

**Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Direkt Sürülen Eksenel
Akıllı Yabancı Uyartımlı Senkron Alternatör Tasarımı ve
Uygulaması**

Program Kodu: 3001

Proje No: 114E431

Proje Yürütücüsü:
Yrd.Doç.Dr. Engin HÜNER

Araştırmacılar:

Doç.Dr. M.Caner AKÜNER

KASIM 2016
KIRKLARELİ

ÖNSÖZ

Yapılan bu projede yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi için eksenel akılı yabancı uyarımlı senkron (EAYUS) alternatör tasarlanmıştır. Özellikle son yıllarda enerji ihtiyacının global ölçekte artması bilim insanlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli istifade etmeye yöneltmiştir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinde kullanılan alternatörler üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) alternatörlerin yanında EAYUS alternatörlerinde etkin bir şekilde uyarımın daha geniş bir aralıkta kullanılmak istendiği durumlarda tercih edileceğini ortaya konmuştur. Bununla birlikte eksenel akılı alternatörlerde yabancı uyarım ile mıknatıs ile sabit uyarımın birlikte kullanıldığı prototip çalışmalarında ileride bu alanda önemli olduğu gösterilmiştir.

Yapılan bu çalışma Tübitak 3001 proje destekleri kapsamında 114E431 nolu proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM	5
3.1 Senkron Alternatörler	5
3.1.1 Endüvi	6
3.1.2 Endüktör	7
3.1.3 Senkron Alternatörlerin Oluk Yapıları	7
3.2 Eksenel Akıllı Alternatörler	8
3.2.1 Tek Kenarlı EASM Senkron Alternatörler	9
3.2.2 İki Kenarlı EASM Alternatör	9
3.2.3 EASM Alternatörlerde Vuruntu Momenti	10
3.3 Tasarım eşitlikleri	11
3.4 Tasarımın 3D Modellenmesi	13
3.4.1 Stator	13
3.4.2 Rotor	14
3.4.3 Tasarımın 3d Katı Modelinin Oluşturulması	17
3.5 Tasarımın 3d Ansys Maxwell ile Manyetik Analizi	18
3.5.1 Eksenel Akıllı Sabit Mıknatıslı Alternatörün Manyetik Analizi	18
3.5.2 Yabancı Uyarımlı Eksenel Akıllı Alternatörün Manyetik Analizi	21
3.6 Tasarımın Üretimi	27

3.6.1	Stator	27
3.6.2	Rotor	29
3.6.3	Kapaklar ve Gövde.....	30
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1	Boş Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler	31
4.1.1	15 Hz Boş Çalışma Durumu	31
4.1.2	20 Hz Boş Çalışma Durumu	32
4.1.3	25 Hz Boş Çalışma Durumu	34
4.1.4	30 Hz Boş Çalışma Durumu	35
4.1.5	35 Hz Boş Çalışma Durumu	37
4.1.6	40 Hz Boş Çalışma Durumu	38
4.1.7	45 Hz Boş Çalışma Durumu	40
4.1.8	50 Hz Boş Çalışma Durumu	41
4.1.9	EAYUS Alternatörün Devir Karakteristiği	42
4.2	Yüklü Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler	43
4.2.1	EAYUS Alternatörün 30 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği	43
4.2.2	EAYUS Alternatörün 40 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği	44
4.2.3	EAYUS Alternatörün 50 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği	44
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	45
EK-1	KAYNAKLAR	47
EK-2	YAYINLAR.....	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Senkron Alternatör a) Duran Endüvi b) Dönen Endüvi	6
Şekil 3.2. Çıkık Kutuplu Senkron Alternatör	7
Şekil 3.3. Çıkık Kutuplu Senkron Alternatör Oluk Yapısı a) Açık Oluk b) Yarı Açık Oluk c) Kapalı Oluk.....	7
Şekil 3.4. EASM Makinenin Temel Yapısı.....	8
Şekil 3.5. Tek Taraflı EASM Alternatör a) Açık Oluklu b) Yarı Açık Oluklu	9
Şekil 3.6. a) Oluksuz İki Rotorlu b) Oluklu İki Rotorlu c) Oluksuz Tek Rotorlu d) Oluklu Tek Rotorlu	10
Şekil 3.7. Tasarlanan Eksenel Akıli Alternatörün Statoru.....	14
Şekil 3.8. Tasarlanan Eksenel Yabancı Uyartımlı Alternatörün Kutup Ayağı.....	15
Şekil 3.9. Tasarlanan Eksenel Akıli Alternatörün Rotoru (24 Kutuplu)	16
Şekil 3.10. Kutup Ayağı Altlığı a) Mıknatıs Altlığı b) Yabancı Uyartımlı Kutup Ayağı Altlığı	16
Şekil 3.11. Rotor a) Sabit Mıknatıslı Rotor b) Yabancı Uyartımlı Rotor	17
Şekil 3.12. Sabit Mıknatıslı Sistemin 3D Modeli	17
Şekil 3.13. Yabancı Uyartımlı Sistemin 3D Modeli	18
Şekil 3.14. EASM Alternatör Hava Aralığı Etkisi (1mm için).....	19
Şekil 3.15. EASM Alternatör Hava Aralığına Bağlı Kontur Boyunca Manyetik Akı Dağılımı ..	20
Şekil 3.16. EASM Alternatör Hava Aralığına Bağlı Kontur Boyunca Manyetik Akı Dağılımı ..	21
Şekil 3.17. Tasarlanan Yabancı Uyartımlı Eksenel Akıli Alternatör	21
Şekil 3.18. Kutup Ayak Ölçüleri	22
Şekil 3.19. 1200 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	24
Şekil 3.20. 1300 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	24
Şekil 3.21. 1400 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	25
Şekil 3.22. 1500 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	25
Şekil 3.23. 1600 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	26
Şekil 3.24. 1700 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	26
Şekil 3.25. 1800 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı.....	27
Şekil 3.26. Eksenel Akıli Alternatörün Statoru	28
Şekil 3.27. Sargı Şeması	29
Şekil 3.28. EAYUS Alternatörün Rotoru.....	29
Şekil 3.29. EAYUS Alternatörün Test Düzenneğı.....	30
Şekil 4.1. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri.....	31

Şekil 4.2. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	32
Şekil 4.3. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	32
Şekil 4.4. EAYUS Alternatörün 20 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	33
Şekil 4.5. EAYUS Alternatörün 25 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	34
Şekil 4.6. EAYUS Alternatörün 25 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	35
Şekil 4.7. EAYUS Alternatörün 30 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	35
Şekil 4.8. EAYUS Alternatörün 30 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	36
Şekil 4.9. EAYUS Alternatörün 35 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	37
Şekil 4.10. EAYUS Alternatörün 35 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	38
Şekil 4.11. EAYUS Alternatörün 40 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	38
Şekil 4.12. EAYUS Alternatörün 40 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	39
Şekil 4.13. EAYUS Alternatörün 45 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	40
Şekil 4.14. EAYUS Alternatörün 45 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	41
Şekil 4.15. EAYUS Alternatörün 50 Hz Durumunda U _f a) I _u =1 A için b) I _u =6 A için Faz Gerilim Eğrileri	41
Şekil 4.16. EAYUS Alternatörün 50 Hz Durumunda Uyarım Akımı (I _u) – Faz gerilimi (U _{faz}) Eğrisi	42
Şekil 4.17. EAYUS Alternatörün Devir Karakteristiği	43
Şekil 4.18. EAYUS Alternatörün 30 Hz Yüklü Çalışma Grafiği a) I _u =2A b) I _u =4A c) I _u =6A	43
Şekil 4.19. EAYUS Alternatörün 40 Hz Yüklü Çalışma Grafiği a) I _u =2A b) I _u =4A c) I _u =6A	44
Şekil 4.20. EAYUS Alternatörün 50 Hz Yüklü Çalışma Grafiği a) I _u =2A b) I _u =4A c) I _u =6A	44

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Çevresel hıza bağlı rotor hızı	11
Tablo 3.2. Tasarlanan Statorun Mekanik Büyüklükleri	14
Tablo 3.3. Tasarlanan Rotorun Mekanik Büyüklükleri	15
Tablo 3.4. Hava Aralığı – Manyetik Akı Dağılımı İlişkisi	19
Tablo 3.5. Kutup Genişliği – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi.....	22
Tablo 3.6. Amper Sarım – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi	23
Tablo 3.7. Kutup Kenar Yüksekliği – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi.....	23
Tablo 4.1. Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	31
Tablo 4.2. Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	33
Tablo 4.3. Alternatörün 25 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	34
Tablo 4.4. Alternatörün 30 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	36
Tablo 4.5. Alternatörün 35 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	37
Tablo 4.6. Alternatörün 40 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	39
Tablo 4.7. Alternatörün 45 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	40
Tablo 4.8. Alternatörün 50 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi	42

ÖZET

Yapılan bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi için direkt sürülebilir eksenel akılı yabancı uyarımlı senkron (EAYUS) alternatör tasarlanmıştır. EAYUS alternatör tasarımında sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanan ANSYS firmasının Maxwell programı kullanılmıştır. Maxwell ile manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler eşliğinde tasarlanan EAYUS alternatör üretilerek deneysel veriler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada yabancı uyarım ile hava aralığı akısı geniş aralıkta ayarlanması mümkün olmuştur. Analitik ve manyetik hesaplamalar sonucunda 152 volt gerilim elde edilmiştir. Bununla birlikte Deneysel olarak ta 1150 amper sarımda 129 volt elde edilmiştir. Manyetik simülasyonlarda manyetik nüvenin doyum noktasının 1800 amper sarım değerinin üstünde olduğu görülmüştür. Ayrıca gerekli uyarım sağlandığı takdirde 150 volt faz gerilimi ve 19,8 amper yük akımı değeri ile 17 kW güce erişileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Bunun yanında sabit mıknatıslı uyarıma sahip alternatörlere göre kutup ayakları için daha geniş yere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden hem hava aralığı akısını kontrol etmek hem de kompakt bir yapı sağlamak amacıyla mıknatıs ve yabancı uyarımın birlikte kullanıldığı tasarımların ortaya konması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Akılı Alternatör, Yabancı Uyarım, SEY Analizi, Yenilenebilir Enerji

ABSTRACT

In this paper is designed direct drive axial flux externally excited synchronous (AFEES) alternator for wind energy, which is one of the renewable energy sources. In the AFEES alternator design is used Maxwell program of ANSYS company which uses the finite element method. Magnetic analyzes were performed with Maxwell. Experimental data were obtained by designed AFEES alternator via magnetics analysis. In this study, it was possible to adjust the wide range of air gap flux with externally excitation. In the results of analytical and magnetic calculations was obtained 152 volts per phase. However, experimentally 129 volts per phase was obtained in the 1150 ampere turns excitations. In the core have saturation level up 1800 ampere turns with magnetically simulations. Also with needed externally excited were obtained 150 volt and 19,8 ampere per phase experimentally. This is equal to 17 kw power. In addition, AFEES alternators require a wider range for pole legs according to permanent magnet poles. Therefore, it is necessary to provide permanent magnet and externally excited design together. Thus the air gap flux can be controlled and a compact structure is obtained.

Keywords: Axial Flux Alternator, Externally Excitation, FEM Analysis, Renewable Energy

1. GİRİŞ

Hazırlanan bu proje ile yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi için direkt sürülebilir eksenel akılı yabancı uyartımlı senkron (EAYUS) alternatör tasarlanmıştır. Tasarlanan EAYUS alternatör için ANSYS firmasının Maxwell programı kullanılmıştır. Maxwell ile tasarlanan EAYUS alternatörün manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler doğrultusunda stator ve rotor üretimi yapılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

Son yıllarda rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan alternatörler üzerine yapılan çalışmalar özellikle mıknatıslı ve direkt pervane rotoruna bağlanan alternatör çeşitlerine yönelmiştir. Neodyum mıknatısların gelişimi ve fiyatlarının ucuzlaması direkt sürülen eksenel akılı (EA) alternatörleri geliştirmiştir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) alternatörlerde vuruntu momenti oluşur. Vuruntu momenti rotor kutuplarını oluşturan mıknatıslar ile stator olukları arasındaki etkileşimdir. Özellikle hava aralığındaki relüktans değişimi büyüdüğünde vuruntu momenti de artar. Vuruntu momentini azaltmak için literatürde yapılan farklı çalışmalar mevcuttur. Bunların bir kısmı mıknatıs kaykay tekniklerine dayanır. Bu tekniklerde ise mıknatısa verilen özel şekillerden dolayı mıknatıs maliyetleri büyük ölçüde artmaktadır. Ayrıca EASM alternatörlerde alan zayıflatmanın zorluğu da EASM alternatörlerin dezavantajlarından biridir. Bu nedenle gerçekleştirilen bu çalışmada rotor manyetik kutupları alan sargıları ile oluşturularak geniş bir aralıkta manyetik akı kontrolü sağlanmıştır. Bununla birlikte ürettikleri gerilim açısından sabit mıknatıslı yapılan çalışmalara göre de yakın değerler elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan alternatörlerin genel yapısını rotor hızı belirlemektedir. Son 10 yıldır verimi arttırma ve bakım maliyetlerini düşürmek için direkt sürülen alternatörler önemli araştırma konusu olmuştur. Sabit mıknatıslı eksenel akılı alternatörlerde de son 20 yıldaki gelişmeler ile birlikte bu alternatörler önem arz etmiştir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı alternatörlerin geniş rotor yüzeyleri ve kutup sayılarının çok olması da direkt sürülen rüzgar alternatörleri için önemli bir aday haline gelmiştir. Günümüzde radyal akılı mıknatıslı ve sargılı tip kutba sahip alternatörlerin ticari üretimi mevcuttur. Eksenel akılı alternatörler ise prototip ve kısıtlı üretim aşamasındadır. Eksenel akılı alternatörlerde de en çok çalışılan konu sabit mıknatıslı EA alternatörler ve performanslarını artırıcı yöntemler üzerinedir. EASM alternatörler üzerine yapılan bir çok çalışmada mıknatıs maliyetleri ve stator üretim maliyetlerinin yüksek oluşu önemli bir dezavantajdır. Stator üretim maliyetlerinde en önemli etki toroidal nüvede açılan oluklar için tel erezyonunun kullanılmasıdır(Aydın, 2009). Tel erezyonu ile nüvede oluk açılması hem zaman açısından bir kayıp hem de maliyetleri çok fazla yukarı çeken bir yöntemdir. Ülkemizde de rüzgar potansiyelinin son yıllarda farkına varılması ve bu yönde kurulan bir çok büyük güçlü alternatör dış ülkelerin tasarımlarına dayanmaktadır. Bu yüzden ülkemizde son yıllarda rüzgar santrali konusunda ulusal projeler yapılmaya başlanmıştır(Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, 2014).

Yukarıdakiler ışığında üretim maliyetinin düşük olduğu yerli imkanlarla üretilen 2,5 m/sn de üretime başlayan ve 10 kW nominal güce sahip yüksek verimli bir EAYU alternatör tasarlanıp uygulaması yapılacaktır. Ayrıca üretilen bu EAYU alternatör EASM alternatörler ile karşılaştırılacaktır. Yapılması amaçlanan bu proje ile bu alanda yerli tasarımların geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek güçlü eksenel akılı alternatörler için yol gösterici bir proje niteliği taşıması hedeflenmektedir.

EASM alternatörler üzerine yapılan çalışmaları prototip üretimler ve vuruş momenti üzerine yapılan çalışmalar olarak iki başlık altında toplayabiliriz. Özellikle toroidal tip oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerin sağladıkları yüksek güç yoğunluğu nedeniyle üzerinde yoğun olarak çalışılan eksenel akılı makine tipidir(Huang vd., 1999; Huner ve Akuner, 2012). Bununla birlikte oluklu tip eksenel akılı makinelerde en önemli problem vuruş momentidir. Son yıllarda vuruş momentini giderici yöntemler üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Vuruş momentini gidermek için stator veya rotor tarafında oluk yapısı ve mıknatıs şeklini değiştirmek gerekmektedir. Stator tarafında yapılan kayk

yöntemleri vuruntu momentini azaltmaktadır(Choi vd., 2009). Fakat stator işleme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle farklı mıknatıs şekilleri ve kaykılar ile vuruntu momentini azaltıcı yöntemler üzerine yapılan çalışmalar daha fazladır(Parvininen vd., 2001; Letelier vd., 2007; Aydın vd., 2007). Fakat vuruntu momentini azaltmak için yapılan yöntemler makine performansı üzerine olumsuz etkileri vardır. Mıknatıslar ile yapılan değişik kaykılar uygulamak toplam mıknatıs hacmini azalttığı için makine performansını düşürmektedir(Parvininen vd., 2001). Rotorların birbirine göre ötelenmesi ile vuruntu momentini azaltıcı yöntemde de makine gerilimini ve gücünü azaltıcı etki oluşturduğu belirtilmiştir(Aydın vd., 2007).

Sabit mıknatıslı eksenel akılı makinelerde diğer bir problem rotordaki sabit mıknatıslardan dolayı alan zayıflatmanın zorluğudur. Bunun için rotor tarafında mıknatıs ve yumuşak manyetik malzeme kullanılarak yapılan prototip çalışmalar mevcuttur(Letelier vd., 2007; Tapia vd., 2006). Bu çalışmada yumuşak manyetik malzeme endüvi reaksiyonu ile manyetize ve demanyetize edilerek alan zayıflatma gerçekleştirilmiştir. Dezavantajı ise mıknatısların bir miktar demanyetize alana maruz kalmalarıdır. Bir diğer çalışmada bir kutbun tamamı yumuşak manyetik malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Alan kontrolü ise statora sarılan sargı ile gerçekleştirilmiştir(Hsu, 1998). Statora sarılan alan sargısı ile alan zayıflatmanın yapıldığı başka bir çalışmada ise rotor asimetric olarak yumuşak demir ve sabit mıknatıslardan oluşturulmuştur. Alan zayıflatma sargısına uygulanan dc gerilimin yönüne bağlı olarak rotorda ki toplam manyetik devrenin yönü değiştirilerek yapılan bu alan zayıflatma yönteminde mıknatısların demanyetikleşme riski ortadan kaldırılmıştır(Aydın vd., 2002). Bununla birlikte azalan mıknatıs hacmi ve alan zayıflatma sargısında harcanan güç bu yöntemin en büyük dezavantajıdır.

