belirtildiği gibi para ve diamagnetik malzemelerde magnetik akı yoğunluğunun H magnetik alan şiddetine göre değişimi doğrusaldır. Bu nedenle bu tür malzemelerde magnetik geçirgenlik sabittir. Buna karşın ferromagnetik malzemelerde H alan şiddetindeki küçük bir değişim, B magnetik akı yoğunluğunda büyük değişikliklere neden olur. Dolayısı ile magnetik geçirgenlik ferromagnetik malzemelerde magnetik akı yoğunluğu H 'ın belli bir değerine kadar sabit kalırken, bu değerden sonra doğrusallıktan ayrılır.

$$\mu = B / H \quad (3.2)$$



Şekil 3.2 : Mıknatıslanma eğrisi

Şekil 3.2’de başlangıçta mıknatıslanmamış olan bir malzemenin mıknatıslanma eğrisi verilmiştir. Bu eğriyi çizmek için ferromagnetik malzemedan yapılmış uygun bir çekirdek hazırlanıp, üzerine sarılan (yerleştirilen) ve uyarma sargısı olarak adlandırılan sargıdan akım geçirerek mıknatıslamak gerekir (Şekil 3.3). Eğri üzerinde herhangi bir noktadaki magnetik geçirgenlik, magnetik akı yoğunluğunun alan şiddetine olan oranı ile hesaplanır. Bu değer, eğri üzerinde alınan noktanın O noktası ile bileştirilerek elde edilen doğrunun, yatay H eksenine ile yaptığı açının tanjantı ile orantılıdır. Orantı katsayısı, B ve H için seçilen ölçeklere bağlıdır. O’dan eğriye çizilen teğetin eğriye değdiği noktada magnetik geçirgenlik maksimumdur [6].



Şekil 3.3 : Ferromagnetik bir çekirdeğin mıknatıslanması

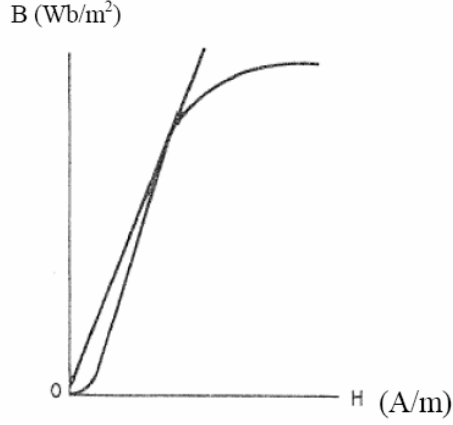
Birbirinden farklı olan bir çok magnetik geçirgenlik tanımı vardır. Bunlar farklı indislerle gösterilir.

μ_o : Mutlak magnetik geçirgenlik. Boşluğun magnetik geçirgenliğidir. $4 \times \pi \times 10^{-7}$ [Wb/(Amper-sarım metre)]

μ_i : Başlangıç magnetik geçirgenlik

μ_r : Bağlı magnetik geçirgenlik. Boşluğa göre malzemenin magnetik geçirgenliğidir.

μ_{max} : Maksimum magnetik geçirgenlik (Şekil 3.4).

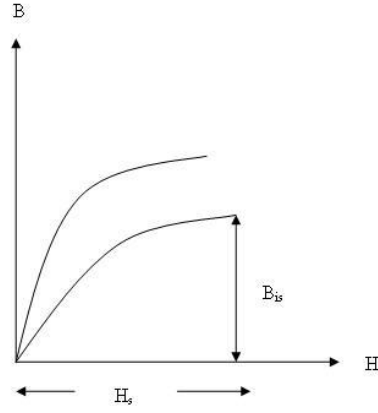


Şekil 3.4 : Maksimum magnetik geçirgenlik

3.4 Mıknatıslandırma Eğrisi ve Histerezis Çevrimi

Magnetik malzemelerin en önemli özelliklerinden bir tanesi, malzemede oluşan akı yoğunluğu B ile magnetik alan şiddeti H arasındaki bağıntının doğrusal olmamasıdır. Doğrusal olmayan bu eğrinin bilinmesi, magnetik malzemelerin karşılaştırılması ve kullanımı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle her bir malzemenin $B = f(H)$ eğrisinin çok büyük bir doğrulukla elde edilmesi gerekmektedir. Birçok mühendislik uygulamasında, bu eğri de yeterli bulunmayarak doğal akı yoğunluğuna ilişkin $B_i = f(H)$ eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu eğri (3.1) bağıntısı yardımı ile $B = f(H)$ eğrisinden belirlenmektedir [2].

Doğal akı yoğunluğu B_i , ölçülen akı yoğunluğunun ferromagnetik ve ferrimagnetik malzemenin tek başına oluşturduğu bileşenidir. Bu iki akı yoğunluğu kavramı birbirinden şu şekilde ayrılmaktadır. Magnetik alan şiddeti pozitif yönde arttırıldıkça doğal akı yoğunluğu B_i sınır değeri B_{is}' ye yaklaşır. Oysa ki, ölçülen akı yoğunluğu B magnetik alanın artış kapasitesine göre artmaya devam eder. Doğal akı yoğunluğunun bu sınır değerine doyma akı yoğunluğu B_{is} denir. Bu değer malzemenin karakteristik özelliğine ve kimyasal yapısına bağlıdır (Şekil 3.5). [2]

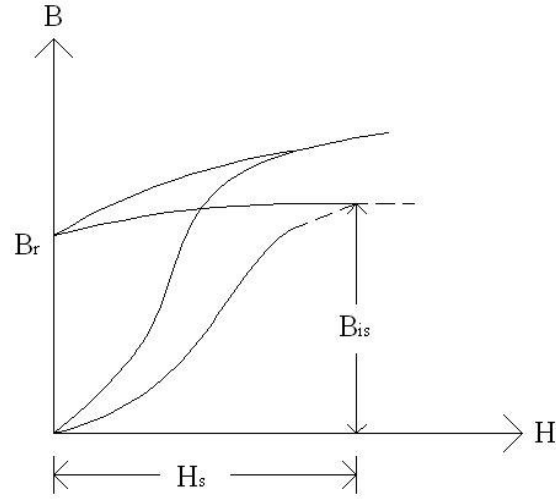


Şekil 3.5 : Başlangıç mıknatıslandırma eğrisi

Bir sürekli mıknatıstan faydalı kullanım sağlamak için, mıknatısın mıknatıslandırılması esnasındaki mıknatıslandırma magnetik alan şiddetinin malzemedeki tüm magnetik bölgelerin yeniden yönlendirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için gerekli olan magnetik alan şiddetine malzemenin doyuma ulaştığı magnetik alan şiddeti H_s diyoruz. Pratikte H_s değeri, malzemenin doğal gideren alan şiddetinin beş veya altı katı kadardır [7].

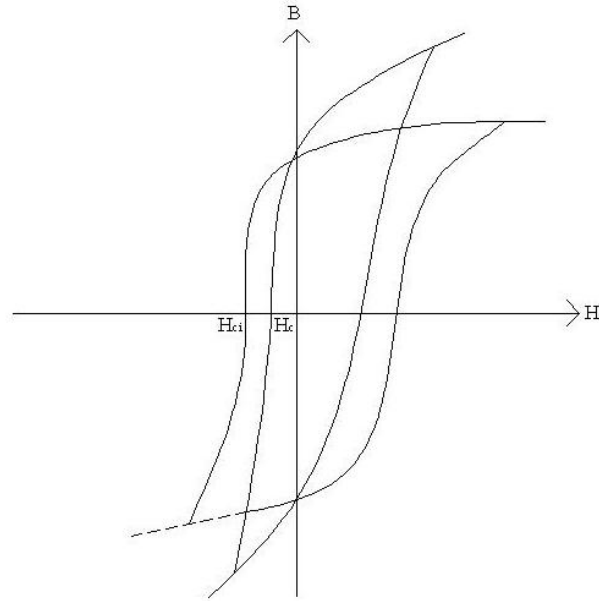
Magnetik malzeme doyuma ulaştıktan sonra, mıknatıslandırma magnetik alan şiddeti yavaş yavaş azaltılırsa, akı yoğunluğu başlangıçta izlediği eğri üzerinden değil yeni bir eğri üzerinden azalmaya başlar (Şekil 3.6). Mıknatıslandırma magnetik alan şiddetinin sıfıra ulaştığı noktada akı yoğunluğu artık bir değer olan B_r değerine ulaşır. Eğer mıknatıslandırma magnetik alan şiddeti ters yönde artırılmaya devam edilirse malzemedeki akı yoğunluğu azalmaya devam edecek ve magnetik alan şiddetinin gideren alan şiddeti değerine erişmesi ile akı yoğunluğu sıfır değerine ulaşacaktır. Magnetik alan şiddetinin ters yönde artırılmasıyla birinci bölgedeki özeğrinin simetriği olan bir özeğri oluşur. Bu özeğriye Histerezis eğrisi adı verilir.

Sürekli mıknatıslarla ilgili uygulamalarda mıknatıs yüzeyinde ölçülen magnetik alan şiddeti ile mıknatısın doğal akı yoğunluğu ters işaretlidir. Bu nedenle sürekli mıknatıslarla ilgili yapılan tüm incelemelerde Histerezis eğrisinin ikinci veya dördüncü bölgesi kullanılmaktadır.



Şekil 3.6 : Histerezis çevriminin birinci bölgesi

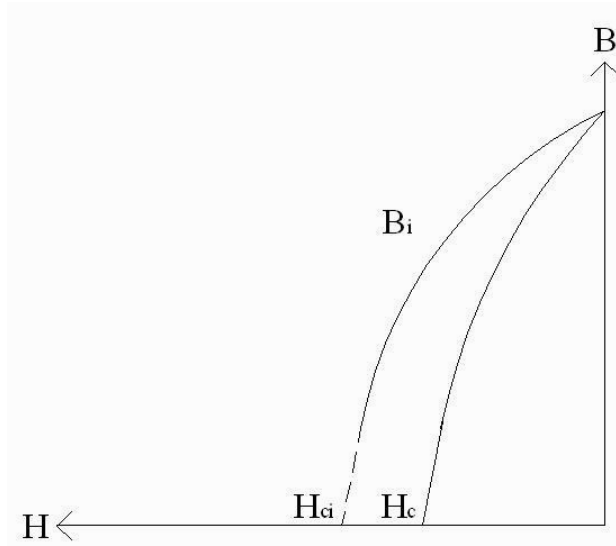
Şekil 3.7’deki özeğriden görüldüğü gibi özeğrinin ikinci ve dördüncü bölgesindeki mıknatıslandırma magnetik alan şiddeti ile akı yoğunluğu şiddeti ters işaretlidir [2].



Şekil 3.7 : Temel Histerezis çevrimi

Temel Histerezis eğrisinin akı yoğunluğu eksenini kestiği nokta artık akı yoğunluğu B_r olarak adlandırılır. Bu büyüklük sürekli mıknatısın temel özbüyüklüklerindedir. Bu büyüklüğün değeri ne kadar büyükse, sürekli mıknatısın kesiti o kadar küçük olur.

Temel Histerezis çevrimindeki ölçülen akı yoğunluğu ve doğal akı yoğunluğu eğrileri magnetik alan şiddeti doğrusunu farklı iki noktada keser. Doğal akı yoğunluğu eğrisinin magnetik alan şiddeti doğrusunu kestiği noktaya doğal gideren alan şiddeti H_{ci} , ölçülen akı yoğunluğu eğrisinin magnetik alan şiddeti doğrusunu kestiği noktaya ise ölçülen gideren alan şiddeti H_c denilmektedir. Tanım olarak gideren alan şiddeti bir sürekli mıknatısın mıknatıslığını gidermeye çalışan bir dış magnetik alana karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Gideren alan şiddeti sürekli mıknatıs malzemelerinin bir diğer önemli öz büyüklüğüdür. Gideren alan şiddetinin değeri ne kadar büyükse, sürekli mıknatısın boyu o kadar kısa olur (Şekil 3.8) [2].



Şekil 3.8 : Ölçülen ve doğal gideren alan şiddeti arasındaki fark

Doğal ve ölçülen akı yoğunluğuna ilişkin bu eğriler farklı amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Doğal akı yoğunluğuna ilişkin eğri bir dış alandaki sürekli mıknatısın etkinliğinin belirlenmesinde, ölçülen akı yoğunluğu eğrisi ise hava aralığında biriktirilen magnetik enerjinin önem kazandığı mıknatıs boyutlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

H_c ölçülen gideren alan şiddetinin değerine göre magnetik malzemeler, yumuşak ve sert magnetik malzemeler olarak sınıflandırılırlar. Öyleki H_c ' ye göre,

$H_c < 1000$ A/m : Yumuşak malzeme

$H_c > 1000$ A/m : Sert malzeme

şeklinde tanımlanır. Elektromekanik enerji dönüşümü yapan sistemler ve transformatörlerde yumuşak malzemeler kullanılır. Buna karşın ölçü aletleri ve daimi mıknatıslı küçük elektrik motorlarında magnetik alanı büyütecek uyarma sargısının bulunmaması nedeniyle sert malzemeler kullanılır.

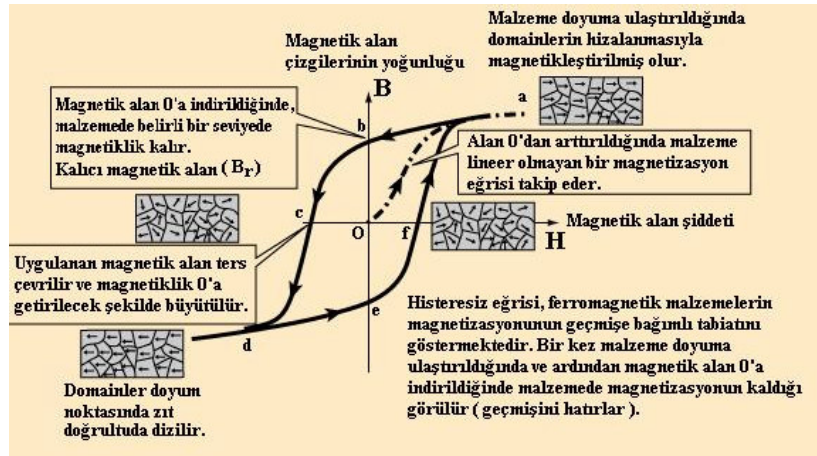
Histerezis çevrimi, bir magnetik malzemenin bir çekirdeğin mıknatıslanırken ısı olarak kaybedilen enerjinin bir ölçüsüdür. Histerezis çevriminin elde edilmesinde en uygun yol, doğru akım kullanılmasıdır. Uyarma sargısında doğru akımın kullanılması ile magnetik alan şiddetinin yavaş değişimi sağlanacaktır. Böylece malzemede girdap akımlarının (eddy akımları) oluşumu önlenmiş olunacak, bunun sonucunda da histerezis kayıplarının daha sağlıklı bir şekilde belirlenmesi söz konusu olacaktır. Bu yolla elde edilen histerezis çevrimi, bir mıknatıslanma periyoduna karşılık düşer ve statik histerezis çevrimi olarak adlandırılır. Alternatif akım kullanılması durumunda mıknatıslanma periyodu sürekli olarak tekrarlandığından histerezis çevrimi dolayısıyla histerezis kaybı, uygulanan akımın periyoduna, başka bir deyişle frekansına bağlı olur.

Histerezis kaybı, bir alternatif alana maruz kalan magnetik saçın ya da çekirdeğin toplam kaybı yerine sadece bir kısmını gösterir. Bilindiği gibi Faraday yasasına göre zamanla değişen bir alan içinde bulunan iletken ve magnetik malzemelerde bir gerilim endüklenir. İşte malzemede endüklenen bu gerilim sonucunda oluşan küçük elektrik akımları girdap akımları ya da Eddy akımları olarak bilinir. Bu akımların genlikleri (büyüklükleri); frekans ve magnetik akı yoğunluğu yanında malzemenin özgül direnci ve kalınlığına bağlıdır. İşte hem histerezis, hem de girdap akımları kayıplarını içeren histerezis çevrimine dinamik histerezis çevrimi adı verilir [6].

