

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**ÇIKIK KUTUPLU SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet Kemal GEYİK

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ
TUNCELİ – 2018

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

**ÇIKIK KUTUPLU SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet Kemal GEYİK
(142103113)**

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ**

TUNCELİ – 2018

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇIKIK KUTUPLU SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMENLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Ahmet Kemal GEYİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez / / 2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ
(Munzur Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet POLAT
(Fırat Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Düzgün AKMAZ
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Elektrik enerjisi üretim sistemlerinin ana teçhizatlarından biri senkron generatörlerdir. Enerji üretiminde kullanılan bu donanımların iyi analiz edilmesi hem ekonomik hem de işletme anlamında büyük önem taşımaktadır. Son dönemde süper hızlı bilgisayarlar ve benzetim programlarındaki gelişmeler, imalatın önce generatöre ait verilerin doğrulukla analiz edilmesi, parametrelerin hesaplanması, sanal ortamda daha gerçekçi benzetimler ile imalatından önce generatörün görülmesine imkân sağlamaktadır. Bu benzetimler ile generatörlerin istenilen değerlere ulaşma durumları, negatif yanlarının görülmesi anlamında büyük kolaylık sağlanmaktadır.

Çıkık kutuplu senkron generatör analizinde değişik bilgisayar yazılımlarından faydalanılmaktadır. Bu yazılımlar generatörlerin kararlı durum, geçici durum parametreleri, akı değişimi, manyetik alanın değişimlerinin, elektrik alan değişimi, moment değişimleri, demir kayıpları vb. durumların daha erkenden görülmesi, analiz edilmesine imkân vermektedir.

Bu tez çalışmasında halen işletmede olan kırk kutuplu, üç fazlı çıkık kutuplu senkron generatör, Maxwell programında iki boyutlu ve üç boyutlu tasarım yöntemi kullanılarak modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analiz edilmiş, elde edilen sonuçlar ile generatör katalog ve işletme değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, öncelikle Türkiye'deki enerji sektörü durumu, senkron makinaların genel yapısı, çalışma prensipleri, sonlu elemanlar yöntemi ve Maxwell programı incelenmiş, daha sonra Seyrantepe Hidroelektrik Santralinde kullanılan senkron generatör bilgisayar ortamında modellenmiştir.

Analiz sonucunda geçici ve kalıcı durum, moment, akım, gerilim, manyetik akı dağılımları ortaya konmuştur. Sonuç olarak işletmede olan, çıkık kutuplu senkron generatörün benzetim sonuçları ile işletmede sağlanan veriler karşılaştırılmış ve sonuçların benzeştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çıkık Kutuplu Senkron Generatör, Ansys Maxwell, Ansoft, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ansys Rmxprt

ABSTRACT

Analysis of Salient Pole Synchronous Generator by Finite Element Method

One of the main equipment of electric energy production systems is synchronous generators. Good analysis of these equipment used in energy production is of great importance both in economic and operational sense. Recent developments in super-fast computers and simulation programs allow for accurate analysis of generator data prior to manufacturing, calculation of parameters, more realistic simulations in the virtual environment and the ability to see the generators before their manufacture. With these simulations, it is possible to achieve great convenience in terms of reaching the appropriate values of the generators and seeing the negative sides.

Different computer software is used in the analysis of synchronous generator of discrete poles. This software's can be used to determine the steady state, transient state parameters, flux exchange, changes in magnetic field, electric field exchange, moment changes, iron losses, etc. allowing them to be seen and analyzed earlier.

In this thesis, the forty-pole, three-phase salient pole synchronous generator, which is still in operation, is modeled using two-dimensional and three-dimensional design method in Maxwell program and analyzed with finite element method (FEM). The obtained results and generator catalog and operating values are compared.

In this study, primarily energy sector situation in Turkey, the overall structure of synchronous machines, working principles, examined the finite element method and Maxwell program, then modeled in synchronous generator computing environment used in Seyrantepe Hydroelectric Power Plant.

As a result of analysis, transient and permanent state, moment, current, voltage and magnetic flux distributions are investigated. As a result, the simulation results of the salient pole synchronous generator in operation are compared with those obtained in the operation, and the results are similar.

