

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN 2 KADEMELİ
ALTERNATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya UYKIZ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER

HAZİRAN 2019

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN 2 KADEMELİ
ALTERNATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hülya UYKIZ
(1148204101)**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER

HAZİRAN 2019

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1148204101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hülya UYKIZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN 2 KADEMELİ ALTERNATÖR TASARIMI**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER**
Kırklareli Üniversitesi


.....

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Hayrettin TOYLAN**
Kırklareli Üniversitesi


.....

Dr. Öğr. Üyesi Haydar BAYAR
Yıldız Teknik Üniversitesi


.....

Teslim Tarihi : 29 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 21 Haziran 2019

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması boyunca her zaman yanımda olan, emeğini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, katkılarını her daim şükran ile hatırlayacağım kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Engin HÜNER' e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan annem, babam ve kardeşime, çalışmalarım sırasında bana gösterdiği sabır ve desteğinden dolayı sevgili eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Tübitak 3501 Kariyer Projesi kapsamında 115E964 proje numarası ile desteklenmiştir.

Haziran 2019

Hülya UYKIZ
(Öğretmen)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Literatür Taraması	2
2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER.....	9
2.1 Elektrik Makinelerinde Kullanılan Manyetik Malzemeler	11
2.1.1 Sürekli mıknatıslar	11
2.1.1.1 AlNiCo mıknatıslar	12
2.1.1.2 Ferrit mıknatıslar	13
2.1.1.3 Nadir toprak elementi mıknatıslar.....	14
2.1.2 Elektriksel çelik.....	15
2.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Sınıflandırılması	15
2.2.1 Radyal akılı makineler	16
2.2.1.1 Yüzey yerleştirmeli RASM makineler.....	17
2.2.1.2 Gömülü tip RASM makineler	17
2.2.2 Eksenel akılı makineler	17
2.2.2.1 EASM makinelerin avantaj ve dezavantajları.....	19
2.2.2.2 EASM makinelerinin kullanım alanları	20
2.2.2.3 EASM makinelerinin yapısı ve çeşitleri	21
2.2.2.4 EASM makinelerinin rotor ve stator yapıları.....	26
2.2.2.5 EASM makinelerde vuruş momenti	27
2.3 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	27
2.4 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Kullanım Alanları	28
3. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	29
3.1 Volan Sistemleri Bileşenleri.....	32
3.1.1 Volan roturu	32
3.1.2 Elektrikli makine	35
3.1.3 Yatak	35
3.1.4 Muhafaza.....	36
3.1.5 Güç elektroniği.....	37
3.2 Kapasite Aralığı.....	37
3.3 Çevre Sorunları	38
4. TASARIMIN UYGULANMASI.....	39
4.1 2p=12 Kutuplu EASM Motor-Alternatör Manyetik Analizi.....	39
4.2 Tasarımın 3d Katı Modeli ve Üretimi	40
4.2.1 Volan 3d katı modeli.....	41
4.2.2 EASM 2P=12 motor alternatör modeli	42

4.2.3 VEDS alternatör modeli	43
4.3 Tasarlanan EASM Motor ve Alternatörün Sargı Şemaları.....	45
4.3.1 2P=12 kutuplu motor-alternatör sargı şeması	45
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	49
5.1 Boş Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler	49
5.1.1 2P=12 kutuplu EASM makine “A” sargısı boş çalışma değerleri	49
5.1.2 “A” sargısı boş çalışma	55
5.1.3 “B” sargısı boş çalışma	56
5.1.4 “A” ve “B” sargısının karşılaştırılması	57
5.1.5 Seri bağlı durumda boş çalışma	58
5.2 Rejeneratif Modda Çalışma (Yüklü Çalışma)	58
5.2.1 “A” sargısı yüklü çalışma.....	59
5.2.2 Seri sargı yüklü çalışma	65
5.2.3 Paralel sargı yüklü çalışma.....	75
6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....	85
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	95
.....	95

KISALTMALAR

SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Makine
VEASM	: Volanlı Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
VEDS	: Volanlı Enerji Depolama Sistemi
EASM	: Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
RASM	: Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı
KW	: KiloWatt
MW	: MegaWatt
d/dk	: Devir/dakika
emk	: Elektromotor kuvveti

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : AlNiCo mıknatısların manyetik özellikleri	13
Çizelge 2.2 : Ferrit mıknatısların manyetik özellikleri	13
Çizelge 2.3 : SmCo mıknatıslarının manyetik özellikleri.....	14
Çizelge 2.4 : NdFeB mıknatıs tiplerinin manyetik özellikleri.....	15
Çizelge 3.1 : Volan Enerji sistemelerindeki SMSM'nin avantajları ve dezavantajları	35
Çizelge 4.1 : Volanın mekanik parametreleri	41
Çizelge 4.2 : 2P=12 EASM motor stator ve rotor parametreleri	43
Çizelge 4.3 : 2P=12 EASM makine sargı parametreleri	46
Çizelge 5.1 : 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.....	55
Çizelge 5.2 : "B" Sargısı 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.	56
Çizelge 5.3 : Seri sargının 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.	58
Çizelge 5.4 : VEDS'de 0,5sn'de alınan elektriksel değerler.	62
Çizelge 5.5 : VEDS'de 0,25sn'de alınan elektriksel değerler.	64
Çizelge 5.6 : VEDS'de 0,5sn'de alınan elektriksel değerler.	72
Çizelge 5.7 : VEDS'de 0,25sn'de alınan elektriksel değerler	73
Çizelge 5.8 : VEDS'de 0,5sn'de alınan elektriksel değerler.	81
Çizelge 5.9 : VEDS'de 0,25sn'de alınan elektriksel değerler.	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Sürekli mıknatıslı senkron generatörün rotor kesiti.	10
Şekil 2.2	: Sürekli mıknatısların demanyatizasyon eğrileri.	12
Şekil 2.3	: Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron generatörün rotor kesiti.	16
Şekil 2.4	: EASM alternatörlerin yapısı.	18
Şekil 2.5	: Eksenel akılı motorların elektrikli taşıtta kullanımı a) iki motorlu yapı b) tek motorlu yapı.	20
Şekil 2.6	: Tek rotorlu ve tek statorlu eksenel akılı jeneratör yapısı.	22
Şekil 2.7	: Stator dengeli tek kenarlı eksenel akılı motor.	23
Şekil 2.8	: Çift statorlu eksenel akılı makine.	24
Şekil 2.9	: Nüvesiz, çok diskli eksenel akılı sabit mıknatıslı makine.	25
Şekil 2.10	: Çeşitli yapılardaki eksenel akılı motor yapıları a) Toroidal sargılı tek stator iki rotor b) Çoklu rotor ve stator c) Rombodial sargılı tek stator iki rotor d) Rombodial sargılı tek rotor iki stator.	26
Şekil 3.1	: Volanlı enerji depolama sisteminin genel yapısı.	30
Şekil 3.2	: Farklı volan kesitleri.	34
Şekil 4.1	: 2P=12 Kutuplu EASM alternatörün maxwell’de modellenmesi.	39
Şekil 4.2	: Volan a) 3d Katı modeli b) Üretilen volan.	41
Şekil 4.3	: 2P=12 EASM motor-generatör a) 3d Katı modeli b) üretim sonrası.	42
Şekil 4.4	: VEDS a) 3d katı modeli b) 3d Modelin üretimi.	44
Şekil 4.5	: Tam kalıp sarım şeması X=36 oluk 2P=12 a) Sargı oluk yerleşimi b) R fazının bağlantı şeması c) S fazının bağlantı şeması d) T fazının bağlantı şeması.	47
Şekil 4.6	: Sargı bağlantı şeması a) Seri bağlantı b) Paralel bağlantı.	47
Şekil 5.1	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 12,53 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	50
Şekil 5.2	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 19,70 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	51
Şekil 5.3	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 29,67 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	52
Şekil 5.4	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 35,92 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	53
Şekil 5.5	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 42,33 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	54
Şekil 5.6	: EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 45,92 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.	55
Şekil 5.7	: “A” Sargısı 2P=12 Kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.	56
Şekil 5.8	: “B” Sargısı 2P=12 Kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.	57
Şekil 5.9	: “A” ve “B” sargısının EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.	57

Şekil 5.10 : Seri sargının 2P=12 kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği	58
Şekil 5.11 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. kademe.....	59
Şekil 5.12 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 2. kademe.....	60
Şekil 5.13 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 3. kademe.....	60
Şekil 5.14 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. kademe.....	61
Şekil 5.15 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. kademe.....	61
Şekil 5.16 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. kademe.....	62
Şekil 5.17 : VEDS 0,5sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	63
Şekil 5.18 : VEDS 0,25sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	65
Şekil 5.19 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. Kademe	66
Şekil 5.20 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 1. Kademe.....	66
Şekil 5.21 : VEDS “A+B” Seri sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 2. Kademe ...	67
Şekil 5.22 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 2. Kademe.....	67
Şekil 5.23 : VEDS “A+B” Seri sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 3. Kademe ...	68
Şekil 5.24 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 3. Kademe.....	68
Şekil 5.25 : VEDS “A+B” Seri sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. Kademe ...	69
Şekil 5.26 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 4. Kademe.....	69
Şekil 5.27 : VEDS “A+B” Seri sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. Kademe ...	70
Şekil 5.28 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 5. Kademe.....	70
Şekil 5.29 : VEDS “A+B” Seri sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. Kademe ...	71
Şekil 5.30 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 6. Kademe.....	71
Şekil 5.31 : VEDS 0,5sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	73
Şekil 5.32 : VEDS 0,25sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	74
Şekil 5.33 : VEDS “A//B” Paralel sargının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. Kademe	75
Şekil 5.34 : VEDS “A//B” Paralel sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 1. Kademe.....	75
Şekil 5.35 : VEDS “A//B” Paralel sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 2. Kademe.....	76
Şekil 5.36 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 2. Kademe.....	76
Şekil 5.37 : VEDS “A//B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 3. Kademe	77
Şekil 5.38 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 3. Kademe.....	77
Şekil 5.39 : VEDS “A//B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. Kademe	78

Şekil 5.40 : VEDS “A//B” Paralel sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 4. Kademe.....	78
Şekil 5.41 : VEDS “A//B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. Kademe	79
Şekil 5.42 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 5. Kademe.....	79
Şekil 5.43 : VEDS “A//B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. Kademe	80
Şekil 5.44 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 6. Kademe.....	80
Şekil 5.45 : VEDS 0,5sn’deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	82
Şekil 5.46 : VEDS 0,25sn’deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği	83

VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN 2 KADEMELİ ALTERNATÖR TASARIMI

ÖZET

Günümüzde enerjinin geri kazanımı önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Enerjinin geri kazanımı için en çok çalışılan alanlar süper kapasitörler ve volanlardır. Volanlar, enerjiyi kinetik olarak depo eden elemanlardır. Yapılan çalışmalarda volanlar yüksek çevrim ömürleri ve sağladıkları yüksek güç yoğunluğu açısından ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada da volanlı enerji depolama sistemleri için çok kutuplu ve çok sargılı alternatör yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan alternatör yapısı kompakt tasarımı, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verime sahip olan eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) alternatördür. Böylece kompakt yapı çerçevesinde tasarlanan EASM alternatör yapısı ile maksimum enerjinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Volanlı enerji depolama sistemleri (VEDS) incelendiğinde enerjinin kısa sürelerde depolaması açısından çok uygun olduğu görülmektedir. VEDS sistemleri yüksek hız ve düşük hız kademesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük hız kademesi 10000 d/dk hıza kadar olan kademedir. Volan hızı 10000 d/dk üstüne çıktığında ise yüksek hız kademesi olarak isimlendirilir. Literatürde VEDS'leri üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında ise; yenilenebilir enerji sistemlerinde oluşabilecek enerji dalgalanmalarının giderilmesinde, elektrikli araçların fren enerjisinin geri kazanılmasında, enerji nakil hatlarında meydana gelen dalgalanmalarda, uzay uygulamalarında ve bobinli manyetik fırlatıcılara enerji sağlanmasında kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada düşük hız kademesinde (460 d/dk hızda) mekanik rulmanlar ile yataklama yapılarak volanın kinetik enerjisi depolaması sağlanmıştır.

Volan için alüminyumdan yarıçapı 15cm olan disk şeklinde bir yapı kullanılmıştır. Volanın deneylerin yapıldığı 460d/dk hızda depolayabildiği enerji 493 joule olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan EASM alternatör yapısında çift özdeş sargı kullanılmıştır. Kullanılan bu sargı yapısı ile amaç farklı durumlarda kademeli olarak enerjinin geri kazanılmasıdır. Elde edilen deneysel sonuçlar tek sargı, seri bağlı durum ve paralel bağlı durumlar için alınmıştır. Tasarlanan EASM alternatör yapısı üretim kolaylığı açısından açık oluklu yapıya sahiptir. İkizkenar yamuk sargı yapısı, tam kalıp olarak kullanılmıştır. Rotor ise 12 kutuplu yapıya sahiptir. Dikdörtgen tip neodyum mıknatıslar kullanılmıştır.

Tasarlanan EASM alternatör A ve B sargısından oluşmaktadır. A sargısı için faz değerleri 125 ve 459 d/dk da sırasıyla 24.9 ve 91 voltur. B sargısı için elde edilen faz değerleri 126.6 ve 457 d/dk da sırasıyla 24.8 ve 90.2 voltur. Değerler göz önünde tutulduğunda aynı devir sayıları için sargıların özdeş olduğu görülmektedir.

Fren enerjisinin geri kazanılması (rejeneratif modda) 6 kademeli yük kullanılarak 0,5sn içerisinde elde edilen enerjiler hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar A sargısı için maksimum 332 joule, sargıların seri bağlı durumu için 474 joule ve paralel bağlı durumu için 463 joule enerji elde edilmiştir.

Volandan 460d/dk için hesaplanan enerji 493 joule'dür. Bu durumda 460 d/dk'da en yüksek enerji seri sargından elde edilmiştir. Seri sargıdan elde edilen enerji toplam enerjiden %3,8 daha azdır.

DESIGN OF 2 STATE ALTERNATOR FOR FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEMS

SUMMARY

Today, the recovery of energy in systems has become an important subject of study. The most studied areas for energy recovery are super capacitors and flywheels. Flywheels are the elements that store energy in kinetics. Flywheels are characterized by high cycle life and high power density. In this study, multi-pole and multi-wind alternator structure is designed for flywheel energy storage systems. The designed alternator structure is a compact design, high power density and high efficiency axial flux permanent magnet (EASM) alternator. Thus, it is aimed to obtain maximum energy with EASM alternator structure which is designed within as a compact structure.

When the energy storage systems (VEDS) with flywheel are examined, it is seen that the energy is very suitable for short periods of storage. VEDS systems are divided into two groups as high speed and low speed. The low speed range is up to 10000 rpm. When the flywheel speed rises above 10000 rpm, it is called high speed. When the studies on the literature on VEDS are examined; It is seen that electric vehicles are used in the recovery of energy fluctuations in renewable energy systems, in the recovery of brake energy, in fluctuations in energy transmission lines, in space applications and in providing energy to coil magnetic launchers. In this study, kinetic energy storage of the flywheel has been provided by mechanical bearings at low speed (460 rpm).

For the flywheel, a disc-like structure with a radius of 15cm is used. The energy that the flywheel can store at a speed of 460 rpm was calculated as 493 joule. In the designed EASM alternator structure, double identical winding is used. The purpose of this winding structure is to take energy gradually in different situations. The experimental results obtained were taken from single winding, series connected state and parallel connected conditions. The designed EASM alternator structure has an open corrugated structure for ease of production. The trapezoidal winding structure was used as a full mold. The rotor has a 12-pole structure. Rectangular type neodymium magnets were used.

Designed with EASM alternator A and B winding. The phase values for winding A are 24.9 and 91 volts at 125 and 459 rpm respectively. The phase values obtained for winding B are 24.8 and 90.2 volts at 126.6 and 457 rpm respectively. Considering the values, it is seen that the windings are identical for the same speeds.

In the regenerative mode, the energies obtained within 0.5 s are calculated by using 6-stage load. The experimental results obtained have a maximum of 332 joule for the winding A, 474 joule for the series connected state of the windings and 463 joule for the parallel state.

The energy calculated for the flywheel at 460 rpm is 493 joule. In this case, the highest energy at 460 rpm was obtained from the series winding. The energy obtained from the series winding is 3.8% less than the total energy.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada EASM makinelerinin ve volanlı enerji depolama sistemlerinin yapıları incelenmiştir. VEDS'lerde biriken kinetik enerjinin geri kazanılması için aksenal akılı sürekli mıknatıslı (EASM) alternatör tasarlanmıştır. Tasarımın 3 boyutlu modellenmesi yapılmıştır. 12 kutuplu EASM makine yapısı içinde sargıların seri ve paralel durumlarda gerilim ve güç değerleri elde edilmiştir.

Bu çalışmanın;

Giriş bölümünde; konu açıklanarak literatürdeki çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde; sabit mıknatıslı senkron makinelerin yapıları, çeşitleri, avantaj-dezavantajları ve kullanım alanları anlatılmıştır. EASM makinelerin yapısı, çeşitleri, rotor ve stator yapıları, kullanım alanları, avantaj-dezavantajları ve vuru mu momentine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde; volanlı enerji depolama sistemleri ve bileşenlerine yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde; EASM tasarımının 3 boyutlu modellemesine yer verilmiştir. Yapılan modelin manyetik analizleri yapılmıştır.

Beşinci bölümde; 12 kutuplu EASM makine yapıları farklı devir sayılarında döndürülerek elde edilen emk değerleri kaydedilmiştir. 12 kutuplu EASM makinenin boş çalışma ve yüklü çalışmada, sargıların seri ve paralel durumlarında elde edilen emk ve elde edilen rejenaratif enerji deneysel olarak gösterilmiştir.

Altıncı bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Volanlı enerji depolama sistemleri (VEDS) için çok kutuplu ve çok sargılı aksenal akılı sürekli mıknatıslı (EASM) alternatör yapısı tasarlanmıştır. Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verime sahip olmasından dolayı EASM alternatör tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan makine yapısında elektromotor kuvveti (emk) değerleri elde edilmiştir. Bunun için 12 kutuplu EASM makine sargıların seri ve paralel durumlarda

gerilim ve güç değerleri kaydedilmiştir. Çalışmada amaç en kısa sürede volandaki enerjiyi geri kazanmaktır.

1.2 Literatür Taraması

Günümüzde güç yoğunluğu, kompakt yapıları ve yüksek verimlilik avantajlarından dolayı eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır.

Volanlı enerji depolama sistemleri yüksek güç yoğunluğu, depolama veriminin yüksek olması, şarj süresinin kısa olması, evre dostu bir teknoloji olması ve uzun ömürleri sebebiyle farklı uygulama alanlarında yer bulmaktadır. Volanlı enerji depolama sistemi (VEDS) ve eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler ile ilgili yapılan çalışmalara bu bölümde yer verilmiştir.

Ajily ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada EASM makinelerde meydana gelebilecek dinamik ve statik dış merkezlilik, mıknatıs deformasyonu ve düzensiz manyetik dağılımına engel olabilmek amacıyla farklı yöntem üzerinde durmuşlardır. Bu yöntemle üç boyutlu tasarımıyla, analizi aşamasında makinenin yüksek analiz yükünün azaldığı gösterilmiştir (Ajily ve diğ, 2016).

Huang ve arkadaşı 2016 yılında yaptıkları çalışmada hafif elektrikli araçlarda bulunan EASM makinelerin meydana getirdiği vuruuntu momentinin SEY ile sebeplerini araştırmışlardır. Vuruuntu momentini gidermek amacıyla yamuk çift katmanlı olan mıknatıslar tasarımlarda kullanılmıştır. Tek taraflı EASM makineyle yaptıkları tasarımları test ederek %70 oranında vuruuntu momentininin azaldığı grlmştir (Huang ve diğ, 2016).

Kim ve arkadaşı 2016 yılında yaptıkları çalışmada denizlerdeki gel-git türbinlerine EASM makine tasarımı yapılmışlardır. Makine boyutunu mıknatısların manyetik davranışları, stator- rotor çapları ve hava aralığını göz önüne alarak hesaplanmıştır. 3D simülasyonu oluşturarak, SEY ile analiz edilmiştir. Referans makineyle oluşturulan tasarımın karşılaştırması yapılmıştır (Kim ve Sarlioğlu, 2016).

Pop ve arkadaşları yaptıkları çalışmada radyal akılı ve eksenel akılı makineleri karşılaştırmıştır. Fiziksel ve elektromanyetik olarak birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlı özellikleri değerlendirilmiştir. Bu makine tiplerinin nerelerde kullanıldığına yönelik çalışma yapılmıştır (Pop ve diğ, 2013).

Shokri ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı model mıknatısla oluşturulan rotorlara sahip EASM makinelerinin, 3D SEY ile performanslarının analizini yapmışlardır. Bu şekilde performansı en iyi olan mıknatıs modeli belirlenmiştir. Bu mıknatıs modelinin vuruğu momenti ve üretilen gerilim gibi değerleri yorumlanmıştır (Shokri ve diğ., 2015).

Ishikawa 2015 yılında yaptığı çalışmada EASM bir makinenin optimize modelini oluşturmuştur. Bu tasarlanan makinenin analizi yapılmıştır. Ticari olan EASM makineyle tasarlanan makine kıyaslanmıştır (Ishikawa, 2015).

Alipour ve arkadaşı 2016 yılında yaptıkları çalışmada EASM makine yarı açık oluklu şekilde tasarlamış ve 3D simülasyonu oluşturulmuştur. Bu simülasyon ve SchwarzChristoffel ile alınan değerler karşılaştırılmıştır (Alipour ve Moallem, 2013).

Limsuwan 2014 yılında yaptığı çalışmada sabit mıknatıslı makinelerin verimliliğini ve geniş işletim aralığını artırabilmek amacıyla makinelerde değişken manyetik özellikleri olan sabit mıknatıs kullanılmıştır. Oluşturulan bu makine SEY ile analiz edilmiştir (Limsuwan, 2014).

Donato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kesirli sargılı, tek stator ve çift rotorlu EASM makine tasarımı oluşturulmuştur. SEY ile analizi gerçekleştirerek, makine performansını kesirli sargı modelinin arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır (Donato ve diğ., 2015).

Marques 2008 yılında yaptığı çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron makine kullanarak karayolu taşıtları için bir volan depolama sistemi tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. Volanın rotoru, boyutları, ağırlığı ve malzemenin farklı enerji kapasiteleri için maliyetini hesaplayarak tasarım yapılmıştır. Kinetik enerji ile elektrik enerjisi arasındaki dönüşüm için her biri 30 kW iki sabit mıknatıslı senkron makine kullanılmıştır. 2,5 kWh ve 44 kg'lık iki sağlam rotoru olan elektrikli bir araçta kullanılmak üzere 5 kWh kapasiteli bir volan enerji depolama sisteminin tasarlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Marques, 2008).

Zhou ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada enerji hatlarında oluşan gerilim dalgalanmalarını düzenlemek için VEDS önermişlerdir. Matematiksel model için Matlab yazılımı kullanmışlardır. Sabit mıknatıslı radyal akılı makine tasarımda kullanılmıştır (Zhou ve diğ., 2015).

Santiago ve arkadaşı 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında aksenal akı ve radyal akı demirsiz geometrilerini analitik olarak karşılaştırmışlardır. Bunların özelliklerini hesaplamak için Maxwell denklemlerinin analitik bir çözümünü kullanmışlardır. Modeli 3D FEM analiziyle doğrularak bir prototip oluşturmuşlardır. Karşılaştırma sonucunda önemli farklılıklar elde etmişlerdir (Santiago ve Bernhoff, 2010).

Fu ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında EASM makine yapısında elektrikli araçlar için VEDS önermişlerdir. Elektrikli araçlarda VEDS'lerin kısa zamanda tekrar şarj olma, maliyet ve çevrim ömrü gibi özelliklerinden dolayı kullanılabilceğini vurgulanmışlardır (Fu, 2010).

Su ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında matlab tabanlı bir volan enerji depolama modeli oluşturmuşlardır. Simülasyon sonuçlarıyla, volan ünitesinin şarj ve deşarj modları sırasında dinamik davranışlarını göstermişlerdir. VEDS'in dinamik performansını analiz etmek için ayrıntılı Simulink modelini gerçekleştirmişlerdir (Zhou ve diğ, 2010).

Qian 2010 yılında yaptığı çalışmada rüzgar ve güneş enerji sistemlerinde VEDS'lerin kullanılmasını incelemiştir. Güneş ve rüzgar süreklilik göstermediğinden enerjinin 4 saate kadar elde edilebilmesi için VEDS'nin önemli olduğu belirtilmiştir (Qian, 2010).

Zhang ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmalarında VEDS için EASM makine tasarlamışlardır. 3D sonlu elemanlar yönteminin (SEY) kullanıldığı programlar ile analizleri yapmışlardır. Kaykı tekniklerini, vuru momentini için uygulamışlardır. Çift rotorlu sistemleri, aksenal kuvvetleri dengelemek için önermişlerdir (Zhang ve diğ, 2010).

Dong ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmalarında elektromanyetik uçak fırlatma sistemine 2 saniyede 30kW kuvvet sağlayan VEDS tasarlamışlardır. İkinci bir sargıyla alternatör modu için sistem oluşturmuşlardır. Nüvesiz EASM makine tasarlamışlardır (Dong ve diğ, 2012).

Bai ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmalarında aktif manyetik rulmanlı, bir VEDS prototipi geliştirmişlerdir. Manyetik kuvvetin, volan rotorunun ve kontrol ünitesinin dinamik sistemin kararlılığına etkisini incelemiştir. Volanın 28500 d/dk dönme hızına, maksimum uç hızının 450 m/s'ye ve maksimum elektrik boşalma gücünün 40W'a ulaştığı sonucuna ulaşmışlardır (Bai ve diğ, 2012).

Junfeng 2012 yılında küçük uydularda kullanmak amacıyla PCB ye basılı devre kartından meydana gelen statoru sabit mıknatıslı VEDS tasarlamıştır. Kompakt yapısının radyal akılı makinelerle göre avantajlı olduğu vurgulanmıştır (Junfeng, 2012).

Aydın ve Aydemir çalışmalarında uzay uygulamaları için basit bir volan enerji depolama sistemi incelenmiştir. Bunun için kontrol algoritması sunarak deneysel sonuçlar elde etmişlerdir (Aydın ve Aydemir, 2013).

Diaz-Gonzalez ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada VEDS tabanlı rüzgar türbininde kullanılan enerji yönetim sistemi önermişlerdir. VEDS kontrolün amacı rüzgar türbininin yüklenmesiyle meydana gelen gerilim dalgalanmalarına karşı dc hat gerilimini sabit tutabilmektedir (Diaz-Gonzalez ve diğ, 2013).

Kato ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada 10MW'lık, 20 dakika enerji kapasiteli network sistemleri için bir VEDS önermişlerdir. Tasarlanan sistemin %90 şarj ve deşarj verimliliğinin olduğunu vurgulamışlardır. 6000d/dk referans alınarak çalışma yapmışlardır. Değişen meteorolojik koşullarda oluşan güç dalgalanmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgar enerjisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır (Kato ve diğ, 2014).

Zhou ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada trenlerin frenleme enerjilerini tekrar kazandırmak amacıyla VEDS tasarlamışlardır. Isı enerjisi, kinetik enerjiye sistem trenin durması esnasında dönüştürmektedir. Bu enerji trenin hızlanmasıyla kullanılmaktadır (Zhou ve diğ, 2014).

Sezenoğlu ve Balıkçı çalışmalarında yeni üç fazlı EASM makine tasarlanmışlardır. Geleneksel üç fazlı EASM makinelerinin aksine, her aşamayı bir faz sarımından oluşturmuşlardır. Bununla birlikte endüktans ve direnç değerlerini geliştiren yeni bir sarım şekli sunmuşlardır. Sistemi, lineer endüksiyon başlatıcısının güç ihtiyacını karşılamak için motor, volan sistemi ve tasarlanmış jeneratörden oluşturmuşlardır (Sezenoğlu ve Balıkçı, 2015).

Hedlund ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmalarında otomotiv uygulamalarındaki ilerlemeye odaklanan volan enerji depolama teknolojisinin bir incelemesini yapmışlardır. Bu teknolojinin gelişimine katkıda bulunan en az 26 üniversite araştırma grubunun ve 27 şirketin konuyla alakalı bilgilerini paylaşmışlardır (Hedlund ve diğ, 2015).

Kumar ve arkadaşları çalışmalarında havacılıkta volanı enerji depolama sistemi için ultra yüksek hızlı bir aksenel akılı sabit mıknatıslı makinenin tasarımına ve analizine odaklanmışlardır. Rotor kalıcı mıknatıs şekli, analitik modelleme kullanılarak sinüzoidal bir geri elektrik hareket gücü elde etmek üzere tasarlamışlardır. İki tür sargıya dayanarak, sinüzoidal mıknatıslar kullanılarak iki model önermişlerdir. Bu sinüzoidal modellerin, elektrik hareket gücü harmoniklerinin ve tork dalgalanmasının temel modelden çok daha az geri çekildiğini doğrulayan bir 3D FEM analizi yapmışlardır (Kumar ve diğ, 2015).

Tameghe ve arkadaşları 2015 yılında VEDS'in analizini, modellenmesini ve simülasyonunu yapmışlardır. Analiz edilen VEDS cihazını alt sistemlere bölerek, her birini modellemişlerdir. Geliştirilen modelleri matlab yazılımını kullanarak uygulamışlardır. Elde edilen sinyaller, dalga formları gelişmiş teoriyle uyumlu olduğunu göstermişlerdir (Tameghe ve diğ, 2015).

Erhan ve arkadaşları çalışmalarında elektrikli hibrit araçlarda enerji depolamak için bir VEDS tasarlanmışlardır. VEDS'in performansını test etmek için deneysel bir kurulum tasarlayarak, şarj ve deşarj testleri yapmışlardır. Deney sonucunda, VEDS'in 24.000 d/dk'ye ulaştığını göstermişler ve VEDS'e başarıyla enerji depolayabilmişlerdir (Erhan ve diğ, 2016).

Nemsi ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında VEDS'in bir microgrid'deki davranışını incelemişlerdir. VEDS'in her parçasını modellenmişlerdir. Volan enerji depolama sisteminin avantajlarını, sistemin motor olarak çalıştığı ve kinetik bir form olarak 450 kW depoladığı ya da sistemin bir jeneratör olarak çalıştığı restitüsyon döneminde depoladığı zamanları, matlab yazılımını kullanarak göstermişlerdir (Nemsi ve diğ, 2016).

Wojciechowski çalışmasında EASM çekirdeksiz motordaki manyetik alan simülasyonu için yöntemler önermiştir. Aksenel simetrik 2B kalıpları üst üste bindirerek 3B alan dağılımını temsil etmeyi temel alan iki yaklaşım ele almıştır. Çalışılan yaklaşımlardan ilkinde doğrudan Biot-Savart yasası uygulanırken, ikincisinde 2D aksenli simetrik sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Seçilen EASM çekirdeksiz motoru için manyetik alan dağılımlarının ve elektromanyetik tork özelliklerinin seçilmiş sonuçları sunarak, Maxwell'de elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır (Wojciechowski, 2016).

Conteh ve arkadaşı çalışmasında volan enerji depolama için uygun çeşitli kompozit malzemelerin özelliklerini incelemişlerdir. Volan için maksimum enerji yoğunluğunu ve şekil faktörünü belirlemek için tasarım ve stres analizi kullanmışlardır. Özellikleri değerlendirmek için CADEC-online yazılımıyla analitik çalışmalar yapmışlardır (Conteh ve Nsofor, 2016).

Kale ve arkadaşı 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında volan enerji depolama sistemleri için optimum metal ve kompozit rotorlar arasında karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Spesifik malzeme sekanslarına sahip pres takılı çok kenarlı kompozit rotorların, toplam enerji veya spesifik enerji açısından tek jantlı kompozit ve metal volanlardan daha iyi performansı olabileceğini göstermişlerdir (Kale ve Secanell, 2018).

Soomro ve arkadaşları çalışmalarında endüksiyon ve EASM makinesi tarafından işletilen volan sistemlerini ele almışlardır. Farklı şarj ve deşarj durumları sırasındaki bireysel performansları analiz ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Her iki makinenin VEDS şarj ve deşarj döngülerindeki genel bir karşılaştırmasını yapmışlardır. EASM, endüksiyon makinesine kıyasla daha az reaktif güç gereksinimi, daha düşük başlangıç ani akımları ve daha düşük voltaj değişimleri olduğunu göstermişlerdir (Soomro ve diğ., 2018).

Basmaji 2018 yılında yaptığı çalışmasında, yüksek hızlı eğirme sağlayan en yüksek çekme dayanımına sahip olan kompozit malzemedan yapılmış volan rotorunu döndürerek, enerjiyi kinetik enerji biçiminde depolayan volanın çalışma prensibi üzerinde durmuştur (Basmaji, 2018).

Toodeji 2019 yılında yaptığı çalışmasında süper kapasitörlerin dönen diskin içine yerleştirildiği yeni bir tasarım önermiştir. Dönen süper kapasitörlerin kinetik enerjinin yanı sıra elektriksel olarak depolanması da önerilen volan enerji deposunun, enerji depolama kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Sürekli mıknatıslı senkron bir makine ile donatılmış ve doğrudan vektör kontrolöründe modifiye edilmiş olan gelişmiş volan enerji deposu, çeşitli koşullar altında matlab ile simüle edilmiştir (Toodeji, 2018).

Literatür incelendiğinde yapılan çalışmaları maddeler halinde sıralayabiliriz.

- EASM makinelerin farklı alanlarda kullanılması
- Vuruntu momentinin giderilmesi

- Farklı EASM makine tiplerinin hazırlanması
- Radyal akılı ve eksenel akılı makineleri karşılaştırılması
- VEDS'in analizi, modellenmesi ve simülasyonunun yapılması
- Havacılıkta volan enerji depolama sistemi
- Uzay uygulamaları için enerji depolama sistemi
- Karayolu taşıtları için volan enerji depolama sistemi tasarımı
- Enerji hatlarında oluşan gerilim dalgalanmalarını düzenlemek için VEDS tasarımı
- EASM makine yapısında elektrikli araçlar için VEDS tasarımı
- Rüzgar ve güneş enerji sistemlerinde VEDS'lerin kullanılışı
- VEDS için EASM makine tasarımı

Volan enerji depolama sistemleri çevrim ömürleri ve verimlerinin fazla olması, hızlı şarj ve deşarj olabilmeleri gibi avantajlarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Bunda VEDS'lerin sahip oldukları avantajlar vardır. Bunlar kimyasal bataryalara göre çok hızlı şarj ve deşarj olmalarıdır. Bununla birlikte çevrim ömürleri ve verimleri yüksektir. Yüksek deşarj akımları verebilirler.

Bu çalışmada VEDS için moment karakteristiği ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle EASM makine tasarlanarak 3 boyutlu tasarımı yapılmıştır. Tasarımın manyetik analizi yapılarak, boş ve yüklü çalışma durumlarında A ve B sargılarından enerji elde edilmiştir.