Ferromagnetik malzemelerin magnetizasyon eğrileri histerezis eğrileri olarak adlandırılır (Şekil 3.9). Bu eğriler, malzemenin kimyasal kompozisyonu ile değişim gösterir. Mıknatıslığı tamamen giderilmiş bir malzemeye değişken bir dış magnetik alan uygulandığında, bu alan ile akı yoğunluğu ölçülerek histerezis eğrisi çizilebilir. Histerezis, ferromagnetik malzeme kütesine etki eden magnetik alan şiddeti değiştirildiğinde, magnetik etkinin gecikmesi anlamına gelmektedir. Eğrinin düşey eksenini B , malzemedeki akı yoğunluğunu, H ise uygulanan alan şiddetini göstermektedir. Eksenlerin kesişim noktası, 0, mıknatıslamanın olmadığı ve hiçbir kuvvetin uygulanmadığı anı temsil eder. Magnetik alan şiddeti arttırıldığında, akı

yoğunluğu önce hızlı, sonra maksimum ya da doyma noktasına ulaşınca kadar yavaşlayarak artar. Magnetik alan şiddetinin daha fazla artırılması akı yoğunluğunda bir artış meydana getirmez. Akı yoğunluğunun yükselişi noktalı çizgi ile gösterilmiştir.

Magnetik alan şiddeti ters yönde 0'a düşürüldüğünde B_r noktasında malzemede bir miktar mıknatıslanma mevcut kalır. Buna malzemenin artık mıknatıslığı adı verilir. Mıknatıslama akımı ters çevrilerek yavaşça 0'a düşürüldüğünde malzemedeki akı yoğunluğu azalır. Artık mıknatıslık c noktasında 0 olur. Yatay eksendeki mesafe, giderme kuvveti olarak adlandırılır. Giderme kuvveti, mıknatıslanma sonrasında malzemelerdeki magnetik akı yoğunluğunu 0'a indirmek için gerekli olan magnetik alan şiddeti değeridir. Bu noktadan magnetik alan şiddeti daha da arttırılırsa malzeme tekrar doyuma ulaşır (d). Magnetik alan şiddeti tekrar yavaş yavaş 0'a düşürüldüğünde, akı yoğunluğu bir miktar azalır (e). Bu noktada da malzemede bir miktar artık mıknatıslanma görülür. Magnetik alan ilk yönde arttırılmaya devam edilirse artık akı yoğunluğu azalır ve f noktasında 0 olur. F noktasından magnetik alan arttırılmaya devam edilirse başlangıç doyma noktasına (a) ulaşılır. Histerezis eğrisinin daralması malzemenin kolay mıknatıslanabileceğini ve düşük artık mıknatısa sahip olacağını, genişlemesi ise malzemenin zor mıknatıslanabileceğini ve daha kuvvetli bir artık mıknatıslığa sahip olacağını gösterir [8].

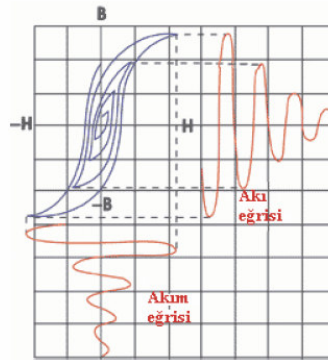


Şekil 3.9 : Histerezis eğrisi [8]

3.5 Sürekli Mıknatıslarda Demagnetizasyon

Kalıcı mıknatıslık talaşlı imalat esnasında takım ömrünü azaltması, elektronik ekipmanlara zarar vermesi, kaynaklı birleştirmeler sırasında ark üflemesi oluşturması ve malzeme üzerine toplanan metal parçacıkların aşınmayı arttırması gibi pek çok sebepten dolayı istenilmeyen bir oluşumdur. Demagnetizasyon işleminin zorluğu veya kolaylığı pek çok faktöre bağlıdır ve gerekli giderme kuvveti; parçanın şekli, malzeme türü, uygulanan akımın türü ve yöntemi ile değişir. Yumuşak çelik parçalarda kalıcı mıknatıslık kolayca azaldığında demagnetizasyona ihtiyaç duyulmayabilir. Kalıcı magnetik alanın ürün performansını etkilemeyeceği yapısal parçaların da demagnetizasyonu gerekmez. Isıl işlem görece malzemeler için, özellikle $\sim 700^{\circ}\text{C}$ Curie sıcaklığı üzerinde, demagnetizasyona ihtiyaç duyulmaz.

Magnetik domainlerin rastgele dizilişlerine döndürülebilmesi için pek çok yöntem kullanılabilir. En kolay malzemenin Curie sıcaklığının üzerine ısıtılmasıdır. Curie sıcaklığı düşük karbonlu bir çelik için yaklaşık 770°C 'dir. Çelik bu sıcaklığın üzerine ısıtıldığında magnetiklik özelliğini kaybeder. Soğutulduğunda ise üzerinde kalıcı magnetiklik bulunmaz. Malzemelerin, yerin magnetik alanının etkisinden kurtulması için doğu-batı doğrultusunda bekletilmesi de demagnetizasyon için önemli bir husustur. Domainlerin rastgele dizilmelerinin sağlanması malzemenin bir alternatif akım bobininden geçirilmesi ile de sağlanabilir. Elektromıknatısların kullanıldığı durumlarda da alternatif akımın yavaşça azaltılması yolu ile de malzemeler demagnetize edilebilir. Bütün demagnetizasyon işlemlerinde esas prensip parçanın, yönü sürekli değişen ve şiddeti giderek azalan bir magnetik alan tesiri altında bırakılmasıdır (Şekil 3.10) [8].



Şekil 3.10 : Demagnetizasyon eğrileri [8]

Alan yönünün sürekli değiştirilmesi, ya parçanın magnetik alan içinde ters çevrilmesi ya da akım yönünün sürekli değiştirilmesi ile sağlanır. Alan şiddetinin değiştirilmesi ise, ya akımın azaltılması, ya da parçanın veya bobinin birbirinden uzaklaştırılması ile sağlanabilir.

Genel bir değerlendirme olarak mıknatıs türlerinin demagnetizasyon karakteristikleri Şekil 3.10'da verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi en yüksek enerjiye sahip mıknatıs sinterlenmiş NdFeB mıknatıstır. Sinterlemek, döküm malzemeyi çok küçük parçalar kırıp yeniden yüksek sıcaklıkla yapıştırma işlemidir. Ferromagnetik malzemelerde belirli magnetik dipol bölgeleri bulunur. Sinterleme işleminde, döküm malzeme ne kadar küçük kırılırsa, o kadar çok magnetik dipol bölgesi oluşması sağlanır.

Bir başka yöntem ise malzemeyi şerit halinde üreterek, sarmaktır. Sarma (bonded) malzemeler sağlam olmalarına karşın, enerji katkıları, sinterlenmiş türlere göre oldukça küçüktür [9].

3.6 Sürekli Mıknatısların İşletme Bölgesi Magnetik Enerjisi

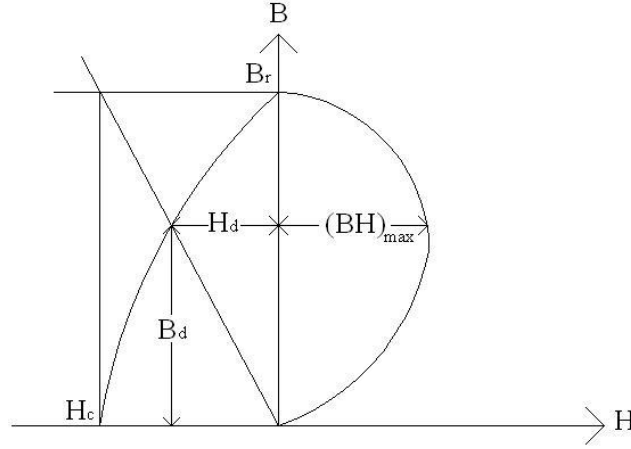
Bir sürekli mıknatısın hava aralığında biriktirdiği enerji SI birim sisteminde, magnetik alan şiddetinin ve akı yoğunluğunun çarpımının yarısına eşittir.

$$W = \frac{1}{2} B \times H \quad (3.3)$$

Bir sürekli mıknatısın işletme noktası magnetik enerjisi $(BH)_{max}$ mıknatıs malzemesinin mümkün olan en yüksek magnetik enerjideki işletme noktasının ve kullanılacak mıknatıs hacminin belirlenmesinde etkili olmaktadır [7].

Şekil 3.11'den de görüldüğü gibi magnetik enerjinin akı yoğunluğu ile değişiminde magnetik enerjinin en büyük değeri aldığı nokta mıknatıslanmayı giderme eğrisine B_r ve H_c noktasından çizilen doğruların kesişim noktasını başlangıç noktasına birleştiren doğrunun mıknatıslanmayı giderme eğrisini kestiği noktadır [2].

Günümüze kadar sürekli mıknatısların boyutlarının belirlenmesi için sadece mıknatısın $(BH)_{max}$ enerjisinin değerine bakılmaktaydı. Oysa ki bugün $(BH)_{max}$ enerjisi yanında artık akı yoğunluğu B_r 'nin ve gideren alan şiddeti H_c 'nin malzemenin kalitesini belirlemek açısından önemli büyüklükler olduğu bilinmektedir.



Şekil 3.11 : $(BH)_{max}$ noktasının belirlenmesine ilişkin grafiksel anlatım

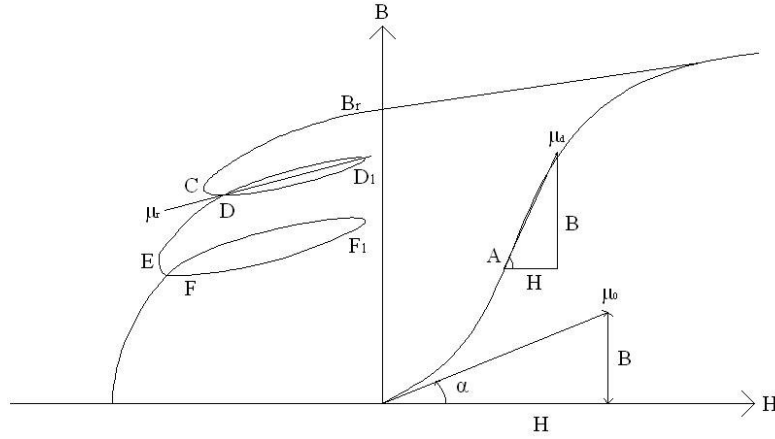
3.7 Magnetik Geçirgenlik

Akı yoğunluğunun, magnetik alan şiddetine bölümü magnetik geçirgenlik olarak adlandırılmaktadır.

Sürekli mıknatıslar için temel Histerezis çevrimi üzerinde üç farklı noktada magnetik geçirgenlik tanımı yapılmaktadır. Bunlar; başlangıç magnetik geçirgenliği μ_0 , en büyük fark magnetik geçirgenliği μ_d ve geri çekilme magnetik geçirgenliği μ_r ' dir. Bu üç kavram mıknatıs malzemesinin kapasitesinin ve kalitesinin belirlenmesi bakımından önem taşımaktadır.

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, başlangıç magnetik geçirgenliği μ_0 , mıknatıslandırma eğrisine başlangıç noktasından çizilen teğetin eğimidir. Düşük değerli başlangıç magnetik geçirgenliği, malzemenin yüksek değerli bir gideren alan şiddetine sahip olabileceğini belirtmektedir.

Sürekli mıknatıslar için tanımlanan ikinci magnetik geçirgenlik kavramı en büyük fark magnetik geçirgenliği μ_d' dir. Şekil 3.12'deki eğrinin herhangi bir noktasındaki küçük magnetik alan şiddeti değişimine karşılık gelen B/H bölümüdür. Başlangıç mıknatıslandırma eğrisi üzerindeki A noktasında, bu bölüm en büyük değerini almaktadır. A noktasının magnetik alan şiddeti yaklaşık olarak malzemenin doğal gideren alan şiddeti değeri H_{ci}' ye eşittir.



Şekil 3.12 : Sürekli mıknatıs malzemelerinde magnetik geçirgenlik kavramı

Mıknatıslandırılmış bir mıknatısa mıknatıslığını giderici bir magnetik alan uygulanırsa akı yoğunluğu şekil 3.12'deki Histerezis eğrisinin ikinci bölgesinde azalmaya başlar; C noktasına gelince, magnetik alan şiddeti pozitif yönde artırılmaya başlanırsa akı yoğunluğu temel çevrim üzerinde değil CD_1 eğrisi üzerinde azalmaya başlar. Eğer bir sürekli mıknatısın mıknatıslığını giderici magnetik alan şiddeti veya sürekli mıknatısın bulunduğu yerdeki hava aralığı değişken ise temel histerezis çevriminin ikinci bölgesi DD_1 çevrimleri gibi küçük çevrimlerden oluşur. Bu çevrimler çok küçük olduğundan bunları uç noktalarından geçen doğrular ile gösterebiliriz. Çevrimlerin uç noktalarından geçen eğrinin eğimi çevrimlerin ortalama eğimidir ve geri çekilme magnetik geçirgenliği μ_r olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda geri çekilme magnetik geçirgenliğinin temel histerezis eğrisinin artık akı noktasındaki eğimine de eşittir [2].

3.8 Mıknatıslandırma İçin Gereken Magnetik Enerji

Bir sürekli mıknatısın mıknatıslandırılması esnasında hava aralığında biriktirilen magnetik enerji miktarının belirlenmesi, mıknatıslanmayı sağlayacak sistemin boyutlandırılması açısından önemlidir. Bu enerjinin hesaplanmasında mıknatıslayıcı olarak kullanılan bobinin hava aralığında biriktirdiği enerjiden yararlanılacaktır. Buna göre, hava aralığında biriktirilen magnetik enerjideki değişim, mıknatıslayıcı olarak kullanılan bobinin sarım sayısı N 'nin, bobinden geçen akım i 'nin ve magnetik akıdaki değişim $d\phi$ 'nin çarpımına eşittir.

$$dW_m = N \times i \times d\phi \quad (3.4)$$

Akı ile akı yoğunluğu arasındaki bağıntıdan ve Ampere yasasından faydalanarak magnetik enerji yoğunluğu bağıntısını mıknatıs hacmi V , doyma magnetik alan şiddeti H_s ve doyma akı yoğunluğundaki değişim cinsinden ifade edebiliriz. Burada; H_s doyma magnetik alan şiddeti, l_m mıknatısın boyu, a mıknatısın kesit alanı, V mıknatısın hacmi ve dB_s doyma akı yoğunluğundaki değişimdir.

$$dW_m = H_s \times l_m \times a \times dB_s = V \times H_s \times dB_s \quad (3.5)$$

Hava aralığındaki akı yoğunluğu ile magnetik alan şiddeti arasındaki $B_s = \mu_0 \times H_s$ bağıntısından yararlanılarak değişken dönüşümü yapılırsa, magnetik enerjideki değişimin integrali hava aralığında biriktirilen toplam magnetik enerjinin ifadesini vermektedir.

$$dW_m = V \times \mu_0 \times H_s \times dH_s \quad (3.6)$$

$$W_m = \int V \times \mu_0 \times H_s \times dH_s = \frac{1}{2} V \times \mu_0 \times H_s^2 = V \times w_m \quad (3.7)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \times \mu_m \times H_s^2 \quad (3.8)$$

Günümüz sürekli mıknatıs malzemelerinde doyma magnetik alan şiddeti H_s çok yüksek olduğundan, bu malzemelerin doyuma ulaşması için gerekli olan magnetik enerji miktarı da çok yüksektir ve bir malzemedен diğerine değişmektedir. Tablo 3.1.'de bazı günümüz sürekli mıknatıs malzemelerinin doyma magnetik alan şiddeti ve magnetik enerji yoğunluğu değerleri verilmiştir. Bu değerlerde mıknatıslama bobinindeki bakır kayıpları ve madensel kısımlarda oluşan demir kayıpları göz önüne alınmamıştır [2,7].