Key Words: Salient Pole Synchronous Generator, Ansys Maxwell, Ansoft, Finite Element Method, FEM, Ansys Rmxprt

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, sabır gösteren, tezin tamamlanmasında büyük katkıda bulunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ'a ve bölüm hocalarıma, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen şirket yetkililerime ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bana yardım ve destekleriyle hep yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Kemal GEYİK
TUNCELİ- 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
RESİMLER LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR TABLOSU	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	5
1.2 Tezin Amacı	8
2. MATERYAL ve METOT İle BULGULAR	9
2.1 Generatörlerin Genel Yapısı, Çalışma İlkesi ve Temel Parametreleri	9
2.2 Senkron Generatörler	12
2.2.1 Stator ve Stator Sargı Yapısı	15
2.2.2 Rotor, Rotor Mili ve Kutuplar	18
2.2.2.1 Rotor Kutbu	21
2.2.2.2 Kutup Çekirdeği ve Ayakları	21
2.2.2.3 Kutup Sargıları	24
2.2.2.4 Amortisör Sargısı	26
2.2.3 Bir Senkron Generatörün Çalışma İlkesi ve İndüklenen Gerilim	27
2.2.4 Senkron Generatörün Hızı	30
2.2.5 Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim	31
2.2.6 Bir Generatörün Endüvi Reaksiyonu ve Eşdeğer Devresi	32
2.2.7 Senkron Generatörlerin Fazör Diyagramları	37
2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi	39
2.3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi	39
2.3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışma İlkesi	41
2.3.3 Sonlu Elemanlar Çözümünün Gerçek Çözüm ile Karşılaştırılması	46
2.3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri	48
2.3.5 Sonlu Eleman Yöntemi İşlem Aşaması	49

2.3.6	Sonlu Elemanlar Yönteminin Manyetik Alan Analizine Uygulanması	50
2.3.6.1	Sınır Koşullarının Belirlenmesi	51
2.3.6.2	Sonlu Elemanlar Yapısının Belirlenmesi	53
2.3.6.3	Eleman İçindeki Temel Denklemin Yazılması.....	54
2.4	Ansys Maxwell Programı	57
2.4.1	Ansys Maxwell ile Ansys Rmxprt Birleştirerek En Uygun Elektrik Makinası Tasarımı Oluşturmak	60
2.4.2	Ansys Rmxprt ile Bir Generatör Modelinin Oluşturulması.....	63
2.4.3	Maxwell 2D/3D Benzetim ve Analiz	65
2.4.4	Maxwell Çözümleri	69
3.	SONUÇ, DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER	82
	KAYNAKLAR	83
	EKLER	90
	ÖZGEÇMİŞ	92