Eksenel akılı makinelerde yapılan prototip çalışmalar genel olarak nüveli ve nüvesiz tipler olarak ikiye ayrılmıştır. Nüvesiz tip EA makinelerde vuruntu momentinin olmayışının yanında düşük enerji yoğunluğu nedeniyle daha çok fan gibi uygulamalar ile düşük güçlü rüzgar alternatörlerinde kullanımı uygundur(Park vd., 2006). Nüveli tip eksenel akılı makinelerde üretilen prototipler ise oluksuzu tip EASM makineler ve oluklu tip EASM makineler olarak ayrılabilir. Oluksuz tip EASM makineler vuruntu momentinin olmayışı nedeniyle büyük bir avantaja sahiptir(Crescimbeni vd., 2005). Bununla birlikte oluklu EASM makinelere göre düşük güç yoğunlukları en önemli dezavantajlarıdır. Oluklu tip EASM makineler genellikle iki rotor ve bir statordan oluşan yapıdadır. Stator toroidal, rhomboidal ve trapezoidal olmak üzere farklı sargılar kullanılabilir. Ayrıca stator yapısı açısından çıkık kutuplu EASM makine prototipleri de sunulmuştur(Mendrela ve Jagiela, 2004). Bununla

birlikte yüksek hızlarda daha yüksek verim elde etmek için yumuşak manyetik malzemeden yapılan oluklu statora sahip EASM makine prototip çalışmaları da yapılmıştır(Profumo vd., 1998). Ayrıca yumuşak manyetik malzemeden yapılan EASM makine statorunun sıcaklık dağılımı açısından da avantajı deneysel olarak sunulmuştur(Marignetti vd., 2008).

Eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler üzerine çalışmaların son on yıldır yoğun olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında da sağladıkları yüksek güç ve kompakt yapısı nedeniyle özellikle elektrikli araçlarda direkt tekerleği sürmek için kullanılmasının yanında diğer direkt sürülebilir bir çok uygulamada kullanılmak üzere prototip çalışmaların olduğu görülmektedir. Özellikle rüzgar alternatörleri içinde düşük bakım maliyeti ve sürdürülebilirliği açısından direkt sürülen EA makinelerin önemi büyüktür. EA makinelerin rüzgar enerjisinde alternatör olarak kullanımlarında düşük maliyet ve geniş aralıkta kontrol edilebilmesi için yapılacak olan bu projede yabancı uyarımlı EA senkron bir alternatör tasarımı ve uygulamasının yapılması amaçlanmaktadır. Ayrıca sabit mıknatıslı alternatörler ile de performans ve maliyet açısından karşılaştırılmaları yapılacaktır. Bunun yanında kırsal bölgelerde kullanılmak üzere yurtdışından sağlanan düşük güçlü rüzgar enerjisi türbinleri açısından önemli bir yerli prototip çalışması gerçekleştirilecektir. 2,5 m/sn rüzgar hızında güç üretmeye başlayan ve 10 kW nominal güce sahip prototip EAYU alternatör ile kırsal kesimlerin elektrik ihtiyacının optimum karşılanması da sağlanacaktır.

Yapılan çalışmada birinci bölümde giriş verilmiştir. 2. Bölümde literatür taraması gerçekleştirilmiştir. 3. Bölümde tasarlanan EAYUS alternatörün analitik hesapları, 3d çizimleri, 3d manyetik analizleri ve üretim aşamaları açıklanmıştır. 4. Bölümde ise deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise deneysel bulgular tartışılarak ileriki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Yapılan bu projede EAYU senkron alternatör tasarlanmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye yönelik yapılan çalışmalar son on yıldır büyük miktarda artmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalardan bir kısmı da rüzgar türbinlerindeki alternatörler üzerinedir. Genel olarak rüzgar türbinlerinde kullanılan alternatörler DC Akım Dinamoları, AC Akım dinamoları ve Sabit Mıknatıslı alternatörler olarak 3'e ayırabiliriz. Tarihte ilk rüzgar gücünü elektrik enerjisine dönüştüren İskoç akademisyen Profesör James Blyth 'dir. Bu tarihten önceki dönemlerde de rüzgar gücü yel değirmenleri ve bunlarda kullanılan mekanik aksamlar vasıtasıyla sulama işleminde veya tahıl ezmek amacıyla mekanik sistemlere aktarılıyordu. 1970'li yıllarda ise ilk defa Danimarka'da modern rüzgar türbinleri üretilmeye başlandı. İlk üretilen rüzgar türbinlerinin gücü 20-30 kW civarındaydı. Günümüzde ise 7 MW güce ulaşan rüzgar türbinleri yapmak mümkündür.

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülürken kullanılan alternatörün devir sayısına uygun redüktör sistemi kullanmak gerekmektedir. Bununla birlikte 1980'li yıllardan itibaren neodyum mıknatısların bulunması ve son 20 yıldan beridir neodyum mıknatıs fiyatlarının düşmesi nedeniyle çok kutuplu radyal tasarımlarda ön plana çıkmıştır. Çok kutuplu alternatör tasarımının en önemli faydası düşük devirlerde güç üretebilme yetenekleridir. Bu sayede direkt pervane rotoruna bağlanarak sisteme akupile olan bu alternatörler sayesinde genel sistem verimi artmıştır. Bunun yanı sıra son 10 yıldır eksenel akıllı makineler üzerine yapılan çalışmalarda da rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere alternatörler geliştirilmiştir. Eksenel akıllı makineler radyal akıllı makinalara göre daha kompakt yapıda olup güç yoğunlukları daha yüksektir. Bununla birlikte yüksek eksenel çaplarda oluşan kuvvetlere uygun mekanik aksam üretmek ve nüveli eksenel akıllı makinalarda oluşan vuruş momenti başlıca sakıncalarındandır.

Yapılan bu projede EAYU senkron alternatör için hedeflenen 2.5 m/sn'de güç üretmeye başlaması ve 10 kw güce sahip olması için tasarım parametreleri ortaya konmuştur. Bununla birlikte yabancı uyartım ile geniş bir aralıkta hava aralığı akısının kontrolü hedeflenmiştir.

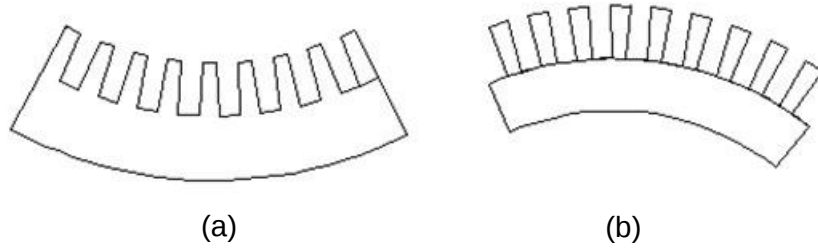
3.1 Senkron Alternatörler

Alternatörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik cihazlardır. Endüvi ve endüktör olmak üzere iki bölümden oluşurlar. Endüvi sargılarında elektro motor kuvvetin (EMK) olduğu kısımdır. Küçük güçlü alternatörlerde hareketli kısımda bulunur. Endüktör ise manyetik alanın oluşturulduğu kısımdır. Küçük güçlü alternatörlerde duran kısımda bulunmasına rağmen büyük güçlü alternatörlerde hareketli kısımda bulunur.

Senkron alternatörde indüklenen gerilim ve akım arttıkça dönen kısımdan gücü dışarı almak güçleşir. Bu yüzden endüvi duran kısımda imal edilir.

3.1.1 Endüvi

Alternatörde endüvi gücüne göre duran veya hareketli kısımda bulunabilir. Her iki durumda endüvi nüvesi ince silisli saçların paketlenmesi ile oluşturulur. Büyük çaplı alternatörlerde ise kullanılan ince silisli saçlar dairesel dilimlerden oluşturularak tasarlanır. Döner endüvili alternatörler yüksek gerilimli üretildiklerinde bileziklerin ve endüvinin yalıtılması oldukça zorlaşır. Bununla birlikte döner endüvide oluklara yerleştirilen iletkenlerin maruz kaldıkları merkezkaç kuvvetleri ile yerlerinden çıkma veya şekli bozukluklar gelebilir. Şekil 3.1’de duran ve döner endüvi için oluk yapısı verilmiştir.



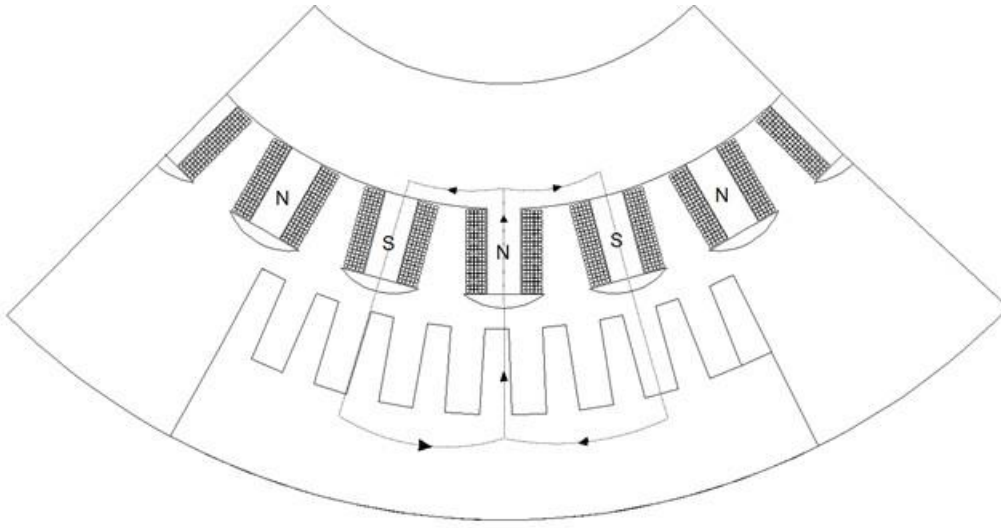
Şekil 3.1. Senkron Alternatör a) Duran Endüvi b) Döner Endüvi

Endüvinin hareket etmesine göre ikiye ayrılan senkron alternatörlerde endüvinin duran kısımda yapılmasının birçok faydası vardır. Bunları aşağıda maddeler halinde sıralayabiliriz.

- Döner endüvili sistemde indüklenen yüksek değerli gerilimin dış devreye alınmasında izolasyon problemi ortaya çıkar. Ayrıca yüksek gerilim ve akımın bilezik ve fırça yardımıyla dış devreye alınması sırasında ortaya çıkan arklardan dolayı alternatörün arıza yapma olasılığı artar.
- Döner endüvide sargılar üzerinde kısa devre akımları ve merkezkaç kuvvetinin oluşturduğu kuvvetler sargılarda bozulmalara neden olur. Bunun önlemek için uygulanması gereken yalıtım işi çok zordur.
- Kutup sargıları için gerekli olan gerilim 200-300 volt civarındadır. Dolayısıyla endüktör döner kısımda tasarlandığında oluk yalıtımı kolaylıkla sağlanır. Döner endüvide ise oluk yalıtımı için daha kalın yalıtım malzemesi kullanmak gerekir.
- Döner endüvide daha derin oluk yapısı istenmesine karşın şekil 3.1.b’de görüldüğü gibi oluk derinleştikçe mekaniksel olarak hem zayıflama oluşmakta hem de yer kalmamaktadır.

3.1.2 Endüktör

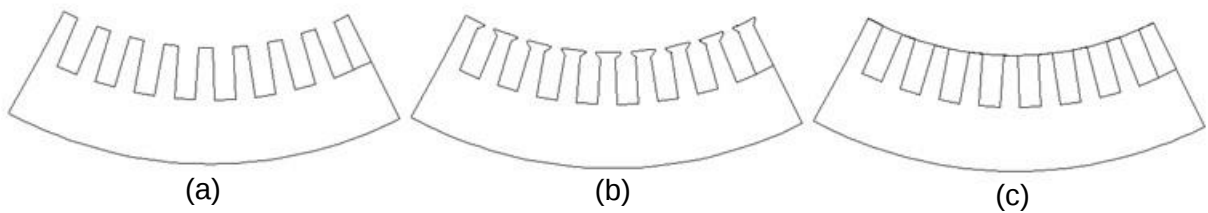
Senkron alternatörde manyetik kutupların meydana geldiği ve uyarım sargılarını taşıyan kısımdır. Büyük güçlü alternatörlerde dönen kısımda tasarlanmaktadır. Senkron alternatörün endüktörü iki çeşittir. Birincisi çıkık kutuplu endüktör diğeri ise silindirik kutuplu endüktördür. Silindirik kutuplu endüktör yüksek hızlardaki senkron alternatörlerde kullanılır. Bu tip alternatörlerin çap uzunlukları kısa devir sayıları yüksektir. Çıkık kutuplu alternatörler ise düşük devirli makinalarda kullanılır. Senkron alternatör çapı yüksektir. Dolayısıyla devir sayısının düşük olduğu hidroelektrik santrallerinde kullanılır. Şekil 3.2’de çıkık kutuplu alternatörün yapısı verilmiştir.



Şekil 3.2. Çıkık Kutuplu Senkron Alternatör

3.1.3 Senkron Alternatörlerin Oluk Yapıları

Senkron alternatörlerde açık oluk ve yarı açık ve kapalı oluk olmak üzere üç tür oluk yapısı bulunmaktadır. Şekil 3.3’de farklı oluk yapıları verilmiştir.



Şekil 3.3. Çıkık Kutuplu Senkron Alternatör Oluk Yapısı a) Açık Oluk b) Yarı Açık Oluk c) Kapalı Oluk

Şekil 3.3.a'da verilen açık oluk yapısı endüvi sarımını kolaylaştırdığı için tercih edilir. Sargıların oluk dışına itilmemesi için oluk başları uygun yerlere açılan kırlangıç kuyruğu vasıtasıyla manyetik olmayan bir malzeme ile kapatılır. Hava aralığı akısını daha homojen yapmak için olukları kapatmak için kullanılan kavalalar madeni olarak ta seçilir.

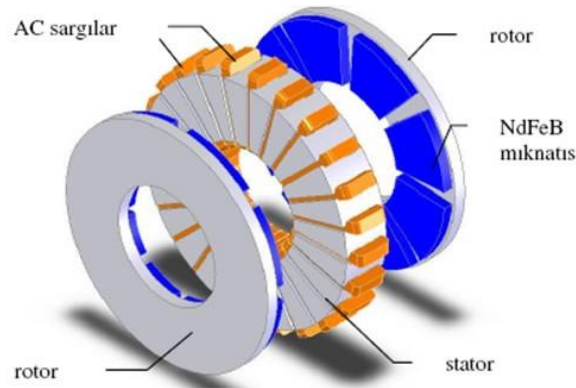
Şekil 3.3.b'de yarı kapalı oluk yapısında sargıların önceden sarılıp yerleştirilmesi zordur. Bu da maliyeti arttırır. Bununla birlikte hava aralığındaki relüktans düşüktür. Ayrıca hava aralığı manyetik akısı daha homojen dağıldığı için endüvide indüklenen gerilim daha sinüsoidaldir. Olukları yarı kapalı olmasından dolayı oluk yalıtımı açık olukluya göre daha zordur.

Şekil 3.3.c'de verilen kapalı oluk tipinde hava aralığı akısı homojen olmasına karşın endüvi iletkenlerini yerleştirmek ve yalıtımı sağlamak zordur.

3.2 Eksenel Akılı Alternatörler

Eksenel akılı makinelerin tarihçesine bakıldığında 19. Yüzyıla dayanmaktadır. İlk olarak Faraday tarafından tasarlanmıştır. Dönemin doğal mıknatısları ile yapılan eksenel akılı makinenin gelişimi ise 1980 li yıllarda neodyum mıknatısların bulunup yayılmasına kadar durmuştur. 1980'li yıllarda neodyum demir ve bordan oluşan yapay mıknatısların bulunması ve geliştirilmesi ile birlikte eksenel akılı makineler (EAM) önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir.

Eksenel akılı makineler ismini rotor ve stator arasında oluşan manyetik devrenin eksenel olarak hareket etmesinden alırlar. Bununla birlikte disk tipinde olan makine türüdür. En önemli özellikleri düşük hızlarda yüksek moment üretmeleri, yüksek güç yoğunlukları ve kompakt yapılarıdır. Şekil 3.4'de Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) bir makinenin temel yapısı verilmiştir.



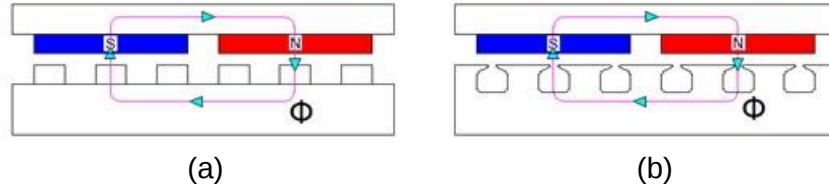
Şekil 3.4. EASM Makinenin Temel Yapısı

EASM makinelerin en önemli kullanım alanları su pompaları, robotlar, direkt bağlanan hareket vericiler, fanlar, vanalar ve rüzgar türbinleridir.

EASM makinelerin rotor ve stator dizilimlerine göre iki rotor- bir stator, bir rotor iki stator ve çoklu rotor ve stator olmak üzere sınıflandırılabilir. Bunun yanı sıra statorunda kullanılan nüveye göre de oluklu tip, oluksuz tip, nüveli ve nüvesiz olarak sınıflandırmak mümkündür. Ayrıca kullanılan sargılar bakımından da rhombodial sargılı, trapezodial sargılı ve torodial sargılı olmak üzere çeşitlendirebiliriz.