Tablo 3.1: Günümüz sürekli mıknatıs malzemeleri için gerekli H_s magnetik alan şiddeti ve w_m magnetik enerji yoğunluğu

Sürekli mıknatıs malzemesi	H_s (kA/m)	$w_m = W_m/V$ (Vs/cm ³)
AlNiCo	300.....400.....500	0.0565....0.1....0.157
Sert Ferit	800....1000	0.403....0.63
NdFeB	2500	4
SmCo	2000....4000	2.5....10

4. SÜREKLİ MIKNATISLI SİSTEMİN İNCELENMESİ

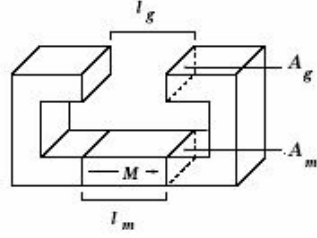
4.1 Basit Sürekli Mıknatıslı Sistem, Relüktans ve Kaçak Akı Katsayısı

Bir sürekli mıknatısın etkinliği, mıknatısın magnetik devredeki yerine ve mıknatısın mıknatıslandırılmasına bağlıdır. Sürekli mıknatıslı sistemin incelenmesindeki temel amaç, kullanılacak sürekli mıknatısın boyutlarının belirlenmesidir. İlk adım olarak, kurulacak sistemin özelliklerine uygun mıknatıs tipi belirlenir. Mıknatıs tipi belirlenirken malzemenin fiyatına, mekanik özelliklerinin sisteme uygunluğuna ve magnetik özelliklerine bakılmalıdır.

Sistemde kullanılacak mıknatıs tipi belirlendikten sonra sıra mıknatısın boyutlarının belirlenmesine gelir. Ampere yasasına göre bir sürekli mıknatısın magnetik alan şiddeti H_m ile mıknatısın uzunluğu l_m 'in çarpımı, hava aralığındaki magnetik alan şiddeti H_g , hava aralığı uzunluğu l_g ve magnetik alan zayıflatma katsayısı γ 'nin çarpımına eşittir.

$$H_m \times l_m = H_g \times l_g \times \gamma \quad (4.1)$$

Magnetik alan zayıflatma katsayısı, magnetik devredeki yumuşak maddelerin ve magnetik olmayan bölgelerin etkisi ile hava aralığındaki magnetik potansiyel azalmasının bir ölçüsüdür. Buna göre magnetik alan zayıflatma katsayısı, mıknatısın magnetik potansiyelinin hava aralığı magnetik potansiyeline oranı olarak tanımlanmaktadır. Tasarımı iyi yapılmış bir sürekli mıknatıslı sistemin magnetik alan zayıflatma katsayısı 1'e eşit olmalıdır [5]. Minimum relüktans, magnetik malzemenin geçirgenliğinin yüksek magnetik devredeki hava aralığının düşük tutulmasıyla gerçekleştirilebilir. Sürekli mıknatıslı devrede relüktansın etkisi malzemenin demagnetize edilmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 4.1 : Sürekli mıknatıslı magnetik devre

Sistemdeki toplam akının korunumu gereği mıknatısın akı yoğunluğu B_m 'in mıknatısın kesit alanı A_m ile çarpımı hava aralığındaki magnetik akı yoğunluğu B_g 'nin hava aralığı kesit alanı A_g ve kaçak akı katsayısı K_i ile çarpımına eşittir.

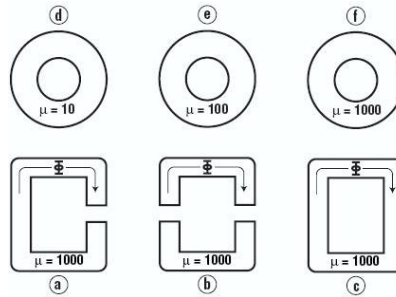
$$B_m \times A_m = B_g \times A_g \times K_i \quad (4.2)$$

(4.1) ve (4.2) bağıntılarından magnetik geçirgenlik katsayısı P_c şu şekilde hesaplanır.

$$P_c = \frac{B_m}{H_m} = \frac{A_g \times L_m}{A_m \times L_g} \times K_i \quad (4.3)$$

Minimum relüktans, magnetik malzemenin geçirgenliğinin yüksek, magnetik devredeki hava aralığının düşük tutulmasıyla gerçekleştirilebilir. Sürekli mıknatıslı bir devrede relüktansın etkisi malzemenin demagnetize edilmesi durumunda görülür. Yüksek çalışma akı yoğunluğu, sürekli mıknatıslı devredeki hava aralığının azaltılması ile elde edilebilir [10].

Şekil 4.2'de farklı relüktans değerlerindeki magnetik devreler gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Farklı relüktans (hava aralığı) değerlerindeki magnetik devreler [12]

5. MIKNATISLAYICILAR

Mıknatıslandırma işleminde, geometrik şekillendirmesi tamamlanmış sürekli mıknatıs malzemeleri belirli bir H_s doyma magnetik alan şiddeti ile doyuma ulaştırılır. H_s doyma magnetik alan şiddeti, sürekli mıknatısı çevreleyen bobinden bir doğru veya darbe akımın akıtılmasıyla elde edilir. Bir mıknatıslayıcı, bir mıknatıslama kafası veya bobini ve bu mıknatıslama bobininden akacak olan akımı sağlayan güç elektroniği devresinden oluşmaktadır.

5.1 Mıknatıslayıcı Bobini ve Kafası

Mıknatıslayıcı bobinleri demir magnetik devreli ve magnetik devresiz olmak üzere iki türlü yapılıdır. Demir magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinde, magnetik devrenin varlığı mıknatısın H_s doyma magnetik alan şiddetini sınırlamaktadır. Ancak magnetik devrenin varlığı magnetik alanın mıknatıs hacmi üzerinde yoğunlaştırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu sayede elektriksel enerji ihtiyacı azalmaktadır. Ayrıca magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinde soğuma daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir. Özellikle mıknatıslama akımı yüksek olan mıknatıslayıcılarda, magnetik devrenin varlığı mıknatıslayıcı bobini iletkenlerinde yalıtım sorunları ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca magnetik devreli mıknatıslayıcı bobinlerinin imalatında daha çok işçiliğe ve malzemeye gereksinim duyulmaktadır. Bu ise mıknatıslayıcı bobinin maliyetini artırmaktadır.

Sürekli mıknatıslar bazen yerlerine takılmadan önce bazen takıldıktan sonra mıknatıslandırılırlar. Bunlardan hangisinin uygulanacağını belirlemek önemli bir sorundur. Mıknatısın biçimi, malzemesi ve kullanılacağı yer, kullanılacak yöntemin belirlenmesinde etkindir. Sürekli mıknatısın yerine takılmadan ve yerine takıldıktan sonra belirlenen işletme eğrileri arasında fark varsa, yerinde mıknatıslandırmanın uygulanması gerekir. Bazı hallerde ise örneğin bir birine yakın, ters kutuplu, büyük mıknatısların yerinde mıknatıslandırılması olanaksızdır.

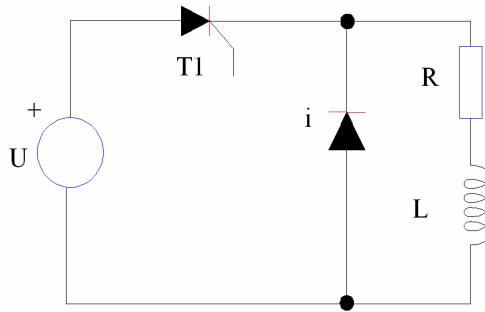
Yerine yerleştirilmiş sürekli mıknatısların mıknatıslanmasında kullanılan araçlara "mıknatıslayıcı kafası" denilmektedir. Çoğunlukla mıknatıslayıcı kafasında bobin sarımı için yeterli yer yoktur. Bu nedenle bobinin sarım sayısı küçük tutularak, bobinden geçen akımın değeri yükseltilir. Bu nedenle mıknatıslayıcı kafasının bobini genellikle nispeten küçük şiddetli doğru akımla değil, tepe değeri büyük darbe akımı ile beslenir [7].

Mıknatıslayıcı kafasından yüksek değerli bir darbe akım geçmesi ile bobinde mekanik ve elektriksel zorlanmalar oluşmaktadır. Bu nedenle mıknatıslayıcı kafasının bu elektriksel ve mekanik zorlanmalara karşı dayanıklı olması gerekir. Mekanik zorlanmalara karşı hem mıknatıslayıcı hem de mıknatıslanacak malzemenin iyice sabitlenmiş olması gerekir. Elektriksel zorlanmalara karşı ise bobin iletken kesitinin ve yalıtkan malzemesinin doğru seçilmiş olması gerekir. Özellikle doyma magnetik alan şiddeti 2500kA/m ile 4000kA/m arasında olan NdFeB ve SmCo sürekli mıknatıs malzemelerinin mıknatıslanmasında kullanılan mıknatıslayıcı bobinlerinde özel soğutma fanı kullanılması gerekir.

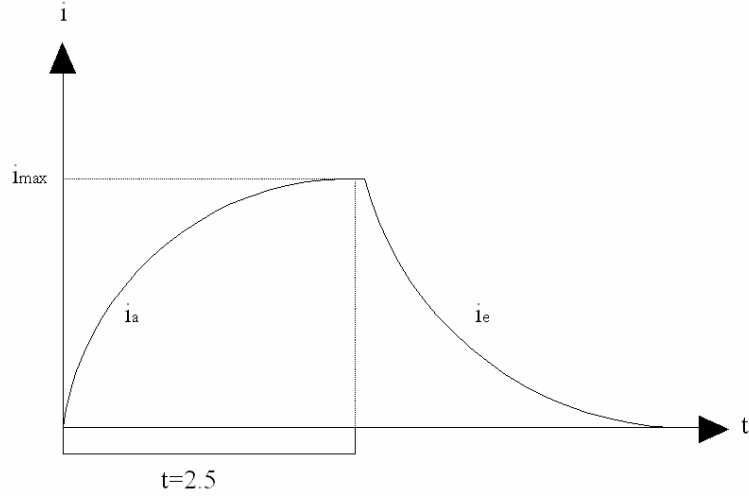
5.2 Mıknatıslayıcı Enerji Besleme Devreleri

5.2.1 Doğru Akımlı Mıknatıslayıcılar

Doğru akımlı mıknatıslayıcılarda, mıknatıslama bobininden veya kafasından belirli bir süre yüksek değerli bir doğru akım akıtılır. Genellikle sargı hacmi büyük ve mıknatıslanma akım yoğunluğu $20\text{A}/\text{mm}^2$ nin üzerinde olan mıknatıslayıcılar doğru akımlı mıknatıslayıcılardır. Böyle bir mıknatıslayıcının bobinini bir güç elektroniği anahtarı üzerinden bir doğru akım kaynağından beslenir (Şekil 5.1) [3].



Şekil 5.1 : Doğru akımlı mıknatıslayıcı eşdeğer devresi



Şekil 5.2 : Mıknatıslayıcı bobininden akan akımın dalga şekli

Şekil 5.1’de mıknatıslayıcı bobini ve malzemesinin ideal halde olduğu varsayılmaktadır. Buna göre T_I anahtarının kapatılmasıyla mıknatıslayıcı bobininden akacak olan akımın değeri, mıknatıslayıcı bobinine uygulanan gerilimle doğru, mıknatıslayıcı direnci ile ters orantılı olarak değişmektedir.

$$i_a(t) = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad \tau = \frac{L}{R} = \text{Zaman sabiti} \quad (5.1)$$

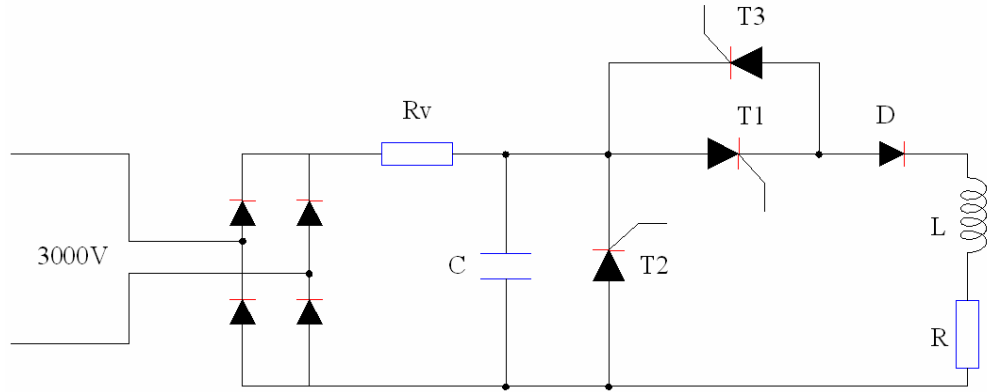
$$i_{max} = \frac{U}{R} \quad (5.2)$$

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi T_I anahtar kapatıldıktan 2.5τ süre sonra mıknatıslayıcı bobininden akan akımın değeri, ulaşabileceği en büyük değere ulaşmaktadır. Mıknatıslama akımının en büyük değere ulaşmasıyla T_I anahtarı açılır, bu durumda endüktans üzerindeki magnetik enerji (5.2) bağıntısı ile üstel olarak azalarak sifira ulaşır. Doğru akımlı mıknatıslayıcılar genellikle H_s doyma magnetik alan şiddeti küçük, kutup sayısı az olan çubuk, silindirik ve at nalı biçimli sürekli mıknatısların mıknatıslandırılmasında kullanılmaktadır [3].

5.2.2 Darbe Akımlı Mıknatıslayıcılar

Darbe akımlı mıknatıslayıcılar, bir kondansatörde biriktirilen elektrostatik enerjinin mıknatıslandırma bobini üzerinden boşaltılması ilkesine dayanır. Uygun değerdeki kondansatör önce bir doğrultucu üzerinden şebekeden doldurulur, kondansatördeki

elektrostatik enerji istenilen bir değere ulaşıncaya, kondansatör bir güç elektroniği düzeneği aracılığıyla mıknatıslayıcı bobini üzerinden boşaltılır. Bu nedenle bir mıknatıslayıcıyı belirleyen büyüklük mıknatıslayıcı kondansatörü elektrostatik enerjisidir. Kondansatör elektrostatik enerjisi $1/2C \times U^2$ gerilimin karesi ile orantılı olduğundan, genellikle mıknatıslayıcı kondansatör gerilimi, besleme devresine konulan uygun değerli bir transformatör ile yükseltilir. Ayrıca öngörülen uygun değerli bir bobin aracılığı ile sabit değerli bir akım kaynağı sağlar. Bu sayede kondansatör en kısa sürede en az kayıpla doldurulur [7].



Şekil 5.3 : Darbe akımlı mıknatıslayıcıların prensip şeması

Farklı boşalma akımı dalgalarını elde edebilmek için uygun triyot gruplarının tetiklenmesi gerekmektedir. Tetikleme grupları, triyotlerin olabildiğince kayıpsız anahtarlama yapmasına göre tasarlanır. Boşalma devresini anahtarlama, triyotlerden triyot anahtar veya yarı iletken anahtar olarak yararlanılır. Isısal zorlanmayı azaltmak için özel soğutucu düzeneklerden yararlanılır [7].

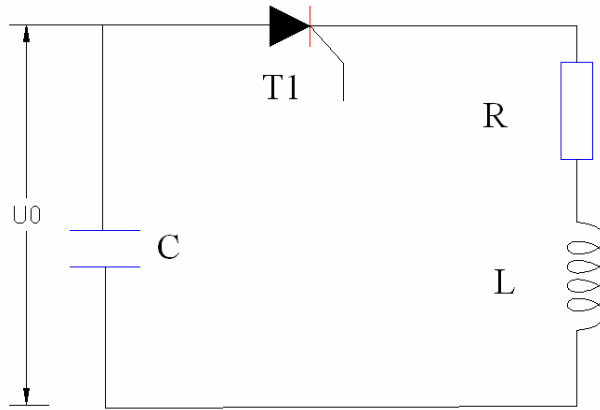
1. Kısa süreli bir mıknatıslama işlemi için yalnız T_1 triyotü tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü, T_1 triyotü ve mıknatıslayıcı bobini üzerinden kapanır. Boşalma akımı bu durumda bir yarım sinüs dalgasından oluşmaktadır

2. Uzun darbeleri bir mıknatıslama işlemi için T_1 ve T_2 triyotü tetiklenir. Bu durumda akım devresi kondansatörün başlangıçta boşalmasından sonra T_1 triyotü, mıknatıslama bobini ve T_2 triyotü üzerinden kapanır. Boşalma dönemsizdir ve logaritmik bir mıknatıslanmadır.