Şekil 1.1. 2016 yılı sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara dağılımı (TEİAŞ).....	4
Şekil 2.1. Generatör prensip Şeması (Whitby hydro, 2008).....	9
Şekil 2.2. Basit bir generatör yapısı (Whitby hydro, 2008).....	10
Şekil 2.3. Sinüzoidal sinyalin oluşturulması (Whitby hydro, 2008)	10
Şekil 2.4. Sinüzoidal gerilimin iletkenin hareketine bağlı oluşumu (Whitby hydro,2008). 11	
Şekil 2.5. (a)-Rotor kutbu düz (b)-Rotor kutbu dairesel yapısı	23
Şekil 2.6. Senkron generatör çalışma prensibi modeli (Chapman, 2005)	27
Şekil 2.7. (a)-Bir senkron generatör için akının uyarma akımına göre değişimi (b)-Senkron generatör için mıknatıslanma eğrisi (Chapman, 2005)	32
Şekil 2.8. (a), (b), (c), (d) Endüvi reaksiyonunun oluşumu (Chapman, 2005).....	34
Şekil 2.9. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi (Chapman, 2005)	35
Şekil 2.10. Üç fazlı bir senkron generatörün tam eşdeğer devresi (Chapman, 2005)	37
Şekil 2.11. Senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi (Chapman, 2005)	37
Şekil 2.12. Omik bir yükü besleyen senkron generatörün fazör diyagramı	38
Şekil 2.13. Senkron generatörün (a) geri ve (b) ileri güç faktöründe fazör diyagramları ..	38
Şekil 2.14. (a)- SEY'in uygulanacağı sınırlı alan (b)- Sınırlı alan içinde sonlu üçgen elemanın tanımlanması (c)- Sınırlı alan içinde sonlu üçgen elemanlı ağ yapısı. 43	
Şekil 2.15. Ağ yapısı – 1	46
Şekil 2.16. Ağ yapısı - 2	46
Şekil 2.17. (a)- Dairenin çevresini bulmak için altıgenin kullanılması (b)- Sekizgen kullanılması (Orijinal)	47
Şekil 2.18. Bir boyutlu sonlu eleman (Orijinal)	48
Şekil 2.19. Dörtgen ve üçgen tipi sonlu eleman örnekleri (Orijinal)	48
Şekil 2.20. Üç boyutlu sonlu eleman (Orijinal).....	49
Şekil 2.21. Sonlu elemanlar yöntemi çözüm adımları (Orijinal).....	49
Şekil 2.22. Sonlu elemanlar analiz akış blok diyagramı (Orijinal)	51
Şekil 2.23. İki boyutlu sonlu eleman örnekleri (Orijinal).....	53
Şekil 2.24. Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri (Orijinal)	53
Şekil 2.25. Pascal üçgeni (Kutucu, 2009).....	55
Şekil 2.26. Pascal piramidi (Kutucu, 2009).....	55
Şekil 2.27. Maxwell ağ örgüsü yapısı (Orijinal)	56
Şekil 2.28. Senkron generatör ağ örgüsü yapısı (Orijinal)	56
Şekil 2.29. Maxwell sonlu elemanlar ağ çözümü akış diyagramı (Orijinal)	61
Şekil 2.30. Rmxprt ana menü	63
Şekil 2.31. Rmxprt stator çekirdek yapısı.....	64
Şekil 2.32. Rmxprt' ta modellenen rotor yapısı	64
Şekil 2.33. Rmxprt generatör yapısı görünüşü	65
Şekil 2.34. Maxwell 3D stator sargıları	66
Şekil 2.35. Stator çekirdeği ve stator sargıları.....	66
Şekil 2.36. Generatör alan sargıları	67
Şekil 2.37. Generatör rotor, kutuplar ve alan sargıları	67
Şekil 2.38. Generatöre ait rotor yapısı.....	68
Şekil 2.39. Stator çekirdeği ve oluk yapısı	68
Şekil 2.40. Generatör Maxwell 2D modeli.....	69

Şekil 2.41. Generatör modeline uygulanan sonlu elemanlar ağ yapısı.....	70
Şekil 2.42. Hava aralığı sonlu elemanlar ağ örgüsü	70
Şekil 2.43. Geçici rejim akım değerleri	71
Şekil 2.44. SCADA generatör akım grafiği.....	71
Şekil 2.45. Geçici rejim faz gerilimleri	72
Şekil 2.46. SCADA generatör Vab gerilimleri.....	72
Şekil 2.47. Geçici rejim moment grafiği	73
Şekil 2.48. (a)- Akı çizgileri (b)- Akı vektörel değişimi	74
Şekil 2.49. (a)- Manyetik alan şiddeti (b)- Manyetik alan şiddeti vektörel değişimi	75
Şekil 2.50. (a)- Generatör benzetim modeli manyetik akı yoğunluğu (b)- Vektörel gösterimi	76
Şekil 2.51. Generatör hız grafiği	77
Şekil 2.52. Generatör tam yükte iken hava aralığındaki akı değişimi	77
Şekil 2.53. Generatör yüksüz durumda iken hava aralığındaki akı değişimi	78
Şekil 2.54. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilimleri.....	78
Şekil 2.55. Generatör vuruntu torku	79
Şekil 2.56. Faz gerilimi-ikaz akımı grafiği.....	79
Şekil 2.57. Generatör ikaz akımı SCADA grafiği.....	80
Şekil 2.58. Generatör fazlar arası gerilim SCADA grafiği.....	80
Şekil 2.59. Generatör aktif güç SCADA grafiği.....	81

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Türkiye'nin birincil enerji arzı	2
Tablo 1.2. Türkiye, yıllara göre kişi başına enerji ve elektrik tüketimi	3
Ek Tablo 1.1. Senkron generatör tasarım parametreleri.....	90
Ek Tablo 1.2. Senkron generatör rotor parametreleri.....	90
Ek Tablo 1.3. Senkron generatör stator parametreleri.....	91



