

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

**EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI ALTERNATÖRLERDE
KUTUP AÇISININ MAKİNE PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan ZEKA

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Engin HÜNER

Ağustos 2016

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

**EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI ALTERNATÖRLERDE
KUTUP AÇISININ MAKİNE PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gökhan ZEKA
(1148204108)**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Engin HÜNER

Ağustos 2016

Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1148204108 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Gökhan ZEKA**'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **EKSENEL AKILI SABİT MIKNATISLI ALTERNATÖRLERDE KUTUP AÇISININ MAKİNE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ** “ başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Engin HÜNER**
Kırklareli Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. M. Caner AKÜNER**
Marmara Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Süreyya KOCABEY
Kırklareli Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Temmuz 2016
Savunma Tarihi : 26 Ağustos 2016

Metoş'a,

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde bizzat elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada özgün olmayan tüm kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ediyorum.

İmza

Gökhan ZEKA

26/08/2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında desteğini ve dostluğunu hiçbir zaman esirgemeyen, tüm tez çalışması boyunca yanımda olan, her zaman katkılarını sükran ile anacağım kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Engin HÜNER' e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her zaman yanımda olan annem, babam ve kardeşlerime teşekkür ederken, hayatımın büyük kısmında yer eden, desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Kırklareli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Komisyon Başkanlığı tarafından KÜBAP-039 proje numarası ile desteklenmiştir.

Ağustos 2016

Gökhan ZEKA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
2. MANYETİK MALZEMELER	9
2.1 Yumuşak Manyetik Malzemeler.....	11
2.2 Sert manyetik malzemeler.....	12
2.3 Alüminyum – Nikel – Kobalt Mıknatıslar (AlNiCo).....	13
2.4 Ferrit (seramik) mıknatıslar	14
2.5 Nadir Toprak Elementli Mıknatıslar	15
2.5.1 Samaryum – Kobalt mıknatıslar (SmCo).....	15
2.5.2 Neodyum - Demir – Bor mıknatıslar (NdFeB)	16
3. SABİT MIKNATISLI SENKRON ALTERNATÖRLER	19
3.1 Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörler.....	19
3.1.1 Yüzey yerleştirmeli RASM alternatörler	21
3.1.2 Gömülü tip RASM alternatörler	22
3.2 Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörler	23
3.2.1 EASM alternatörlerin yapısı ve çeşitleri	24
3.2.1.1 Tek kenarlı EASM senkron alternatörler	24
3.2.1.2 Çift kenarlı EASM senkron alternatörler	25
3.2.2 EASM alternatörlerin stator ve rotor yapıları	25

3.2.3	EASM alternatörlerde vuruuntu momenti.....	26
3.2.3.1	Statora uygulanan vuruuntu momentini azaltıcı teknikler	27
3.2.3.2	Rotora uygulanan vuruuntu momentini azaltıcı teknikler.....	27
3.3	Sabit Mıknatıslı Alternatörlerin Avantaj ve Dezavantajları	28
4.	EASM ALTERNATÖRLERİN MANYETİK ANALİZİ	31
4.1	Maxwell 3D SEA Programı	31
4.2	TAOEASM-NN Tip Alternatörün 3D Modellenmesi ve Analizi	31
4.2.1	TAOEASM-NN alternatörün 3D modellenmesi.....	32
4.2.1.1	Malzeme tanımlamaları.....	33
4.2.1.2	Sargılara terminal tanımlaması ve akım yoğunluğu.....	34
4.2.1.3	Tasarımın 3D benzetimi	35
4.2.2	Tasarımın analiz sonuçları	35
4.2.2.1	Tasarımın değişken hava aralığındaki manyetik analizleri	36
4.2.2.2	Tasarımın mıknatıs açısına bağlı manyetik analizleri	42
4.2.2.3	Manyetik analizlerin değerlendirilmesi.....	45
5.	TASARIMIN UYGULANMASI	47
5.1	Statorun Sarım Hesabı ve Sarım Şeması.....	47
5.2	Stator	48
5.3	Rotor.....	50
5.3.1	Eksen döndürme parçası.....	50
5.3.2	Açı sabitleme kalıbı.....	51
5.4	Gövde ve Kapaklar.....	52
6.	DENEYSEL SONUÇLAR	57
6.1	Alternatörün Yüksüz Çalıştırılması	57
6.1.1	0 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	57
6.1.2	4 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	59
6.1.3	8 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	60
6.1.4	12 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	61
6.1.5	16 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	63
6.1.6	20 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	64
6.1.7	24 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	66
6.1.8	28 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	67
6.1.9	30 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar	69
6.1.10	Yüksüz durumdaki deneysel sonuçların değerlendirilmesi.....	70

6.2	Alternatörün Yüklü Çalıştırılması.....	72
6.2.1	Birinci kademe 60.4 ohm' da yüklü çalışma.....	73
6.2.2	İkinci kademe 29.1 ohm' da yüklü çalışma	75
6.2.3	Üçüncü kademe 22.6 ohm' da yüklü çalışma	76
6.2.4	Dördüncü kademe 16.4 ohm' da yüklü çalışma.....	78
6.2.5	Beşinci kademe 10.8 ohm' da yüklü çalışma.....	79
6.2.6	Altıncı kademe 7.4 ohm' da yüklü çalışma.....	81
6.2.7	Yüklü durumda çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi	83
7.	DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	85
	KAYNAKLAR	87
	ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Makine
SMSA	: Sabit Mıknatıslı Senkron Alternatör
EASM	: Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı
RASM	: Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
TAOEASM-NN	: Toroidal Sargılı, Açık Oluklu, Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı ve NN Kutuplu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Preslenmiş AlNiCo mıknatısların özellikleri.	13
Çizelge 2.2 : Döküm AlNiCo mıknatısların özellikleri.	14
Çizelge 2.3 : Ferrit mıknatısların özellikleri.....	14
Çizelge 2.4 : Samaryum – Kobalt (SmCo) mıknatısların özellikleri.....	16
Çizelge 2.5 : Polimer bağlı (NdFeB) mıknatısların özellikleri.....	17
Çizelge 2.6 : Preslenmiş (NdFeB) mıknatısların özellikleri.....	17
Çizelge 4.1 : Tasarımın fiziksel boyutları.....	32
Çizelge 6.1 : Deneyde kullanılan ölçü aletleri ve cihazlar.	57
Çizelge 6.2 : Yüksüz durumdaki deneysel sonuçlar.....	71
Çizelge 6.3 : Yüklü durumdaki deneysel sonuçlar.	83

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Diamanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.	9
Şekil 2.2 : Paramanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.	10
Şekil 2.3 : Ferromanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.	10
Şekil 2.4 : Antiferromanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.	11
Şekil 2.5 : Ferrimanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.	11
Şekil 2.6 : Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin B-H eğrileri.	12
Şekil 2.7 : Maksimum enerjilerine göre sabit mıknatısların gelişim süreci.	13
Şekil 2.8 : Nadir toprak elementli mıknatısların demanyetikleşme eğrileri.	15
Şekil 3.1 : RASM alternatörün yapısı ve manyetik akı yönü.	20
Şekil 3.2 : Yüzey yerleştirmeli RASM alternatör.	21
Şekil 3.3 : Gömülü tip RASM alternatör.	22
Şekil 3.4 : EASM alternatörlerin yapısı.	23
Şekil 3.5 : (a) Oluksuz tip stator ve yüzey yerleştirmeli mıknatıslı EASM alternatör, (b) Oluklu tip stator ve yüzey yerleştirmeli mıknatıslı EASM alternatörün manyetik akı yolları.	24
Şekil 3.6 : (a) Oluksuz iç stator dış rotorlu EASM alternatör, (b) Oluklu iç stator dış rotorlu EASM alternatör, (c) Oluksuz dış stator iç rotorlu EASM alternatör, (d) Oluklu dış stator iç rotorlu EASM alternatörlerin manyetik akı yolları.	25
Şekil 3.7 : EASM alternatörlerde kullanılan Neodyum mıknatıs yapıları.	26
Şekil 3.8 : Stator tarafına uygulanan teknikler.	27
Şekil 3.9 : Rotor tarafına uygulanan teknikler.	28
Şekil 4.1 : MOH nüvenin BH eğrisi.	33
Şekil 4.2 : Steel 1008 BH eğrisi.	33
Şekil 4.3 : Bir bobinin terminal noktası ve akım yönü.	34
Şekil 4.4 : Tüm bobin gruplarının terminal noktaları ve akım yönleri.	34
Şekil 4.5 : Tasarımın 3D simülasyonu.	35
Şekil 4.6 : 1mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	36
Şekil 4.7 : 2mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	37
Şekil 4.8 : 3mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	37
Şekil 4.9 : 4mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	38

Şekil 4.10 : 5mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	38
Şekil 4.11 : 6mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	39
Şekil 4.12 : 7mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	39
Şekil 4.13 : 8mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	40
Şekil 4.14 : 9mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	40
Şekil 4.15 : 10mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.	41
Şekil 4.16 : Alınan bir kontur boyunca değişken hava aralığındaki manyetik alanın değişimi.	42
Şekil 4.17 : Farklı mıknatıs açılarında vurutu momentinin değişimi.	43
Şekil 4.18 : 3mm hava aralığı ve 12 derece kaykık durumu.....	43
Şekil 4.19 : 3mm hava aralığı ve 12 derece mıknatıs açısı durumunda manyetik akı dağılımı.....	44
Şekil 4.20 : 3mm hava aralığı ve 12 derece mıknatıs açısı durumunda kontur boyunca manyetik akı dağılımı.	44
Şekil 5.1 : Sarım şeması ve mıknatıs dizilimi.....	48
Şekil 5.2 : Oluk açılan nüve.....	49
Şekil 5.3 : Sargısı ve bağlantıları tamamlanan stator.....	49
Şekil 5.4 : Mıknatısların yerleştirildiği rotor kalıbı.	50
Şekil 5.5 : Eksen döndürme parçası.....	50
Şekil 5.6 : Mıknatıs yapıştırılan eksen döndürme parçası.	51
Şekil 5.7 : Eksen döndürme parçalarının yerleştirildiği rotor kalıbı.....	51
Şekil 5.8 : Mıknatıs açısı sabitleme kalıbı.	52
Şekil 5.9 : Stator sabitleme parçası.	52
Şekil 5.10 : Hava aralığı ayarlama aparatı.	53
Şekil 5.11 : Çıkış uçları ve bağlantı klemensleri.	53
Şekil 5.12 : Alternatör kapakları.	54
Şekil 5.13 : Alternatör bağlı deney düzeneği.....	54
Şekil 5.14 : Sürücü frekansına bağlı alternatör çıkış gerilimi.....	55
Şekil 6.1 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	57
Şekil 6.2 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.	58
Şekil 6.3 : Vurutu momenti (0 derece).	58
Şekil 6.4 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	59
Şekil 6.5 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.	59
Şekil 6.6 : Vurutu momenti (4 derece).	60
Şekil 6.7 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	60
Şekil 6.8 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.	61

Şekil 6.9 : Vuruntu momenti (8 derece).	61
Şekil 6.10 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	62
Şekil 6.11 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	62
Şekil 6.12 : Vuruntu momenti (12 derece).	63
Şekil 6.13 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	63
Şekil 6.14 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	64
Şekil 6.15 : Vuruntu momenti (16 derece).	64
Şekil 6.16 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	65
Şekil 6.17 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	65
Şekil 6.18 : Vuruntu momenti (20 derece).	66
Şekil 6.19 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	66
Şekil 6.20 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	67
Şekil 6.21 : Vuruntu momenti (24 derece).	67
Şekil 6.22 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	68
Şekil 6.23 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	68
Şekil 6.24 : Vuruntu momenti (28 derece).	69
Şekil 6.25 : 3 faz hat gerilim eğrileri.	69
Şekil 6.26 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.....	70
Şekil 6.27 : Vuruntu momenti (30 derece).	70
Şekil 6.28 : Yüksüz durumda mıknatıs açısına bağlı olarak gerilim harmoniğinin değişimi.	71
Şekil 6.29 : Yüksüz durumda mıknatıs açısına bağlı olarak hat geriliminin değişimi.	72
Şekil 6.30 : Yüksüz durumda mıknatıs açısına bağlı olarak vuruntu momentinin değişimi.	72
Şekil 6.31 : Sargılı dirençler ve kademe noktaları.....	73
Şekil 6.32 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	73
Şekil 6.33 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.	74
Şekil 6.34 : Faz başına görünür güç.....	74
Şekil 6.35 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	75
Şekil 6.36 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.	75
Şekil 6.37 : Faz başına görünür güç.....	76
Şekil 6.38 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	76
Şekil 6.39 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.	77
Şekil 6.40 : Faz başına görünür güç.....	77
Şekil 6.41 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	78

Şekil 6.42 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.....	78
Şekil 6.43 : Faz başına görünür güç.....	79
Şekil 6.44 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	79
Şekil 6.45 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.....	80
Şekil 6.46 : Faz başına görünür güç.....	80
Şekil 6.47 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.....	81
Şekil 6.48 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.....	81
Şekil 6.49 : Faz başına görünür güç.....	82

EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI ALTERNATÖRLERDE KUTUP AÇISININ MAKİNE PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Rüzgar türbinlerinde kullanılan alternatörler, sisteme çeşitli mekanik sistemler ile bağlanabilirler. Bu mekanik parçaların kullanılması, türbin hacmini, sistem maliyetini, arıza ihtimalini arttırdığı gibi türbin güvenilirliğini de azaltmaktadır. Günümüzde yapılan çalışmalar rüzgar türbinlerine doğrudan bağlanabilen, mekanik donanıma ihtiyaç duymayan alternatörlere yöneliktir. Bu alternatörlerden birisi de sabit mıknatıslı olarak üretilen Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı alternatörlerdir.

Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı alternatörler günümüzde yaygın arge çalışmaları ile birlikte kullanımı yaygınlaşan sabit mıknatıslı alternatör tipidir. Rüzgar türbinlerinde doğrudan sisteme bağlanabilmesi, harici bir uyarıma ihtiyaç duymaması ve düşük dönme hızlarında yüksek güç üretebilmeleri bu alanda yapılan çalışmaların artmasının en önemli sebeplerindendir.

Bu çalışmada sabit mıknatıslı makinelerin genel yapıları incelenmiş ve makine tasarımında kullanılan malzemeler tanıtılmıştır. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı makine modelleri tanıtılarak makine performansını etkileyen faktörler üzerinde durulmuştur. Bunlardan en önemlisi olan vuru momentini açıklanarak bu davranışı giderici yöntemler üzerine çalışmalara yer verilmiştir.

14 kutuplu, toroidal sargılı, açık oluklu NN tip eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörün ANSYS firmasının Maxwell programı ile 3D tasarımı yapılarak modellenen alternatörün sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımın rotor-stator arasındaki farklı hava aralıklarında ve farklı mıknatıs açılarında analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak en uygun değerlere karar verilmiştir. Yapılan 3D modellemeye göre üretilen alternatörün her bir üretim aşaması verilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen alternatör yüksüz durumda üretilen gerilim, vuru moment ve harmonik gibi değerler ölçülmüş, grafiksel olarak verilerek açıklanmıştır. Alternatörün omik yük altında çektiği akım, gerilim, harmonik ve güç değerleri ölçülerek yine grafiksel olarak verilerek yorumlanmıştır. Elde edilen veriler sonucunda alternatörün en az vuru momentinde en çok güç üretilen mıknatıs açısı ve hava aralığı elde edilmiştir.

INVESTIGATION EFFECTS OF POLAR ANGLE TO MACHINE'S PERFORMANCE ON AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET ALTERNATORS

SUMMARY

The alternators used in wind turbines can be connected to a variety of mechanical systems. Using of these mechanical parts increase turbine volume, system cost and the possibility of faults as well as decreasing the reliability of the turbine. The studies are made at the present day are for alternators which can connected to the wind turbine directly and can not need for mechanical equipment. One of these alternators is Axial Flux Permanent Magnet alternators which is produced as permanent magnet alternator.

This day, Axial Flux Permanent Magnet alternators are type of permanent magnet alternator which widely used with extensive R&D work. Connected directly to the system on wind turbines, not needed an external stimulation and produced high power at low rotational speed are most important reasons for increasing of the work in this area.

In this study, it has been examined the general structure of permanent magnet machine and it has been introduced the material used in mechanical design. Axial Flux Permanent Magnet machine models are introduced and focused on the factors which affecting the performance of the machine. Moment of detonation which is most important factor is explained and it is given way to studies on the behaviour relieving methods.

It has been performed the magnetic analysis of the alternator with 14 poles, toridal winging, open slot, NN type axial flux, fixed magnet which designed its 3D model in Maxwell which is a program of ANSYS company by using the finite elements method. Analysis of design is materialized different air gap between the rotor-stator and different angles of magnet. Optimal values are decided by comparing analysis. According to 3D modelling, each production stage of the alternator that manufactured are given. It has been explained diagrammatically for the alternator which is produced to measure values about harmonic, cogging and the voltage that is produced no-loading state. Ohmic load current drawn by under the alternator measuring the voltage. Harmonics and power values still interpreted graphically. As a result, on at least detonation moment of alternator has been decided magnet angle which produced the most power and air gap.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji tüketiminin artması, fosil yakıtların azalması ve neden olduğu çevre tahribatının göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşması, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretilmesi yönelik yapılan çalışmaların artmasını sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olup enerji verimliliği yüksek olan rüzgar gücünden enerji üretiminde, maliyeti ve enerji verimliliğini etkileyen önemli unsurlardan biri de mekanik güç aktarımında kullanılan redüktör sistemleridir. Rüzgar türbinlerinde, türbin maliyetini azaltıp verimi arttırmak için mekanik donanımların kullanılmadığı doğrudan bağlanan alternatörler kullanılarak bu kayıpların önüne geçilebilmektedir.

Rüzgar türbinlerinde alternatörler; geleneksel yöntemde, hareketli pervanelere çeşitli mekanik sistemler ile akuple edilerek bağlanırlar. Bu mekanik parçalar türbin hacmini arttırdığı gibi düzenli bakım gerektirdiği ve arıza ihtimali barındırdıklarından türbin güvenilirliğini azaltmaktadırlar. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile pervane miline doğrudan bağlanabilecek, dişli kutusu gibi mekanik donanım ihtiyacı olmayan alternatörler geliştirilmiştir. Bu alternatörlerin rüzgar türbinlerinde kullanılması türbin bakım maliyetinin düşmesine ve olası mekanik arızaların önüne geçilmesini sağlamıştır. Doğrudan bağlanan bu alternatörler genellikle sabit mıknatıslı olarak üretilirler. Alternatörlerin sabit mıknatıslı olmaları harici bir uyarım gerektirmediğinden, bu alternatörlerden yüksek verim elde edilebilmektedir.

Son yıllarda mıknatıs teknolojisindeki önemli gelişmelerin sabit mıknatıslı alternatör tasarımına katkısı büyüktür. Özellikle nadir toprak elementli mıknatıslar bu tip alternatör tasarımında önemli bir yere sahiptir. Sabit mıknatıslı alternatörler harici bir uyarıma ihtiyaç duymayan, büyük B-H eğrilerine ve yüksek kalıcı akı yoğunluğuna (Br) sahip mıknatıslardan oluşurlar.

Rüzgar türbinlerinde doğrudan sisteme bağlanan sabit mıknatıslı alternatörlerden birisi de Eksenel Akı Sabit Mıknatıslı (EASM) senkron alternatörlerdir. EASM alternatörler günümüzde arge çalışmaları ve rüzgar türbinlerinde kullanımı

yaygınlaşan alternatör tiplerindedir. Doğrudan tahrik yönü ile pervaneye bağlanabilen ve harici bir uyarıma ihtiyaç duymayan sabit mıknatıslı alternatörlerdir. En önemli özellikleri ise düşük dönme hızlarında ürettikleri yüksek güç yoğunlukları ve yüksek momentleridir.

Bu çalışmada EASM alternatörlerin genel yapıları incelenerek, alternatör tasarımında kullanılan malzemeler tanıtılmıştır. Ayrıca EASM alternatör tasarım modelleri üzerinde bir inceleme yapılmıştır. Alternatör performansını etkileyen faktörler üzerinde durularak, bunlardan en önemlisi olan vuruş momenti açıklanmış ve bu davranışı giderici yöntemler üzerinde durulmuştur. 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile rotor – stator arasındaki hava aralığına ve kutup açısına bağlı alternatör performansı analizi yapılmıştır. Son olarak tasarlanan alternatör üretilerek, alternatör performansına etkileyen etkenler deneysel olarak elde edilerek optimum tasarım modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın;

Giriş bölümünde; konu açıklanarak literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde; manyetik malzemelerin yapıları, çeşitleri ve özelliklerine detaylı olarak yer verilmiştir. Ayrıca mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte farklı mıknatıs yapıları incelenerek karakteristik yapıları sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; sabit mıknatıslı senkron alternatörlerin yapıları, çeşitleri ve uyarım sargılı alternatörlere göre avantaj – dezavantajları sıralanmıştır. EASM alternatörlerin yapısı, çalışması, çeşitleri ve alternatör performansını etkileyen etkenlere yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde; Maxwell 3D programı ile 42 oluklu, 14 kutuplu, tek stator – çift rotorlu, toroidal sargılı, açık oluklu, NN tip aksel akılı senkron alternatör (TAOEASM-NN) tasarlanarak, farklı hava aralıklarında ve kutup açılarındaki çalışması SEY ile analiz edilmiştir.

Beşinci bölümde; 3D tasarımı yapıp SEY ile analizi yapılan alternatörün üretim aşamalarına yer verilmiştir.

Altıncı bölümde; tasarımı gerçekleştirilen TAOEASM-NN tip alternatörün deneysel çalışmalarına yer verilmiştir. Alternatörün yüklü ve yüksüz durumlarda elde edilen deneysel sonuçları sunulmuştur.

Yedinci bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

19. yüzyılda Michael Faraday tarafından tasarlananan eksenel akılı alternatörlerin gelişimi son yıllarda yüksek verimli mıknatısların üretilmesi ile gerçekleşmiştir. Özellikle neodyum (NdFeB) mıknatıslarının keşfi ile birlikte bu mıknatısların yüksek manyetik yoğunlukları ve üretim maliyetlerinin gün geçtikçe azalması eksenel akılı alternatörlerin gelişimine katkısı büyük olmuştur. Son yıllarda eksenel akılı alternatörler alanında yapılan çalışmalar bu bölümde sıralanmıştır.

Hwang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rüzgar enerjisi sistemleri uygulaması için 60Hz, 10kVA, 300rpm çift taraflı eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron alternatör tasarlayarak SEY ile elde ettikleri analiz sonuçlarını sunmuşlardır. Tasarladıkları çift taraflı eksenel akılı alternatörü dişlisiz tip rüzgar enerjisi sistemine adapte ederek hangi değişken çalışma koşullarında çalıştırılması gerektiğini açıklamışlar[1].

Chan çalışmasında şehir merkezi dışındaki kasabaların enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatör ile dikey eksenli bir rüzgar türbini tasarlamıştır. Tasarımını türbinin küçük bir prototipini yaparak, yaptığı testler ile yüksek verim elde etmiş ve sistemin uygulanabilirliğini gözlemlemiştir. Ayrıca tasarım sürecinde kullandığı gelişmiş 2D manyetik dağılım yöntemi ve SEY ile gelecekte etkili makine tasarımları yapılabileceğini öngörmüştür[2].

Donato ve arkadaşları kesirli sargılı, çift rotor ve tek statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı bir alternatörün tasarımını oluşturarak SEY ile analizini gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan kesirli sargı modelinin makine performansını arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır[3].

You ve Hwang yaptıkları çalışmada rüzgar türbinlerinde üretilen enerji kalitesini arttırmak ve harmonik bozulmaları en aza indirebilmek için eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörlerde dağılık sargı modelini, 3D SEY ile analiz ederek deneysel yöntemler ile de teyit etmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda alternatör çıkış gücü dengesizliklerini düzeltmişlerdir[4].

Aydın ve arkadaşları çalışmalarında oluklu tip çift rotorlu EASM makinenin orta noktasına yerleştirdikleri DC sargı ile harici olarak oluşturdukları manyetik alan ile, makinede manyetik alan zayıflatması oluşturabilmişler[5].

Yang ve arkadaşı çalışmalarında elektrikli araçlarda kullanılan EASM makineler için bir vites yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında makine sargılarından belirli aralıklarla çıkardıkları uçlar ile aynı güçte farklı hız aralıkları sağlayabilmişlerdir[6,7].

Yang ve arkadaşları çalışmalarında elektrikli araçlar için kullanılan EASM makine tasarımı ve analizi gerçekleştirmişlerdir. Tasarımın en önemli sonuçlarından birisi de vuru momentinde elde ettikleri önemli ölçüdeki azalmadır[8].

Limsuwan sabit mıknatıslı makinelerin geniş işletim aralığını ve verimliliğini artırabilmek için alternatörlerde değişken manyetik özelliklere sahip sabit mıknatıs kullanmıştır. Tasarlanan makinenin SEY ile analizini gerçekleştirmiştir[9].

Rizk ve Nagrial çalışmalarında rüzgar türbini uygulamalarında kullanılmak üzere 5 kW'lık kendinden uyarımlı RASM alternatör tasarımı yaparak SEY ile elde ettikleri tasarım sonuçlarını sunmuşlardır[10].

Jurca ve Martis küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere sabit mıknatıslı alternatör tasarlayarak yazılımsal ve deneysel sonuçları paylaşmışlar. Maksimum çıkış gerilimi ve verim elde edebilmek için Hooke-Jeeves algoritması kullanarak optimum tasarım modelini gerçekleştirmişler. Makinenin deneysel modeli oluşturarak yüklü ve yüksüz durumdaki test sonuçlarını elde edilen teorik sonuçlar ile karşılaştırmışlar[11].

Parviainen ve arkadaşları çalışmalarında tek rotor ve iki statorlu EASM alternatörde sinüsoidal yapıda mıknatıslar kullanarak düzgün bir çıkış sinüs eğrisi elde etmişlerdir. Fakat bu durumun mıknatıs maliyetini arttırdığını ve mıknatıs hacminin azalması ile birlikte makine performansını olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir[12].

Reed ve Bakhoun küçük ölçekli rüzgar türbinlerinde kullanılan EASM alternatörlerin stator yapılarındaki farklı yaklaşımlar üzerine bir inceleme yapmışlar. Baskı devre stator ile geleneksel sargılı tip stator arasındaki verim karşılaştırmasını yapabildikleri deneysel bir çalışma yapmışlar[13].

Alipour ve Moallem çalışmalarında yarı açık oluklu EASM makine tasarlayarak 3D simülasyonunu oluşturmuşlar. Oluşturdukları simülasyonu 3D SEY ve Schwarz-Christoffel dönüşüm ilkesi ile alınan değerlerin karşılaştırmasını yapmışlar[14].

Ishikawa çalışmasında EASM bir alternatörün optimize modelini geliştirmiştir. Tasarladığı alternatörün analizini yaparak ticari olarak kullanılan EASM alternatörler ile kıyaslamıştır[15].

Lee ve Jung çalışmalarında EASM alternatörün elektromanyetik yapısını inceleyerek vuru momentini azaltıcı yöntemler üzerinde çalışmışlar. SEY kullandığı çalışmalarında vuru momentinin azaldığı optimum tasarım modelini geliştirerek 1,3kW çıkış gücünde %1.61 lik vuru moment değeri elde etmişler[16].

Mardaneh ve arkadaşları çalışmalarında EASM makinelerin manyetik davranışlarını analitik yöntemler ile ve iki boyutlu SEY ile modelleyerek iki yöntem sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda en uygun tasarım modelini sunmuşlardır[17].

Shokri ve arkadaşları çalışmalarında farklı mıknatis modellerinden oluşturulan rotolara sahip EASM alternatörlerin performanslarını 3D SEY ile analizini yaparak en iyi performansa sahip mıknatis modelini belirlemişler. Optimum mıknatis modelinin üretilen gerilim, harmonik ve vuru moment gibi değerlerini yorumlamışlar[18].

Pop ve arkadaşları çalışmalarında aksel akılı ve radyal akılı makinelerin elektromanyetik ve fiziksel olarak birbirlerine olan avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu makine tiplerin hangi alanlarda kullanıldığına yönelik bir değerlendirmede bulunmuştur[19].

Jussile ve arkadaşları çalışmalarında endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere tek rotor çift statorlu açık oluklu EASM' lı makine tasarlamışlar. Rotoru tamamen nüvesiz olarak tasarladıkları makine analizinde açık oluklu sistemlerin eddy kayıplarının yüksek olduğu vurgulanmış ve bu kayıpları azaltıcı çalışmalar yapmışlardır[20].

Kahourzade çalışmasında EASM makinelerin; üretimi, özellikleri, elektromanyetik ve termal modellemesi, simülasyon, analiz, tasarım malzeme ve üretim biçimleriyle genel bir incelemede bulunmuş. Özellikle EASM makinelerin tasarımı ve performans analizleri üzerinde durarak, farklı tip sabit mıknatıslı makineler ile karşılaştırmasını yapmıştır[21].

Bahador ve arkadaşları çalışmalarında EASM makinelerde en önemli bileşen olan mıknatısların demanyetikleşme durumları üzerinde durarak makine sıcaklığının

optimum değerinin korunması ve makine içerisinde oluşabilecek uç faz kısa devre durumunda mıknatısların manyetik akı yoğunluğu üzerindeki olası etkileri üzerinde durmuşlardır[22].

Kim ve Sarlioğlu çalışmalarında denizlerde kullanılan gel-git türbinleri için EASM alternatör tasarımı gerçekleştirmişler. Stator- rotor çapları, hava aralığı ve mıknatısların manyetik davranışlarını göz önünde bulundurarak makine boyutunu hesaplayıp 3D simülasyonu oluşturmuşlar. Oluşturulan simülasyonu SEY ile analiz ederek referans makine ile karşılaştırmalarını yapmışlar[23].

Huang ve arkadaşları çalışmalarında ilk olarak hafif elektrikli araçlarda kullanılan EASM makinelerin oluşturduğu vuruuntu momentinin sebeplerini SEY ile araştırmışlar. Vuruuntu momentini gidermek için mıknatıs adımlarını klterek yamuk çift katmanlı mıknatıs yapısını tasarımlarında kullanmışlar. Son olarak tasarımlarını tek taraflı aksenal akılı makine ile test ederek vuruuntu momentini %70 oranında azaltmışlar[24].

Lim ve arkadaşları çalışmalarında elektrikli bisikletler için EASM bir makinenin optimal tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarım modelini geliştirmek için fazla zaman ve çaba gerektiren 3D SEY yerine Pareto ile n tasarımı gerçekleştirip Samoo algoritması ile optimal tasarım sonucunu elde etmişlerdir[25].

Ajily ve arkadaşları EASM makinelerde oluşabilecek mıknatıs deformasyonu, statik ve dinamik dış merkezlilik ve oluşabilecek düzensiz manyetik dağılımı önlemek için farklı bir yöntem üzerinde çalışmışlar. Tasarım sürecinde kullanılan bu teknik ile makinenin uç boyutlu tasarımı ve analizi sürecinde yüksek analiz yükünü azaltmışlardır[26].

Wibowo ve arkadaşları yarı uç boyutlu yaklaşımına dayalı bir analiz yöntemi ile tek rotorlu oluksuz EASM alternatörün endüktansını ve oluşturacağı elektromanyetik alan yoğunluğunu renebileceklerini ve bu yöntemin sonlu elemanlar yönteminden çok daha az zaman alacağını analizini yapmışlar. Yapılan analizleri deneysel yöntem ile elde ettikleri sonuçlar ile de doğrulamışlar[27].

Jin ve arkadaşları çalışmalarında EASM bir makinenin uç boyutlu manyetik alan analizini yapmışlardır. alışmalarında uç boyutlu analizi silindirik manyetik skaler potansiyeli ve yeni Bessel koordinat sistemleri fonksiyonlarını kullanarak yapmışlar.

Makinenin manyetik alan dağılımı ve elektromanyetik alanın doğruluğunu SEY ile kanıtlamışlar[28].

Muljadi ve Green EASM makinelerin en önemli dezavantajlarından olan vuruğu momentini azaltıcı çalışmalar yapmışlardır. Gürültü ve mekaniksel titreşime neden olan vuruğu momentini azaltmak için kutup genişliği, hava aralığı ve simetri düzenleme yöntemlerini denemişlerdir. Stator oluk eğimi ve kutup eğimi ile vuruğu momentinin azaltılabileceğini göstermişlerdir[29].