3.2.1 Tek Kenarlı EASM Senkron Alternatörler

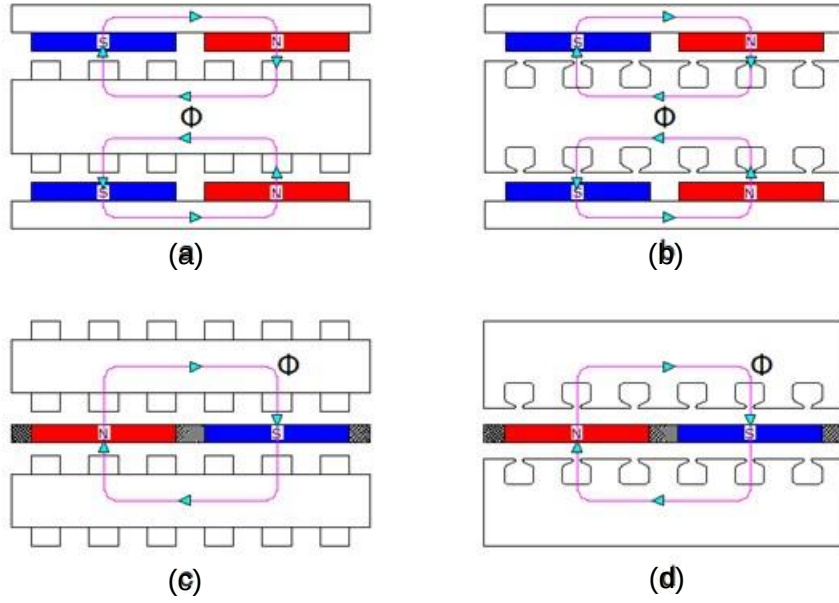
Bu tip EASM alternatörler tek rotor ve tek stator yapısındadır. Diğer çok rotorlu veya çok statorlu yapılara göre daha düşük momente ve güç yoğunluğuna sahiptir. Oluk yapısına göre açık oluk veya yarı açık oluk kullanılabilir. Manyetik akı yönleri şekil 3.5’de verildiği gibi N kutbundan çıkıp karşı nüveye oradan ise S kutbuna dönerek devresini tamamlar. Bu tip alternatörlerde toroidal sargı kullanılmaz. Çünkü toroidal sargının aktif bir yüzü statorun diğer tarafında olur.



Şekil 3.5. Tek Taraflı EASM Alternatör a) Açık Oluklu b) Yarı Açık Oluklu

3.2.2 İki Kenarlı EASM Alternatör

Bu tip EASM alternatörlerin güç yoğunlukları daha fazladır. Ayrıca iki yönden etki eden kuvvetler birbirini dengeleyerek daha stabil çalışmalarına yardımcı olur. Şekil 3.6’da farklı tasarımlarla EASM alternatörler verilmiştir. Oluklu ve oluksuz yapıya sahip bu alternatörlerde kullanılan sargı yapıları da değiştirilerek farklı tasarımlar oluşturulabilir. Literatürde toroidal sargı yapısının daha uzun aktif parçasının bulunmasından dolayı kayıplarının az güç yoğunluğunun ise yüksek olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte oluksuz (nüvesi) tip EASM alternatörlerde ise toroidal sargı kullanılmamaktadır.



Şekil 3.6. a) Oluksuz İki Rotorlu b) Oluklu İki Rotorlu c) Oluksuz Tek Rotorlu d) Oluklu Tek Rotorlu

3.2.3 EASM Alternatörlerde Vuruntu Momenti

EASM Alternatörler sağladıkları yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapısına karşın en önemli dezavantajları vuruntu momentidir. Nüveli ve oluklu tip EASM alternatörler ortaya çıkan vuruntu momenti mıknatıslar ile stator nüvesi arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkar. Neden oldukları moment dalgalanmaları ve oluşan titreşimler makineye bozucu etki yaratır. Dolayısıyla literatürde EASM alternatörler üzerine yapılan birçok çalışma vuruntu momentini azaltıcı yöntemler üzerinedir.

Vuruntu momentini gidermek için stator ve rotor tarafına uygulanan teknikler mevcuttur. Stator tarafına kaydırılmış oluk, yardımcı oluk, farklı oluk aralıkları gibi teknikler uygulanmaktadır. Fakat stator tarafına uygulanan teknikler üretim maliyetlerini ciddi derecede arttırmaktadır.

Vuruntu momentini azaltmak için rotor tarafına uygulanan teknikler stator tarafına uygulanan tekniklere göre daha düşük maliyetlidir. Rotor tarafında uygulanan tekniklerin temeli rotor veya mıknatıs kaydırma ile mıknatıs kaykılarıdır. Mıknatıslara kaykı vermek için mıknatısın özel bir şekilde üretilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kullanılan mıknatıs maliyeti artmaktadır. Rotor kaydırması ve mıknatıs gruplaması ise daha basit tekniklerdir.

3.3 Tasarım eşitlikleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinde kullanılan rüzgar türbinlerinde en önemli parametrelerden biri minimum kaç m/sn hızda elektrik üretimine başlandığıdır. Bu yüzden öncelikle tasarlanan EAYU senkron alternatörün çevresel hızına bağlı olarak rotor hızı hesaplanmıştır. Hesaplama çevresel hız denklem 1'e göre ifade edilir. Denklem 1'de verilen V,d, ve n sırasıyla çevresel hız, rotorun çapı ve devir sayısıdır.

$$V = \frac{\pi dn}{60} \quad (1)$$

Denklem 1'e göre farklı devirlerdeki çevresel hız aşağıda tablo 3.1'de verilmiştir. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi çevresel hızın 2,41-11,39 m/sn aralığı için rotor devrinin 70-330 d/dk aralığında olması gereklidir. Dolayısıyla tasarlanan EAYU senkron (EAYUS) alternatörün herhangi bir redüktör sistemine ihtiyaç duymadan direkt rotor pervanesine bağlanabilmesi için bu devir aralığında gerilim üretmesi gerekir. Üretilen geriliminde nominal frekans değeri olan 50 hz yakın olması gerekmektedir.

Tablo 3.1. Çevresel hıza bağlı rotor hızı

n (devir/dakika)	V (metre/saniye)
70	2,41
100	3,45
150	5,18
200	6,9
250	8,63
300	10,362
330	11,39

Tasarlanan EAYUS alternatörün 50 hz'de gerilim üretebilmesi için kutup ve devir sayısı arasındaki ilişki denklem 2'de verilmiştir. Denklem 2'de n_s, f ve p sırasıyla senkron devir sayısını, frekansı ve çift kutup sayısını ifade etmektedir. Eksenel akılı makinelerde aktif olan yüzey alanı tasarımda yerleştirilen oluk sayısı ve kutup sayısında etkilidir. Dolayısıyla tasarım ve üretim teknikleri de düşünülerek tek kutup sayısı 24 düşünülmüştür. Bu değerlere göre nominal senkron devir sayısı da denklem 2'de hesaplanmıştır.

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{12} = 250 \text{ d/dk} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'ye göre hesaplanan değerler ve tablo 3.1'deki çevresel hız göz önünü alındığında tasarlanan alternatör 2,5 m/sn'de üretime başlayıp 12 m/sn hıza kadar problemsiz enerji üretebilmektedir. Buda nominal hızın yaklaşık %50 alt ve üst sınırı olarak hesaplanmıştır. Bu aralıkta denklem 2'ye göre ürettiği gerilimin frekans değeri ise 25 Hz ile 75 Hz arasındadır.

Tasarlanan EAYUS alternatörün faz sayısı 3'tür. Toplam 72 oluklu stator yapısı tasarlanmıştır. Buna göre faz başına düşen oluk sayısı denklem 3'de verildiği gibidir.

$$X/faz = \frac{72}{m} = \frac{72}{3} = 24 \text{ oluk/faz} \quad (3)$$

Her bir oluk için sipir sayısı oluk parametrelerine göre değişmektedir. Bununla birlikte oluk hacminde sargı doluluk oranı da önemlidir. Yapılan bu prototip çalışması için henüz yurtiçinde sargı makinesi olmadığı için sarımlar elle yapılacağı göz önünde tutularak sargı doldurma oranı düşük alınmıştır. Buda genel güç oranında bir azalmaya neden olacaktır. Dolayısıyla tasarım sonuç elde edilen YUEAS alternatör parametreleri iyileştirilebilir bir ölçekte olacaktır.

Sipir Sayısı denklem 4'e göre hesaplanmıştır.

$$N = \text{oluk/faz} * \text{sipir sayısı} = 24 * 46 = 1104 \text{ sipir/faz} \quad (4)$$

Lamda Katsayısı literatür incelendiğinde 0,6 ve civarı değerlerde maksimum güç elde edildiği görülmektedir. Buna göre dış ve iç çap değerleri belirlenmiştir. Denklem 5'de D_i ve D_o sırasıyla iç ve dış çapın ölçüleridir. İç çapın dış çapa oranı 0,714 bulunmuştur.

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} = \frac{0,4}{0,56} = 0,714 \quad (5)$$

Stator sargılarında indüklenen gerilim denklem 6'ya göre hesaplanmaktadır. Denklem 6'da $e(t)$, K_e , N , B_g , f , p , λ , D_o ve $f_e(t)$ sırasıyla indüklenen gerilim, gerilim katsayısı, sipir sayısı, hava aralığı ortalama manyetik akı yoğunluğu, frekans, çift kutup sayısı, lamda katsayısı, dış çap uzunluğu ve sabit katsayı olarak değerler verilmiştir.

$$e(t) = Ke * N * Bg * \frac{f}{p} * (1 - \lambda^2) D_0^2 * fe(t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e(t) &= 0,9 * 1200 * 0,6 * \frac{50}{12} * (1 - 0,714^2) * 0,56^2 * 0,8 \\ &= 305 \text{ Volt/faz} \end{aligned} \quad (7)$$

Hat gerilimi değeri denklem 8'e göre hesaplanmıştır.

$$Uh = \sqrt{3} * e(t) = \sqrt{3} * 305 = 528 \text{ Volt} \quad (8)$$

Toplam görünür güç denklem 9'dan toplam 9142 VA olarak hesaplanmıştır. Hedeflenen değer de 10 KVA civarı güç üreten EAYUS alternatör tasarlamaktır. Analitik olarak seçilen mekanik ölçülere göre bu gücün üretilmesi mümkündür.

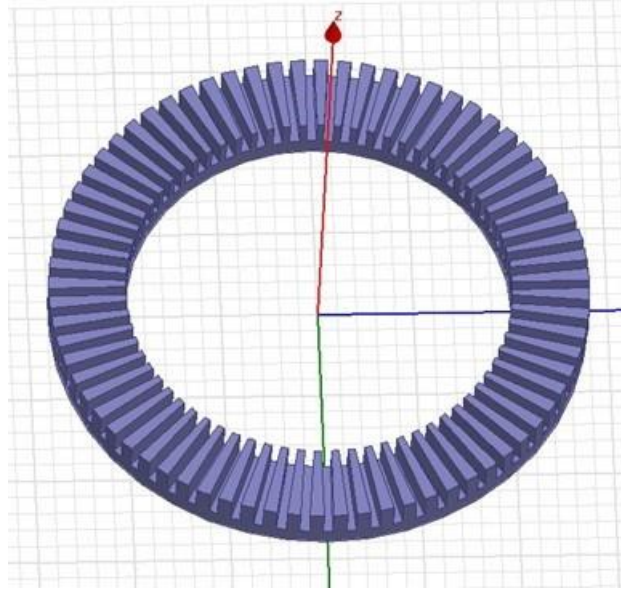
$$S = \sqrt{3} * Uh * Ih = \sqrt{3} * 528 * 10 = 9142 \text{ VA} \quad (9)$$

3.4 Tasarımın 3D Modellenmesi

Tasarımı yapılan EAYUS alternatörün analitik hesaplamalar sonucunda 3d program vasıtasıyla modellemesi yapılmıştır. Bunun için öncelikle stator ve rotor modellenmiş sonrasında ise bu parçaları birleştirerek deneysel verilerin elde edileceği diğer parçalar modellenerek üretime geçilmiştir.

3.4.1 Stator

Stator açık oluklu tipte tasarlanmıştır. EASM makinelerde özellikle stator üretimi hem yüksek maliyetli hem de uzun bir süreç gerektiren tekniklerle (tel erezyon) gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu çalışmada ise açık oluk yapısı kullanılarak üretim maliyetleri düşürülmüş ve üretim sürecinde zamandan tasarruf edilmiştir. Tasarlanan EAYUS alternatörde kutup ve faz başına bir oluk düşmektedir. Bununla birlikte stator üretim kolaylığı açısından iki parça yapılarak sarım öncesi aşamada birleştirilerek tek parça haline getirilecektir. Tasarlanan stator şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Tasarlanan Eksenel Akılı Alternatörün Statoru

Tasarlanan statorun mekanik parametreleri aşağıdaki tablo 3.2’de verilmiştir. Tasarım 72 oluktan oluşmaktadır. Her bir oluğun genişliği 10mm ve derinliği ise 35 mm’dir. Oluk derinliği yapılan manyetik analizler sonucunda ortaya konmuştur.

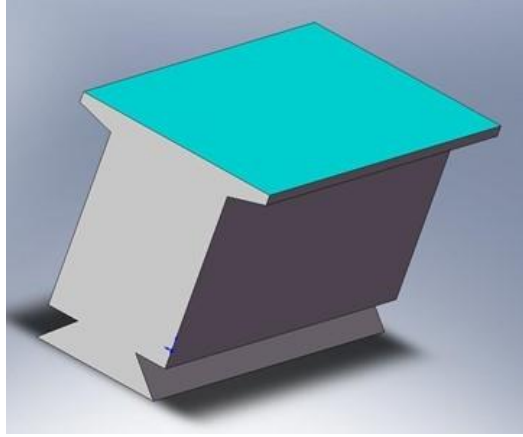
Tablo 3.2. Tasarlanan Statorun Mekanik Büyüklükleri

Dış çap (Do)	560 mm
İç çap (Di)	400 mm
Kalınlık (H)	50 mm
Oluk Derinliği	35 mm
Oluk genişliği	10 mm
Oluk sayısı (X)	72
Di/Do	0,714

3.4.2 Rotor

Tasarlanan alternatör hem yabancı uyarımlı hem de sabit mıknatıslı rotorlu oluşturulmuştur. Her iki rotor için elektriksel değerler karşılaştırılacaktır. Bu yüzden öncelikli olarak yabancı uyarımlı rotor tasarlanmıştır.

Aşağıdaki şekil 3.8’de verildiği gibi ayaklar üzerine sarılan sargıların dışarıdan dc bir gerilim kaynağı tarafından uyarılması ile mıknatıslanma sağlanmaktadır. İlk tasarım aşamasında Şekil 3.8’de verilen kutup ayağına göre manyetik analizler gerçekleştirilecektir. Manyetik analiz sonuçlarına göre kutup ayağı ölçüleri optimize edilecektir. Tasarımda üretim kolaylığı ve maliyeti düşünülerek bazı değişiklikler yapılmıştır. Bununla birlikte proje sonrasında da araştırma faaliyetlerinde bulunulması da düşünülmüştür.



Şekil 3.8. Tasarlanan Eksenel Yabancı Uyartımlı Alternatörün Kutup Ayağı

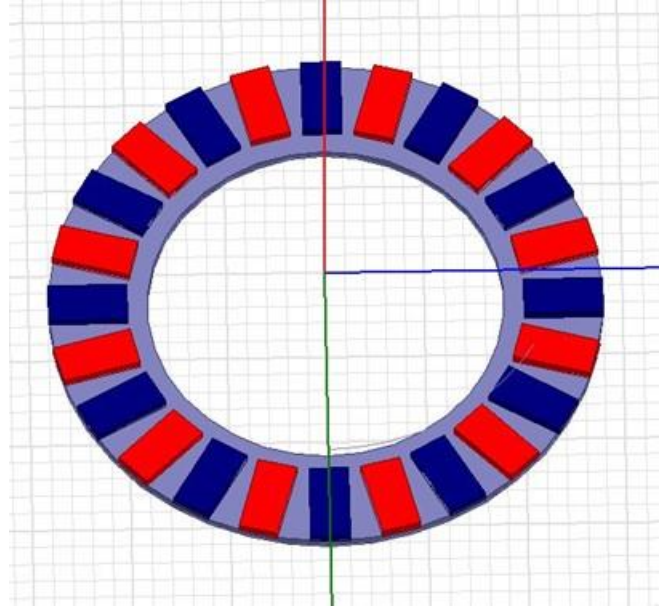
Tasarlanan rotorun mekanik büyüklükleri tablo 3.3’de verilmiştir. Dış çapı 560 mm’dir. İç çapı 400 mm’dir. Toplam kutup sayısı 24’dür. Kullanılan mıknatıs ölçüsü ise 80x40x10mm ölçüsündedir.

Tablo 3.3. Tasarlanan Rotorun Mekanik Büyüklükleri

Dış çap (Do)	560 mm
İç çap (Di)	400 mm
Kutup Sayısı	24
Mıknatıs uzunluğu	80 mm
Mıknatıs genişliği	40 mm
Mıknatıs yüksekliği	10 mm

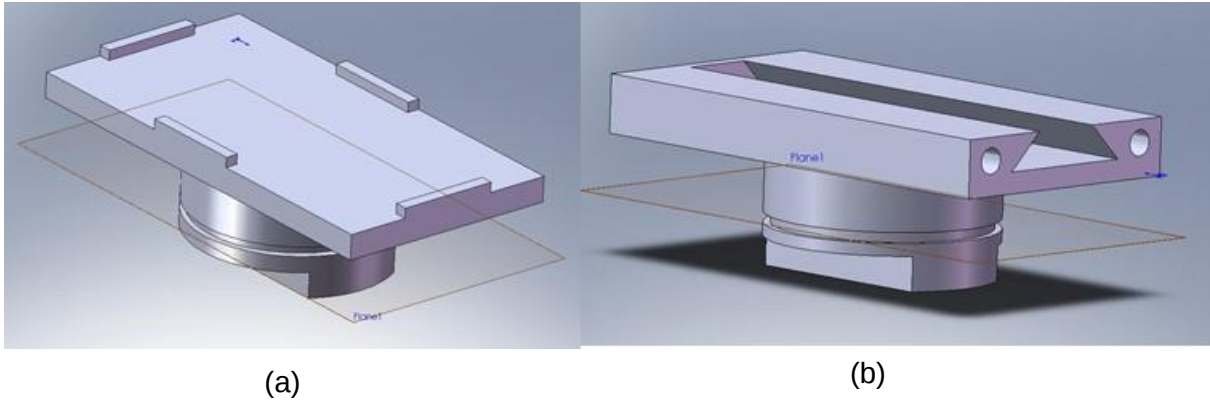
İkinci olarak tasarlanan EAYUS alternatörün sabit mıknatıslı makineler ile karşılaştırılması için sabit mıknatıslı rotorda tasarlanmıştır. Tasarım 24 kutuplu olarak gerçekleştirilmiştir. Mıknatıs ölçüleri tablo 3.3’de verilmiştir. Tablo 3.3’de verilen ölçülere göre

tasarlanan sabit mıknatıslı rotor şekil 3.9'da verilmiştir. Tasarlana EAYUS alternatör sabit mıknatıslı alternatör ile karşılaştırılması mümkün olacaktır.