3. Mıknatıslanmayı gidermek için T_1 ve T_3 tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü, karşıt koştur bağlı T_1, T_3 tristör çifti ve mıknatıslama bobini üzerinden kapanır. Boşalma akımı sinüs biçimli dalgalardan oluşmaktadır.

5.2.2.1 Kısa Süreli Mıknatıslandırma

Bu tipteki mıknatıslayıcılarda darbe akımının değişim hızı (di/dt) çok yüksektir. Bu nedenle, bu tipteki mıknatıslandırmada mıknatıslanacak malzemedeki magnetik alan dağılımı malzemedeki oluşan girdap akımları nedeniyle düzgün değildir ve malzemenin mıknatıslanmasını engellemektedir. Pratikte bu tip mıknatıslandırma, elektriksel iletkenliği oldukça düşük olan Ferrite uygulanmaktadır.



Şekil 5.4 : Kısa darbeli mıknatıslandırma eşdeğer devresi

$$\frac{1}{C} \int i dt - U_0 + Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (5.3)$$

$$i(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (5.4)$$

$$s_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2 C - 4L}{4L^2 C}}; s_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2 C - 4L}{4L^2 C}} \quad (5.5)$$

$$\tau = \frac{2L}{R}, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \omega\tau = \sqrt{\frac{4L}{R^2 C} - 1} \quad (5.6)$$

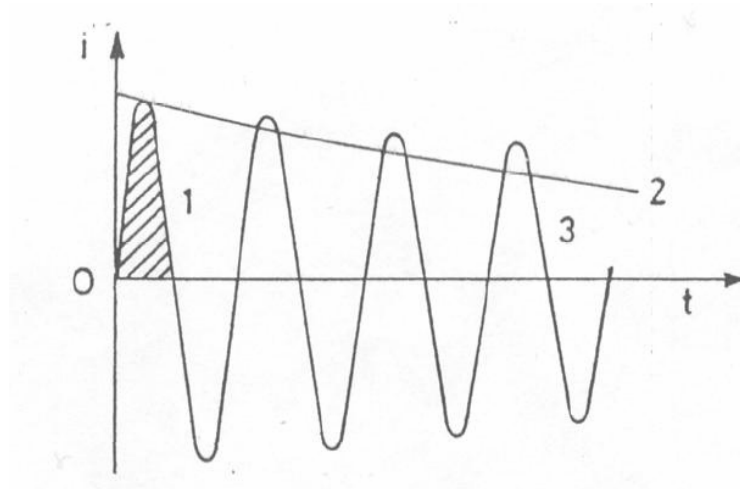
$$S_1 = -\frac{1}{\tau} - \omega, S_2 = -\frac{1}{\tau} + \omega \quad (5.7)$$

Kısa darbeli mıknatıslandırmada, U_0 gerilimiyle üzerindeki elektrostatik enerji biriktirilen kondansatör, T_I tristörü tetiklenerek, R ve L elemanlarından oluşan mıknatıslandırma bobini üzerinden boşalır.

(5.4) bağıntısının kısa süreli darbeli bir akım oluşturabilmesi için ω 'nın karmaşık bir sayı olması gerekir. Bunun için (5.6)'daki ω denklemine bakıldığında mıknatıslayıcı direnci, endüktansı ve kondansatörü arasındaki $1/L \times C < R^2/4L^2$ eşitsizliğinin sağlanmış olması gerekir. Bu şart sağlanıyorsa, mıknatıslayıcı mıknatıslandırma akımı kısa darbeli bir akımdır. Buna göre mıknatıslayıcıdan akacak olan akımın bağıntısı (5.8)'deki gibidir.

$$i(t) = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) e^{-t/\tau} \sin \omega t \quad (5.8)$$

Şekil 5.5'de de görüldüğü gibi mıknatıslama akımının dalga şekli, genliği üstel olarak azalan sinüs dalgalarından oluşmaktadır. Ancak kısa darbeli mıknatıslandırmada negatif periyottaki akım darbelerinin geçmesine izin verilmemektedir.



Şekil 5.5 : Mıknatıslandırma akımının farklı işletme biçimlerinde dalga şekli

Böylece mıknatıslandırma işlemi birinci sinüs darbesi tarafından gerçekleştirilmektedir. Kısa süreli darbe mıknatıslandırmada akımın en büyük değere

yükselme süresi, (5.8) bağıntısının zamana göre türevinin sifıra eşitlenmesi ile bulunur. Bulunan bu sürenin (5.8) bağıntısında yerine konulması ile mıknatıslandırma akımının yükselebileceği en büyük değer bulunur.

Bu bağıntılardan da anlaşılacağı gibi kısa süreli bir darbe akımının en büyük değere ulaşması için gereken süre mıknatıslayıcının kapasitesi, endüktansı ve direnci tarafından belirlenmektedir. Mıknatıslama akımının ulaştığı en büyük değer ise mıknatıslayıcı kondansatör gerilimi ve kapasite değeri, mıknatıslayıcı direnç ve endüktansına bağlıdır.

$$t_{\max} = \arctan \frac{\omega\tau}{\omega} \quad (5.9)$$

$$i_{\max} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\arctan \omega\tau}{\omega\tau}} \quad (5.10)$$

Bir darbe akımlı mıknatıslayıcıda en önemli ifade mıknatıslandırma işleminin kalitesini belirleyen, mıknatıslama magnetik alan enerjisinin kondansatör enerjisine oranıdır. Bu oran mıknatıslayıcının mıknatıslandırma verimi olarak adlandırılmaktadır. (5.11) bağıntısından da görüldüğü gibi mıknatıslandırma verimi eşdeğer devrenin $\omega\tau$ katsayısı ile değişmektedir.

$$\frac{E_l}{E_c} = \frac{\frac{1}{2} L i_{\max}^2}{\frac{1}{2} C U_0^2} = e^{-\frac{2 \arctan \omega\tau}{\omega\tau}} \quad (5.11)$$

Tablo 5.1: Mıknatıslandırma veriminin $\omega\tau$ katsayısı ile değişimi

$\omega\tau$	1	3	10	30	100	180
E_l/E_c	0.2	0.43	0.74	0.90	0.97	0.98

5.2.2.2 Uzun Darbeli Mıknatıslandırma

Bu tipteki mıknatıslandırmada, mıknatıslandırma akımı çok kısa bir sürede en yüksek değerine ulaşır daha sonra yavaş yavaş sifıra üstel olarak azalır. Uzun darbeli

mıknatıslandırmada Şekil 5.3'deki eşdeğer devrenin T_1 ve T_2 tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi kondansatör boşalmasından sonra karşıt koşul bağlı T_1 , T_3 tristör çifti, mıknatıslandırma bobini ve T_2 tristörü üzerinden kapanır.

Şekil 5.3'deki eşdeğer devrenin (5.4) bağıntısının uzun süreli darbeli bir akım oluşturabilmesi için ω katsayısının reel bir sayı olması gerekir. Buna göre (5.6) bağıntısındaki ω 'nın açılımına bakıldığında mıknatıslayıcı direnci, endüktansı ve kapasitesi arasındaki $1/L \times C > R^2/4L^2$ eşitsizliğinin sağlanmış olması gerekir. Buna göre mıknatıslayıcıdan akacak akımın ifadesi şu şekildedir.

$$i(t) = -\frac{U_0}{2\omega L} e^{(-\frac{1}{\tau} + \omega)t} + \frac{U_0}{2\omega L} e^{(-\frac{1}{\tau} - \omega)t} \quad (5.12)$$

Şekil 5.5'de görüldüğü üzere uzun darbeli mıknatıslandırmada akımın ulaşabildiği en büyük değer kısa darbeli mıknatıslandırmadaki değerle aynıdır.

5.2.3 Ters Mıknatıslandırma

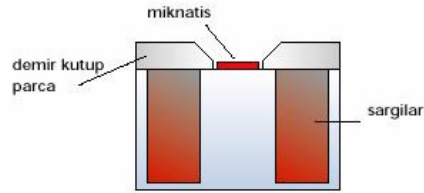
Mıknatıslığı giderme işletme biçiminde, mıknatıslandırma akımı genliği üstel olarak azalan periyodik sinüs dalgalarından oluşmaktadır. Mıknatıslığın giderilmesinde Şekil 5.5'deki devrenin T_1 ve T_3 tristörleri tetiklenir. Bu durumda akım devresi boşalma kondansatörü karşıt koşul bağlı T_1 , T_3 tristör çifti ve mıknatıslandırma bobini üzerinden kapanır. Buna göre kısa süreli mıknatıslandırmada matematiksel olarak var olan ancak akması için gerekli akım yolu olmayan negatif periyotlu akımlar T_3 tristörü üzerinden akarak doğrultusu sürekli olarak değişen bir magnetik alan oluşturur. Bu değişen magnetik alan daha önceden mıknatıslandırılmış mıknatısların mıknatıslığının giderilmesini sağlamaktadır.

5.3 Mıknatıslayıcı Çeşitleri

5.3.1 DC Mıknatıslayıcılar

Yüksek magnetik alanlar elde etmek için sargılara doğru akım uygulanır. Bu yöntem kısa süreli bir alan kuvveti için büyük bir güç gereksinimi gerektirmekte ve soğutma işlemi için sıklıkla problem yaratmaktadır. Francis Bitter National laboratuvarında

çok büyük DC jeneratörler, DC bobinler kullanılarak yaklaşık 2.5kA/m mıknatıslama alan kuvveti elde edilmiştir. Bu sistemin normal şartlarda kullanılması imkansız olmakla beraber, magnetik akı yolu ve çelik halka üzerine binlerce sarımlık geniş sargılar gibi çelik boyunduruk kullanılarak 175A/m'lik alanlar ve hatta su soğutmalı düzenek yardımıyla daha yüksek değerler elde edilebilir. Mıknatıslama süresi sınırlandırılarak bu alan şiddeti basit bir aksel silindir tipi için 1.25kA/m seviyesine getirilebilir [11].

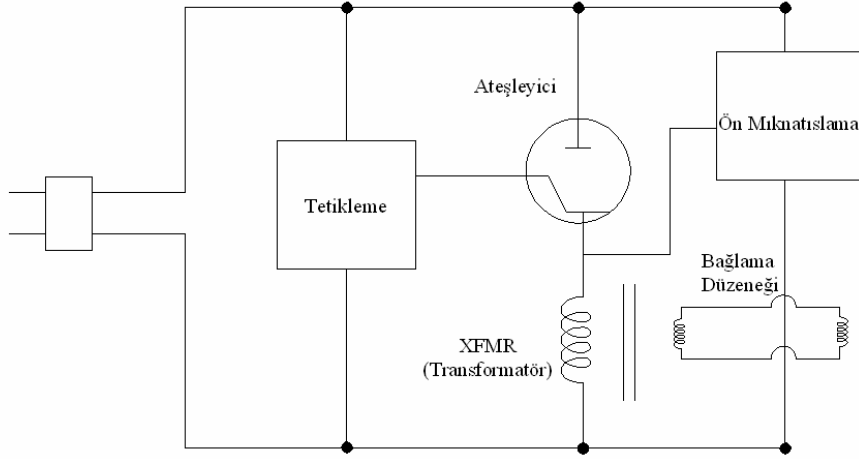


Şekil 5.6 : DC mıknatıslayıcı devre [12]

DC mıknatıslayıcıların kullanım alanı maliyetinden dolayı sınırlı kalmıştır. Düşük mıknatıslama kuvvetine sahip AlNiCo sürekli mıknatis malzemelerinin mıknatıslandırılmasında kullanılır.

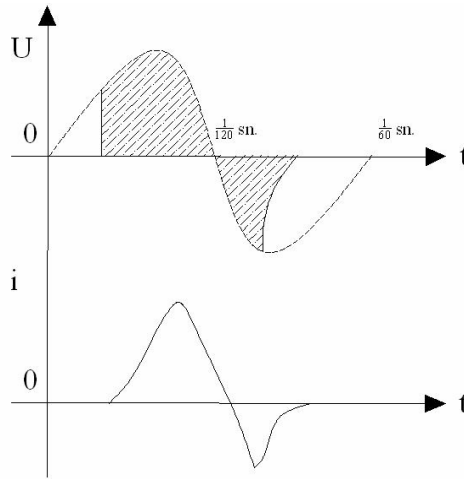
5.3.2 Yarı Çevrimli Mıknatıslayıcılar

Şekil 5.7'de yarı çevrimli mıknatıslayıcıların prensip şeması gösterilmiştir. Bu sistemlerin tasarımı çok eski olup 2. Dünya Savaşı'ndan ve hatta yarı iletkenlerin keşfinden daha öncesine dayanmaktadır. Civalı ateşleyici tüp transformator çıkışına seri olup, doğrudan karşı şebeke hattının tek fazına bağlıdır. Şekil 5.8'de de görüldüğü üzere kısmi zaman diliminde hattın binlerce amper mertebesinde akımlar geçmektedir. Bunun şebeke üzerinde muhtemel yıldırım atlaması benzeri etkisi olmaktadır. Diğer cihazlar, aynı şebeke hattına bağlı noktalar gerilim darbelerine ve muhtemel arızalara maruz kalmaktadır. Darbenin aşırılığı, geleneksel güç analizörlerinin elektromekanik doğaları gereği yeteri kadar hızlı ölçüm alamadıkları için kaydedilemez [11].



Şekil 5.7 : Yarı çevrimli mıknatıslayıcı

Ateşleyici anahtar yeteri kadar ters akımın akmasına kapalı konuma geçmeden önce imkan verir. Yeteri kadar ters akımın düzenekte akmasına izin verilirse, parça ilk olarak istenen yönde mıknatıslandırılabilir. Ancak hemen sonra ters akım vasıtasıyla demagnetize edilir. Kaliteli bir diyot ile bu durum engellenebilirdi fakat o dönem bu tür bir diyot mevcut değildi. Bu durumda çözüm çıkış transformatörü kullanmaktır. İleri yöndeki darbe oluşumundan hemen önce doğru akım çelik çekirdeğin doyma noktasında ters yönde uygulanır. Bu tür bir devreye önmıknatıslama devresi denir.



Şekil 5.8 : Yarı çevrimli mıknatıslayıcıda akım-gerilim eğrileri

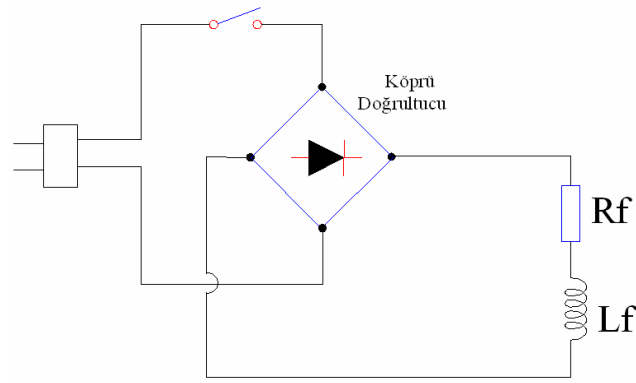
İleri yönde uygulanan darbe, çıkış sargılarına iletilir. Ancak takip eden ters akım transformatör çekirdeğini doyurur ve önemli miktardaki kısmını çıkışa geçirmez. Bu

nedenle transformatör doğrultucu görevi yapar. İlave olarak transformatörün giriş hattında çıkışa göre daha fazla sarıma sahip olabilir. Bu yüzden de çıkış akımı girişe göre daha yüksek olabilir.

Yarı periyotlu mıknatıslayıcılar diğerlerinden daha uygun maliyetli olup ve makul düzeyde performansa sahiptir [11].

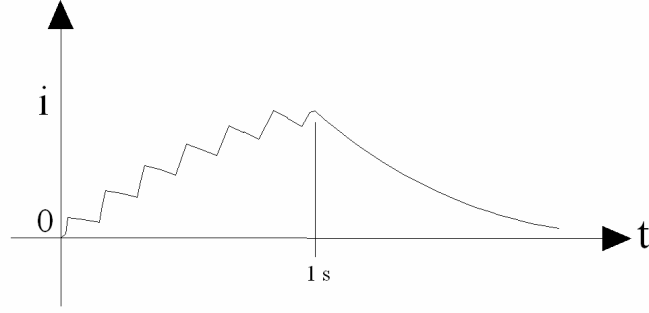
5.3.3 Yüksek Endüktanslı C Tipi Mıknatıslayıcılar

Çelik döküm çerçeven oluşturulan C biçimindeki levha bünyesinde boşluklar ve çelik arasında akı dönüş yolu barındırmaktadır.