2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER

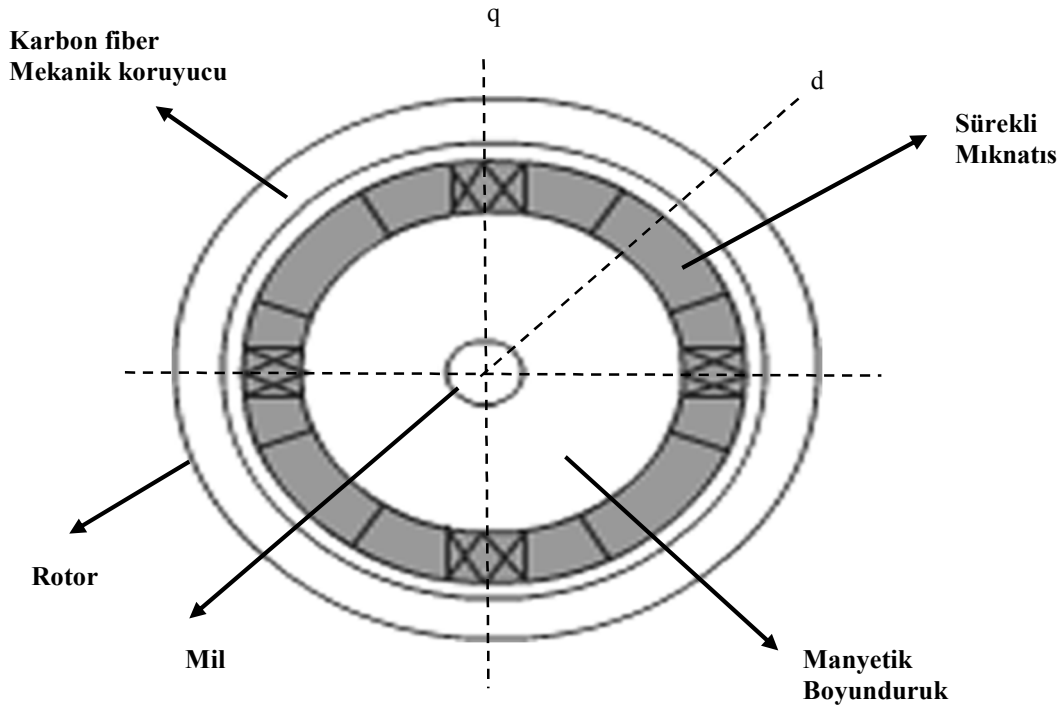
Elektrik makineleri günlük hayatta bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Evlerde kullanılan elektrik süpürgeleri, derin dondurucular, buzdolabı, klima vb küçük güçlü motorlu aletlerdir. Sanayide ise çok güçlü elektrik makineleri kullanılmaktadır. Hayatımızı kolaylaştıran bu makinelerde kullanılan elektrik gücü, uzun mesafelerde iletimi ve kontrol edilmesi kolay, temiz ve verimli bir enerji kaynağı olması sebebiyle kullanım alanı geniştir. Bu makinelerde güçlerin sağlanması için generatörlerin ürettikleri güçlere ihtiyaç vardır (Umar, 2018).

Elektrik makinelerinin çalışması enerji dönüşümüne dayanır. Bu dönüşüm, manyetik alan hareketine bağlıdır (Umar, 2018). Manyetik alan, motorlarda, jeneratörlerde ve transformatörlerde enerjinin bir formdan diğerine dönüştürüldüğü yerdir. Transformatör, motor ve generatörler manyetik alanı kullanarak enerji dönüşümü yapan elektrik makineleridir. Jeneratör , mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken, motor elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür (Chapman, 2005). Transformatörler ise mekanik ve elektrik enerjisi arasında dönüşüm yapmazlar. Elektrik gücünü transformatör, bir devreden diğerine aktarmak ve gerilim seviyesini artırmak veya azaltmak amacıyla kullanılır. Alternatif akım ve gerilimle çalışan transformatörler değişken bir manyetik alan etkisi ile gerilim seviyesini dönüştüren aletlerdir. Elektrik sistemlerinde dağıtım ve iletimde transformatörler önemli rol oynar (Umar, 2018).

Bir elektrik makinesi, biri sabit olan ve diğeri kendi etrafında dönen iki parçadan meydana gelir. Motor gövdesine sabitlenmiş ve hareket etmeyen stator, motorun dış kısmıdır. İçteki kısım rotor, bir mil üzerinde dönebilecek şekilde bilyelerle motor gövdesinde bulunmaktadır (Yavuz, 2015). Stator kısmında nüveye sargılar sarılmıştır. Rotorun dönmeye başlaması için sargı uçlarına gerilim verilmesi gerekir. Makinenin dönmesini rotor ve stator arasındaki hava aralığı sağlar (Umar, 2018).

Sabit mıknatıslı senkron makineler (SMSM), birçok işin üstesinden gelebildiğinden tıp, otomotiv, havacılık endüstrisi, uzay araçları, robotik sistemlerinde kullanılır. Geniş bir kullanım alanına sahip olan SMSM'ler yüksek verim kabiliyeti, yüksek moment, hassas ve kararlı kontrol imkanı, hacim ve ağırlığına göre yüksek güç sağlaması gibi avantajlara sahiptir. Sağlıklı olmayan motorun çalışma ömrü de kısadır. SMSM'lerin çalışma ömrü sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. Sistemin sürekliliği ve motorun ömrü açısından arızanın oluştuğu sırada tespit edilerek, buna gerekli müdahalenin yapılması büyük öneme sahiptir. SMSM'ler yüksek hızlarda sürülebilmesi, kompakt yapısı ve yüksek verimi, düşük hızlarda dahi moment kontrolü, güç ağırlık oranının yüksekliği gibi özellikleri sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. SMSM'lerin daha yoğun ve verimli hale gelmesini bazı mıknatıslardaki gelişmeler etkilemiştir. Bunlar doğal mıknatıslı Hd-Fe-B ve Sm-Co gibi nadir toprak elementlilerdir. SMSM'de motor verimi ve güç faktörü, motor hızına ve kutup sayısına bağlı değildir (Çıra, 2017).

Sabit mıknatıslı senkron makinelerin mıknatıslar tarafından uyartım akımı sağlanmaktadır. Diğer elektrik makinalarındaki gibi bu makinelerde, rotor ve stator şeklinde iki kısma ayrılır. SMSM'de rotorda sürekli mıknatıslar, stator ise sargılar vardır. Şekil 2.1'de sürekli mıknatıslı senkron generatör kesiti gösterilmiştir (Öner, 2009).



Şekil 2.1 : Sürekli mıknatıslı senkron generatörün rotor kesiti.

SMSM'lerin rotorlarında mıknatısın bulunması, bilezik ve fırça gruplarında oluşabilecek mekanik aksaklıkları ve bakım giderlerini ortadan kaldırır. Bu durum SMSM'nin veriminin aynı kuvvetteki alan sargılı senkron makinelere kıyasla daha yüksek olmasında etkilidir. Rotorlarında sargı bulunmadığından SMSM'nin bakır kayıpları oluşmaz. SMSM'de hava aralıklı bilezikli rotorlu alternatörlere kıyasla daha yüksek olmasının sebebi neodimyum gibi yüksek enerjili mıknatısların kullanılmasıdır (Zeka, 2016).

2.1 Elektrik Makinelerinde Kullanılan Manyetik Malzemeler

Elektrik makinelerinde, yumuşak manyetik malzemeler ve sert manyetik malzemeler kullanılır. Manyetizasyonu ve demanyetizasyonu kolay olan malzemeler, yumuşak manyetik malzemelerdir. Manyetizasyonu ve demanyetizasyonu zor olan malzemeler ise sert manyetik malzemelerdir (Öner, 2013).

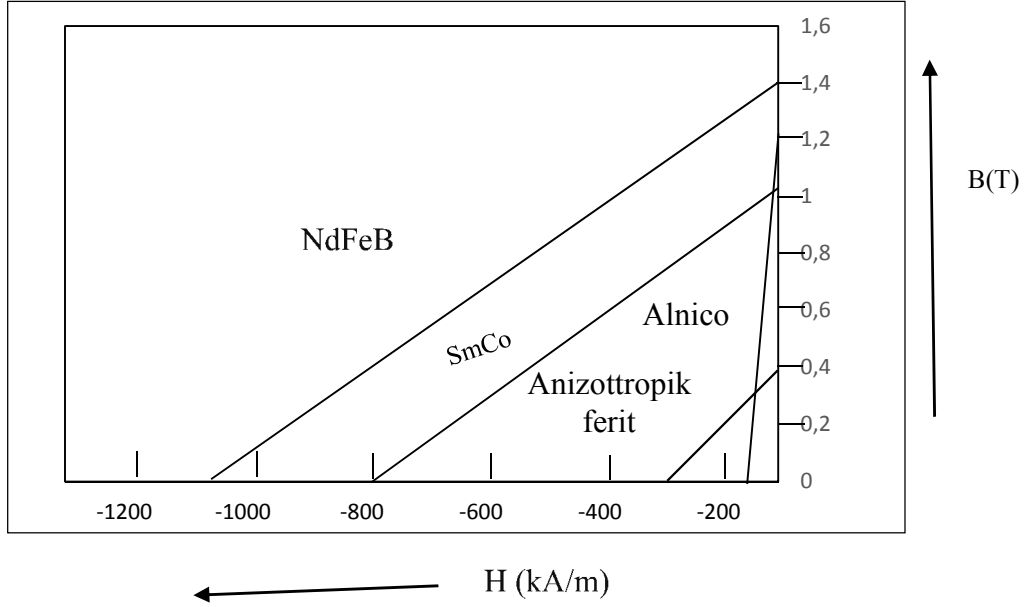
Günümüzde mıknatıs uyarımlı elektrik makinelerinin önü, yüksek enerjili nadir toprak elementi mıknatısların keşfedilmesi ve gelişmesiyle açılmıştır. Güç kaynağı ihtiyacı, sabit mıknatısların elektrik makinelerinde kullanılması ile ortadan kalkmıştır. Böylece daha kompakt yapıda elektrik makinelerinin tasarımı gerçekleşmiştir (Zeka, 2016).

2.1.1 Sürekli mıknatıslar

Sürekli mıknatısların malzemeleri sert manyetiktir. Çalışma yerindeki manyetik enerjiyi ulaşabileceği en yüksek hale getirebilmek için sert manyetik malzemeler, manyetik histerisiz çevrime geniş bir şekilde sahiptirler. Akı üretici olarak elektrik makinelerinde sürekli mıknatıslar kullanılır. Motordan sağlanan moment veya makinelerden sağlanan gerilim, makineden sağlanan akıyla orantılıdır. Makine tasarımı için akının verimli ve doğru bir şekilde elde edilmesi önemlidir (Öner, 2013).

Sürekli mıknatısların gelişim aşamalarında farklı malzeme ve özelliklerde çeşitli mıknatıslar yapılmıştır. Farklı özelliklerine göre yapılan bu mıknatısları sınıflandırmak mümkündür. Yapıldıkları malzemelere göre sürekli mıknatıslar sınıflandırılırlarsa; AlNiCo mıknatıslar, nadir toprak elementli mıknatıslar ve seramik mıknatıslar olmak üzere 3 gruba ayrılırlar (Öner, 2009).

Tiplerine bağı olarak sürekli mıknatısların farklı demanyatizasyon eğrileri vardır. Sürekli mıknatısların demanyetizasyon eğrileri şekil 2.2’de gösterilmiştir (Öner, 2013).



Şekil 2.2 : Sürekli mıknatısların demanyetizasyon eğrileri.

2.1.1.1 AlNiCo mıknatıslar

Sürekli mıknatıstaki ilk gelişme Alüminyum, Nikel ve Demir alaşımının 1932 yılında manyetik özelliklerinin gelişimiyle olmuştur. Mıknatıslı senkron generatörün ilk tasarımları 1935’de AlNiCo mıknatısların keşfedilmesiyle ortaya çıkmıştır. Ferrit mıknatıslara göre AlNiCo mıknatıslar pahalıdır. AlNiCo alaşımlar, iyi termal stabiliteye ve yüksek artık mıknatısiyete sahiplerdir (Öner, 2009). 520°C maksimum işletme sıcaklığıdır. Bu durum yüksek manyetik akı yoğunluğuna, yüksek mıknatıs sıcaklığında izin verir. Ayrıca AlNiCo sürekli mıknatıs demanyetize olursa yeniden manyetize olması zordur. Genellikle yüksek hava aralıklığına sahip sürekli mıknatıslı DC komütatör makinelerde, AlNiCo sürekli mıknatıslar kullanılır. AlNiCo’nun manyetik özellikleri çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Öner, 2013).

Çizelge 2.1 : AlNiCo mıknatısların manyetik özellikleri.

Malzeme	$B_r(T)$	$H_c(Oe)$	$H_{ci}(Oe)$	$(BH)_{max}$ [MGOe ya da (kJ/m^3)]
Alnico 5	1,27	640	645	5,5 (44.0)
Alnico5-7	1,34	740	745	7,5 (60.0)
Alnico5DG	1,33	685	690	6,5 (52.0)
Alnico 8B	0,9	1600	1640	6,75 (54.0)
Alnico 9	1,05	1500	1515	10,5 (84.0)

2.1.1.2 Ferrit mıknatıslar

1950’li yıllarda stronsiyum ve baryum gibi Ferrit sürekli mıknatıslar bulunmuştur. AlNiCo sürekli mıknatıslara kıyasla bu tip mıknatıslar yüksek koersif kuvvetten oluşurlar. Aynı zamanda artık manyetik akı yoğunluğu daha düşüktür. Düşük maliyetlidirler ve sıcaklık katsayıları yüksektir. 400°C maksimum işletme sıcaklıklarıdır. Yüksek elektriksel dirençten oluşmaları, Ferrit mıknatısların en önemli özelliğidir. Bu sebeple Eddy kayıpları nerdeyse yoktur . Ferrit mıknatısların manyetik özellikleri çizelge 2.2’de gösterilmiştir (Öner, 2013).

Çizelge 2.2 : Ferrit mıknatısların manyetik özellikleri.

Malzeme	$B_r(T)$	$H_c(Oe)$	$H_{ci}(Oe)$	$(BH)_{max}$ [MGOe ya da (kJ/m^3)]
Ferrit 5	0,395	2200	2230	3,6 (29)
Ferrit 7B	0,38	3250	3800	3,3 (26)
Ferrit 8A	0,39	2950	3000	3,5 (28)
Ferrit 8D	0,40	3100	3000	3,8 (30)
Ferrit 8C	0,43	4100	2200	4,3 (34)

2.1.1.3 Nadir toprak elementi mıknatıslar

Kalıcı indüksiyonlu ve yüksek enerjili mıknatıs malzemeler, elektrik makinelerinde mıknatısların önem kazanmasını sağlamış ve son yıllarda geliştirilmişlerdir. Bu mıknatıs malzemeler SmCo ve NdFeB genel formülleriyle tanınırlar. Bu mıknatısların ferrit mıknatıslara kıyasla çok üstün özelliklere bulunmaktadır (Yüzer, 2011).

Bu mıknatıslar yüksek artık manyetik akıya, yüksek koersif kuvvete, liner demanyetizasyon eğrisine, düşük sıcaklık katsayısına ve yüksek enerji üretimine sahiptirler. 300°C ile 350°C arasında maksimum işletme sıcaklığıdır. Yüksek güç yoğunluklu ve düşük hacimli motorlar için uygundur. Diğer sürekli mıknatıslara kıyasla daha pahalıdır (Öner, 2013).

Bu mıknatısları iki alt grupta sınıflandırabiliriz.

1. Kobalta dayalı toprak mıknatısları (SmCo)
2. Demire dayalı toprak mıknatısları (NdFeB)

SmCo mıknatıslarının manyetik özellikleri çizelge 2.3'de gösterilmiştir (Öner, 2009).

Çizelge 2.3 : SmCo mıknatıslarının manyetik özellikleri.

Malzeme	B_r [T]	H_c [kOe]	H_{ci} [kOe]	$(BH)_{max}$ [MGOe ya da (kJ/m ³)]
SmCo ₅	0,90	9,0	29,0	20,2 (162,0)
Sm ₂ Co ₁₇	1,10	10,0	33,0	37,5 (300,0)

NdFeB sürekli mıknatıslar kullanılan en yaygın mıknatıs çeşitidir. NdFeB sürekli mıknatısların manyetik özellikleri çizelge 2.4'te gösterilmektedir (Öner, 2009)

Çizelge 2.4 : NdFeB mıknatıs tiplerinin manyetik özellikleri.

Malzeme	B_r [T]	H_{ci} [kOe]	$(BH)_{max}$ [MGOe ya da (kJ/m ³)]
Sinterlenmiş VCM	1,31	14	3,6 (29)
Bağlı MQ1-B	0,69	9	3,3 (26)
Isı baskılı MQ2-E	0,825	17,5	3,5 (28)
Die-Upset MQ3-F	1,31	16	3,8 (30)
Sinterlenmiş	1,51	8,68	4,3 (34)

2.1.2 Elektriksel çelik

Dar histerisiz çevrime sahip yumuşak manyetik malzemeli elektriksel çelik, gücün iletilmesinde önemli bir malzemedir. Motor, generatör ve transformatör gibi elektrik makinalarında kullanılır. Lamineli elektriksel çeliğin doğru şekilde manyetik özellikleri hesaplanırsa düzgün ve doğru bir şekilde elektrik makinası tasarımı gerçekleştirilebilir. Çoğunlukla manyetik malzemenin özellikleri manyetik alanın yönü, manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti göz önüne alınarak hesaplanır. Manyetik alan uygulamaları alan şiddetine bağlı kalarak, basit bobin yapımından başlayarak süper iletkenli karmaşık cihazlara kadar değişebilir (Öner, 2013).

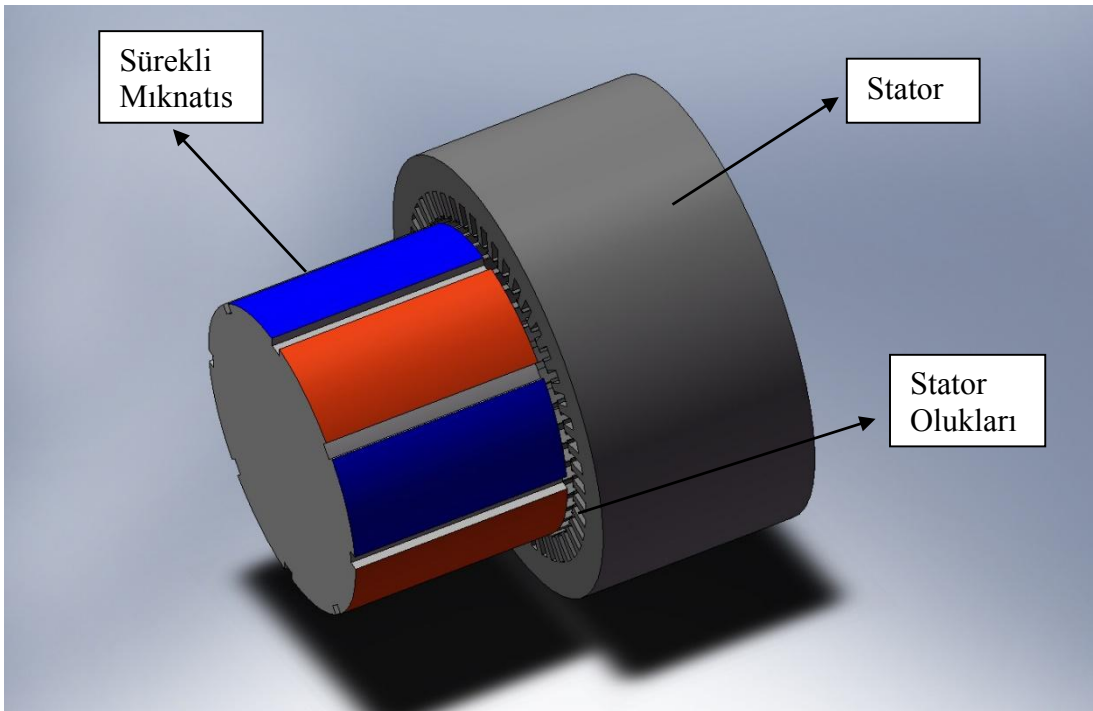
2.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Sınıflandırılması

SMSM' ler stator ve rotor olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır. SMSM'de mıknatıslar rotor içerisine veya rotor yüzeyine yerleştirilirler. Bu makinelerde kollektör ve fırça bulunmamaktadır. Bu sebeple bu makineler basit yapılı ve sorunsuz kabul edilmektedir. Hava aralığı akı dağılımına göre sabit mıknatıslı makineler radyal akılı makineler ve eksenel akılı makineler şeklinde 2 grupta toplanabilir (Öner, 2013). Radyal akılı makinelerde manyetik akı yarıçap yönünde geçirilir, eksenel akılı makinelerde ise yarıçap yönüne dik bulunan eksen boyunca akı geçişi sağlanır (Gör, 2014).

2.2.1 Radyal akılı makineler

Sabit mıknatıslı elektrik makinelerinin en geleneksel tipi radyal akılı sabit mıknatıslı makinelerdir (RASM). Bu tür makinelerde akım eksenel olarak akarken, akımın yönü ise radyal şekildedir (Öner, 2013). Yapımı kolay ve ucuz olan bu makinelerin statorunun, asenkron makinenin statoruna benzeyen bir yapısı vardır. Buna rağmen eksenel akılı ve çapraz akılı makinelere göre eksenel uzunluk ve ağırlık bakımından ebatları daha büyüktür (Sakarya, 2009). Sabit mıknatıslı makinenin tasarımında yaygın bir şekilde kullanılan RASM alternatörler, rotor miline manyetik akı yolu dik olan ve hava aralığı radyal olan makinelerdir (Zeka, 2016).

RASM'nin yüksek tork kapasitesine sahip olmasından dolayı verimlilik yüksektir. Bununla birlikte rotorun ayrılmamasından dolayı mıknatıs bakımının dikkatlice uygulanması gerekir. RASM oluklu ve oluklu olmayan versiyonları arasındaki iki ana fark, olukların varlığı ve çok fazlı sarım tipidir. Stator yapısı oluklu değildir ve bir yığın lamine çelikten oluşur (Aydın ve diğ, 2004). RASM makinenin rotor kesiti şekil 2.3'te gösterilmiştir (Öner, 2009).



Şekil 2.3 : Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron generatörün rotor kesiti.

RASM alternatörlerde rotorlarda bulunan yüksek manyetik yoğunluklu mıknatısların, stator oluklarında manyetik yolunun kesilmesiyle vuru momentini oluşturur. Bu durum alternatörün performansını etkiler. RASM alternatörlerde vuru momentini titreşime

ve mekanik gürültüye neden olur. Alternatörün vuruntu momentini azaltmak için alternatörde mıknatıslara veya stator oluklarına eğim verilebilir veya tasarımı özel mıknatıslar tercih edilebilir. Rotorda yapılan değişikliklerin üretim masraflarını arttırmamasından dolayı rotor tarafında yapılabilecek değişiklikler yerine statora uygulanan, kesirli sargı, yardımcı diş ve yardımcı oluk kullanımı gibi teknikler kullanılabilir.

RASM alternatörlerde mıknatıs seçiminde çalışma sıcaklığı, ağırlık, maliyet ve verimlilik gibi faktörlere özen gösterilmelidir. Rotor üzerine mıknatısların yerleştirilme şekli, alternatörün performansını etkileyen diğer bir faktördür. Mıknatısların rotor üzerine yerleştirilme şekline göre RASM alternatörler, yüzey yerleştirmeli RASM ve Gömülü tip RASM şeklinde iki gruba ayrılırlar (Zeka, 2016).

2.2.1.1 Yüzey yerleştirmeli RASM makineler

Rotor yüzeyine mıknatısların yay veya ince şeritler şeklinde yerleştirildiği makine tipidir. Özel yapıştırıcılar ile yüzeye yerleştirilen mıknatıslar, hava aralığının etkisini artırır. Ayrıca üretim basitleşir ve maliyeti azalır (Zeka, 2016). Yapılarının basit olması sebebiyle kullanımı yaygın olan bu makine türünün rotoruna yerleştirilen mıknatısların, yüksek merkezkaç kuvvetine maruz kalmaları en büyük sakıncadır. Genellikle bu tür tasarımlar mıknatısların yerinden kopmaması için düşük devirli uygulamalar için tercih edilirler (Yüzer, 2011).

2.2.1.2 Gömülü tip RASM makineler

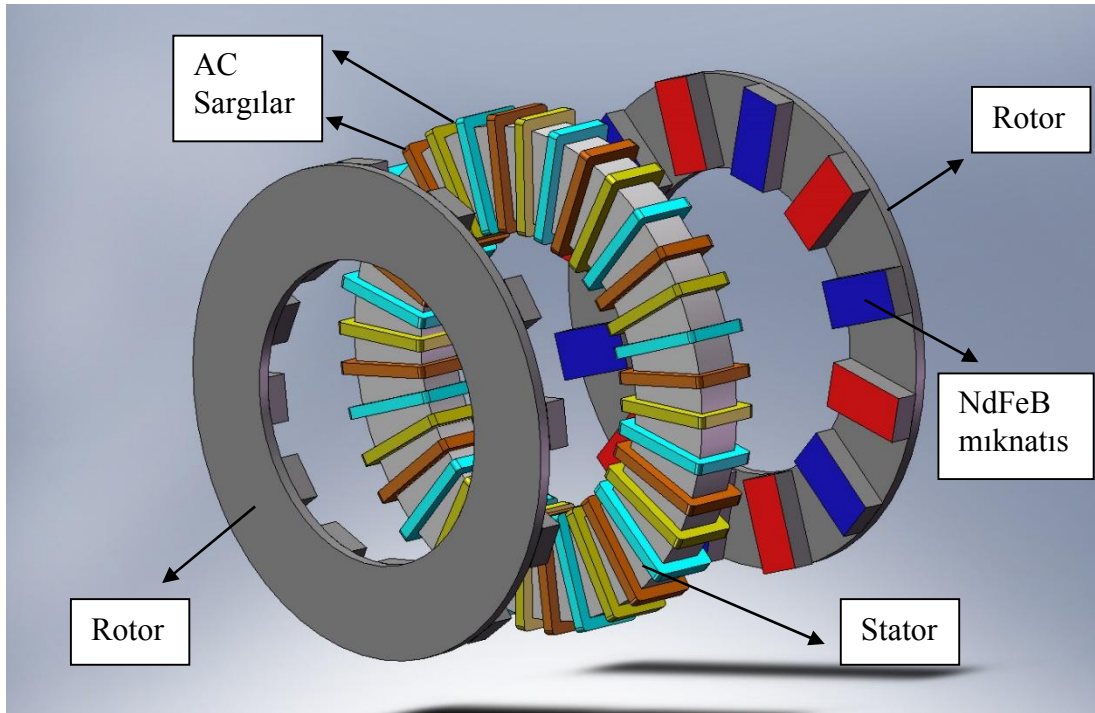
Yüksek hızlı uygulamalar için tasarlanan bu alternatörlerde mıknatıslar, rotor yüzeyine yerleştirilir. Gömülü tip RASM alternatörlerde verim yüksektir. Mıknatıslar yüksek hızlarda büyük merkezkaç kuvvetlerine maruz kaldığından rotorda açılan oluklara mıknatıs malzeme yapıştırılarak yerleştirilir. Gömülü tip mıknatıslı rotorun avantajı, mekanik sağlamlığı ve merkezkaç kuvvetlerine karşı mukavemetleri yüksek oluşudur. Bu alternatörlerin maliyetli olması ise dezavantajdır (Yüzer, 2011).

2.2.2 Eksenel akılı makineler

Eksenel akılı makineler, Faraday tarafından 1831'de tasarlanmıştır (Patterson ve diğ., 2009). 1980'li yıllara kadar eksenel akılı makineler gelişmemiştir. Neodyum mıknatısları ile yüksek güç yoğunluğu 1980'li yıllarda elde edilmiştir. Sabit mıknatıslı makineler üzerine yapılan çalışmalar neodyum mıknatısların gelişimiyle artmıştır.

Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler çalışmaların arttığı bu sabit mıknatıslı makinelerden biridir (Hüner, 2017).

Mıknatis teknolojisindeki gelişmelerle birlikte son yıllarda EASM makineler önem kazanmıştır. Rotor miline manyetik akının paralel olarak yönlendirildiği EASM makinelerin, hava aralığı eksenel olup disk tipindedir (şekil 2.4). İç ve dış çap arasına yerleştirilen sargılarda oluşan kuvvetlerin etkisi önemlidir. Makinenin güç üreten bölümü statorun iç kısmından dış kısmına kadar giden radyal uzunluğudur (Zeka, 2016).



Şekil 2.4 : EASM alternatörlerin yapısı.

EASM makineler kompakt üretimleri, disk şekilleri ve yüksek güç yoğunlukları gibi nitelikleri nedeniyle dairesel yapıda olanlara göre ilgi çekici özelliklere sahiptir. Bu makineler, disk makineler olarak adlandırılırlar (Sakarya, 2009). Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler, vana kontrolünde, santrifüjlerde, robotlarda, endüstriyel ekipmanlarda, elektrikli taşıtlarda, pompalarda, fanlarda ve küçük makinelerde kullanım için uygundur (Jussila ve diğ, 2010).

Yenilenebilir enerji kaynakları gereksiniminin arttığı günümüzde eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler yüksek güç yoğunluklarıyla ön plana çıkmaktadır. Modüler ve kompakt yapıları ve diğer mekanik birimlerle kolay entegrasyonları sebebiyle EASM makineler, elektrikli araçlar ve rüzgar sistemleri gibi yerlerde

kullanılabilir. Düşük hızlı yüksek tokalı entegre sistemlerin gereksinimlerini çok iyi karşıladığından EASM makineler, rüzgar sistemleri için uygundur (Rostami ve diğ, 2015). Küçük ölçekli güç üretimi için de kullanılan EASM makineler, düşük devirli uygulamalardan olan rüzgâr türbinleri için çok kutuplu yapılabilmelerinden dolayı kullanımı idealdir (Ocak, 2009).

Elektrikli araçların tekerlek motorlarının düşük hız ve yüksek tork gereksinimlerine, EASM makinesinin yapısı ve performansı uygundur (Parviainen ve diğ, 2001). Düşük devirli ve yüksek torklu uygulamalarda, EASM makineleri güvenilir ve verimlidir. EASM makineleri, RASM makinesine göre elektrikli taşıtların tekerlekli motorları gibi bazı uygulamalarda daha kullanışlıdır (Arora ve Singh, 2015).

2.2.2.1 EASM makinelerin avantaj ve dezavantajları

Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) makineler benzersiz birçok özelliğe sahiptir. Kalıcı mıknatıs olduğu için, rotor kayıplarını önemli ölçüde azalttığından genellikle daha verimlidir. Eksenel akı yapısı daha az çekirdek malzemeye sahiptir, EASM makineleri ince mıknatıslara sahiptir. Bu nedenle RASM makinelere göre daha küçüktür. Ürettikleri gürültü ve titreşim, geleneksel makinelere göre daha azdır. Hava boşlukları düzlemsel ve kolayca ayarlanabilir (Mahmoudi ve diğ, 2011).

EASM makinelerin, geleneksel makineler ile kıyaslandıklarında ortaya çıkan avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

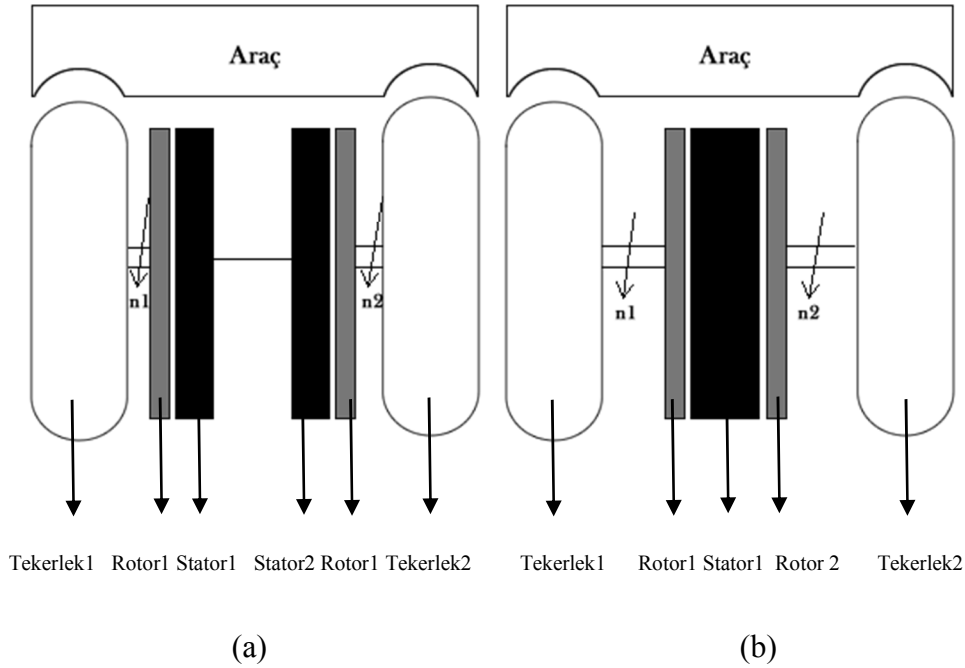
- Yüksek verimli olması
- Manyetik nüvenin kullanım oranının yüksekliği
- Kompakt olarak yapılabilmeleri
- Gürültünün azaltılabilirliği
- Düşük maliyetli enerji üretilebilirliği
- Az bakım ve yüksek güvenilirlik (Ocak, 2009).

Eksenel akılı makineler, geleneksel makinelerle karşılaştırıldığında hava aralığını sabit tutmadaki zorluklar, rotor ve stator arasında bulunan eksenel manyetik çekim kuvvetinin güçlü olması, uzun süren üretim süreci, makinenin montajı, stator üretiminin zor olması gelişime açık yanlardır (Çetin ve Daldaban, 2017).

Yeni teknolojiler, soğutma teknikleri, kütle başına düşen güç yoğunluğunun artması gibi sebeplerle radyal akılı sabit mıknatıslı makineler, elektrik makineleri içerisinde dezavantajlı konuma gelmiştir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı makine, yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Fakat diğer makinelere göre daha kompakt bir yapıdadır (Çetin ve Daldaban, 2014).

2.2.2.2 EASM makinelerinin kullanım alanları

EASM makinelerin kullanım alanları avantajlarından dolayı oldukça geniştir. Taşıt uygulamalarında bu makine tipinin kullanımı giderek artmaktadır. Taşıtların tekerleklerinin içerisine eksenel akılı motor yerleştirilir (şekil 2.5). İki eksenel akı makinesiyle her tekerleğe rotor, stator çifti konularak sürülebileceği gibi bir çift tekerlek için tekerleğin ortasına eksenel akı makinesi konumlandırılarak da kullanılabilir (Ayçiçek, 2012).



Şekil 2.5 : Eksenel akılı motorların elektrikli taşıtta kullanımı a) iki motorlu yapı b) tek motorlu yapı.

Bu tür motorları elektrikli bisikletlerde de görmek mümkündür. Bisiklet tekerleklerinin ortasına bu motorun yerleştirilmesi durumunda standart motora göre kapladığı yer daha az olacağı için daha yoğun bir yapı oluşur. Ayrıca bisiklet hafif olacağı için daha rahat kullanım sağlanır. Bu motorlar, güneş enerjisinin kullanıldığı

elektrikli araçlarda da bulunabilir. Motorun ince bir şekilde tekerleğin içinde olması en büyük avantajdır (Ayçiçek, 2012).

2.2.2.3 EASM makinelerinin yapısı ve çeşitleri

EASM makineler mıknatısların bulunduğu bir rotordan ve sargıların yer aldığı bir statordan oluşur (Hüner, 2017). Manyetik akı, EASM makinelerde aksel olarak hava boşluğundan doğrudan geçer. Çoğunlukla rotor disk, stator ise halka yapıdadır (Ayçiçek, 2012).

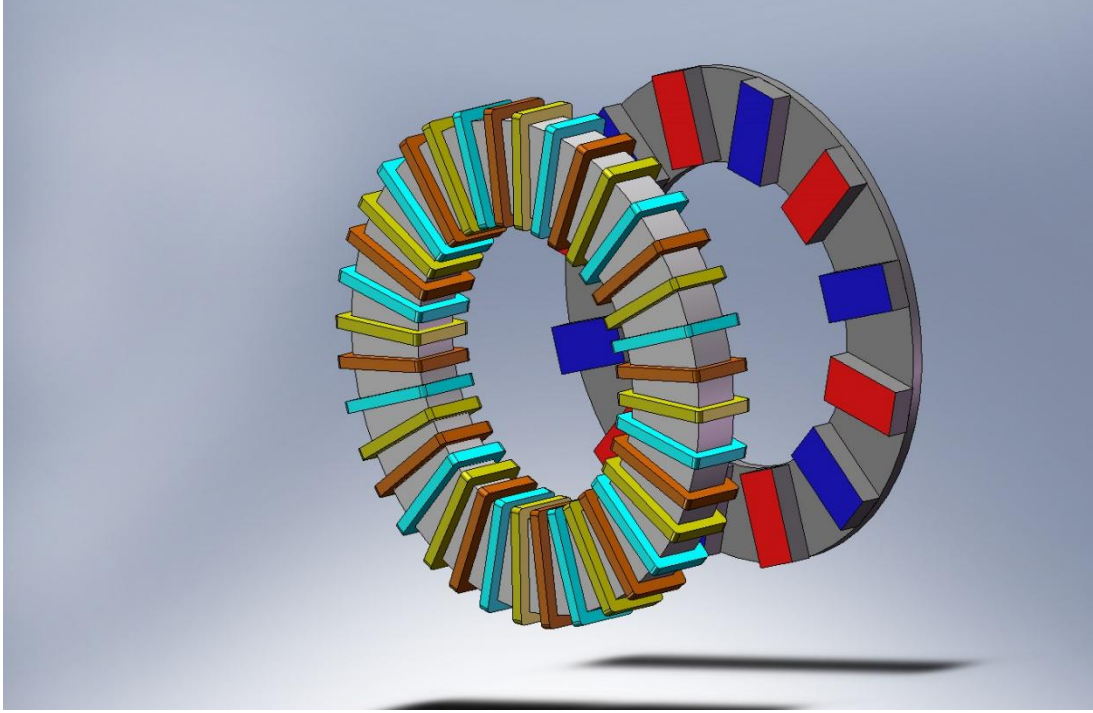
Eksenel akı makineler rotor ve stator sayılarına, mıknatısların yerleştiriliş biçimine, oluk yapısına ve statorun nüveli ve nüvesiz olmasına göre sınıflandırılırlar (Hüner, 2017).