Aküner ve Hüner çalışmalarında EASM makinelerde, hava aralığının ve kutup açısının makine performansına etkisinin önemini belirtirken yaptıkları manyetik analiz sonucunda en uygun hava aralığı ve en uygun kutup açısı değerini belirlemişlerdir[30].

Aküner ve Hüner çalışmalarında açık oluklu EASM bir alternatör tasarlayarak, tasarımın manyetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak da yaptıkları tasarımı analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Alternatörün açık oluk yapısı stator maliyetini düşürürken, kullanılan dikdörtgen geometrideki mıknatıslar ile rotor maliyetini düşürmüşlerdir[31].

Hüner ve Aküner çalışmalarında aksel akı makinelerin gelişimi, yapısı, çeşitleri, makine üzerine yapılan çalışmaları ve makine kontrol sistemleri üzerine incelemede bulunmuş olup gelişmekte olan bir alan olduğunu üzerinde durmuşlardır[32].

Aydın ve arkadaşları çalışmalarında EASM makinelerin vuruğu momentini gidermek için rotor ve stator tarafına yapılabilecek çalışmaları sunmuşlardır. Radyal akı makinelerde kullanılan vuruğu momentini azaltıcı yöntemlerinin aksel akı makineler içinde kullanılabileceğini ancak bu durumun stator üretim maliyetini arttıracığından maliyeti düşürücü farklı yöntemler üzerinde durmuşlardır[33].

Literatürde yapılan çalışmalar; EASM makinelerin farklı alanlarda kullanılması, farklı EASM makine tiplerinin hazırlanması, vuruğu momentinin giderilmesi, akı zayıflatma tekniklerinin uygulanması ve genel makine eşitliklerinin çıkarılması üzerine yapılan çalışmalardır.

EASM alternatörlerde kullanılan yüksek manyetik enerjili mıknatısların stator olukları ile etkileşimi sonucu oluşan vuruğu momenti, bu makinelerin tasarımındaki en hassas konudur.

Literatürde EASM alternatörlerin kutup açılarının, lineer arttırılarak her bir mıknatıs açısında vurutu momentinin ve alternatör performansının değişiminin gözlemlendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

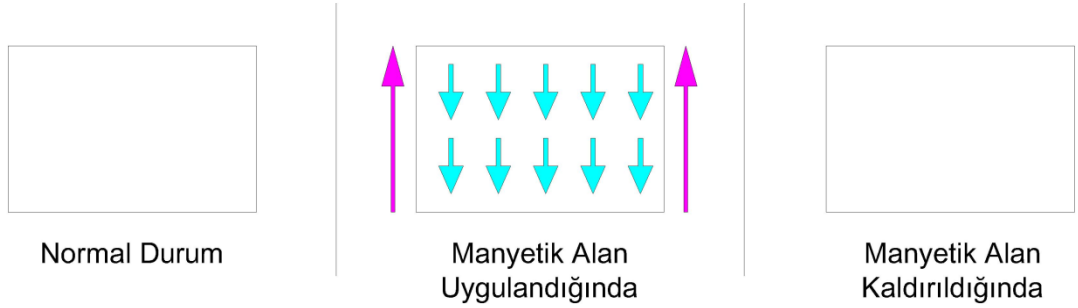
Bu çalışmada, toroidal sargılı açık oluklu NN tip aksenal akılı sabit mıknatıslı alternatör tasarlanarak üretimi gerçekleştirilecektir. Tasarlanan alternatörün SEY ile manyetik analizi yapılacak, en uygun hava aralığı ve mıknatıs açısı belirlenerek tasarımı yapılan alternatör üretilecektir. Üretimi gerçekleştirilen alternatörde mıknatıs açısının değişiminin, vurutu momenti üzerindeki etkisi incelenerek yüklü ve yüksüz durumdaki alternatör performansı test edilecektir.

2. MANYETİK MALZEMELER

Maddelerin manyetik özelliklerini belirleyen atomlarındaki elektronlardır. Maddelerin atomlarında birbiri ile eşleyen veya eşleşmeyen elektronlar bulunur. Eşleşen elektronların dönme yönleri birbirlerinin tersi olduğundan oluşan zıt manyetik alanlar birbirini yok eder. Elektronların bu durumuna bakarak maddelerin manyetik özellikleri belirlenir[34].

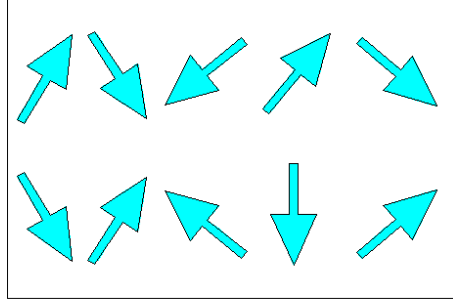
Manyetik malzemeler Diamanyetik, Paramanyetik, Ferromanyetik, Antiferromanyetik ve Ferrimanyetik olmak üzere beş gruba ayrılır.

Demir (Fe) gibi diamanyetik malzemelerin atomlarındaki elektronların tamamı eşleştiğinden net bir manyetik alan oluşturmazlar. Dolayısı ile bu malzemelere manyetik alan uygulandığında, uygulanan manyetik alan yönüne zıt elektron hareketi oluşur. Manyetik etki ortadan kalktığında ise elektron hareketi durur dolayısı ile kalıcı olarak mıknatıslanmazlar[34,35]. Şekil 2.1' de diamanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri verilmiştir.



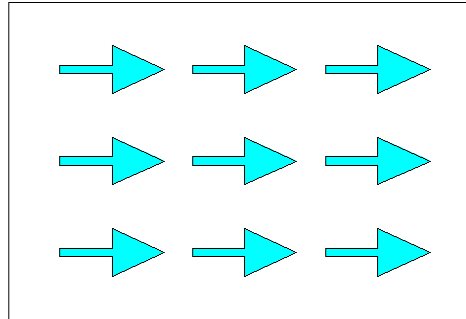
Şekil 2.1 : Diamanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.

Platin (Pt), Alüminyum (Al) gibi paramanyetik malzemeler küçük de olsa bir manyetizmaya sahiptirler. Bu malzemelere manyetik alan uygulandığında şekil 2.2' de simüle edildiği gibi elektronlar aynı yönde dizilerek yönlendirilmiş bir manyetik moment oluştururlar. Bu manyetik moment sıcaklıkla çok fazla etkilendiğinden bu malzemelerde kalıcı olarak mıknatıslanma oluşturulamamaktadır[34,35].



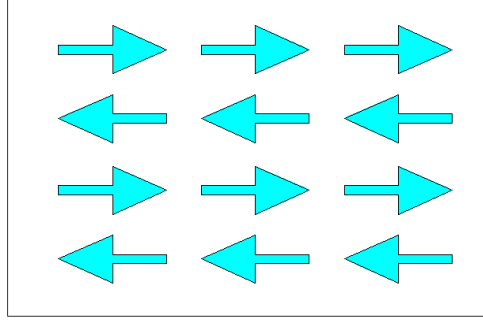
Şekil 2.2 : Paramanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.

Ferromanyetik malzemeler, zayıf bir manyetik alan içerisinde kalsalar bile atomlarındaki manyetik dipoller birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışırlar. Dipol momentler paralel hale geldikten sonra dış manyetik alan kaldırılrsa bile ferromanyetik malzeme mıknatıslı olarak kalacaktır. Bu süreklilik komşu manyetik momentlerin kuvvetli etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu malzemeler ısı enerjisi veya dış manyetik alanın oluşturduğu manyetik enerji ile kalıcı mıknatıslanma kazanabilirler[35]. Şekil 2.3’ de ferromanyetik malzemelerin manyetik davranışları gösterilmiştir.



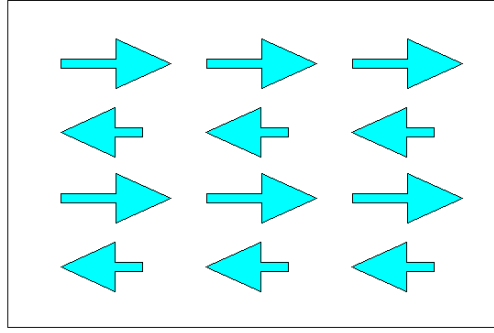
Şekil 2.3 : Ferromanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.

Antiferromanyetik malzemelerde komşu momentler birbirine eşit ve zıt yönde olduklarından üretilen net manyetik alan sıfırdır. Şekil 2.4’ de antiferromanyetik malzemelerin manyetik davranışları gösterilmiştir[34].



Şekil 2.4 : Antiferromanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.

Ferrimanyetik malzemeler de şekil 2.5’de görüldüğü gibi, komşu momentler birbirine zıt yönde fakat büyüklük olarak farklı olduklarından azda olsa üretilen bir moment vardır[37].



Şekil 2.5 : Ferrimanyetik malzemelerin manyetik yönelimleri.

2.1 Yumuşak Manyetik Malzemeler

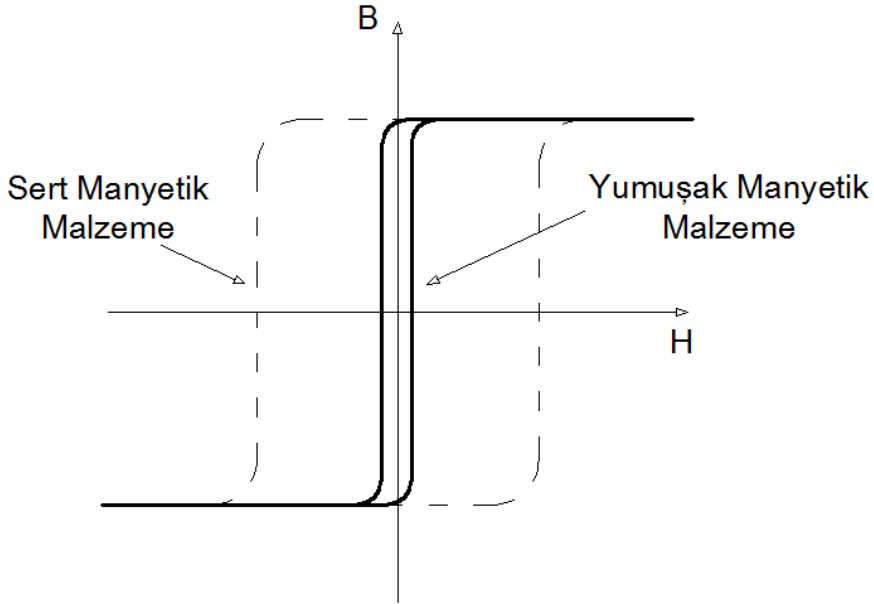
Ferromanyetik malzemelerin mekanik dayanımları ve manyetik yoğunluklarını arttırabilmek için yapılan çalışmalar sonucunda bu malzemelerde manyetik olarak gruplama yapılmıştır. Bir mıknatıs manyetik özelliklerini kolaylıkla kaybedebiliyorsa yumuşak (soft) manyetik malzeme adını alır. Bu malzemenin manyetik özelliklerini kolaylıkla kaybediyor olması tersi durumda da manyetik özelliklerini kolaylıkla kazanabileceği anlamına gelir. Bu malzemeler mekanik olarak da yumuşak malzemelerdir. İlk yapay mıknatıslardan olan çelik mıknatıslar yumuşak manyetik malzemelere örnek gösterilebilir[34-36].

Yumuşak manyetik malzemeler kendilerini kolaylıkla manyetize ve demanyetize ettirebilen, yüksek geçirgenlikli ve düşük koersiviteli (2-4-5) ($H_c < 1000$ A/m) olarak karakterize edilirler. Bu malzemeler yüksek geçirgenlikleri ve manyetik akı yoğunlukları sebebiyle elektrik makinelerinde manyetik devre olarak kullanılırlar.

2.2 Sert manyetik malzemeler

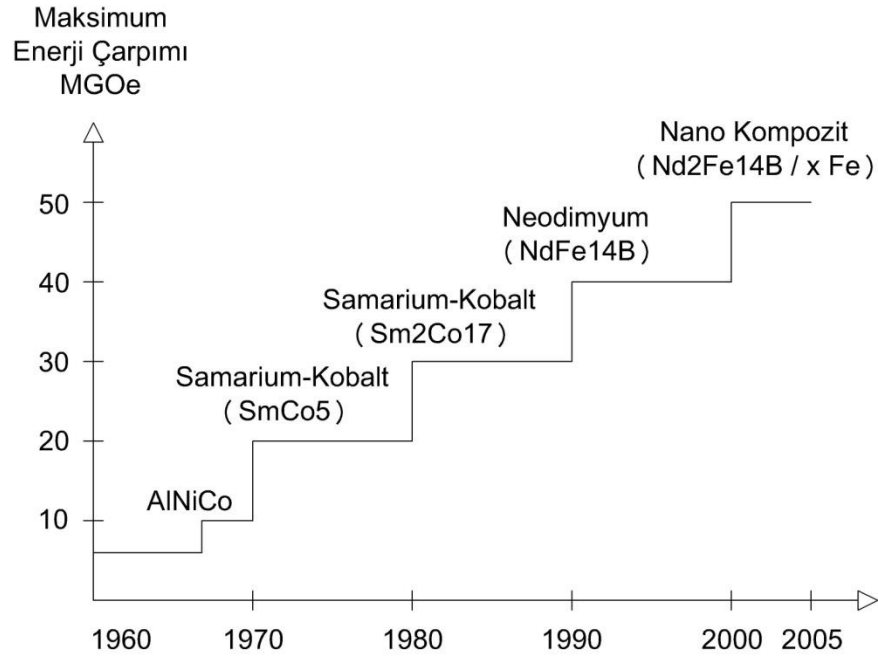
Kendileri daha zor manyetize ve demanyetize ettiren, düşük geçirgenlik ve yüksek koersiviteye sahip ($H_c < 10000$ A/m), yapısal olarak da sert ve kırılkan olan malzemelere sert manyetik malzemeler denir. Manyetize edilen bu malzemeler uzun süre mıknatıslanmalarını koruyabildiklerinden bu mıknatıslara sabit mıknatıs da denir[37].

Sert mıknatıslar; demir, nikel, kobalt gibi elementlerin çeşitli alaşımlarından oluşur. Bu mıknatısların kalıcı mıknatısiyetleri (B_r) ve mıknatıslanmayı giderici (H_c) kuvvetleri yüksek olduğu gibi büyük B-H eğrilerine sahiptirler. Şekil 2.6'da bu manyetik malzemelerin B-H eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.6 : Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin B-H eğrileri.

Manyetik malzemeler kimyasal yapılarına göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar; AlNiCo, Ferrit ve Nadir Toprak Elementli mıknatıslardır. Nadir toprak elementli mıknatıslar ise Samaryum – Kobalt Mıknatıslar (SmCo) ve Neodyum - Demir – Bor Mıknatıslar (NdFeB) ikiye ayrılırlar. Sabit mıknatısların tarihsel gelişim süreçleri Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Maksimum enerjilerine göre sabit mıknatısların gelişim süreci.

2.3 Alüminyum – Nikel – Kobalt Mıknatıslar (AlNiCo)

1930’lu yıllarda üretilen bu mıknatıslar Alüminyum, Nikel ve Kobalt elementlerinin çeşitli oranlardaki sıvı alaşımlarının dökümü veya metal tozlarının preslenerek sıkıştırılması ile üretilen yüksek induksiyona sahip mıknatıslardır.

Manyetik yoğunlukları nadir toprak elementli mıknatıslara göre daha düşük olan AlNiCo mıknatısların çalışma sıcaklıkları 860 °C’ye kadar çıkmaktadır. Yapısal olarak sert ve dayanıklı olan bu mıknatısların mekanik dayanımları oldukça yüksektir[34].

Çizelge 2.1 : Preslenmiş AlNiCo mıknatısların özellikleri.

AlNiCo (Preslenmiş)	2	5	6	8
B_r (T)	0,71	1,05	0,94	0,76
H_c (kAm^{-1})	43,8	47,8	62,9	119
H_{ci} (kAm^{-1})	45,3	49,3	65,2	134
$(BH)_{max}$ (kJm^{-3})	11,9	24	23	36
μ_r	6,4	4	4,5	2,1
Yoğunluk (kg/m^3)	6837	7000	6892	6975
Curie Sıcaklığı (°C)	810	900	860	860

Çizelge 2.2 : Döküm AlNiCo mıknatısların özellikleri.

AlNiCo (Döküm)	2	5	6	8
B_r (T)	0,75	1,24	1,5	0,82
H_c (kAm⁻¹)	44,6	50,9	62,1	131,3
H_{ci} (kAm⁻¹)	46,1	54,1	63,7	148
(BH)_{max} (kJm⁻³)	13,5	43,8	31	42,2
μ_r	6,4	4,3	5,3	2
Yoğunluk (kg/m³)	7086	7308	7418	7252
Curie Sıcaklığı (°C)	810	900	860	860

2.4 Ferrit (seramik) mıknatıslar

1950’li yıllarda üretilen seramik olarak da adlandırılan ferrit mıknatıslar kalıcı manyetik indüksiyonlarına ve yapılarına göre sert ferrit mıknatıslar ve yumuşak ferrit mıknatıslar olmak üzere iki farklı şekilde üretilebilirler.

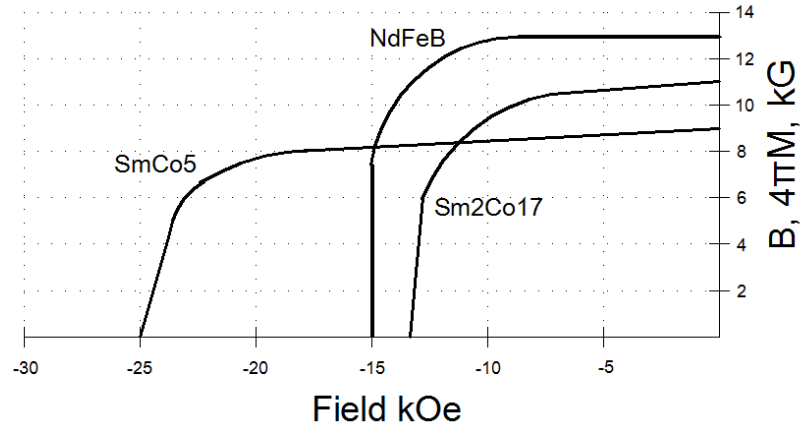
Ferrit mıknatıslar, Baryum ve Strontiumun elementlerinin karıştırılarak yüksek sıcaklıklarda preslenmesiyle oluşur[34]. Maliyetleri düşük olduklarından kalıcı mıknatıslı makine tasarımlarında tercih edilirler. Yapısal olarak sert ve kırılğan olmaları ise bu mıknatısların dezavantajlarından sayılabilir[38].

Çizelge 2.3 : Ferrit mıknatısların özellikleri.

	B_r (KGs)	H_c (KOe)	H_{ci} (Koe)	Bh_{max} (MGOe)
Seramik 1	2,2	1,86	3,25	1,1
Seramik 5	3,8	2,4	2,5	1,1
Seramik 7	3,4	3,25	4	2,75
Seramik 8	3,85	2,95	3,2	3,5
Seramik 10	4,2	2,95	3,05	4,2

2.5 Nadir Toprak Elementli Mıknatıslar

Azrak toprak mıknatıslar olarak da bilinen bu mıknatısların yapısında atom sayıları 58–71 arasında bulunan geçiş grubu elementleri barındırırlar. Samaryum ve Neodyum içerikli nadir toprak elementli mıknatıslar doğada çok karmaşık bileşikler halinde bulunurlar. Dolayısıyla bu elementlerin ayrıştırma işlemi zor ve maliyeti yüksek bir işlemdir. Şekil 2.8’de demanyetikleşme eğrisi verilen bu manyetik malzemeler, mıknatıs teknolojisinde ki en güçlü mıknatıs grubudur.



Şekil 2.8 : Nadir toprak elementli mıknatısların demanyetikleşme eğrileri.

2.5.1 Samaryum – Kobalt mıknatıslar (SmCo)

1966’lı yıllarda keşfedilen Samaryum – Kobalt mıknatıslar, takip eden yıllarda K.J. Strnat tarafından geliştirilmiştir. SmCo_5 ve $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ bileşimlerinden üretilen SmCo mıknatısların üretilmesi ile birlikte yüksek enerji değerinde nadir toprak elementli mıknatıslar dönemi de başlamıştır[39].

Samaryum Kobalt mıknatısların enerji üretimleri 32 MGOe (255 kJ/m^3) iken 350°C ye kadarki sıcaklıklarda kullanılabilir olması bu mıknatısların en önemli özelliklerindedir. Samaryum elementinin doğada zor bulunması ve akabinde bu elementin pahalı olması bu mıknatısların dezavantajlarından sayılabilir[39,40].

Çizelge 2.4 : Samaryum – Kobalt (SmCo) mıknatısların özellikleri.

	SmCo₅	Sm₂Co₁₇
B_r (T)	0,83	1
H_c (kAm⁻¹)	600	480
H_{ci} (kAm⁻¹)	1440	558
(BH)_{max} (kJm⁻³)	128	192
μ_r	1,05 - 1,1	1,05
Yoğunluk (kg/m³)	8200	8100
Curie Sıcaklığı (°C)	700	750

2.5.2 Neodyum - Demir – Bor mıknatıslar (NdFeB)

Neodyum mıknatısların gelişimi 1982’li yıllardan günümüze kadar uzanır. Neodyum elementinin kobalta göre doğada daha çok bulunması ve maliyetlerinin SmCo mıknatıslara göre daha düşük olması bugüne kadarki gelişimlerinin başlıca nedenlerindedir. Küçük boyut ve düşük ağırlıklarda üretilebilmeleri diğer mıknatıs türlerine göre üstünlüklerindedir[38,39].

Neodyum mıknatıslar iki neodyum atomu, on dört demir ve bir bor atomundan oluşur ve kimyasal olarak Nd₂Fe₁₄B şeklinde ifade edilirler[39].

48 MGOe (382 kJ/m³)enerji üretimine sahip NdFeB mıknatıslar en yüksek enerji üretimine sahip mıknatıslardır. Bu mıknatısların yüksek akı yoğunlukları ve kalıcı indüksiyonları ile sabit mıknatıslı makine tasarımında önemli bir yere sahiptirler. Çalışma sıcaklıkları 80 °C – 220 °C arasındadır. Bu mıknatısların en önemli dezavantajları ise curie sıcaklıklarının düşük olması ve maliyetlerinin yüksek olmasıdır[39,40].

Çizelge 2.5 : Polimer bağlı (NdFeB) mıknatısların özellikleri.

Polimer Bağlı NdFeB Mık.	B _r (KGs)	H _c (KOe)	H _{ci} (Koe)	Bh _{max} (MGOe)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Recoil Perm.	Sıcaklık Etls. B _r (% °C)	Çalışma Sıc. °C
BNP-6	5,2-6	3,8-4,5	8-10	5-7	5,3-5,8	1,15	-0,13	140
BNP 8	6-6,5	4,5-5,5	8-12	7-9	5,6-6	1,15	-0,13	140
BNP-10	6,5-7	4,5-5,8	8-12	9-10	5,8-6,1	1,22	-0,07-0,10	120
BNP-12	7-7,6	5,3-6	8-11	10-12	6-6,2	1,22	0,13	120

Çizelge 2.6 : Preslenmiş (NdFeB) mıknatısların özellikleri.

Preslenmiş NdFeB Mık.	B _r (KGs)	H _c (KOe)	H _{ci} (Koe)	Bh _{max} (MGOe)	Curie °C	Çalışma Sıc. °C
N28UH	10,2-10,8	> 9,60	> 25	26-29	350	180
N33UH	11,3-11,7	> 10,7	> 25	31-34	350	180
N35	11,7-12,1	> 10,9	> 12	33-36	310	80
N35SH	11,7-12,1	> 11,0	> 20	33-36	340	150
N40	12,5-12,8	> 11,6	> 12	38-41	310	80
N42H	12,8-13,2	> 12,0	> 17	40-43	320	120
N48	13,8-14,2	> 10,5	> 11	46-49	310	80

3. SABİT MİKNATISLI SENKRON ALTERNATÖRLER

Yüksek enerji yoğunluklu nadir toprak elementi mıknatısların keşfi ve günümüzdeki gelişimleri mıknatıs uyarımlı elektrik makinelerinin önünü açmıştır. Sabit mıknatısların elektrik makinelerinin uyarımının da kullanılması ile uyarım için ayrı bir sargının ve güç kaynağının ihtiyacını ortadan kaldırmış, daha kompakt yapıdaki elektrik makinelerinin tasarımını gerçekleştirmiştir. Sabit mıknatıslı senkron alternatörler (SMSA), alan sargılı olarak da adlandırılan geleneksel senkron alternatörlerdeki rotor sargıları yerine mıknatısların yerleştirildiği sabit uyarımlı alternatörlerdir[39].

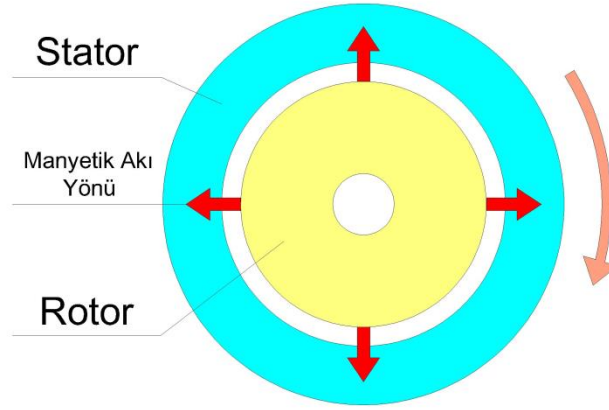
Senkron alternatörler ilk kalkınma anında bir uyarıma ihtiyaç duyarlar. Alan sargılı senkron alternatörlerde uyarım, rotor üzerindeki sargılara harici bir kaynaktan gerilim uygulanması ile oluşur. SMSM' de ise uyarım rotor üzerine yerleştirilen mıknatıslar tarafından gerçekleştirilir. Dolayısı ile alan sargılı senkron alternatörlerinin rotorları sargılı iken, SMSM' in ise rotorları sargısız ve mıknatıslıdır. Bu iki grup alternatörün statorları ise benzer yapıdadır.

SMSM' lerin rotorlarında sargı yerine mıknatıs kullanılması, fırça ve bilezik gruplarından doğabilecek mekanik arızaları ve bakım masraflarını ortadan kaldırdığı gibi alternatör verimini aynı güçteki alan sargılı senkron alternatörlere göre daha yüksek olmasını sağlamaktadır. SMSM' nin rotorlarında sargı bulunmadığından bakır kayıpları oluşmaz. SMSM' de neodimyum (NdFeB) gibi yüksek enerjili mıknatısların kullanılması nedeniyle hava aralığı indüksiyonu sargılı rotorlu alternatörlere göre daha yüksektir. Dolayısıyla SMSM' lerin aynı güçteki alan sargılı senkron alternatörlere göre boyut olarak ta daha küçüktür[37].

3.1 Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörler

Radyal akılı sabit mıknatıslı (RASM) alternatörler, sabit mıknatıslı makine tasarımında yaygın olarak kullanılan, tasarımı basit ve üretim maliyeti düşük olan alternatör tipidir. RASM alternatörler manyetik akı yolunun rotor miline dik olduğu, radyal hava aralığına sahip makinelerdir. RASM alternatörlerde akım eksenel olarak

akarken, manyetik akı radyal bir yol izler. Şekil 3.1’ de RASM alternatörün temel yapısı ile birlikte manyetik akı yönü gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : RASM alternatörün yapısı ve manyetik akı yönü.

RASM alternatörlerin rotorlarında bulunan manyetik yoğunluğu yüksek mıknatısların manyetik yolunun, stator oluklarında kesilmesi ile vuru momentini oluşturur. Vuru momentini RASM alternatörlerde mekanik gürültü ve titreşime neden olurken, alternatör performansını önemli ölçüde etkiler. Alternatörde vuru momentini azaltmak için stator oluklarına veya mıknatıslara eğim verilebileceği gibi özel tasarımı mıknatıslarda kullanılabilir. Rotor tarafında yapılabilecek bu değişiklikler üretim maliyetini çok arttırdığından, alternatörün vuru momentini azaltmak için kullanılan yöntem olarak tercih edilmezler. Bunun yerine daha ekonomik olan stator tarafına uygulanan, yardımcı oluk, yardımcı diş ve kesirli sargı kullanımı gibi teknikler tercih edilmektedir.

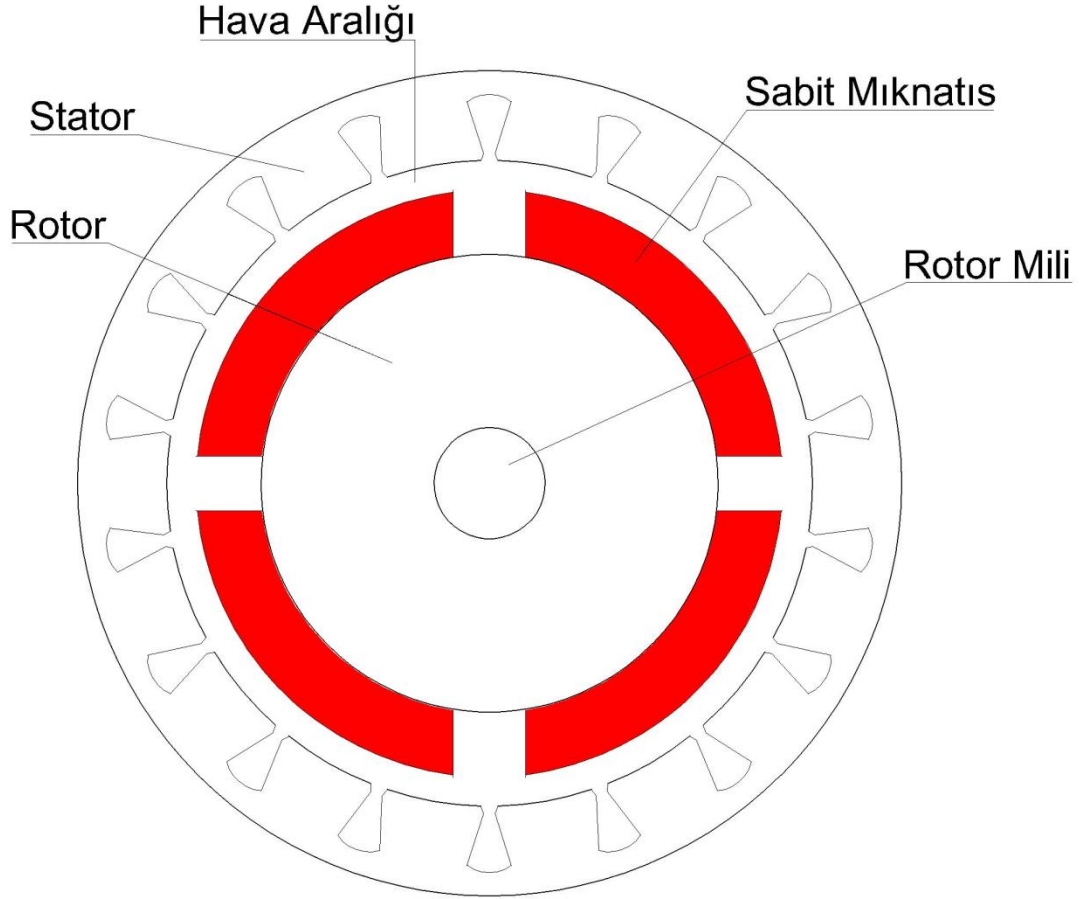
RASM alternatörlerde kullanılacak olan mıknatısların seçiminde; ağırlık, verimlilik, çalışma sıcaklığı ve maliyet dikkat edilmesi gereken faktörlerdendir. Alternatör performansını etkileyen bir diğer önemli faktör ise seçilen mıknatısların rotor üzerine yerleştirilme şeklidir. RASM alternatörler, mıknatısların rotor üzerine yerleştirilme şekline göre iki gruba ayrılırlar. Bunlar;

- Yüzey yerleştirmeli RASM
- Gömülü tip RASM

3.1.1 Yüzey yerleştirmeli RASM alternatörler

Mıknatısların çelik nüveli rotor yüzeyine ince şeritler veya yay şeklinde yerleştirildiği alternatör tipine yüzey yerleştirmeli RASM alternatör denir(Şekil 3.2). Özel yapıştırıcılar veya yüzey irtibat ekipmanları ile mıknatısların yüzeye yerleştirilmesi hava aralığı etkisini artırırken bunun yanında üretim maliyeti azalır ve basitleşir.