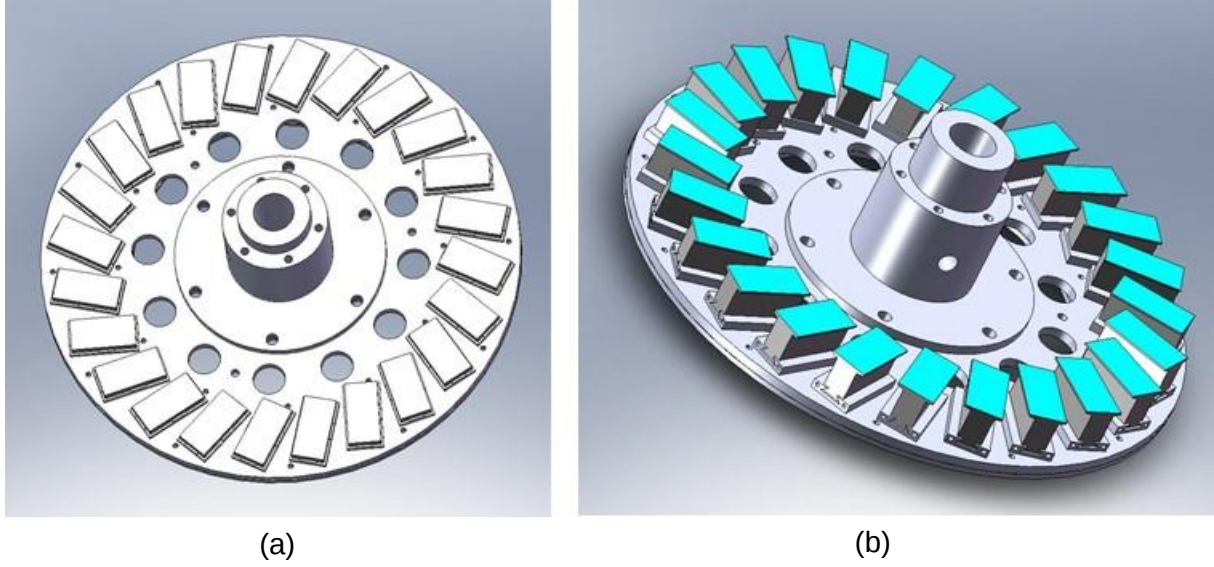
Şekil 3.9. Tasarlanan Eksenel Akılı Alternatörün Rotoru (24 Kutuplu)

Şekil 3.10'da verilen ayaklar sayesinde mıknatıslar ve kutup ayaklarının kendi eksenleri etrafında hareket etmesi sağlanacaktır. Bu sayede tasarlanan alternatör için minimum vuruş momenti değerleri de elde etmek mümkün olacaktır. Bunun yanı sıra proje tamamlanmasından sonrada mıknatıs açısının üretilen gerilim eğrileri üzerine olan etkilerinin de araştırılması planlanmaktadır. Ayrıca yenilenen tasarım ile modüler bir sistem elde edilecektir. Böylelikle yüksek maliyetli mıknatısların yerleştirilmesi ve işletilmesi esnasında oluşabilecek problemlerde bozulan ya da zarar gören kutup ayağı kolaylıkla sistemden çıkarılarak yenisi ile değiştirilmesi düşünülmüştür. Şekil 3.10.a'da mıknatıs için kutup altlığı, şekil 3.10.b'de ise yabancı uyartımlı kutup ayağı altlığı verilmiştir.



Şekil 3.10. Kutup Ayağı Altlığı a)Mıknatıs Altlığı b)Yabancı Uyartımlı Kutup Ayağı Altlığı

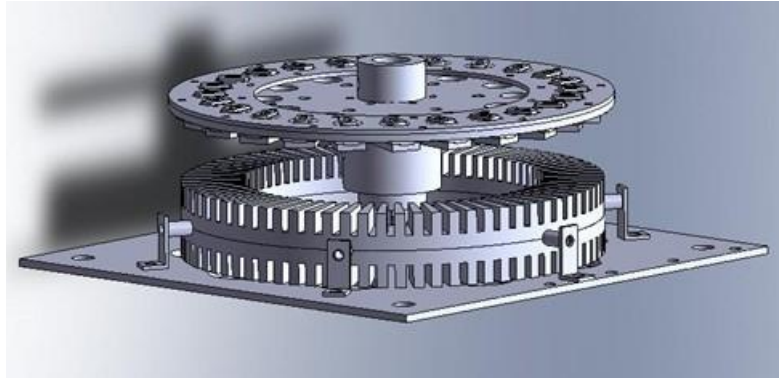
Şekil 3.11'de ise kutup ayaklarının rotora monte edilmiş hali verilmiştir. Görüldüğü gibi yapılan tasarım sayesinde kutup ayaklarının istenilen açılara getirilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3.11. Rotor a)Sabit Mıknatıslı Rotor b)Yabancı Uyartımlı Rotor

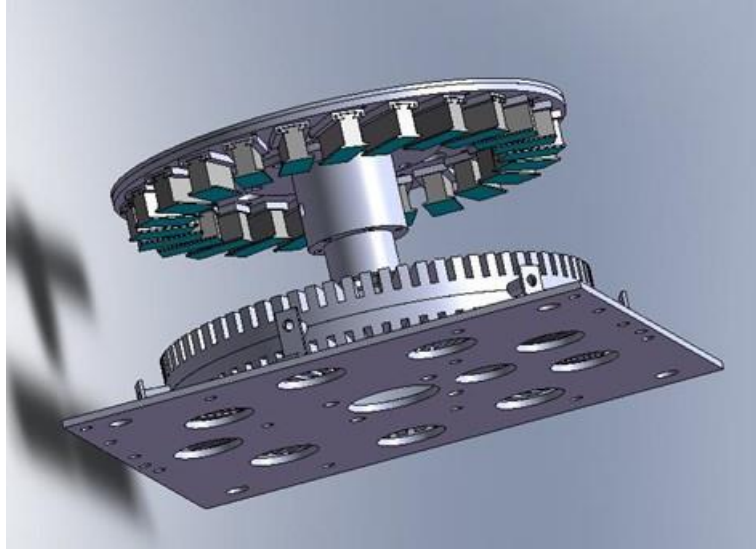
3.4.3 Tasarımın 3d Katı Modelinin Oluşturulması

Tasarlanan toroidal sargılı eksenel akılı sabit mıknatıslı NN tip alternatör şekil 3.12'de verilmiştir. Tasarımda tek rotor kullanılarak deney düzeneğinin daha esnek olması sağlanmıştır. Ayrıca mıknatısların altlıklara yapıştırılıp kullanılması da meydana gelebilecek problemlerde tüm rotoru tekrar üretmeden sadece problemlı mıknatıs kutbunun değiştirilmesi ile çözüm üretilecektir.



Şekil 3.12. Sabit Mıknatıslı Sistemin 3D Modeli

Şekil 3.13’de ise yabancı uyartımlı rotora sahip eksenel akılı alternatörün 3d modeli verilmiştir. Sabit mıknatıslı rotorda olduğu gibi yabancı uyartımlı rotorun kutup ayakları da tasarlanan altlığa monte edilerek modüler bir sistem oluşturulmuştur. Bunun sayesinde herhangi bir arıza durumunda kolaylıkla ilgili kutup değişimi yapılabilecektir. Ayrıca harmoniklerin minimum değere indirilmesine yönelik araştırmalar içinde önemlidir.



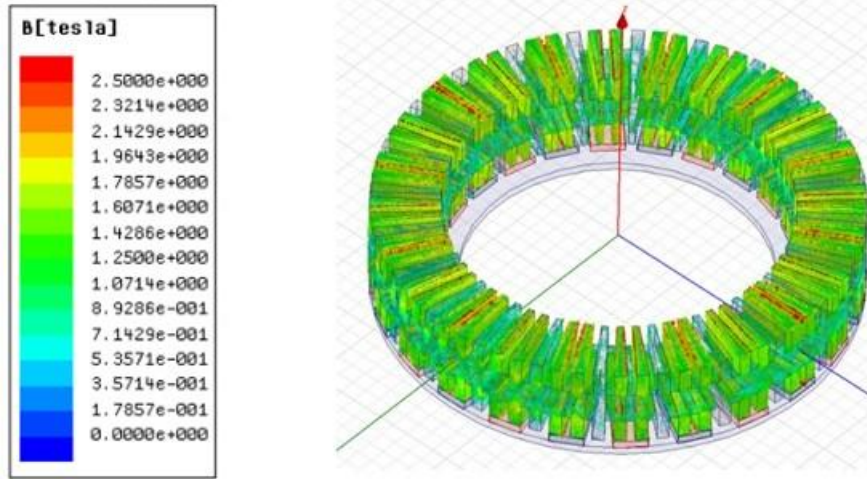
Şekil 3.13. Yabancı Uyartımlı Sistemin 3D Modeli

3.5 Tasarımın 3d Ansys Maxwell ile Manyetik Analizi

Tasarımın 3d manyetik analizleri ASYS firmasının maxwell programı ile gerçekleştirilmiştir. Güncellenen parametreler ve ilk raporda belirtilen hususlar göz önünde tutularak manyetik analizler tekrar edilmiştir. Öncelikli olarak rotor sabit mıknatıslardan yapıldığında hava aralığı etkisinin ortalama manyetik alana etkisi ve optimum hava aralığının belirlenmesi için manyetik analizler gerçekleştirilmiştir.

3.5.1 Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Alternatörün Manyetik Analizi

Eksenel akılı sabit mıknatıslı (EASM) alternatör için şekil 3.14’deki 3d model oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında nüve yüzeyindeki manyetik akı dağılımı görülmektedir. Açık olukların kenar kısımlarında nüvenin doyuma ulaştığı açıkça görülmektedir. Açık oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı (AOEASM) alternatörlerde hava aralığı relüktansının değişimi yüksek vuruş momentini ortaya çıkartır. Bu etkinin azalması için uygun hava aralığı seçilmelidir. Program tarafından hesaplanan ortalama manyetik akı yoğunluğu 1.04099890783973 tesla olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.14. EASM Alternatör Hava Aralığı Etkisi (1mm için)

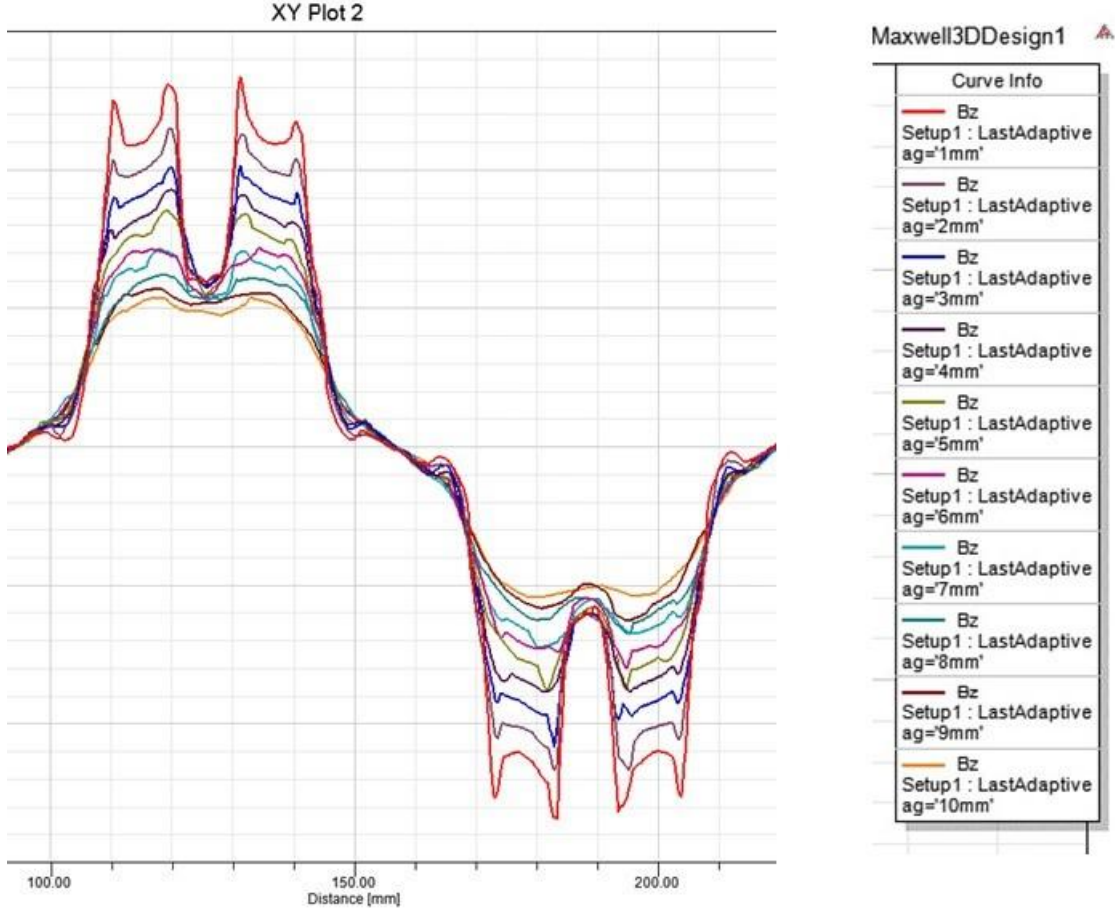
Şekil 3. 14'deki model göz önünde tutularak değişik hava aralıkları için ortalama manyetik akı dağılımını değerleri tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Hava Aralığı – Manyetik Akı Dağılımı İlişkisi

Hava Aralığı (mm)	Ortalama Manyetik Akı Dağılımı (Tesla)
1	1.04099890783973
2	0.962536504658722
3	0.888184859784565
4	0.817814049839883
5	0.758293476620965
6	0.701727832435653
7	0.651442054096054
8	0.607331916790411
9	0.564354740657385
10	0.529920082573129

Tablo 3.4 göz önünde tutulduğunda tasarlanan alternatör için en uygun hava aralığı değerinin 3-4 mm için olacağı görülmektedir. 0,8 tesla düzeyindeki hava aralığı manyetik akı yoğunluğu alternatör tasarımında yeter bir değerdir. Ayrıca açık oluklu alternatör yapısında yüksek hava aralığı akısı yüksek vuruntu momenti değerlerine neden olmaktadır. Bu yüzden oluk kenarlarındaki manyetik akı doyumları değerlendirilmiştir.

Şekil 3.15’de seçilen bir kontur boyunca hava aralığı manyetik akı dağılımı görülmektedir. Şekil 15’den görüldüğü gibi 7-8 mm hava aralığında açık oluk etkisi ortadan kalkmıştır. 4mm’de ise 1mm ile 10mm hava aralıklarında oluşan manyetik akı yoğunluğunun %50’si civarındadır. Dolayısıyla 4mm hava aralığı tasarım parametresi olarak manyetik analizler sonucunda ortaya çıkarılmıştır.

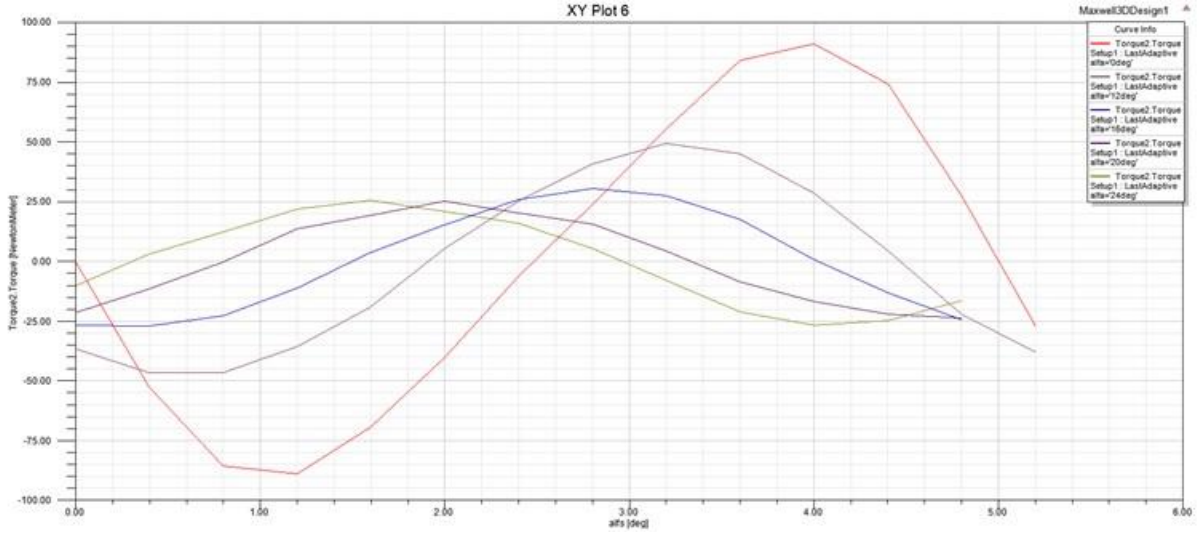


Şekil 3.15. EASM Alternatör Hava Aralığına Bağlı Kontur Boyunca Manyetik Akı Dağılımı

EASM alternatörlerde en büyük problemlerden biri de vurutu momentidir. Vuruntu momenti mıknatıs ile oluk kenarı arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan moment dalgalanmalarıdır. Tasarlanan alternatör açık oluklu yapıya sahip olduğu için oluşan vurutu momenti değerleri de yüksektir. Bunun için öncelikle hava aralığı relüktansının değişim değerlerinin en aza indirilmesidir. Hava aralığı 4mm alınarak bu sağlanmıştır. Bunun yanı sıra mıknatıslar kendi ekseninde alfa açısı kadar da döndürülerek vurutu momenti değerlerinin azaltılması sağlanmıştır.

Şekil 3.16’da verilen grafikte sırasıyla 0, 12, 16, 20 ve 24 derece mıknatıs açısı için vurutu momenti değerleri maxwell ile hesaplatılmıştır. Şekil 3.16 incelendiğinde 0 derece mıknatıs açısına göre sırayla %44, %66, %72 ve %72 oranında vurutu momenti

azalmaktadır. 20 ve 24 derece için vuruğu momenti değeri aynıdır. Bu nedenle 16 ve 20 derece tasarım parametresi olarak seçilebilir.