- Stator – Rotor sayısına göre
 - ✓ Tek taraflı
 - ✓ Çift taraflı
 - ✓ Çok Statorlu ve Çok Rotorlu
- Oluk Yapısına Göre
 - ✓ Oluklu
 - ✓ Oluksuz
- Mıknatısların nüveye yerleştirilmesine göre
 - ✓ Yüzey yerleştirmeli
 - ✓ Gömülü tip
- Nüve yapılarına göre
 - ✓ Demir Nüveli tip
 - ✓ Nüvesiz tip

Tek kenarlı EASM makineler

Basit yapıya sahip tek kenarlı EASM makineler, tek stator ve rotordan oluşur. Bu makinelerin nüveli ve nüvesiz tipleri mevcuttur. Farklı oluk yapıları nüveli tiplerde kullanılabilir. Tek taraflı makinenin, çift taraflı makineye göre güç yoğunluğu, sağladıkları moment ve yapım maliyetleri daha düşüktür (Hüner, 2017). Bu makinenin rotor yüzeyine sürekli mıknatıslar yerleştirilmiş ve statoru lamine olarak elektriksel özellikli çelik şeritlerden yapılmıştır. Tek stator ve tek rotorlu makine yapısında, rotor ve stator arasında dengesiz bir aksel kuvvet meydana gelmesi önemli bir

dezavantajdır. Bu nedenle çift taraflı makine yapısına göre daha karmaşık ve dayanıklı rulman sistemlerine ihtiyaç duyar (Gör, 2014). Basit yapıya sahip tek kenarlı aksel akılı makinalar endüstride, taşıma ve servo elektromekanik sürücülerde kullanılır (Ocak, 2009). Şekil 2.6’da yapısı gösterilmektedir (Gör, 2014).



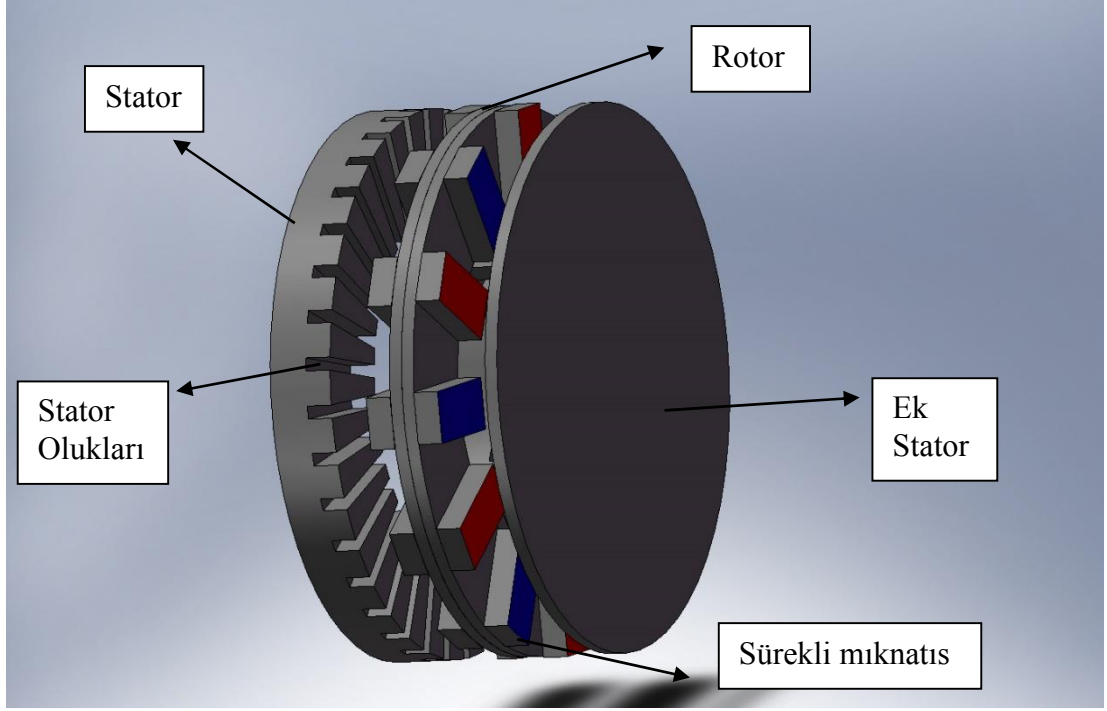
Şekil 2.6 : Tek rotorlu ve tek statorlu aksel akılı jeneratör yapısı.

Radyal akılılara göre tek kenarlı EASM makineler, daha kısa eksen uzunluğuna ve daha büyük bir çapa sahiptir. Sabit mıknatısların ürettiği akı eksen boyunca akarken akım radyal olarak akar (Sakarya, 2009). Tek kenarlı EASM makinesi, geleneksel radyal akı makinesine göre hacimsel olarak avantajlıdır (Patterson ve diğ., 2009).

Stator dengeli tek kenarlı EASM makineler

Bu makineler bir stator ve rotora sahiptir. Stator ve rotorun arasında güçlü çekme kuvveti meydana gelir. Normal şartlarda bileziği bulunmayan SMSM makineler, özel bilezikleri rotoru aksel yöndeki hareketten korumak amacıyla kullanır. Çekim kuvveti statora ek yapı ekleyerek dengelenebilir. Manyetik alan üreten sürekli mıknatıslara, rotorun karşı kısmında denge gücü indüklemek amacıyla ihtiyaç duyulur.

Stator laminesine, manyetik alanın eddy ve histeresiz yitimlerini dalgalandırması nedeniyle ihtiyaç duyulur. Ek stator ve rotorun arasındaki gücü, akı yüzeyi özenle tasarlanırsa makinenin statoru ve rotoru arasındaki güç dengelenmiş olur. Şekil 2.7’de yapısı gösterilmektedir (Ayçiçek, 2012).



Şekil 2.7 : Stator dengeli tek kenarlı aksenal akılı motor.

Rotor dengeli tek kenarlı EASM makineler

Stator dengeli tek kenarlı EASM makineye yapı olarak benzemektedir. Çekme kuvvetinin dengesi, diğer makineden farklı olarak rotoru ek yüzey mıknatıslı olarak eklenir. Stator dengeli makinelere kıyasla bu makinelerde daha çok malzeme kullanılır (Öner, 2009).

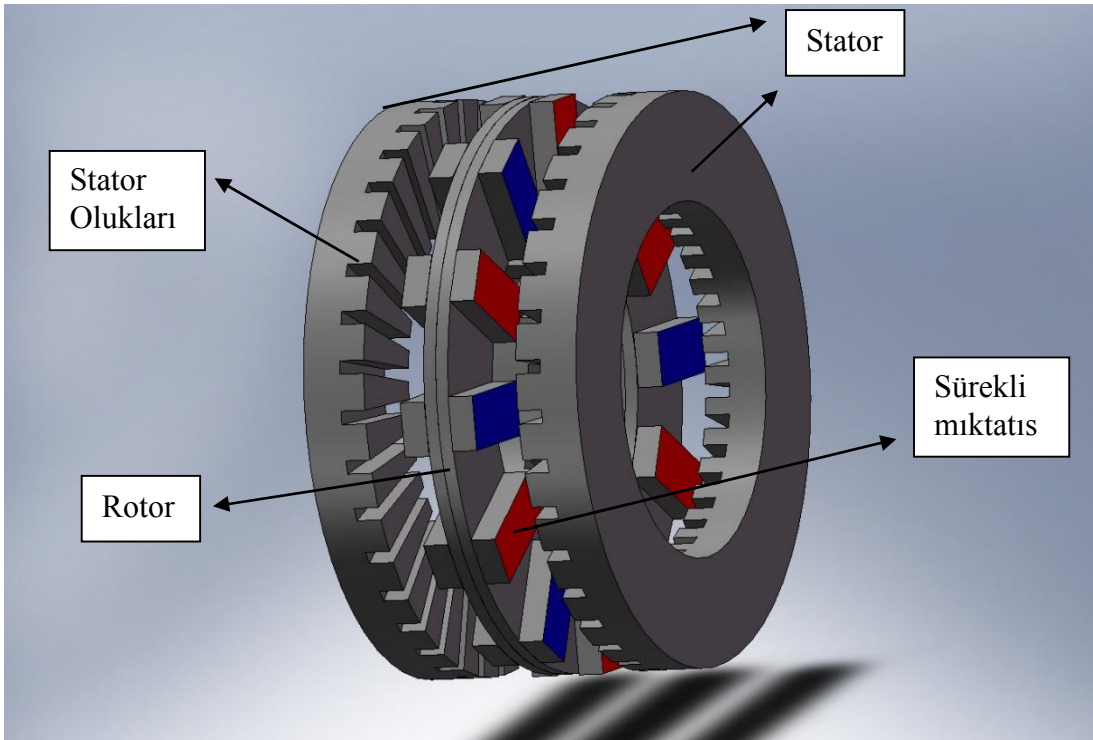
Çift kenarlı EASM makineler

Tek taraflı yapıya göre çift taraflı aksenal akılı makine yapısında daha fazla enerji elde edilebilir. Çift taraflı EASM makinede iki statorun arasında konumlandırılmış rotor çift taraflıdır. Statorlara sargılar, rotorun her iki yüzeyine sürekli mıknatıslar yerleştirilir. Rotor ve statorlar arasında çekim kuvveti bakımından çift taraflı makine yapısı, tek taraflı makine yapısına göre daha dengeli durumdadır (Gör, 2014). Çift taraflı kuvvetlerden oluşan çift kenarlı EASM makinelerde, merkezdeki rulmanlara düşen kuvvetlerin daha dengeli olması makine ömrünü uzatır (Hüner, 2017). Çift taraflı EASM, tek taraflı EASM'ye göre yüksek tork yoğunluğuna sahiptir (Shokri, 2015). Manyetik olmayan hava aralığı çift taraflı makinede, tek taraflı makineye göre daha fazladır. Stator sargıları paralel bağlandığında, çift taraflı makinede statorlardan biri arızalanırsa diğer stator işlev görebilmektedir (Gör, 2014). Bu makineler tek rotor çift stator, tek stator çift rotorlu yapıya sahip olabilirler. Bununla birlikte bu makineler

demir nüvesiz ve demir nüveli yapılabilir. Nüveli tiplerinde oluk yapıları da açık oluklu, yarı açık ve tam kapalı yapıda olabilir (Hüner, 2017).

Çift stator oluklu EASM makineler

Bu makineler pancake'e şekil olarak benzemesi nedeniyle pancake makine şeklinde isimlendirilmektedir. Bir iç rotor ve iki dış statordan meydana gelmektedir. Mıknatıslar içe gömülü veya rotor yüzeyine yerleştirmeli olabilir. Radyal yönde stator demir nüvesi lamine edilir. %75 civarında verim elde edilir. Bu makine tipi şekil 2.8'de gösterilmiştir (Öner, 2009).



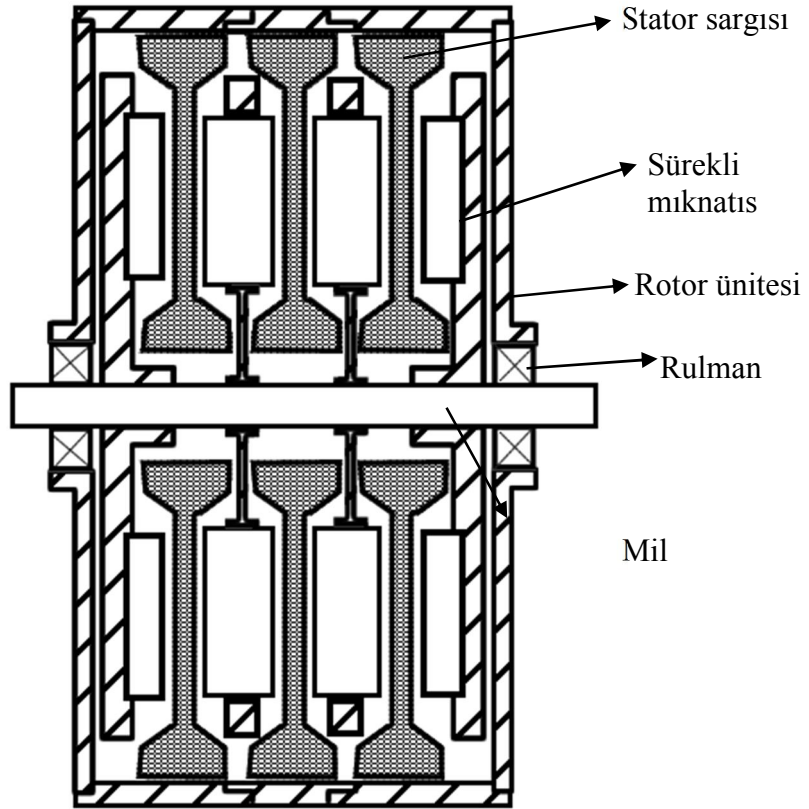
Şekil 2.8 : Çift statorlu aksel akılı makine.

Çift rotor oluklu EASM makineler

Çift stator oluklu EASM makineye yapı olarak benzemektedir. İki rotora ve bir statora sahiptir. İki rotorun arasına stator yerleştirilmiştir. Demir kısma rotor boyunduruğunda akı yoğunluğu için ihtiyaç vardır. Stator boyunduruğu için buna ihtiyaç yoktur (Ayçiçek, 2012).

Çok statorlu çok rotorlu EASM makineler

EASM makinelerde rotor ve stator sayıları arttırılarak, yüksek miktarlarda güç ve moment değerleri elde edilebilir. Bu durumda makine yapısı karmaşık hale gelir. Rotor ve stator sayısının artırılmasıyla bir takım mekaniksel problemler olabilir. Bu problemler, mil ve rulmanlardan kaynaklanabileceği gibi kullanılan mıknatısların çekim kuvvetlerinin rotor ve stator plakalarını etkilemelerinden kaynaklı da olabilir. Gerekli tedbirlerin alınabilmesi için bu tür problemlerin tasarım aşamasında düşünülmesi önemlidir. Şekil 2.9’da çok statorlu ve çok rotorlu EASM makinenin yapısı gösterilmiştir (Gör, 2014).

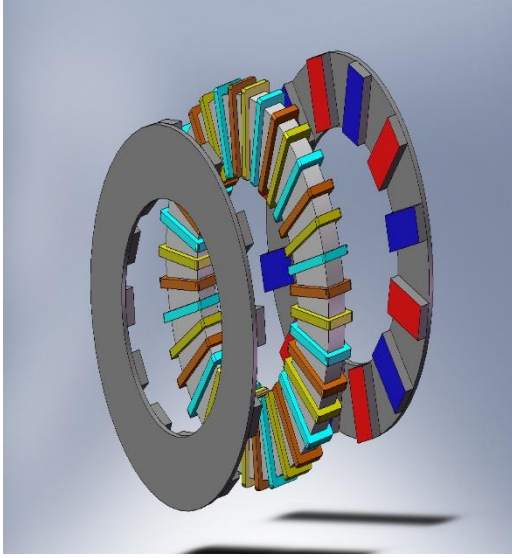


Şekil 2.9 : Nüvesiz, çok diskli aksel akılı sabit mıknatıslı makine.

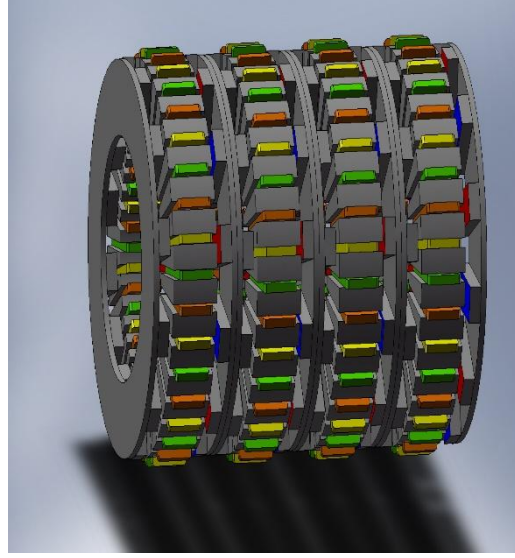
Çok statorlu çok rotorlu EASM makineleri diğer makinelere göre daha karmaşıktır. Bu makineler gemi sevkiyatında kullanılabilir. Çok statorlu çok rotorlu EASM makineleri, hava boşluklu yüzeyleri sabit kaldığından daha kolay monte edilir (Mahmoudi ve diğ, 2011).

2.2.2.4 EASM makinelerinin rotor ve stator yapıları

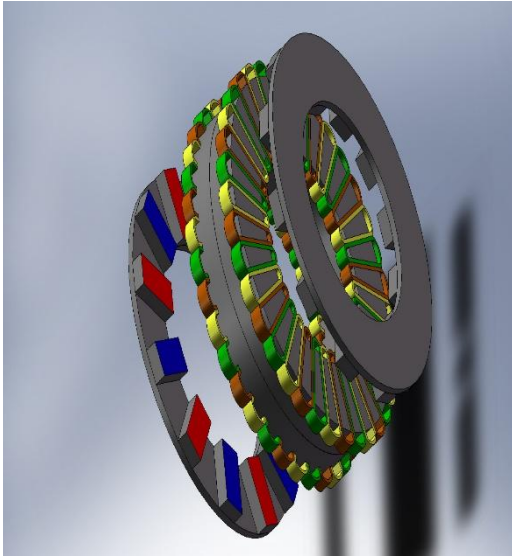
EASM makinelerde, som demirden yapılan rotor diskleri bulunur. Bir tarafına nadir toprak mıknatısları vidalanır veya özel maddeyle yapıştırılır. Mıknatıslar yay şeklinde ve merkezleri diskin merkezinde tutulacak şekilde oluşturulur. Spiral şekilde sarılmış lamine demir kullanılarak makinenin statoru oluşturulur. Şekil 2.10'da farklı rotor ve stator yapıları gösterilmektedir (Ayçiçek, 2012).



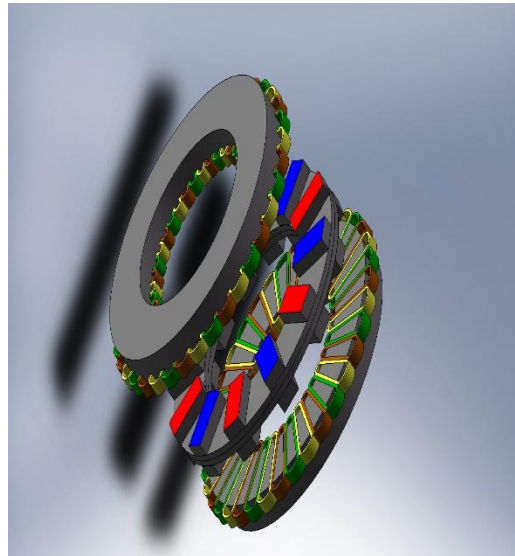
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.10 : Çeşitli yapılarıdaki aksenal akılı motor yapıları a) Toroidal sargılı tek stator iki rotor b) Çoklu rotor ve stator c) Rombodial sargılı tek stator iki rotor d) Rombodial sargılı tek rotor iki stator.

Stator, EASM makinelerde nüvesiz veya nüveli yapılıdır. EASM makinenin nüveli çeşidinde toroidal olarak sarılmış manyetik geçirgenliği güçlü demir, rotorda ise güçlü yumuşak demir kullanılır. Burada neodyum demir bordan meydana gelen mıknatıslar kullanılır. Çalışma sıcaklığına, hava aralığı akışına ve tasarlanan makine tipine uygun olan mıknatıs seçilmelidir (Hüner, 2017).

2.2.2.5 EASM makinelerde vuruuntu momenti

EASM makinelerde giderilmesi gereken husus ve en büyük dezavantaj vuruuntu momentidir. Vuruuntu momenti, oluk kenarlarıyla mıknatıslar arasındaki etkileşimdir. EASM makinede bu etkileşim sonucunda moment dalgalanması oluşur. EASM makine üzerindeki mıknatıslarda, sargılarda ve rulmanlarda bu dalgalanmayla bozucu kuvvetler oluşur. Bu kuvvetler zaman içerisinde EASM makinede zarara neden olur. Vuruuntu momentini gidermek bu sebeplerle önemli çalışma konusudur.

Stator ve rotor tarafında vuruuntu momentini azaltıcı bazı teknikler vardır. Stator tarafındaki teknikler, yüksek oranda üretim maliyeti olduğu için tercih edilmez. Rotor kısmındaki teknikler ekonomiktir. Bunları rotor öteleme, mıknatıs kaydırma, farklı kutup yaylarından oluşan mıknatısları kullanma, mıknatısların ekseninde döndürülmesi, mıknatıs gruplama ve mıknatıs kaykısı olarak sıralayabiliriz. Bunlar içerisinde üretim maliyetlerini arttıran özel mıknatıs şekillerinin kullanılmasıdır (Hüner, 2017).

2.3 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Avantaj ve Dezavantajları

Yarı iletken elemanlardaki ve sürekli mıknatıs malzemelerdeki gelişmeler, SMSM’i alternatif akım motorlarının güvenilirlik ve sağlamlık özellikleri ile doğru akım motorunun üstün yönlerini sağlayabilecek duruma getirmiştir. Diğer makineler ile karşılaştırıldıklarında SMSM’lerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Vektör kontrollü asenkron makineye kıyasla basit denetimi vardır ve parametre değişimlerinden etkilenmez.
- Güç faktörü, asenkron makineye göre yüksektir.
- SMSM’nin soğutulması, rotorda sargılar bulunmadığından daha kolay sağlanabilmektedir.
- SMSM’lerin hacimleri ve ağırlıkları, asenkron makinelere kıyasla daha küçüktür.
- Dinamik performansı iyi olmakla birlikte atalet momenti düşüktür.

- SMSM’de kollektör ve fırça sistemi olmadığı için bakım maliyeti az, fırçalarda kayıp oluşmadığından verim çoktur.
- Sargı yerine rotorunda mıknatısların olması verimini arttırmaktadır.

Dezavantajları:

- Bakım sırasında eski çalışma noktası rotorun, statordan çıkarılmasıyla kayabilir.
- Mıknatısların yüksek hızlarda rotor yüzeyine tutturulması güçtür ve kopma riski vardır.
- Asenkron ve doğru akım makinelerine kıyasla daha pahalıdır.
- Kullanılan mıknatısın uygun olmayışı ile malzemenin mıknatıs özelliğini kaybetmesi, makine açısından olumsuz bir durumdur.
- Mıknatıs malzemelerin demagnetizasyon riski ve ısıl sınırlamaları, sistemin güvenilirliğini azaltmaktadır (Ayçiçek, 2012).

2.4 Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Kullanım Alanları

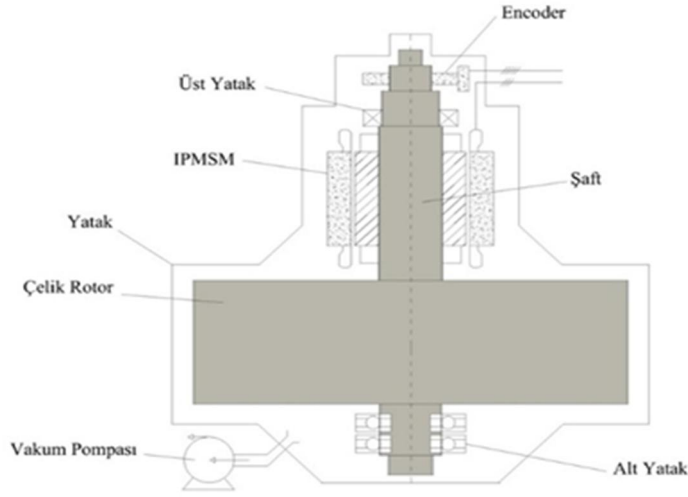
SMSM mıknatıslarının çeşitli uygulamaları ve kullanım alanları mevcuttur. Verimliliği ve güç yoğunluğu gibi avantajları sebebiyle elektrik makinelerinin kullanıldığı her alanda SMSM’lerde kullanılmakta ve yeni teknolojilerin gelişmesine olanak sağlamaktadır.

SMSM’ler, savunma sistemlerinde, havacılıkta, tıp ve sağlık uygulamalarında, araştırma ve keşif araçlarında, evsel uygulamalarda, otomotiv sektöründe, elektrikli araçlarda, geleneksel otomobillerde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Ayçiçek, 2012).

3. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Volanlar kinetik enerjiyi dönen bir kütle sayesinde depo etmektedir (Sarı, 2006). Uzay uygulamalarında NASA'nın 1961'deki açıkladığı çalışma raporundan sonra volanlar kullanılmıştır (Erdoğan ve diğ. 2011). Volanlar enerjiyi mekanik biçimde depolayan ve ilk kez uzay endüstrisi alanında uygulanan enerji depolama sistemleridir. Volan teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, çeşitli endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (He ve diğ. 2009). Volan sistemlerinin uygulanabilirliği birçok farklı uygulamada sınanmıştır. Volanı mekanik olarak döndürebilmek ve hareketlendirebilmek için bir enerjinin var olması gerekir. Dönme hızına göre volan dönmeye başladığında enerjinin bir miktarını depo eder. Volan yavaşlatılarak depolanmış bu enerji istenildiğinde generatör modunda bulunan elektrik motorunun, varolan kinetik enerjinin belli bir kısmı tahrik etmesiyle elektrik enerjisine çevrilebilir. Volanın hızına bağlı olarak enerjinin miktarı artar (Erdoğan ve diğ. 2011). Bir volanın dönme hızını artırmak, depolanan enerjiyi arttırmada en önemli faktördür. Bir volanın hızını iki katına çıkarmak, depolanan enerji miktarını dört katına çıkarır (Aljohani, 2014). Dönme hızı ile volan enerji yoğunluğu ilişkili olduğundan yüksek dönme hızına sahip yataklar, çok dayanıklı malzeme gerektiğinden maliyetleri yüksek olmaktadır. Hafif yoğunluklu ve yüksek dayanıklı malzemeler volanlarda kullanılmalıdır (Sarı, 2006).

Volan enerji depolama sisteminin tasarım modeli şekil 3.1'de gösterilmiştir. Dönen mil ve rotor için tasarımda tek shaft kullanılmıştır. Dış birt kapsülle sistem vakumlanmıştır. Alternatör ve motor seti için eş mil üzerinde sabit mıknatıslı senkron motor çeşitlerinden içten yerleştirmeli olan kullanılmıştır. Mekanik herhangi bir bağlantı yoktur. Bu durum maliyeti ucuzlatmıştır (Hüner, 2017).



Şekil 3.1 : Volanlı enerji depolama sisteminin genel yapısı.

Volanların en büyük avantajlarının başında yüksek güç yoğunluğu, depolama veriminin yüksek olması, şarj süresinin çok kısa olması gelmektedir (Sarı, 2006). Şarj edilmesi bazen uzun saatler gerektiren batarya sistemlerine kıyasla volan sistemlerinin kısa bir sürede hızlanabilmesi avantajdır. Volan enerji depolama sistemlerinin en temel avantajları yüksek şarj ve deşarjaya uygun yapıda olmaları ve uzun bir devir ömrüne sahip olmalarıdır. Volanların çevrim ömürleri 105 ve 107 çevrim arasında değişmektedir. Volan sisteminin ömrü mekanik olarak 20 yıl olarak kabul edilmektedir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip volan sistemlerinin %90 civarında güç verimleri vardır (Erdoğan ve diğ. 2011). Volanların çevre dostu olmaları ve uzun ekonomik ömürlerinin bulunması önemli avantajlarındandır (Kozak ve Kozak, 2012). Volan sistemlerinin dezavantajlarından en önemlileri boştaki sürtünme kayıpları ile yüksek fiyatlarıdır. Saat başına volanların boştaki kayıpları %20 seviyelerini görebilmektedir. Enerji verimliliği volan sistemi boş kaldığında önemli oranda azalmaktadır (Erdoğan ve diğ. 2011).

Volan, dönme hızını artırarak kinetik enerjiyi depolayan ve mekanik enerjide yavaşlama yoluyla enerjiyi serbest bırakan bileşendir (Xu, 2012). Volan enerji depolama, kinetik enerjiyi dönen bir kütleyle depolayan mekanik bir bataryadır. Böyle bir sistem bir elektrik makinesinden enerjinin dönüştürülmesi için itici gücünden ve kinetik enerjiyi depolamak için dönen bir kütle oluşur. Şarj modunda elektrik makinesi bir motor olarak çalışır ve elektriği mekanik enerjiye dönüştürür. Bu dönüştürülen enerjiyi dönen diskte saklamak, dolayısıyla hızını artırır. Deşarj modu

sırasında, elektrikli makinenin generatör çalışması depolanan kinetik enerjiyi geri verir ve hız buna göre azaltılır (Toodeji, 2019).

Volan, yük talebinin arttığı periyotlara tahrik gücü fazla olan periyotlardan üzerine aldığı fazla enerjiyi yüke aktararak yük dengelemesi yapar. Bu mekanik tahrik sistemlerde doğrusal hareketin dönme hareketine çevrilmesinde ideal bir çözümdür. Burada volan, mekanik batarya görevindedir. Az kayıplı rulmanların ve yüksek dayanıklılığa sahip kompozit malzemelerin gelişmesiyle volanlar önemli hale gelmiştir. Kullanım alanı yaygınlaşan volanlar gelişen teknolojiyle günümüzde elektrik ve mekanik dönüşümlerinin olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır (Özdemir ve Hadra, 2016).

Volanlar değişik yataklama tiplerine sahiptir. Manyetik kuvvetlerin kontrolüyle yatak ve rotor arasında temassız yataklama oluşturan sistemler aktif manyetik yataklardır. VEDS manyetik yatakların potansiyel bir uygulama alanıdır (Sarı, 2006).

Volan enerji depolama sistemlerinin çeşitli yataklama tipleri mevcuttur. Bunlar;

- Kaymalı Yataklar
- Bilyalı Yataklar
- Manyetik Yataklar
- Süper İletken Yataklar (Sarı, 2006).

Volanların, bazı uygulamalarda sahip olduğu potansiyel önemlidir. Bilhassa endüstriyel ve ticari asansör, otomobiller, vinç uygulamaları gibi az sürelerde önemli güçlerin üretilmesi ve tüketilmesine uygun gelişmeyi yük sistemlerinde sağlayabilirler. Volanlar, enerji depolamada ihtiyaçlar geniş çaplı olursa karşılamakta güçlük çekebilirler (Kozak ve Kozak, 2012). Nükleer araştırma endüstrileri, ulaşım ve telekomünikasyondaki güç sistemleri büyük güç etkileri oluşturmak amacıyla kullanılabilir (Kocaman, 2013). Günümüzde şebeke frekansının istikrarı, endüstride aralıksız güç kaynağı ve güç kalitesi gibi uygulamalarda hızlı cevap verme yetenekleri sebebiyle volanlar kullanılabilir (Çaliker ve Özdemir, 2013). Uzay uyduları ve hibrit gibi birçok uygulama için de volanlar kullanılabilir (Xiao ve diğ, 2013).

3.1 Volan Sistemleri Bileşenleri

Temel olarak, modern bir volan enerji depolama sistemi volan rotoru, elektrik makinesi, güç elektroniği, yatak ve muhafaza olmak üzere beş ana bileşenden oluşur (Östergard, 2011).

3.1.1 Volan roturu

Bir volanda depolanan enerji, rotor şekli ve malzemesi ile belirlenir. Denklem 3.1 'de gösterildiği gibi atalet momenti ve açısal hızının karesi ile doğru orantılıdır (Amiryar ve Pullen, 2017).

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3.1)$$

E: Volanda depolanan kinetik enerji

J : Atalet momenti

ω : Açısal hız

Bir volanın minimum hız (ω_{\min}) ve maksimum hız (ω_{\max}) aralığında yararlı enerjisi:

$$E = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (3.2)$$

Elektrikle çalışan bir volan normalde (ω_{\min}) ve (ω_{\max}) arasında çalışır. Çok büyük gerilim değişimlerini önlemek ve verilen güç değeri için maksimum motor-generator torkunu sınırlamak için çalışır. Atalet momenti, rotorun kütesinin ve rotor şekil faktörünün bir fonksiyonudur. Volanlar genellikle kısa ve disk tipinden, uzun ve tambur tipine kadar değişen, içi dolu veya içi boş silindirler şeklinde yapılmıştır. Katı silindir veya disk tipi bir volan için, atalet momenti:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (3.3)$$

m: Rotor kütlesi

r: Dış yarıçap

Dış yarıçap b ve iç yarıçap a'nın içi boş silindir volanı için atalet momenti şöyledir:

$$J = \frac{1}{2}m(b^2 - a^2) \quad (3.4)$$

Uzunluğu h ve kütle yoğunluğu ρ olan bir volan için, atalet momenti şu şekilde belirlenir:

$$J = \frac{1}{2}\pi\rho h(b^4 - a^4) \quad (3.5)$$

Böylece aşağıdaki denklem elde edilir.

$$E = \frac{1}{4}\pi\rho h w^2(b^4 - a^4) \quad (3.6)$$

Bir volanın çalışabileceği maksimum hız sınırı, çekme dayanımı σ olarak adlandırılan rotor malzemesinin dayanımı ile belirlenir. Rotorun yaşadığı stresi, rotor malzemesinin gücünün altında tutmak için uygun bir güvenlik marjı sağlanmalıdır. İnce dönen bir halkanın maksimum gerilmesi:

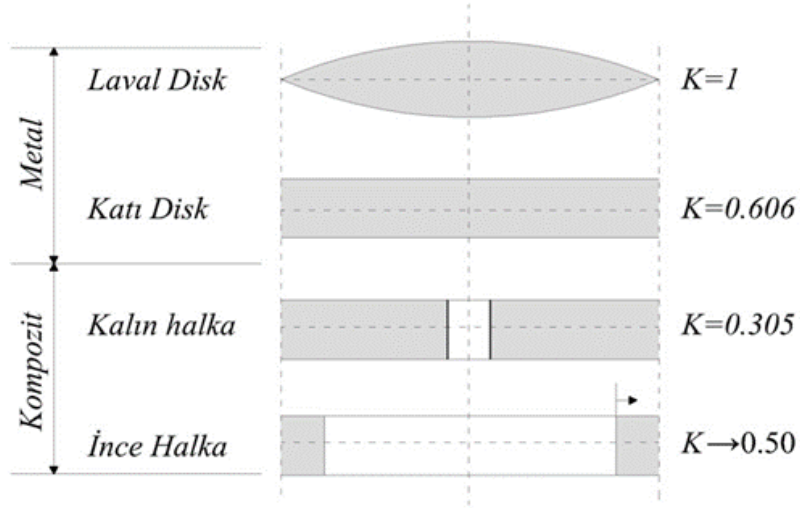
$$\sigma_{\max} = \rho r^2 w^2 \quad (3.7)$$

σ , maksimum gerilmedir ve ρ , volan malzemesinin yoğunluğudur. Farklı rotor geometrileri için daha karmaşık denklemler mevcuttur. Ancak maksimum gerilme her zaman ρ ve periferik hız karesiyle orantılıdır. Rotor geometrilerinin etkisi, bir şekil faktörü K getirilerek yerleştirilebilir. Daha sonra maksimum spesifik enerji ve enerji yoğunluğu aşağıdaki şekilde verilir (Amiryar ve Pullen, 2017).