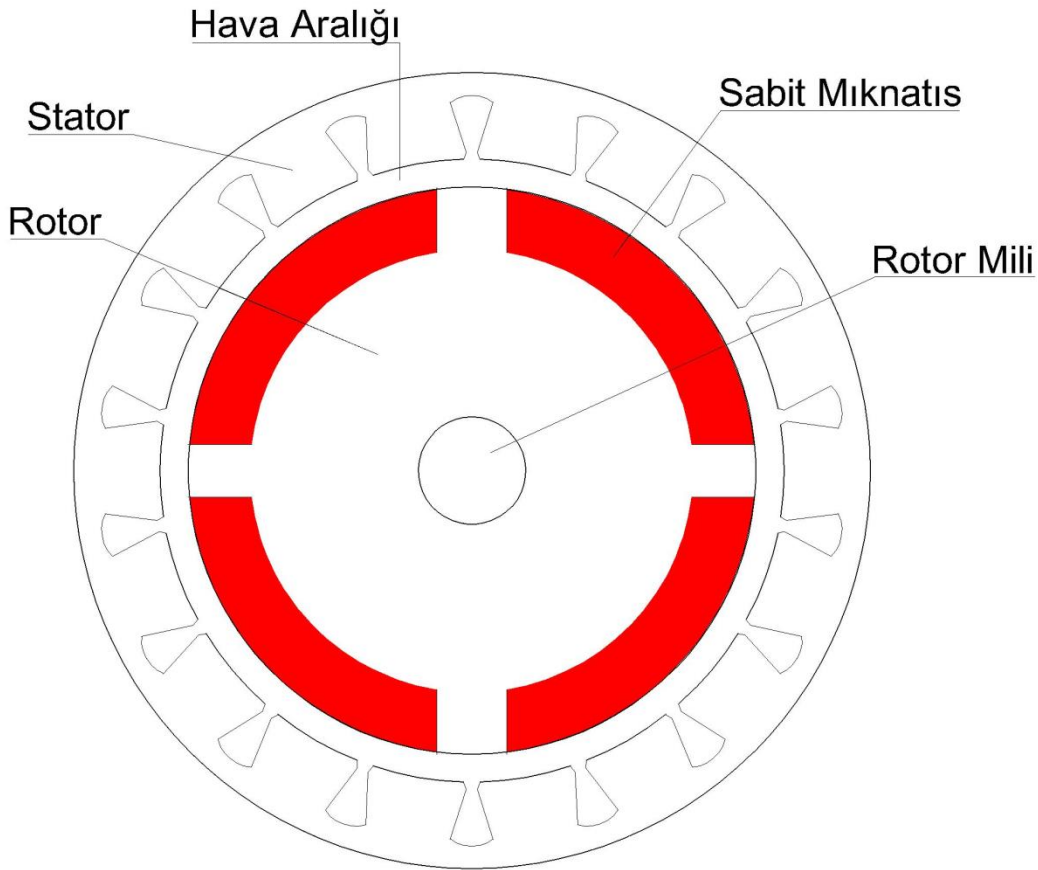
Basit yapıları sebebiyle yaygın olarak kullanılan bu alternatör türünün en büyük sakıncası rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatısların dönme hareketi ile birlikte yüksek merkezkaç kuvvetine maruz kalmalarıdır. Bu nedenle bu tip mıknatıs yerleşimi daha çok düşük devirli uygulamalarda tercih edilir. Bu alternatörlerin bir diğer sakıncası ise rotor yüzeyinde ki yüksek yoğunluklu mıknatıslar ile stator oluk dişleri arasındaki yüksek etkileşim ile birlikte ortaya çıkan moment deki dalgalanmadır[37,41].



Şekil 3.2 : Yüzey yerleştirmeli RASM alternatör.

3.1.2 Gömülü tip RASM alternatörler

Gömülü tip RASM alternatörlerde mknatsların bulunduğu alanlarda hava aralığı etkisi yüksek iken, mknats bulunmayan alanlarda ise hava aralığı etkisi düşüktür(Şekil 3.3). Bu yapıdaki alternatörlerde daha düşük hacimli mknatslar kullanılarak yüzey yerleştirmeli RASM alternatörler ile aynı moment retiler. Mknatslar rotor yüzeyine gömülü olduğundan mknatsların etrafında hava aralığı yerine rotor malzemesi kaplıdır. Bu durum ise alternatörde relüktans momenti oluşmasına neden olur. Gömülü tip RASM alternatörlerin yüzey yerleştirmeli RASM alternatörlere göre bir diğer üstünlüğü mknatsların rotor yüzeyine gömülü olması sebebiyle merkez kaç kuvvetine karşı mukavemetleri çok yüksektir. Bu nedenle yüksek hızlı uygulamalar için tercih edilirler. En büyük dezavantajları ise mknatsların yerleştirileceği yuvaların açılması zahmetli ve maliyetli bir iştir[39].



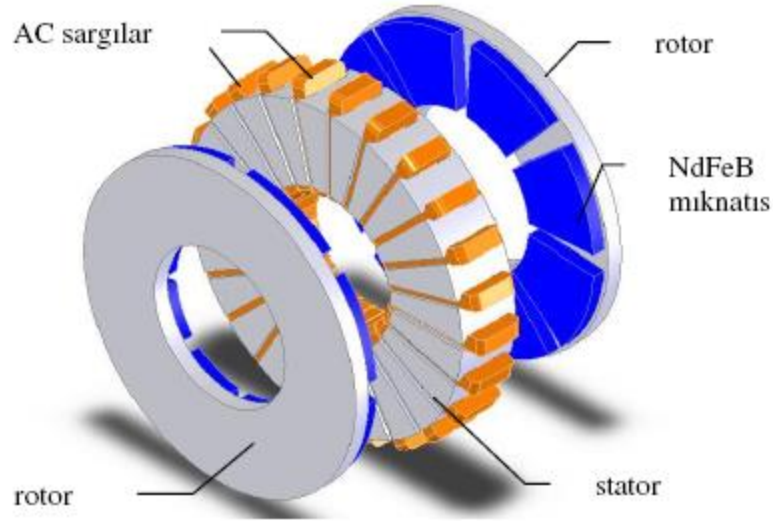
Şekil 3.3 : Gömülü tip RASM alternatör.

3.2 Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörler

19. yüzyılda Michael Faraday tarafından tasarlanan eksenel akılı alternatörler, son yıllarda mıknatıs teknolojisindeki önemli gelişmeler ile birlikte günümüz alternatör tasarımında önemli konulardan biri haline gelmiştir. Özellikle yüksek manyetik yoğunluğa sahip neodyum (NdFeB) mıknatısların günümüz teknolojisine kazandırılmasının eksenel akılı alternatörlerin gelişimine katkısı büyük olmuştur[32].

EASM alternatörler, manyetik akı yolunun rotor miline paralel olarak yönlendirildiği, eksenel hava aralığına sahip disk tipi alternatörlerdir(Şekil 3.4). Genellikle statoru yüzük, rotoru ise disk şeklinde üretilirler. Statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluk alternatörün güç üreten etkin kısmıdır.

Eksenel akılı alternatörler kutup sayıları yüksek olduğundan düşük hızlarda döndürüldüklerinde radyal akılı alternatörlere göre daha yüksek güç yoğunluğu sağladıklarından, küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinde alternatör olarak kullanılırlar. Ayrıca elektrikli araçlar, pompalar, fanlar, vana kontrolleri, robotlar ve endüstriyel ekipmanlar için motor olarak kullanılırlar[37,38].



Şekil 3.4 : EASM alternatörlerin yapısı.

Eksenel akılı alternatörler disk tipi modüler yapıları sayesinde ihtiyaca göre farklı stator ve rotor dizilimleriyle farklı yapılarda üretilebilirler. Bunların başlıcaları; tek rotor–tek stator, çift rotor–tek stator, tek rotor–çift statordur. Bu alternatörler farklı hava aralıklarıyla üretilebildiği gibi oluklu–oluksuz, nüveli–nüvesiz olarak da tasarlanabilmektedir.

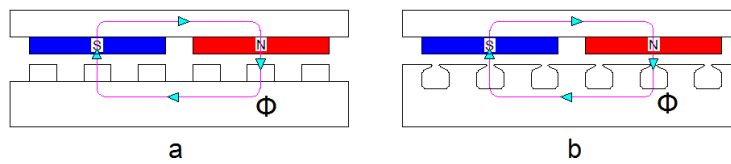
3.2.1 EASM alternatörlerin yapısı ve çeşitleri

Eksenel akılı alternatörlerin genel yapıları mıknatısların yer aldığı bir rotor ve sargıların yer aldığı statorun yan yana getirilmesi ile oluşur. Bu alternatörler stator-rotor dizilimi ve sayısı, mıknatısların yerleştiriliş biçimi ve nüve yapılarına göre sınıflandırılırlar.

- Stator – Rotor dizilimine göre
 - Tek kenarlı
 - Çift kenarlı
 - Multi Disk
- Mıknatısların yerleştiriliş biçimlerine göre
 - Gömülü tip sabit mıknatıslı
 - Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı
- Nüve yapılarına göre
 - Oluklu tip (nüveli)
 - Oluksuz tip (nüvesiz)

3.2.1.1 Tek kenarlı EASM senkron alternatörler

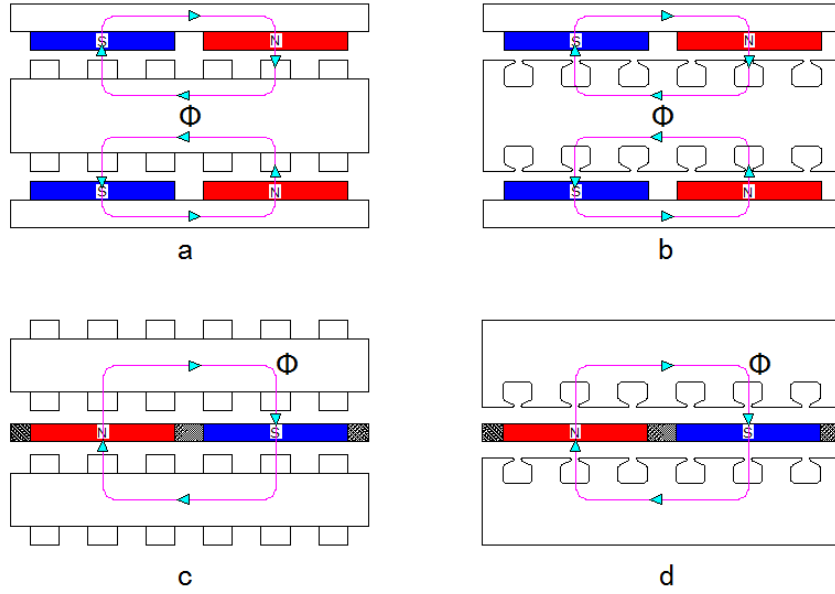
Eksenel akılı alternatörler içerisinde en basit yapıda olan bu alternatörlerin moment kapasiteleri de diğer alternatör türlerine göre daha düşüktür. Şekil 3.5’ de kesiti görünen alternatörler; statoru oluklu (a) ve oluksuz (b), yüzey yerleştirmeli mıknatısların yer aldığı bir rotordan oluşmaktadır. Genellikle asansör sistemlerinde kullanılmakla birlikte endüstride kullanımı yaygın değildir. Bu alternatör modelinde mıknatısların oluşturduğu manyetik akı N kutbundan statora girer, bir kutup boyunca statorda ilerledikten sonra mıknatısın S kutbu üzerinden geçerek rotor diski üzerinden devresini tamamlar.[43]



Şekil 3.5 : (a) Oluksuz tip stator ve yüzey yerleştirmeli mıknatıslı EASM alternatör, (b) Oluklu tip stator ve yüzey yerleştirmeli mıknatıslı EASM alternatörün manyetik akı yolları.

3.2.1.2 Çift kenarlı EASM senkron alternatörler

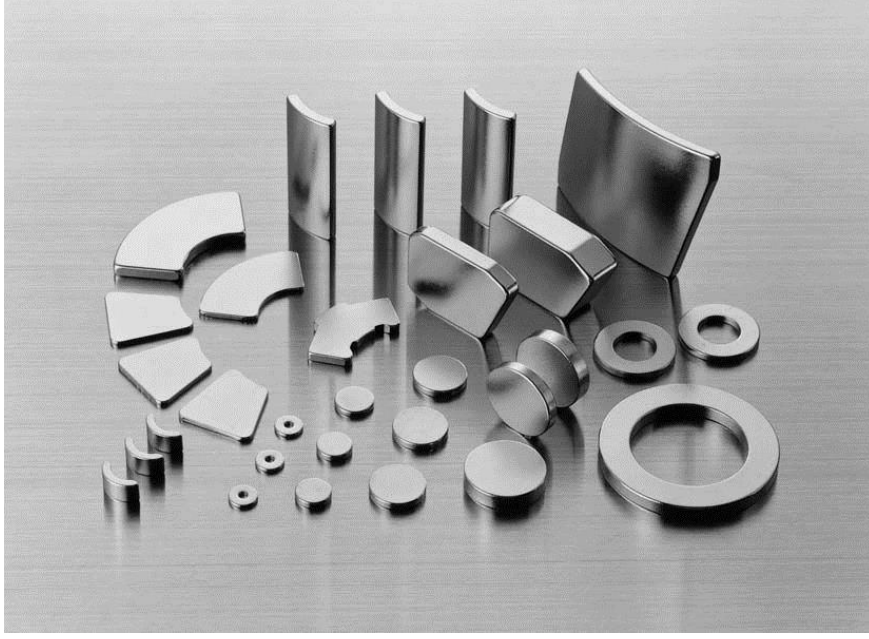
Bu alternatörler tek kenarlı aksel akılı alternatörlere göre moment kaliteleri ve yoğunlukları daha fazladır. Bu yapıdaki aksel akılı alternatörler; oluklu çift stator – tek rotor, oluksuz çift stator – tek rotor, oluklu tek stator – çift rotor, oluksuz tek stator – çift rotorlu olarak üretilmelerinin yanında mıknatıs dizilimlerine göre de farklılık gösterirler. Şekil 3.6’ da her bir alternatörün manyetik akı yolları çizilerek bu alternatörlerin manyetik davranışları gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6 : (a) Oluksuz iç stator dış rotorlu EASM alternatör, (b) Oluklu iç stator dış rotorlu EASM alternatör, (c) Oluksuz dış stator iç rotorlu EASM alternatör, (d) Oluklu dış stator iç rotorlu EASM alternatörlerin manyetik akı yolları.

3.2.2 EASM alternatörlerin stator ve rotor yapıları

Eksenel akılı alternatörlerin rotor diskleri manyetik geçirgenliği yüksek malzemelerden yapılır. Rotor diskleri üzerine yuva açılarak mıknatıslar yerleştirilebildiği gibi rotor diski üzerine yapıştırılır veya vida gibi materyaller ile de mıknatıslar sabitlenebilir. Kullanılan mıknatıslar rotor diskinde radyal olarak yerleştirilirler. Kullanılacak mıknatıslar özel tasarım mıknatıslar veya standart ölçüde olabilir. Ancak kullanılacak olan mıknatısların boyut ve şekil gibi parametrelerinin alternatör performansına etkisi göz ardı edilmemelidir[37].



Şekil 3.7 : EASM alternatörlerde kullanılan Neodyum mıknatıs yapıları.

Bu alternatörlerin statoru ise toroidal olarak sarılan silisyumlu saçların laminasyonu ile oluşturulur. Stator tasarımındaki en büyük zorluk ise nüve üzerine sargı oluklarının açılmasıdır. Bu işlem zahmetli olduğu kadar hassas ve maliyeti yüksek bir işlemdir.

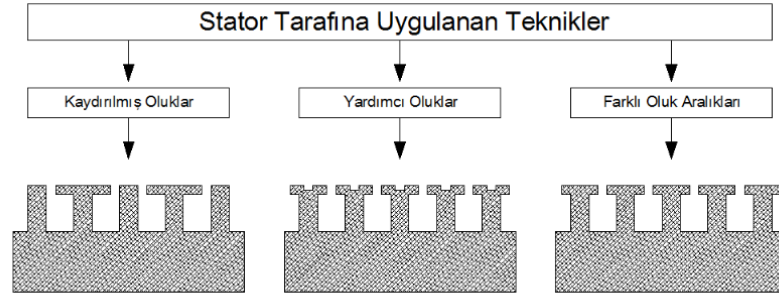
3.2.3 EASM alternatörlerde vurutu momenti

EASM alternatörler düşük hızlarda, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek moment üreten alternatörlerdir. Bu alternatörlerde kullanılan yüksek manyetik enerjili mıknatısların stator olukları ile manyetik etkileşimlerinin ortalama moment üzerine etkisine vurutu momenti denir. Düşük hızlarda çalışan EASM alternatörlerde vurutu momenti ile oluşan moment dalgalanmaları kabul edilemez derecede hız değişimlerine, alternatör titreşimlerine ve gürültüye neden olmaktadır. Alternatör çalışması ve verimi üzerinde ciddi sorunlar oluşturan vurutu momentinin en aza indirilmesi oldukça önemlidir. EASM alternatörlerin endüstriyel uygulamalarında kabul edilebilir vurutu momenti sınırı % 2–5 aralığındadır[37,38,41,44].

Sabit mıknatıslı radyal akılı alternatörlerde vurutu momentini azaltıcı birçok teknik EASM alternatörlerde de kullanılır. Bu tip alternatörlerde vurutu momentini azaltıcı teknikler, stator tarafında uygulanan teknikler ve rotor tarafında uygulanan teknikler olarak iki gruba ayrılır. EASM alternatörlerde stator tarafına uygulanabilecek tekniklerin zorluğu üretim maliyetini arttırdığı için tercih edilmezler. Daha ekonomik ve uygulanabilir olan rotor tarafındaki azaltıcı teknikler kullanılır[41,44].

3.2.3.1 Statora uygulanan vurutu momentini azaltıcı teknikler

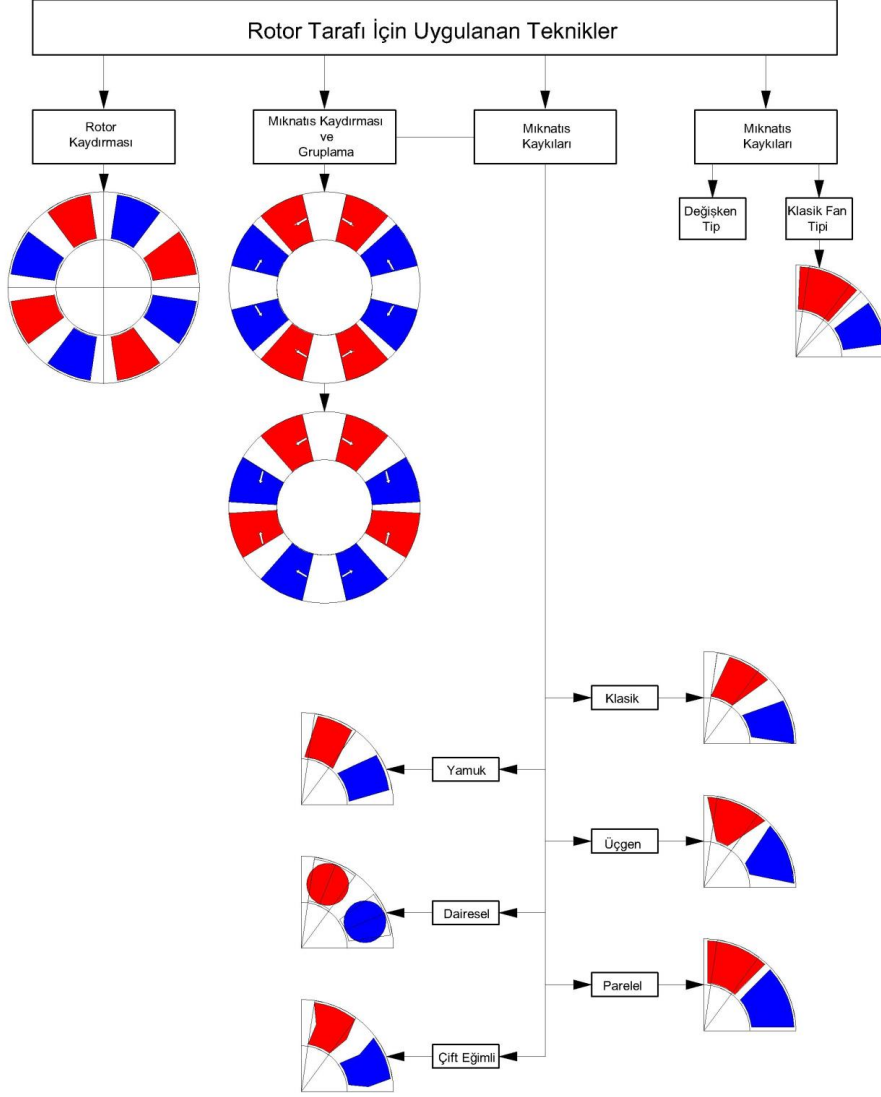
EASM alternatörlerde vurutu momentini azaltmak için stator tarafına uygulanabilecek teknikler; farklı oluk açıklıkları, stator dişlerine yardımcı olukların açılması, yüzey yerleştirmeli sargıların kullanılması ve kaydırılmış oluk yapısı sıralanabilir. Ancak stator tarafında uygulanan bu teknikler stator imalatını güçleştirmesi ile birlikte alternatör maliyetini arttırdığından endüstriyel alanda tercih edilmezler. Şekil 3.8’de statora uygulanan vurutu momentini azaltıcı tekniklerin bir kaçı gösterilmiştir[44].



Şekil 3.8 : Stator tarafına uygulanan teknikler.

3.2.3.2 Rotora uygulanan vurutu momentini azaltıcı teknikler

EASM alternatörlerde stator tarafında uygulanabilen vurutu momentini azaltıcı tekniklerin üretimleri zor ve maliyetleri yüksektir. Stator tarafına uygulanan vurutu momentini azaltıcı tekniklerin aksine, üretim kolaylığı ve düşük maliyetleri nedeniyle rotor tarafındaki tekniklerin uygulanabilirliği çok daha yüksektir. Bu nedenle EASM alternatörlerde vurutu momentini azaltıcı teknikler daha çok rotor tarafına uygulanmaktadır[44]. Rotor tarafında kullanılan başlıca teknikler; mıknatıs adımının kutup adımına oranının doğru seçilmesi, mıknatıslara yapısal kayk vermesi, mıknatıs dizilimlerinin kaydırılması veya gruplandırılması, kullanılan mıknatıs açılarının değiştirilmesi ve farklı eğimdeki mıknatısların kullanılması olarak sıralanabilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : Rotor tarafına uygulanan teknikler. [41]

3.3 Sabit Mıknatıslı Alternatörlerin Avantaj ve Dezavantajları

Mıknatısla uyarımı sağlanan RASM alternatörlerin, rotoru sargılı senkron alternatörlere göre avantajları ve dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Avantajları;

- Rotorlarında sargı yerine mıknatıs bulunması rotorda bakır kaybına neden olmadığı gibi farklı bir kaynaktan uyarım gerektirmez. Bu durum alternatör verimini yükseltir.
- RASM alternatörlerde fırça ve bilezik olmadığından bakım maliyetleri ve mekanik arıza riskleri daha azdır.
- Bilezik ve sargıların bulunmaması alternatör hacmini düşürür.

- Rotorlarında sargı bulunmadığından çalışma sıcaklıkları alan sargılı senkron alternatörlere göre daha düşüktür.
- Alan sargılı senkron alternatörlere göre güç faktörleri yüksektir.
- Elektriksel kontrolleri daha basittir.

Dezavantajları;

- Mıknatısların çalışma sıcaklıkları sınırlıdır ve manyetik özelliğini yitirmesi riskleri sistem güvenilirliğini zayıflatır.
- Nadir toprak elementi mıknatıslarının maliyetlerinin yüksek olması RASM alternatörlerin üretim maliyetini artırır.
- Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmesi akabinde alternatör çalışması ile oluşan merkezkaç kuvveti mıknatısların kopma durumuna neden olabilir.
- Sabit mıknatıs ve stator manyetik alanları arasında senkronizasyonu sağlayabilmek için rotor pozisyonu bilinmelidir. Buda sensörler ile yapılabildiği gibi alternatör maliyetini arttırmaktadır.

4. EASM ALTERNATÖRLERİN MANYETİK ANALİZİ

Sonlu Elemanlar Analizi - SEA (Finite Element Analysis- FEA) alternatör tasarımında manyetik alan problemlerinin çözümlenmesinde kullanılan en popüler yöntemdir. Günümüzde; MagNet, Maxwell, Flux, Vector Field, Jmag gibi yazılımlar ile alternatör tasarımında SEA yöntemi kullanılmakta olup bu yazılımlar birçok araştırmacı tarafından doğrulukları kanıtlanmıştır[17].

SEA ile tasarlanan alternatörün rotor ve stator üzerindeki manyetik doyum noktaları ve miktarlarının belirlenmesi bu yöntemin üstünlüklerinden birisidir. Ayrıca SEA ile alternatör tasarımının doğruluğu test edilebildiği gibi çıkış gücü, akımı, gerilimi, momenti gibi değerler de gözlemlenebilmektedir.

4.1 Maxwell 3D SEA Programı

Sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analiz yapılan programlardan biriside Ansys firmasının geliştirmiş olduğu Maxwell 3D programıdır. Maxwell 3D programı ile tasarlanan alternatörün manyetik ve transient çözümlenmeleri SEA yöntemi ile yapılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada maxwell 3D programı ile ilk olarak tasarlanan alternatörün fiziksel boyutları belirlenerek 3D modeli oluşturulacaktır. Oluşturulan modelde kullanılan malzemelerin her biri için malzeme özellikleri tanımlanacaktır. Kullanılan mıknatısların manyetik yönleri, bobinlerden geçen akım şiddeti ve yönü belirlenerek, hesaplanması istenilen parametreler sisteme girilecektir. İşlem hızını ve hassasiyetini etkileyen çözüm metodu ayarlanarak çözümlenme işlemi başlatılacaktır.

4.2 TAOEASM-NN Tip Alternatörün 3D Modellenmesi ve Analizi

Manyetik analizi yapılacak alternatörün öncelikle fiziksel parçalarının büyüklükleri ve malzeme özellikleri belirlenmelidir. EASM alternatörlerde statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluğu, momentin üretildiği etkin kısımdır. Bu alan lamda (λ) değeri ile ifade edilirken, lamda eşitliği stator iç çapının dış çapına oranı olarak ifade edilir[34]. Manyetik analizi yapılacak olan alternatörün stator büyüklüğü

daha önce yapılan çalışmalar ışında en verimli oran olarak belirlenen $\lambda=0,61$ ve ulaşılmak istenen güç yoğunluğu değerleri belirlenerek hesaplanmıştır. Statorun fiziksel büyüklüğü ile rotorun büyüklüğü de belirlenmiştir. Mıknatıs boyutları ise statorun radyal uzunluğu dikkate alınarak uzunluğu 40mm, genişlik değerleri sargı adımına bağlı olarak seçilirken, yükseklik değeri ise piyasada rahatlıkla ulaşılabilen boyutlar tercih edilerek üretim maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Mıknatıs sayısını statordaki oluk sayısına bağlı olarak belirlerken, mıknatıslar için eksen döndürme parçası tasarlanarak farklı mıknatıs açılarının alternatör performansına etkisini gözlemleyebilmek amaçlanmıştır.

4.2.1 TAOEASM-NN alternatörün 3D modellenmesi

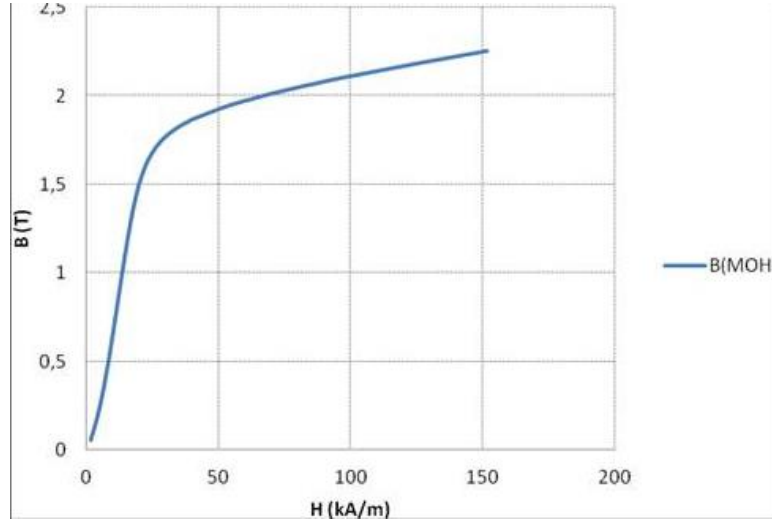
Tasarımı ve analizi yapılan toroidal sargılı açık oluklu NN tip eksenel akılı senkron alternatörün (TAOEASM-NN) belirlenen fiziksel boyutları Tablo 4.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tasarımın fiziksel boyutları.

STATOR	<i>Dış Çap</i>	210 mm
	<i>İç Çap</i>	130 mm
	<i>Kalınlık</i>	40 mm
ROTOR	<i>Çap</i>	210 mm
	<i>Kalınlık</i>	8 mm
NdFeB MIKNATIS	<i>Boy</i>	40 mm
	<i>En</i>	20 mm
	<i>Yükseklik</i>	10 mm
SARGI	<i>Genişlik</i>	8 mm
	<i>Yükseklik</i>	15 mm
	<i>Adet</i>	42
FAZ SAYISI		3
HAVA ARALIĞI		1- 10 mm
KUTUP SAYISI		14

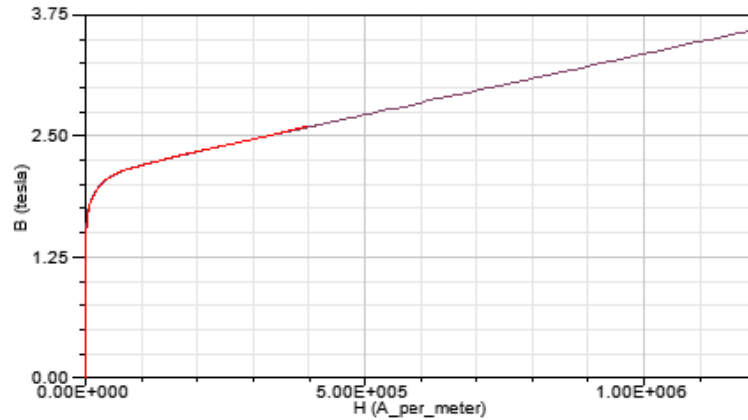
4.2.1.1 Malzeme tanımlamaları

Tasarlanan modelde nüve lamine edilmiş saçlardan oluşmaktadır. Gerçeğe yakın değerler elde edebilmek için tasarımda nüve BH eğrisi çıkarılarak sisteme girilmiştir. Manyetik analiz ile elde edilen nüve parametreleri, tedarikçi firmanın sunduğu nüve özellikleri ile karşılaştırılarak alınan değerlerin geçerliliği sağlanmıştır. Tasarımda kullanılan nüvenin BH eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : MOH nüvenin BH eğrisi.

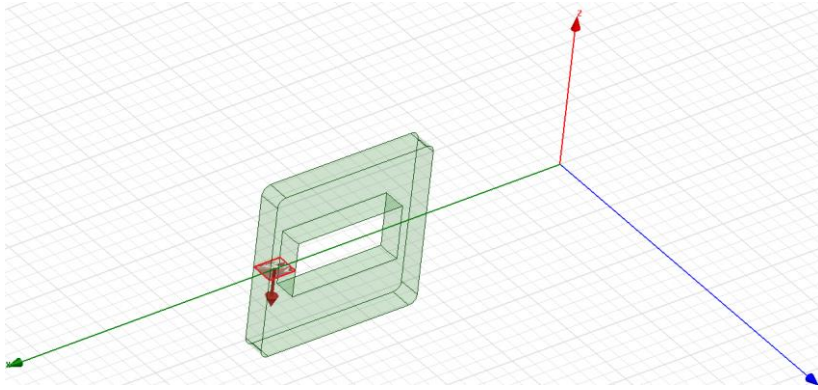
Analizde kullanılan sargılar tek parça bakır, rotorlar ise Steel 1008 olarak program kütüphanesinden alınarak malzeme özelliği olarak atanmıştır. Yine mıknatıslar program kütüphanesinden NdFeB₃₅ olarak belirlenmiş ve 3D görsele bu parametre atanmıştır. Steel 1008 malzemesinin BH eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Steel 1008 BH eğrisi.