Şekil 5.9 : C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcı

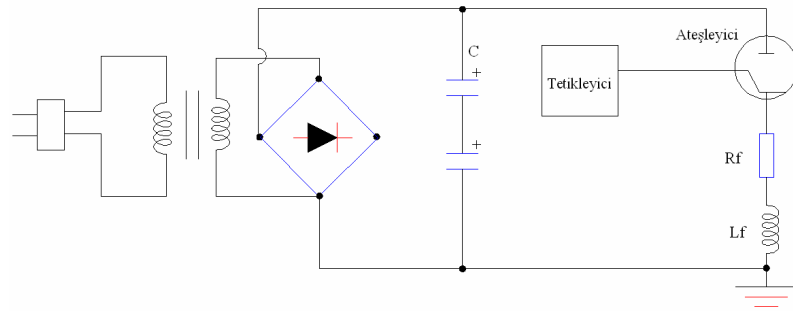
Şekil 5.9'da gösterildiği üzere geniş sargılar boşlukların her iki tarafına yerleştirilir ve devreye bağlanır. Anahtar kapatıldığında akım, şebekeden köprü doğrultucu vasıtasıyla doğrultulur ve sargılara akar. Devre tek faz için düzenlenmiş olup, üç faz için farklı bir doğrultucu düzeneğiyle de çalışması mümkündür. Endüksiyon oranı 10H ve üzerinde değerlerde akım, yavaş bir biçimde çevrimlerden geçer. İstenen akım değerine ulaşmak için boşlukların oranı ayarlanabilmektedir. Zamanlayıcı tarafından belirlenen alan genişliği istenilen düzeye ulaştığında anahtar tekrar kapanır. Magnetik alanda depolanan enerji, sargılarda yakılmadığı sürece devrenin DC darbeleri kısmındaki akımın devamını sağlar. Anahtar kapatıldığında devredeki akım zayıflaması birkaç saniye devam edebilir. Bu tip mıknatıslayıcılar önceleri hoparlör sanayisinde kullanılmakla birlikte günümüzde yerlerini kondansatör boşalmalı sistemler almıştır. C tipi mıknatıslayıcılar, hoparlörlerde kullanılan yapılarıyla içlerine gömülü AlNiCo sürekli mıknatıs malzeme ile iyi sonuçlar vermektedir [11].



Şekil 5.10 : C tipi uzun çevrimli mıknatıslayıcıda akım eğrisi

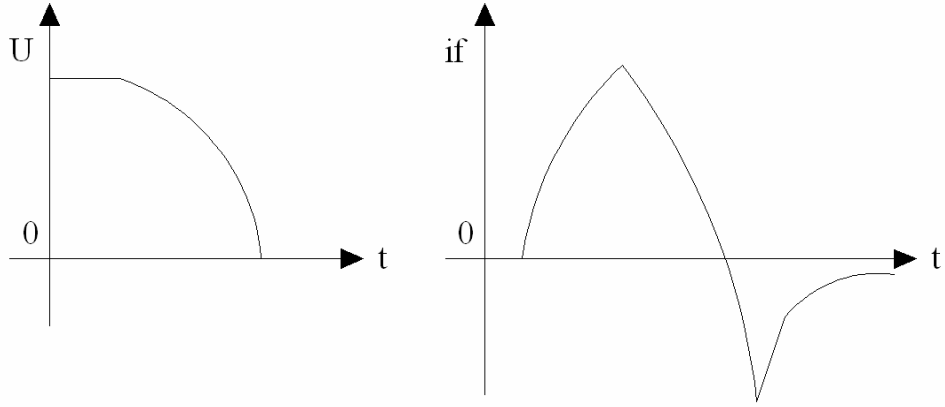
5.3.4 Kondansatör Boşalmalı Mıknatıslayıcılar

Kapasite boşalmalı mıknatıslayıcı şebekeden aldığı elektriksel gücü, genelde gerilim ile katlayarak büyük kondansatör gruplarında depolar. Yeterli enerji depolandığında ve bir kısım mıknatıslandığında anahtar kapatılır ve akım bağlama düzeneğine akar. Sistem, elektrik enerjisinin anlık magnetik darbelere birkaç milisaniyede dönüştürebileceği yapıda tasarlanmıştır. Bu tip mıknatıslayıcılar alçak, orta ve yüksek gerilimde olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılırlar. Alçak gerilim için kondansatörlerin birbirine paralel olduğu bir devrede 400-500V ile sınırlı mıknatıslayıcı olarak nitelendirilebilir. Çiftli kondansatörlerden oluşmuş 800-1000V arası kullanımda olan birçok mıknatıslayıcı orta gerilim mıknatıslayıcı olarak tanımlanır. Yüksek gerilim mıknatıslayıcı ise 1500-3000V ve üstü elektrolitiksiz kondansatörlerden oluşmaktadır. Tasarımının getirdiği ekonomik sonuç, yüksek gerilimli mıknatıslayıcıları diğer iki mıknatıslayıcı tipine göre yüksek frekanslarda kullanım imkanı sağlar. Darbe süresinin azalması elektrik enerjisinin magnetik enerjiye daha verimli dönüşmesini sağlar [11].



Şekil 5.11 : 1944 yılına ait kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi

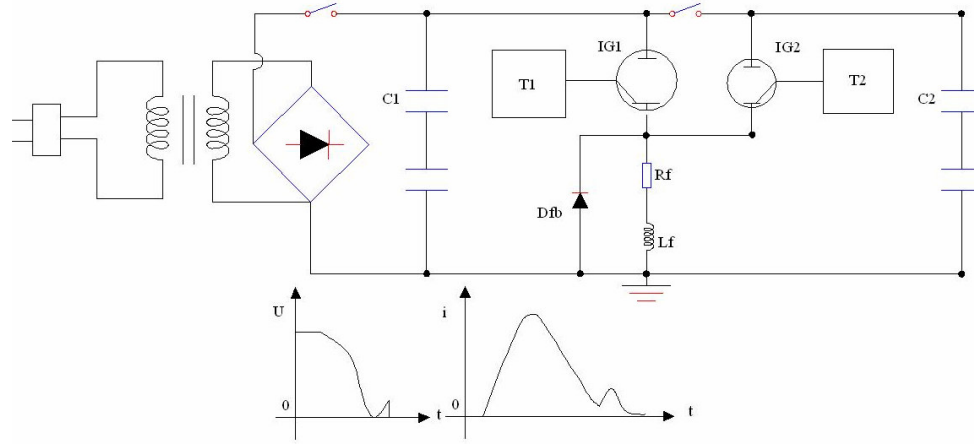
Şekil 5.11’de 1944 yıllarına ait kondansatör boşalmalı bir mıknatıslayıcıyı devresi gösterilmektedir. Bu modelin maksimum şarj gerilimi, kondansatörlerin ne zaman yapıldığına bağlı olarak 350-400V’u aşmamaktadır. Devre tasarımı, mıknatıslayıcı bağlama düzeneğinin birleşiminden ortaya çıkacak aşırı sönümü engelleyecek yapıda olmalıdır. Aksi takdirde sistem, özellikle mıknatıslanmanın gerçekleşmediği bölümlerde oksitlenmenin meydana gelebileceği yönde alarm vermeye başlamaktadır. Aynı zamanda yerle olan temasa rağmen, kablo içindeki kondansatörlerin ısınması sonucu kondansatörlerin kullanım süreleri azalabileceği gibi patlamaları da muhtemeldir. Mıknatıslama komutu verildikten sonra yeni bir şarja geçmeden önce işlemi yapan kişi ateşleme anahtarı kapanıncaya kadar bir süre beklemelidir. Aksi takdirde akım bağlama düzeneğinden geçecek ve bunun sonucu olarak ısı miktarı artacak ve kondansatörler şarj etmeyecektir. Bu durumda işlemi yapan kişi makineyi kapatarak bir süre beklemeli ve ardından tekrar denemelidir [11].



Şekil 5.12 : Kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcının akım-gerilim eğrileri

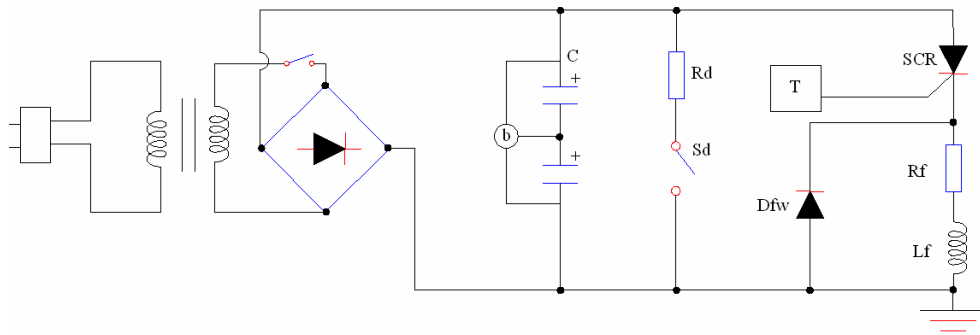
Şekil 5.13’de geliştirilmiş bir tasarım gösterilmiştir. Sistemdeki iki sıra elektrolitik kondansatör daha yüksek gerilimim kullanılmasına imkan verir. D_I diyotu ateşleyici içerisindeki akımın kondansatöre geri akmamasını sağlar. Flyback diyotu olarak anılan D_{fb} diyotu oldukça önemlidir ve mıknatıslayıcı maksimum akımı taşımakla yükümlüdür. Kondansatör depolarındaki pozitif uç sıfıra yaklaştığında, geniş endüktanslı akımın akmasını aniden durdurarak flyback diyot akımını yeniden düzenler ve ateşleyicideki gerilimi düşürerek sıfır noktasına çeker.

Kondansatörler pozitif uç üzerindeki negatif gerilimden korunduğu için herhangi bir arızaya neden olmadan az sönümlenebilirler. İkinci anahtar ikinci ve daha küçük C_x kondansatörleri şarj etmek için kapatılır ve ardından tekrar açılır. Ana devre açıldıktan ve ana kondansatör depolarının şarjının bitmesinin ardından ikinci ateşleyici tetiklenir. Ana anahtarın katodundaki gerilim ana kondansatör depolarını doldurana kadar artar [11].



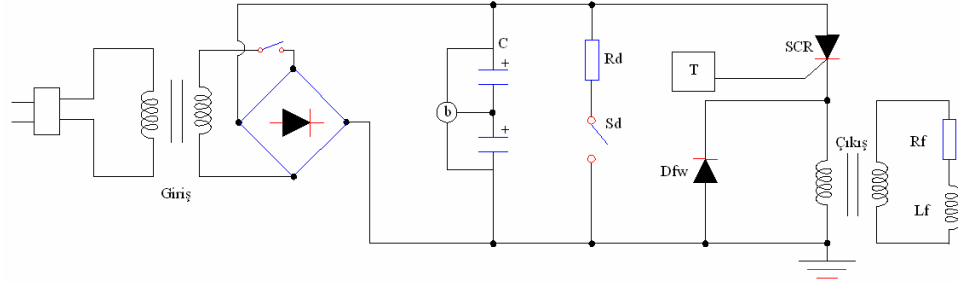
Şekil 5.13 : Gelişmiş ateşlemeli mıknatıslayıcı devresi

Şekil 5.14'de SCR (Silicon Controlled Rectifier) kullanılan bir devre gösterilmiştir. Flyback diyot halen devrede olmasına rağmen ancak SCR ters yönlü bir akım söz konusu olduğunda devreyi kapatmayı her ne kadar gerekli olmasa da daha hızlı gerçekleştirir. Bu durum ancak iki sıra kapasite değerlerinin birbirinden oldukça farklı olduğu durumlarda gerçekleşebilir. Aynı zamanda R_d boşalma direnci, S_d anahtarı açık konumda devreye eklenmiştir.



Şekil 5.14 : Silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi

Şekil 5.15’de görüldüğü üzere aynı devreye çıkış transformatörü eklenmiştir. Transformator bağlama düzeneğine giden gücü etkileyememektedir. Daha az akım geçirilerek daha fazla sarım elde edilebileceğinden ilk etapta bu durum herhangi bir avantaj sağlamasa da bağlantıda aynı sonuçlar elde edilebilir. Ancak transformatorün kullanımı bazı durumlarda yararlı olabilir. İlk olarak düzenekteki maksimum gerilim düşürülerek operatörün güvenliği sağlanır. İkincisi düşürülen gerilim ve daha az sayıda sarım sayısı düzenekteki elektriksel izolasyon için gerekli olan alanı azaltır. Sonuç olarak transformator kullanımı sistemdeki maliyeti yükseltmekle beraber talep edilen güçte ciddi bir artış sağlamaktadır [11].

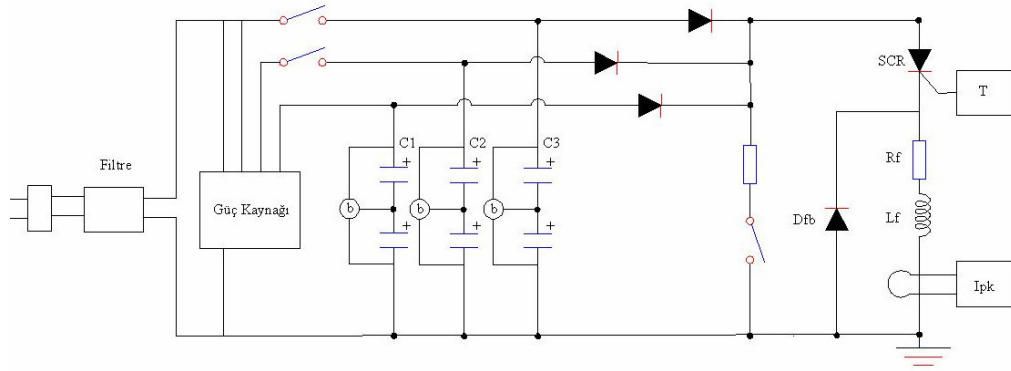


Şekil 5.15 : Çıkışı transformatörü kullanılan mıknatıslayıcı devresi

Şekil 5.16’da yer alan devrenin iki temel yeniliği mevcuttur. Bunlardan ilki kondansatörün şarj gerilimi gibi değişiklik gösterebilmesidir. İkincisi ise elde edilen maksimum akımın otomatik olarak ön panel de gösterilmesidir. Her iki yenilik de patentli olmasına rağmen sadece Oersted Technology ürünlerinde yer almaktadır. Değişebilen kapasitelerin varlığı bir mıknatıslayıcının birçok sabit kondansatör gruplarının yerine kullanılmasına ve böylelikle farklı boyutlardaki değişik bağlantılarla ve farklı ürünlerle kullanımına olanak sağlar. Aynı zamanda bağlantı düzeneği-mıknatıslayıcı bağlantısını en iyi duruma getirir.

Maliyetinin yüksek olmasından dolayı her yeni uygulama için farklı bağlantılar oluşturmak, çok gerekli görülmediği takdirde yapılmamalıdır. En iyi dizayn edilmiş bağlantılar bile belirsizlikler ve yanlış bilgilerden dolayı ihtiyaçları karşılamada başarılı olamayabilirler. Ayarlanabilir kondansatörlü mıknatıslayıcılar bu çeşitliliği birbirlerine uydurmak için kullanılırlar. Kondansatörler ve gerilim değişikliğine

yönelik yapılan kişisel çalışmalar, performans ürün miktarı ve farklı materyalleri beraberinde getirmektedir [11].