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma_{\max}}{\rho} \left[\frac{J}{\text{kg}} \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{E}{V} = K \sigma_{\max} \left[\frac{J}{\text{m}^3} \right] \quad (3.9)$$

Denklemler 3.8 ve 3.9 spesifik enerjinin (kütle birimi başına enerji) ve volanın enerji yoğunluğunun, şekil faktörü K olarak ifade edilen şekline bağlı olduğunu belirtir. Volanın şekli, volanın belirlenmesi için önemli bir faktördür. Şekil faktörü K , volan malzeme kullanımının bir ölçümüdür. Şekil 3.2'de, en yaygın volan geometrisi tipleri için K 'yi göstermektedir (Amiryar ve Pullen, 2017).



Şekil 3.2 : Farklı volan kesitleri.

Denklem 3.1 'e göre, bir volanın depolanan enerjisi eğirme hızını (w) artırarak veya atalet momentini (J) artırarak optimize edilebilir. Bu VEDS için iki seçeneğe izin verir: düşük hızlı VEDS (tipik olarak 10.000 d/dk 'ye kadar) ve yüksek hızlı VEDS (100.000 d/dk 'ye kadar). Düşük hızlı çarklar genellikle daha ağır metalik malzemeden yapılıdır. Mekanik veya manyetik rulmanlar tarafından desteklenir. Yüksek hızlı çarklar genellikle daha hafif ve güçlü kompozit malzemeler kullanır. Yüksek hızda çalışan çarkların maliyeti düşük hızda çalışan çarkların maliyetinden beş kat daha yüksek olabilir. Çark sisteminin maliyeti rotordan değil tüm sistemin tasarımından etkilendiği söylenebilir (Amiryar ve Pullen, 2017).

Yüksek hızlı VEDS'ler sabit mıknatıslı elektrik makinelerinde kullanılır. Manyetik levitasyonlu temassız rulman yapısına sahiptir. Yapımı karmaşık yüksek maliyetlidir. Volan malzemesi olarak kompozit materyaller kullanılır. Vakum ortam mutlaka gereklidir. Volan da kullanılan malzeme VEDS'de maksimum hızda belirleyicidir. Volanda yüksek hızlarda büyük merkezkaç kuvvetleri oluşur. Malzemenin sertlik derecesi de bu kuvvetlere dayanacak yükseklikte olmalıdır. Bu sebeple özellikle karbon elyaf içerikli kompozit malzemeler, yüksek hızlı volanlarda kullanılır (Hüner, 2017). Yüksek hızlı VEDS'lerin enerji yoğunluğu 100 Wh/kg'a ulaşabilmektedir (Erdoğan ve diğ. 2011). Bu sistemler 50000d/dk dönme hızlarına sahiptirler. Boyut ve ağırlığın belirleyici olduğu elektrikli araçlar ve buna benzer alanlarda kullanılırlar (Turan ve Yönetken, 2016).

Düşük hızlı VEDS'ler sabit mıknatıslı elektrik makinelerde ve asenkron makinelerde kullanılır. Mekanik veya manyetik rulman yapısına sahiptir. Yapımı daha az kontrole gerek duyan düşük maliyetli sistemdir. Volan malzemesi olarak çelik ve alüminyum kullanılır. Vakum olması zorunlu değildir (Hüner, 2017). Düşük hızlı VEDS'lerin enerji yoğunluğu 5 Wh/kg'a ulaşabilmektedir (Erdoğan ve diğ. 2011). Bu sistemler 7000 d/dk daha düşük hızda çalışırlar ve yüksek hızlıya göre daha büyüktürler (Turan ve Yönetken, 2016)

3.1.2 Elektrikli makine

Enerji, volanın içinde depolanır. Volanın şarj edilmesi ve boşaltılması için bir elektrikli makineye bağlanmalıdır. Volan şarj edilirken makine volanı hızlandırır ve enerji çekildiğinde makine volanı yavaşlatır. Böylece elektrikli makine hem motor hem de generatör olarak çalışabilmelidir.

Makinenin karşılaması gereken temel tasarım kriterleri arasında yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, düşük rölanti kayıpları ve düşük rotor kayıpları bulunur. Yüksek verimlilik, VEDS'in etkili bir enerji depolama sistemi olması için önemlidir. Çoğu VEDS vakumda çalıştığından ve ısının kaldırılmasının sınırlı olması nedeniyle düşük rotor kayıpları kritik öneme sahiptir. Uzun süre enerji depolanması için düşük rölanti veya bekleme kayıpları istenmektedir (Östergard, 2011).

Çizelge 3.1 : Volan enerji sistemlerindeki SMSM'nin avantajları ve dezavantajları.

Avantajları	Dezavantajları
Eksitasyona gerek yoktur.	Manyetik giderme riski vardır.
Rotor tasarım karmaşıklığı azdır.	Merkezkaç kuvvetlerine karşı yapısal destek gerektirir.
Yüksek verimlilik vardır.	Isıtmaya duyarlıdır.
Yüksek güç yoğunluğu vardır.	

3.1.3 Yatak

Rotor, rulmanlar tarafından desteklenmelidir. Rulmanlar sürtünmeyi en aza indirir ve rotoru yerinde tutar. Modern volan tasarımlarının çoğunda yüksek hız istenmektedir. Volan sistemini verimli bir şekilde çalıştırmak için, rulmanlar düşük kayıplara sahip olmalıdır.

Mekanik rulmanlar, 20000 d/dk altındaki hızlarda VEDS için en iyi seçimdir ve 40000 d/dk üzerindeki hızlarda manyetik rulmanlar tek seçenektir. Mekanik rulmanlar basit uygulama, düşük başlangıç maliyeti ve nispeten yüksek sürtünme sunar. Yağlama ihtiyacı olan bu tip rulmanlar yüksek hızlı volan sistemleri için uygun değildir. Yüksek hızlı volan, düşük basınçlı bir ortamda çalıştırılır. Bu nedenle mekanik rulmanların yağlanması zor olmaktadır.

Manyetik rulmanlar rotor veya şaftla temas halinde değildir. Düşük kayıplar, uzun ömür ve yağlama gerektirmez. Bu özellikler manyetik yatağı yüksek hızlı volan sistemlerinde kullanım için uygun hale getirir. Temel olarak, manyetik bir yatak volanın kütlelerini kaldıran sabit mıknatıslardan ve volan rotorunu radyal olarak stabilize eden kontrollü elektromıknatıslardan oluşur. Dengeleme, pahalı sensörlere sahip karmaşık bir kontrol sistemi gerektirir. Bazı sistemlerde hem mekanik hem de manyetik yatakların bir kombinasyonu kullanılır (Östergard, 2011).

3.1.4 Muhafaza

Muhafazanın iki amacı vardır: düşük gaz sürtünmesi ve bir arıza durumunda rotorun çevrilmesi için bir ortam sağlamak. Bir VEDS'teki aerodinamik sürüklenme kaybı, sistem atmosferik basınçta çalıştırılırsa, dönme hızının küpü ile artar. Bu performans, sistemin performansını ve güvenliğini arttırmak için döner çarkı vakumlu bir muhafaza içine monte ederek azaltılır. Muhafaza, çarkın hareketsiz bir parçasıdır ve genellikle kalın çelikten veya kompozitler gibi diğer yüksek mukavemetli malzemelerden yapılmıştır. Konteyner, cihazın içindeki düşük basıncı koruyarak rotor aerodinamik sürtünme kayıplarını kontrol etmek için rotoru bir vakum içinde tutar. Sistemi düşük bir basınçta çalıştırmak için bir vakum pompası ve verimli bir soğutma sistemi gerekir. Elektrikli bir makine vasıtasıyla güç tekerleğini kapatıp açarken döner contalar yoktur. Bu nedenle sızıntı çok küçük olabilir. Bu vakum pompasının sık çalışmak zorunda olmadığı veya muhafazanın yeterli bir şekilde sızdırmazlığı ile ortadan kaldırılabileceği anlamına gelir. Vakum pompasının çalışması rotor tipine bağlıdır. Kompozit rotorlar, düşük vakum basınçlarına ve gaz çıkışı gerektiren çok yüksek bir uç hızına sahiptir. Alternatif bir yaklaşım, hem aerodinamik sürüklenme kaybını hem de sistem soğutma gereksinimlerini azaltan bir helyum ve hava gaz karışımı kullanmaktır (Amiryar ve Pullen, 2017).

VEDS'in en önemli parametrelerinden biri verimliliğidir. Aerodinamik sürüklenme kaybı, toplam kayıplara büyük ölçüde katkıda bulunur. Atmosfer basıncında yüksek hızlı bir volan kullanılırsa kayıplar önemli olacaktır. Bu nedenle, bu kayıpların azaltılması, toplam sistem verimliliğinin toplam kayıplarını azaltmanın etkili bir yoludur. Aerodinamik olarak sürtünme kaybını azaltmak için bir çözüm, volanı bir vakum mahfazasına monte etmektir. Bu, hava sürüklenmesini ortadan kaldırır ve böylece kayıpları azaltır. Bununla birlikte, sisteme karmaşıklık kazandırır (Östergard, 2011).

3.1.5 Güç elektroniği

Modern VEDS'te güç elektroniği sistemin hayati bir parçasıdır. Elektrik makinesi için bir kontrol arayüzü ve güç aktarımı için de bir arayüz sağlar. Güç elektroniği arabirimi genellikle iki yönlü bir invertör ve değişken hızlı bir sürücüdür oluşur. VEDS'i bir AC ızgarasına bağlamak için başka bir iki yönlü dönüştürücü gerekir. Yani dönüştürücü tek kademeli (AC-DC) veya çift kademeli (AC-DC-AC) olabilir. Jeneratör yavaşlarken, jeneratör frekansı azalan AC akımı üretecektir. Bu nedenle, AC akımını sabit bir frekansa dönüştürmek gerekir; bu güç elektronik arayüzü tarafından yapılır. VEDS uygulamasının gerekliliklerine bağlı olarak, dönüştürücülerin denetleyici çalışması değişebilir. Bir ac şebekesiyle birbirine bağlanmış bir VEDS için, hem aktif hem de reaktif gücün kontrolüne ihtiyaç duyulabilir (Östergard, 2011).

3.2 Kapasite Aralığı

Bir VEDS'in gücü ve enerji kapasitesi söz konusu olduğunda bunların tamamen ayrıldığını belirtmek önemlidir. Volanın özgül enerjisi dört mekanik parametre ile belirlenir: Şekil, malzemenin gücü, kütle yoğunluğu ve açısal hız. Elektrikli makine ve güç elektroniği bu denklemin bir parçası değildir ve bu nedenle volanda depolanan enerjiyi etkilemez. Bununla birlikte, elektrikli makinenin rotoru, depolanan enerjinin toplam miktarına katkıda bulunur. Ayrıca, sistemin güç seviyesi esas olarak elektrikli makinenin özelliklerine ve güç elektronik arayüzüne bağlıdır. Bu nedenle, sistemlerin enerji depolama kapasitesi mekanik özelliklerle sınırlıdır. Güç kapasitesi sınırı, elektrikli makine ve güç elektroniği tarafından belirlenir. 138 kWh'ye kadar depolama kapasitesine sahip volanlar mevcuttur. Depolama ve güç yeteneklerini arttırmak için

birkaç volan ünitesinin paralel veya seri olarak bağlanabileceği belirtilmelidir (Östergard, 2011).

3.3 Çevre Sorunları

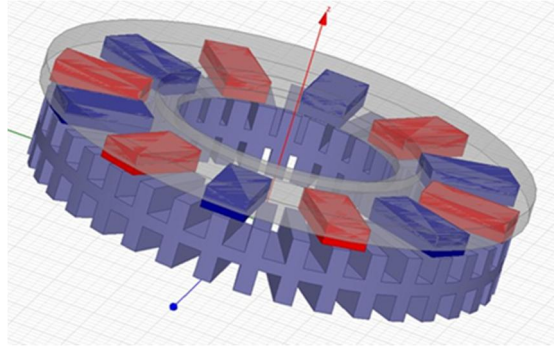
VEDS'te kullanılan malzemeler genellikle tehlikesizdir. Kullanılan malzemeler esas olarak; kompozit lifler (karbon, cam ve epoksi lifler), elik, bakır, alüminyum, silikon ve nadir toprak magnetikleridir. Normal işletimde sifıra yakın emisyon vardır. Düzgün bir şekilde kullanıldığı takdirde, kullanılan tüm malzemeler kullanım ömrünün sonunda geri döndürülebilir. Başlıca tehlike, volan rotorunun potansiyel arızasıdır (Östergard, 2011).

4. TASARIMIN UYGULANMASI

4.1 2p=12 Kutuplu EASM Motor-Alternatör Manyetik Analizi

Yapılan bu çalışmada VEDS'lerde biriken kinetik enerjinin geri kazanılması için aksenal akılı sürekli mıknatıslı (EASM) alternatör tasarlanmıştır. Tasarlanan EASM alternatörün manyetik analizleri ANSYS firmasının maxwell 3d programı ile gerçekleştirilmiştir. Maxwell manyetik analiz programı sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanarak analizleri gerçekleştirmektedir.

Analizlere başlamadan önce tasarımın 3d katı modeli program aracılığıyla oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de verilen model 12 kutuplu bir yapıya sahiptir. Stator 36 olukludur. Maxwell ile yapılan manyetik analizlerde nüve yüzeyinde manyetik doyum noktaları incelenmiştir. Bununla birlikte vuru mu momenti üzerine de analizler gerçekleştirilmiştir (Sever, 2019).



Şekil 4.1 : 2P=12 Kutuplu EASM alternatörün maxwell'de modellenmesi.

Maxwell ile manyetik analizleri gerçekleştirilirken bazı parametreler değişken olarak alınmıştır. Değişken olarak alınan parametreler A_g , A_h , B_h , M_d , A_{irg} ve A_{lfaR} sırasıyla ayak genişliği, ayak yüksekliği, boyunduruk yüksekliği, mıknatıs açısı, hava aralığı ve rotor dönüş açısı olarak belirlenmiştir (Sever, 2019).

Ayak genişliği A_g parametresi için 2-8mm arasındaki değerler analiz edilmiştir. nüve ayak kenarlarında 1,7 tesla civarında ortalama manyetik akı yoğunluğu vardır. A_g parametresi için hava aralığında belirlenen kontur boyunca manyetik akı dağılımı

incelenmiştir. A_g 'nin artışı ile değişim minimum olmaktadır. Buda hava aralığı relüktansının değişiminin azaldığını gösterir. Burdan da vurutu momentinin azalacağını söyleyebiliriz. A_g 'nin 4mm olması durumunda en yüksek ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte toplam ayak uzunluğunun çevre uzunluğuna oranı olan $TAg/\Çu$ 'nin 0,4-0,5 arasında olmasının toplam amper sarım miktarını belirleyen siper sayısını sınırladığı belirtilmiştir. Bu açıdan da bakıldığında A_g parametresi 5-6mm arasındaki değerin optimum olacağı belirtilmiştir (Sever, 2019).

Ayak yüksekliği A_h değeri ise 6-12mm arasında değiştirilmiştir. Alınan sonuçlar incelendiğinde $A_g=5,5$ mm için A_h parametresinin 8-12mm değerleri için ortalama manyetik akı yoğunluğundaki değişim oranının %0,66 oranında azaldığı görülmüştür. Tasarımda çift sargı sarılarak seri ve paralel bağlantı durumları elde edilmek istendiğinden oluk derinliğinin fazla olması için $A_h=12$ mm alınmıştır (Sever, 2019).

Mıknatis açısı M_d değişimi vurutu momenti üzerine etkisi vardır. M_d 'nin 30 derece durumu için yapılan analizlerde rotorun her bir dönüş açısı için diğer açı değerlerine göre daha fazla ayak yüzeyini kapladığı elde edilmiştir. Bununla birlikte AlfaR'nin değişimi ile birlikte M_d 'nin 0-30 derece arasındaki vurutu momenti değerleri elde edilmiştir. elde edilen değerlerde M_d 'nin 10 ile 30 derece arasındaki değişimi söz konusu olduğunda vurutu momentinin %61 oranında düştüğü tespit edilmiştir (Sever, 2019).

Tasarımın ANSYS maxwell 3d ile yapılan manyetik analizleri sonucunda $M_d=5.5$ mm, $A_h=12$ mm ve $M_d=30$ derece en uygun değerler olarak tespit edilmiştir. bununla birlikte bu değerlerde yapılacak üretimin kolaylığı ve maliyeti göz önünde tutularak belirlenen parametre değerlerinden aşağı yukarı oynama imkanı da vardır (Sever, 2019).

Yapılan proje çalışmasında bu değerler dikkate alınarak 12 kutuplu EASM alternatör yapısı tasarlanmıştır.

4.2 Tasarımın 3d Katı Modeli ve Üretimi

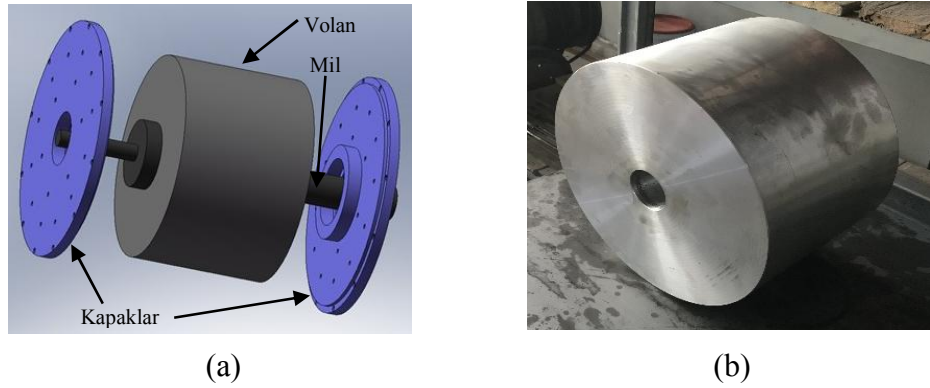
Yapılan çalışmada bobinli manyetik fırlatıcılar için VEASM motor-alternatör sistemi tasarımı ve uygulaması amaçlanmıştır. En önemli amaç en kısa sürede volanı referans hıza ulaştırmak ve en kısa sürede en yüksek akımla deşarj edebilmektir. Çünkü bobinli

manyetik fırlatıcılar 1-2sn içerisinde çok yüksek akım çekerler. Yapılan projede de temel amaç bobinli manyetik fırlatıcılar için gerekli enerjinin karşılanmasıdır.

Tasarımın modeli için hesaplanan volan büyüklüğü ve ağırlığı dikkate alınarak 3d katı modeli oluşturulmuştur. Bunun için öncelikli olarak volan modellenerek üretilmiştir.

4.2.1 Volan 3d katı modeli

Volan farklı malzemelerden ve farklı şekillerden yapılabilmektedir. Her iki parametrede depolanan enerjinin miktarını değiştirmektedir. Fakat projede amaç depolanan enerjinin miktarını arttırmaktan ziyade depolanan enerjinin kısa sürede deşarj olmasının sağlanmasıdır. Bu nedenle üretim kolaylığı ve maliyet düşünülerek volan silindir bir alüminyum malzeme olarak tanımlanmıştır. Volanın bağlandığı mil ise paslanmaz çelikten imal edilmiştir.



Şekil 4.2 : Volan a) 3d Katı modeli b) Üretilen volan.

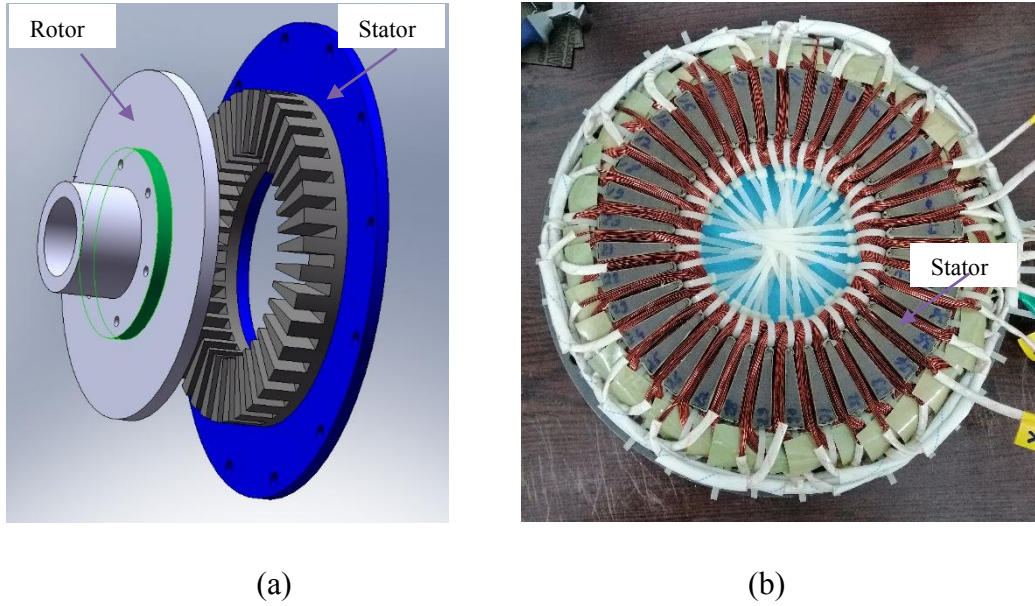
Şekil 4.2.a'da Enerji depolama sisteminde kullanılan volanın 3d katı modeli verilmiştir. Şekil 4.2.b'de ise volanın üretim sonrası görüntüsü verilmiştir. Verilen 3d katı modele göre üretilen volanın mekanik parametreleri aşağıdaki çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Volanın mekanik parametreleri.

Volanın Dış Çapı (mm)	300
Volanın Uzunluğu (mm)	200
Milin çapı (mm)	100
Ağırlığı (kg)	38
Eylemsizlik Momenti (kgm ²)	0,4275
Malzemenin Cinsi	Alüminyum
Depo edilen enerji miktarı (Joule) (3000 – 1000 d/dk arası)	9366

4.2.2 EASM 2P=12 motor alternatör modeli

Tasarımda 2P=12 kutuplu rotor ve 36 oluklu stator yapısı kullanılmıştır. Bu motorun temel amacı statora ikinci bir sargı yerleştirilerek volanda biriken kinetik enerjinin büyük kısmını en kısa sürede yüksek akım değeri ile deşarj etmektir. Çünkü projenin amacı bobinli fırlatıcılar için VEASM motor-alternatör sistemi geliştirmektir. İkinci amacı ise sahip olduğu çok kutuplu yapısı ile düşük referans hıza erişmektir. Dolayısıyla 12 kutuplu EASM motor alternatör olarak ta kullanılarak proje gerçekleştirilecektir. Şekil 4.3.a’da 12 kutuplu rotor ve stator yapısının 3d katı modeli verilmiştir. Şekil 4.3.b’de ise katı modelin üretim sonrası verilmiştir. Statora iki katlı 3 fazlı sargı uygulanmıştır. Böylelikle hem motor modun da hem de alternatör modun da çalışması mümkündür. Özellikle alternatör modun da yüksek deşarj akımı sağlarken iç direncinin düşük olması ile yüksek akım kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.3 : 2P=12 EASM motor-generatör a) 3d Katı modeli b) üretim sonrası.

Tasarlanan stator yapısı 36 olukludur. Rotor yapısı ise 12 adet dikdörtgen tip mıknatıstan oluşmaktadır. Mekaniksel parametreleri çizelge 4.2 'de verilmiştir.

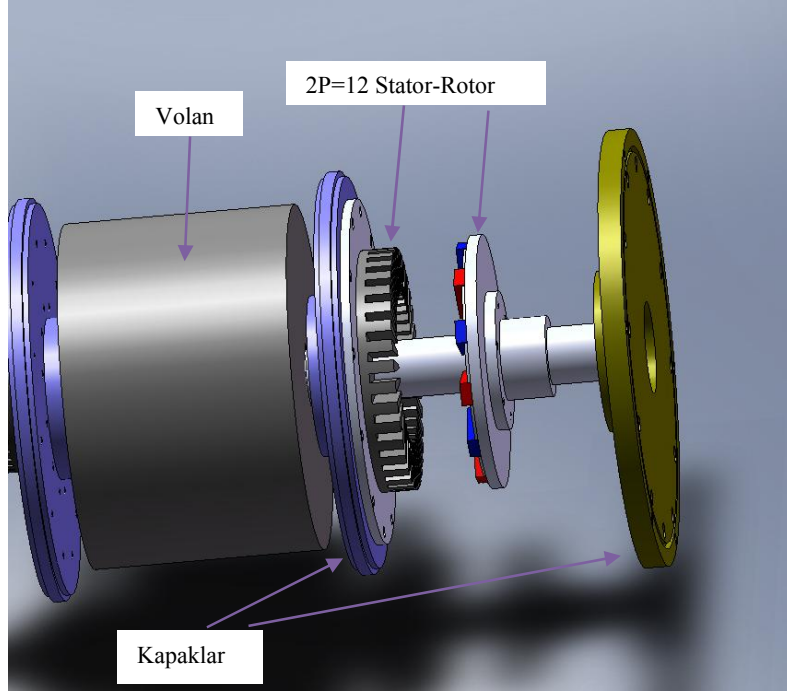
Çizelge 4.2 : 2P=12 EASM motor stator ve rotor parametreleri.

Stator	
Oluk Sayısı	36
Oluk Ölçüsü	8x40x12 mm
Nüve Ölçüsü	210x130x30 mm
Lamda Katsayısı (λ)	0,619
Faz Sayısı	3
Faz Başına Oluk Sayısı	12
c (Bir kutup altında faz başına oluk sayısı)	1

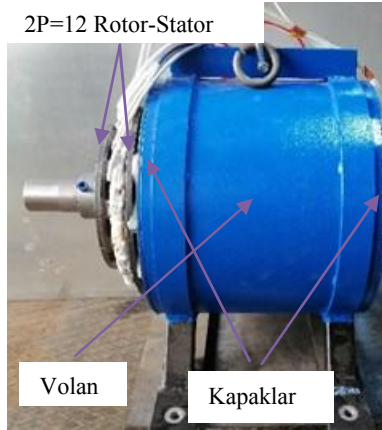
Rotor	
Malzeme	Yumuşak demir malzeme
Mıknatıs Ölçüsü	40x20x10 mm
Mıknatıs manyetizma yönü	Eksenel
Mıknatıs Tipi	NdFeBr (en az N35)
Mıknatıs çalışma sıcaklığı	En az 80 °C

4.2.3 VEDS alternatör modeli

Tasarlanan VEDS alternatör sistemi bir volan iki adet EASM makine ve kapak ve dış gövdeden oluşmaktadır. Büyük çaplı EASM makine hem motor hem de alternatör görevi görecektir. Literatürde tahrik makinası olarak kullanılan motor genellikle alternatör olarakta kullanılmaktadır. Fakat yapılan bu çalışmada bobinli manyetik fırlatıcıları sürmek amacıyla motor sargılarının üstüne özel olarak alternatör sargıları sarılacaktır. Dolayısıyla volandaki kinetik enerjinin en kısa sürede en yüksek deşarj akımıyla alınması amaçlanmaktadır. İkinci EASM makine ise motor olarak kullanılacaktır. İkinci motorun görevi ise referans bir kinetik enerji kazanan volanın enerjisini hızını arttırarak yükseltmektir. Tüm sistemin katı modeli şekil 4.4.a'da verilmiştir. Şekil 4.4.b'de ise 3d katı modelin üretim sonrası verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.4 : VEDS a) 3d katı modeli b) 3d Modelin üretimi.

Şekil 4.4.a'da VEDS'nin en temel parçaları sırasıyla EASM Motor-Alternatör ($2P=12$), Volan, Kapaklar ve Gövde kısımlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte sisteme gerektiğinde vakum pompası eklenecek düzenlemeler de gerçekleştirilecektir. Yapılan tasarım da motor ve alternatör sistemlerinde eksenek akılı makine yapısı kullanılmıştır. Bunun en temel nedeni yapısının basit ve kompakt olması, yüksek güç yoğunluğu ve direkt sürülebilir yapısıdır. Bununla birlikte tasarımdaki EASM motor ve alternatör tek taraflı toroidal sargılı yapılması tasarlanmıştır. Tasarımda dikkat edilen diğer bir nokta uygulamanın geliştirilebilir nitelikte olmasıdır. Dolayısıyla

tasarımda volan sabit tutulmak üzere EASM motor ve alternatör sistemleri farklı yapılar için değiştirilebilir nitelikte tasarlanmıştır. Ayrıca tek taraflı toroidal nüvenin kullanılması ile gerçekleştirilecek bu uygulamada alınan sonuçlar ışığında ileri ki çalışmalarda daha büyük bir volan için elde edilen veriler kullanılacaktır. Dolayısıyla aynı EASM motor-alternatör sistemi ile iki kat daha fazla enerji depolayabilen bir volanda ileri ki çalışmalarda kullanılması mümkün olacaktır.

4.3 Tasarlanan EASM Motor ve Alternatörün Sargı Şemaları

Yapılan bu çalışmada VEDS için iki farklı EASM makine yapısı önerilmiştir. Birincisi 12 kutuplu yapıya sahip EASM motor-alternatör setidir. Tasarımda sargı şemalarında kullanılan eşitliklerde öncelikle faz başına oluk sayısı denklem 4.1'den hesaplatılmıştır. Denklem 4.1'de n_s , X ve m sırasıyla faz başına oluk sayısı, oluk sayısı ve faz sayısını ifade etmektedir.

$$n_s = \frac{X}{m} \quad (4.1)$$

Denklem 4.2'de renk sayısı verilmiştir. Renk sayısı bir kutup altında bir faza ait kaç oluk olduğu bilgisini bize verir.

$$c = \frac{X}{2p \cdot m} \quad (4.2)$$

Denklem 4.3'de her bir oluk arasındaki elektriksel açı (α) değeri verilmiştir.

$$\alpha = \frac{180.2P}{X} \quad (4.3)$$

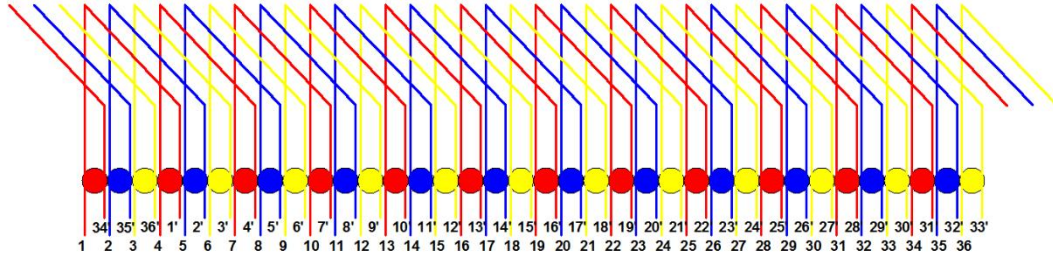
4.3.1 2P=12 kutuplu motor-alternatör sargı şeması

Tasarlanan 12 kutuplu yapıda motor ve alternatör sargısı mevcuttur. Tasarlanan EASM makine yapısının ölçüm sonuçları ile denklem 4.1-4.3'e göre hesaplama sonuçları çizelge 4.3'de verilmiştir.

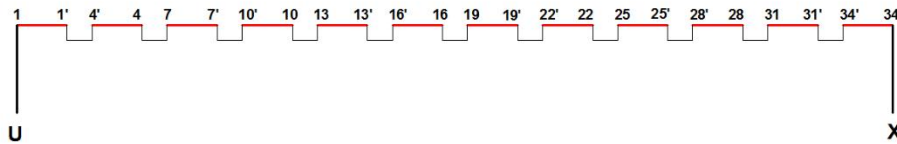
Çizelge 4.3 : 2P=12 EASM makine sargı parametreleri.

	1 nolu EASM	2 nolu EASM	3 nolu EASM
Oluk Sayısı (X)	36	36	36
Tek kutup sayısı (2P)	12	12	12
Faz sayısı (m)	3	3	3
Elektriksel açı (α)	60	60	60
Faz başına oluk sayısı (n_s)	12	12	12
Renk sayısı (c)	1	1	1
Adım sayısı (Y_x)	(1-4)	(1-4)	(1-4)
Sipir sayısı (sipir/oluk)	40	40	8x5
İletken çapı	0,50 mm	0,50 mm	8x0,50 mm
Sarım tipi	Tam kalıp	Tam kalıp	Tam kalıp
Faz direnci	8,3 ohm	8,3 ohm	

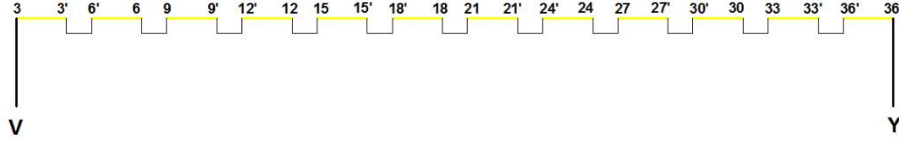
Çizelge 4.3 göz önünde tutularak 1-2-3 nolu EASM makine yapılarının sarım şeması şekil 4.5'da verildiği gibidir. Oluk sayısı ve kutup sayısı aynı olduğu için 3 sargıda da aynı şema kullanılmaktadır. Şekil 4.5.b.c. ve d'de ise giriş ve çıkış uçlarının bağlantı şemaları verilmiştir. Şemadan da görüldüğü üzere giriş-girişe, çıkış-çıkışa bağlanmaktadır.



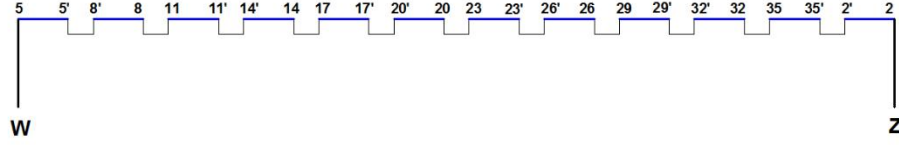
(a)



(b)



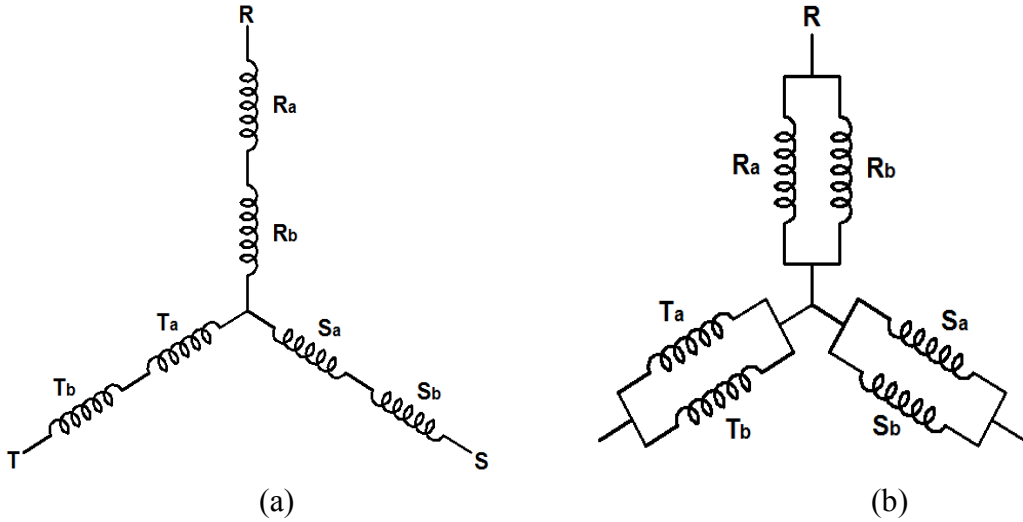
(c)



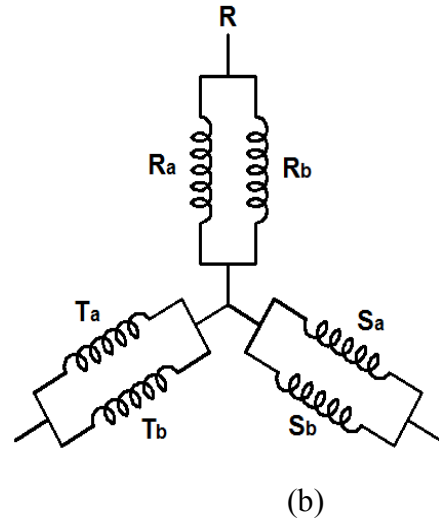
(d)

Şekil 4.5 : Tam kalıp sarım şeması $X=36$ oluk $2P=12$ a) Sargı oluk yerleşimi b) R fazının bağlantı şeması c) S fazının bağlantı şeması d) T fazının bağlantı şeması.