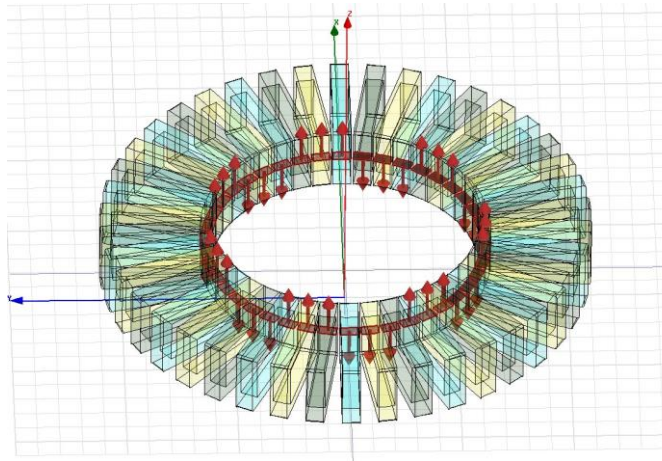
4.2.1.2 Sargılara terminal tanımlaması ve akım yoğunluğu

Üç fazlı tasarımda 42 adet sargı kullanıldığından faz başına 14 adet sargı düşmektedir. Maxwell programında çizilen çok sipirli bobinler tek bir sargı gibi davrandığından tasarımda önemli olan her bir bobin grubunun toplam iletken kesiti ve akım değeridir. Bu da bize birim kesitteki akım yoğunluğunu verir. Programda kesit ve akım değeri ayarlanarak uygulama sırasında sarılacak sipir sayısı ve bobin gruplarından geçirilen nominal akım değeri modellenebilir. Şekil 4.3'de bir bobin için terminal ve akım yönü gösterilmiştir. Tasarlanan sistemde bobinin terminal noktası 15mm x 8mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3 : Bir bobinin terminal noktası ve akım yönü.

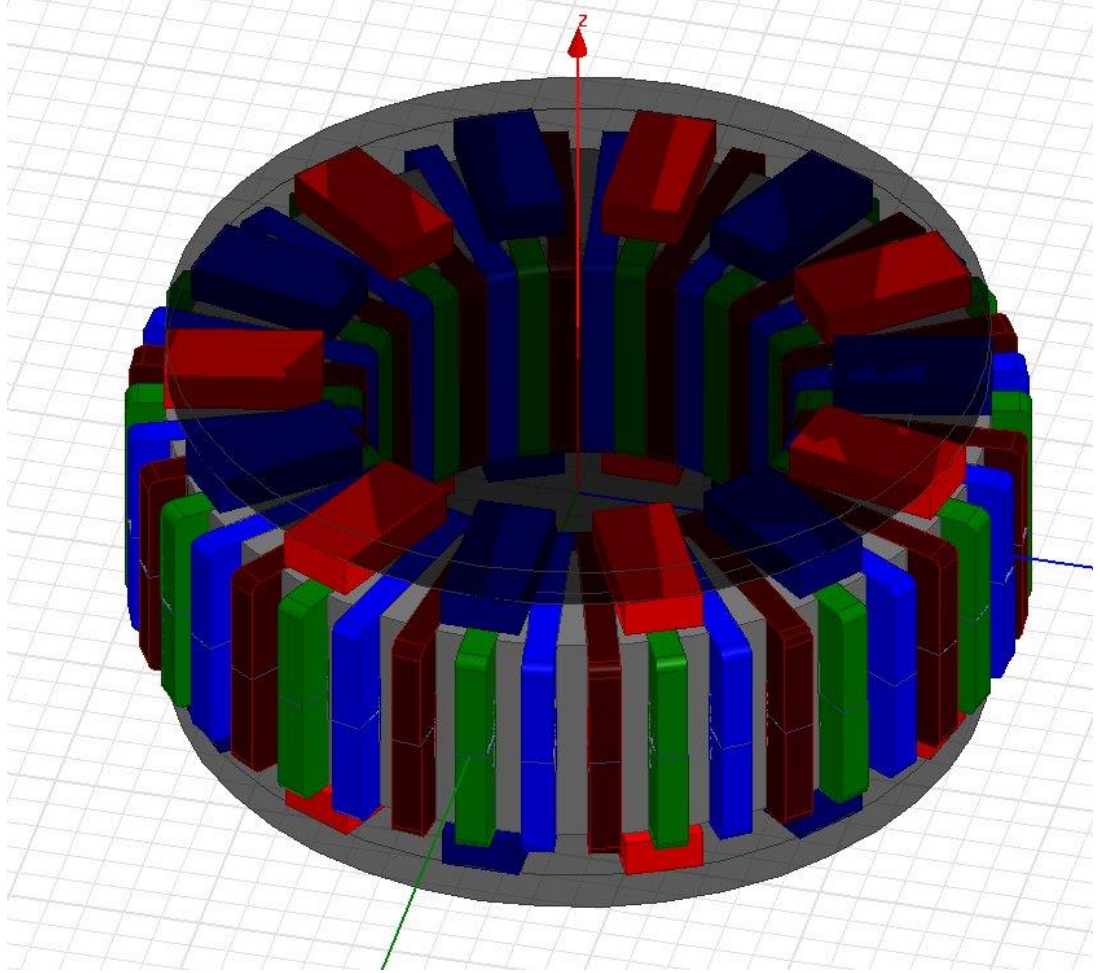
Şekil 4.4'de ise tüm bobin gruplarının terminal noktaları ve akım yönleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Tüm bobin gruplarının terminal noktaları ve akım yönleri.

4.2.1.3 Tasarımın 3D benzetimi

Tasarımda 42 oluklu, 14 kutuplu, tek stator – çift rotorlu, toroidal sargılı, açık oluklu, NN tip eksenel akılı senkron alternatörün (TAOEASM-NN) üç boyutlu çizimi yapılarak malzeme özellikleri çizim üzerine atanmıştır. Şekil 4.5’de stator, bobinler, rotor ve mıknatısların yer aldığı 3D simülasyonu verilmiştir.



Şekil 4.5 : Tasarımın 3D simülasyonu.

4.2.2 Tasarımın analiz sonuçları

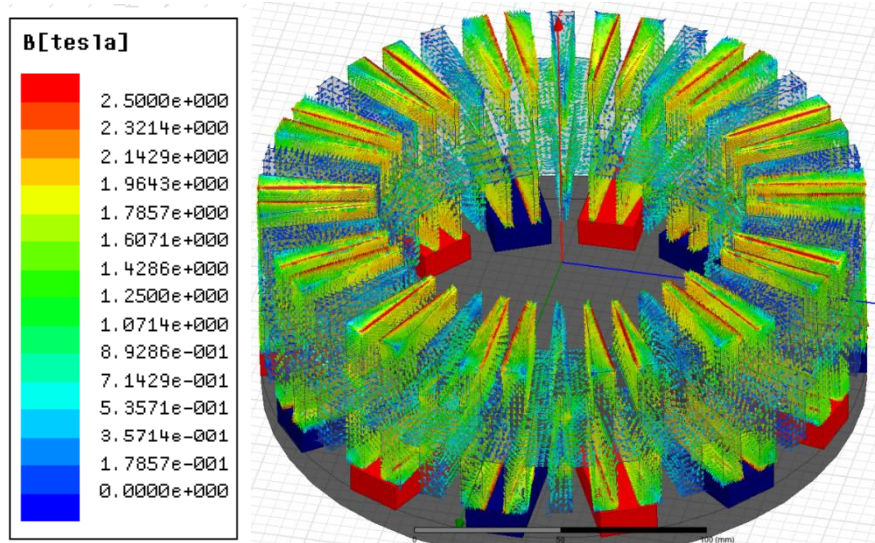
Tasarlanan 42 oluklu, 14 kutuplu, tek stator – çift rotorlu, toroidal sargılı, açık oluklu, NN tip eksenel akılı senkron alternatörün farklı hava aralığı değerlerindeki manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı hava aralığı değerlerindeki manyetik akı yoğunluğu tek bir grafik üzerinde gösterildi. Ayrıca farklı mıknatıs açılarına bağlı olarak alternatörün manyetik akı yoğunlukları, vurutu momenti ve üretilen gerilim değerleri alınarak her bir açı değeri için ayrı ayrı incelendi.

4.2.2.1 Tasarımın değişken hava aralığındaki manyetik analizleri

Tasarımın farklı hava aralığı büyüklüklerine karşı manyetik davranışı Maxwell 3D SEY ile belirlenmiştir. Stator ve rotor arasında 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm, 8mm, 9mm ve 10mm'lik hava aralığı değerlerinde, alternatörün manyetik analizi yapıldı. Her bir hava aralığında alternatördeki manyetik akı yoğunluğunun değişimi, vektörel dağılımı ve indüklenen ortalama manyetik akı değeri analiz sonucunda alınmıştır. Ayrıca değişken hava aralığında manyetik akı yoğunluğunun değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir.

1mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

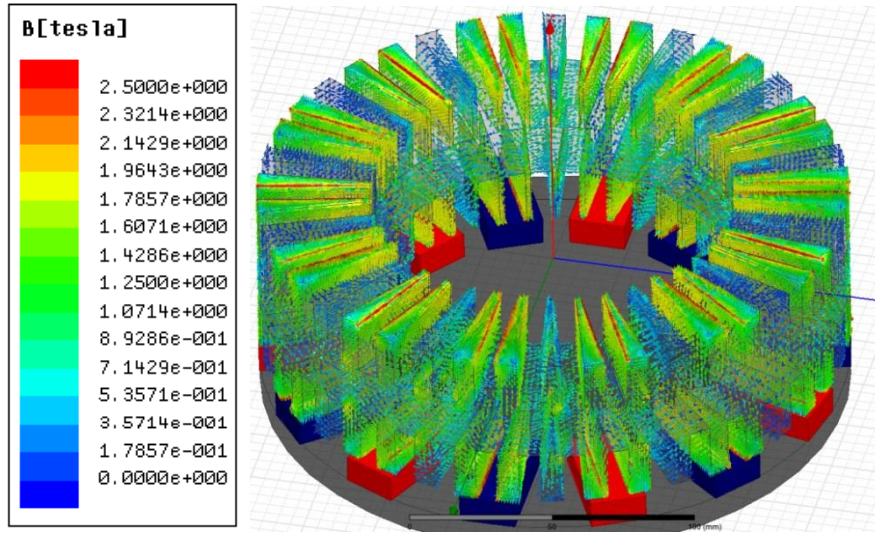
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 1mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.6' da verilmiştir. Kırmızı renge ulaşan noktalar alternatörün manyetik akı yoğunluğunun en yüksek seviyeye ulaştığı noktalardır. Bu noktalarda alternatör manyetik doyuma ulaşır. 1mm'lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 1,0425 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6 : 1mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

2mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

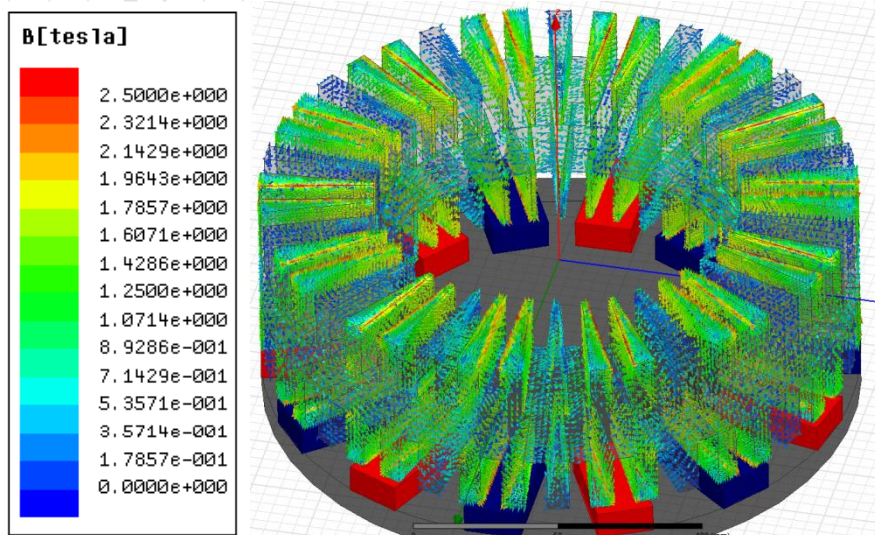
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 2mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.7'de verilmiştir. Kırmızı renge ulaşan noktalar alternatörün manyetik akı yoğunluğunun en yüksek seviyeye ulaştığı noktalardır. Bu noktalarda alternatör manyetik doyuma ulaşır. 2mm'lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,9611 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 : 2mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

3mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

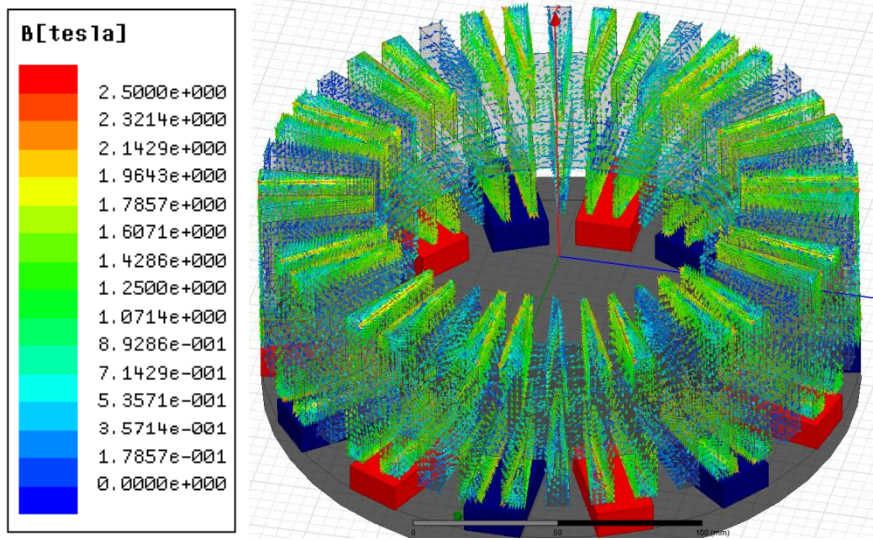
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 3mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.8’ de verilmiştir. Kırmızı renge ulaşan noktalar alternatörün manyetik doyuma ulaştığı noktalardır. 3mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,8746 Tesla olarak hesaplanmıştır. 1mm ve 2mm hava aralıklarındaki ortalama manyetik akı değerine göre daha düşük olmasının yanı sıra oluk kenarlarındaki doyma neredeyse kalmamıştır. Bununla birlikte ortalama manyetik akı değeri de alternatör tasarımında kabul edilebilir bir değerdir.



Şekil 4.8 : 3mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

4mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

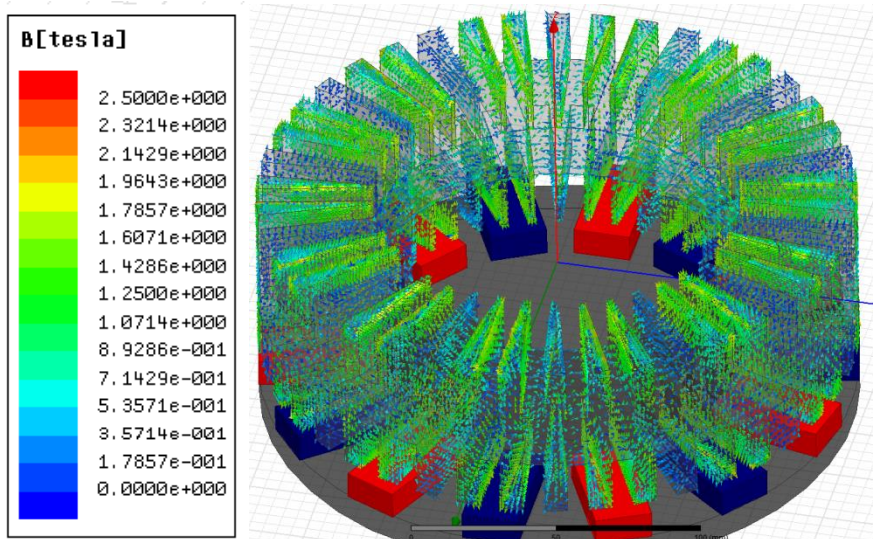
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 4mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.9’ da verilmiştir. 4mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,7953 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 : 4mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

5mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

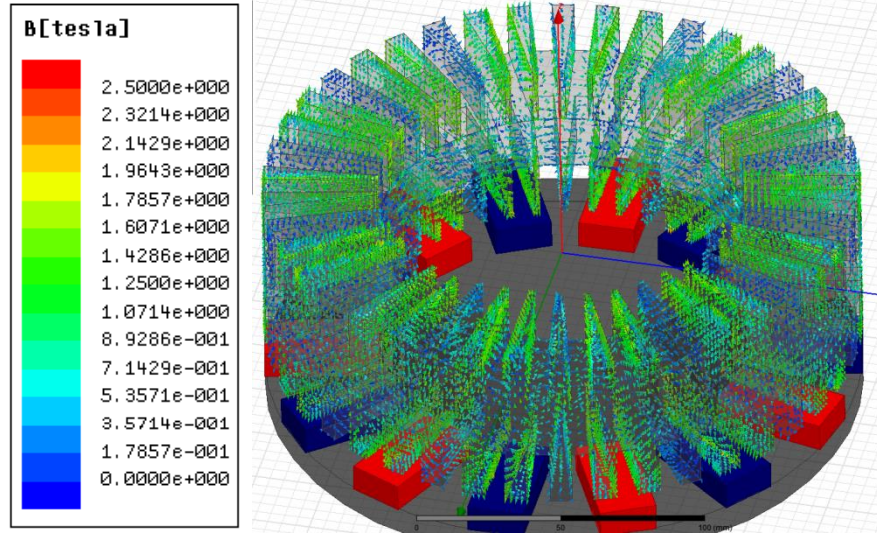
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 5mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.10’da verilmiştir. 5mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,7278 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 : 5mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

6mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

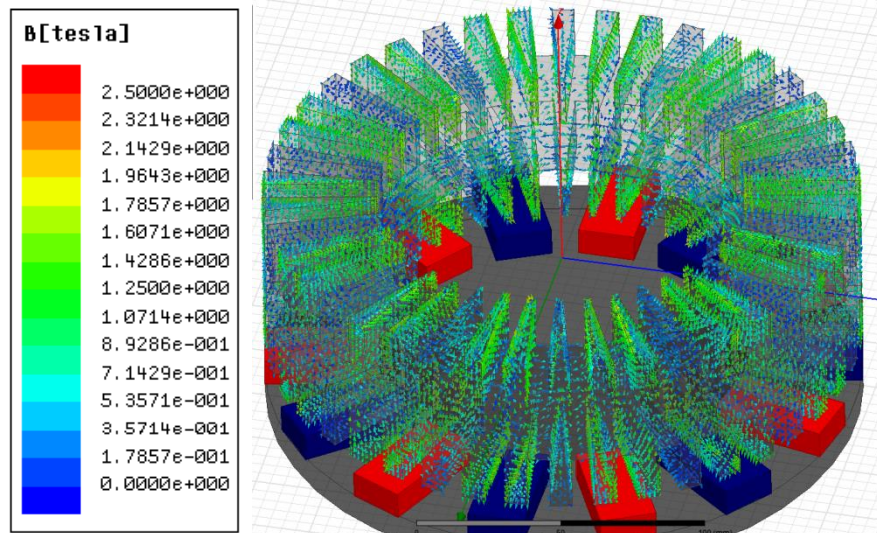
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 6mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.11’ de verilmiştir. 6mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,6656 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 : 6mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

7mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

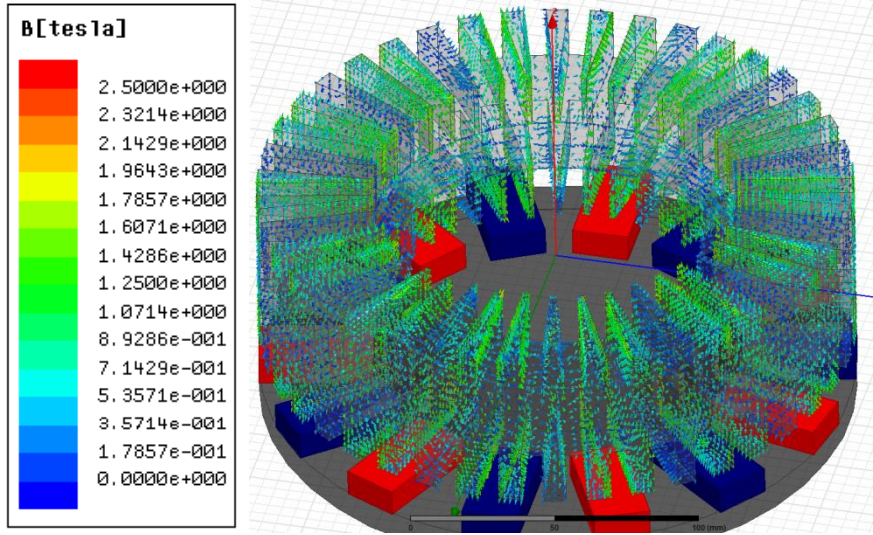
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 7mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.12’ de verilmiştir. 7mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,6038 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.12 : 7mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

8mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

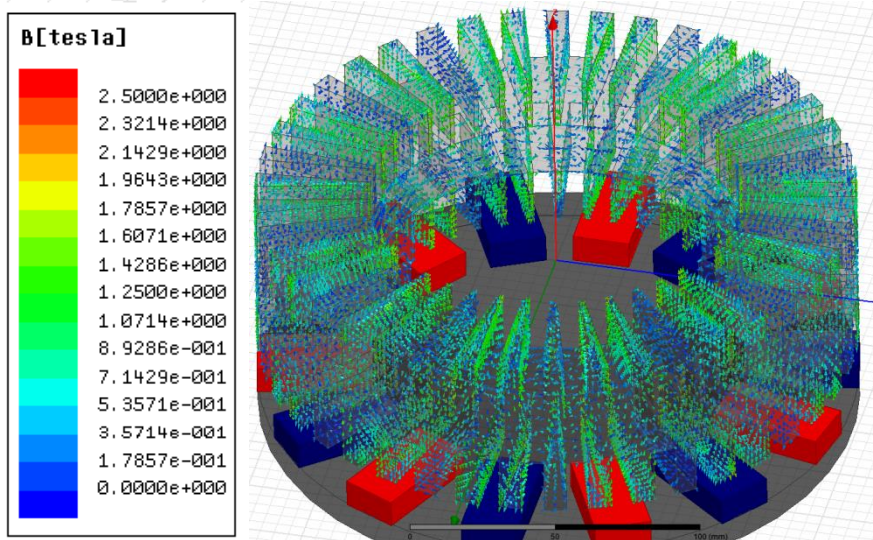
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 8mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.13’ de verilmiştir. 8mm’lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,5497 Tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : 8mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

9mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

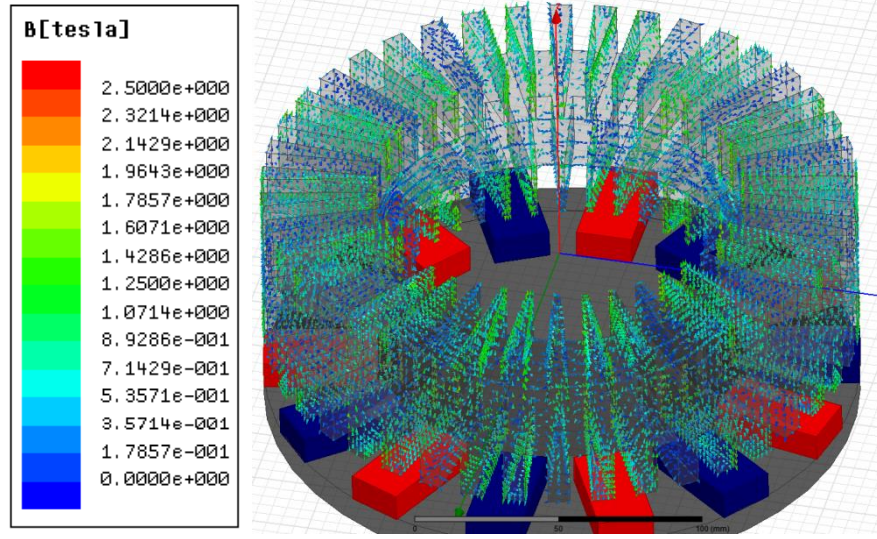
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 9mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.14’de verilmiştir. 9mm’ lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,4997 Tesla olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarda hava aralığı manyetik akısının 0,5 tesla veya daha yüksek bir değer olması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 4.14 : 9mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

10mm hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

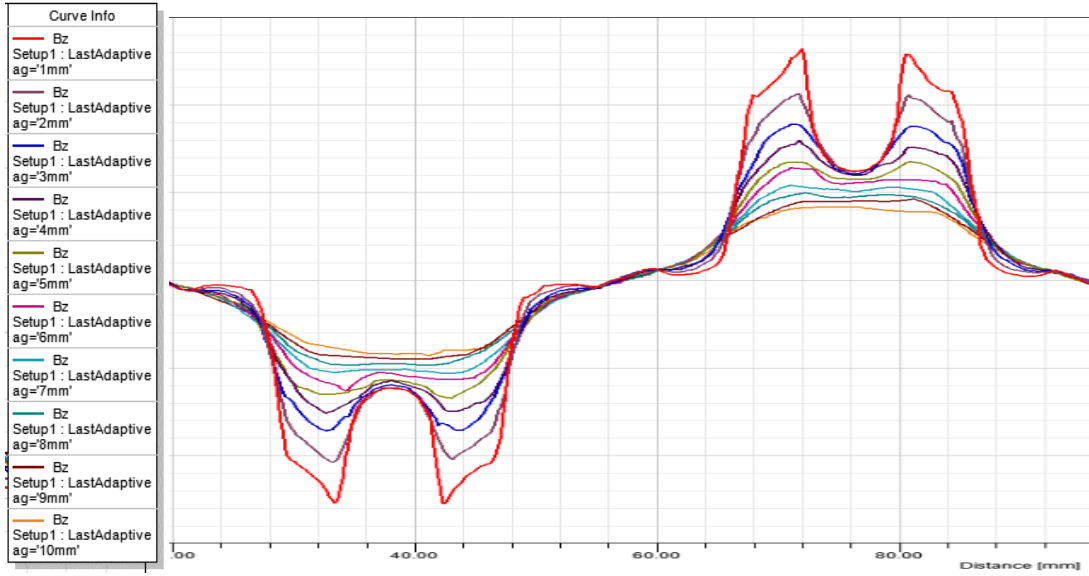
Stator ve rotor arasındaki hava aralığının 10mm olduğu anda SEY ile elde edilen analiz sonucu Şekil 4.15’de verilmiştir. 10mm’ lik hava aralığında elde edilen nüve Bort değeri 0,4618 Tesla olarak hesaplanmıştır. Hava aralığı manyetik akı değeri yapılan çalışmalarda belirtilen değerın altında bir değerdir.



Şekil 4.15 : 10mm hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu.

Değişken hava aralığında manyetik alanın değişimi

Hava aralığındaki manyetik akının değeri büyüdükçe vuruñtu momentı de artmaktadır. Bu yüzden ortalama manyetik akı değeri de göz önünde tutularak hava aralığı minimum değeri alınmalıdır. Grafikler incelendiğinde bu değeri 3mm olduğu görülmektedir. 3mm hava aralığında ortalama manyetik akı değeri de 0,8746 tesla civarındadır. Tasarlanan aksel akılı açık oluklu NN tip alternatör için bu değeri idealdir. Yapılan çalışmalarda alternatör tasarımında genel olarak 0,5 tesla değerinden yüksek değerler tercih edilmektedir. Dolayısıyla doymanın azaldığı noktadaki hava aralığı değeri Bort=0,8746 tesla alternatör tasarımı için uygundur. Hava aralığından alınan bir kontur boyunca hava aralığında değişim ile birlikte oluşan manyetik alanın değişim grafiğı de Şekil 4.16’ da verilmiştir.

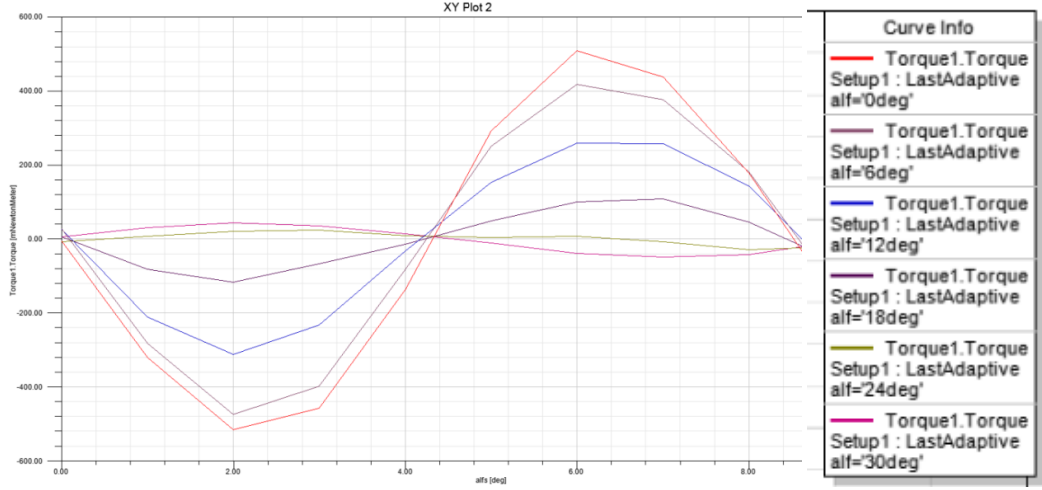


Şekil 4.16 : Alınan bir kontur boyunca değişken hava aralığındaki manyetik alanın değişimi.

Şekil 4.16’da verilen grafik incelendiğinde hava aralığındaki kontur boyunca manyetik alanın değişimi görülmektedir. Hava aralığının artışı ile birlikte relüktans değişimi azalmaktadır. Bu da bize vuru mu momentinin azaldığına ilişkin bir göstergedir. Bununla birlikte hava aralığının yüksek değerleri için ortalama manyetik akı değerinin düşmesi de istenen bir durum değildir. Her iki parametrenin yanı sıra farklı önlemlerde almak gerekir. Bunlardan biri de mıknatıs açısının değiştirilmesidir.

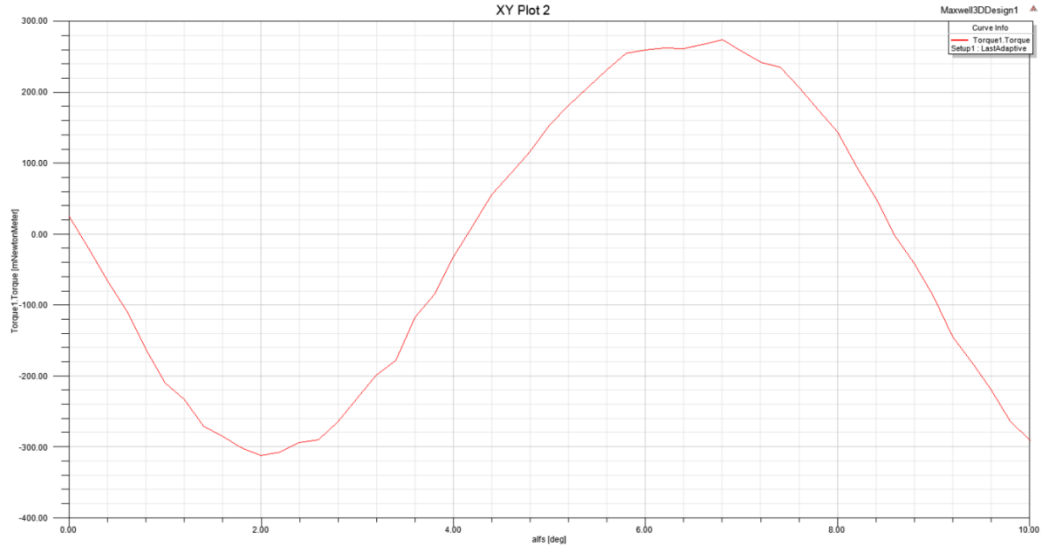
4.2.2.2 Tasarımın mıknatıs açısına bağlı manyetik analizleri

Şekil 4.17’de farklı mıknatıs açılarında vuru mu momentinin değişimi 3d SEY ile elde edilmiştir. Çözümleme sürecinde 6 farklı açı değeri için 10 adımda bir çözümleme gerçekleştirilmiştir. Özellikle 3d çözümleme süreci yüksek hesaplama kapasitesine sahip bilgisayar gerektirdiğinden öncelikle genel eğri elde edilmiştir. Elde edilen şekil 4.17’de gösterilen eğriden dikdörtgen tipi mıknatısın kendi eksenine etrafında açı verilmesiyle birlikte vuru mu momentinin büyük oranda düştüğü görülmektedir.