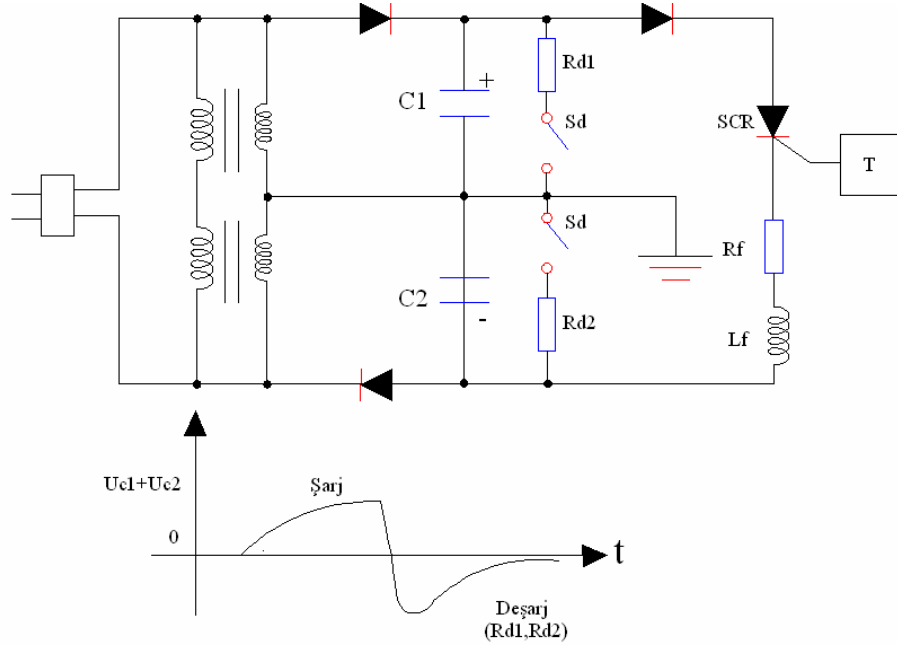


Şekil 5.16 : Gelişmiş silikon kontrollü doğrultucu kullanılan mıknatıslayıcı devresi

Bu mıknatıslayıcıda 60Hz genişliğinde bir transformatör yerine sürekli akımlı şarj devresi kullanılır. Transformatörler öncelikle yüksek seviyede şarj edilir ancak kapasiteler yüksek şarja ulaştığından dolayı akım ters bir gerilimle düşürülür.

Sonuç olarak transformatör odaklı tasarımlar, şebekeden sürekli akımlı şarj devrelerine göre daha fazla akım çeker.

Şekil 5.17’de gösterilen devre çift kutuplu yüksek gerilimli mıknatıslayıcıya örnektir. Bu tasarımda kondansatör şarjlı iki ayrı devreye ihtiyaç bulunmaktadır. C_1 kondansatörünün negatif ucu ile C_2 kondansatörünün pozitif ucu birlikte topraklanır. C_1 ve C_2 kondansatörleri aynı anda şarj edilir. Anahtar kapatıldığında akım C_1 ve C_2 kondansatörleri üzerinden akarak her ikisinin önce boşalmasına ve ardından birbirlerine paralel yönde tekrar dolmasına imkan verir. Devrede Flyback diyota ihtiyaç duyulmamaktadır. Ters gerilim arttıkça yavaş yavaş bağlantı içindeki akımın azalmasını ve sonunda durmasını sağlar. Bir sonraki tetiklemeden önce kondansatörler R_{d1} ve R_{d2} dirençleri üzerinden boşaltılmalıdır [11].



Şekil 5.17 : İki kutuplu kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devresi

Yüksek gerilimli mıknatıslayıcılarda yüksek gerilim kondansatörlerine ve iki adet şarj devresine gereksinim olduğu için, orta gerilimlilere nazaran daha pahalıdırlar.

6. KONDANSATÖR BOŞALMALI MIKNATISLAYICININ TASARIMI

6.1 Devrenin Çalışma Şekli

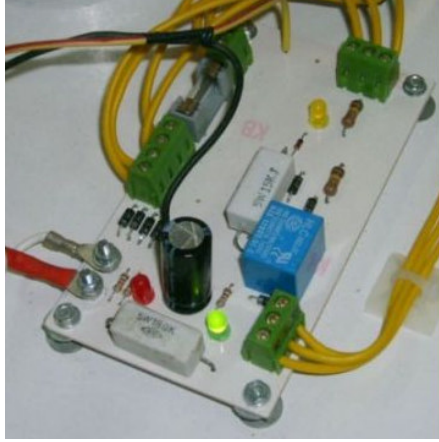
NdFeB sürekli mıknatıs malzemesini mıknatıslandırmak için tasarlanan kondansatör boşalmalı mıknatıslayıcı devre Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Şebekeden çekilen gerilim açık-kapalı anahtarı ile anahtar kapalı konumda iken devreyi açar. Kullanılan ampul akım sınırlama işlemi görmektedir. Ampul pozitif ısı katsayılı termistördür. (PTC: Possitive Temperature Coefficient) Üzerlerindeki sıcaklık arttıkça direnci artar, sıcaklık düştükçe direnci azalır. Devre üzerindeki iki adet 1N4007 kodlu diyotlar vasıtasıyla gerilim katlayıcı oluşturulmuştur. Böylece çıkışta 220V alternatif gerilimin (AC: Alternating Current) tepe değeri olan 310V doğru gerilimin (DC: Direct Current) iki katı olan 620V doğru gerilime ulaşmak hedeflenmiş, diyotlar üzerinde gerilim düşümü de dikkate alındığında yaklaşık olarak 600V doğru gerilim elde edilmiştir. Bu işleme iki adet yarım dalga doğrultma denmektedir. Pozitif alternans bir diyottan, negatif alternans diğer diyottan geçirilerek kondansatörler üzerinde enerji biriktirilmiştir.

Devrede Thyrex marka 235RK serisi tristör ve 250UM serisi serbest geçiş diyotu kullanılmıştır. Tristör anot tipi olduğu için, diyotun da anotu negatif seçilerek ortak anodu aynı bara üzerine monte edilmiştir.

6.2 Tetikleme Devresi

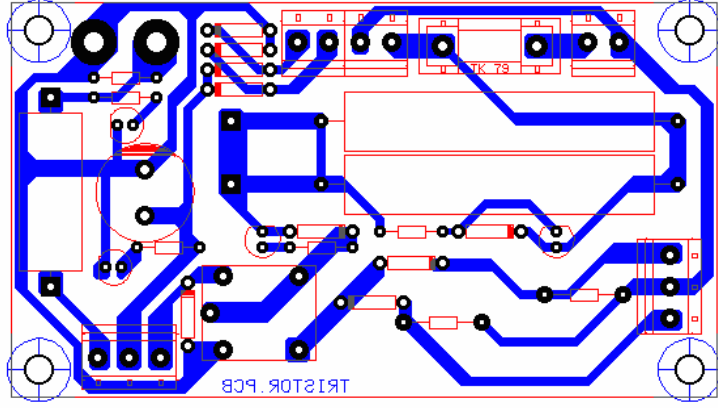
Şekil 6.2’de tetikleme devresi resmi gösterilmiştir. Şebekeden çekilen 220VAC, izolasyonu yüksek bir gerilim düşürücü trafo ile 12VDC’ye düşürülmüştür. Köprü doğrultucuda kullanılan diyot ile çıkışta 16VDC gerilim elde edilmiştir.

Devrede kullanılan yeşil led 220VAC ve tetikleme geriliminin var olduğunu göstermektedir. Gelen doğru akım devredeki anahtardan geçip tetikleme yapılmadığı anda 12V’luk röleyi çekili halde tutmaktadır. 12VDC röle şarj akımının geçmesine izin vermektedir. Tetikleme anında şarj akımı kesilerek, devrenin şebekeden sürekli olarak akımı çekmesini engellemektedir.



Şekil 6.2 : Tetikleme devresi

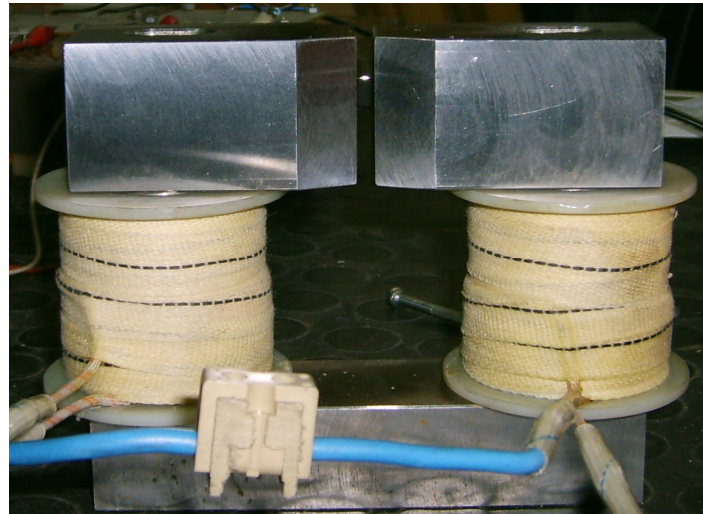
Tetikleme anahtarına basıldığında kondansatör üzerinde oluşmuş olan tetikleme gerilimi 22Ω ’luk direnç üzerinden geçerek tristörü tetikler. Tristörü tetiklediğimiz anda iletme geçer. Tetikleme anında anahtardan el teması kesilse dahi kondansatörler boşalana kadar tristör iletimde kalacaktır. Bu arada kırmızı renkli led tetikleme gerilimi sebebiyle yanar. Tristörün tetiklenmesiyle kondansatör grupları üzerinde birikmiş olan enerji mıknatıslama bobinine doğru akar ve geçen akım sayesinde mıknatıslama gerçekleşir. Şekil 6.3’de tetikleme devresinin baskılı devre çizimi gösterilmiştir.



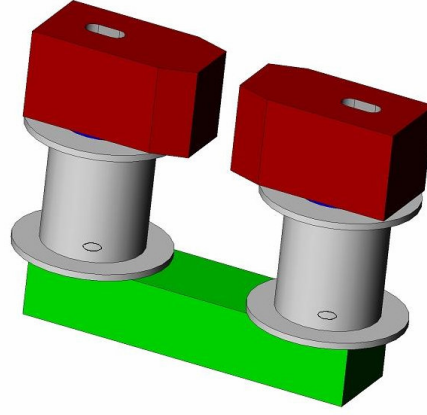
Şekil 6.3 : Tetikleme baskı devresi

6.3 Mıknatıslama Sargıları ve Magnetik Devre

Şekil 6.4'de görülen mıknatıslama bobini için iki ayrı 60'ar sarımlık sargılar kullanılmıştır. Sargı teli kalınlığı 2mm'dir. Sürekli mıknatısın yerleştirildiği gövdede soğuk çekilmiş 20NiCrMo_2 DIN normlu yumuşak çelik olan sementasyon çeliği kullanılmıştır. Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlanmalara dayanıklı parçaların imalinde kullanılan, düşük karbonlu, alaşımsız veya alaşımlı çeliklerdir.



Şekil 6.4 : Mıknatıslayıcı sargıları



Şekil 6.5 : Mıknatıslayıcı magnetik devresi

6.4 Magnetik Parametrelerin Belirlenmesi ve Sargı Akımının Hesaplanması

Tasarlanan mıknatıslayıcı daha önce de belirtildiği gibi küçük hacimli mıknatısları mıknatıslamak için tasarlanmıştır. Bu nedenle uygulanan magnetik devre yaklaşık olarak 1200mm^2 kesitinde ve ortalama magnetik akı yolu uzunluğu 340mm 'dir. Hava aralığında kesit alanı 1070mm^2 'ye düşmektedir. Hava aralığı mıknatısların magnetik yolu dikkate alınarak 4mm seçilmiştir. Mıknatıslama denemesi yapılan mıknatıslar N28 ve N45 tipinde olup boyutları sırasıyla $(9 \times 9 \times 4 \text{ mm})$ ve $(9 \times 22 \times 4 \text{ mm})$ 'dir

Örnek olarak N45 türü bir mıknatısın uygun olarak mıknatıslanabilmesi için, mıknatıslayıcı devrenin hava aralığı akı yoğunluğu $B_g = 2.5 - 3\text{T}$ civarında olması gerekir [13].

Buna göre, zayıflama katsayısını 0.9 alarak,

$$B_g \cdot A_g = B_c \cdot A_c \cdot \gamma \quad (6.1)$$

$$B_c = \frac{B_g \times A_g}{A_c \times \gamma} = 2.97\text{T} \quad (6.2)$$

Şekil 6.9'da kullanılan yumuşak çeliğin ($_{20}\text{NiCrMo}_2$) basitleştirilmiş BH eğrisinden bu değer için çekirdek içindeki magnetik alan şiddetinin 537kA/m olduğu görülmektedir.

Magnetik devreye amper yasası uygulanırsa;

$$N \times i = H_g \times l_g + H_c \times l_c \quad (6.3)$$

Buradan gerekli amper sarımı 192000A olduğu bulunur. Sarım sayısı 120 olduğuna göre, N45 mıknatısı için sargı akımı yaklaşık olarak 1600A olarak bulunur. N28 mıknatısı için sargı akımı yaklaşık olarak 1000A olarak bulunur. N45 mıknatısı için mıknatıslanma sonucu ölçülen demagnetizasyon karakteristiği Şekil 7.2’de verilmiştir.

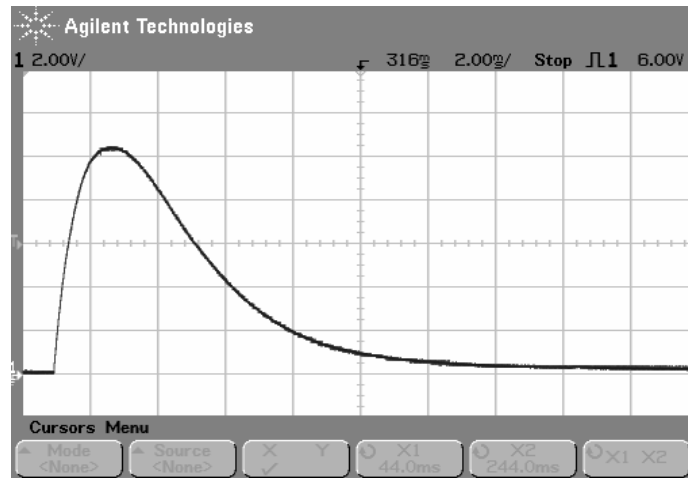
6.5 Deneyin Yapılması

Deneyde önemli olan husus mıknatıslama enerjisini gözlemektir. Bu nedenle magnetik alanı oluşturan akımın ölçümü gereklidir. Deneyde, özel olarak imal edilmiş bir şönt ölçüm direnci yardımıyla bu akım osiloskop ortamında ölçülmüştür.

$$(R_{\text{şönt}} = 0.01\Omega, 0.1\text{kA/V})$$

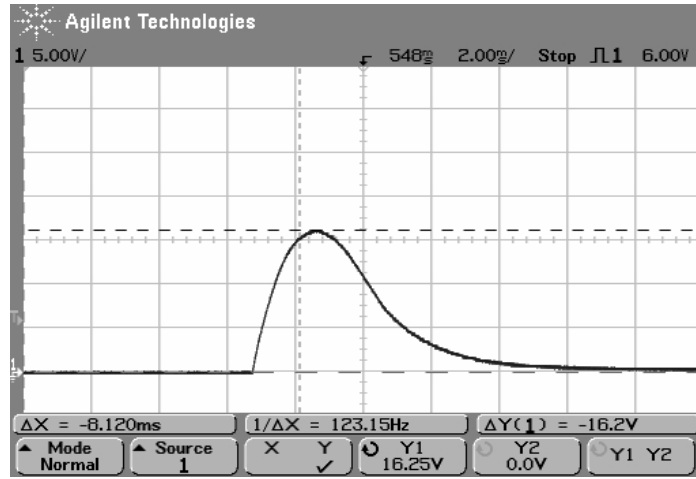
Devreden geçen akım özel bir direnç teli yardımıyla sınırlandırılmıştır. Bu telin değeri $2.71\Omega/\text{m}$ ’dir.

Şekil 6.6’da N28 materyalin mıknatıslanması sırasında geçen sargı akımının zamanla değişimi görülmektedir. Yaklaşık olarak sargıdan geçen akım 1.080kA’dir.

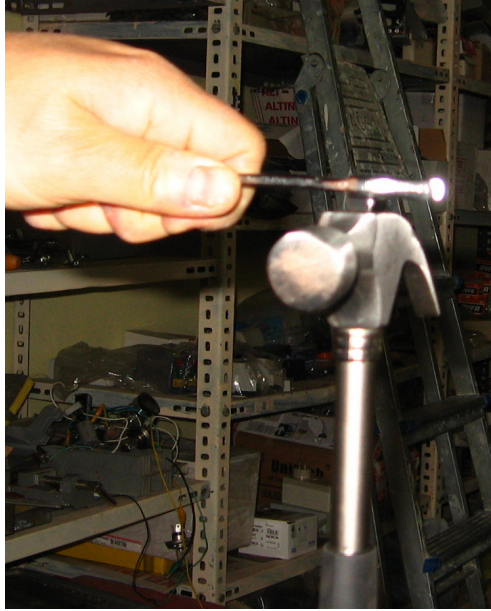


Şekil 6.6 : N28 materyal için sargı akımının zamanla değişimi

Şekil 6.7’de N45 materyalin mıknatıslanması sırasında geçen sargı akımının zamanla değişimi görülmektedir. Yaklaşık olarak sargıdan geçen akım 1.625kA’dır.