VEDS için tasarlanan 12 kutuplu EASM makine modeli için 2 özdeş sargı vardır. Bu sargılar seri ve paralel bağlanarak motor modunda volanın istenen referans hıza ulaşmasını sağlamaktadır. Şekil 4.6.a ve b’de sırasıyla seri ve paralel bağlantı şeması verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.6 : Sargı bağlantı şeması a) Seri bağlantı b) Paralel bağlantı.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada VEDS için tasarlanan EASM makine yapısı mevcuttur. Çalışmada amaç en kısa sürede volandaki enerjiyi geri kazanmaktır. Dolayısıyla bobinli manyetik fırlatıcının ihtiyacı olan enerjinin elde edilmesi sağlanacaktır.

Tasarlanan makine yapıları maksimum 45 hz frekansta gerilim üretecek şekilde test edilmiştir. Çünkü tasarımın atalet momenti yüksek olduğu için iyi bir balans ayarı gerekmektedir. Dolayısıyla yüksek atalet momentine sahip bu sistemi daha düşük hızlarda test ederek balanstan dolayı meydana gelebilecek problemler giderilmiştir.

Tasarlanan her makine modeli için indüklenen elektromotor kuvveti (emk) değerleri elde edilmiştir. Bunun için 12 kutuplu EASM makine yapıları farklı devir sayılarında döndürülerek elde edilen emk değerleri kaydedilmiştir. Bununla birlikte 12 kutuplu EASM makine yapısı içinde sargılar seri ve paralel durumlarında elde edilen emk ve enerjinin geri kazanım miktarları deneysel olarak elde edilmiştir.

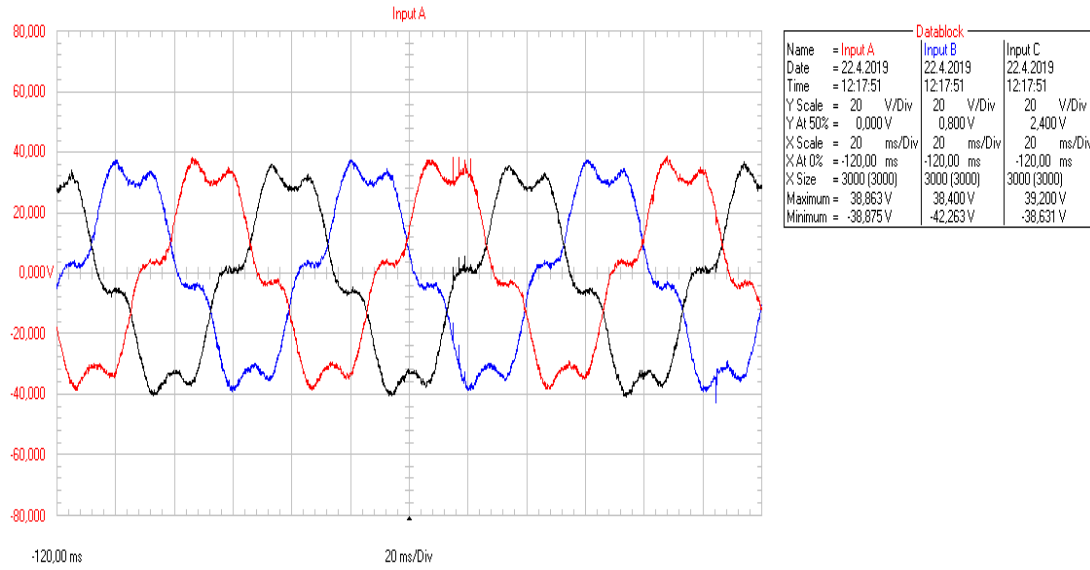
5.1 Boş Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler

Tasarlanan 12 kutuplu EASM makine modeli için emk değerleri elde edilmiştir.

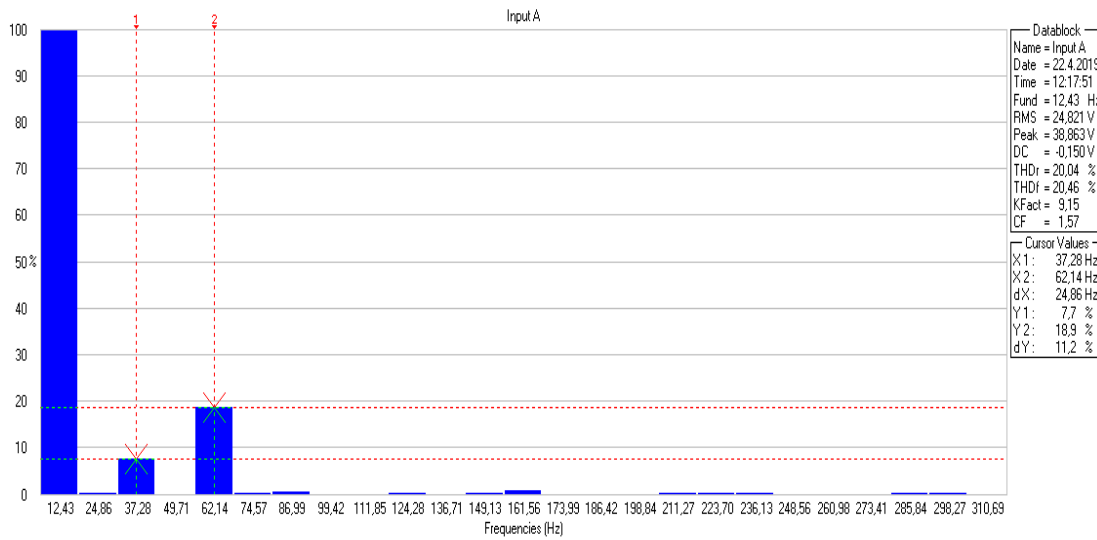
5.1.1 2P=12 kutuplu EASM makine “A” sargısı boş çalışma değerleri

VEDS için tasarlanan 12 kutuplu EASM makine modelinin birinci sargısı için farklı frekanslar için boş çalışma değerleri elde edilmiştir.

Şekil 5.1'a ve b'de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 12,54 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.1.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=24,9$ V, frekansı 12,53 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.1.b'de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri $THd= \%20$ 'dir. Gerilimin 3. Ve 5. Harmonik değerleri sırasıyla $\%7,7$ ve $\%18,9$ 'dur.



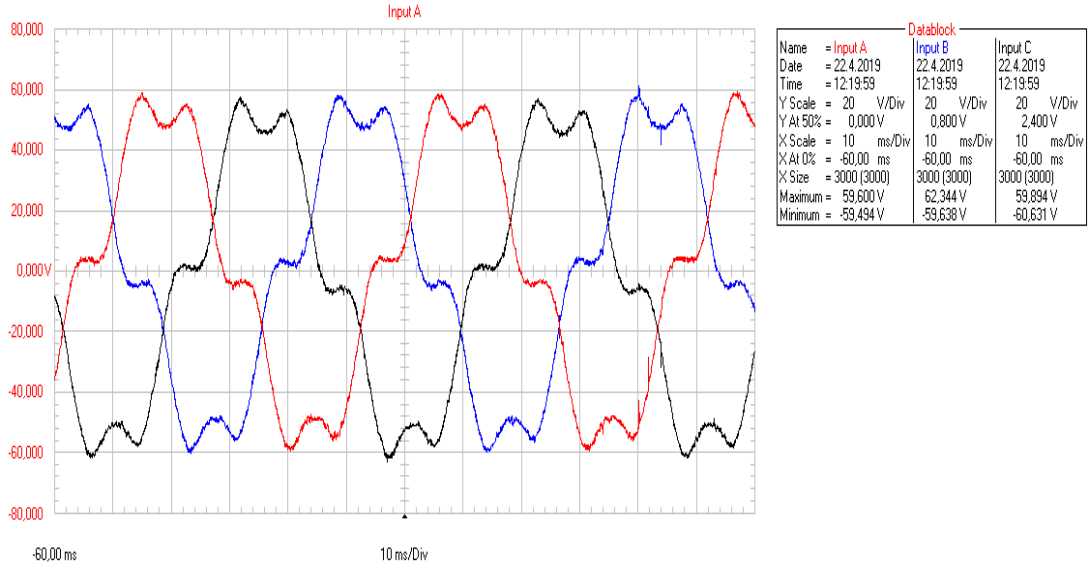
(a)



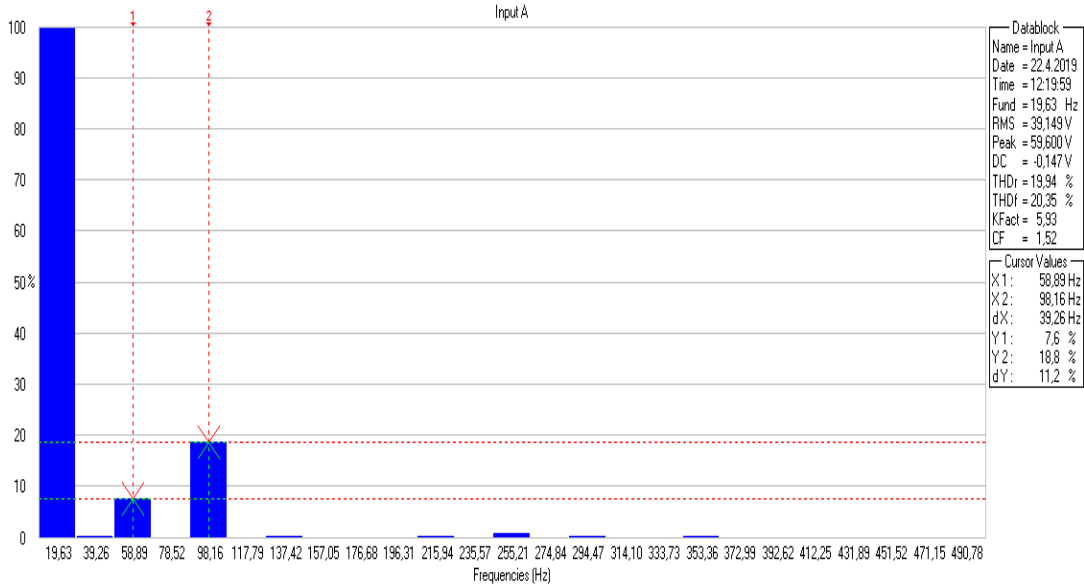
(b)

Şekil 5.1 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 12,53 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

Şekil 5.2’a ve b’de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 19,70 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.2.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=39,1$ V, frekansı 19,70 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.2.b’de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri $THd= \%19,94$ ’dir. Gerilimin 3. ve 5. harmonik değerleri sırasıyla $\%7,6$ ve $\%18,8$ ’dir.



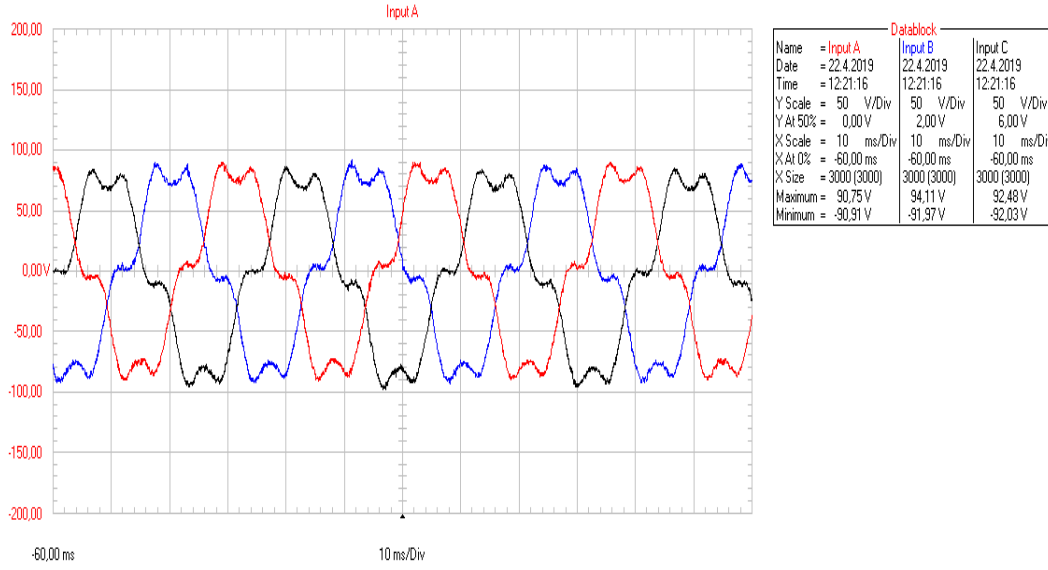
(a)



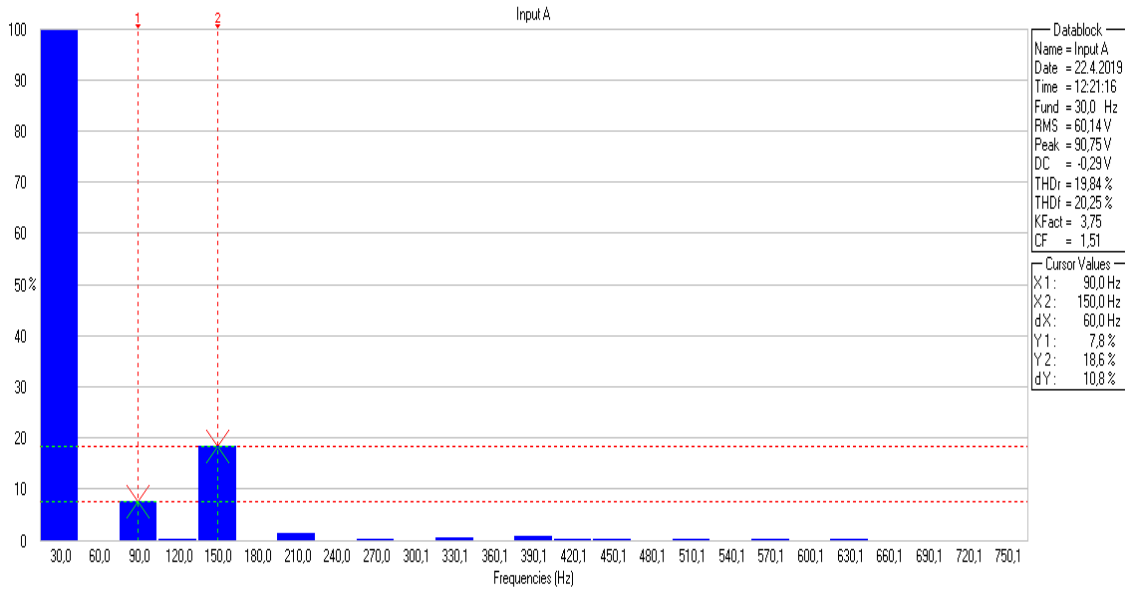
(b)

Şekil 5.2 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 19,70 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

Şekil 5.3’a ve b’de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 29,67 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.3.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=59,9$ V, frekansı 29,67 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.3.b’de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri THD= $\%19,84$ ’dir. Gerilimin 3. ve 5. harmonik değerleri sırasıyla $\%7,8$ ve $\%18,6$ ’dir.



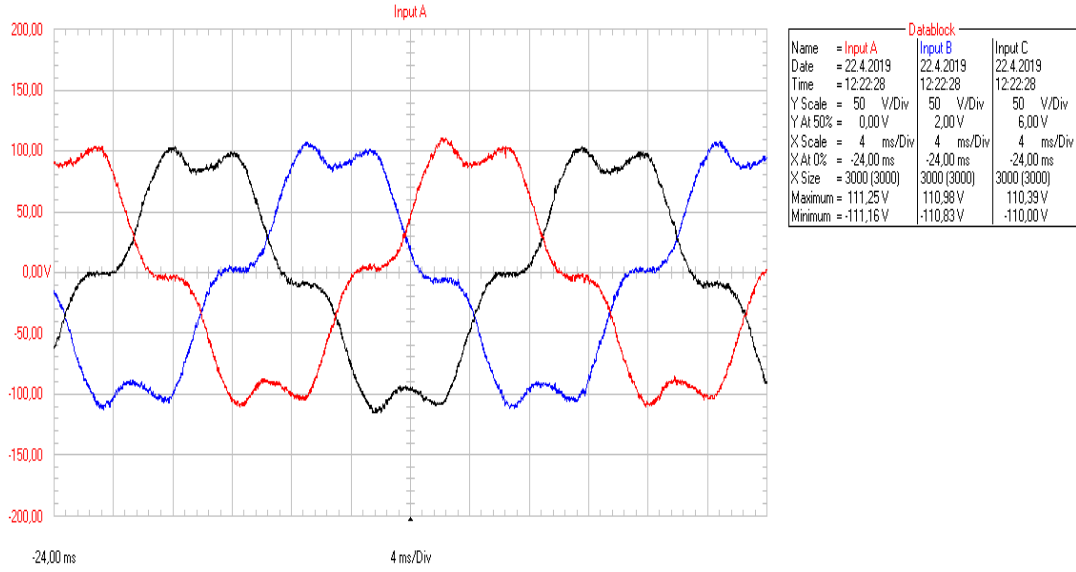
(a)



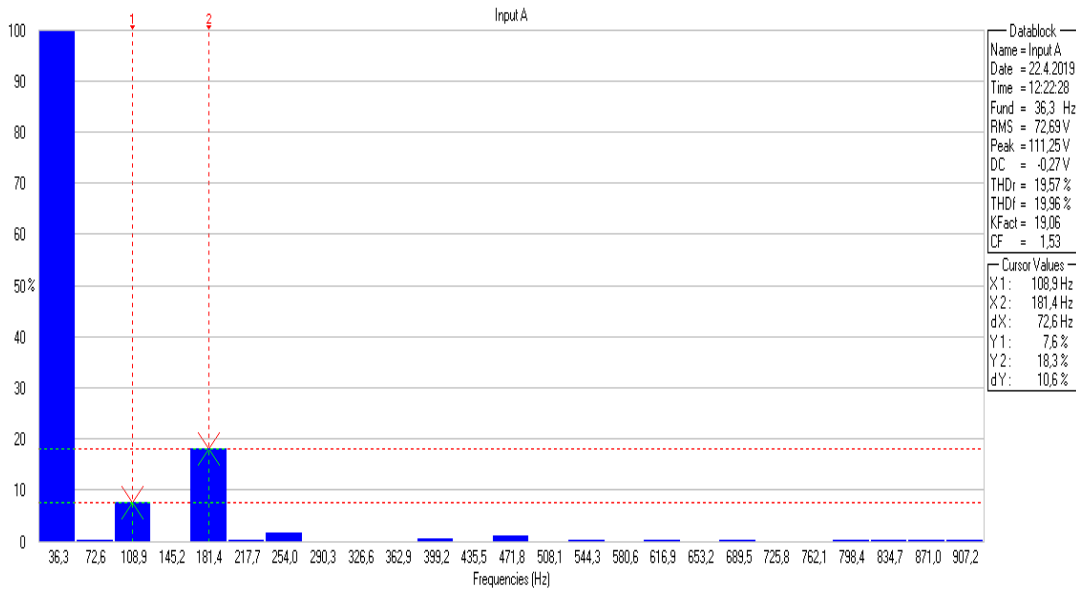
(b)

Şekil 5.3 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 29,67 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

Şekil 5.4’a ve b’de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 35,92 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.4.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=72,3$ V, frekansı 35,92 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.4.b’de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri THD= $\%19,57$ ’dir. Gerilimin 3. ve 5. harmonik değerleri sırasıyla $\%7,6$ ve $\%18,3$ ’dir.



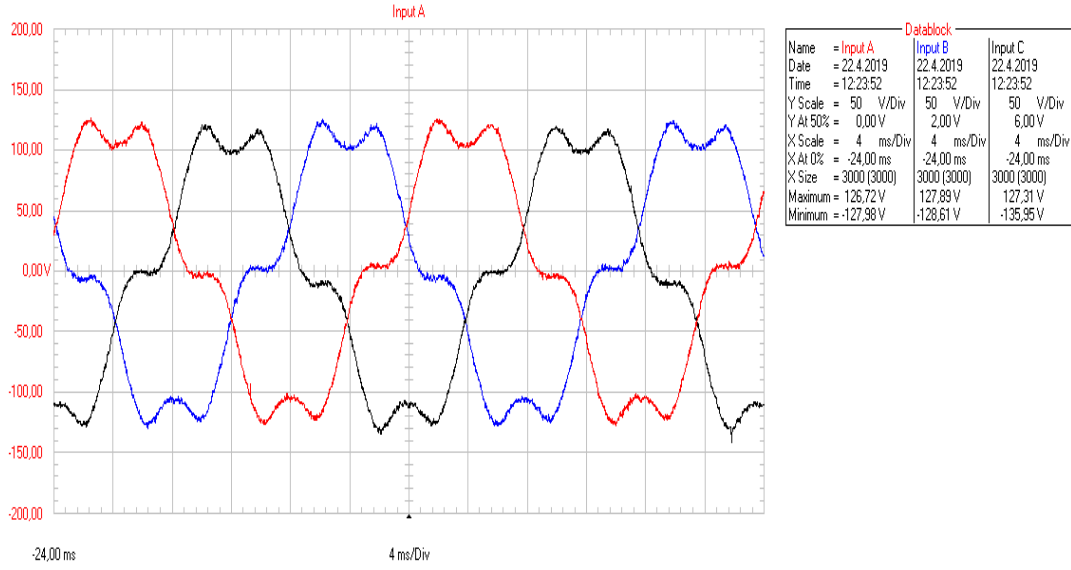
(a)



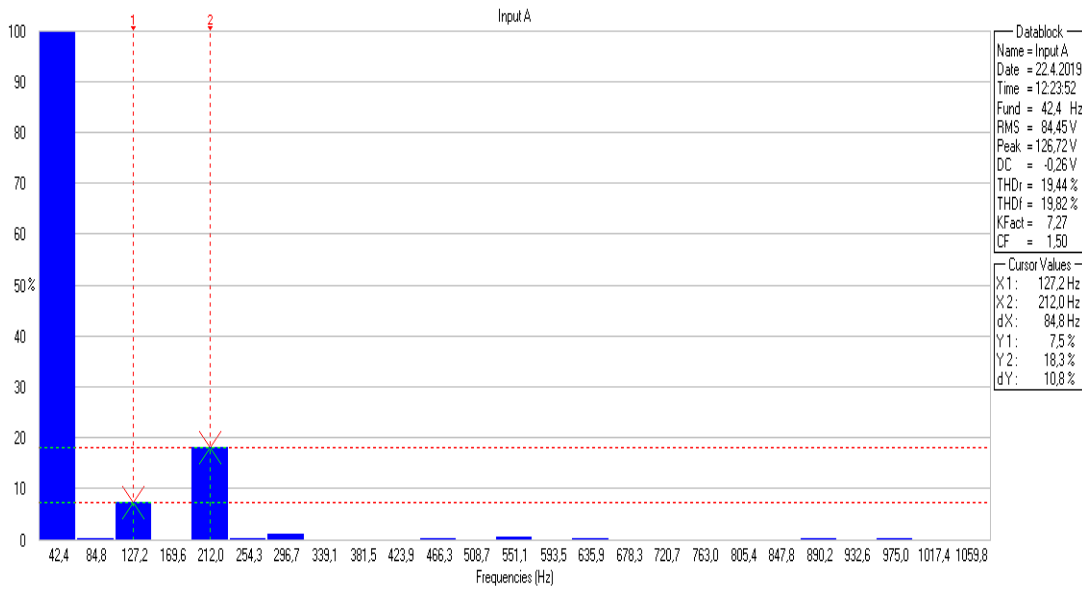
(b)

Şekil 5.4 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 35,92 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

Şekil 5.5’a ve b’de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 42,33 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.5.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=84,2$ V, frekansı 42,33 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.5.b’de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri $THD=$ %19,44’dir. Gerilimin 3. ve 5. harmonik değerleri sırasıyla %7,5 ve %18,3’dir.



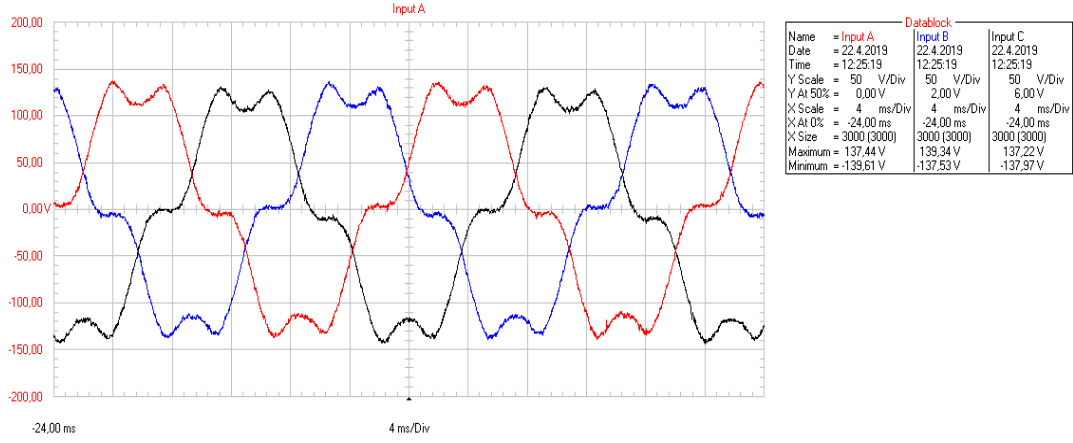
(a)



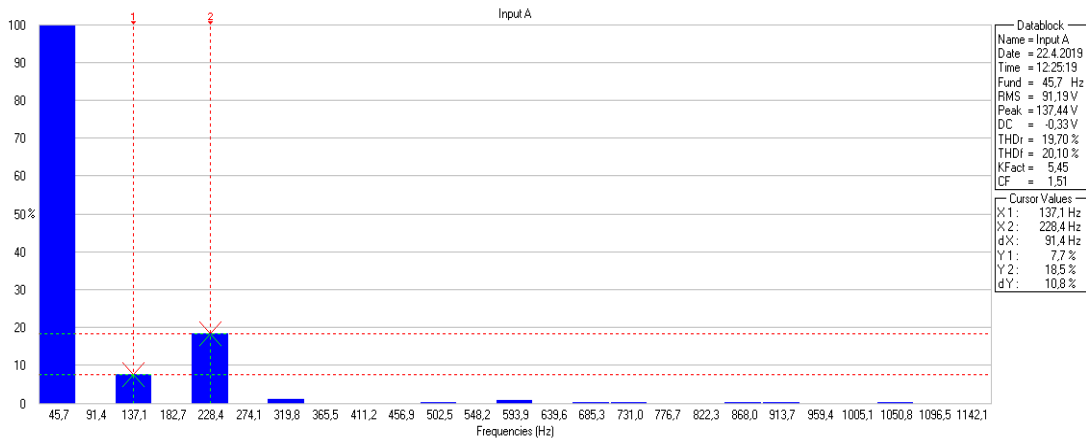
(b)

Şekil 5.5 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 42,33 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

Şekil 5.6’a ve b’de sırasıyla VEDS için tasarlanan EASM makinenin 45,92 Hz frekansında boş çalışmasına ait 3 fazın emk değeri ve harmonik eğrisi verilmiştir. Şekil 5.6.a incelendiğinde etkin faz gerilim değeri $U_f=91,0$ V, frekansı 45,92 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 5.6.b’de ise 3 fazlı gerilim eğrisinin harmonik değeri $THd=\%19,70$ ’dir. Gerilimin 3. ve 5. harmonik değerleri sırasıyla $\%7,7$ ve $\%18,5$ ’dir.



(a)



(b)

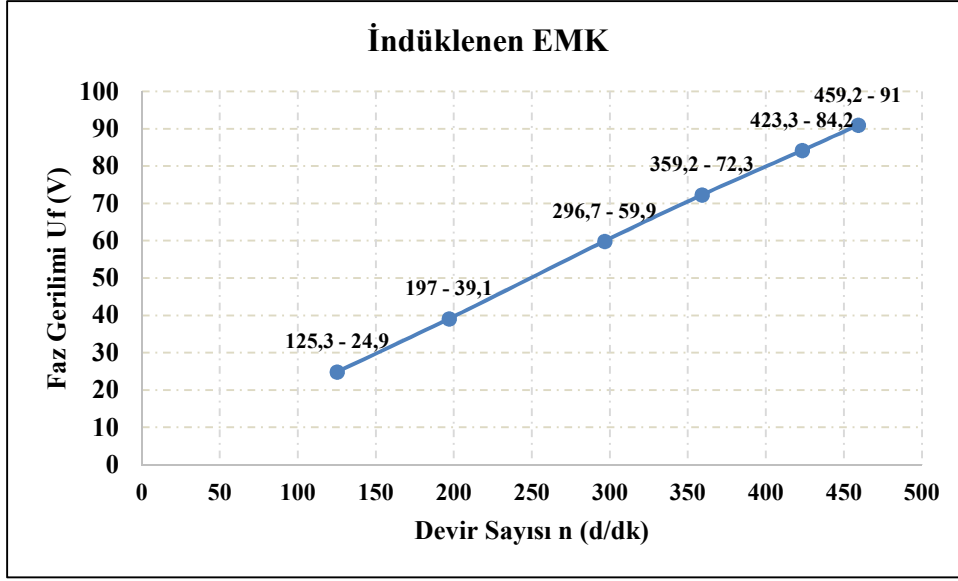
Şekil 5.6 : EASM 12 kutuplu 3 fazlı makinenin 45,92 Hz’de boş çalışması a) Gerilim eğrisi b) Harmonik eğrisi.

5.1.2 “A” sargısı boş çalışma

VEDS için tasarlanan EASM 12 kutuplu makine yapısının boş çalışma durumunda farklı frekanslarda alınan değerler şekil 5.1-6’da verilmiştir.

Çizelge 5.1 : 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.

Devir sayısı n (d/dk)	Frekans (Hz)	Gerilim (U _r)	% Thd	% Thd ₃	% Thd ₅
125,3	12,53	24,9	20,04	7,7	18,9
197	19,7	39,1	19,94	7,6	18,8
296,7	29,67	59,9	19,84	7,8	18,6
359,2	35,92	72,3	19,57	7,6	18,3
423,3	42,33	84,2	19,44	7,5	18,3
459,2	45,92	91	19,7	7,7	18,5



Şekil 5.7 : “A” Sargısı 2P=12 Kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.

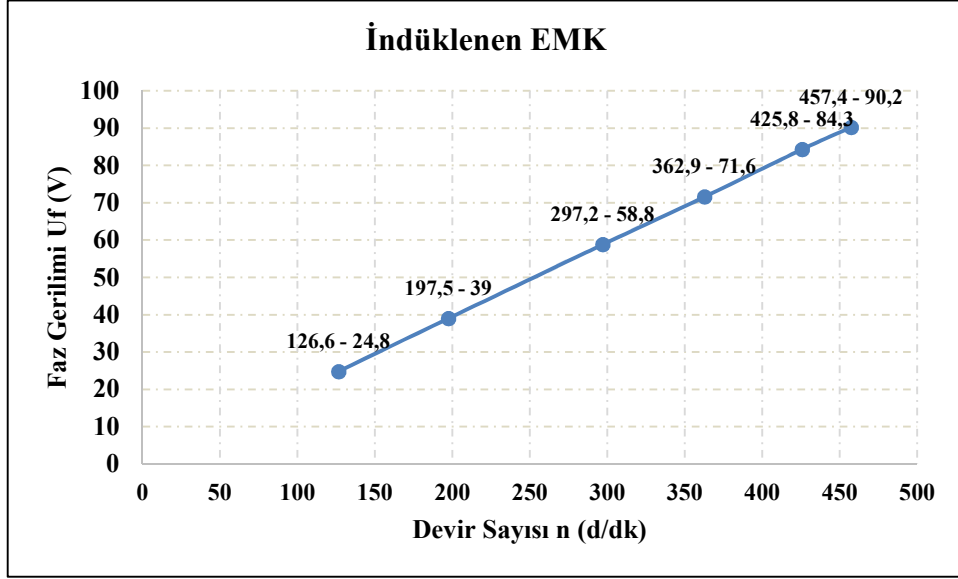
5.1.3 “B” sargısı boş çalışma

VEDS için tasarlanan EASM makine yapısındaki ikinci sargı değerleri çizelge 5.2’de verilmiştir. İkinci sargı ile birinci sargı özdeş sargılardır.

Çizelge 5.2 : “B” Sargısı 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.

Devir sayısı n (d/dk)	Frekans (Hz)	Gerilim (U_f)	% Thd	% Thd ₃	% Thd ₅
126,6	12,66	24,8	20,16	9,1	18,4
197,5	19,75	39	20,19	9	18,5
297,2	29,72	58,8	20,05	9,1	18,3
362,9	36,29	71,6	19,7	9	17,7
455,8	45,58	84,3	19,56	8,7	17,8
457,4	45,74	90,2	19,64	8,8	17,9

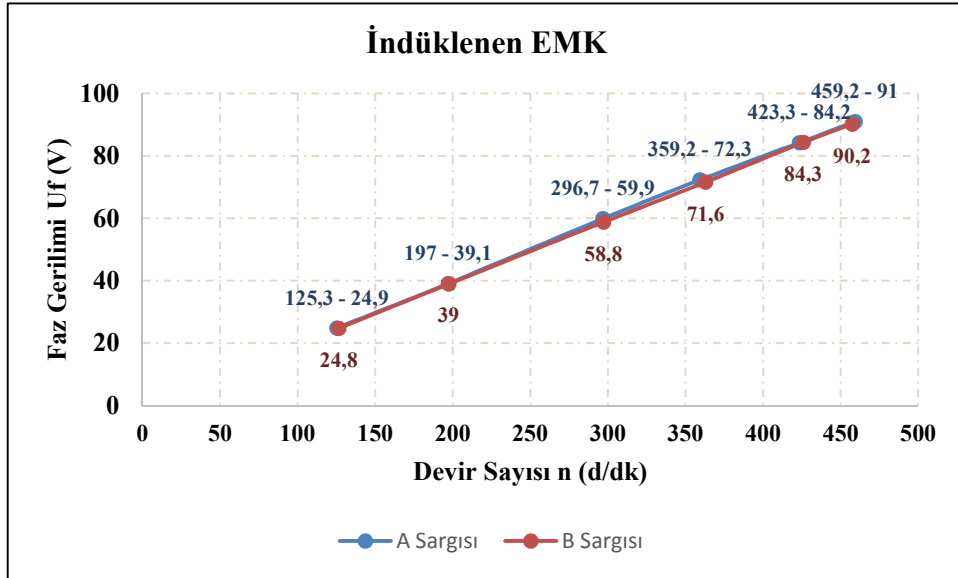
Çizelge 5.2’de verilen değerlere göre devir sayısı ile faz gerilimi arasındaki ilişki şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8 : “B” Sargısı 2P=12 Kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.

5.1.4 “A” ve “B” sargısının karşılaştırılması

Birinci ve ikinci sargılar için şekil 5.7-8 gösterilen değerler şekil 5.9’da birlikte verilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde elde edilen değerler ile aynı ölçekte çizilen şekil 5.9’da her iki sargı için farkın sadece iki noktada çok küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her iki sargının özdeş olduğu alınan deneysel sonuçlarla da ispat edilmiştir.



Şekil 5.9 : “A” ve “B” sargısının EASM devir (n, d/dk) – gerilim (U_f , V) karakteristiği.