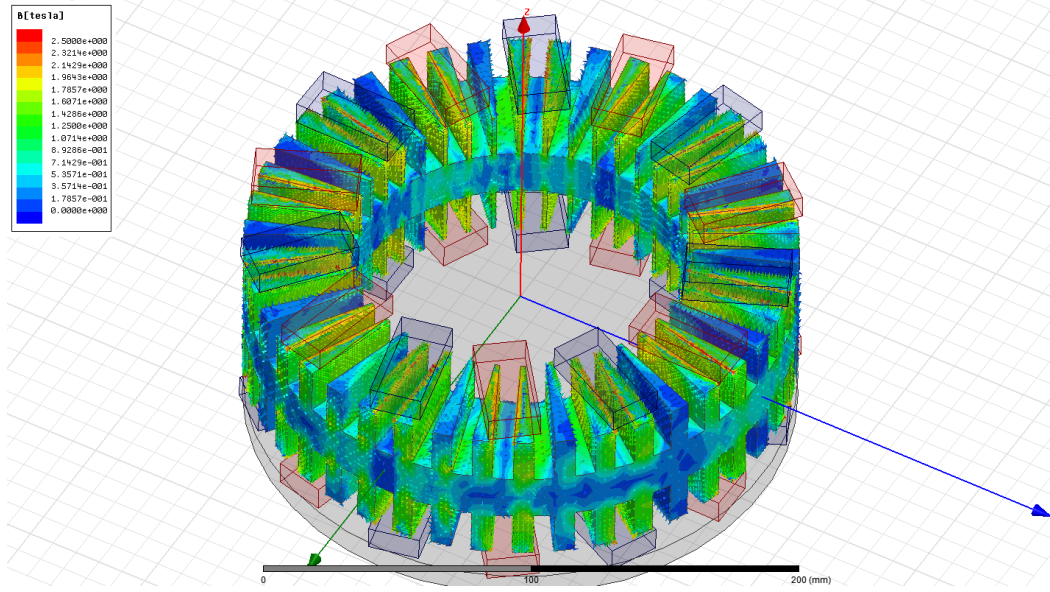
Şekil 4.17 : Farklı mıknatıs açılarında vuruntu momentinin değişimi.

Şekil 4.17'de çözümlene sonucunda alınan eğrinin çözünürlüğünü arttırmak için 3mm hava aralığı ve 12 derece mıknatıs açısı için çözümlene tekrar başlatılmıştır. Çözümlene sonucunda şekil 4.18 elde edilmiştir.

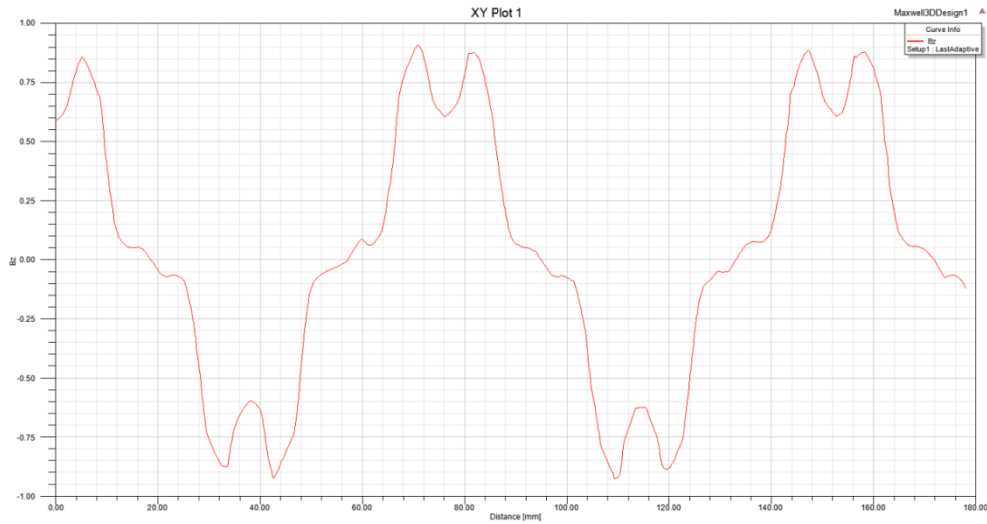


Şekil 4.18 : 3mm hava aralığı ve 12 derece kaykısı durumu.

Şekil 4.18'de görüldüğü gibi çözünürlük artırılmıştır. Alınan sonuçlar şekil 4.17 ile tutarlı görülmektedir. Rotorun hareketine bağlı olarak meydana vuruntu momenti gelmektedir. Bu durum dikdörtgen mıknatısa kendi eksenini etrafında açı verilerek düşürülmektedir.



Şekil 4.19 : 3mm hava aralığı ve 12 derece mıknatıs açısı durumunda manyetik akı dağılımı.



Şekil 4.20 : 3mm hava aralığı ve 12 derece mıknatıs açısı durumunda kontur boyunca manyetik akı dağılımı.

Şekil 4.19 ve 4.20 sırasıyla 12 derece mıknatıs açısı durumu için statordaki manyetik akı dağılımını ve kontur boyunca manyetik akı değişimini vermektedir. Şekil 4.19 mıknatıs açısına bağlı olarak dikdörtgen mıknatısın 3 stator kenarıyla etkileşimde olduğunu göstermektedir. Bu da vuruğu momentini azaltıcı bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte şekil 4.20’de 3mm hava aralığı için kontur boyunca manyetik akı değişimini vermektedir. Hava aralığı relüktansının büyük olması da vuruğu momentini arttırmaktadır.

4.2.2.3 Manyetik analizlerin değerlendirilmesi

Maxwell programı ile yapılan manyetik analizler sonucunda farklı hava aralıkları ve mıknatıs mıknatıs açısı değerleri için manyetik akı değerleri elde edilmiştir. Hava aralığının arttırılması vurutu momentini azaltmak ile birlikte hava aralığı manyetik akısını da azaltmaktadır. Bununla birlikte dikdörtgen mıknatısın kendi ekseninde aç verilmesi de vurutu momentini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda en uygun hava aralığı değerinin 3mm olduğu görülmektedir. Bunun yanında en uygun mıknatıs açısının da 18 dereceden daha yukarıdaki değerler olduğu görülmektedir. 18 derece için vurutu momenti %70 oranında azalmaktadır.

5. TASARIMIN UYGULANMASI

Üretilen alternatör temel olarak üç ayrı parçadan oluşmaktadır. Bunlar; stator, rotor ve gövde-kapaklar olarak adlandırılmaktadır. Analitik ve manyetik analizler ile alternatörün mıknatıs sayısı, iç-dış çapı, sargı sayısı, sipir sayısı, bağlantı şekli ve nüve kalınlığı gibi temel bilgilere ulaşıldı. Ayrıca elde edilen analiz sonuçlarıyla alternatörün mekanik ekipmanları da 3D yazılımı ile tasarlanmış ve üretim aşamasına geçilmiştir.

5.1 Statorun Sarım Hesabı ve Sarım Şeması

Tasarımımızda kullanacağımız sargı modeli toroidal olup, 5.1 eşitliğinden faz başına düşen sargı sayısı bulunur. Bu eşitlikte;

nc , faz başına düşen sargı sayısını,

x , toplam oluk sayısını,

m ise faz sayısını ifade eder.

$$nc = \frac{x}{m} \quad (5.1)$$

Eşitlikte değerler yerlerine koyulacak olursa;

$$nc = \frac{42}{3} = 14, \text{ olarak bulunur.}$$

Bir mıknatıs kutbu altına gelen oluk sayısı ise 5.2' deki eşitlikten bulunur. Bu eşitlikte $2P$ kutup sayısını verir.

$$Yx = \frac{x}{2P} \quad (5.2)$$

Formülde değerler yerine koyulursa;

$$Yx = \frac{42}{14} = 3, \text{ olarak bulunur.}$$

Her fazın bir kutup altındaki oluk sayısı ise 5.3' deki eşitlikten bulunur.

$$c = \frac{x}{2P.m} \quad (5.3)$$

Eşitlikteki değerler yerine koyulduğunda;

$$c = \frac{42}{14.3} = 1, \text{ olarak bulunur.}$$

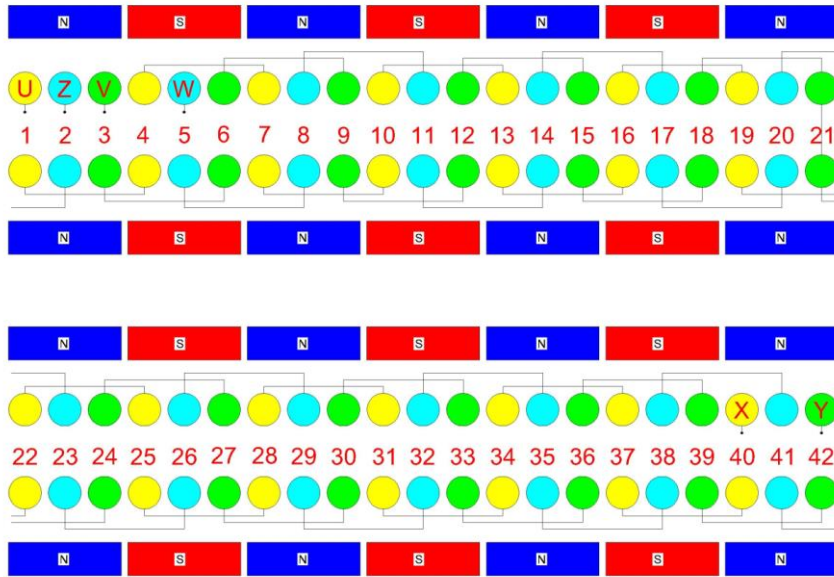
Tasarımda iki sargı arasındaki elektriki açı 5.4' deki eşitlikten bulunur.

$$\alpha = \frac{180.2P}{x} \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte değerler yerlerine yazıldığında;

$$\alpha = \frac{180.14}{42} = 60, \text{ derece olarak bulunur.}$$

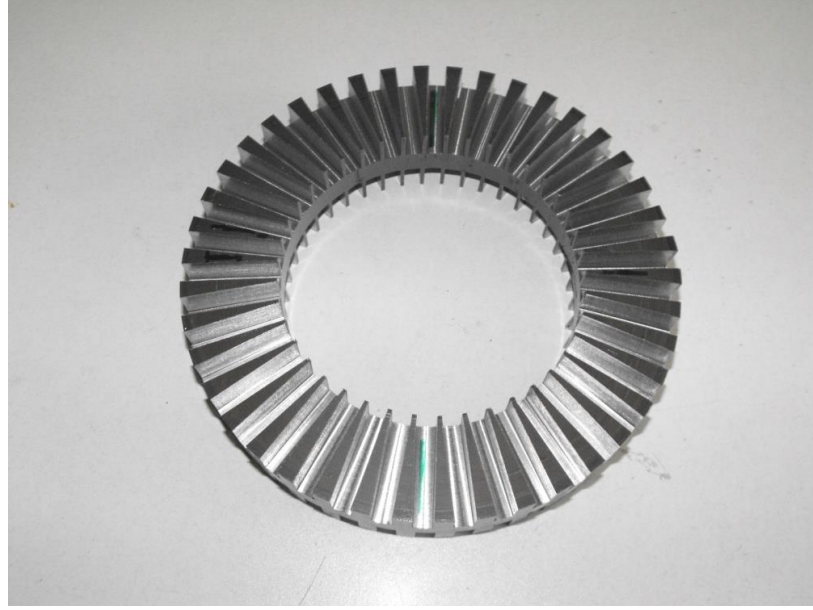
Yapılan bu hesaplamalar ile sargı sayısı ve sargıların fazlara göre dağılımları bulunur. Tasarımın toroidal sargılı olması ve karşılıklı aynı kutuplar kullanıldığından aynı fazda sargıların girişleri bir sonraki sargının girişine, çıkışları ise bir sonrakinin çıkışına bağlanır. Tüm bu hesaplamalar sonucunda oluşturulan sarım şeması ve mıknatıs dizilimi Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Sarım şeması ve mıknatıs dizilimi.

5.2 Stator

80mm genişliğindeki silisyumlu sacın 130mm çapındaki bir silindir etrafında sıkı sarım tekniği ile sarılarak dış çapının 210mm olana kadar sarılması ve uç noktalarının puntalanmasıyla nüve demiri oluşturuldu. Oluşturulan nüve demirinin her iki yüzüne tasarlandığı üzere 15mm derinliğinde, 8mm genişliğinde, 42 adet oluk freze yardımıyla açıldı (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Oluk açılan nüve.

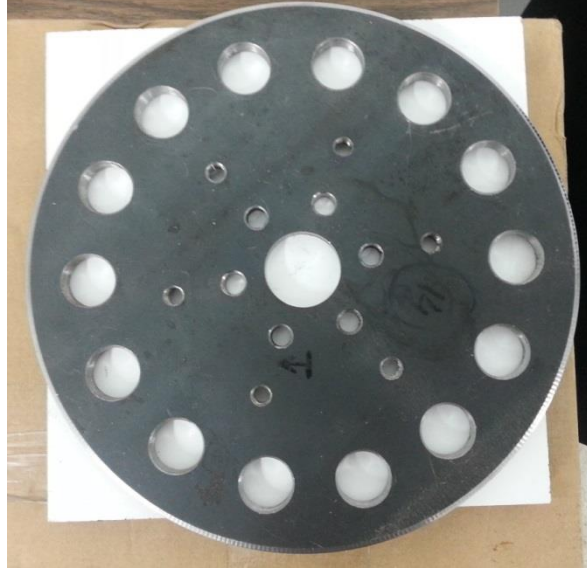
Stator olukları sarıma geçilmeden önce uygun ölçülerde kesilen pleksiglas malzeme ile yalıtımı sağlandıktan sonra Şekil 5.1’ de verilen sargı şeması her bir oluğa 88 sipir sarılarak 42 oluğa sarım yapıldı. Sarımı tamamlanan statorun sargı uçları her faz için giriş girişe, çıkış çıkış olacak şekilde bağlantısı yapılarak makaron ile yalıtımı sağlandı. Faz çıkış ve giriş uçları çıkarılarak yüzey sertleştirici sürülerek kurumaya bırakıldı. Şekil 5.3’ de sarımı tamamlanan statorun sargılarında; Rdc faz-faz direnç değeri 10 ohm olarak ölçülürken, Rdc faz-nötr arası ise 5.2 ohm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.3 : Sargısı ve bağlantıları tamamlanan stator.

5.3 Rotor

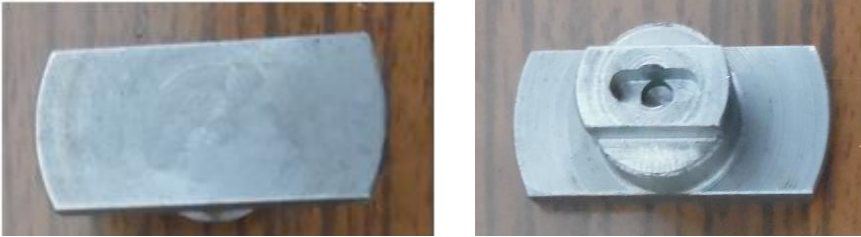
Tasarlanan 210mm çapında 8mm kalınlığında saç rotor gövdesi lazer kesim ile saç levhadan kesilerek üretildi (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : Mıknatısların yerleştirildiği rotor kalıbı.

5.3.1 Eksen döndürme parçası

Çalışmanın en önemli aşamalarından birisi de mıknatısların kendi eksenleri etrafında dönebilir olmasıdır. Bu amaçla Şekil 5.5’ de görülen eksen döndürme parçası tasarlanarak epoksi yapıştırıcı ile 40mm X 20mm X 10mm ölçülerindeki NdFeB mıknatısların irtibatı sağlanmıştır.



Şekil 5.5 : Eksen döndürme parçası.

Şekil 5.6’ da görülen mıknatıs ile sabitlenen eksen döndürme parçaları sekban yardımıyla rotor yüzeyine takılmıştır. Bu sayede her bir açı değişiminde rotor sistemden ayrılmadan mıknatısların açı değerlerinin değiştirilebilir olması sağlanmıştır.



Şekil 5.6 : Mıknatıs yapıştırılan eksen döndürme parçası.



Şekil 5.7 : Eksen döndürme parçalarının yerleştirildiği rotor kalıbı.

5.3.2 Açı sabitleme kalıbı

Eksen döndürme parçalarına bağlı olan mıknatıslar merkez notalarından sekban yardımıyla alternatör gövdesine bağlandıklarından, kendi merkezlerinde serbestçe dönebilmektedirler. Tüm mıknatısları 0'dan 30'a uygun açığa getirerek sabitlemek için Şekil 5.8' de görülen pleksiglas malzemeden kalıplar üretildi. Üretilen bu kalıplar mıknatısları doğru açığa getirip rotor yüzeyine sabitlemek için kullanılan birer kılavuz görevi görmektedir. Her bir açı için rotor kapağı sökülür, mıknatıs eksenlerinde küçük oynamalar yapılarak bu kalıplara oturtulur ve rotor yüzeyine sabitlenerek deneyler gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.8 : Mıknatıs açısı sabitleme kalıbı.

5.4 Gövde ve Kapaklar

Statoru çember dış gövde içerisinde sabitleyebilmek için Şekil 5.9’ daki parça tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir.



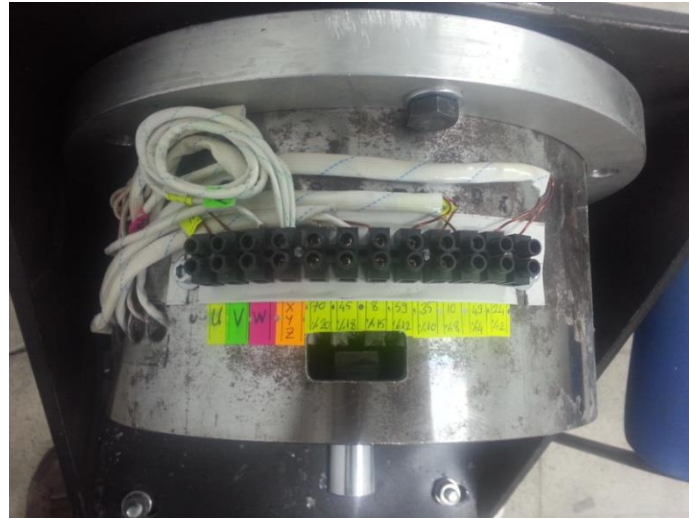
Şekil 5.9 : Stator sabitleme parçası.

Stator ve rotor arasındaki optimum hava aralığını ayarlayabilmek için Şekil 5.10’ daki stator aksel kaydırma aparatı tasarlanarak üretimi gerçekleştirildi. Üretilen parça gövde üzerine kaynakla irtibatlandırıldı. Ayrıca bırakılan hava aralığını gözlemleyebilmek için gövde üzerinde pencereler açıldı.



Şekil 5.10 : Hava aralığı ayarlama aparatı.

Stator sargı uçları gövde dışına çıkarılarak gövde üzerinde sabitlenen klemenslerde sonlandırıldı (Şekil 5.11).



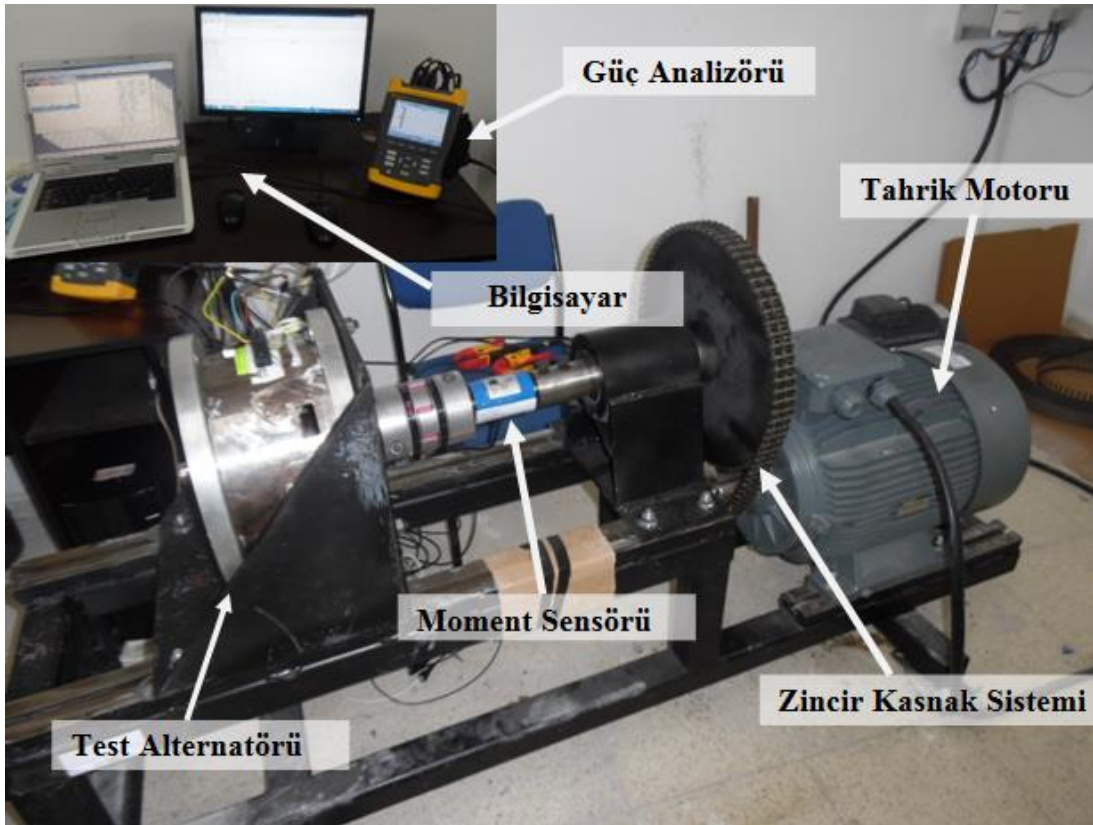
Şekil 5.11 : Çıkış uçları ve bağlantı klemensleri.

Son olarak alternatör, Şekil 5.12' deki kapaklar alüminyum malzemeden frezede işlendi ve rulman yataklarına rulmanların yerleştirilmesi ile birlikte alternatör üretimi tamamlandı.



Şekil 5.12 : Alternatör kapakları.

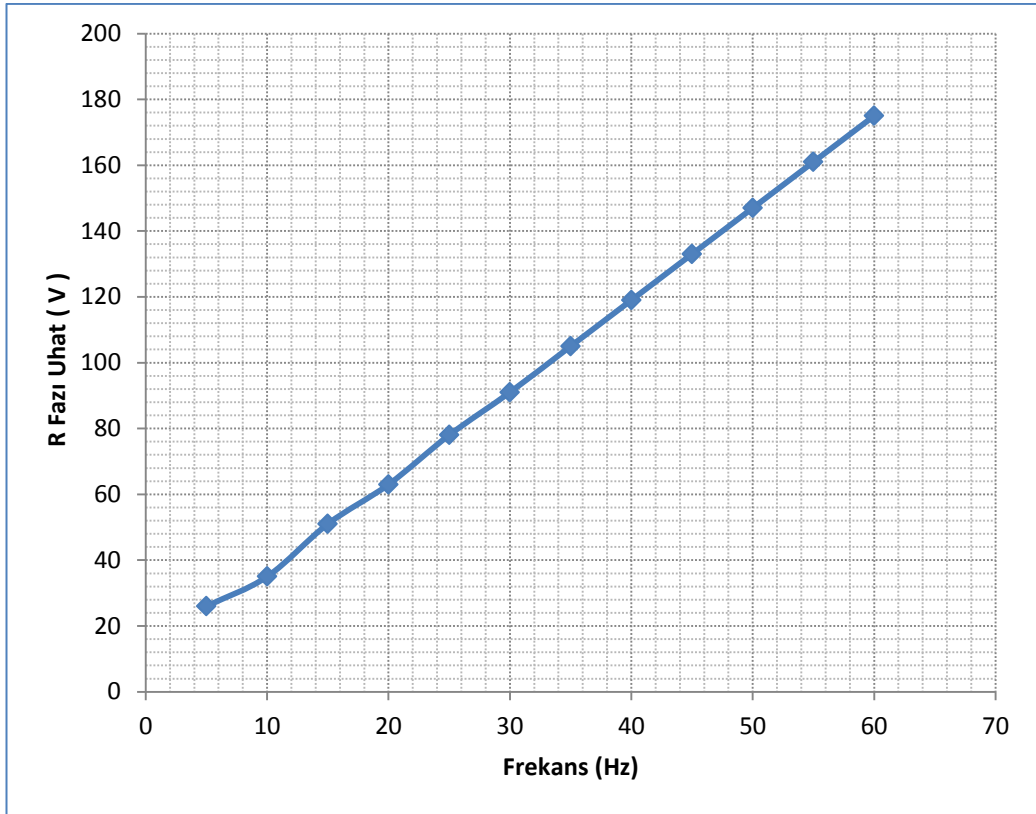
Tamamlanan alternatör test düzeneğine gerekli ölçüm bileşenleri ile bağlanmasıyla birlikte deneylerin yapımına geçildi (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : Alternatör bağlı deney düzeneği.

Deney düzeneğinde vurutu momenti, moment sensörü ile ölçülmektedir. Alternatörün çıkış gerilimi, gerilim harmoniği, akım harmoniği ve yüklü çalışmada çekilen akım değerleri Fluke404 güç analizörü ile alınmaktadır. Bununla birlikte alternatör tahriği asenkron motor, devir düşürücü dişli sistem ve asenkron motor sürücüsü gibi bileşenler yardımıyla sağlanmaktadır.

Deney düzeneğinde kullanılan frekans kontrollü asenkron motor sürücüsünün, frekans değişiminin alternatör çıkış gerilimi (R fazı) üzerindeki etkisi Şekil 5.14' de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Sürücü frekansına bağlı alternatör çıkış gerilimi.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Alternatörün Yüksüz Çalıştırılması

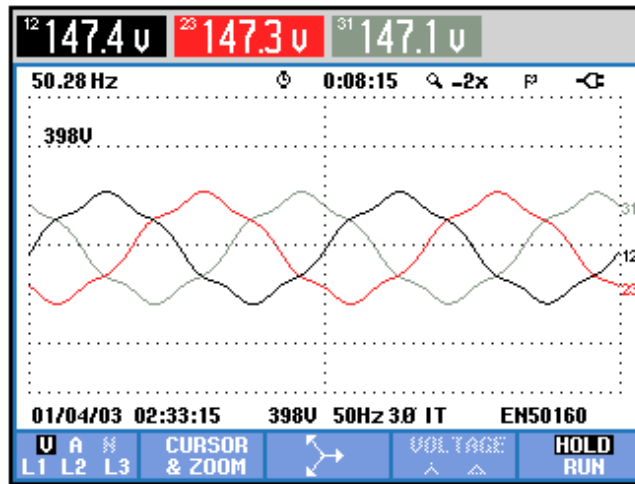
Yapılan tasarımda alınan sonuçlar sırasıyla 0-4-8-12-16-20-24-28-30 derece mıknatis açısına bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar 3 fazlı hat gerilim eğrilerini, gerilim harmoniklerini ve vuruñtu moment eğrilerinden oluşmaktadır. Alınan değerlerde kullanılan ölçü aletleri ve cihazlar tablo 6.1’ de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Denede kullanılan ölçü aletleri ve cihazlar.

Ölçü Aleti ve Cihaz	Kullanım Amacı
Fluke 434 Güç Analizörü	Gerilim eğrileri ve harmonik analizi için
8645 Moment Sensörü	Vuruñtu momentini elde etmek için
22 kW Asenkron Motor	Tahrik motoru olarak
ABB ACS850 sürücü ve usb bağlantı kiti	Tarik motorunun bilgisayardan kontrolü için

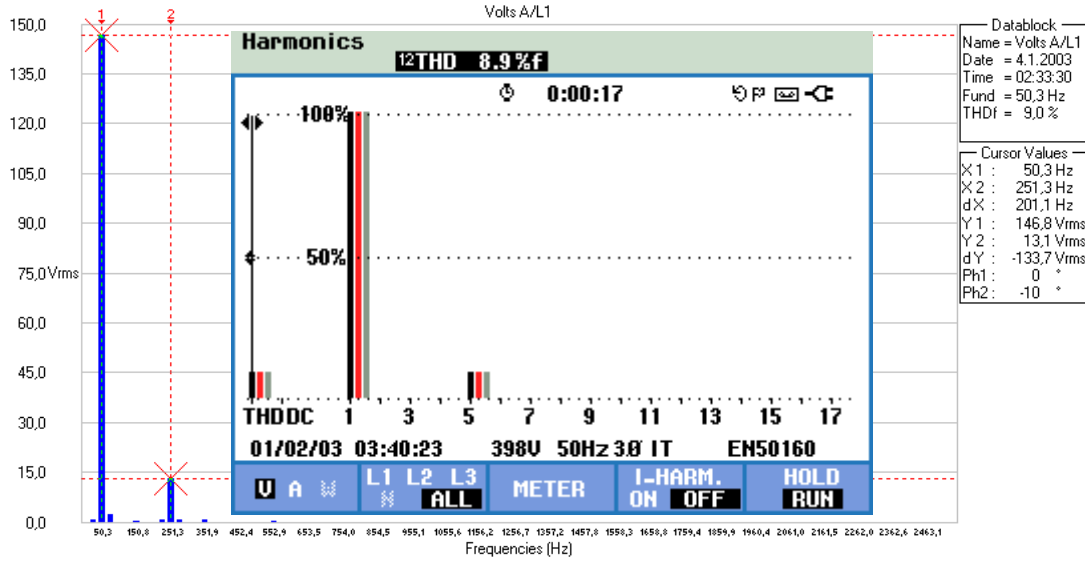
6.1.1 0 derece mıknatis açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 0 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.1’ de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 147,3 voltur. Üretilen 3 faz gerilim değerleri ve oluşan 3 faz harmonik miktarlarından alternatör çıkış geriliminin dengeli olduğu görülmektedir.



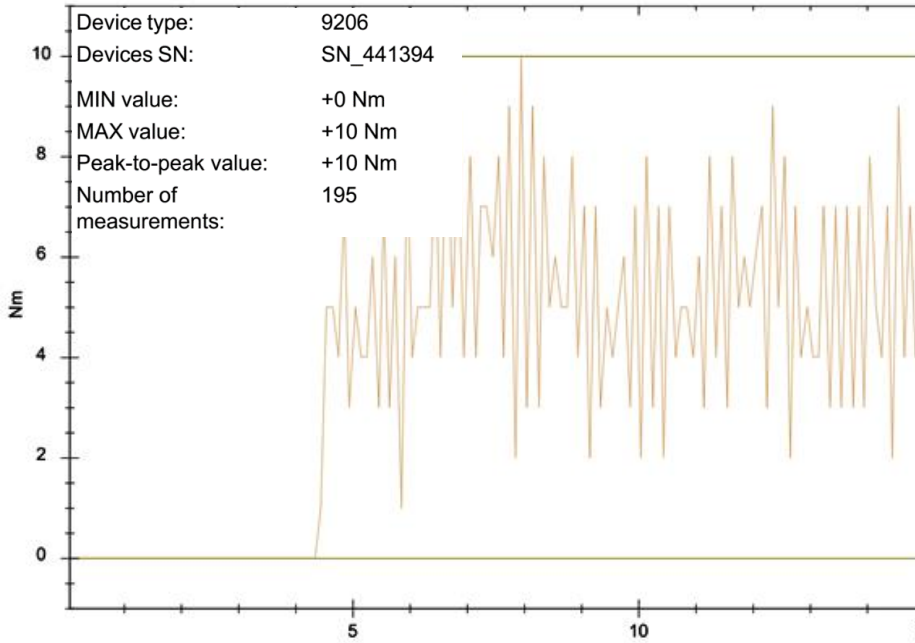
Şekil 6.1 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.2' de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.2' den görüldüğü üzere her bir faz için %8,9 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır. Ayrıca kurulan deney düzeneğinde dengeli 3 faz elde edilmesi başarılmıştır.