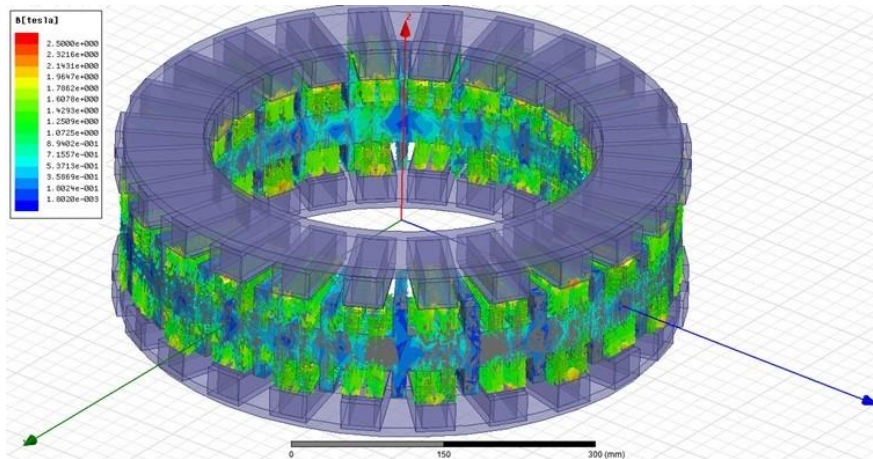


Şekil 3.16. EASM Alternatör Hava Aralığına Bağlı Kontur Boyunca Manyetik Akı Dağılımı

Dolayısıyla açık oluklu EA makinelerde vuruğu momentini azaltmak için ya hava aralığı ayarlanmalı yada mıknatıs açılarının kendi eksenleri etrafında döndürülmesi sağlanmalıdır. Bununla birlikte iki teknik te bir arada kullanılarak maksimum güçte minimum vuruğu momenti değeri elde edilebilir.

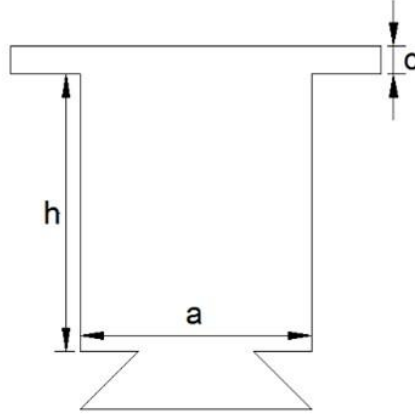
3.5.2 Yabancı Uyartımlı Eksenel Akılı Alternatörün Manyetik Analizi

Yabancı uyartımlı eksenel akılı alternatörün analizi için şekil 17 maxwell programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerinde kutup ayaklarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Tasarlanan Yabancı Uyartımlı Eksenel Akılı Alternatör

Kutup ayaklarının uygun değerlerini seçmek için şekil 3.18'deki değerler kullanılmıştır. Kutup genişliği “a”, kutup kenar yüksekliği “c” ve son parametrede amper sarım miktarına göre manyetik alan dağılımları hesaplatılmıştır.



Şekil 3.18. Kutup Ayak Ölçüleri

Kutup ayaklarının a, c ve amper sarım miktarına göre alınan değerler tablo 3.5'de verilmiştir. Kutup ayak kısmının genişliğine bağlı olarak sabit amper sarım miktarına göre ortalama manyetik alan atmaktadır. Kutup ayağının genişlemesi ortalama manyetik alanı artırmasına rağmen kutup sargısının kesit alanı küçüleceği için 1500 amper sarım değerine ulaşmak mümkün olmayacaktır. Bu yüzden 0,7 tesla manyetik akı yoğunluğunu verecek bir değer seçilebilir.

Tablo 3.5. Kutup Genişliği – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi

Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	Bort (Tesla)
1500	3	15	0.579129497738232
1500	3	20	0.680748532463936
1500	3	25	0.738745832047481
1500	3	30	0.765634777349894
1500	3	35	0.783680766764806

Aşağıdaki tablo 3.6'da ise farklı amper sarım değerleri için sırasıyla 25 ve 30 mm kutup ayağı genişliği için ortalama manyetik alan değerleri hesaplatılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 25 ve 30 mm için ortalama manyetik akı değeri 0,7 tesla üzerine 1400 amper sarım değeri

için çıkmaktadır. 1500 amper sarım için yaklaşık 0,04 tesla fark vardır. Bununla birlikte 25 ve 30 mm için sarım kesiti hesaplanırsa sırasıyla 225 ve 150 mm² olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 25 mm kutup ayağı genişliği için %50 daha fazla sarım gerçekleştirilebilir. Bu da aradaki 0,04 tesla farkı kolaylıkla kapatacaktır. Dolayısıyla kutup genişliği 25 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 3.6. Amper Sarım – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi

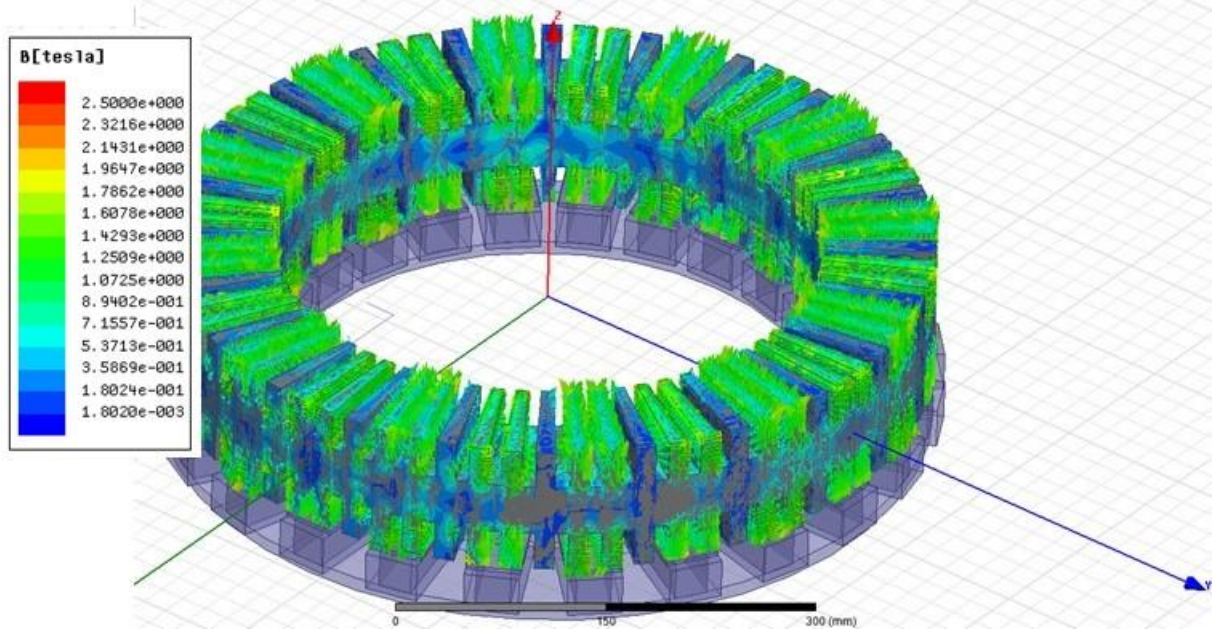
Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	Bort (Tesla)
1200	3	25	0.63816459304603
1300	3	25	0.672434437332498
1400	3	25	0.708101565202119
1500	3	25	0.738745832047481
1600	3	25	0.770633742182609
1700	3	25	0.797683223191462
1800	3	25	0.819750594893547
1200	3	30	0.653482157734056
1300	3	30	0.69535947407155
1400	3	30	0.739107346431529
1500	3	30	0.765634777349894
1600	3	30	0.793342958434319
1700	3	30	0.817569411179648
1800	3	30	0.841633736645339

Tablo 3.7’de kutup kenar yüksekliğine göre manyetik alanın değişimi incelenmiştir. Kutup kenar yüksekliği 3mm’ye kadar arttırıldığında manyetik alanda bir miktar yükselme görülmektedir. Bu yüzden 3 mm kutup kenar yüksekliği seçilmiştir.

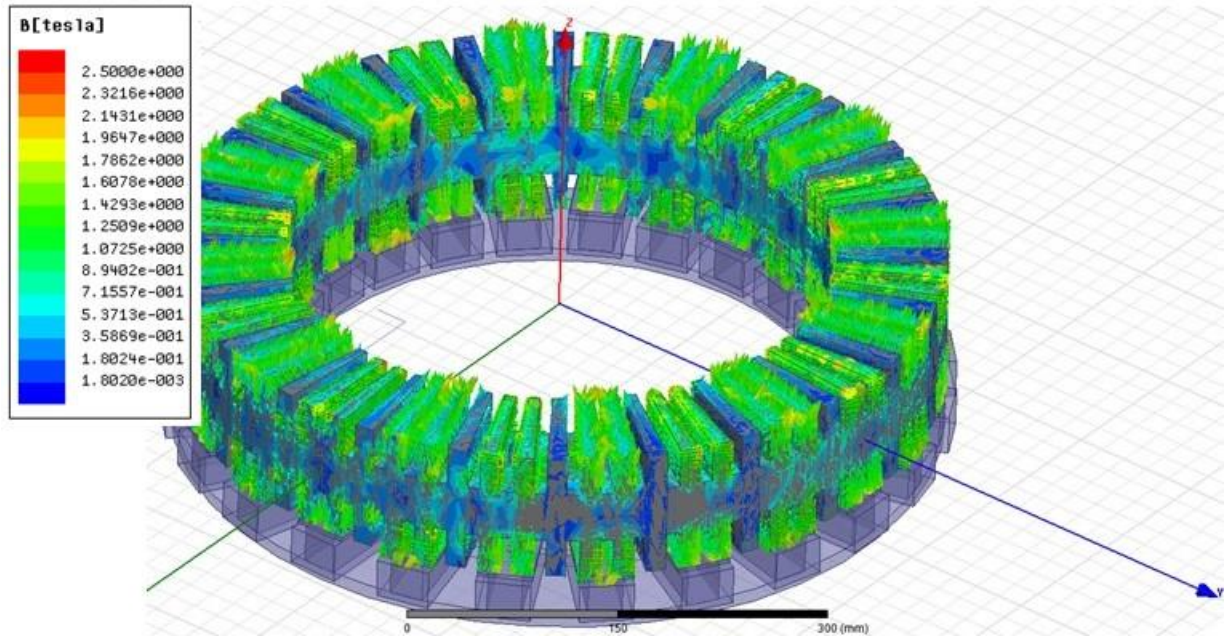
Tablo 3.7. Kutup Kenar Yüksekliği – Ortalama Manyetik Alan İlişkisi

Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	Bort (Tesla)
1500	3	25	0.738745832047481
1500	2	25	0.729896258303207
1500	1	25	0.707664538928399

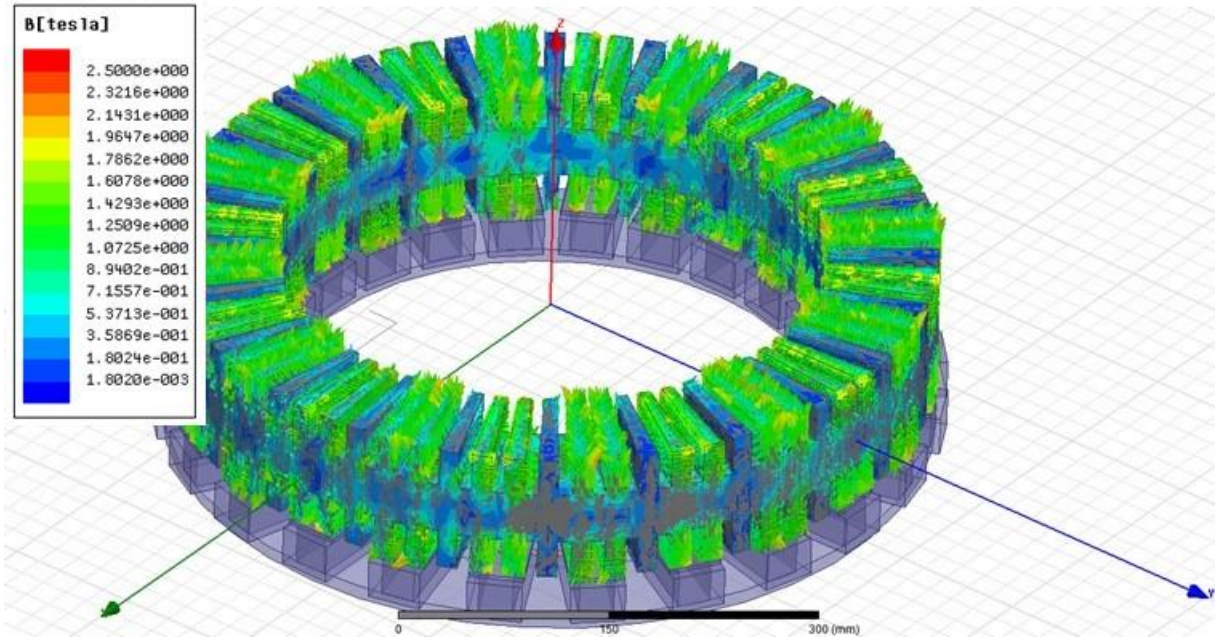
Yabancı uyarımlı eksenel akılı alternatörün kutup ayaklarına uygulanan amper sarım miktarına bağlı olarak manyetik alan dağılımı ise 100'er amper sarım aralıklarla şekil 3.19-3.25 arasında verilmiştir.



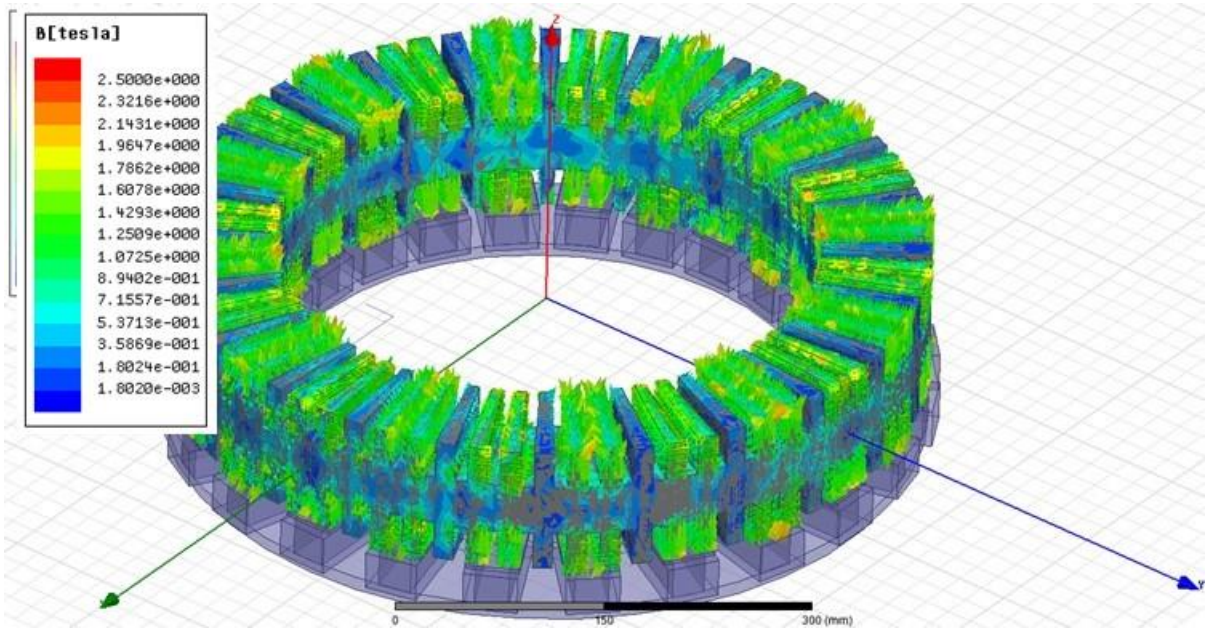
Şekil 3.19. 1200 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



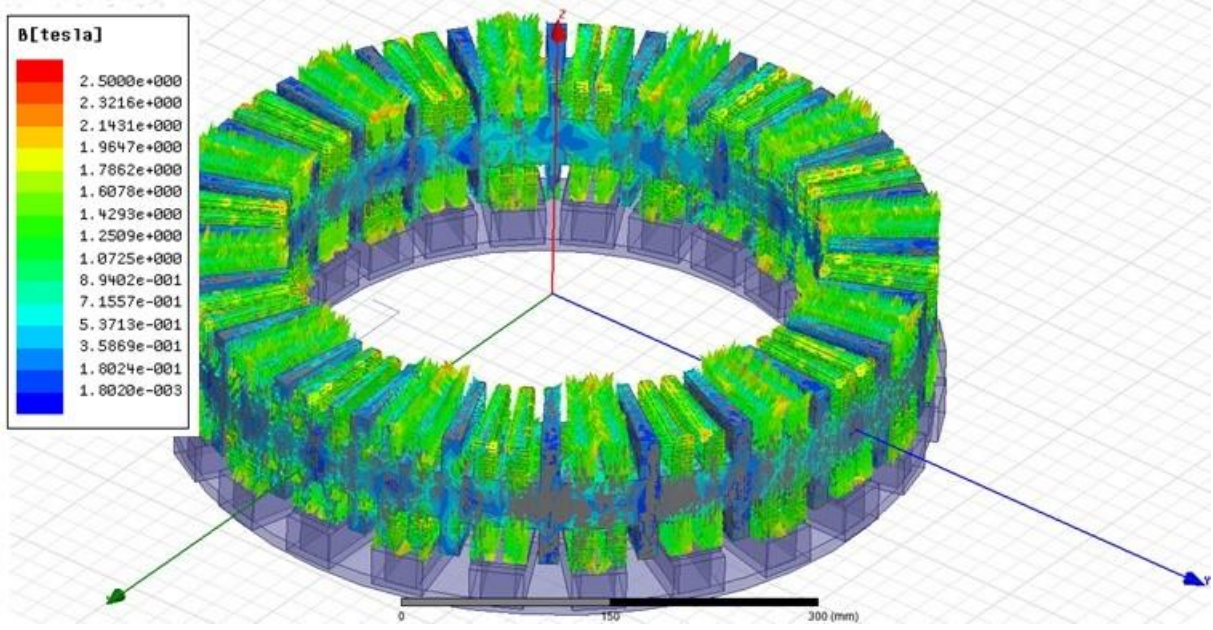
Şekil 3.20. 1300 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