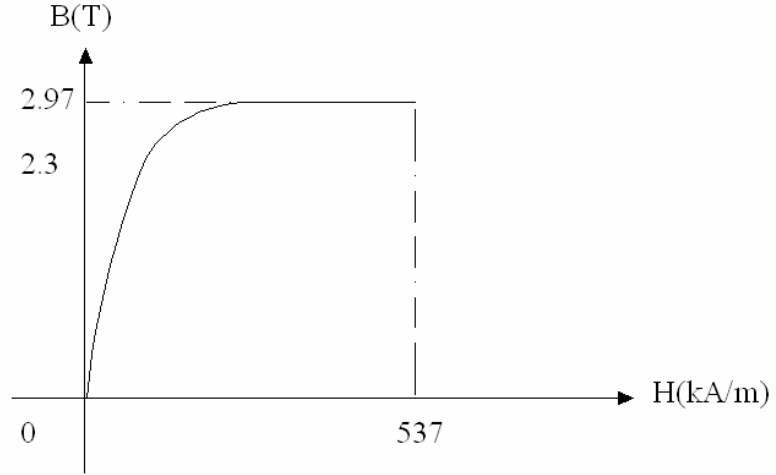


Şekil 6.7 : N45 materyal için sargı akımının zamanla değişimi



Şekil 6.8 : Mıknatıslanmış mıknatısın çekici havada asılı tutma anı

Şekil 6.9’da mıknatıslanmış yumuşak çeliğin basitleştirilmiş BH eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.9 : Yumuşak çeliğin basitleştirilmiş BH eğrisi

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

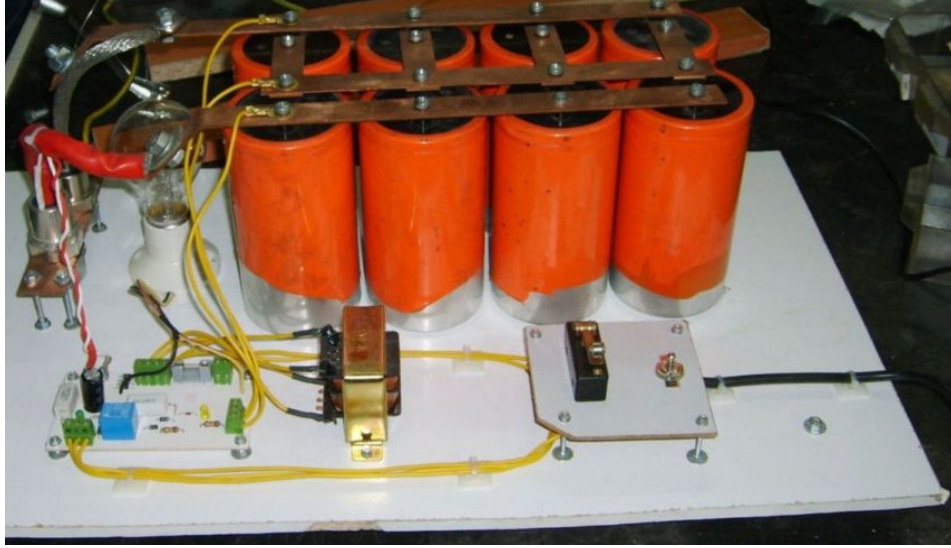
Çalışma kapsamında tasarlanan mıknatıslayıcı üretilmiş ve önceki bölümde de belirtildiği gibi deneyleri yapılmış ve deney sonuçlarının uygunluğu incelenmiştir. Deneyler ve incelemeler sonucunda tasarlanan mıknatıslayıcı devresinin amaca uygun olarak çalıştığı görülmektedir. Ancak bu sistem, mıknatıslayıcı magnetik devresi ve mıknatıslama için depolanan enerji dikkate alındığında, ancak küçük boyutlu (en büyük yaklaşık boyut: 25×25×5mm) NdFeB ve SmCo mıknatısların mıknatıslanması için kullanılabilir.

Tasarım hesaplamaları ve deneysel sonuçlardan da görüldüğü gibi; hava aralığı magnetik akısı yoğunluğunu oluşturmak için magnetik devredeki ampersarım kullanımı çok büyük olmaktadır. Elektromagnetik aygıtlarda bilindiği gibi belli bir yaklaşıklıkla, tüm magnetik enerjinin hava aralığında oluştuğu varsayımı yapılır. Bu durumda, magnetik devrenin ideal olduğu kabul edilir. Ancak söz konusu mıknatıslayıcı devresinde bu yaklaşım uygulanamaz, magnetik devre için gerekli ampersarım ise 192000'dir. Bunu engellemek için daha kaliteli magnetik devre malzemesi kullanmak ya da boyutları daha büyük yapmak gereklidir.

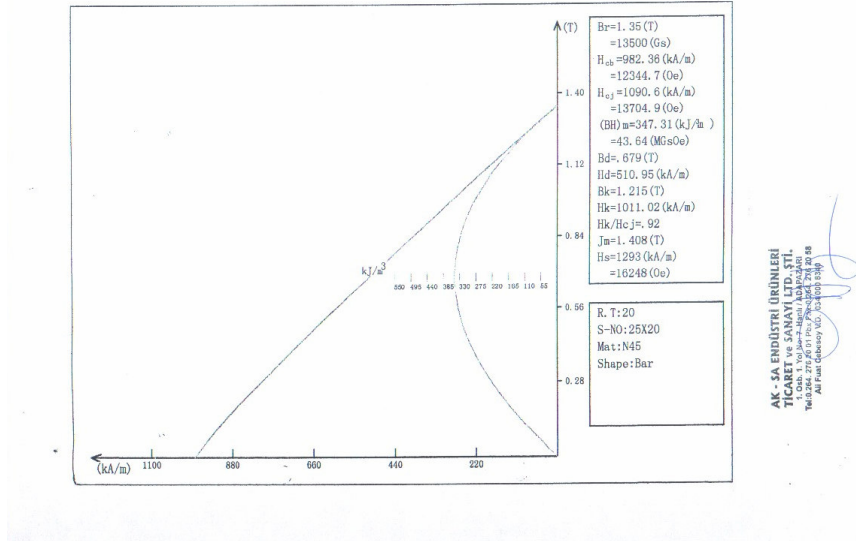
Tezde çalışması yapılan mıknatıslayıcı laboratuvar amaçlıdır. Endüstriyel uygulamalar için daha büyük boyutlu mıknatısları mıknatıslayabilen bir tasarım gerekmektedir. Büyük boyutlu mıknatıslayıcı için magnetik devrenin yeterli büyüklükte olması ve mıknatıslanma enerjisinin de artırılması gerekmektedir. Bunun için daha büyük kondansatörler kullanılabilir. Gerilimin daha çok katlanmasını sağlayan bir devre de kullanılabilir. Güç elektroniği devresinin daha küçük olması istenirse rezonans çeviricili bir devre topolojisi kullanılmalıdır.

Mıknatıslayıcılarda en büyük sorunlardan biri uygun kalitede magnetik devre malzemesi bulmaktır. Çalışmada kullanılan yumuşak demir malzeme, çoğu elektromagnetik aygır için uygun bir çekirdek malzemesi olmasına karşın, yüksek verimli bir mıknatıslayıcı için çok yeterli değildir. Mıknatıslayıcı devrede daha

büyük magnetik akı yoğunluklarını daha düşük magnetik alan şiddetleriyle veren ve daha az doymalı malzemeler kullanılmalıdır.



Şekil 7.1 : Tasarlanan devre



KAYNAKLAR

- [1] **Overshott, K.J.**, 1991. "Magnetism:It is Permanent," IEEE Proceedings A, **138**, No. 1, p. 22-30.
- [2] **Rollin J. Parker and Robert J. Studders Parker, J.R.**, 1962. PermanentMagnet and Their Application, John Wiley and Sons Inc., New York.
- [3] **Nasar, S.A., Boldea, I. and Unnewehr, L.E.**, 1993. Permanent Magnet Reluctance And Self-Synchronous Motor, CRC Press, London Tokyo.
- [4] **Rose, R.H., Shepard, L.A. and Wulff, J.**, Çeviren:**Onaran, K.**, 1986. Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Cilt IV, Elektronik Özellikler, Sayı 1331, İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul.
- [5] **Nalbantoğlu, B.**, 1996. Sürekli mıknatıslar ve mıknatıslayıcılar, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Tacer, E.**, 2004. Elektromekanik Enerji Dönüşümü Ders Notları, İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- [7] **Çetin, İ.**, 1993. "Darbe Akımlı Mıknatıslayıcılar," Kaynak, 93/6, s.101-107.
- [8] **Tahribatsız Malzeme Muayene San. ve Tic. Ltd. Şti.**, 2006. Magnetik Partikül Çatlak Kontrolü ve Demagnetizasyon, Teknik Bilgi, İstanbul.
- [9] **Kenjo, T., Nagamori, S.**, 1985. Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Pres, Oxford.
- [10] **Bochenkov B., Lutz S.**, 2004. "A Review of Modern Materials of Permanent Magnets", IEEE p.201.

- [11] **Joseph J., Stupak Jr.**, 2000. Methods of Magnetizing Permanent Magnets, EMCW Coil Winding Show, Cincinnati, Ohio
- [12] **Magnet Sales and Manufacturing Inc.**, 1995. *High Performance Permanent Magnets* 7, **20**, Culver City, UK.
- [13] **Furlani E.**, 2001. Permanent Magnet and Electromechanical Devices, Academic Press, London Tokyo.

EK A.

Threx 235RK serisi silikon kontrollü doğrultucunun teknik kılavuzu

175/235RK SERIES
Power Silicon Controlled Rectifiers
270/360 Amp RMS SCRs

Types : 175RK20 TO 175RK160, 235RK20 TO 235RK160

FEATURES

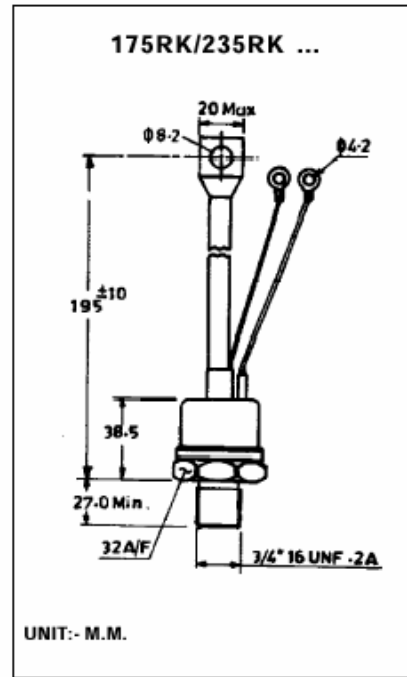
- ❖ Centre amplifying gate.
- ❖ International standard case TO-209AB (TO-93).
- ❖ Threaded studs UNF 3/4 - 16UNF2A.
- ❖ Compression Bonded Encapsulation for heavy duty operations such as severe thermal cycling.

TYPICAL APPLICATIONS

- ❖ DC motor control (e.g. for Machine tools).
- ❖ Controlled rectifiers (e.g. for Battery Charging, Uninterrupted Power Supply).
- ❖ AC controllers (e.g. Temperature control, Lights control).

MAJOR RATINGS & CHARACTERISTICS

Parameters	175RK	235RK	Units
I_{TSM}	170	230	A
@ T_c	85		°C
I_{TSM}	270	361	A
@ 50 Hz	4650	5700	A
I_{TSM}^2	105	163	KA ² s
@ 50 Hz			
V_{TSM} / V_{TSM}	200 to 1600		V
t_{tr} typical	100		µs
T_c	-40 to 125		°C



175/235RK SERIES

BLOCKING

	Parameter	175RK/235RK	Units	Conditions
dv/dt	Maximum critical rate of rise of off-state voltage	400	V/ μ s	$T_j = 125^\circ\text{C}$, linear to 80% rated V_{DSS}
I_{RSM} I_{RSM}	Max. peak reverse and off-state leakage current	30	mA	$T_j = 125^\circ\text{C}$, rated $V_{\text{DSS}}/V_{\text{DSS}}$ applied

TRIGGERING

	Parameter	175RK/235RK		Units	Conditions
P_{GM}	Maximum peak gate power	10.0		W	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $t_p \leq 5\text{ms}$
P_{AVG}	Maximum average gate power	2.0			$T_j = 125^\circ\text{C}$, $f = 50\text{Hz}$, $d\% = 50$
I_{GM}	Max. peak positive gate current	3.0		A	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $t_p \leq 5\text{ms}$
$+V_{\text{GM}}$	Max. peak positive gate voltage	20		V	$T_j = 125^\circ\text{C}$, $t_p \leq 5\text{ms}$
$-V_{\text{GM}}$	Max. peak negative gate voltage	5.0			
I_{GT}	DC gate current required to trigger	TYP.	MAX.	mA	$T_j = -40^\circ\text{C}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $T_j = 125^\circ\text{C}$ Max. required gate trigger / current / voltage are the lowest value which will trigger all units 12V anode-to-cathode applied.
		180	..		
		90	150		
V_{GT}	DC gate voltage required to trigger	2.9	..	V	$T_j = -40^\circ\text{C}$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ $T_j = 125^\circ\text{C}$
		1.8	3.0		
		1.2	..		
I_{GNT}	DC gate current not to trigger	10		mA	$T_j = 125^\circ\text{C}$ Max. gate current / voltage not to trigger is the max. value which will not trigger any unit with rated V_{DSS} anode-to-cathode applied.
V_{GNT}	DC gate voltage not to trigger	0.25		V	

THERMAL AND MECHANICAL SPECIFICATION

	Parameter	175RK/235RK		Units	Conditions
T_j	Max. operating temperature range	-40 to 125		°C	
T_{SM}	Max. storage temperature range	-40 to 150			
R_{JMC}	Max. thermal resistance, junction to case	0.105	0.10	K/W	DC operation
R_{JMS}	Max. thermal resistance, case to heat sink	0.04			Mounting surface, smooth, flat and greased
F	Mounting force, $\pm 10\%$	31		Nm	Non lubricated threads
wt	Approximate weight	280		gm	
	Case style	To - 209AE (TO-118)			See outline