RESİMLER LİSTESİ

Sayfa No

Resim 2.1. (a)- Çıkık kutuplu (kutupları yerleştirilmemiş) rotor yapısı (b)- Bazı kutupların montajı yapılmış rotor ve boş kırlangıç kuyruğu yapıları (Orijinal)	13
Resim 2.2. Generatör bilezik-fırça yapısı örneği (Orijinal).....	15
Resim 2.3. Stator karkası, çekirdeği ve sargıları (Orijinal)	17
Resim 2.4. Stator sargı yapısı, montaj bağlantıları, sargı izolasyon yapısı (Orijinal)	18
Resim 2.5. Çıkık kutuplu senkron generatör rotoru (Orijinal)	19
Resim 2.6. Rotor üzeri kutup bağlantı kısımları, kırlangıç kuyruğu (Orijinal)	20
Resim 2.7. Rotor kenarına montajı hazır kutuplar (a), (b) (Orijinal)	22
Resim 2.8. Çıkık kutuplu senkron generatör kutup ve kutup sargısı yapısı örneği	25



SEMBOLLER LİSTESİ

B	: Manyetik akı yoğunluğu
B_s	: Stator manyetik akı yoğunluğu
B_r	: Rotor manyetik akı yoğunluğu
B_{net}	: Net manyetik akı yoğunluğu
D	: Elektrik akı yoğunluğu
E_{A1}, E_{A2}, E_{A3}	: A, B, C fazlarında oluşan EMK
E_{stat}	: Statorda oluşan gerilim
E	: Elektriksel alan
f	: Frekans
f_s	: Salınım frekansı
f_e	: Elektriksel frekans
F	: Bilinen yük vektörü
J	: Akım yoğunluğu
H	: Manyetik alan şiddeti
$h(s)$	: Dik akı denklemi
I_f	: İkaz akımı
I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}	: A, B, C fazlarında oluşan akımlar
I_a	: Faz akımı
k_p	: Adım katsayısı
k_d	: Dağıtım katsayısı
K	: Bilinen katsayılar matrisi
L_a	: Stator öz indüktansı
L_f	: Uyarma devresi indüktansı
M	: Polinom derecesi
n	: Devir sayısı
n_s	: Sonlu elemanlar birim vektörü
n_m	: Manyetik alan hızı
N_f	: Endüvi sarım sayısı
N_1	: Alan değişkenleri
N	: Yaklaşım denklemleri
P	: Kutup sayısı
R_a	: Stator direnci
R_f	: Uyarma devresi direnci
R_{adj}	: Ayarlanabilir direnç
t	: Zaman
U	: Büyüklük alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör

u, v, w	: Üç boyut indisleri
V_{ind}	: İletkenin uçlarında indüklenen gerilim
V	: Gerilim
V_f	: İkaz gerilimi
V_{ϕ}	: Çıkış gerilimi
ω	: Açısal hız
X	: Reaktans
X_s	: Senkron reaktans
Φ	: Manyetik akı
Φ_d	: Stator çekirdeğinden geçen akı
$\Phi_{\sigma f}$	: İkaz çekirdeğinde kaybolan akı
$\Phi_{A1}, \Phi_{A2}, \Phi_{A3}$	: Sargılarda oluşan alternatif akılar
Φ_a	: Rotorda oluşan akı
Φ_{σ}	: Kaçak akı
Φ_m	: Maksimum akı
Φ_s	: Sınır koşulda potansiyel fonksiyonu
Φ_1	: Düğüm noktası
φ	: Yaklaşıklık işlevi
δ	: Yük açısı
σ	: Manyetik moment
$\sigma(s)$	: Elektriksel iletkenlik fonksiyonu

KISALTMALAR TABLOSU

AA, AC	: Alternatif Akım
DA, DC	: Doğru Akım
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
EPDK	: Enerji Piyasaları Denetleme Kurulu
EMK	: Elektro Motor Kuvvet
JES	: Jeotermal Enerji Santrali
Kep	: Kilogram eşdeğer petrol
MMK	: Magneto Motor Kuvvet
RAM	: Rastgele Erişimli Hafıza (Random Access Memory)
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
RMS	: Etkin Değer
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SG	: Senkron Generatör
TEİAŞ YTB	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Yük Tevzi Başkanlığı
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
N.D.E.	: Dönüş yönü tersi
D.E.	: Dönüş yönü
Tep	: Ton eşdeğer petrol
VPI	: Vakkumlu Vernikleme Sistemi