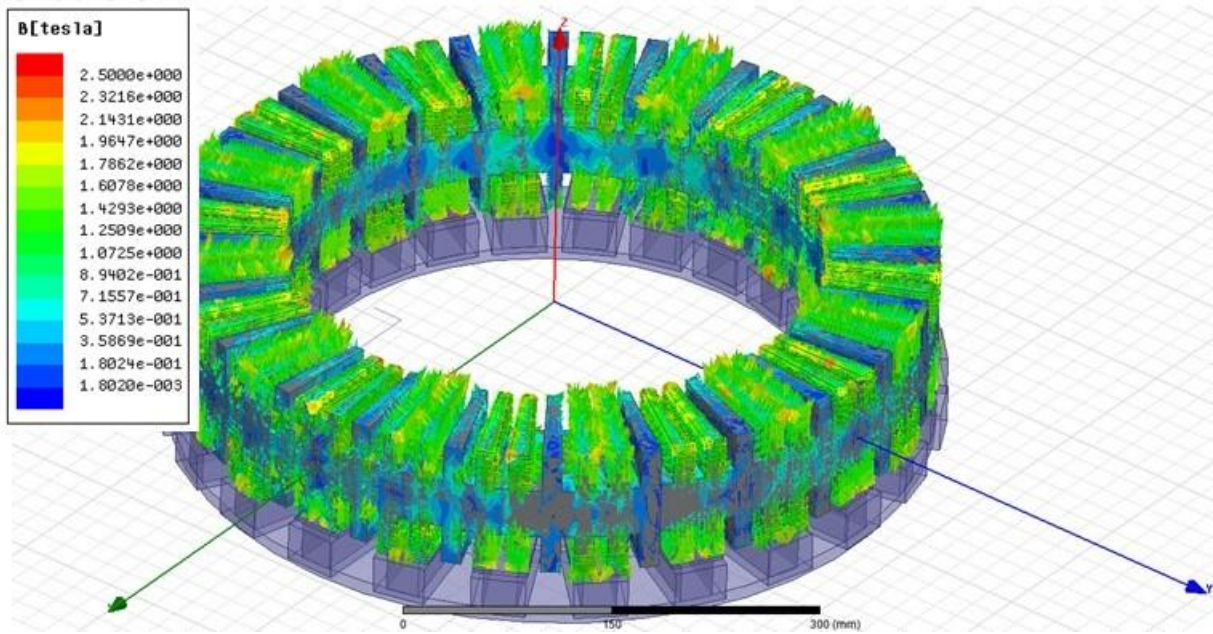
Şekil 3.21. 1400 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



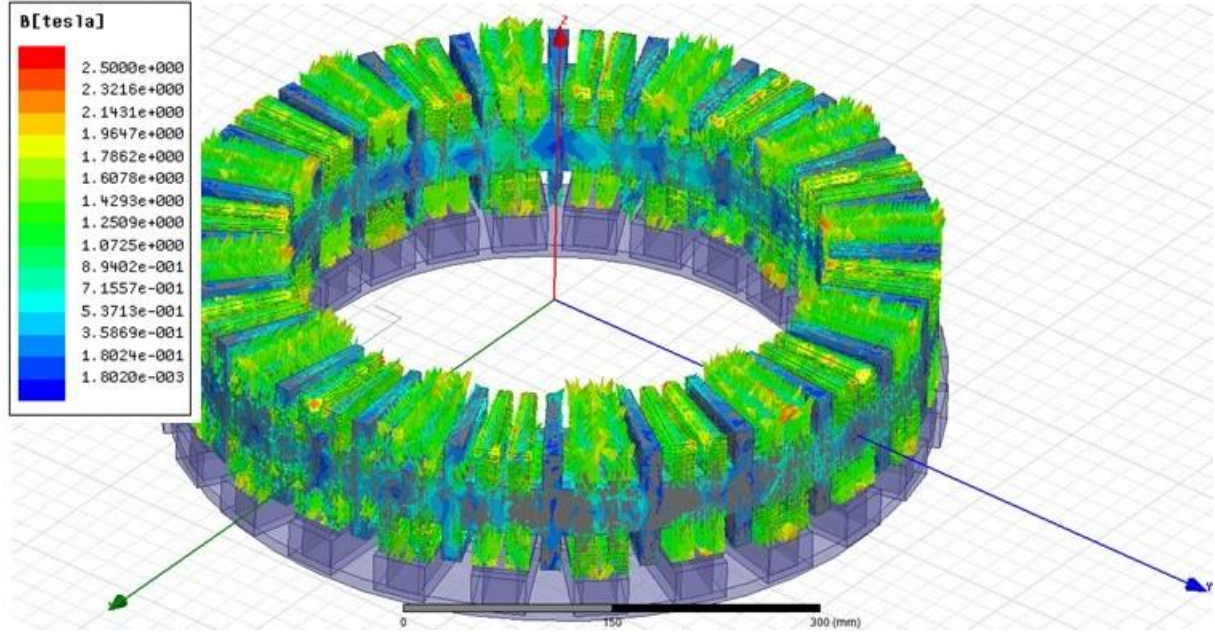
Şekil 3.22. 1500 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



Şekil 3.23. 1600 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



Şekil 3.24. 1700 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı



Şekil 3.25. 1800 Amper Sarımda Manyetik Alan Dağılımı

Sonuç olarak yabancı uyartımlı alternatör için 1. ara rapor sonucunda değerlendirmeler göz önünde tutularak yapılan analizlere ek olarak bu bölümde bahsedilen manyetik analizler eklenmiştir. Alınan sonuçlara göre ortalama hava aralığı manyetik akı yoğunluğu 0,7 tesla ve üzeri değer için kutup genişliği “a” ve kutup kenar yüksekliği “c” sırasıyla 25 mm ve 3 mm olarak seçilmiştir. Bununla birlikte sarımla elde edilmesi gereken amper sarım miktarı da 1500 amper sarım olarak belirlenmiştir. Böylelikle ortalama hava aralığı manyetik akısı 0,7387 tesla düzeyinde olacağı manyetik analizler sonucunda elde edilmiştir.

3.6 Tasarımın Üretimi

Manyetik analizler sonucunda tasarlanan EAYUS alternatörün üretim aşamasına geçilmiştir. Üretim aşamasının en önemli ve en maliyetli kısmı stator üretimidir. Özellikle literatürde tel erezyon yönteminin maliyetinden bahsetmektedir. Yapılan bu çalışmada ise açık oluk yapısı sayesinde cnc freze ile üretimi daha düşük maliyet ve sürede gerçekleştirilmiştir.

3.6.1 Stator

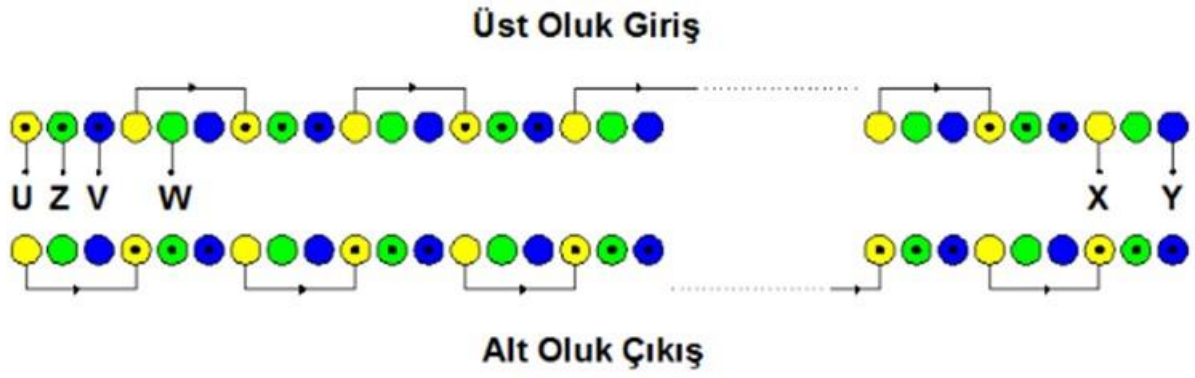
Manyetik analizleri ve analitik hesaplamaları yapılan tasarımın üretimine geçildiğinde ilk üretilen parça statordur. Stator 72 adet oluktan oluşan açık oluklu yapıdadır. Kutup altında

faz başına bir oluk hesaplanmıştır. Statorun çapı 560 mm'dir. Şekil 3.26'da tasarlanan statorun sarım sonrası resmi verilmiştir.



Şekil 3.26. Eksenel Akılı Alternatörün Statoru

Şekil 3.26'da stator üretim aşamasında iki parçadan imal edilmiştir. Daha sonra oluklar hizalanarak iki parça birleştirilip sarıma hazır hale getirilmiştir. Tasarıma toroidal sargı uygulaması yapılmıştır. Literatür incelendiğinde toroidal sarımın diğer trapezodial ve rhombodial sargı yapısına göre daha yüksek güç ürettiği görülmektedir. O yüzden toroidal sargı uygulanmıştır. Toroidal sargının sarım şeması aşağıda şekil 3.27'de verilmiştir. Sarım şemasında karışıklığı önlemek için bir fazın bağlantı şeması verilmiştir. Şekil 3.27'den görüldüğü gibi bobin gruplarında çıkış çıkışa - giriş girişe bağlanarak sarım gerçekleştirilmektedir. Üst oluklar giriş, alt oluklar çıkış olarak alınmıştır.



Şekil 3.27. Sargı Şeması

3.6.2 Rotor

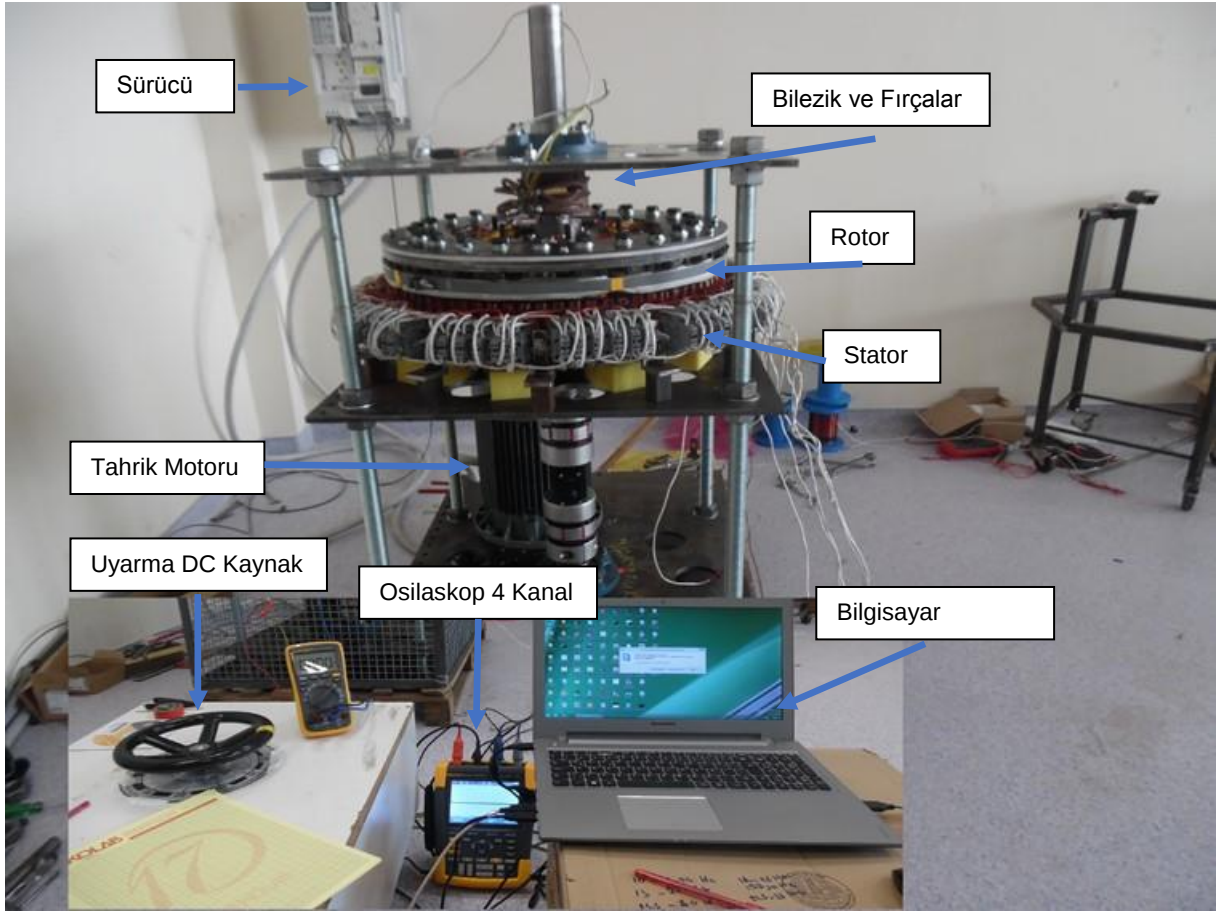
Rotor Şekil 3.28’de görüldüğü gibi 24 kutuplu olarak tasarlanmıştır. Manyetik analizler sonucunda ve geometrik ölçüler dahilinde her bir kutup 1150 sipir olarak sarılmıştır. Dolayısıyla manyetik analizlerde elde edilen 1200 amper sarım ile 1800 amper sarım aralığındaki değerler elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.28. EAYUS Alternatörün Rotoru

3.6.3 Kapaklar ve Gövde

Tasarlanan EAYUS alternatörün kapak ve gövde ile birleştirilerek test düzeneği içinde şekil 3.29'de görüldüğü gibidir. Tasarım deneysel verileri almaya uygun olarak tasarlanmıştır. Tahrik motoru olarak 7,5 kW gücünde bir asenkron motor dişli zincir sistemi ile devir sayısı düşürülerek EAYUS alternatörün miline akuble bağlanmıştır. Tasarım maliyeti düşürmek amacıyla tek rotorlu olarak yapılmıştır. Deneysel veriler elde edilirken tek rotorlu olarak deneysel sonuçlar toplanacaktır. Ayrıca yapılan tasarım çift rotorlu bir yapıdır. Dolayısıyla elde edilen deneysel verilerin ticari olarak iki rotorlu olarak kullanıldığında iki katı olacağı unutulmamalıdır.



Şekil 3.29. EAYUS Alternatörün Test Düzeneği

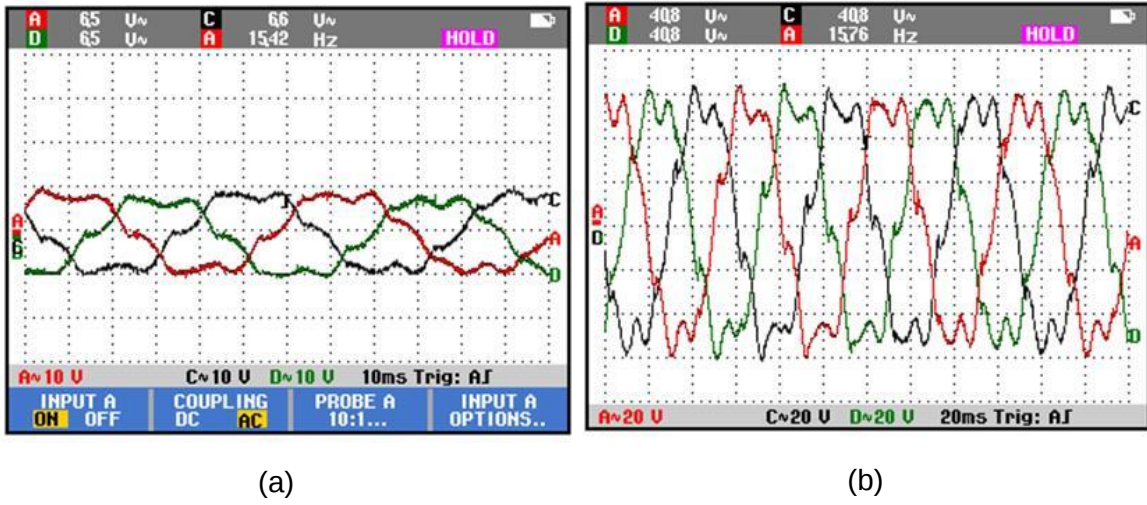
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada tasarlanan EAYUS alternatörün farklı frekans değerlerindeki boş çalışma ve yüklü çalışma grafikleri elde edilmiştir.