175/235RK SERIES

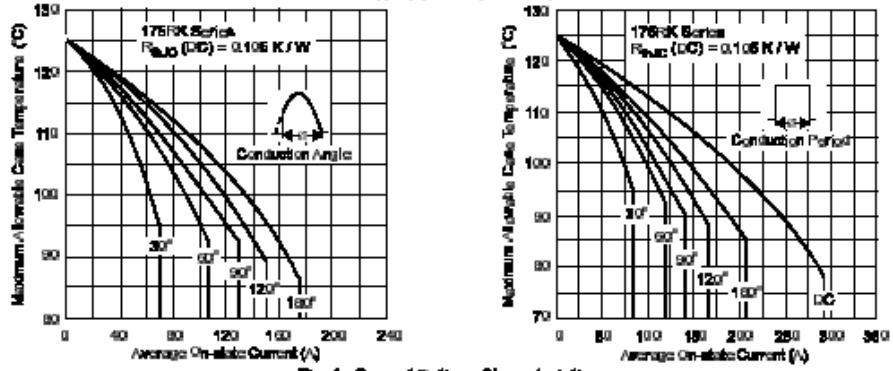


Fig. 1 - Current Ratings Characteristics

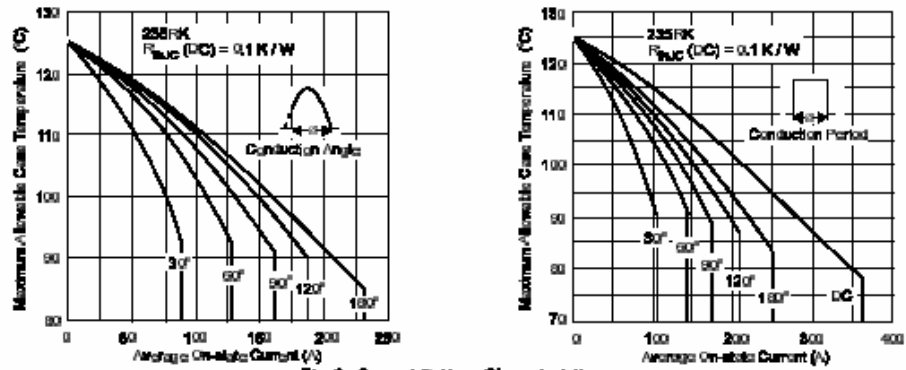


Fig. 2 - Current Ratings Characteristics

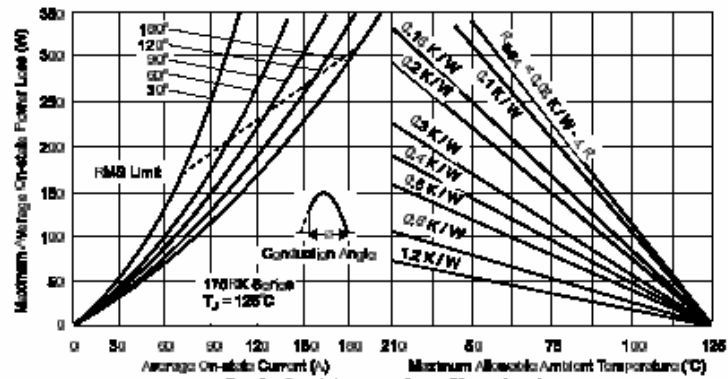


Fig. 3 - On-state Power Loss Characteristics

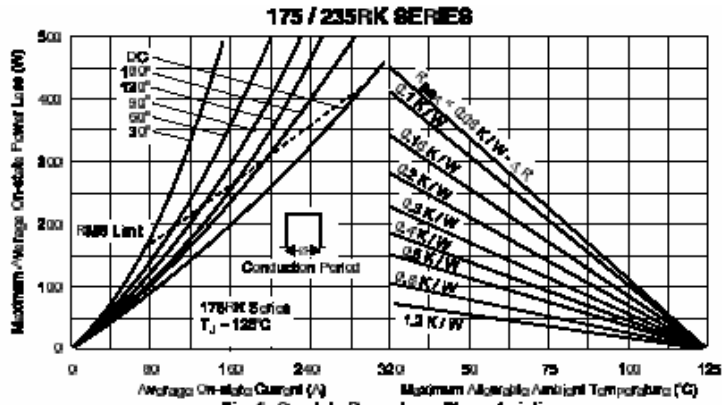


Fig. 4 - On-state Power Loss Characteristics

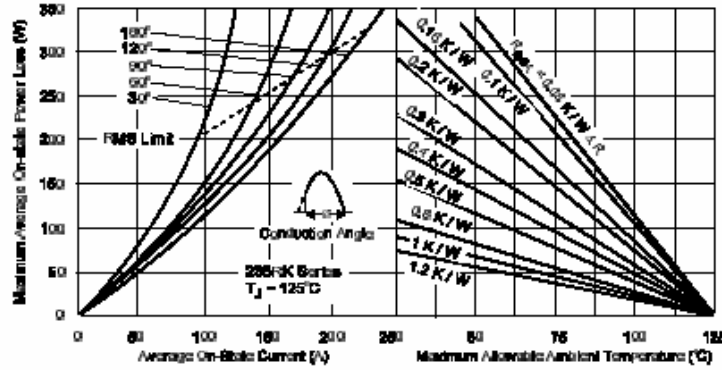


Fig. 5 - On-state Power Loss Characteristics

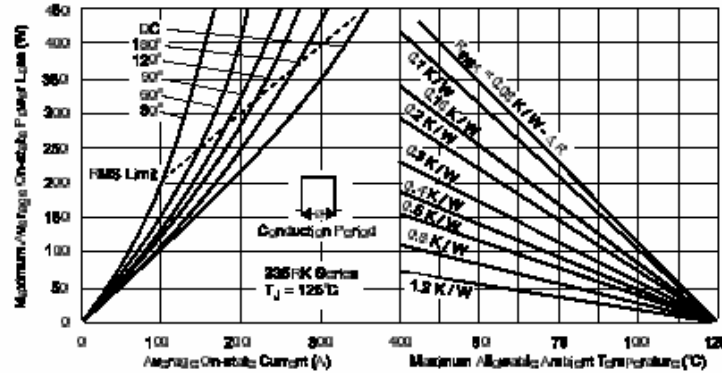
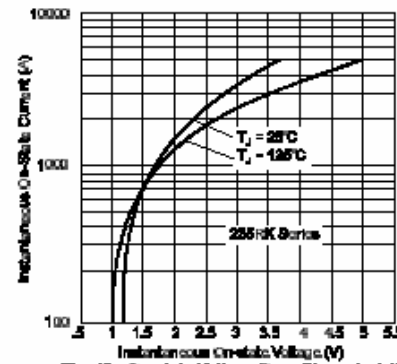
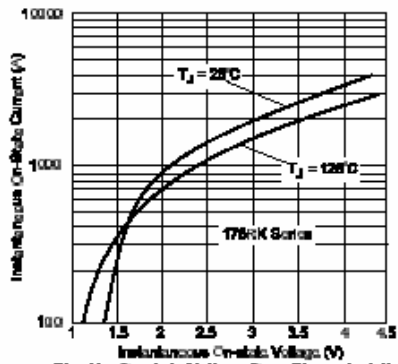
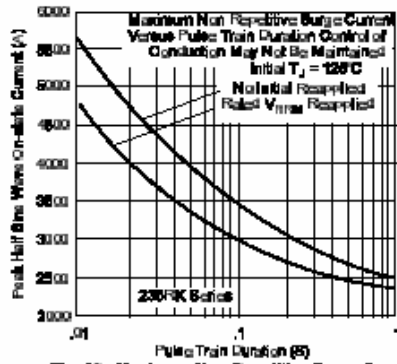
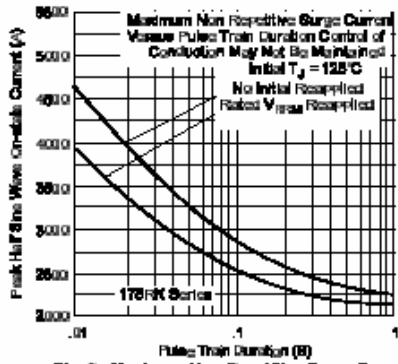
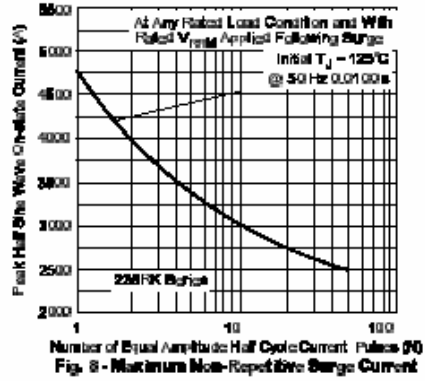
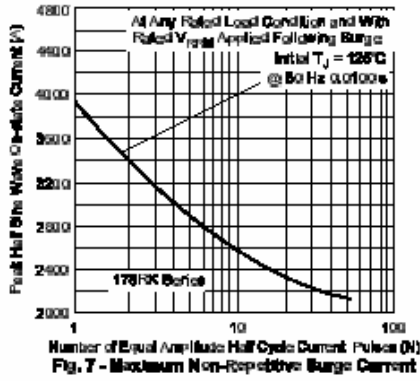


Fig. 6 - On-state Power Loss Characteristics

175/235RK SERIES



175 / 225RK SERIES

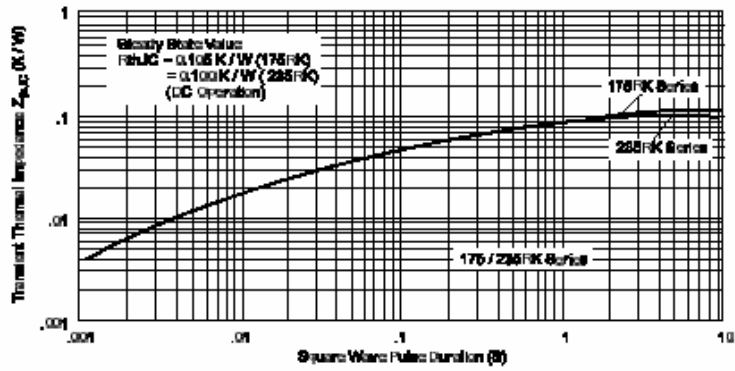


Fig. 18 - Thermal Impedance $Z_{\theta(jc)}$ Characteristics

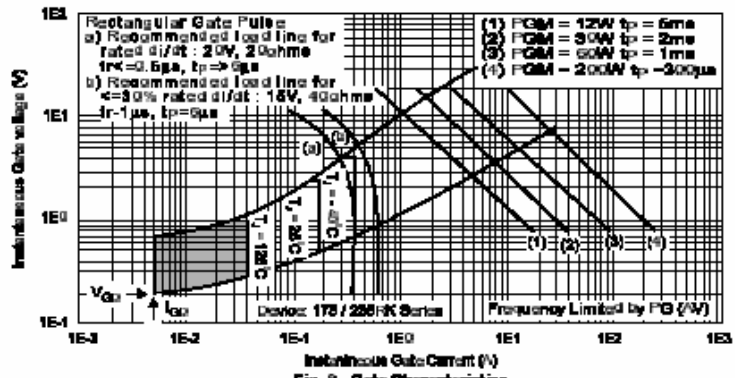


Fig. 9 - Gate Characteristics

EK B.

Threx 250UM serisi silikon güç diyotu teknik kılavuzu

250 Ampere Silicon Power Diodes

FEATURES

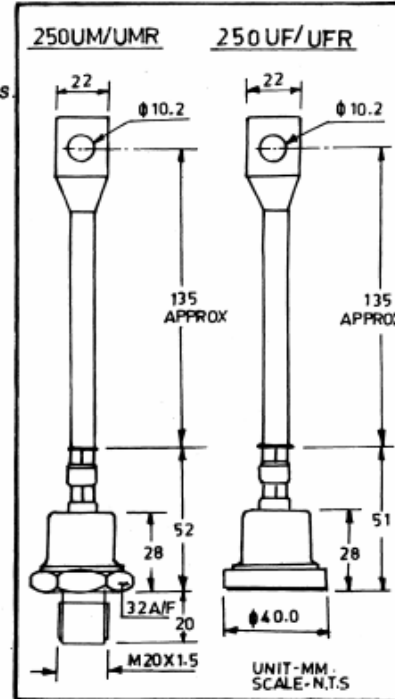
- ❖ Diffused series.
- ❖ Available in normal & reverse polarity.
- ❖ Device conforms to IS 3700 (III) & IS 4400 (III).
- ❖ Device outline (250 UM/UMR) conforms to IS 5000 (Do. 7).
- ❖ UF diodes are also available without ext. cables.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

$I_{F(AV)}$	Maximum average forward current $T_c = 130^\circ\text{C}$	250 A
V_{FM}	Maximum peak forward voltage drop @ Rated $I_{F(AV)}$	1.35 V
I_{FSM}	Maximum peak one cycle (non-rep.) surge current 10 msec.	4500 A
I_{FRM}	Maximum repetitive peak forward current	1200 A
I^2t	Max. I^2t rating (non-rep.) for 5 to 10 msec.	101 kA ² Sec

THERMAL MECHANICAL SPECIFICATIONS

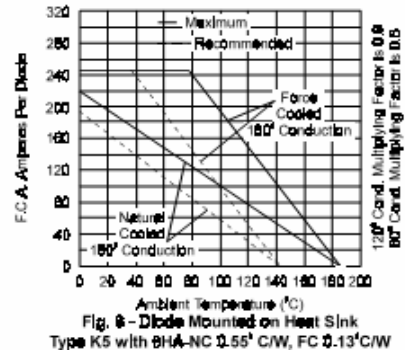
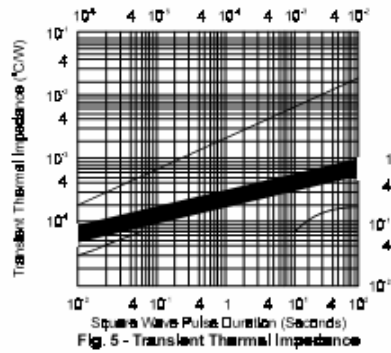
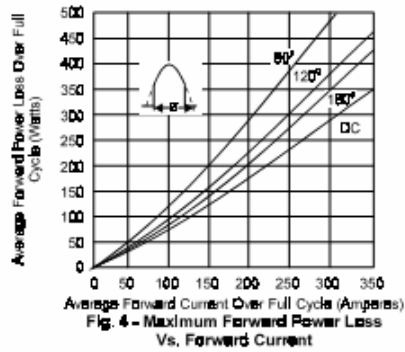
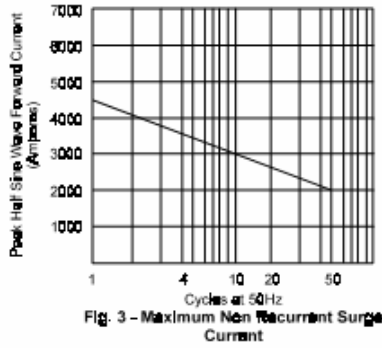
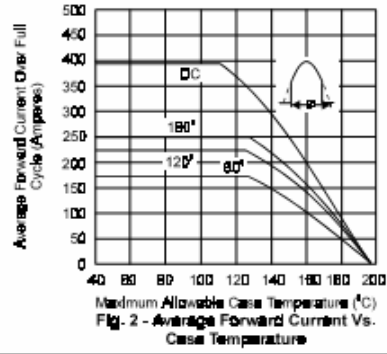
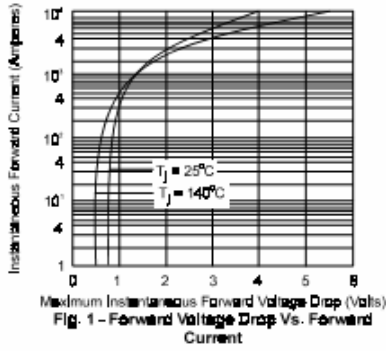
θ_{J-C}	Maximum thermal resistance junction to case	0.18 ^o C/W
θ_{C-H}	Contact thermal resistance	250UM/UMR 0.08 ^o C/W 250UF/UFR 0.05 ^o C/W
T_j	Operating junction temp.	-65 ^o C to 150 ^o C
T_{stg}	Storage temperature	-65 ^o C to 200 ^o C
	Mounting torque (Non-lubricated threads)	3.2 M-Kg min. 3.75 M-Kg max.
W	Approx. weight	260 gms.



ELECTRICAL RATINGS

TYPE NUMBER	250 UM/UMR 250 UF/UFR	10	20	40	60	80	100	120	140	160
V_{RRM}	Max. repetitive peak reverse voltage (V)	100	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
V_{RSM}	Max. non-repetitive peak reverse voltage (V)	150	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700
V_{RRMS}	Max. R.M.S. reverse voltage (V)	70	140	280	420	560	700	840	980	1120
V_R	Max. D.C. Blocking voltage (V)	100	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
	Recommended R.M.S. working voltage (V)	40	80	160	240	320	400	480	560	640
I_{RM}	Max. Average reverse leakage current @ V_{RRM} T_c (mA)	15	15	15	12	9	7	7	6	5

2550V/10A/1000V/25Q/UF250MB SBRFRS



ÖZGEÇMİŞ

Artun İ. Şabciyan 1978 yılında İstanbul'da doğdu. Ortaokul ve lise öğrenimini Özel Getronagan Ermeni lisesinde tamamladı. 1995 yılında YTÜ Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. Bölümünde lisans eğitimine başladı. 1999 yılında mühendislik diplomasını alıp 2002 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005-2006 yılları arasında askerlik görevini Malatya-Erhaç Havaalanında yedek subay olarak yaptı.

2003 yılında çalışmaya başlamış olduğu Mikrohost Sistem şirketinde görev yapmaktadır.