Şekil 6.2 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

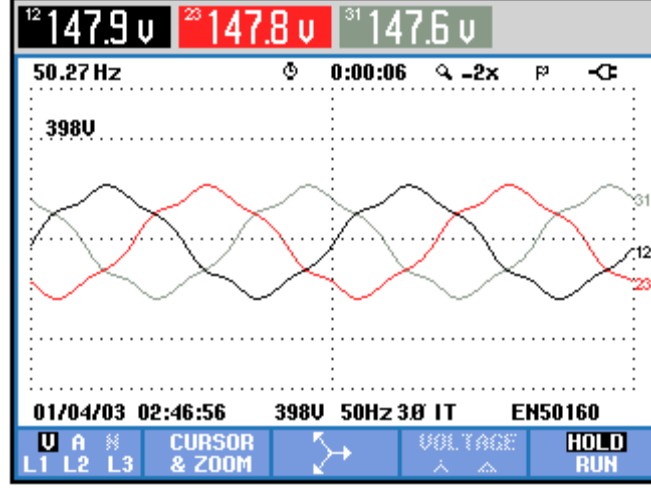
Şekil 6.3' de 0 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.3 incelendiğinde momentin 2-9 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.3 : Vuru mu momenti (0 derece).

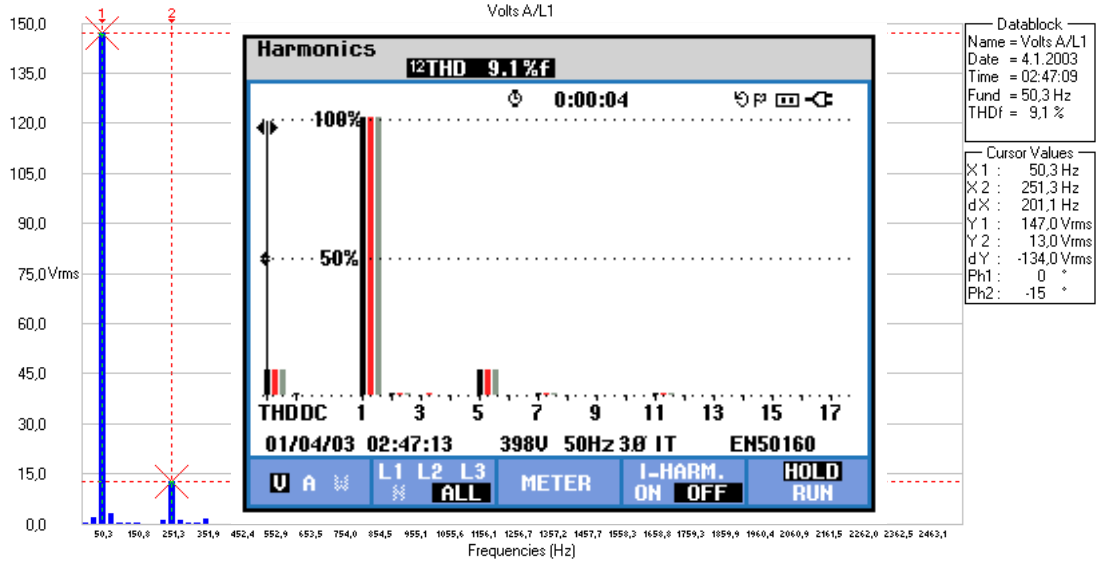
6.1.2 4 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 4 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.4’ de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 147,8 voltur.



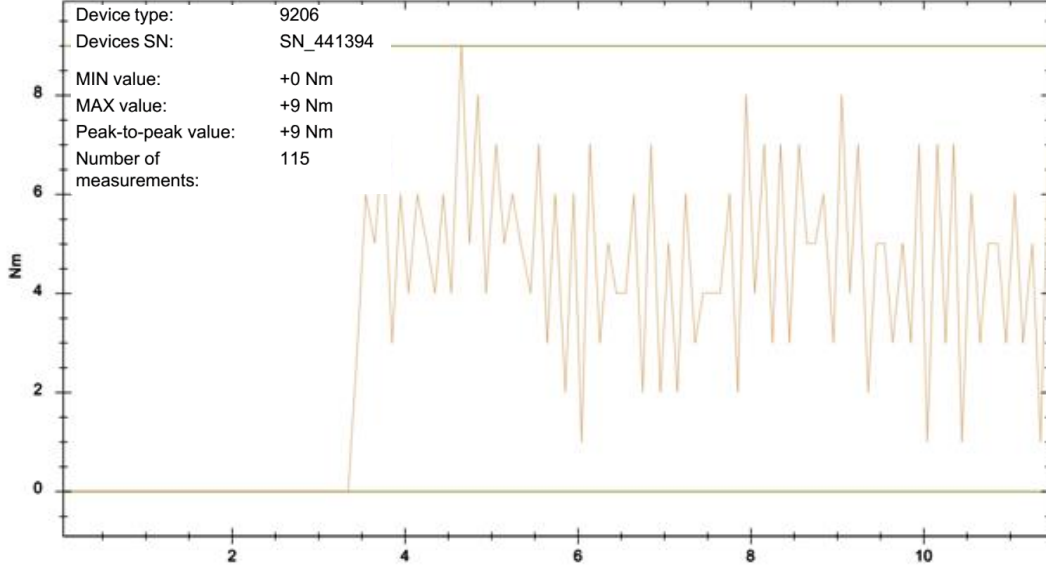
Şekil 6.4 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.5’ de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.5’ den görüldüğü üzere her bir faz için %9,1 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.5 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

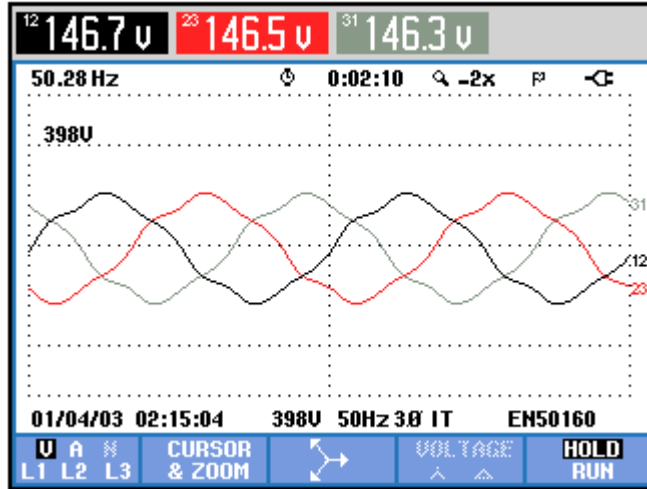
Şekil 6.6’ da 4 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.6 incelendiğinde momentin 1-7 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.6 : Vuruntu momenti (4 derece).

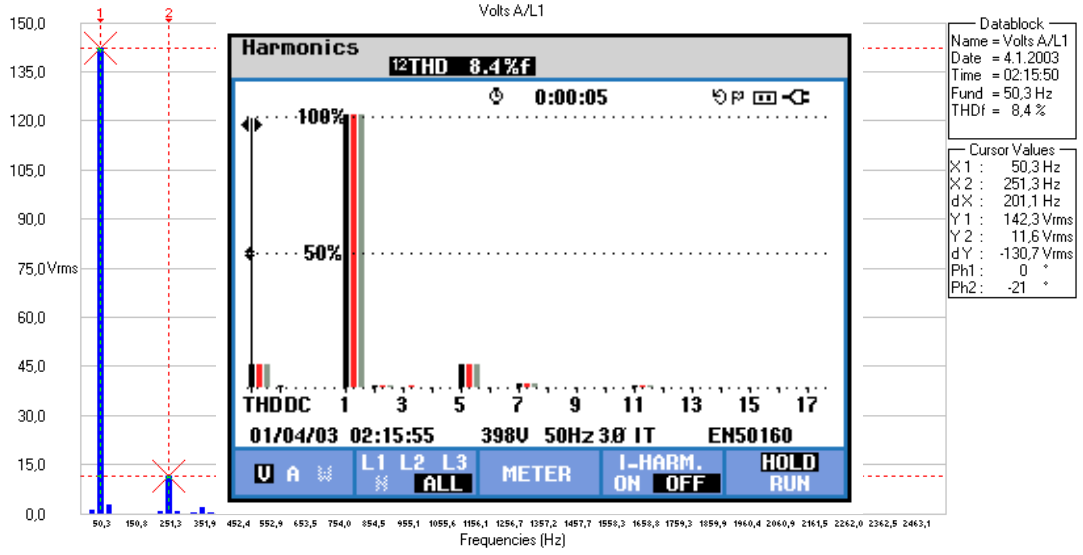
6.1.3 8 derece mıknatis açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 8 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.7’ de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 146,5 voltur.



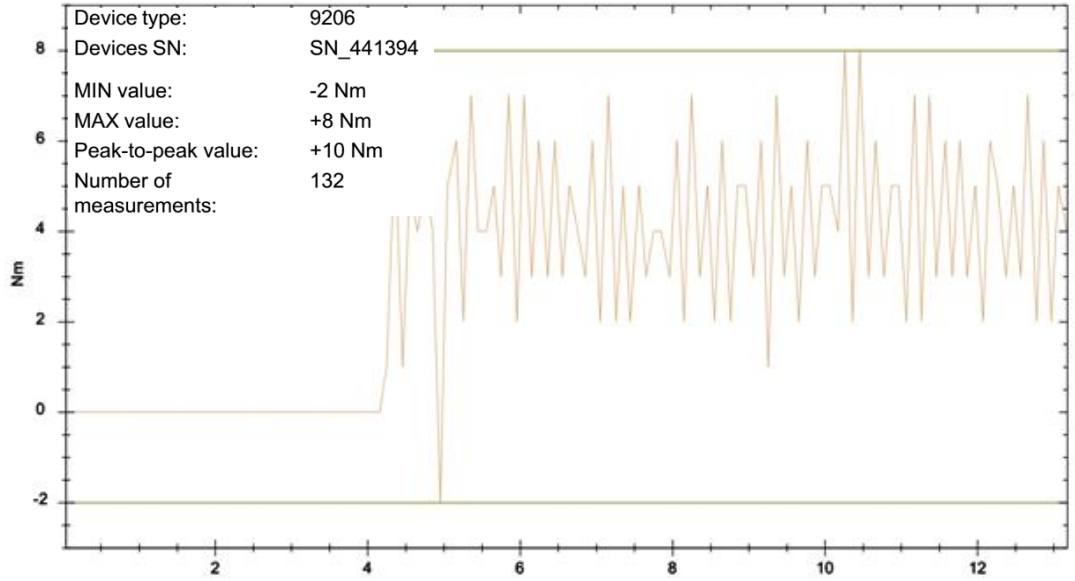
Şekil 6.7 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.8’ de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.8’ den görüldüğü üzere her bir faz için %8,4 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.8 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

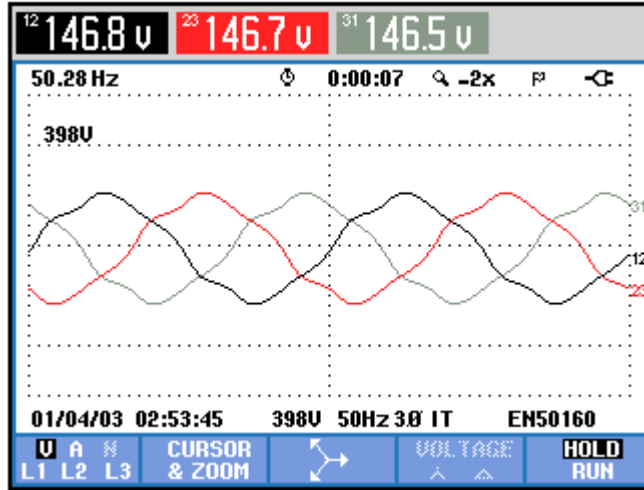
Şekil 6.9' da 8 derece için alınan vurunutu momenti değeri verilmektedir. Şekil 7.9 incelendiğinde momentin 2-7 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.9 : Vurunutu momenti (8 derece).

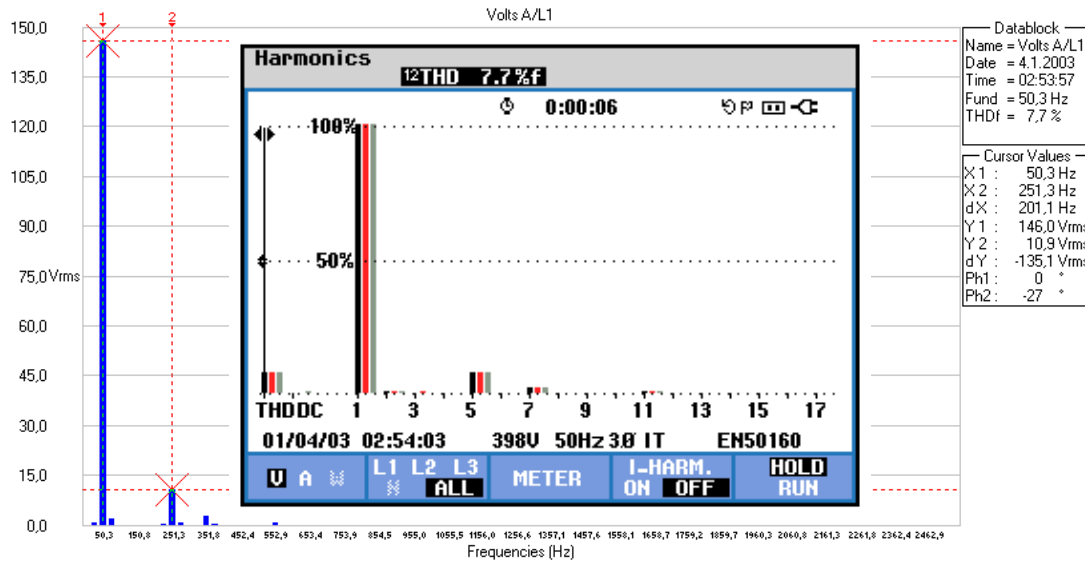
6.1.4 12 derece mıknatis açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 12 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.10' de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 146,7 voltur.



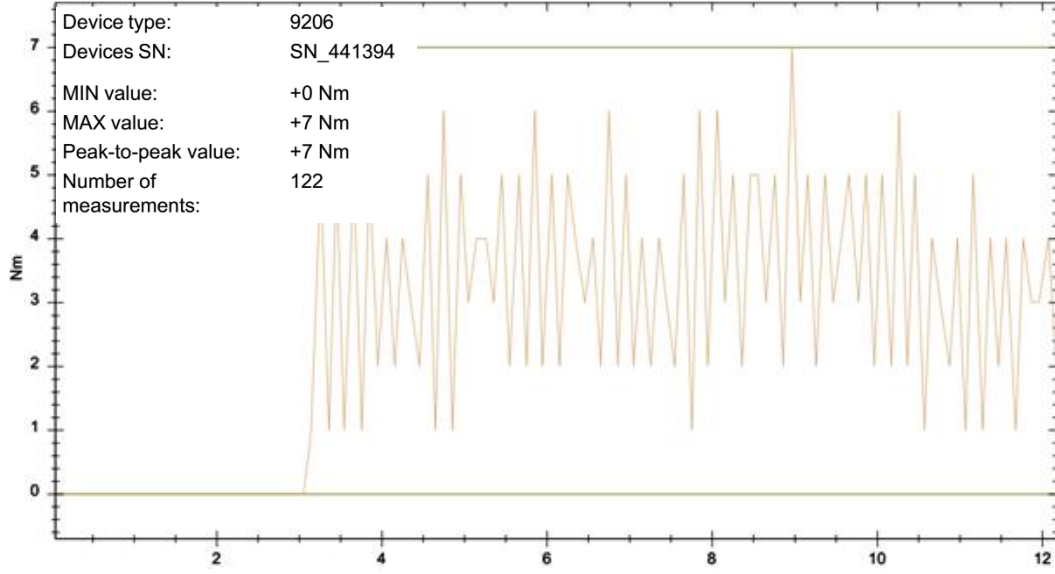
Şekil 6.10 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.11' de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.11' den görüldüğü üzere her bir faz için %7,7 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.11 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

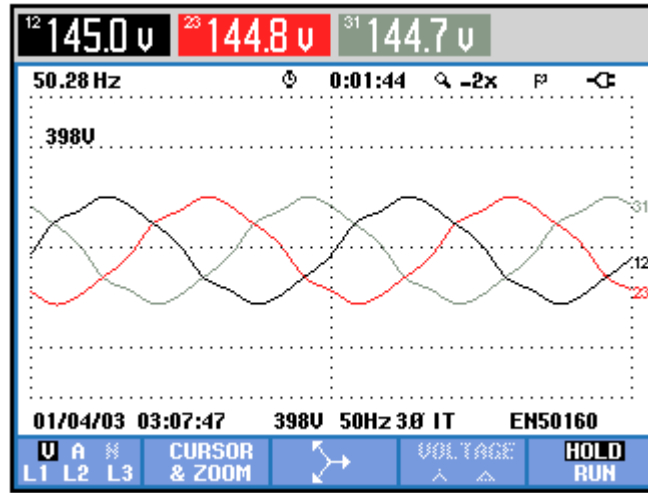
Şekil 6.12' de 12 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.12 incelendiğinde momentin 1-5 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.12 : Vuruntu momenti (12 derece).

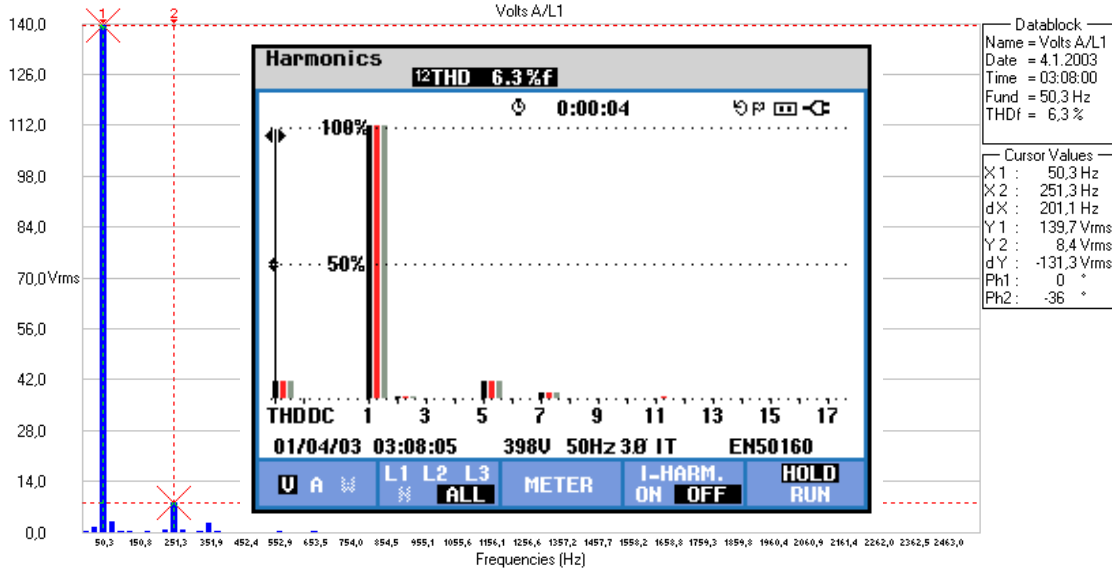
6.1.5 16 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 16 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.13’ de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 144,8 voltur.



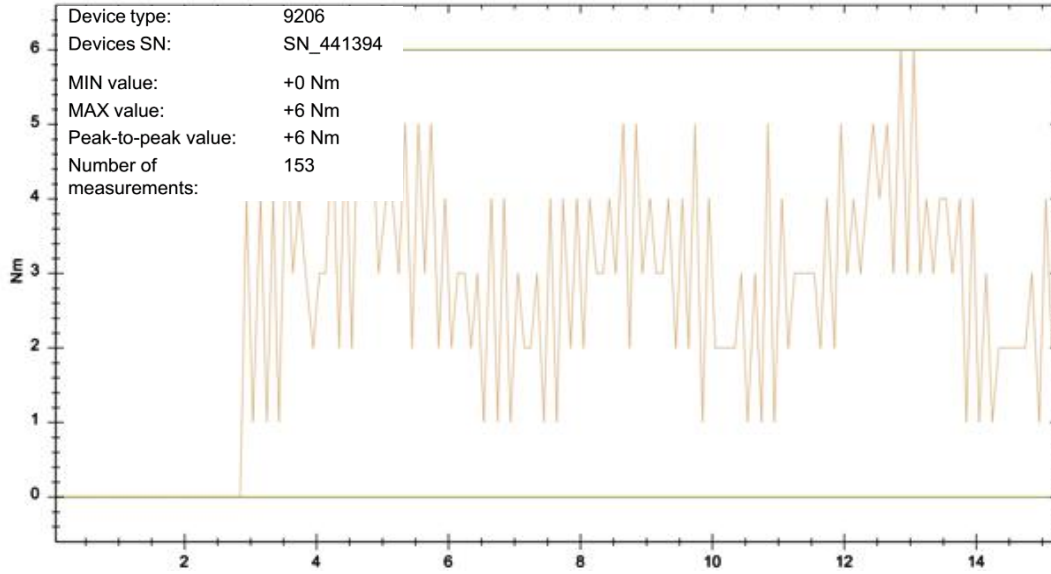
Şekil 6.13 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.14’ de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.14’ den görüldüğü üzere her bir faz için %6,3 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.14 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

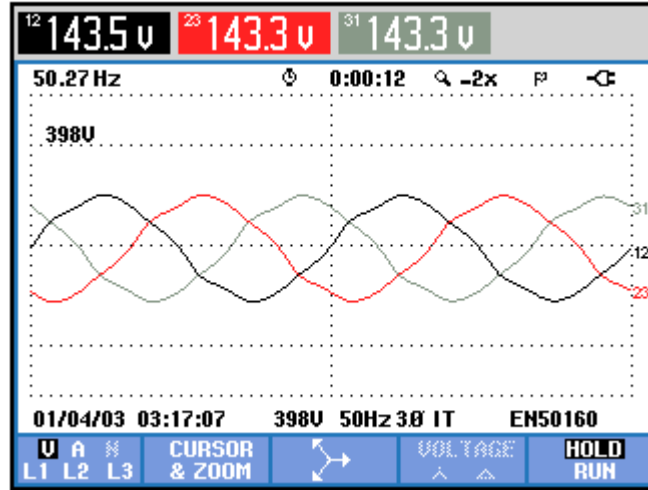
Şekil 6.15' de 16 derece için alınan vurunutu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.15 incelendiğinde momentin 1-4 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.15 : Vurunutu momenti (16 derece).

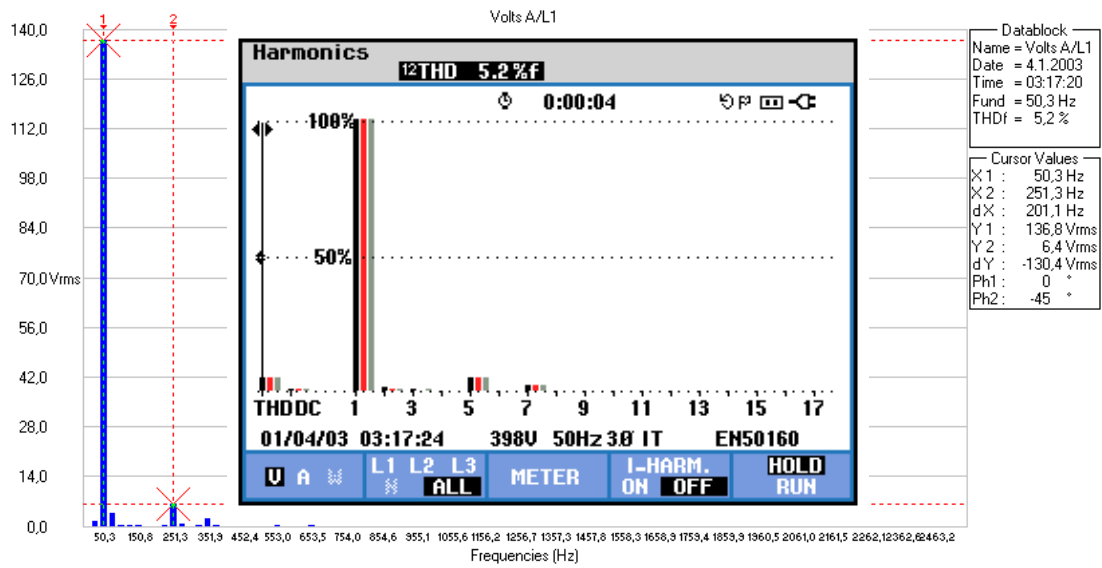
6.1.6 20 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 20 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.16' de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 143,3 voltur.



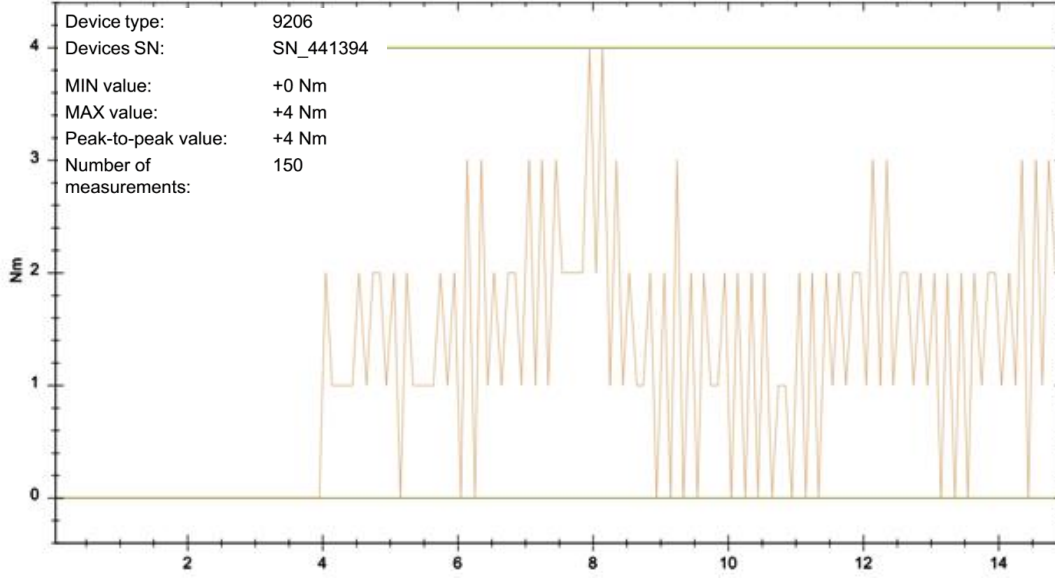
Şekil 6.16 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.17' de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.17' den görüldüğü üzere her bir faz için %5,2 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.17 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

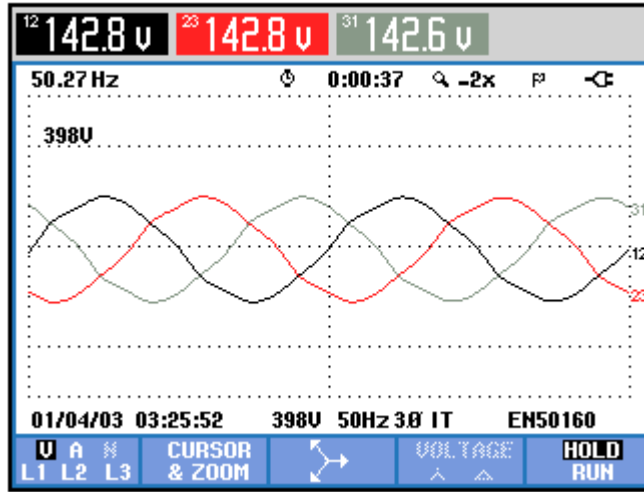
Şekil 6.18' de 20 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.18 incelendiğinde momentin 0-2 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.18 : Vuruntu momenti (20 derece).

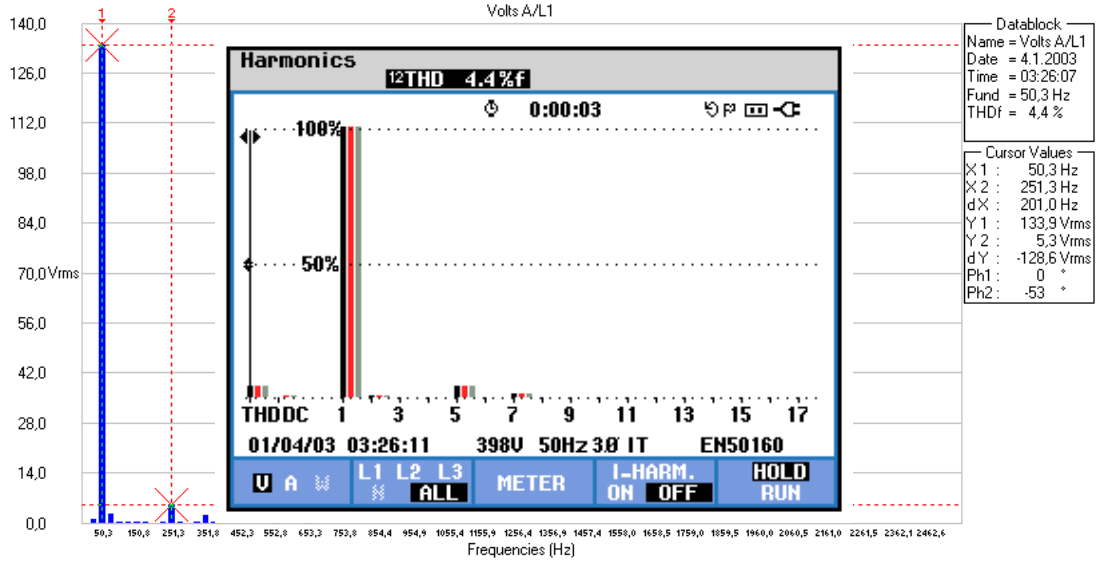
6.1.7 24 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 24 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.19’ da görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 142,7 voltur.



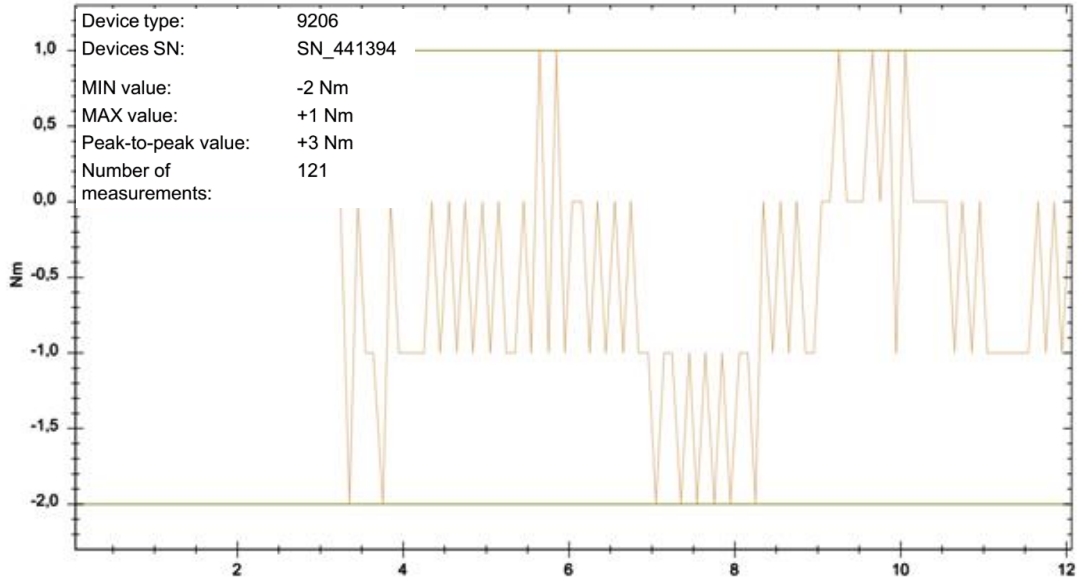
Şekil 6.19 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.20’ de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.20’ den görüldüğü üzere her bir faz için %4,4 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.20 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

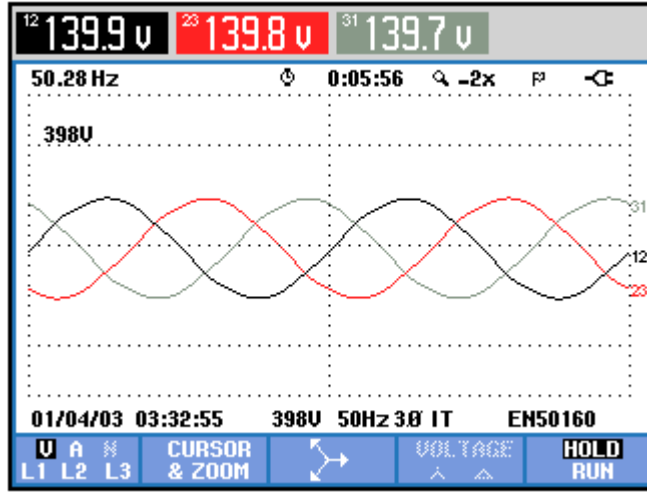
Şekil 6.21' de 24 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.21 incelendiğinde momentin (-1) -0,5 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.21 : Vuru mu momenti (24 derece).