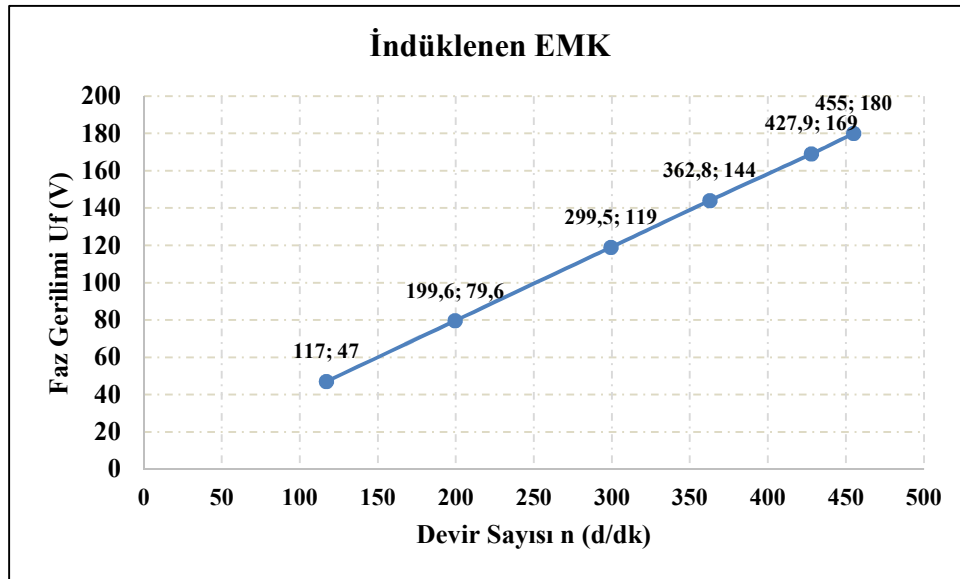
5.1.5 Seri bağılı durumda boş çalışma

VEDS için tasarlanan EASM makine yapısındaki seri sargı değerleri çizelge 5.3’de verilmiştir. Seri sargı “A” ve “B” sargısının bağlantısı ile elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 : Seri sargının 2P=12 EASM makine boş çalışma değerleri.

Devir sayısı n (d/dk)	Frekans (Hz)	Gerilim (Uf)	% Thd	% Thd ₃	% Thd ₅
117	11,7	47	20,18	8,6	18,5
199,6	19,96	79,6	20,19	8,5	18,7
299,5	29,95	119	20,07	8,6	18,5
362,8	36,28	144	19,96	8,3	17,9
427,9	42,79	169	19,52	8,2	18,1
455	45,5	180	19,62	8,5	18

Çizelge 5.3’de verilen değerlere göre devir sayısı ile faz gerilimi arasındaki ilişki şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10 : Seri sargının 2P=12 kutuplu EASM devir (n, d/dk) – gerilim (Uf, V) karakteristiği.

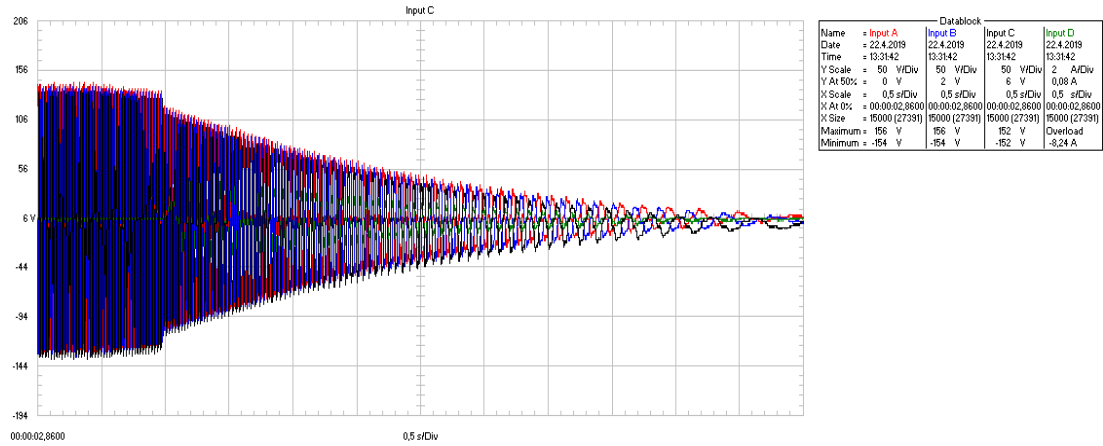
5.2 Rejeneratif Modda Çalışma (Yüklü Çalışma)

VEDS için tasarlanan EASM yapısındaki makine sargıları A ve B sargılarından oluşmaktadır. Bununla birlikte düşük hızlarda yapılan deneyler olduğu için diğer A, B sargısı rejeneratif modda çalıştırılarak daha fazla veri toplanmıştır. Dolayısıyla bobinli fırlatıcının sargı yapısına göre de istenilen bobin yapısı tercih edilebilir.

5.2.1 “A” sargısı yüklü çalışma

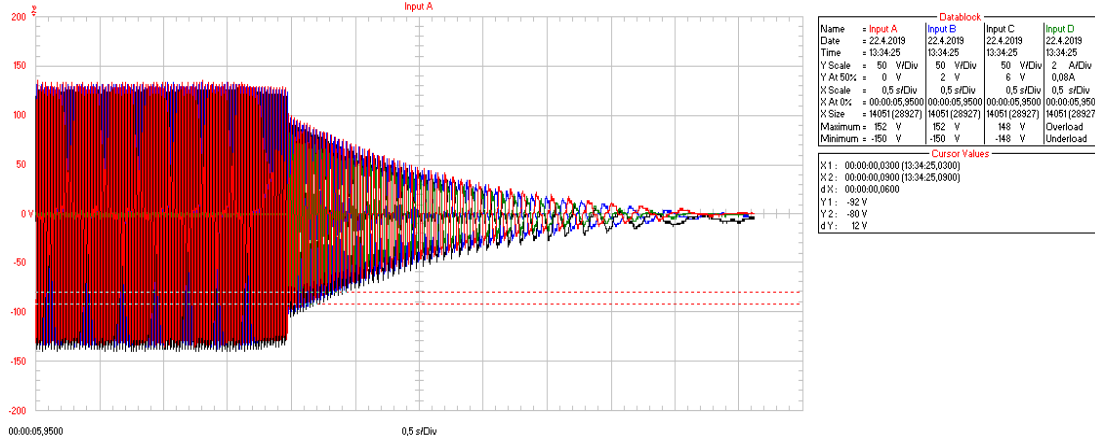
Tasarlanan VEDS’de motor sargısı da rejeneratif modda enerjinin geri kazanılarak bobinli fırlatıcıyı beslemesi için çalıştırılmıştır. Alınan değerler bobinli fırlatıcının bir yük gibi davranması düşünülerek çıkışa bağlanan 6 kademeli bir sistem ile ölçülmüştür. Bunun için fluke 190 serisi osilaskobun kayıt modu kullanılmıştır. Çünkü alınan değerler 1-2sn gibi kısa sürede elde edildiği için osilaskop üzerinden akım ve gerilim değerlerinin kayıt edilmesi uygundur. Ayrıca üretilen enerji 45,92 Hz frekansında volanın 460 d/dk ile dönmesi sonucu elde edilmiştir.

Şekil 5.11’de A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 1 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 4.5sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir.



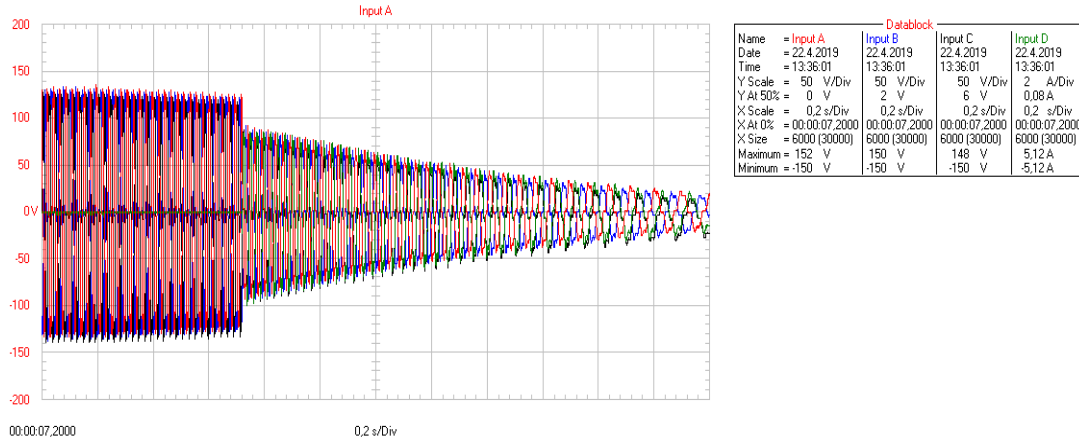
Şekil 5.11 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. Kademe.

Şekil 5.12’de A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 1 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 3 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 1.5sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



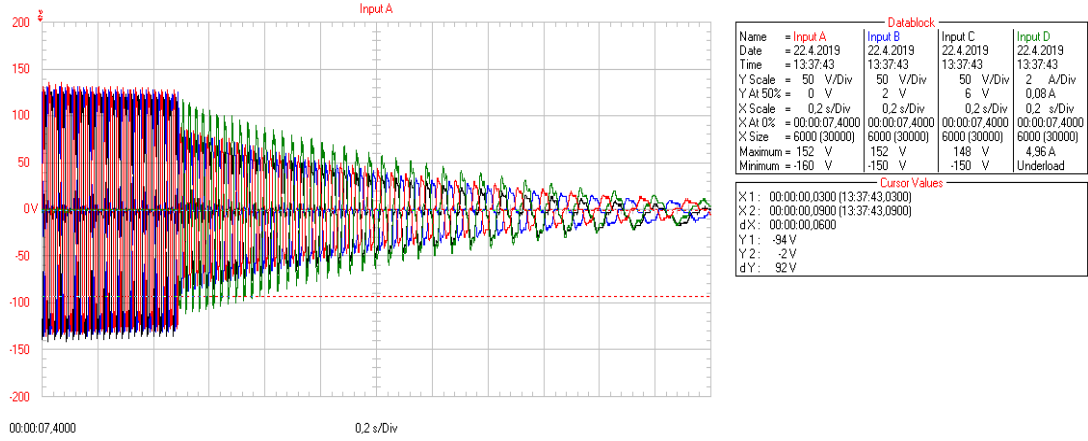
Şekil 5.12 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_F - I_f değerleri 2. Kademe.

Şekil 5.13’de A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.5 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1.7 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 1.3sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



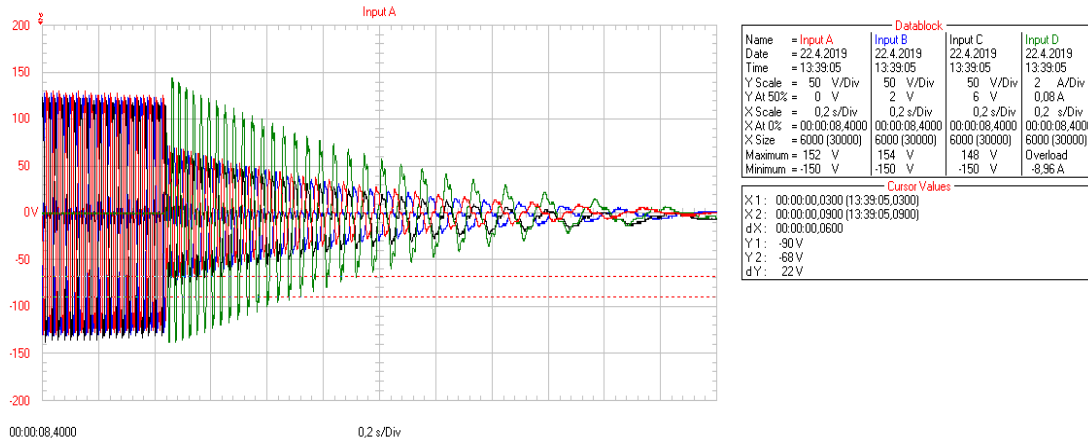
Şekil 5.13 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_F - I_f değerleri 3. Kademe.

Şekil 5.14’de A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.5 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1.5 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



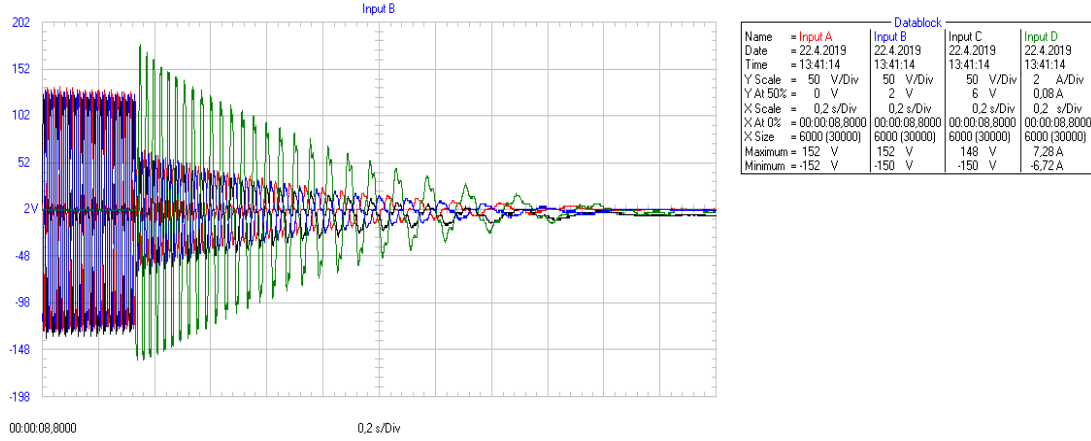
Şekil 5.14 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. Kademe.

Şekil 5.15’de A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.5 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1.2 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir. Bununla birlikte yavaşlama zamanı 0.3 sn azalmıştır.



Şekil 5.15 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. Kademe.

Şekil 5.16’da A sargısının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.5 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1.0 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir. VEDS’den çekilen akımın maksimum değeri 7,28 A’dır. Bununla birlikte yavaşlama zamanı 0.3 sn azalmıştır.



Şekil 5.16 : VEDS “A” Sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. Kademe.

Her bir kademe için alınan değerlerde volanın yaklaşık yarı hızına 0,5sn ve çeyrek hızına 0,25sn indiğindeki ortalama akım ve gerilim değerleri hesaplanarak volandan yarım saniyede ve çeyrek saniyede her kademede alınan enerjiler hesaplanmıştır. Hesaplamalar için şekil 5.12-16’da verilen grafiklerin excel deki verileri göz önünde tutulmuştur.

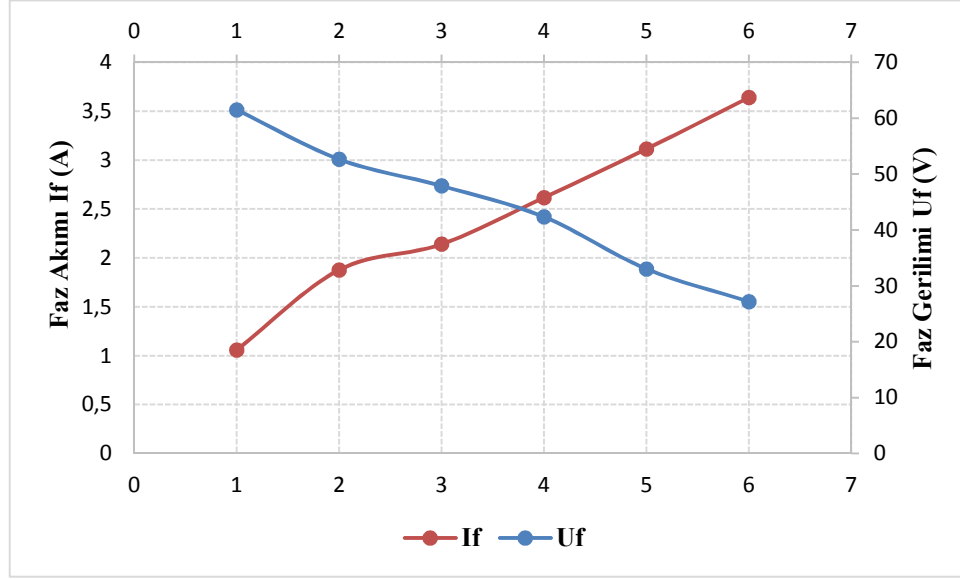
Çizelge 5.4’de VEDS’nin yük kademesinin devreye girmesinden itibaren 0,5 sn’deki değerlerinin hesap sonuçları verilmiştir. Gerilim ve akım değerleri şekil 5.12-16’dan görüldüğü üzere zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu yüzden bu değerlerin hesaplanmasında ortalama değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.4’de 0,5sn’deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değerlerin 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. VEDS’den elde edilecek enerji ise 3 fazlı sistemin enerji olarak hesaplanmıştır. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS’nin akımı artarken gerilimi düşmektedir.

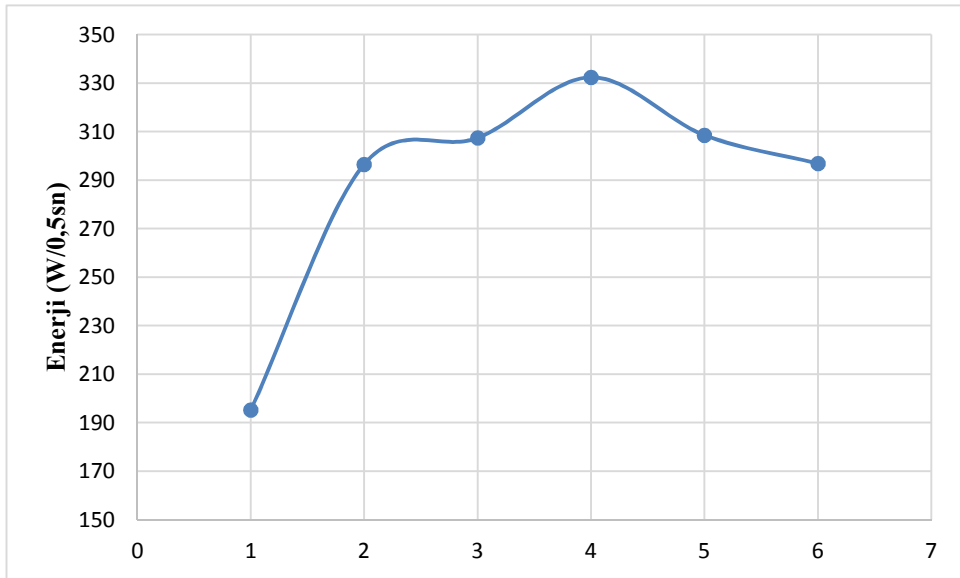
Çizelge 5.4 : VEDS’de 0,5sn’de alınan elektriksel değerler.

Kademe	Ort. Gerilim U_f (V)	Ort. Akım I_f (A)	Enerji (Joule)
1	61,49190624	1,058452672	195,2588174
2	52,64540288	1,877491738	296,5239268
3	47,87383568	2,140363328	307,4022068
4	42,3309984	2,61769776	332,4292791
5	33,02422096	3,114154003	308,5275297
6	27,1810504	3,640536947	296,8608547

Çizelge 5.4'deki değerler kullanılarak şekil 5.17 elde edilmiştir. Şekil 5.17.a'da VEDS'de A sargısından elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.17.b'de ise A sargısından 0,5sn'de el edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.17'den görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve en yüksek enerji alınan nokta ise 4. Kademenin olduğu noktadadır. 4. Kademe 0,5sn boyunca toplam 332 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

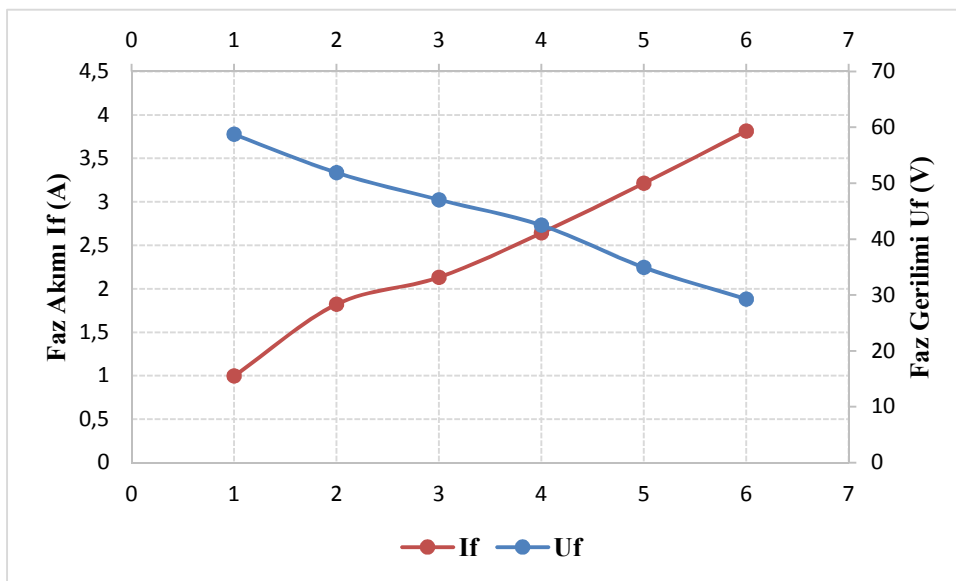
Şekil 5.17 : VEDS 0,5sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

Çizelge 5.5’de 0,25sn’deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değer 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS’nin akımı artarken gerilimi düşmektedir. Saniyenin çeyrek bölümünde de yarım saniyede olduğu gibi yaklaşık en yüksek enerji miktarı 336 Joule (Wsn) değerinde olmuştur.

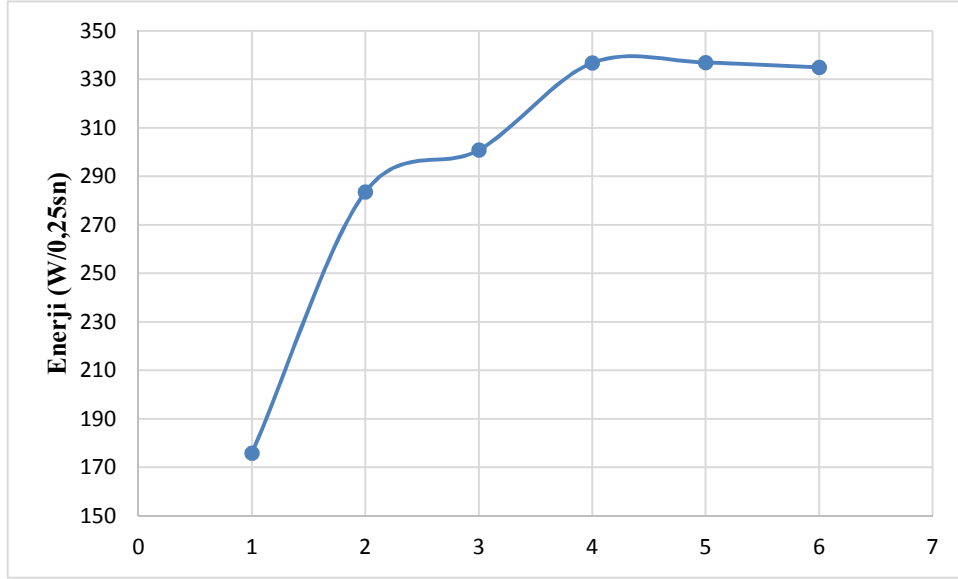
Çizelge 5.5 : VEDS’de 0,25sn’de alınan elektriksel değerler.

Kademe	Ort. Gerilim Uf (V)	Ort. Akım If (A)	Enerji (Joule)
1	58,7392	0,997632	175,8003167
2	51,8848	1,821312	283,4952266
3	47,04	2,131584	300,8091341
4	42,4768	2,642304	336,7098556
5	34,9408	3,213952	336,8941621
6	29,2544	3,815424	334,8538196

Çizelge 5.5’deki değerler kullanılarak şekil 5.18 elde edilmiştir. Şekil 5.18.a’da VEDS’de A sargısından elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.18.b’de ise A sargısından 0,25sn’de elde edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.18’den görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve en yüksek enerji alınan nokta ise yine 4. Kademenin olduğu noktadadır. 4. Kademe 0,25sn boyunca toplam 336 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

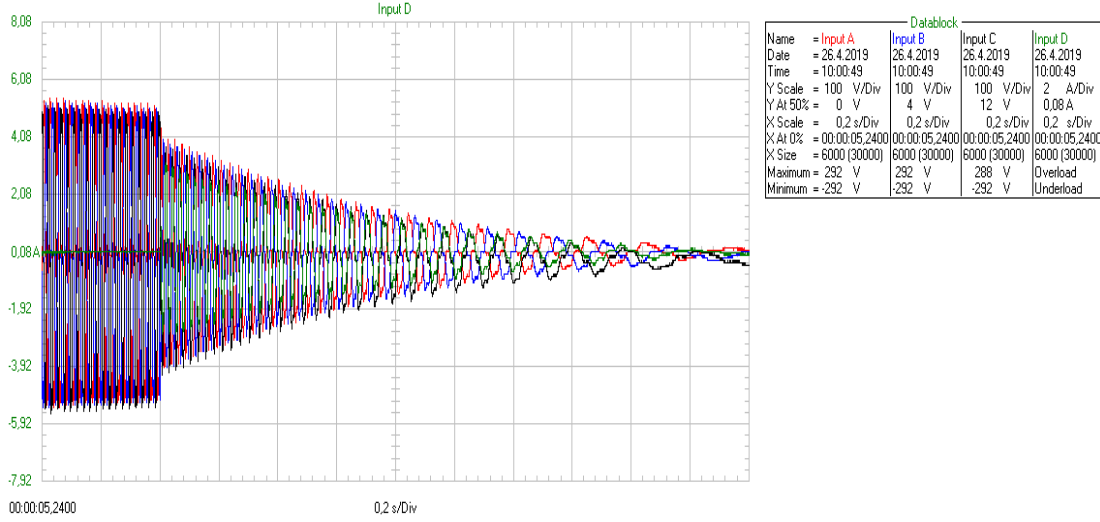
Şekil 5.18 : VEDS 0,25sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

Sonuç olarak VEDS'den 0,5 sn boyunca alınan enerji miktarı yaklaşık 332 Joule (Wsn) oda yaklaşık 165 joule enerjiye karşılık gelmektedir. 0,25 sn'de ise maksimum 336 Joule (Wsn) oda 84 joule enerjiye karşılık gelmektedir. VEDS'de zaman kısaldıkça alınabilen toplam enerji azalmaktadır. Bununla birlikte istenilen sürede aktarılan enerji de artmaktadır.

5.2.2 Seri sargı yüklü çalışma

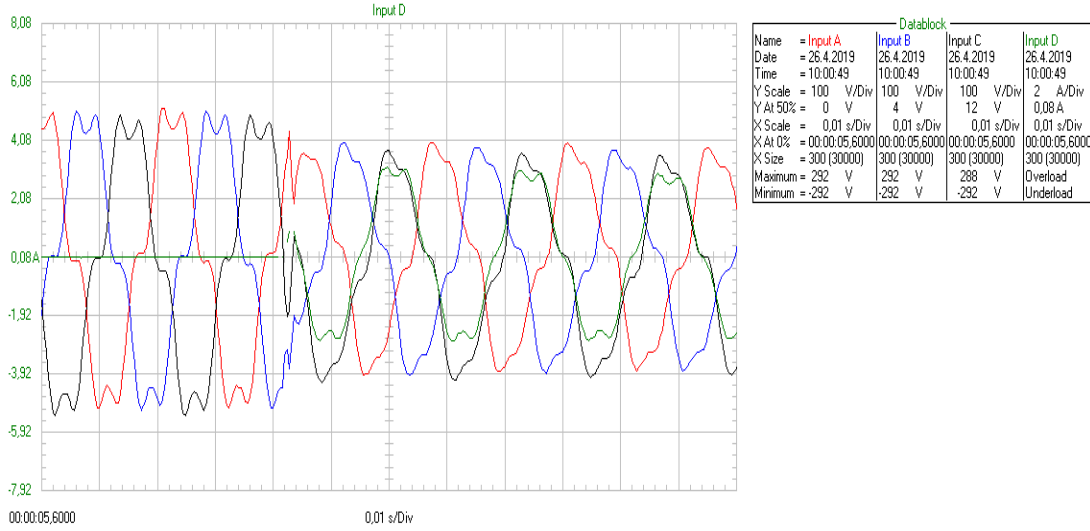
Tasarlanan VEDS'de 2 adet motor sargısı vardır. Bu sargılar kendi aralarında seri bağlanarak hem motor modda volanın kalkınması sağlanmış hem de rejeneratif modda çalıştırılarak farklı sargı değerleri için çıkış akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir.

Şekil 5.19'da Seri bağlı sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0,5 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1.8sn'de 460d/dk'dan durma noktasına gelmiştir.



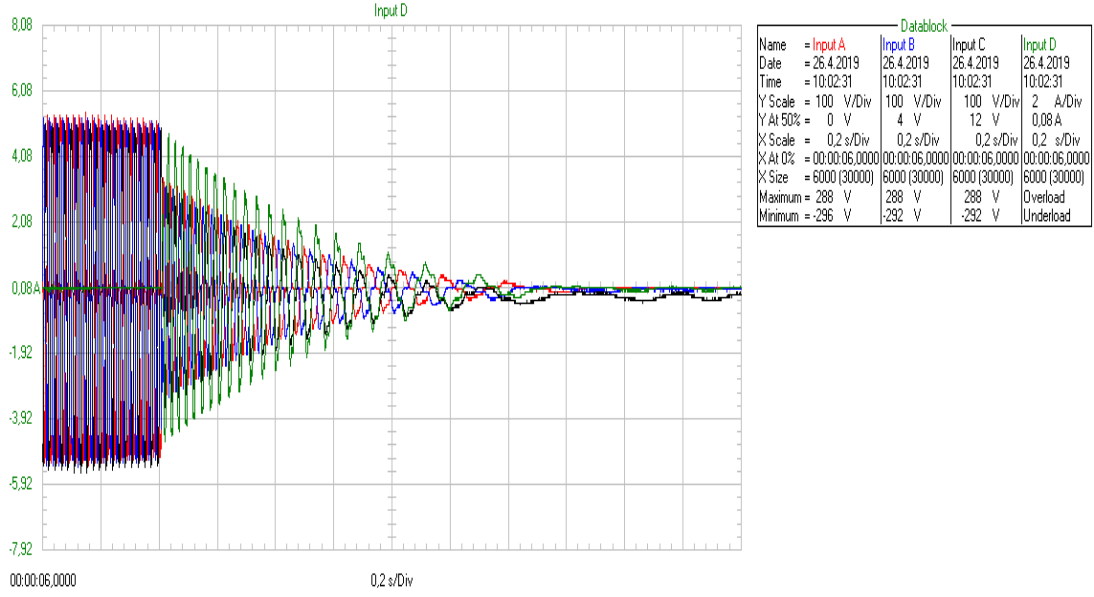
Şekil 5.19 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. Kademe.

Şekil 5.20’de ise seri bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 3 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 150 V değerindedir.



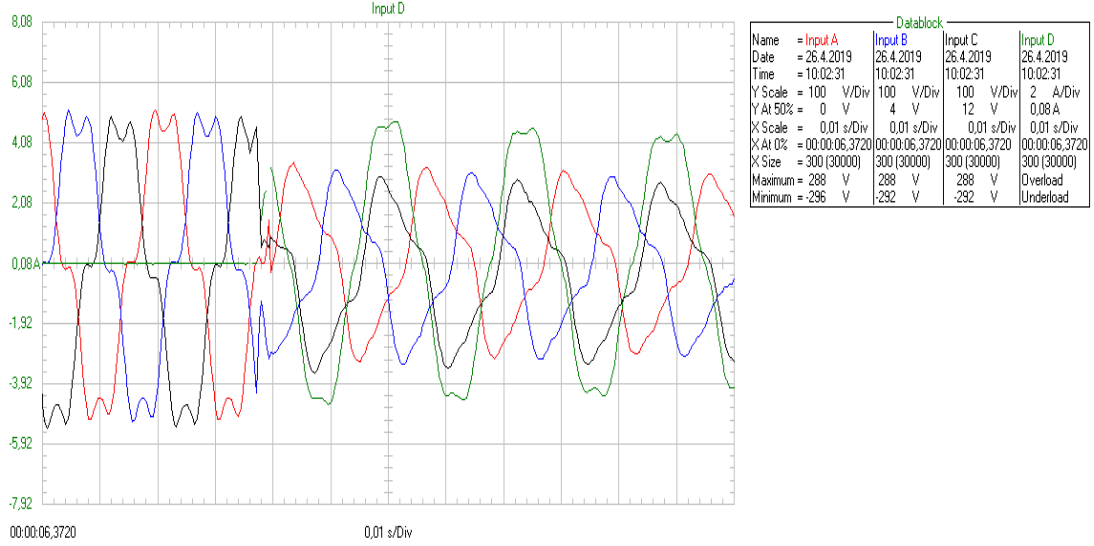
Şekil 5.20 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 1. Kademe.

Şekil 5.21’de A+B seri sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0,4 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1,2 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 0,6sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



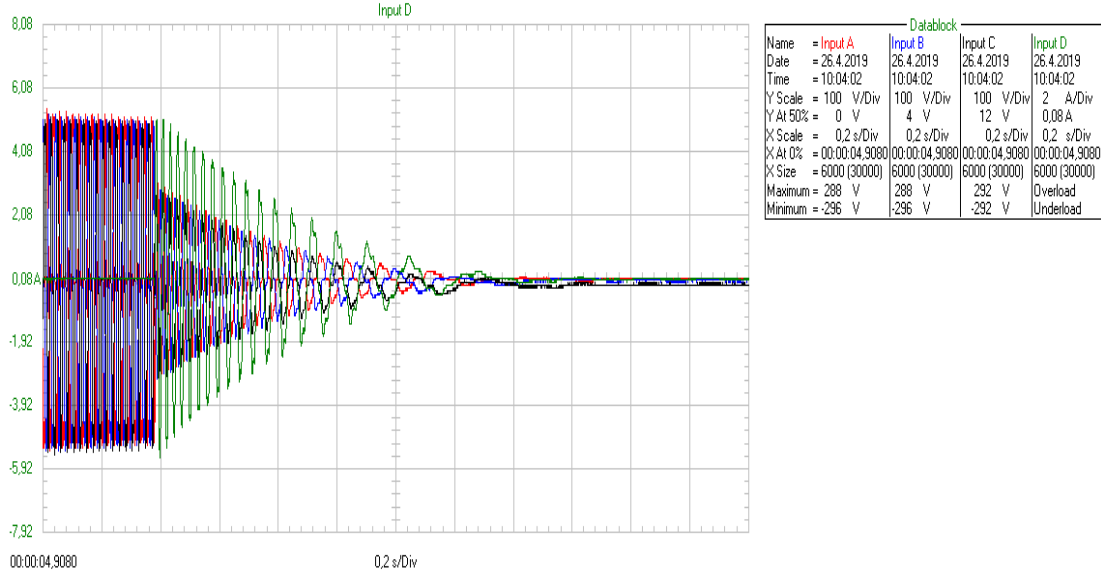
Şekil 5.21 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 2. Kademe.

Şekil 5.22’de ise seri bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 4,8 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 150 V değerindedir.



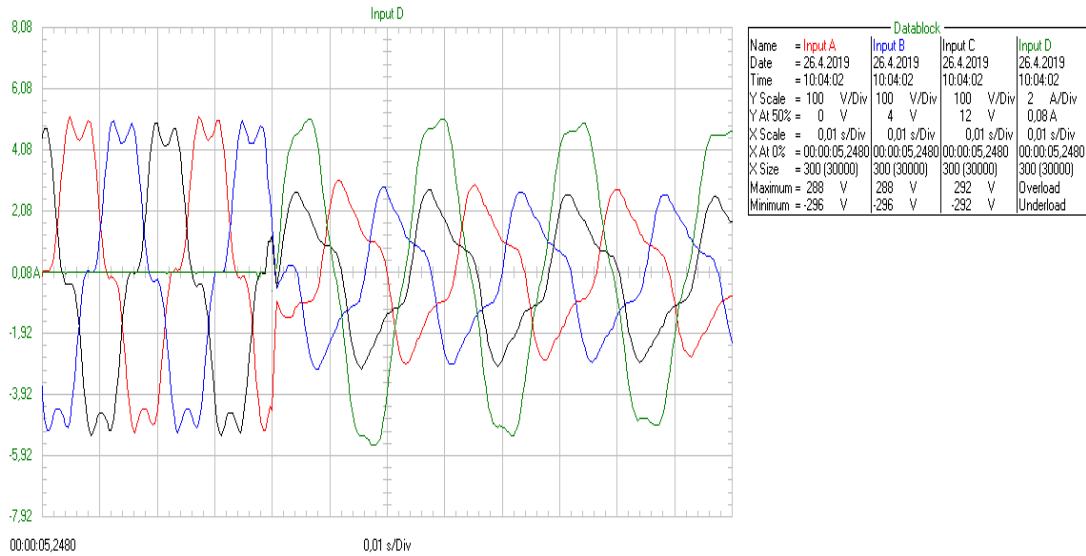
Şekil 5.22 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 2. Kademe.