4.1 Boş Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler

4.1.1 15 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.1'de 15 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.1. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.1'de ise 15 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarım Akımı I_u (A)	Faz Gerilimi U_{fz} (V)
1	6,5
2	12,9
3	19,6
4	25,6
5	33,5
6	40,8

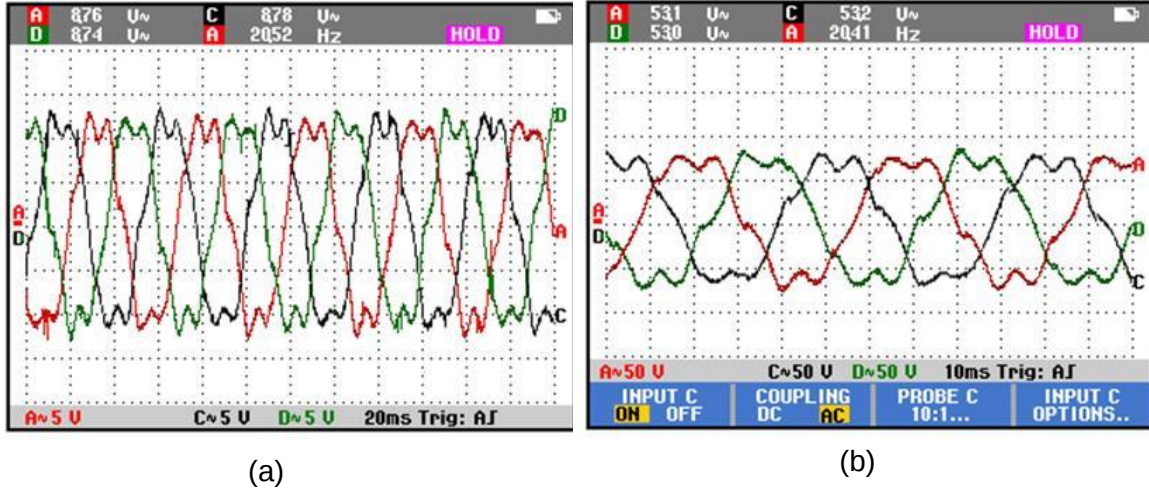
Tablo 4.1 baz alınarak şekil 4.2’de verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.2’den görüldüğü gibi uyartım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde Ufaz artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.2. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyartım Akımı (lu) – Faz gerilimi (Ufaz) Eğrisi

4.1.2 20 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.3’de 20 Hz durumunda 3 farklı uyartım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.3. EAYUS Alternatörün 15 Hz Durumunda Uf a) $lu=1$ A için b) $lu=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.2’de ise 20 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyartım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Alternatörün 15 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarıtım Akımı I _u (A)	Faz Gerilimi U _{faz} (V)
1	8,78
2	17,3
3	25,4
4	33,9
5	43,5
6	53,2

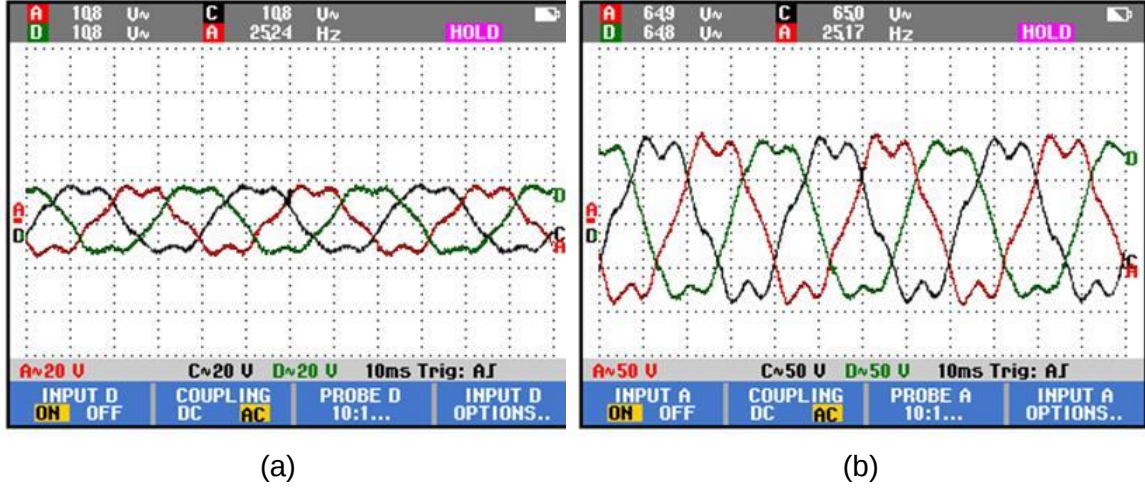
Tablo 4.2 baz alınarak şekil 4.4’de verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.4’den görüldüğü gibi uyarıtım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{faz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.4. EAYUS Alternatörün 20 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı (I_u) – Faz gerilimi (U_{faz}) Eğrisi

4.1.3 25 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.5'de 25 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.5. EAYUS Alternatörün 25 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.3'de ise 25 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Alternatörün 25 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarım Akımı I_u (A)	Faz Gerilimi U_{fz} (V)
1	10,8
2	20,7
3	31,5
4	42,1
5	53,3
6	64,9

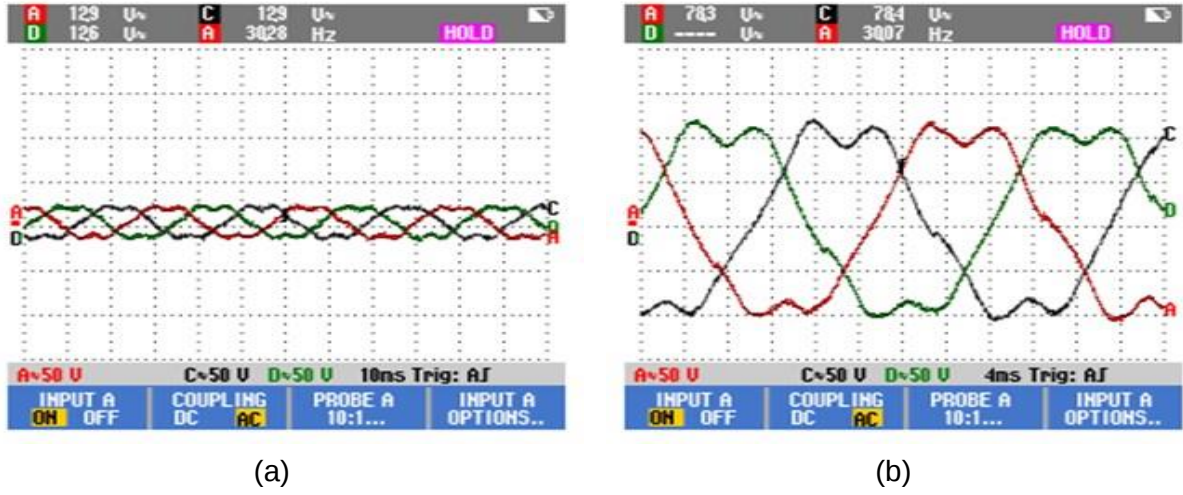
Tablo 4.3 baz alınarak şekil 4.6'da verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi uyarım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{fz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.6. EAYUS Alternatörün 25 Hz Durumunda Uyarım Akımı (lu) – Faz gerilimi (Ufaz) Eğrisi

4.1.4 30 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.7’de 30 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.7. EAYUS Alternatörün 30 Hz Durumunda Uf a) lu=1 A için b) lu=6 A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.4’de ise 30 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Alternatörün 30 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarıtım Akımı I _u (A)	Faz Gerilimi U _{faz} (V)
1	12,9
2	25,4
3	36,6
4	50,7
5	63,6
6	78,4

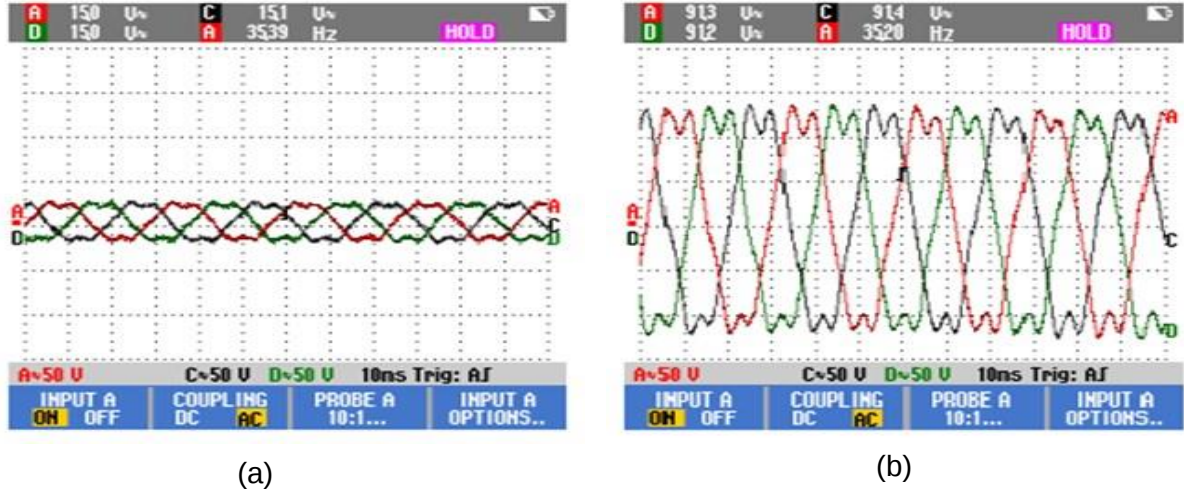
Tablo 4.4 baz alınarak şekil 4.8’de verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.8’den görüldüğü gibi uyarıtım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{faz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.8. EAYUS Alternatörün 30 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı (I_u) – Faz gerilimi (U_{faz}) Eğrisi

4.1.5 35 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.9'da 35 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.9. EAYUS Alternatörün 35 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.5'de ise 35 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Alternatörün 35 Hz Durumunda Uyarım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarım Akımı I_u (A)	Faz Gerilimi U_{fz} (V)
1	15
2	29,7
3	43,2
4	58,9
5	75
6	91,3

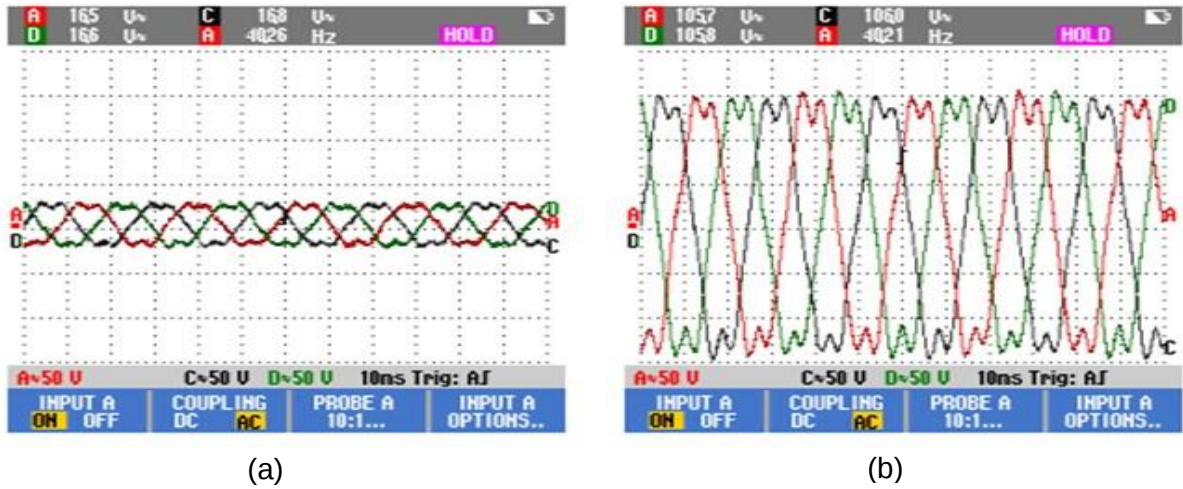
Tablo 4.5 baz alınarak şekil 4.10'da verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi uyarım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{fz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.10. EAYUS Alternatörün 35 Hz Durumunda Uyarım Akımı (lu) – Faz gerilimi (Ufaz) Eğrisi

4.1.6 40 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.11’de 40 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.11. EAYUS Alternatörün 40 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.6’da ise 40 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.6. Alternatörün 40 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarıtım Akımı I _u (A)	Faz Gerilimi U _{faz} (V)
1	16,5
2	33,2
3	49,8
4	66,5
5	82,1
6	105,7

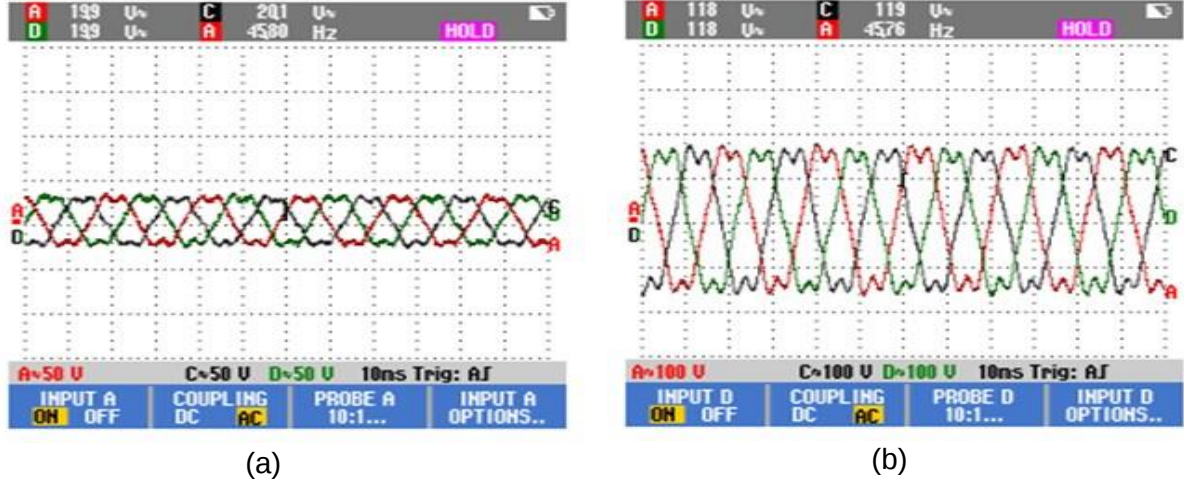
Tablo 4.6 baz alınarak şekil 4.12’de verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.12’den görüldüğü gibi uyarıtım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{faz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.12. EAYUS Alternatörün 40 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı (I_u) – Faz gerilimi (U_{faz}) Eğrisi

4.1.7 45 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.13'de 45 Hz durumunda iki farklı uyartım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.13. EAYUS Alternatörün 45 Hz Durumunda Uf a) $I_u=1$ A için b) $I_u=6$ A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.7'de ise 45 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyartım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7. Alternatörün 45 Hz Durumunda Uyartım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyartım Akımı I_u (A)	Faz Gerilimi U_{fz} (V)
1	19,9
2	37,8
3	56
4	74,6
5	97,4
6	118

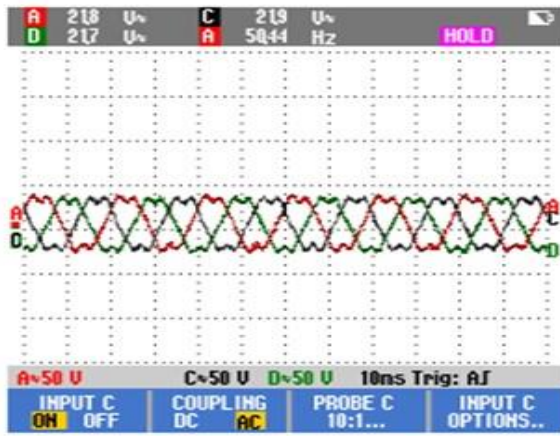
Tablo 4.7 baz alınarak şekil 4.14'de verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.14'den görüldüğü gibi uyartım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{fz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



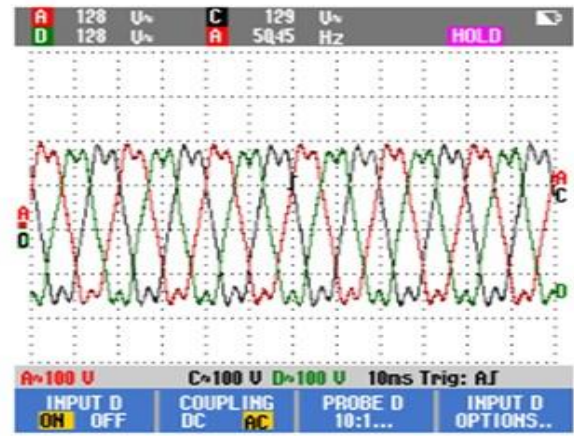
Şekil 4.14. EAYUS Alternatörün 45 Hz Durumunda Uyarım Akımı (lu) – Faz gerilimi (Ufaz) Eğrisi

4.1.8 50 Hz Boş Çalışma Durumu

Tasarlanan EAYUS alternatörün boş çalışma grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.15’de 50 Hz durumunda iki farklı uyarım akımı için elde edilen faz gerilimleri eğrileri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.15. EAYUS Alternatörün 50 Hz Durumunda Uf a) lu=1 A için b) lu=6 A için Faz Gerilim Eğrileri

Tablo 4.8’de ise 50 Hz durumu için alınan ara değerler ile birlikte uyarım akımına bağlı faz gerilimleri değerleri verilmiştir.

Tablo 4.8. Alternatörün 50 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı Faz Gerilim Değerleri İlişkisi

Uyarıtım Akımı I _u (A)	Faz Gerilimi U _{faz} (V)
1	21,8
2	41,1
3	61,9
4	82,7
5	105,6
6	128

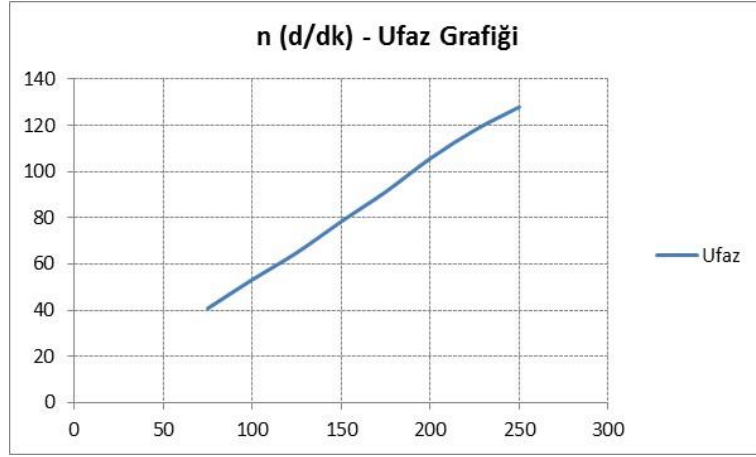
Tablo 4.8 baz alınarak şekil 4.16'da verilen grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.16'dan görüldüğü gibi uyarıtım akımına bağlı olarak lineer bir şekilde U_{faz} artmaktadır. Alternatör bu değerler için lineer bölgede çalışmaktadır.



Şekil 4.16. EAYUS Alternatörün 50 Hz Durumunda Uyarıtım Akımı (I_u) – Faz gerilimi (U_{faz}) Eğrisi

4.1.9 EAYUS Alternatörün Devir Karakteristiği

Tasarlanan EAYUS alternatörün farklı devir sayılarında 6 amper uyarıtım akımı için ürettiği gerilim eğrisi şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere 75 d/dk hızından 250 d/dk hızına kadar olan aralıkta ürettiği elektromotor kuvvet (emk) 40 volt ile 128 volt arasında lineere yakın bir ölçekte değişmektedir. Alınan 6 amper uyarıtım akımı 1150 amper sarıma denk gelmektedir.