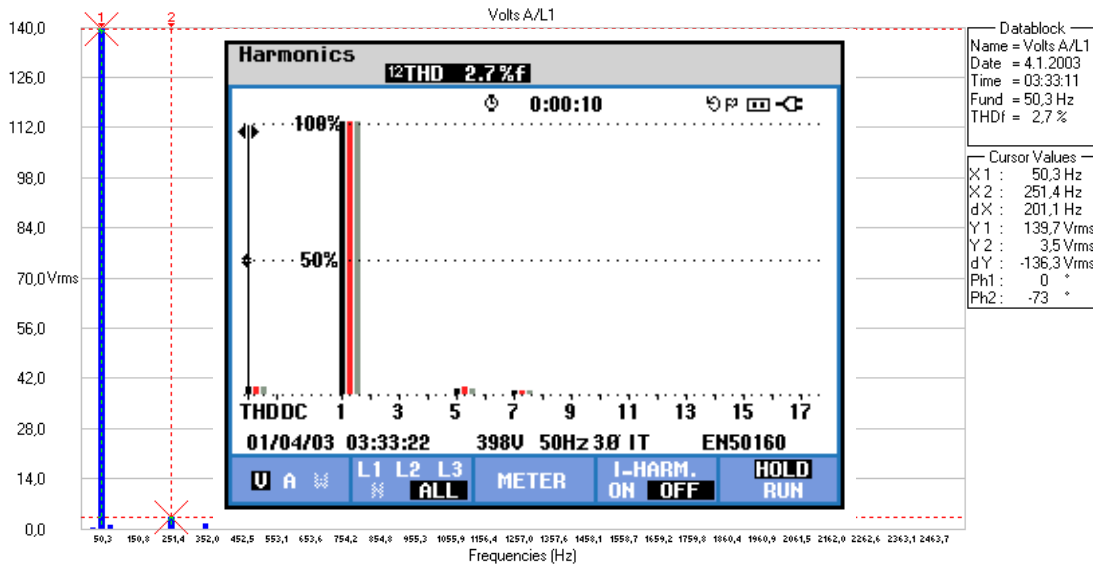
6.1.8 28 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 28 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.22' de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 139,8 voltur.



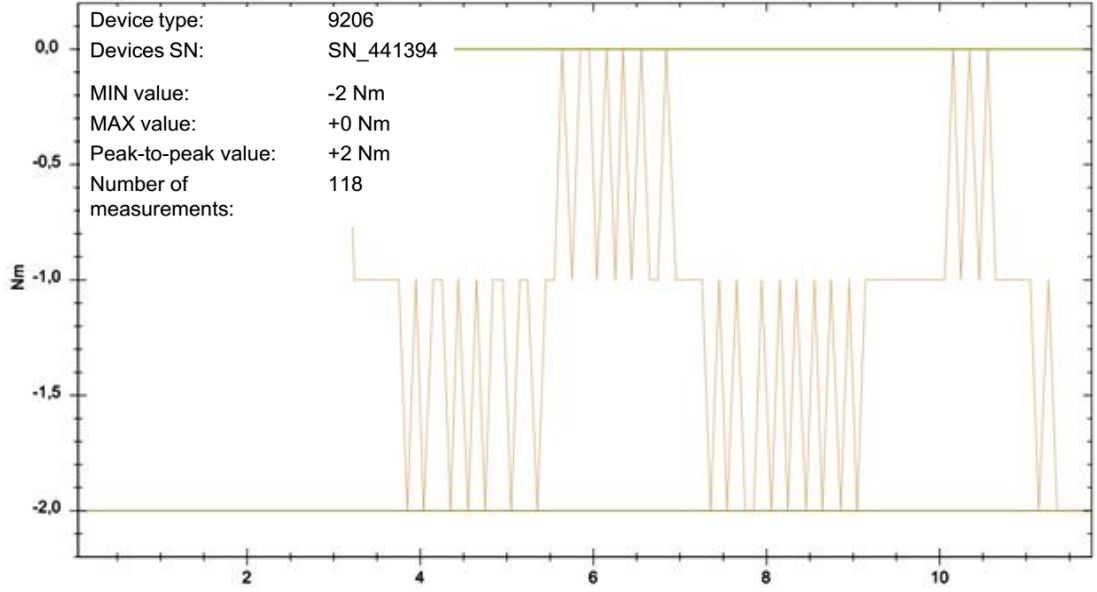
Şekil 6.22 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.23' de bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.23' den görüldüğü üzere her bir faz için %2,7 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.23 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

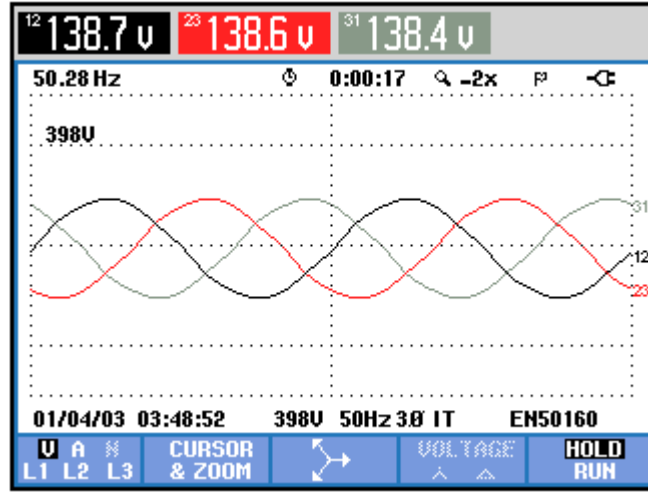
Şekil 6.24' de 28 derece için alınan vuru mu momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.24 incelendiğinde momentin (-1) - (-2) Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.24 : Vuruntu momenti (28 derece).

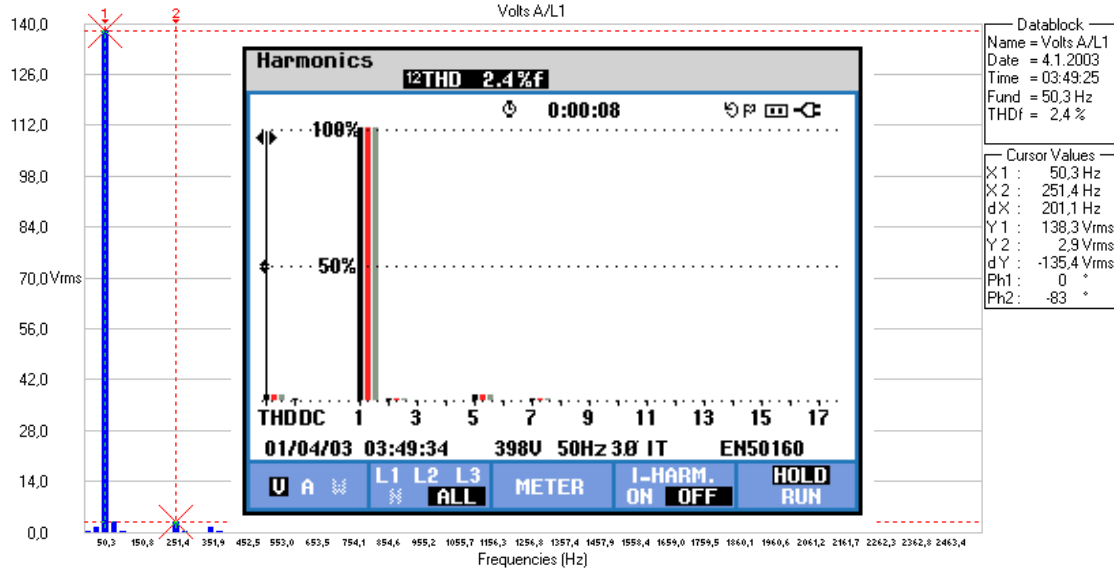
6.1.9 30 derece mıknatıs açısında alınan sonuçlar

Deney setinde 30 derece için hazırlanmış pleksi takıldıktan sonra alınan gerilim eğrisi şekil 6.25’ de görülmektedir. Hat gerilimi her bir faz için ortalama 138,6 voltur.



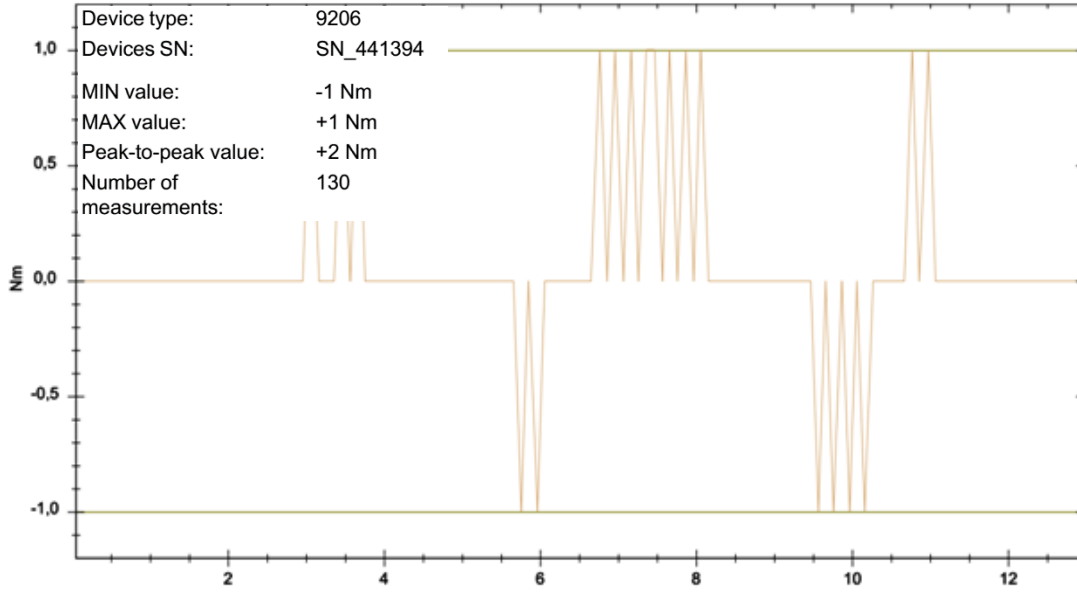
Şekil 6.25 : 3 faz hat gerilim eğrileri.

Şekil 6.26’ da bir faz ve 3 faz için elde edilen harmonik değişimleri verilmektedir. Şekil 6.26’ dan görüldüğü üzere her bir faz için %2,4 oranında gerilim harmoniği oluşmaktadır.



Şekil 6.26 : Bir faz ve 3 faz harmonik değerleri.

Şekil 6.27' de 30 derece için alınan vuruş momenti değeri verilmektedir. Şekil 6.27 incelendiğinde momentin 0-1 Nm arasında salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.27 : Vuruş momenti (30 derece).

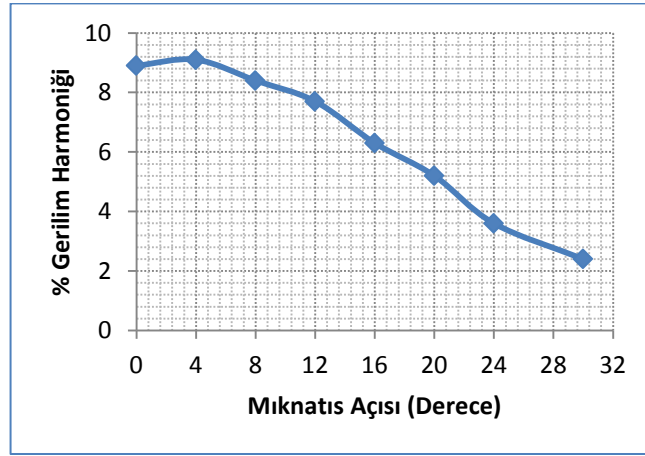
6.1.10 Yüksüz durumdaki deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Tasarlanan deney düzeneği ile TAOEASM-NN tip alternatör için farklı kutup açıları için alternatör çıkış gerilim eğrisi, çıkış gerilim harmoniği ve vuruş momenti eğrileri elde edilmiştir. Alınan sonuçlar aşağıdaki Tablo 6.2' de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Yüksüz durumdaki deneysel sonuçlar.

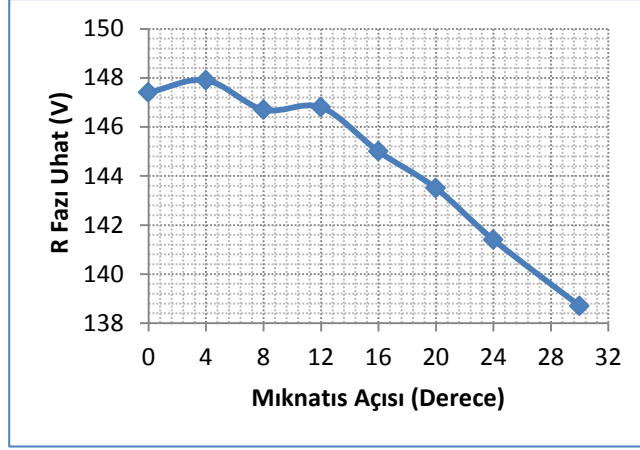
Mıknatıs Açısı (Derece)	Uh (Volt)	Thd (%)	Mv (Nm)
0	147,3	8,9	7
4	147,8	9,1	6
8	146,5	8,4	5
12	146,7	7,7	4
16	144,8	6,3	3
20	143,3	5,2	2
24	142,7	4,4	1,5
28	139,8	2,7	1
30	138,6	2,4	1

Şekil 6.28’deki grafik incelendiğinde toplam harmonik bozulmasının mıknatıs açısına bağlı olarak etkin bir şekilde %8,9 dan %2,4’ e kadar azaldığı görülmektedir.



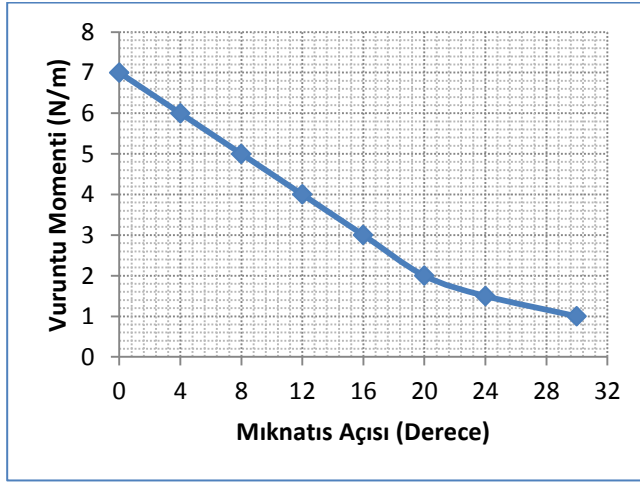
Şekil 6.28 : Yüksüz durumda mıknatıs açısına bağlı olarak gerilim harmoniğinin değişimi.

Şekil 6.29’deki grafik incelendiğinde ise çıkış geriliminde ise 8,7 voltluk bir değişim gerçekleştiği görülmektedir. 0 derecelik mıknatıs açısı, 30 dereceye çıktığında alternatör çıkışından elde edilen faz başına üretilen gerilim değerinde %5,9’luk bir azalma olduğunu görülmektedir.



Şekil 6.29 : Yüksüz durumda mıknatis açısına bağlı olarak hat geriliminin değişimi.

Vuruntu momentinin mıknatis açısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.30' daki grafik incelendiğinde yaklaşık 6 Nm azaldığı görülmektedir. Vuruntu momentindeki azalmanın yüzdelerik olarak ifadesi ise %85,7 kadardır. Vuruntu momentine de bakarak standart bir dikdörtgen mıknatis kullanıldığında mıknatis açısını değiştirerek etkin bir şekilde alternatör performansının iyileştiğini söyleyebiliriz.

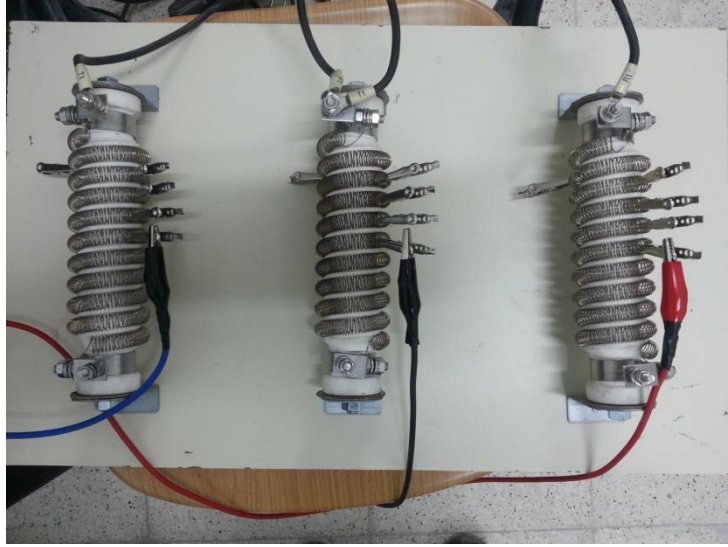


Şekil 6.30 : Yüksüz durumda mıknatis açısına bağlı olarak vuruntu momentinin değişimi.

6.2 Alternatörün Yüklü Çalıştırılması

Alternatörün yüklü çalıştırılabilmesi için 3 adet, her biri 60.5 ohm değerinde rezistan direnç kullanılmıştır (Şekil 6.31). Direnç sargıları üzerinden proplar ile uç çıkartılarak farklı kademe değerleri oluşturuldu. Birinci kademe olarak direnç sargılarının tamamı olan 60.5 ohm, ikinci kademe için 29.1 ohm, üçüncü kademe için 22.6 ohm, dördüncü kademe için 16.4 ohm, beşinci kademe için 10.8 ohm ve son olarak altıncı kademe için 7,4 ohm değerleri belirlenerek bu noktalar alternatör

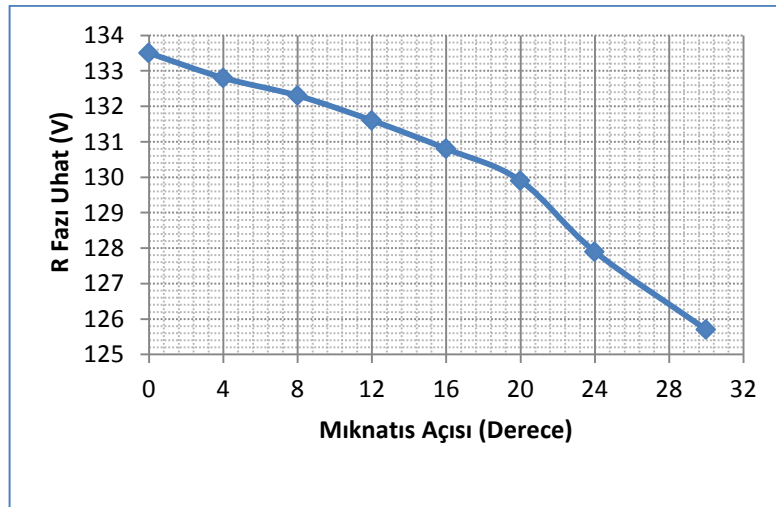
çıkışına bağlanarak yüklü olarak çalıştırıldı. Dirençlerin her bir kademesi için rotorda bulunan mıknatis açıları değiştirilerek farklı açı ve yüklerde alternatör çıkışından elde edilen; çıkış akımı, üretilen gerilim değeri, gerilim ve akımdaki harmonik değişimler ölçülerek grafiksel olarak gösterildi.



Şekil 6.31 : Sargılı dirençler ve kademe noktaları.

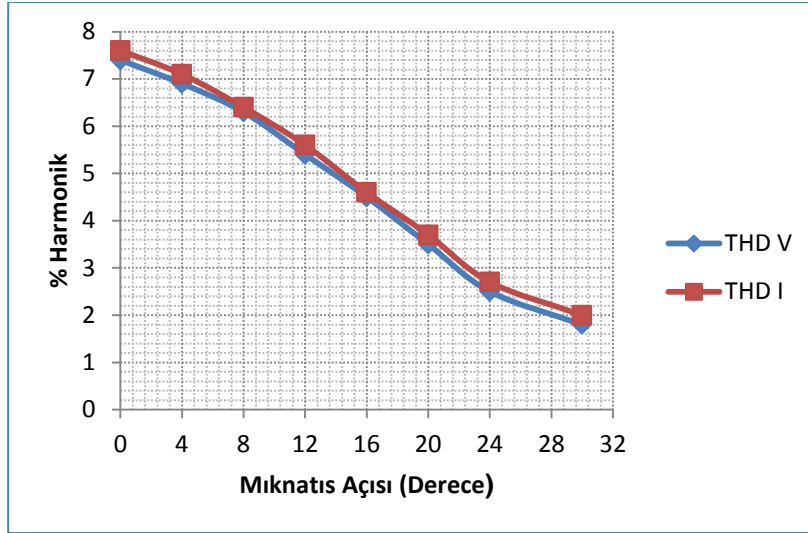
6.2.1 Birinci kademe 60.4 ohm' da yüklü çalışma

Mıknatis açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceler için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 60.4 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 1.3A akım ölçüldü. Şekil 6.32' de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatis açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



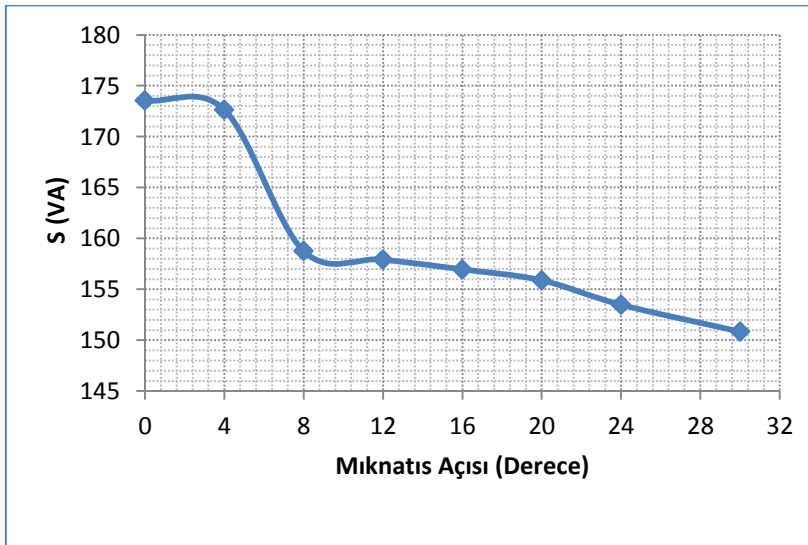
Şekil 6.32 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.33’ de sabit yükte mıknatıs açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 7.4 iken, 30 derecede 1.8’ e düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 7.6’ dan, 2’ ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.33 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

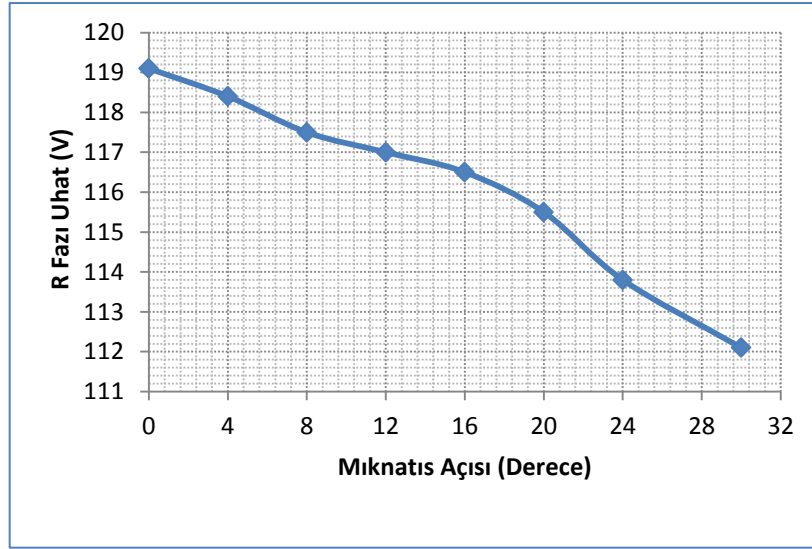
Şekil 6.34’ de her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %9 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %11.6 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.34 : Faz başına görünür güç.

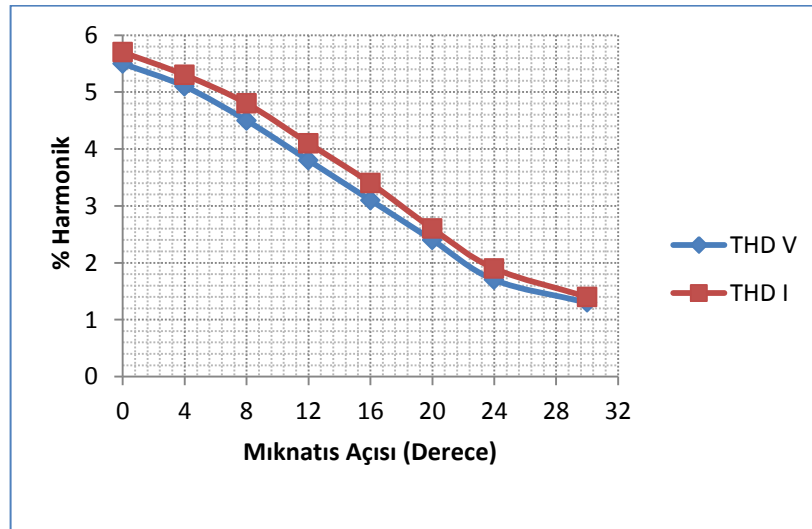
6.2.2 İkinci kademe 29.1 ohm' da yüklü çalışma

Mıknatis açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceler için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 29.1 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 2.3A akım ölçüldü. Şekil 6.35' de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatis açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



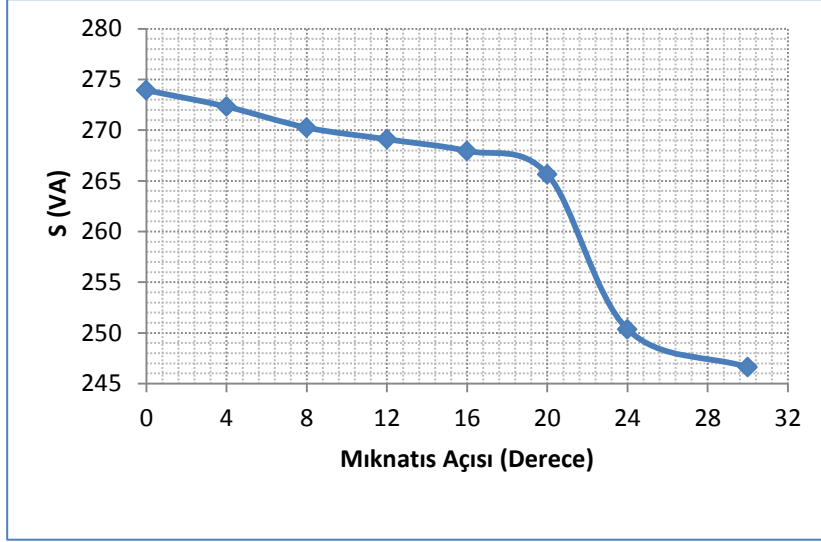
Şekil 6.35 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.36' da sabit yükte mıknatis açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 5.5 iken, 30 derecede 1.3' e düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 5.7' den, 1.4' e düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.36 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

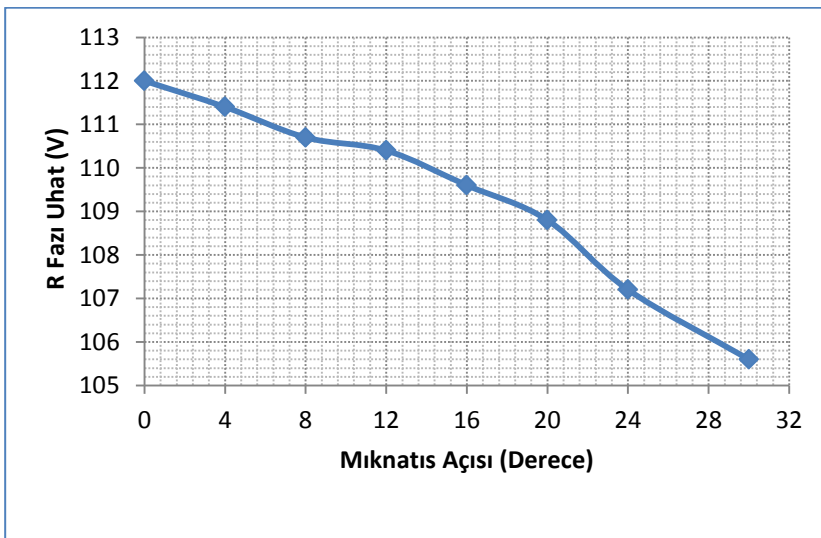
Şekil 6.37’ de her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %1.8 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %8.6 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.37 : Faz başına görünür güç.

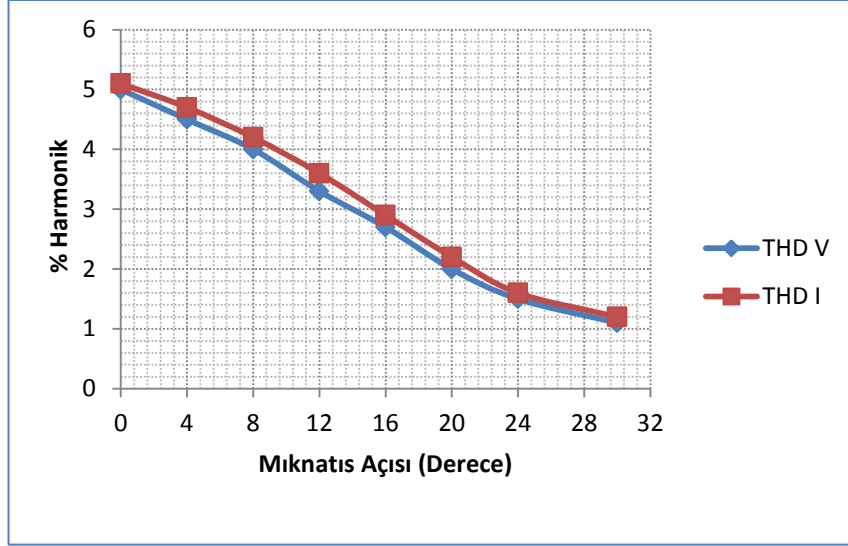
6.2.3 Üçüncü kademe 22.6 ohm’ da yüklü çalışma

Mıknatıs açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceler için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 22.6 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 2.8A akım ölçüldü. Şekil 6.38’ de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatıs açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



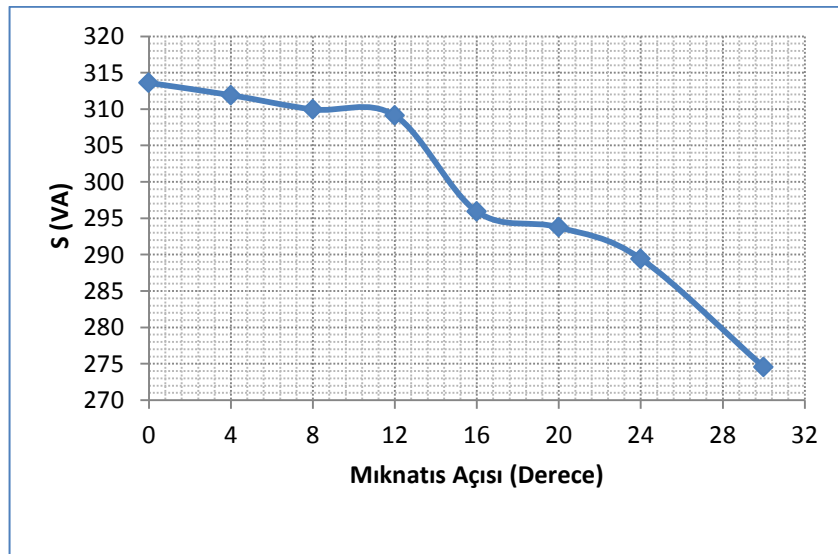
Şekil 6.38 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.39' da sabit yükte mıknatıs açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 5 iken, 30 derecede 1,1' e düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 5.1' den, 1.2' ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.39 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

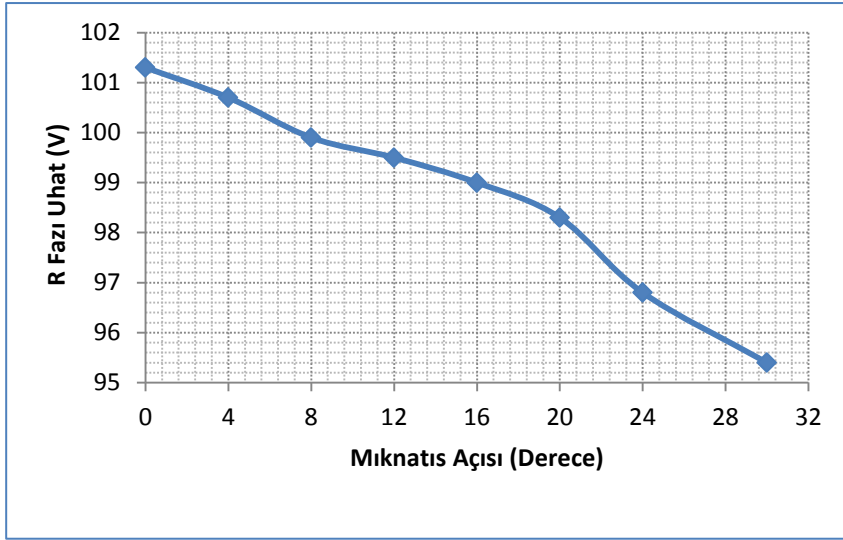
Şekil 6.40' da her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %1.4 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %7.7 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.40 : Faz başına görünür güç.