Şekil 5.23’de A+B seri sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.4 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 0,2 sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



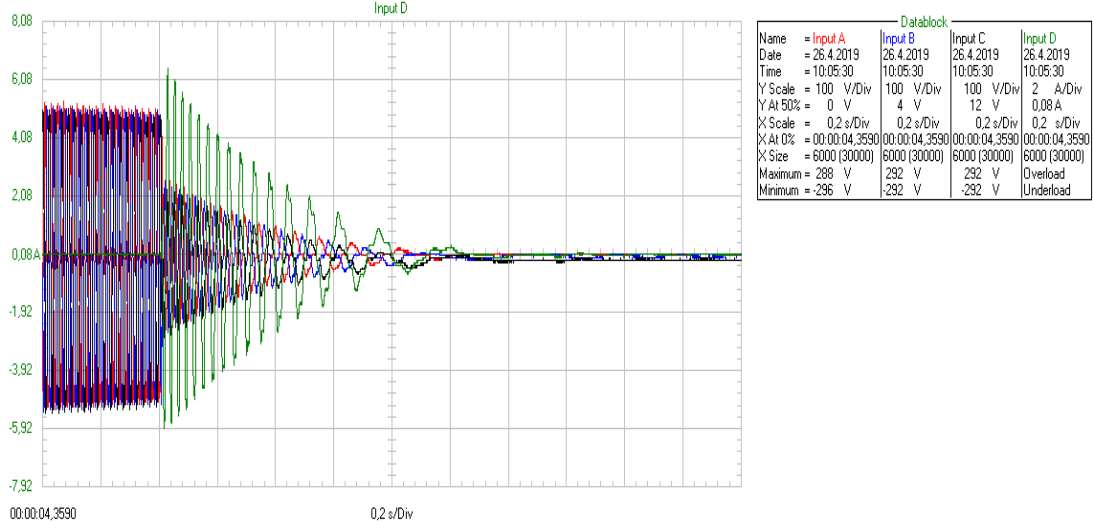
Şekil 5.23 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 3. Kademe.

Şekil 5.24’de ise seri bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 5,3 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 140 V değerindedir.



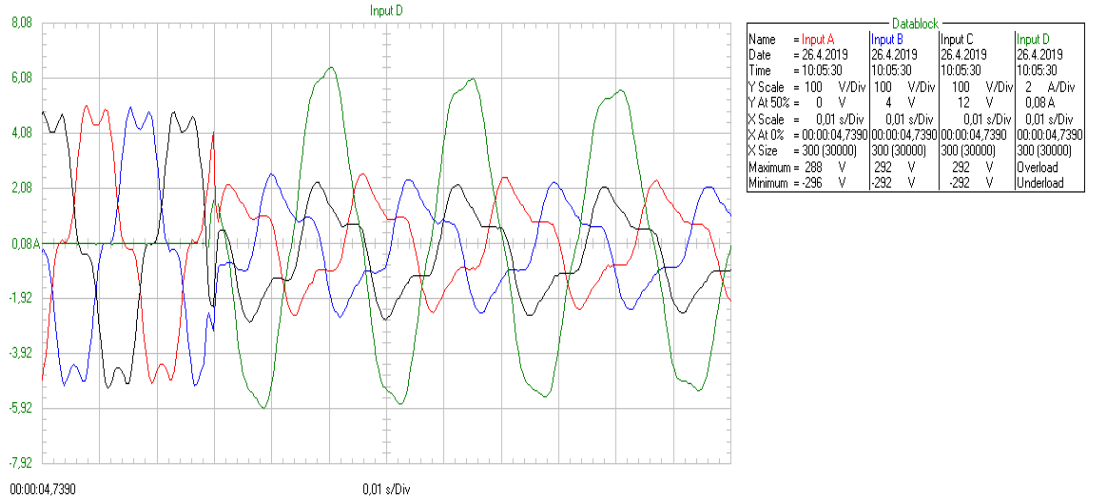
Şekil 5.24 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 3. Kademe.

Şekil 5.25’de A+B seri sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.3 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 0,8 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



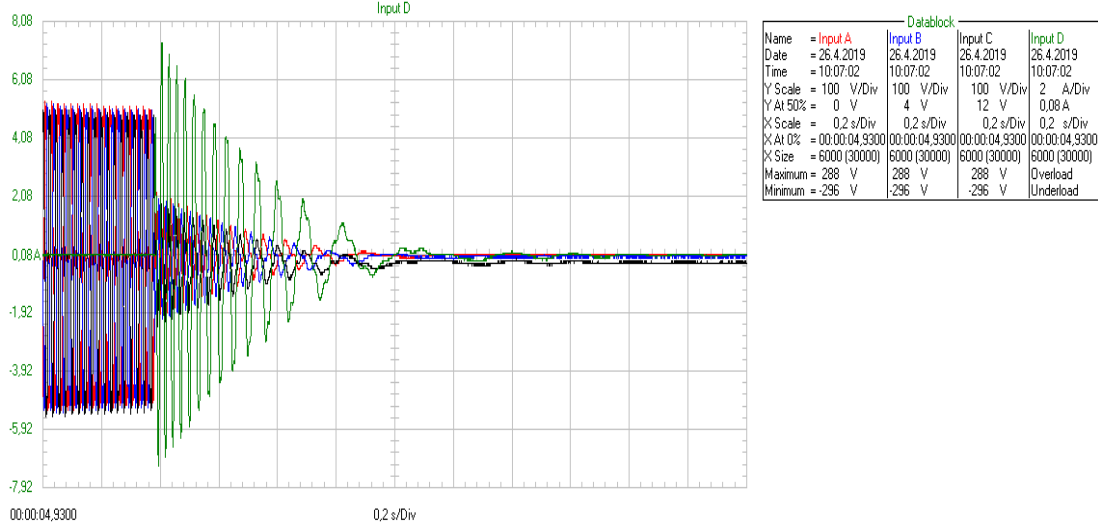
Şekil 5.25 : VEDES “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. Kademe.

Şekil 5.26’de seri bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 6,48 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 120 V değerindedir.



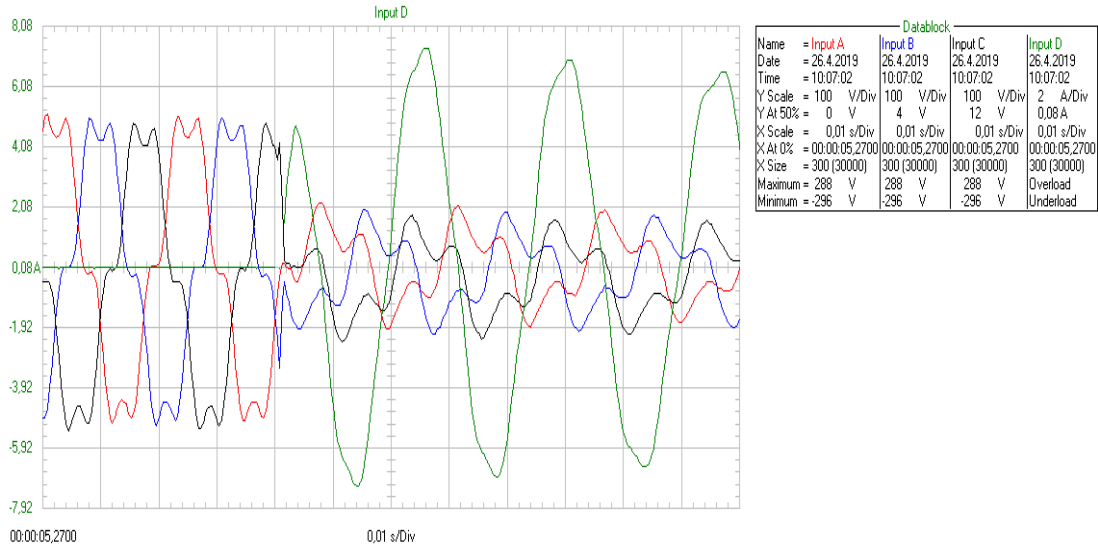
Şekil 5.26 : VEDES “A+B” Seri sargısının başlangıç durumdaki U_f - I_f değerleri 4. Kademe.

Şekil 5.27’de A+B seri sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.3 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 0,7 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir. Bununla birlikte yavaşlama zamanı 0.1 sn azalmıştır.



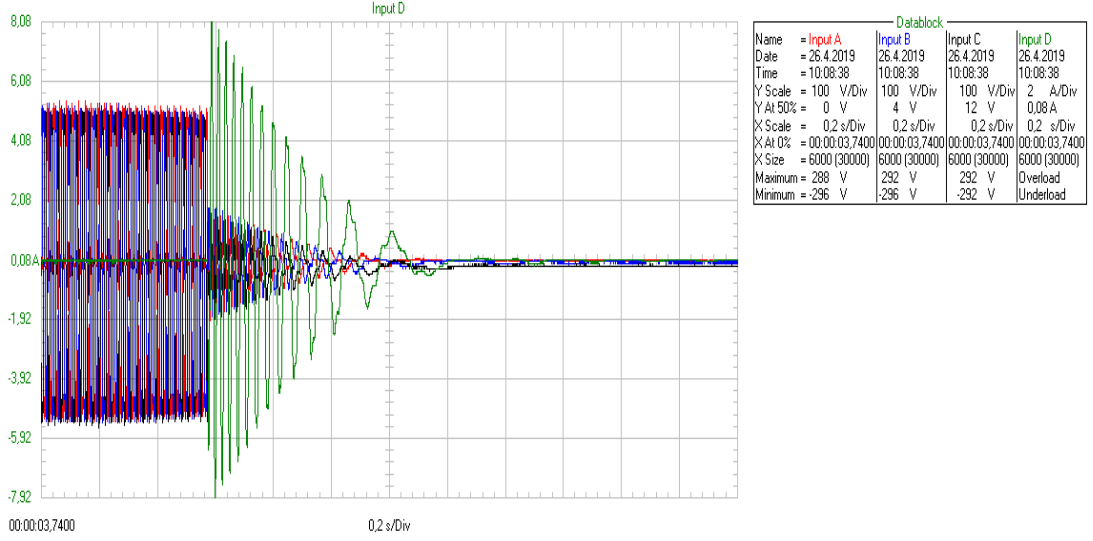
Şekil 5.27 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. Kademe.

Şekil 5.28’da seri bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 7,3 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 100 V değerindedir.



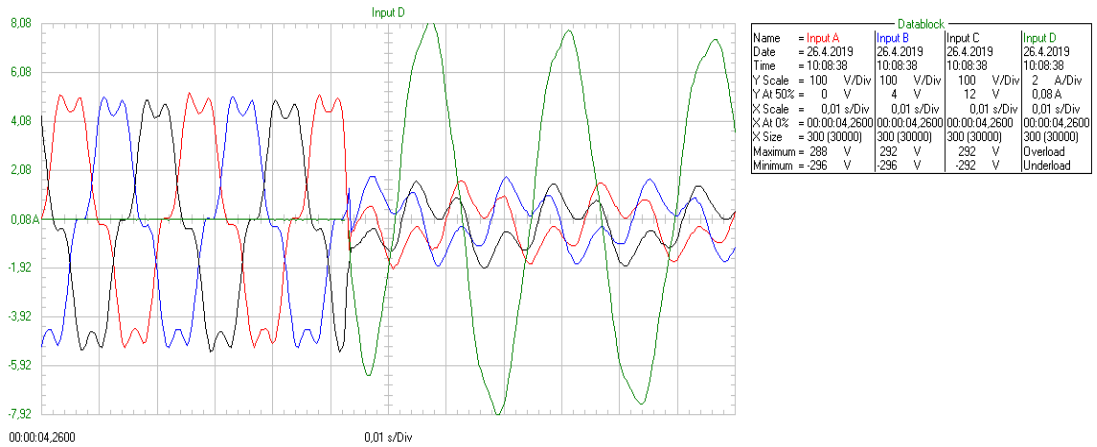
Şekil 5.28 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 5. Kademe.

Şekil 5.29’da A+B seri sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.3 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 0,6 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



Şekil 5.29 : VEDS “A+B” Seri sargısının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. Kademe.

Şekil 5.30’de seri bağlı sargısının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 8 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 90 V değerindedir.



Şekil 5.30 : VEDS “A+B” Seri sargısının başlangıç durumdaki U_f - I_f değerleri 6. Kademe.

Her bir kademe için alınan değerlerde volanın rejeneratif modun ilk 0,5sn’si ve 0,25sn’si için ortalama akım ve gerilim değerleri hesaplanarak volandan yarım saniyede ve çeyrek saniyede her kademedeki alınan enerjiler hesaplanmıştır. Hesaplamalar için şekil 5.20-30’da verilen grafiklerin excel deki verileri göz önünde tutulmuştur.

Çizelge 5.6’da VEDS’nin yük kademesinin devreye girmesinden itibaren 0,5 sn’deki değerlerinin hesap sonuçları verilmiştir. Gerilim ve akım değerleri şekil 5.20-31’den

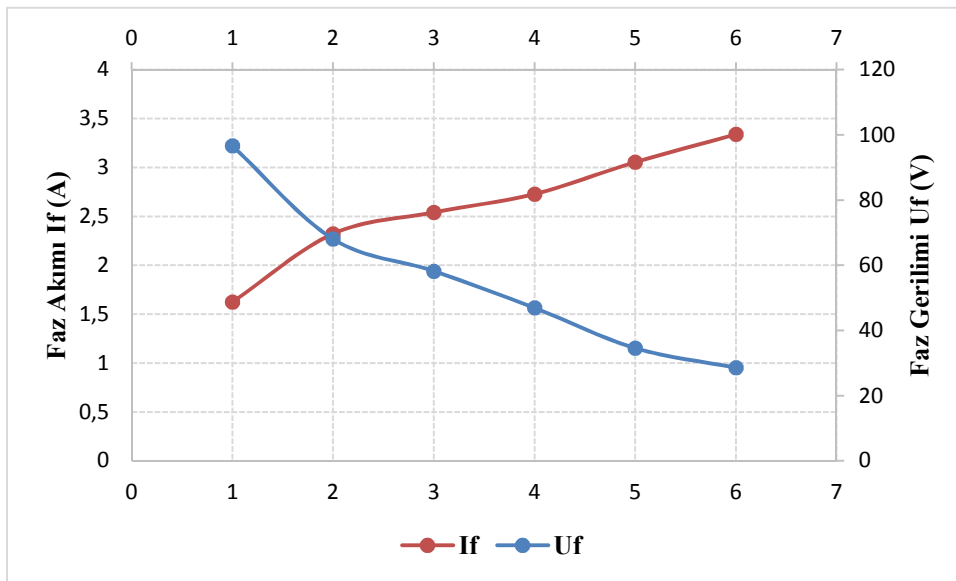
görüldüğü üzere zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu yüzden bu değerlerin hesaplanmasında ortalama değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.6'da 0,5sn'deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değerlerin 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. VEDS'den elde edilecek enerji ise 3 fazlı sistemin enerjisi olarak hesaplanmıştır. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS'nin akımı artarken gerilimi düşmektedir.

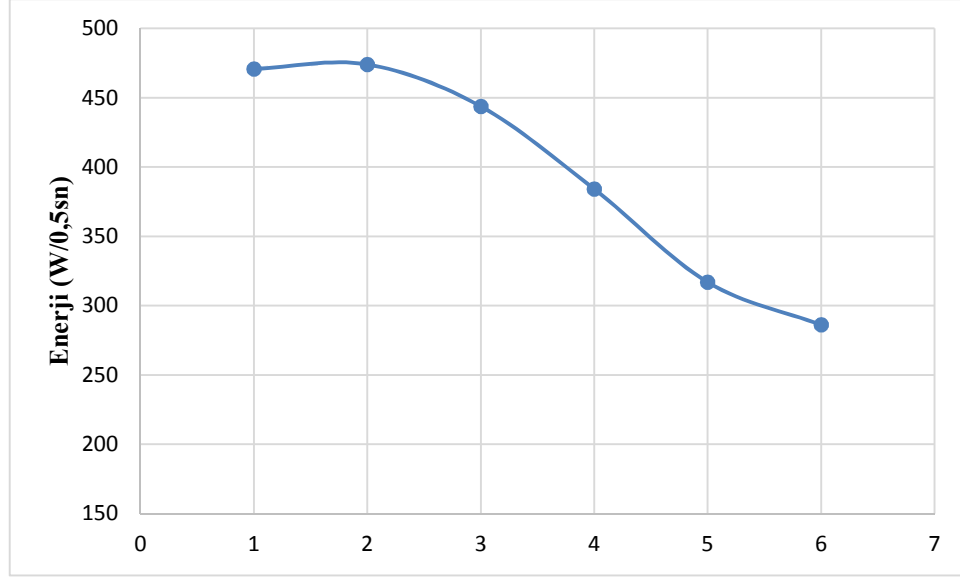
Çizelge 5.6 : VEDS'de 0,5sn'de alınan elektriksel değerler.

Kademe	Ort. Gerilim Uf (V)	Ort. Akım If (A)	Enerji (Joule)
1	96,61846016	1,624358765	470,8291278
2	68,05303328	2,321913907	474,0398532
3	58,21489696	2,540855091	443,746852
4	46,93018496	2,728305709	384,1196746
5	34,58986368	3,053731923	316,8845128
6	28,56542688	3,338355462	286,0846466

Çizelge 5.6'daki değerler kullanılarak şekil 5.31 elde edilmiştir. Şekil 5.31.a'da VEDS'de A+B sargısından elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.31.b'de ise A+B sargısından 0,5sn'de el edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.31'den görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve en yüksek enerji alınan nokta ise 2. Kademenin olduğu noktadır. 2. Kademede 0,5sn boyunca toplam 474 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

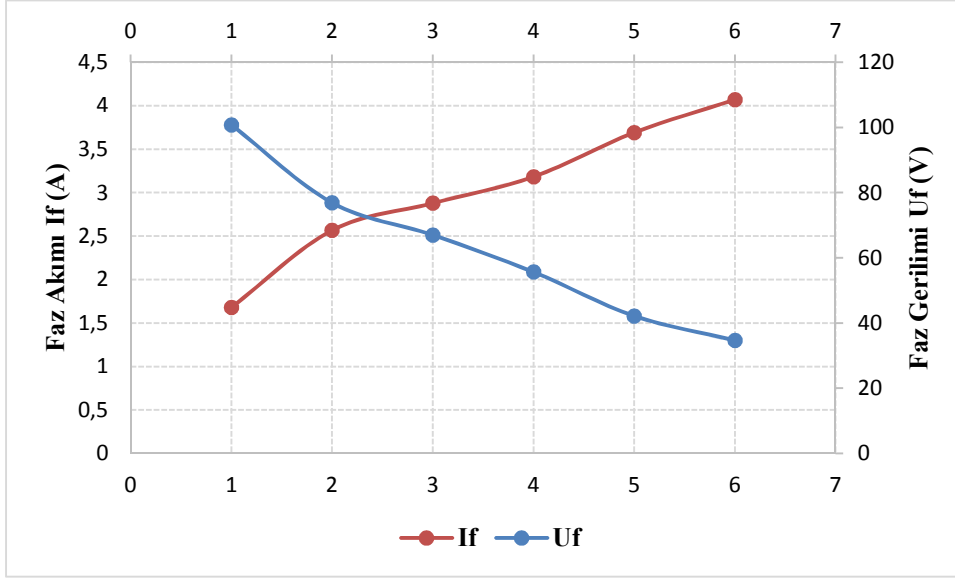
Şekil 5.31 : VEDS 0,5sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

Çizelge 5.7'de 0,25sn'deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değer 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS'nin akımı artarken gerilimi düşmektedir. Saniyenin çeyrek bölümünde de yarım saniyede olduğu gibi yaklaşık en yüksek enerji miktarı 592 Joule (Wsn) değerinde olmuştur.

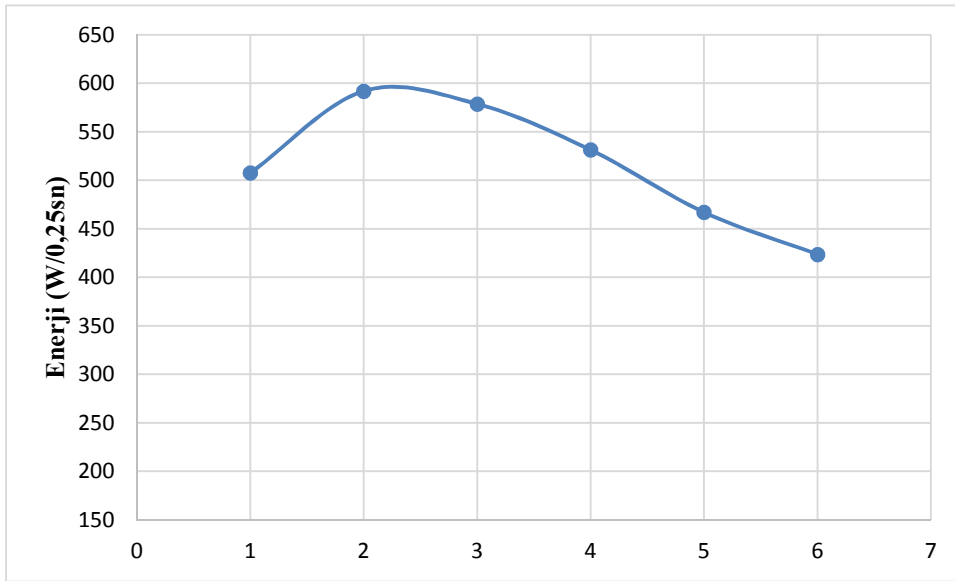
Çizelge 5.7 : VEDS'de 0,25sn'de alınan elektriksel değerler

Kademe	Ort. Gerilim U_f (V)	Ort. Akım I_f (A)	Enerji (Joule)
1	100,8	1,67872	507,644928
2	76,896	2,5664	592,0376832
3	67,0144	2,878464	578,6956136
4	55,648	3,182848	531,3573765
5	42,1824	3,690624	467,0381335
6	34,6944	4,070272	423,6469346

Çizelge 5.7'deki değerler kullanılarak şekil 5.32 elde edilmiştir. Şekil 5.32.a'da VEDS'de A+B sargısından elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.32.b'de ise A+B sargısından 0,25sn'de elde edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.33'den görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve en yüksek enerji alınan nokta ise yine 2. Kademenin olduğu noktadır. 2. Kademe 0,25sn boyunca toplam 592 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

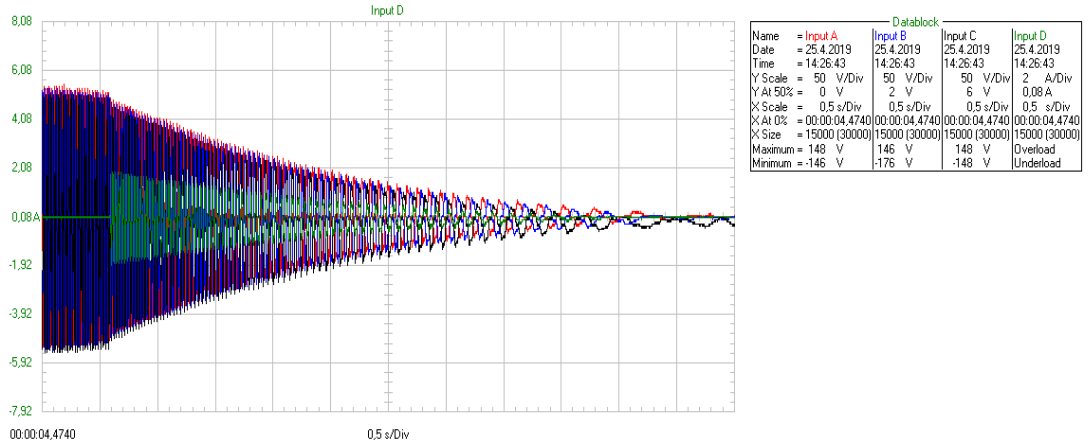
Şekil 5.32 : VEDS 0,25sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

Sonuç olarak VEDS'den 0,5 sn boyunca alınan enerji miktarı yaklaşık 474 Joule (Wsn) oda 237 joule enerjiye karşılık gelmektedir. 0,25 sn'de ise maksimum 592 Joule (Wsn) oda 148 joule enerjiye karşılık gelmektedir. VEDS'de zaman kısaldıkça alınabilen toplam enerji azalmaktadır. Bununla birlikte istenilen sürede aktarılan enerji de artmaktadır.

5.2.3 Paralel sargı yüklü çalışma

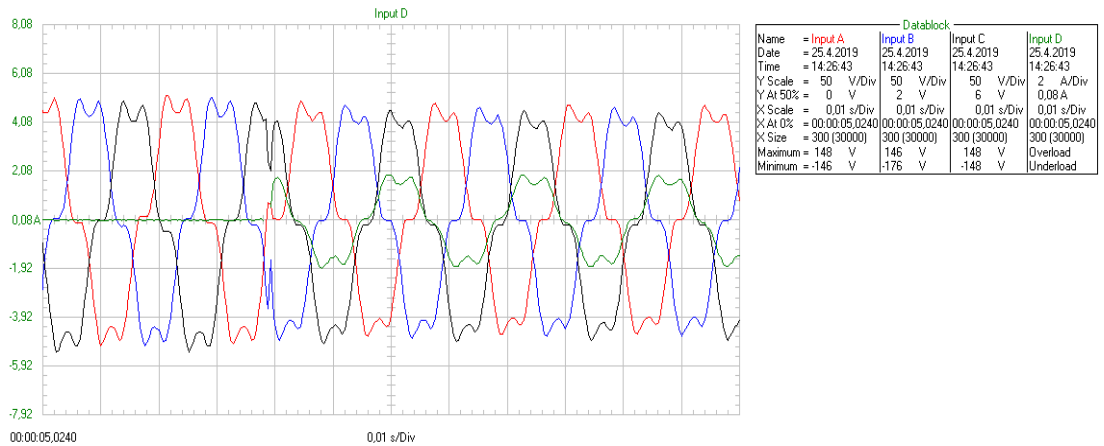
Tasarlanan VEDS’de 2 adet motor sargısı vardır. Bu sargılar kendi aralarında seri ve paralel bağlanarak motorun daha kolay yol almasını sağlamaktadır. Bununla birlikte paralel sargı da rejeneratif modda çalıştırılarak aynı gerilim altında daha yüksek akım vermesi sağlanmaktadır.

Şekil 5.33’de Paralel bağlı sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 1,5 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 4,5 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir.



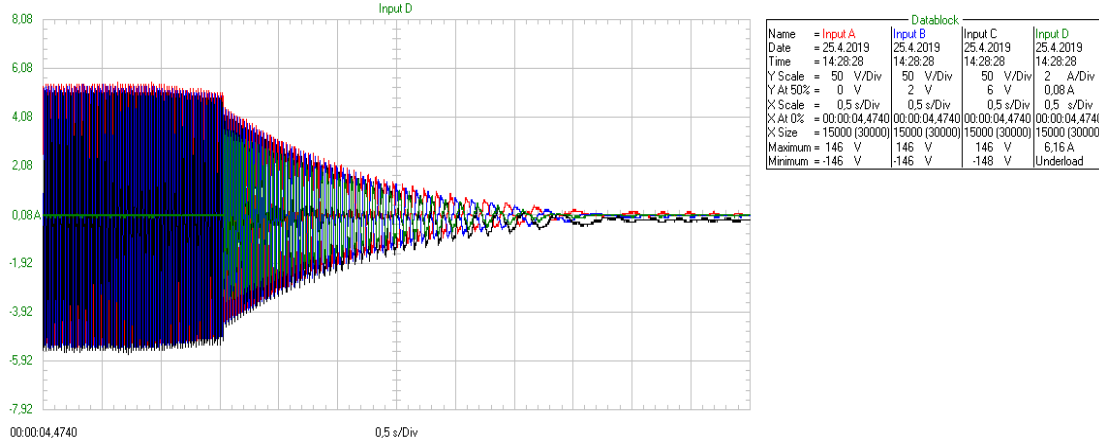
Şekil 5.33 : VEDS “A//B” Paralel sargının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 1. Kademe.

Şekil 5.34’de ise paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 2 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 120 V değerindedir.



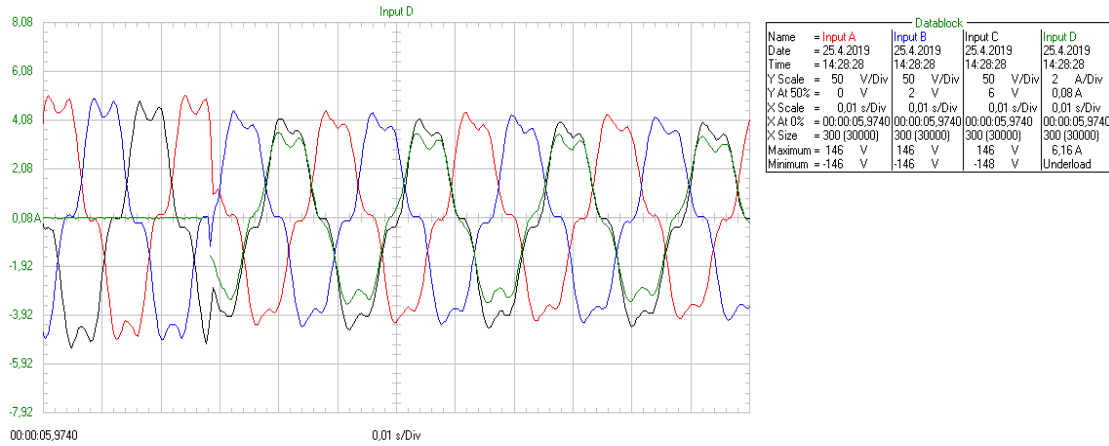
Şekil 5.34 : VEDS “A//B” Paralel sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 1. Kademe.

Şekil 5.35’de A//B paralel sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 1,25 saniye gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 3,5 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 1 sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



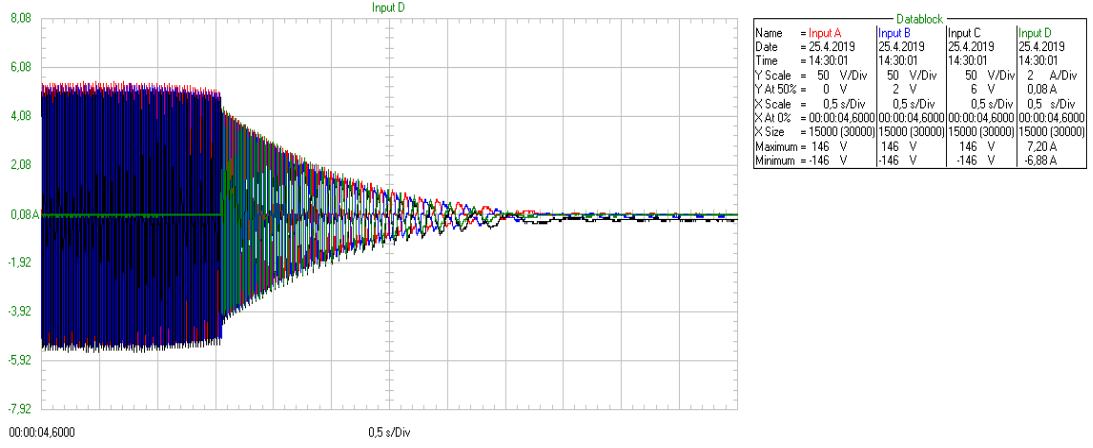
Şekil 5.35 : VEDS “A//B” Paralel sargının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 2. Kademe.

Şekil 5.36’da ise paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 3,68 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 100 V değerindedir.



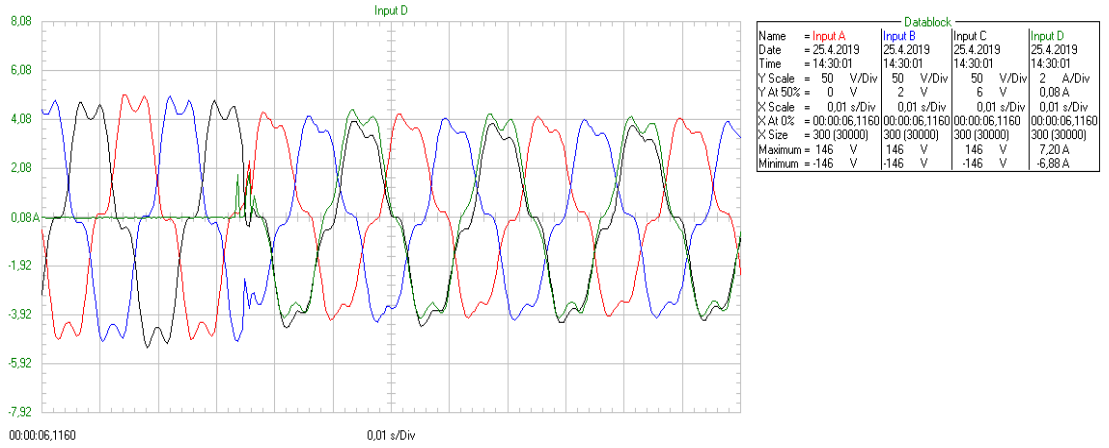
Şekil 5.36 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumdaki U_f - I_f değerleri 2. Kademe.

Şekil 5.37’de A//B paralel sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 1,5 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 2,5 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre 1 sn daha erken durma noktasına gelmiştir.



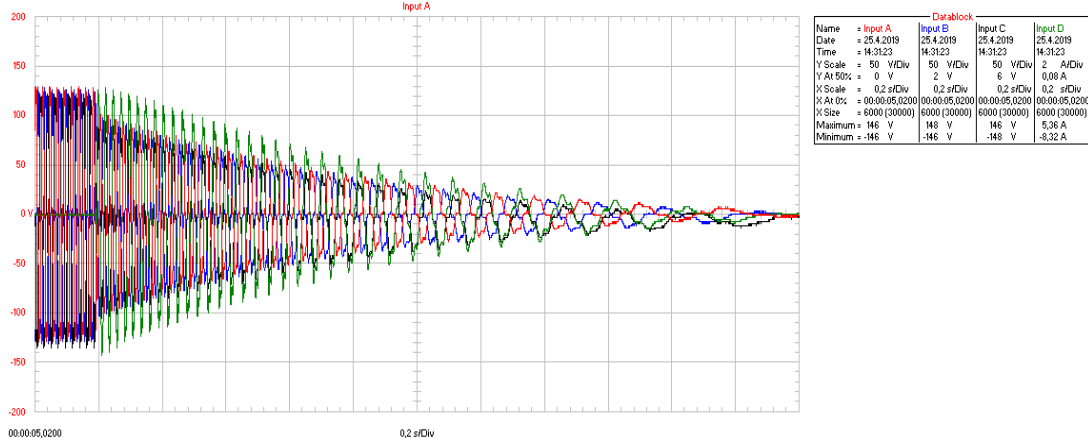
Şekil 5.37 : VEDS “A/B” Paralel sargının rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 3. Kademe.

Şekil 5.38’de ise paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 4,48 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 100 V değerindedir.



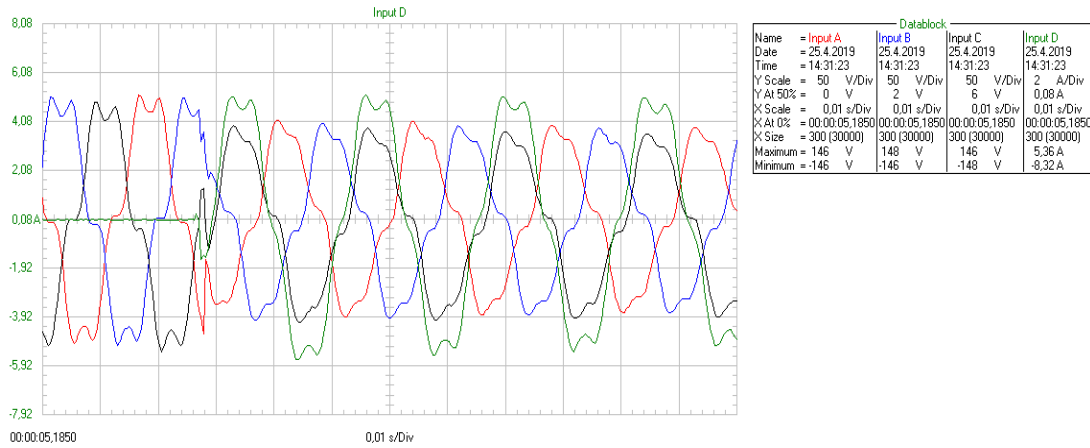
Şekil 5.38 : VEDS “A/B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 3. Kademe.