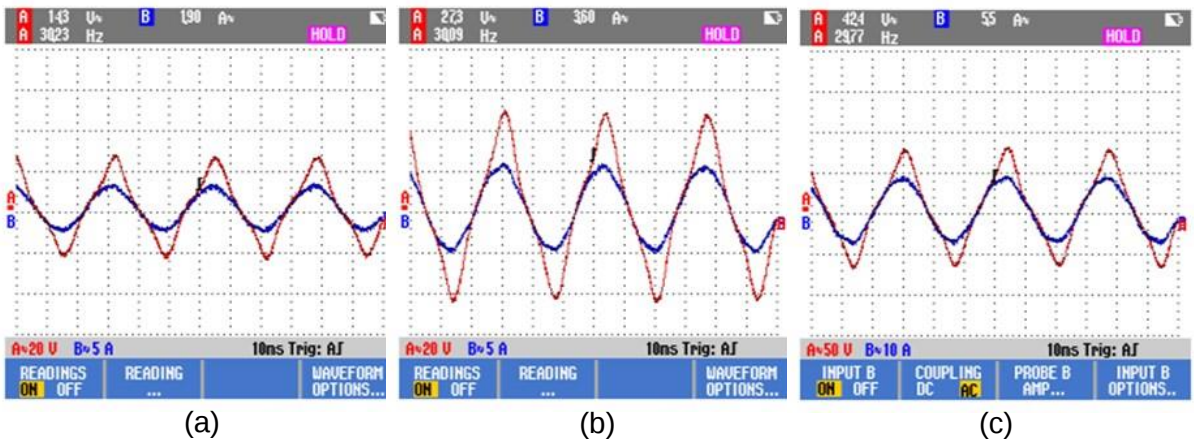
Şekil 4.17. EAYUS Alternatörün Devir Karakteristiği

4.2 Yüklü Çalışma Durumunda Elde Edilen Grafikler

Tasarlanan EAYUS alternatör farklı frekans ve farklı uyarım akımı değerleri için yüklenmiştir. EAYUS alternatörün üzerine yük alabilmesi için elde edilen deneysel verilerden uyarım akımının artırılması gerektiği görülmektedir. sırasıyla 30 Hz, 40 Hz ve 50 Hz durumları için alınan değerler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

4.2.1 EAYUS Alternatörün 30 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği

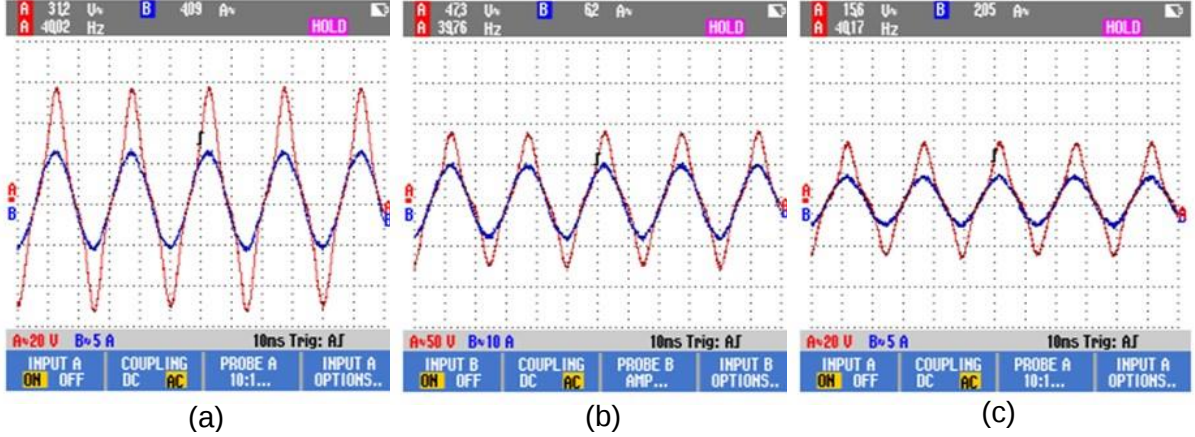
Tasarlanan EAYUS alternatör farklı uyarım akımlarında omik olarak yüklenmiştir. Yükleme grafikleri şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.18'de 2,4 ve 6 amer uyarım akımlarındaki omik yük durumundaki EAYUS alternatörün çıkış gerilim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.18. EAYUS Alternatörün 30 Hz Yüklü Çalışma Grafikleri a) $I_u=2A$ b) $I_u=4A$ c) $I_u=6A$

4.2.2 EAYUS Alternatörün 40 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği

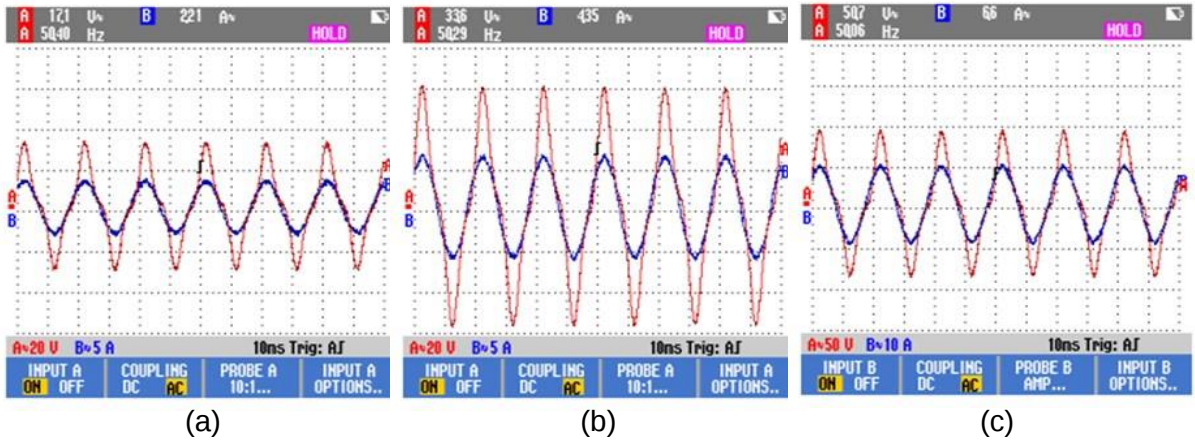
Tasarlanan EAYUS alternatör farklı uyarma akımlarında omik olarak yüklenmiştir. Yükleme grafikleri şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19'da 2,4 ve 6 amer uyartım akımlarındaki omik yük durumundaki EAYUS alternatörün çıkış gerilim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.19. EAYUS Alternatörün 40 Hz Yüklü Çalışma Grafiği a) $I_u=2A$ b) $I_u=4A$ c) $I_u=6A$

4.2.3 EAYUS Alternatörün 50 Hz için Yüklü Çalışma Grafiği

Tasarlanan EAYUS alternatör farklı uyarma akımlarında omik olarak yüklenmiştir. Yükleme grafikleri şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.20'de 2,4 ve 6 amer uyartım akımlarındaki omik yük durumundaki EAYUS alternatörün çıkış gerilim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.20. EAYUS Alternatörün 50 Hz Yüklü Çalışma Grafiği a) $I_u=2A$ b) $I_u=4A$ c) $I_u=6A$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda enerji kaynaklarındaki azalma insanları alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisinden faydalanmak için yoğunluğu düşük olan rüzgar gücünü büyük çaplı kanatlar ile mekanik enerjiye çevirmek mekanik enerjiden de elektrik enerjisine dönüştürmek gerekir. Geleneksel rüzgar türbinlerinde kullanılan alternatörler rotor kanatlarına redüktör sistemi ile bağlanarak önce rüzgar enerjisi mekanik enerjiye daha sonra istenilen referans hıza (redüktör yardımıyla) ve en sonunda da alternatör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu işlem esnasında özellikle redüktör kısmında %30-40 civarında enerji kaybı yaşanmaktadır. Ayrıca redüktör sisteminin düzenli bakımı ve kontrolü de gereklidir.

Son yıllarda ise direkt sürülen alternatörlerin yapımı ile redüktör sistemine gerek kalmaksızın mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve aradaki kayıp enerji kazanılmaktadır. Direkt sürülen alternatörler için çok kutuplu alternatör modelleri gereklidir. Çok kutuplu sistemlerin en kolay uygulaması ise sabit mıknatısların kullanılması ile tasarlanmaktadır. Sabit mıknatıslı alternatörün uyarım sargısı yerine sabit mıknatısın kullanılması verim üzerinde olumlu etkisine karşın özellikle vuru moment ve kontrol edilemeyen hava aralığı akısı en büyük dezavantajlarından biridir.

Rüzgar türbinlerinde sabit mıknatıslı ve yabancı uyarımlı alternatörler temelde ikiye ayrılır. Birincisi radyal akı alternatörler diğeri ise eksenel akı alternatörlerdir. Özellikle son yıllarda eksenel akı makineler üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bunun en önemli sebebi ise bu tip makinelerde kullanılan kuvvetli sabit mıknatısların fiyatlarının ucuzlamasıdır. Bu mıknatısları neodyum, demir ve bordan meydana gelen neodyum mıknatıslar oluşturmaktadır. Eksenel akı makineler üzerine yapılan birçok çalışmada radyal akı türlerine göre daha yüksek moment ve güç ürettikleri üzerine durulmuştur. Bununla birlikte eksenel akı makinelerin rüzgar türbinlerinde kullanılan tipleri üzerine yapılan çalışmalar daha kısıtlıdır.

Yapılan bu çalışmada kırsal bölgelerde kullanılmaya uygun 10 kw civarında güç üretebilen bir EAYUS alternatör tasarlanmıştır. Tasarlanan eksenel akı alternatör ile radyal akı alternatörlere göre daha kompakt yapıda bir alternatör üretilmesinin yanı sıra sabit mıknatısların oluşturduğu vuru moment etkilerinin de azaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca hava aralığı akısı da kontrol altında tutularak değişken rüzgar hızlarında maksimum güç üretmek amaçlanmıştır.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda yapılan bu çalışmada EAYUS alternatör üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analitik ve manyetik çalışmalarda 305 volt faz gerilimi hedeflenmiştir. Toroidal sargı uygulamasında ise tek taraflı çalışmada hesaplanan değer 150

voltttur. Alınan sonuçlar incelendiğinde ise boş çalışma koşullarında faz gerilimi olarak 129 volt elde edilmiştir. Aradaki fark ise yeterli amper sarım değerine ulaşamamış olunmasındandır. Bunun nedeni ise mekanik sistemin rotor ve stator yüzeyinde oluşan kuvvetleri kaldıramamasındandır. Dolayısıyla yapılan tasarım için ileri ki çalışmalarda eksenel kuvvetlere dayanabilecek yeni bir gövdenin imal edilmesi gereklidir. Yapılan bu çalışma deneysel verilerin elde edilmesine yönelik olduğu için bazı parçalar hareketli imal edilmiştir. Böylelikle proje sonunda yüksek lisans öğrencileri ile farklı açılardan çalışmalar gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte 6,6 amper yük akımı değerinde alınan gücü nominal değere göre yorumlarsak yeterli uyarım akımı sağlandığında 150 volt faz gerilimi ve 19,8 amper yük akımı değerine ulaşılacağı deneysel verilerden görülmektedir. Bu da tasarlanan EAYUS alternatörün her iki yüzü için toplam 17 kw güce tekabül etmektedir. Dolayısıyla hedeflenen 10 kw güç değerinin çok üstündedir.

Tasarlanan EAYUS alternatörün dezavantajı ise kutuplaşma için sarılan sargılar büyük bir hacim kaplamaktadır. Buda alternatör üzerinde kutup açısının ayarlanmasını engellemektedir.

İleriki çalışmalarda yapılması gerekenleri aşağıdaki maddeler halinde sıralayabiliriz.

- Kutup sargısı ve mıknatıs birlikte kullanıldığı yarı yabancı uyarımlı sistemlerin tasarımının yapılması.
- Kutup açılarının değiştirilerek alternatör performansına etkilerinin araştırılması.
- Yüksek güçlü alternatörler için elektriksel ve mekaniksel projelerin geliştirilmesi.
- Değişik endüvi sargı şekillerinin alternatör performansına etkisinin araştırılması.

EK-1 KAYNAKLAR

Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A. 2002. "A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control", IEEE Annual Meeting, Vol.(2), 1250-1257.

Aydın, M., Qu, R., Lipo, T.A. 2003. "Cogging Torque Minimization Technique for Multiple-Rotor, Axial-Flux, Surface-Mounted-PM Motors : Alternating Magnet Pole-Arcs in Facing Rotors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol(14), No.2, 185-192.

Aydın, M., Zhu, Z.Q., Lipo, T.A., Howe, D. 2007. "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent Magnet Machines Design Concepts", IEEE Transactions on Magnetics, Vol(43), No.9, 3614-3622.

Aydın, M. 2009. Sayfa 73. "Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Minimum Vuruntu Moment İçin Optimum Rotor Yapısının Belirlenmesi ve Vuruntu Momentinin Deneysel Olarak Doğrulanması", Tubitak Proje No:108E051, Sonuç Raporu.

Belicova, Eva., Hrabovcova, V. 2007. "Analysis of an Axial Flux Permanent Magnet Machine (AFPM) Based on Coupling of Two Separated Simulation Models (Electrical and Thermal Ones)", Journal of Electrical Engineering, Vol(58), No.1, 3-9.

Choi, J.H., Kim, J.H., Kim, D.H., Baek, Y.S. 2009. "Design and Parametric Analysis of Axial Flux PM Motors With Minimized Cogging Torque", IEEE Transactions on Magnetics, Vol(45), No.6, 2855-2858.

Crescimbeni, F., Di Napoli, A., Solero, L., Caricchi, F. 2005. "Compact Permanent-Magnet Generator for Hybrid Vehicle Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol(41), No.5, 1168-1177.

Enpay. "Toroidal Cores". <http://www.enpay.com/en/product.php?id=58#c1>, Son Erişim Tarihi: 13 Haziran 2014.

Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., Lipo, T.A. 1999. "A Comprasion of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol(14), No.2, 185-192.

Huner, E., Akuner, C. 2012. "Axial-Flux Synchronous Machines Compared with Different Stator Structures for Use in Working", *Prezeglad Elektrotechniczny*.

Hsu, J.S. 1998. "A Machine Approach for Field Weakening of Permanent Magnet Motors", *Society of Automotive Engineers*.

Letelier, A.B., Gonzalez, D.A., Tapia, J.A., Wallace, R., Valenzuela, M.A. 2007. "Cogging Torque Reduction in an Axial Flux PM Machine via Stator Slot Displacement and Skewing", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol(43), No.3, 685-693.

Mahmoudi, A., Ping, H.W., Rahim, N.A. 2011. "A Comparison Between the Torus and AFIR Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Using Finite Element Analysis", *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Vol(14), No.2, 185-192.

Marignetti, F., Colli, V.D., Coia, Y. 2008. "Design of Axial Flux PM Synchronous Machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid Dynamical Finite Element Analysis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol(55), No.10, 3591-3601.

Marignetti, F., Colli, V.D., Cancelliere, F., Scarano, M., Boldea, I., Topor, M. 2008. "A Fractional Slot Axial Flux PM Direct Drive", *IEEE*, 689-695.

Mendrela, E. A., Jagiela, M. 2004. "Analysis of Torque Developed in Axial Flux, Single-Phase Brushless DC Motor With Salient-Pole Stator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol(19), No.2, 271-277.

Park, J.C., Choi, H.R., Choe, G.H. 2006. "A Study on AFPM(Axial Flux Permanent Magnet) Motor without Stator Core", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1-6.

Parviainen, A., Pyrhönen, J., Niemela, M. 2001. "Axial Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Sinusoidally Shaped Magnets", *ISEF 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, Cracow, Poland.

Profumo, F., Tenconi, A., Zhang, Z., Cavagnino, A. 1998. "Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor Realized with Powdered Soft Magnetic Materials", *IEEE Industry Applications Conference*, Vol(1), 152-158.

Rahim, N.A., Ping, H.W., Tadjuddin, M. 2007. “Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, June.

Tapia, J.A., Gonzalez, D., Wallace, R.R., Valenzuela, M.A. 2006. “Axial Flux Surface Mounted PM Machine with Field Weakening Capability”, Springer Recent Developments of Electrical Drives, 321-334.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. “Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi (MİLRES)”. http://www.eie.gov.tr/projeler/projeler_tanimli3.aspx Son erişim tarihi: 10 Haziran 2014.

EK-2 YAYINLAR

Hüner, E. 2016. “Eksenel Akılı Açık Oluklu Alternatörlerde Mıknatıs Açısının Vuruntu Momenti Üzerine Etkisinin 3D ANSYS İle Araştırılması”, 1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı İCETAS, 21-22 Nisan, Afyon.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. ENGİN HÜNER
Proje No:	114E431
Proje Başlığı:	Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Direkt Sürülen Eksenel Akılı Yabancı Uyarımlı Senkron Alternatör Tasarımı ve Uygulaması
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MUSTAFA CANER AKÜNER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KIRKLARELİ Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/10/2016
Onaylanan Bütçe:	82766.0
Harcanan Bütçe:	57913.88
Öz:	Yapılan bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi için direkt sürülebilir eksenel akılı yabancı uyarımlı senkron (EAYUS) alternatör tasarlanmıştır. EAYUS alternatör tasarımında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanan ANSYS firmasının Maxwell programı kullanılmıştır. Maxwell ile manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler eşliğinde tasarlanan EAYUS alternatör üretilerek deneysel veriler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada yabancı uyarım ile hava aralığı akısı geniş aralıkta ayarlanması mümkün olmuştur. Analitik ve manyetik hesaplamalar sonucunda 152 volt gerilim elde edilmiştir. Bununla birlikte Deneysel olarak ta 1150 amper sarımda 129 volt elde edilmiştir. Manyetik simülasyonlarda manyetik nüvenin doyum noktasının 1800 amper sarım değerinin üstünde olduğu görülmüştür. Ayrıca gerekli uyarım sağlandığı takdirde 150 volt faz gerilimi ve 19,8 amper yük akımı değeri ile 17 kW güce erişileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Bunun yanında sabit mıknatıslı uyarıma sahip alternatörlere göre kutup ayakları için daha geniş yere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden hem hava aralığı akısını kontrol etmek hem de kompakt bir yapı sağlamak amacıyla mıknatıs ve yabancı uyarımın birlikte kullanıldığı tasarımların ortaya konması gerekmektedir.
Anahtar Kelimeler:	Eksenel Akılı Alternatör, Yabancı Uyarım, SEY Analizi, Yenilenebilir Enerji
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- EKSENEL AKILI AÇIK OLUKLU ALTERNATÖRLERDE MIKNATISAÇISININ VURUNTU MOMENTİ ÜZERİNE ETKİSİNİN 3D ANSYS İLE ARAŞTIRILMASI (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),