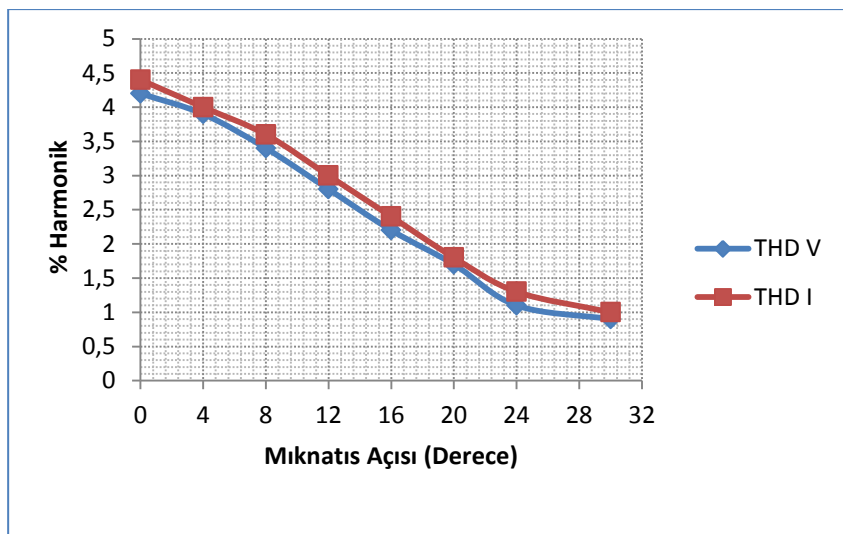
6.2.4 Dördüncü kademe 16.4 ohm' da yüklü çalışma

Mıknatıs açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceleri için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 16.4 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 3.4A akım ölçüldü. Şekil 6.41' de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatıs açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



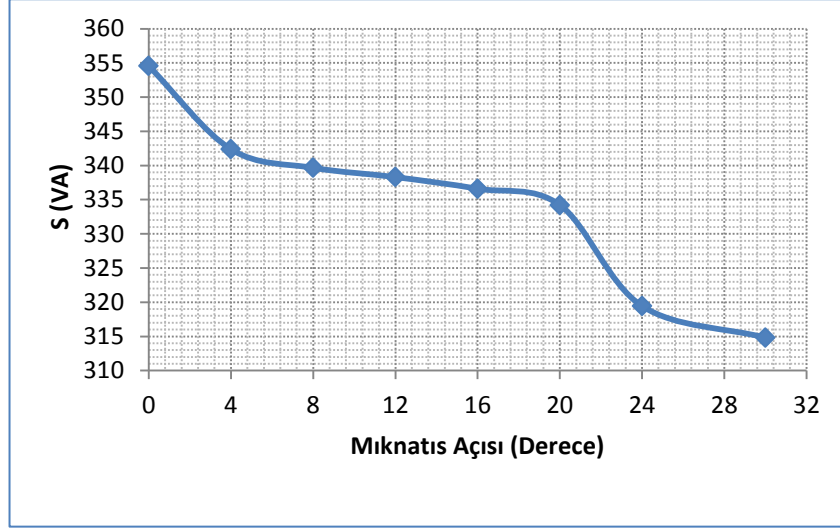
Şekil 6.41 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.42' de sabit yükte mıknatıs açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 4.2 iken, 30 derecede 0.9' a düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 4.4' den, 1' e düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.42 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

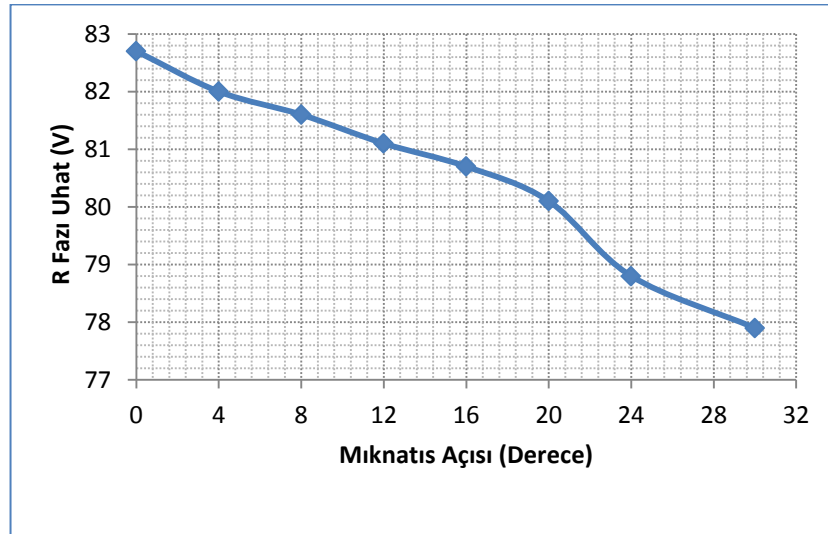
Şekil 6.43' de her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %4.6 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %9.9 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.43 : Faz başına görünür güç.

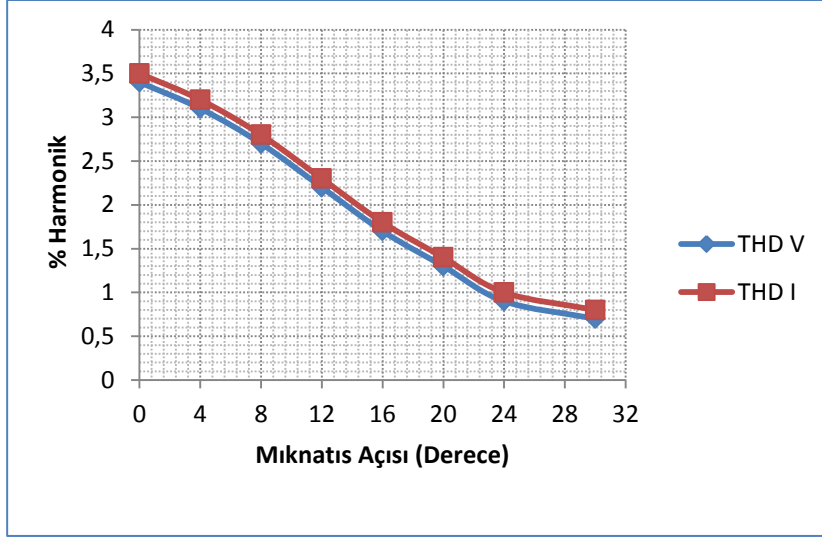
6.2.5 Beşinci kademe 10.8 ohm' da yüklü çalışma

Mıknatıs açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceler için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 10.8 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 4.3A akım ölçüldü. Şekil 6.44' de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatıs açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



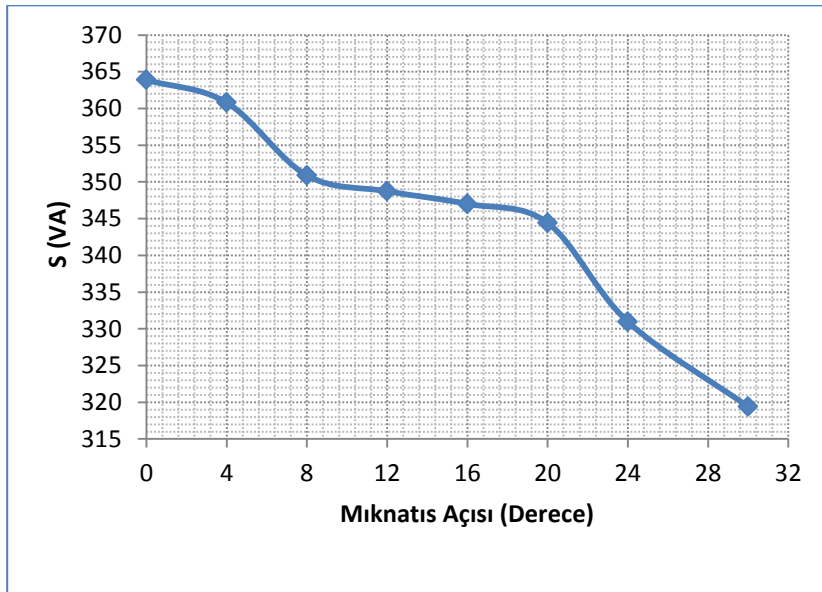
Şekil 6.44 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.45’ de sabit yükte mıknatıs açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 3.4 iken, 30 derecede 0.7’ ye düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 3.5’ den, 0.8’ e düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.45 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

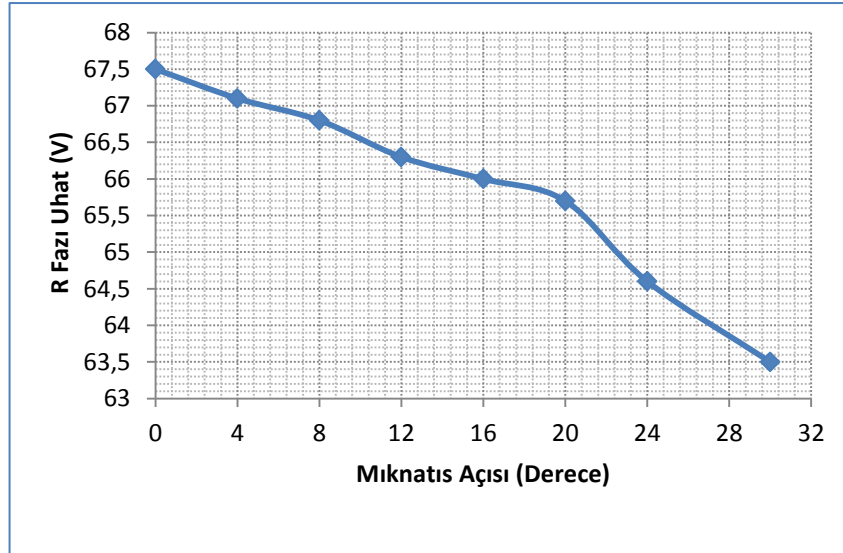
Şekil 6.46’ da her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %4.2 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %9 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.46 : Faz başına görünür güç.

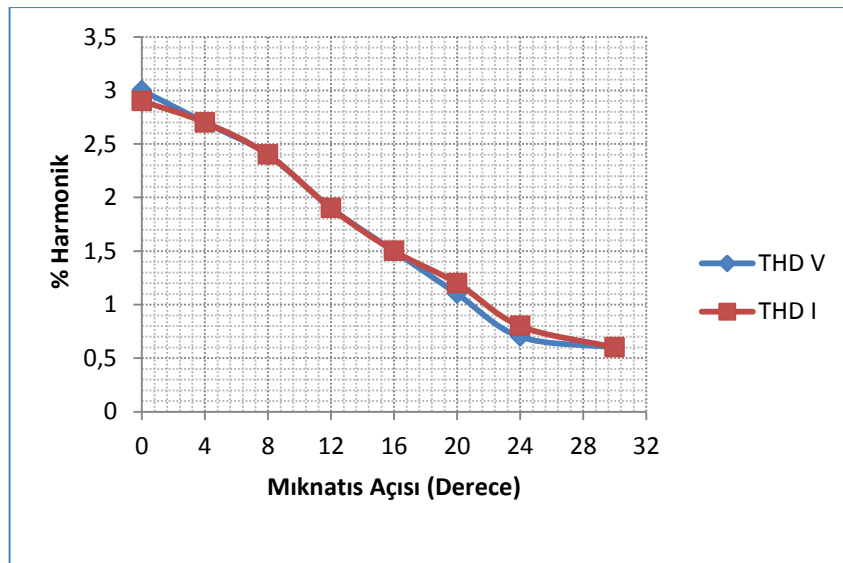
6.2.6 Altıncı kademe 7.4 ohm' da yüklü çalışma

Mıknatis açıları 0-4-8-12-16-20-24-28-30 dereceler için hazırlanan pleksi kalıplar sırasıyla takılarak her açı için alternatör çıkışları faz başı 7.4 ohm ile yüklendi. Bu yük durumunda alternatör çıkışından 50 Hz sabit frekansta faz başına 5A akım ölçüldü. Şekil 6.47' de alternatör çıkış geriliminin sabit yük altında mıknatis açısına bağlı olarak değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



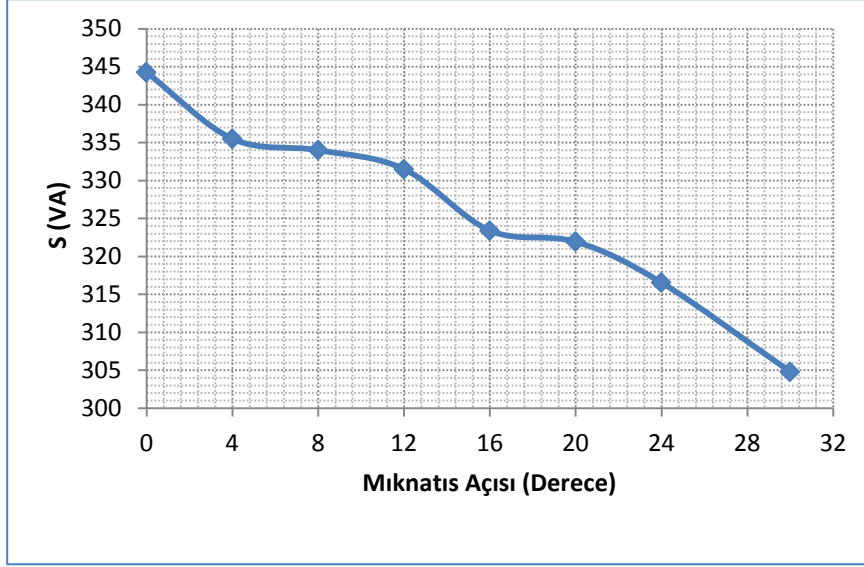
Şekil 6.47 : Bir fazın hat gerilim eğrisi.

Şekil 6.48' de sabit yükte mıknatis açısına bağlı olarak akım ve gerilim harmonik değerlerinin değişimi grafiksel olarak verilmiştir. 0 derecede gerilim harmoniği 3 iken, 30 derecede 0.6' ya düştüğü görülmektedir. Aynı grafikte akım harmoniğinin ise 2.9' dan, 0.6' ya düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.48 : Akım ve gerilim harmonik değişimi.

Şekil 6.49’ da her bir mıknatıs açısında, faz başı üretilen gerilim değeri ve faz başı çekilen akıma bağlı olarak üretilen faz başı görünür güç çıkış eğrisi oluşturulmuştur. Alternatör çıkış görünür güç değerinde mıknatıs açısının 12 derece olduğu durumda 0 dereceye göre %3.7 azalma olduğu görülürken, 24 derecede ise toplam güç kaybının 0 derecelik açığa göre %8 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.49 : Faz başına görünür güç.

6.2.7 Yüklü durumda çalışma sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 6.3 : Yüklü durumdaki deneysel sonuçlar.

	M.Açısı	0	4	8	12	16	20	24	30
1.KADEME 60.5 ohm	THD V	7,4	6,9	6,3	5,4	4,5	3,5	2,5	1,8
	THD A	7,6	7,1	6,4	5,6	4,6	3,7	2,7	2
	I çıkış	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	S (VA)	173,55	172,64	158,76	157,92	156,96	155,88	153,48	150,84
	R	133,5	132,8	132,3	131,6	130,8	129,9	127,9	125,7
	S	133,4	132,8	132,3	131,6	130,8	129,9	127,9	125,7
	T	133,3	132,7	132,2	131,5	130,7	129,8	127,9	125,8
2.KADEME 29.1 ohm	THD V	5,5	5,1	4,5	3,8	3,1	2,4	1,7	1,3
	THD A	5,7	5,3	4,8	4,1	3,4	2,6	1,9	1,4
	I çıkış	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2
	S (VA)	273,93	272,32	270,25	269,1	267,95	265,65	250,36	246,62
	R	119,1	118,4	117,5	117	116,5	115,5	113,8	112,1
	S	118,8	118,2	117,4	116,9	116,3	115,4	113,7	112
	T	118,7	118,2	117,4	116,8	116,3	115,3	113,6	111,9
3.KADEME 22.6 ohm	THD V	5	4,5	4	3,3	2,7	2	1,5	1,1
	THD A	5,1	4,7	4,2	3,6	2,9	2,2	1,6	1,2
	I çıkış	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,6
	S (VA)	313,6	311,92	309,96	309,12	295,92	293,76	289,44	274,56
	R	112	111,4	110,7	110,4	109,6	108,8	107,2	105,6
	S	111,6	111	110,3	107,4	109,2	108,4	106,9	105,3
	T	111,1	110,6	110	102	108,9	108	106,6	105
4.KADEME 16.4 ohm	THD V	4,2	3,9	3,4	2,8	2,2	1,7	1,1	0,9
	THD A	4,4	4	3,6	3	2,4	1,8	1,3	1
	I çıkış	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3
	S (VA)	354,55	342,38	339,66	338,3	336,6	334,22	319,44	314,82
	R	101,3	100,7	99,9	99,5	99	98,3	96,8	95,4
	S	100,5	100	99,2	98,9	98,3	97,6	96,2	94,8
	T	100	99,5	98,9	98,4	97,9	97,3	95,8	94,3
5.KADEME 10.8 ohm	THD V	3,4	3,1	2,7	2,2	1,7	1,3	0,9	0,7
	THD A	3,5	3,2	2,8	2,3	1,8	1,4	1	0,8
	I çıkış	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3	4,2	4,1
	S (VA)	363,88	360,8	350,88	348,73	347,01	344,43	330,96	319,39
	R	82,7	82	81,6	81,1	80,7	80,1	78,8	77,9
	S	81,7	81,3	80,7	80,4	79,9	79,5	78,2	77,1
	T	82	81,5	81	80,5	80,2	79,6	78,3	77,2
6.KADEME 7.4 ohm	THD V	3	2,7	2,4	1,9	1,5	1,1	0,7	0,6
	THD A	2,9	2,7	2,4	1,9	1,5	1,2	0,8	0,6
	I çıkış	5,1	5	5	5	4,9	4,9	4,9	4,8
	S (VA)	344,25	335,5	334	331,5	323,4	321,93	316,54	304,8
	R	67,5	67,1	66,8	66,3	66	65,7	64,6	63,5
	S	67,1	66,8	66,4	66	65,7	65,4	64,3	63,3
	T	65,4	65,1	64,7	64,3	64	64,7	62,6	61,6

Tasarlanan alternatör altı farklı omik yük değeri ile yüklenip, her bir yük değeri için farklı kutup açıları oluşturularak; üç faz çıkış gerilimi, çıkış gerilim harmoniği, çıkış akım harmoniği ve görünür güç değerleri alınarak tablo 6.2' de gösterildi. Ayrıca bu parametrelere bağlı grafikler çıkarıldı.

Tablo 6.2 incelendiğinde farklı yük durumlarında mıknatıs açısının artırılması ile birlikte alternatör parametrelerinde önemli değişimler olduğu görülmektedir.

Gerilim ve akım harmonik değerlerinin, alternatör yükünün artmasıyla azaldığı gibi kutup açısına bağlı olarak da önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Gerilim harmoniği, alternatör birinci kademede yüklü iken kutup açısının 0'dan 30 dereceye çıkarılmasıyla %75'lik azalma olduğu görülmüştür. Gerilim harmoniğindeki bu değişim ikinci kademede %76, üçüncü kademede %78, dördüncü kademede %78, beşinci kademede %79 ve altıncı kademede %80'lik bir azalma söz konusudur. Akım harmoniğindeki azalma ise birinci kademede %73, ikinci kademede %75, üçüncü kademede %76, dördüncü kademede %77, beşinci kademede %77 ve altıncı kademede ise %79'luk bir azalma olduğu görülmektedir.

Çıkış gerilim değerlerinin alternatörden çekilen yükün artırılmasıyla düştüğü gözlemlenmiştir. Bu değişim; yaklaşık olarak birinci kademedan ikinci kademeye geçildiğinde %10.8, ikinci kademedan üçüncü kademeye geçerken %6, üçüncü kademedan dördüncü kademeye geçerken %9.6, dördüncü kademedan beşinci kademeye geçildiğinde %18.4 ve beşinci kademedan altıncı kademeye geçişte %18.4'lük gerilim düşümü gerçekleşmiştir.

Çıkış görünür güç değerinin ise beşinci kademeye kadar yük arttıkça arttığı ancak kutup açısının artırılması ile küçük değerlerde de olsa azaldığı görülmüştür. Kutup açısı 0'dan 30 dereceye çıkıncı her kademe değerinde ortalama %11'lik bir güç kaybı vardır. Bu kayıp 20 derecelik mıknatıs açısında ortalama %6 iken, 24 derecede yaklaşık olarak %9'dur.

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar giderek artmıştır. Bunda dünya üzerindeki kaynakların önümüzdeki 50 yılda büyük ölçüde azalacağı yönünde yapılan çalışmaların da etkisi büyüktür. Bu açıdan yapılan bu çalışmada rüzgar türbinlerinde kullanılan aksel akılı alternatörlerin elektriksel performansını yükseltici bir çalışma ortaya konmuştur. Özellikle aksel akılı alternatörlerden biri olan açık oluklu toroidal sargılı aksel akılı sabit mıknatıslı NN tip (TAOEASM-NN) alternatörde açık oluk etkisinden dolayı büyük oranlarda vuruğu momenti meydana gelmektedir. Bununla birlikte basit ve maliyeti ucuz olan dikdörtgen tipi mıknatıs ile gerçekleştirilen kendi ekseni etrafında döndürülen bir düzenek ile hem vuruğu momenti üzerine hem de elektriksel performansını iyileştirici bir teknik ortaya konmuştur. Alınan manyetik sonuçlar incelendiğinde 18 derece de vuruğu momentinin %70 azaldığı görülmektedir. Yüksüz durumdaki deneysel sonuçlara da bakılırsa 20 derece dönme açısında %62,5 bir değer elde edilerek manyetik sonuçlara yaklaşılmıştır. Bununla birlikte diğer elektriksel parametreler incelendiğinde 20 derece için nominal yükte akım ve gerilim harmonik bozulması yaklaşık %63 azalmıştır. Buna karşılık nominal güç değeri ise %6,6 kadar azalmıştır. 30 derece mıknatıs açısında ise nominal güç değerinin %11,6 azaldığı görülmektedir.

Yapılan çalışmada manyetik ve deneysel çalışmalar göz önünde tutularak TAOEASM-NN tip alternatörlerde dikdörtgen tipi mıknatıs kullanıldığında 20 derecelik bir mıknatıs açısı için alternatörün elektriksel ve mekanik performansının iyileştirildiği görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalarda farklı geometrik şekillere sahip mıknatıslar içinde mıknatıs açılarındaki değişimlerin EASM alternatör performansına olan etkileri incelenebilir. Ayrıca stator tarafında da oluklara açı verilerek EASM alternatör performansı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hwang, Don-Ha; Lee, Ki-Chang; Kang, Do-Hyun; Kim, Yong-Joo; Choi, Kyeong-Ho; Park, Doh-Young: "An Modular-type Axial-flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Gearless Wind Power Systems", IEEE, **2004**.
- [2] Chan, Tze-Fun: "A Novel Wind Energy System", IEEE, **2009**.
- [3] Donato, D. G.; Capponi, F. G.; Caricchi, F.: "Fractional-Slot Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Machine with Core Wound Coils", Industry Application IEE Transactions, Vol.48, No.2, **2012**.
- [4] You, Yong-Min; Hwang, Kyu-Yun; Kwon, Byung-Il: "Optimal Design of Distributed Winding Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Turbine Systems", IEEE, **2010**.
- [5] Aydin, M.; Huang, S.; Lipo, A. S.: "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control", Industry Application Conference, October, **2002**.
- [6] Yang, Yee-Pin; Luh, Y. P.; Cheung, C. H.; Wang, J. P.; Wu, S. W.: "Multi-Objective Optimal Desing and Current Waveforms Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol.1, **2003**.
- [7] Yang, Yee-Pin; Wang, T. J.: "Electronics Gears for Electric Vehicles with Wheel Motor", IEEE Industrial Electronics Society, **2005**.
- [8] Yang, Yee-Pin; Cheung, C. H.; Wu, S. W.; Wang, J. P.: "Optimal Desing and Control of Axial Flux Brushless DC Whell Motor for Electrical Vehicles", Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation, **2002**.
- [9] Limsuwan, N.; Kato, T.; Akatsu, K.; Lorenz, R. D. : "Design and Evaluation of a Variable-Flux Flux-Intensifying Interior Permanent-Magnet Machine", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.50, No.2, March/April, **2014**.
- [10] Rizk, J.; Nagrial, M.: "Design of Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines", Universities Power Engineering Conference (AUPEC '99), September, **1999**.
- [11] Jurca, F. N.; Martis, C.: "Theoretical and Experimental Analysis of a Three - Phase Permanent Magnet Claw - Pole Synchronous Generator", The Institution of Engineering and Technology, **2012**.
- [12] Parviainen, A.; Pyrhönen, J.; Niemela, M.: "Axial Flux Interior Permenant Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets", ISEF 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, **2001**.

- [13] Reed, T.; Bakhoun, Dr. E.: “Axial Flux Permanent Magnet Alternator Using Printed Circuit Board Stators”, IEEE, **2008**.
- [14] Alipour, A.; Moallem, M.: “Analytical Magnetic Field Analysis of Axial Flux Permanent-Magnet Machines Using Schwarz-Christoffel Transformation”, IEEE, **2013**.
- [15] Ishikawa, T.: “Design of an Axial-Flux Type Permanent-Magnet Generator”, Intermag, **2015**.
- [16] Lee, Gyeong-Chan; Jung, Tae-Uk: “Design of Dual Structural Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine”, IEEE, **2013**.
- [17] Mardaneh, M.; Mirsalim, M.; Aliahmadi, M.: “Modelling and Desing of Axial-Flux Permanent Magnet Machines: A new Approach”, Power Electronics, Machines and Drives, the 3rd IET International Conference, **2006**.
- [18] Shokri, M.; Rostami, N.; Behjat, V.; Pyrhönen, J.; Rostami, M.: “Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Different Magnet Shapes”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, No.12, December, **2015**.
- [19] Pop, A. A.; Blan, H.; Radulescu, M.; Kanchev, H.: ”Electromagnetic Torque Capabilities of Axial-Flux and Radial-Flux Permanent-Magnet Machines”, IEEE, **2013**.
- [20] Jussila, H.; Nerg, J.; Pyrhönen, J.; Parviainen, A.: “Concentrated Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor for Industrial Use”, IEEE XIX International Conferance on Electrical Machines, Vol.14, No.2, **2010**.
- [21] Kahourzade, S.; Mahmoudi, A.; Ping, H. W.; Uddin, M. N.: “A Comprehensive Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Machines Revue de Litterature Sur Les Machines a Aimant Permanent a Fux Axiale”, Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.37, No.1, **2014**.
- [22] Bahador, N.; Darabi, A.; Hasanabadi, H.: “Demagnetization Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Motor under Three Phase Short Circuit Fault”, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2013), **2013**.
- [23] Kim, J. H.; Sarlioğlu, B.: “Preliminary Design of Axial Flux Permanent Magnet Machine for Marine Current Turbine”, IEEE, **2013**.
- [24] Huang, Ming-Shi; Chen, Po-Ching; Huang, Yuh-Shyuan; Chen, Kuan-Cheng: “Reduce the Cogging Torque of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for Light Electric Vehicle Applications”, IEEE, **2016**.
- [25] Lim, Dong-Kuk; Cho, Yong-Sun; Ro, Jong-Suk; Jung, Sang-Yong; Jung, Hyun-Kyo: “Optimal Design of an Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor for the Electric Bicycle”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.3, March, **2016**.
- [26] Ajily, E.; Ardebili, M.; Abbaszadeh, K.: “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, **2016**.

- [27] Wibowo, H. A.; Pradikta, A.; Dahono, P. A.: “An Analysis of Slotless Axial Flux Permanent Magnet Generators”, IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, **2012**.
- [28] Jin, P.; Yuan, Y.; Minyi, J.; Shuhua, F.; Heyun, L.; Yang, H.; Ho, S. L.: “3D Analytical Magnetic Field Analysis of Axial Flux Permanent-Magnet Machine”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, No.11, November, **2014**.
- [29] Muljadi, E.; Green, J.: “Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator”, 21th American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium, January, **2002**.
- [30] Aküner, C.; Hüner, E.: “The Air Gap and Angle Optimization in the Axial Flux Permanent Magnet Motor”, Electronics and Electrical Engineering, No.4, **2011**.
- [31] Aküner, C.; Hüner, E.: “Theoretical and Experimental Analysis of Open-Slotted Axial-Flux Permanent Magnet Electrical Machine”, Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, Vol.29, No.2, **2012**.
- [32] Hüner, E.; Aküner, C.: “Eksenel Akıllı Motorlarda Uygulanan Kontrol Yöntemlerine İlişkin Bir İnceleme”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS’09), Mayıs, **2009**.
- [33] Aydın, M.; Zhu, Z. Q.; Lipo, T. A.; Howe, D.: “Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent Magnet Machines Design Concepts”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.43, No.9, September, **2007**.
- [34] Hüner, E.: “Toroidal Sargılı Açık Oluklu Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı NN Tip Motor Tasarımı ve Uygulanması”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Temmuz, **2012**.
- [35] “Malzemelerin Manyetik Özellikleri”, Bölüm 4, Elektrik Elektronik Mühendisliği İçin Malzeme Bilgisi
- [36] Çöktüren E.: “Ferromanyetik Filmlerde Oluşan Yüzey Manyetik Anizotropinin Nümerik Çözümlemesi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2008**.
- [37] Kurt, Ü.: “Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar İçin Yeni Tasarım Modeli Geliştirme”, Doktora Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2006**.
- [38] Ocak, C.: “Mikro-Hidroelektrik ve Rüzgar Santralleri İçin Düşük Devirli Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Generatör Tasarımı ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2009.
- [39] Yüzer, E.Ö.: “Düşük Düşümlü Mikro Hidro Elektrik Santralleri İçin Sabit Mıknatıslı Bir Senkron Genaratör Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2011.
- [40] Yolacan, E.; Özyurt, E.; Aydın, M.: “ Magnet Shape Optimization of A Slotted Surface-Mounted Axial Gap PM Motor for Reducing Cogging Torque”, XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010.

- [41] Ayçiçek, E.: “Vuruntu Momenti Azaltılmış Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [42] Öner, Y.: “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, 2013.
- [43] Sezenoğlu, C.: “Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorun Benzetimi ve Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Gökhan ZEKA
Doğum Yeri ve Tarihi : 15.04.1984 / İzmit
E-Posta : gokhanzeka@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Lisans : 2011, Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,
Elektrik Eğitimi