Şekil 5.39’da A//B paralel sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0,8 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1,6 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



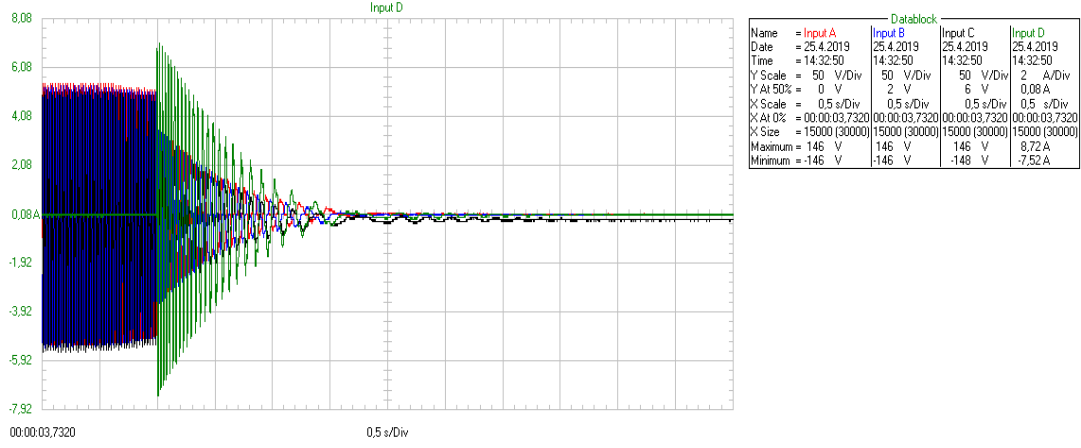
Şekil 5.39 : VEDS “A/B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 4. Kademe.

Şekil 5.40’da paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 5,28 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 100 V değerindedir.



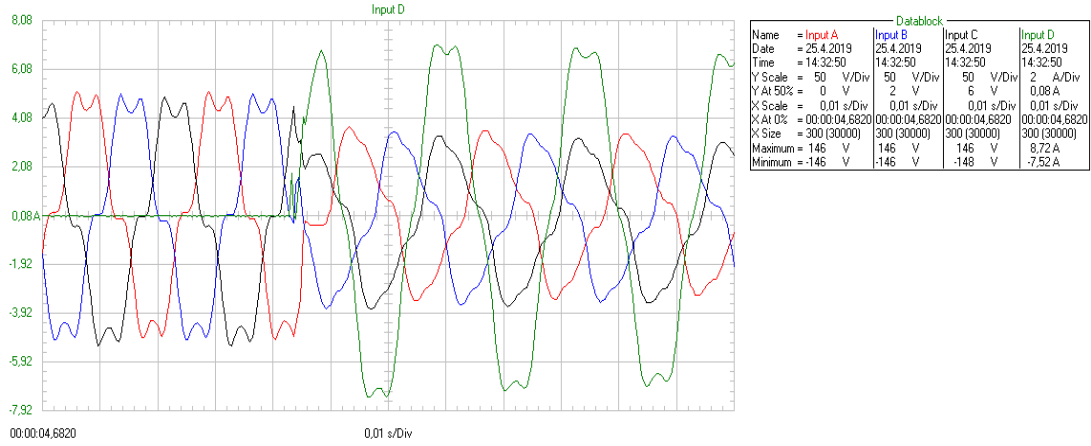
Şekil 5.40 : VEDS “A/B” Paralel sargısının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 4. Kademe.

Şekil 5.41’de A/B paralel sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.6 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 1,2 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



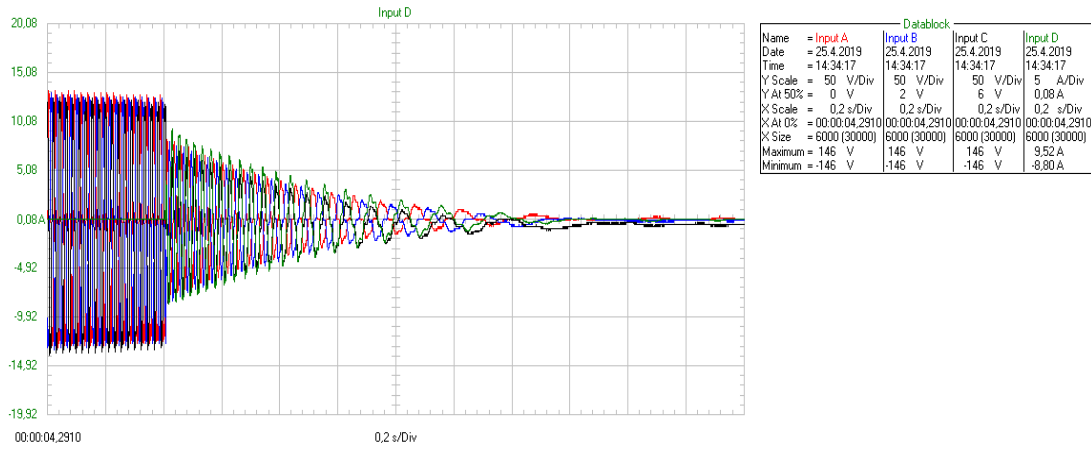
Şekil 5.41 : VEDS “A//B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 5. Kademe.

Şekil 5.42’de paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 6,88 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 90 V değerindedir.



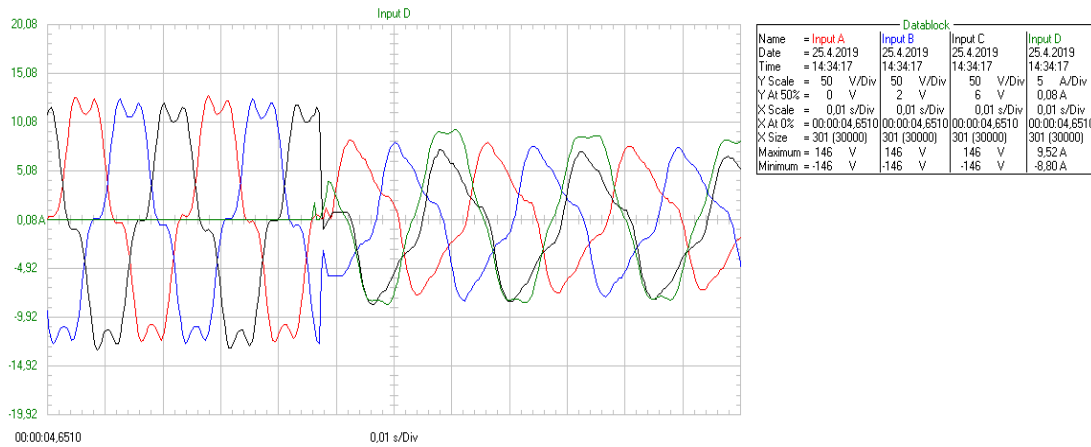
Şekil 5.42 : VEDS “A//B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 5. Kademe.

Şekil 5.43’de A//B paralel sargının rejeneratif modda faz akım ve gerilim değerleri verilmiştir. Volan yaklaşık 0.4 saniye (ölçüm ekranı 0,2 sn/Div kademesindedir) gibi bir sürede yarı hıza inmiştir. Toplamda ise 0,8 sn’de 460d/dk’dan durma noktasına gelmiştir. Bir önceki kademeye göre rejeneratif frenleme akımı (yeşil ile gösterilen grafik akım eğrisidir) yükselmiştir.



Şekil 5.43 : VEDS “A/B” Paralel sargısı rejeneratif mod U_f - I_f değerleri 6. Kademe.

Şekil 5.44’de paralel bağlı sargının rejeneratif modda ilk durumdaki akım gerilim eğrisinin değişimi verilmiştir. 0,01 s/Div kademesinde akımın maksimum değeri yaklaşık 9 A, gerilimin maksimum değeri ise yaklaşık 80 V değerindedir.



Şekil 5.44 : VEDS “A/B” Paralel sargının başlangıç durumundaki U_f - I_f değerleri 6. Kademe.

Her bir kademe için alınan değerlerde volanın rejeneratif modun ilk 0,5sn’si ve 0,25sn’si için ortalama akım ve gerilim değerleri hesaplanarak volandan yarım saniyede ve çeyrek saniyede her kademe alınacak enerjiler hesaplanmıştır. Hesaplamalar için şekil 5.34-45’de verilen grafiklerin excel deki verileri göz önünde tutulmuştur.

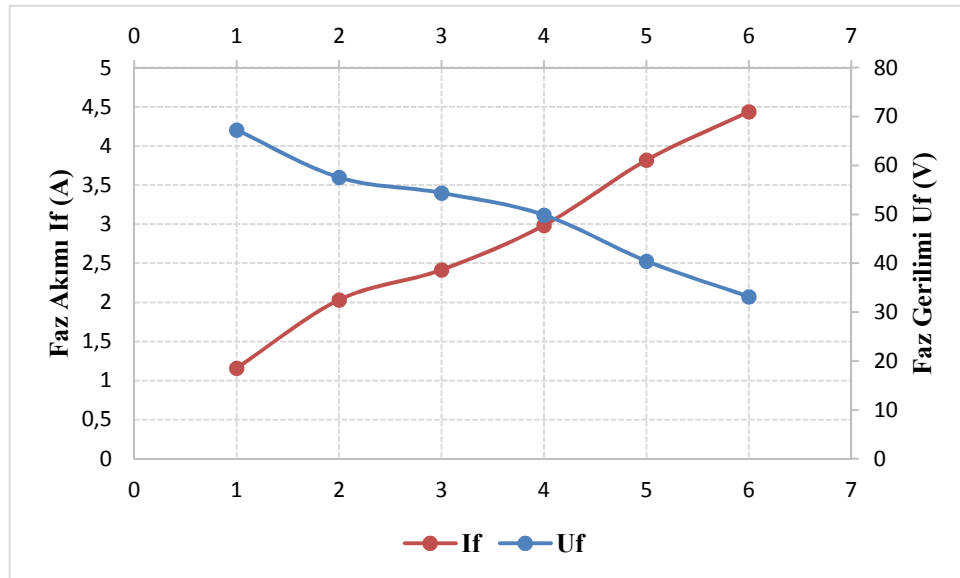
Çizelge 5.8’de VEDS’nin yük kademesinin devreye girmesinden itibaren 0,5 sn’deki değerlerinin hesap sonuçları verilmiştir. Gerilim ve akım değerleri şekil 5.34-45’den görüldüğü üzere zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu yüzden bu değerlerin hesaplanmasında ortalama değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.8'de 0,5sn'deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değer 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. VEDS'den elde edilecek enerji ise 3 fazlı sistemin enerjisi olarak hesaplanmıştır. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS'nin akımı artarken gerilimi düşmektedir.

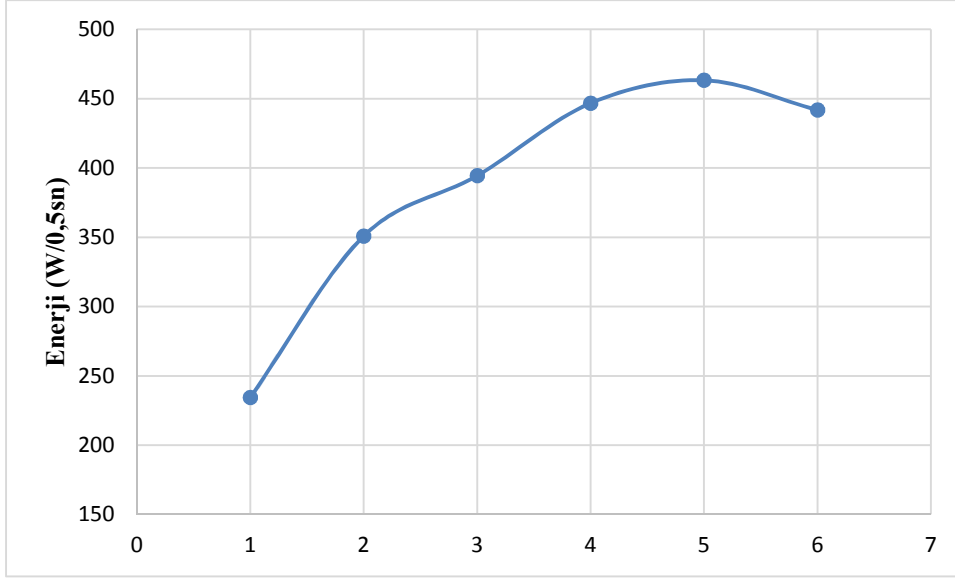
Çizelge 5.8 : VEDS'de 0,5sn'de alınan elektriksel değerler.

Kademe	Ort. Gerilim Uf (V)	Ort. Akım If (A)	Enerji (Joule)
1	67,2373352	1,161881056	234,3653581
2	57,55913968	2,031959008	350,8734371
3	54,39942032	2,4168832	394,4311352
4	49,87309568	2,986343533	446,8145902
5	40,4472512	3,817751354	463,2526441
6	33,17705328	4,439032506	441,8220538

Çizelge 5.8'deki değerler kullanılarak şekil 5.45 elde edilmiştir. Şekil 5.45.a'da VEDS'de paralel sargıdan elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.45.b'de ise paralel sargıdan 0,5sn'de el edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.45'den görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve en yüksek enerji alınan nokta ise 5. Kademenin olduğu noktadadır. 5. Kademe 0,5sn boyunca toplam 463 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.45 : VEDS 0,5sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

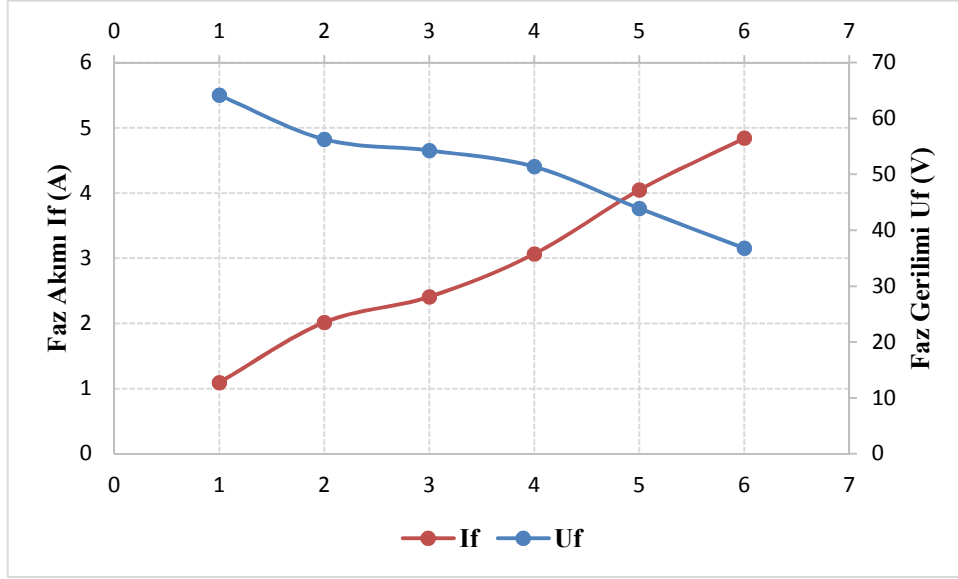
Çizelge 5.9'da 0,25sn'deki volanın yavaşlaması sonucunda alınan gerilimin ve akımın etkin değerleri ortalama değerlerin 1,1107 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Değerlerden görüldüğü üzere kademe sayısı arttıkça yüklenen VEDS'nin akımı artarken gerilimi düşmektedir. Saniyenin çeyrek bölümünde de yarım saniyede olduğu gibi yaklaşık en yüksek enerji miktarı 534 Joule (Wsn) değerinde olmuştur.

Çizelge 5.9 : VEDS'de 0,25sn'de alınan elektriksel değerler.

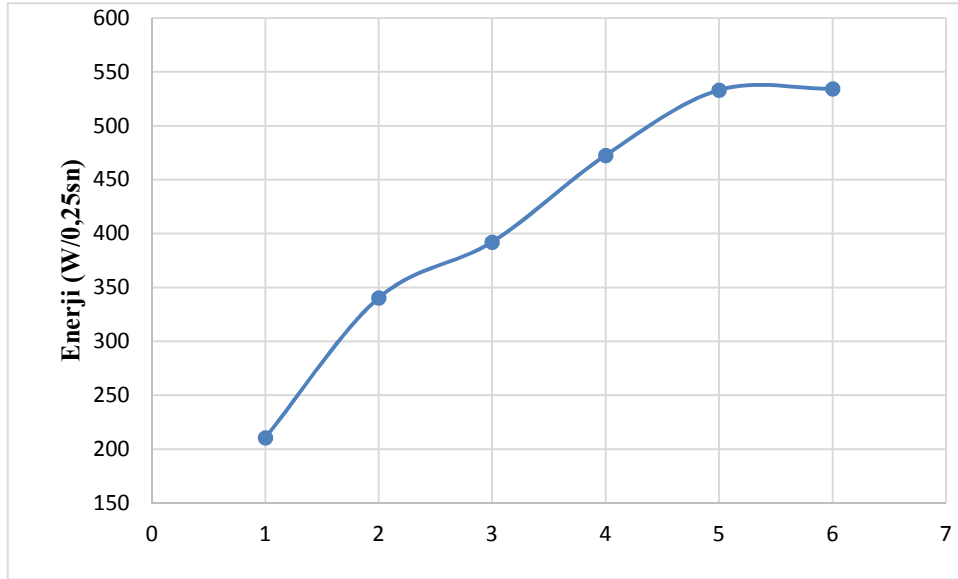
Kademe	Ort. Gerilim U_f (V)	Ort. Akım I_f (A)	Enerji (Joule)
1	64,1664	1,09376	210,547925
2	56,2912	2,014976	340,276251
3	54,2784	2,40832	392,1592689
4	51,3728	3,066752	472,6429114
5	43,92	4,046336	533,1452314
6	36,7904	4,841856	534,4014569

Çizelge 5.9'daki değerler kullanılarak şekil 5.46 elde edilmiştir. Şekil 5.46.a'da VEDS'de paralel sargısından elde edilen akım ve gerilimin etkin değeri ile şekil 5.46.b'de ise paralel sargıdan 0,25sn'de elde edilen 3 fazlı enerjinin değeri gösterilmektedir. Şekil 5.46'dan görüldüğü üzere akım artarken gerilim düşmekte ve

en yüksek enerji alınan nokta ise 6. kademenin olduğu noktadır. 6. Kademede 0,25sn boyunca toplam 534 Joule (Wsn) enerji volandan elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.46 : VEDS 0,25sn'deki elektriksel değerler a) Akım-gerilim b) Enerji grafiği.

Sonuç olarak VEDS'den 0,5 sn boyunca alınan enerji miktarı yaklaşık 463 Joule (Wsn) oda 231,5 joule enerjiye karşılık gelmektedir. 0,25 sn'de ise maksimum 534 Joule (Wsn) oda 133,5 joule enerjiye karşılık gelmektedir. VEDS'de zaman kısaldıkça alınabilen toplam enerji azalmaktadır. Bununla birlikte istenilen sürede aktarılan enerji de artmaktadır.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Günümüzde enerjinin depo edilmesi önemli hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında değişen hava koşullarına göre enerji akışında meydana gelen dalgalanmalar önemli bir problemdir. Bundan dolayı bu sistemler kısa süreli enerjinin depolandığı sistemlere gereksinim duyarlar. Bununla birlikte bobinli manyetik fırlatıcılarda kısa sürede yüksek enerjiye ihtiyaçları vardır. Ayrıca enerji nakil hatlarında da enerji dalgalanmalarını gidermek için kısa süreli enerjiye ihtiyaç duyulur. Tüm bu sistemlerde gerekli olan kısa süreli enerji depolama sistemleri için literatürde en çok kullanılan süper kapasitörler ile volanlı enerji depolama sistemleridir. Volanlı enerji depolama sistemleri (VEDS) kinetik enerjinin dönen bir volanda depolanması esasına dayanır. Yapılan bu çalışmada da VEDS sistemleri için bir alternatör yapısı önerilmiştir.

VEDS için önerilen alternatör yapısı aksenal akılı sürekli mıknatıslı (EASM)'dir. EASM makinalar sağladıkları yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve kompakt yapıları sayesinde ön plana çıkmaktadır.

Yapılan çalışmada öncelikle disk şeklinde bir volan üretilmiştir. Üretilen volanın çapı 30cm ağırlığı ise 38kg'dır. Üretilen volanın 460 d/dk'da depolayabileceği enerji miktarı ise 493 joule olarak hesaplanmıştır. Daha sonra volanın kinetik enerjini elde etmek amacıyla EASM alternatör tasarlanmıştır. Tasarlanan EASM alternatörün stator yapısı açık olukludur. Açık oluklu stator yapısı üretim açısından kolaylık sağlamaktadır. Stator yapısında A ve B olmak üzere iki adet tam kalıp özdeş sargı kullanılmıştır. Bu sargılar kendi aralarında seri ve paralel bağlanarak volandan maksimum enerjinin elde edilmesi sağlanmıştır. Rotor yapısında ise 12 kutuplu dikdörtgen tip neodyum mıknatısların kullanılmaktadır.

Tasarlanan VEDS sistemi 460d/dk için test edilmiştir. VEDS'de yapılan testler tasarlanan alternatörün nominal çalışma frekansına (500 d/dk'da 50 Hz) yakın değerlerde elde edilmiştir.

Boş çalışma durumunda sargılardan elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

A sargısından 459 d/dk'da 91 V, 125 d/dk'da 24.9 V faz gerilimi elde edilmiştir.

B sargısından 457 d/dk'da 90.2 V, 126.6 d/dk'da 24.8 V faz gerilimi elde edilmiştir.

Seri bağlı durumda (A+B) 455 d/dk'da 180 V, 117 d/dk'da 47 V elde edilmiştir.

EASM alternatörün boş çalışması durumunda alınan sonuçlara bakıldığında A ve B sargısının volt/devir değerleri sırasıyla 0.198257 V/devir ve 0.197374 V/devir olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her iki sargı arasındaki V/devir değerleri arasındaki farkın en yüksek değere göre değişim oranı %0.44'tür. Bu oran bize her iki sargının özdeş olduğunu göstermektedir.

Fren çalışma durumunda EASM alternatörün sargılarından alınan enerji değerleri 460 d/dk hızdan frenleme yapıldığı durumun ilk 0.5 sn'lik kısmı için elde edilmiştir. Tasarlanan volanın yapılan analitik hesaplamalar sonucunda depolayabileceği kinetik enerji miktarı 493 joule'dir. Volandan enerjiyi almak için EASM alternatör 6 farklı yük kademesiyle yüklenmiştir. EASM alternatörün fren çalışma durumunda alınan değerler aşağıda verilmiştir.

A sargısından maksimum 332 joule enerji elde edilmiştir.

Sargıların seri bağlı durumunda (A+B) maksimum 474 joule enerji elde edilmiştir.

Sargıların paralel bağlı durumunda (A//B) maksimum 463 joule enerji elde edilmiştir.

EASM alternatörün fren çalışma durumunda alınan sonuçlara bakıldığında alınabilecek en yüksek enerji miktarı A, B sargısının seri bağlı durumundan elde edilmiştir. A, B sargısının seri bağlı durumunda elde edilen enerjinin maksimum enerjiye olan farkın yüzdesel oranı %3.85'tir. Sargıların paralel bağlı olması durumunda %6.08, tek sargı kullanılması durumunda ise %32.65'tir.

Yapılan bu çalışma ile VEDS'nin depoladığı kinetik enerjinin EASM alternatör ile çok büyük kısmının geri alındığını göstermiştir. Bununla birlikte elde edilecek enerjinin maksimum değeri içinde birden çok sargının farklı bağlantı şekilleri ile kullanılmasının önemli olduğu yapılan bu çalışma da görülmektedir.

Bu çalışma göz önünde tutularak ileri ki çalışmalarda bu çalışmanın üstüne nelerin yapılacağı aşağıdaki maddeler halinde verilmiştir.

- Çoklu sargı (2'den fazla) yapısı ile farklı devirlerde elde edilen enerjinin maksimize edilmesi
- Farklı tipte EASM alternatör yapılarının kullanılması

KAYNAKLAR

- Ajily, E., Ardebili, M., Abbaszadeh, K.** (2016). "Magnet Defect and Rotor Eccentricity Modeling in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines via 3-D Field Reconstruction Method", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.31, No.2, June.
- Alipour, A., Moallem, M.** (2013). "Analytical Magnetic Field Analysis of Axial Flux Permanent-Magnet Machines Using Schwarz-Christoffel Transformation", IEEE.
- Aljohani, T. M.** (2014). "The Flywheel Energy Storage System: A Conceptual Study, Design, and Applications in Modern Power Systems", International Journal of Electrical Energy, Vol.2, No.2, June.
- Amiryar, M. E., Pullen, K. R.** (2017). "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications", Applied Sciences, March
- Arora, A. S., Singh, G.** (2015). "Review Of Design And Performance Of Permanent Magnet Synchronous Motor", Proceedings of TheIRES 6th International Conference, Melbourne, Australia August.
- Ayçiçek, E.** (2012). "Vuruntu Momenti Azaltılmış Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, M., Huang, S., Lipo, T. A.** (2004). "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines", SPEEDAM, Italy.
- Aydın, K., Aydemir, M. T.** (2013). "A control algorithm for a simple flywheel energy storage system to be used in space applications", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 1328 – 1339.
- Bai, J. G., Zhang, X. Z., Wang, L. M.** (2012). "A Flywheel Energy Storage System with Active Magnetic Bearings", International Conference on Future Energy, Environment and Materials, Energy Procedia, 1124 – 1128.
- Basmaji, E. A.** (2018). "Flywheel Energy Storage System", Master's thesis, Deggendorf Institute of Technology, December.
- Çaliker, A., Özdemir, E.** (2013). "Modern Enerji Depolama Sistemleri Ve Kullanım Alanları", 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Mayıs, Kocaeli, 175-179.
- Çetin, E., Daldaban, F.** (2014). "Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli", 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Mayıs, Bursa.

- Çetin, E., Daldaban, F.** (2017). “Eksenel akıllı motorlarda oluk açıklıklarındaki hatanın moment üzerine etkisi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 374-381.
- Chapman S. J.** (2005). “Electric Machinery Fundamentals (4. Baskı)”, New York.
- Conteh, M. A., Nsofor, E. C.** (2016). ” Composite flywheel material design for high-speed energy storage”, *Journal of Applied Research and Technology*, 184-190.
- Çıra, F.** (2017). “Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda meydana gelen arızaların incelenmesi”, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17-22.
- Diaz-Gonzalez, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Bianchi, F.D.** (2013). “Energy Management of Flywheel Based Energy Storage Device for Wind Power Smoothing”, *Applied Energy*, Vol.110, 207-219.
- Donato, D. G., Capponi, F. G., Caricchi, F.** (2012). “Fractional-Slot Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Machine with Core Wound Coils”, *Industry Application IEE Transactions*, Vol.48, No.2.
- Dong, J., Huang, Y., Shen, P., Jin, L., Ge, B.** (2012). “An Axial Flux Flywheel Motor/Generator for Pulsed Power Application”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE)*, September, 678-683.
- Erdinç, O., Uzunoglu, M., Vural, B.** (2011). “Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri”, *Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik Sempozyumu*.
- Erhan, K., Özdemir, E., Aktaş, A.** (2016). “Design and Analysis of Flywheel Regenerative Braking Energy Storage System for Hybrid and Electrical Vehicles”, *IEESE*.
- Fu, X.** (2010). “A Novel Design for Flywheel Battery of Electric Vehicles”, *IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, 107-111.
- Gör, H.** (2014). “Eksenel Akıllı Jeneratörlerin Tasarımı ve Uygulaması”, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart*.
- He, J., AO, G., Guo, J., Chen, Z., Yang, L.** (2009). “ Hybrid Electric Vehicle with Flywheel Energy Storage System”, *WSEAS Transactions on Systems*, 1109-2777, May.
- Hedlund, M., Lundin, J., Santiago, J., Abrahamsson, J., Bernhoff, H.** (2015). “Flywheel Energy Storage for Automotive Applications”, *Energies*, 10636-10663.
- Huang, M., Chen, P., Huang, Y., Chen, K.** (2016). “Reduce the Cogging Torque of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Light Electric Vehicle Applications”, *IEEE*.
- Hüner, E.** (2017). *Tübitak araştırma projesi geliştirme raporu, Proje No:115E964, Rapor no:1.*
- Ishikawa, T.** (2015). “Design of an Axial-Flux Type Permanent-Magnet Generator”, *Intermag*.

- Junfeng, W.** (2015). “Design of a Miniature Axial Flux Flywheel Motor with PCB Winding for Nanosatellites”, Optoelectronics and Microelectronics ICOM International Conference, 544-548.
- Jussila, H., Nerg, J., Pyrhönen, J., Parviainen, A.** (2010). “Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor for Industrial Use”, XIX International Conference on Electrical Machines, Rome.
- Kale, V., Secanell M.** (2018). “A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems”, Energy Reports, 576–585.
- Kato, K., Ishigma, S., Nakajima, Y., Arai, H., Ueda, T., Iwata, T., Ito, Y., Sugao, K.** (2014) “10MW, 3.3MWh Energy Storage System consisting of 4000 Flywheels controlled by ICT network for Short Cycle Power Fluctuation Compensation”, The 2014 International Power Electronics Conference IEEE, 403-408.
- Kocaman, B.** (2013). “Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri”, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 119-127.
- Kozak, M., Kozak, Ş.** (2012). “Enerji Depolama Yöntemleri”, International Technologic Science, vol.4, 17-29.
- Kumar, S., Zhao, W., Du, Z. S., Lipo, T. A., Kwon, B.** (2015). “Design of Ultra-high Speed Axial Flux Permanent Magnet Machine with Sinusoidal Back-EMF for Energy Storage Application”, IEEE Transactions on Magnetics.
- Limsuwan, N., Kato, T., Akatsu, K., Lorenz, R. D.** (2014). “Design and Evaluation of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent-Magnet Machine”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.50, No.2, March/April.
- Mahmoudi, A., Rahim, N. A., Hew, W. P.** (2011). “Axial-flux permanent-magnet machine modeling, design, simulation and analysis”, Scientific Research and Essays, Vol. 6(12), June, 2525-2549.
- Marques, M. I. L.** (2008). “Design and Control of an Electrical Machine for Flywheel EnergyStorage System”, Master’s thesis, Instituto Superior Técnico, May.
- Nemsi, S., Belfedhal, S. A., Barazane, L.** (2016). “ Role of Flywheel Energy Storage System in Microgrid”, Journal of Engineering Research and Technology, September.
- Ocak, C.** (2009). “Mikro-Hidroelektrik ve Rüzgâr Santralleri İçin Düşük Devirli Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Generatör Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran.
- Öner, Y.** (2009). “Sürekli Mıknatıslı Dc Motor İle Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Öner, Y.** (2013). “Rüzgar Türbinleri İçin; Düşük Hızlı, Sürekli Mıknatıslı, Yumuşak Manyetik Kompozit Malzemeli, Senkron Generatör Tasarımı, Optimizasyonu ve Üretimi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan.
- Östergard, R.** (2011). “Flywheel energy storage”, Master’s thesis, Uppsala University, December.
- Özdemir, N., Hadra, M.** (2016). “Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Depolama Yöntemleri”, Güç Sistemleri Konferansı, İstanbul, Kasım.
- Parviainen, A., Pyrhönen, J., Niemelä, M.** (2001). “Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnet”, 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering Cracow, Poland, September, 20-22.
- Patterson, D. J., Colton, J. L., Mularcik, B., Kennedy, B. J., Camilleri, S., Rohoza, R.** (2009). “A Comparison of Radial and Axial Flux Structures in Electrical Machines”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May.
- Pop, A. A., Blan, H., Radulescu, M., Kanchev, H.** (2013). “Electromagnetic Torque Capabilities of Axial-Flux and Radial-Flux Permanent-Magnet Machines”, IEEE.
- Rostami, N., Shokri, M., Behjat, V., Pyrhönen, J., Rostami, M.** (2015). “Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Different Magnet Shapes”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, No.12, December.
- Qian, X.** (2010). “Application Research of Flywheel Battery in the Wind and Solar Complementary Power Generation”, Computer Application and System Modeling International Conference on, Vol.13, 546-550.
- Sakarya, H.** (2009). “Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar İçin Alan Yönlendirmeli Sürücü Düzeneği Tasarımı Ve Uygulaması”, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Santiago, J., Bernhoff, H.** (2010). “Comparison between axial and radial flux PM coreless machines for flywheel energy storage”, J. Electrical Systems, 6-2.
- Sarı, A.** (2006). “Düşük Kayıplı Manyetik Yataklamalı Volan Enerji Depolama Sistemlerinin H-Infinity Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Sever, M.** (2019). “Bobinli Fırlatıcılar İçin Volanlı Eksenel Akı Sabit Mıknatıslı Makina Tasarımı ve 3D Manyetik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs.
- Sezenoğlu, C., Balıkçı, A.** (2015). “Design of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Generator Driven Electromagnetic Launcher”, 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, November.

- Shokri, M., Behjat, V., Rostami, N.** (2015). "Characterization of Axial Flux Permanent Magnet Generator Under Various Geometric Parameters for Improved Performance", *Gazi University Journal of Science*, 285-294.
- Soomro, A., Amiryar, M. E., Pullen, K. R.; Nankoo, D.** (2018). "Comparison of Performance and Controlling Schemes of Synchronous and Induction Machines Used in Flywheel Energy Storage Systems ", *Energy Procedia*, 100–110.
- Su, W., Jin, T., Wang, S.** (2010). "Modeling and Simulation of Short-term Energy Storage: Flywheel", *International Conference on Advances in Energy Engineering*, June.
- Tameghe, T. A. T., Wamkeue, R., Kamwa, I.** (2015). "Modelling and Simulation of a Flywheel Energy Storage System for Microgrids Power Plant Applications", *EIC Climate Change Technology Conference*, May.
- Toodeji, H.** (2019). "A developed flywheel energy storage with built-in rotating supercapacitors", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 213-229.
- Turan, D., Yönetken, A.** (2016). "Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analiz", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 113-121.
- Wojciechowski, R. M.** (2016). "Analysis and optimisation of an axial flux permanent magnet coreless motor based on the field model using the superposition principle and genetic algorithm", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 65(3), 601-611.
- Xiao, Y., Ge, X., Zheng, Z.** (2013). "Analysis and Control of Flywheel Energy Storage Systems", *Energy Storage-Technologies and Applications*, chapter 6
- Xu, S.** (2012). "Design and Prototyping of a Low-Speed Flywheel System for Automotive Brake Energy Recovery", *The Ohio State University*.
- Yavuz, C.** (2015). "12/8 Anahtarlama Relüktans Motoru ve 2n Tipi Sürücü Tasarımı ve Gerçeklemesi", *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ekim.
- Yüzer, E. Ö.** (2011). "Düşük Düşülü Mikro Hidro Elektrik Santralleri için Sabit Mıknatıslı Bir Senkron Genaratör Tasarımı", *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Haziran.
- Zeka, G.** (2016). "Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörlerde Kutup Açısının Makine Performansına Etkisinin İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ağustos.
- Zhang, C., Tseng, K.J., Nguyen, T.D.** (2010). "Design and Loss Analysis of a High Speed Flywheel Energy Storage System Based on Axial Flux Flywheel Rotor Electric Machines", *IPEC Conference IEEE*, October, Singapore, 886-891.
- Zhou, L., Qi, Z.** (2009). "Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage Ssystem with IPMSM for Voltage Sags in Distributed Power Network", *International Conference on Mechatronics and Automation*, August, China, 5046-5051.

Zhou, L., Tang, X., Qi, Z. (2014). “Control Method for Flywheel Array Energy Storage System in Energy Harvesting From Electric Railway”, Transportation Electrification Asia-Pacific(ITEC Asia-Pacific) IEEE Conference and Expo, September, 1-5.

Umar, İ. (2018). < <https://www.muhendisbeyinler.net/elektrik-makinalari-ve-genel-ozellikleri/> > Alındığı tarih: 03.04.2019.

ÖZGEÇMİŞ

**VESİK
ALIK
FOTO**

Ad Soyad : Hülya UYKIZ

Doğum Yeri ve Tarihi : 1986-TEKİRDAĞ

E-Posta : hhul_yaa@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, SDÜ,TEF,Bilgisayar Sistemleri Öğretmenliği