1. GİRİŞ

Son dönemde Türkiye’de ve genel olarak dünyada sanayi, teknoloji alanında görülen büyük gelişmeler, enerjinin önemini arttırmış, ülkemizin kalkınma hızına bağlı olarak enerji ihtiyacını en yüksek düzeylere çıkarmıştır. Özellikle ülkemizdeki enerji çeşitliliğinin, enerji kaynaklarının kullanımının son dönemlerde enerji ihtiyacına bağlı olarak sektöre katılımı artmış olup, enerji sektörüne katılımının önü açılarak daha fazla yatırım yapılması sağlanmış buna bağlı olarak generatörlerin ve bunlara bağlı teçhizatın rolü daha çok önem kazanmıştır. Bu da ülkemizin enerji konusundaki ilgili kuruluşlarının öncelikli hedefinin yerli imkânlar, yerli kaynaklar ile enerji üretimi, üretilen bu enerjinin kaliteli, kesintisiz bir şekilde tüm tüketicilere sağlanması olmuştur.

Enerjide oluşan bu talebin karşılanması özellikle enerjide dışa bağımlılığı azaltma amacıyla yerli kaynaklar ile enerji üretiminin sağlanması ile değişik kaynaklara yönelinmiş, bu kaynaklardan en yüksek verimde enerji elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu da enerji üretimindeki teknolojik gelişmelerin hızlı bir şekilde önünü açmış, daha ucuz daha kaliteli ve imkânların, kaynakların maksimum oranda verimli kullanılması için çalışmalar hızlandırılmıştır.

Burada verimliliğin sağlanması öncelikle elektrik enerjisinin üretim aşamasından, taşınmasına, dağıtılmasına ve kullanımına kadar tüm adımların maksimum seviyede kaliteli olması, istenilen özelliklerde, uygun parametrelerde olmasına bağlıdır. Bu tür parametre değişimini ve özellikleri değiştirip analiz etmek maliyet açısından daha iyi yaklaşımların oluşmasını sağlamaktadır.

Enerji üretiminde kilit noktayı oluşturan üretim elemanlarının, bu teçhizatın tasarımının, hesaplamalarının istenilen değerlerde olması, bu değerlerin üretim ve maliyeti en aza indirip maksimum verim için gerekli olan değerler ile tam olarak uyuşması, kullanılacak sistemin analizinin büyük bir doğrulukla yapılmasına bağlı olarak, bu noktada da analiz için kullanılan, uygulanacak metot ayrıca önemlidir. Çünkü maksimum kalitede bir enerjinin sağlanması öncelikle generatör yapısının iyi analiz edilmesi ile elde edilen değerlerin, oluşan ve üretilen enerjiye olumsuz yönde etki eden tüm etkenlerin minimum seviyeye indirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Senkron Generatörlerin (SG) tam verimle çalışmasının sağlanması, kayıpların ve generatörlerin çıkışlarındaki kararlı, maksimum kalitede bir enerji sağlanması için oluşan durumların veya bu duruma olumsuz yönde etki eden özelliklerin minimum seviyeye indirilmesi her zaman istenmektedir. Bu duruma bağlı olarak generatöre ait parametrelerin değiştirilerek istenilen özellikte ve verimde bir generatör elde edilmesi, bu generatörün tasarımının en az maliyet sağlanarak oluşturulması sektör için önemlidir.

Tablo 1.1. Türkiye'nin birincil enerji arzı

	2013 (bin tep)***	2013 (%)	2014 (bin tep)	2014 (%)	2015 (bin tep)	2015 (%)
Doğalgaz	37.628	32,4	40.201	33,3	39.651	30,7
Kömür*	33.433	28,7	36.682	30,4	37.514	29,0
Petrol ve Petrol Ürünleri	32.130	27,6	31.625	26,2	36.367	28,1
Hidrolik	5.110	4,4	3.495	2,9	5.775	4,5
Jeotermal-Diğer Isı	2.636	2,3	3.524	2,9	4.805	3,7
Biyoenjerji ve Atıklar (**)	3.398	2,9	3.246	2,7	2.937	2,3
Rüzgar	650	0,6	733	0,6	1.002	0,8
Güneş	795	0,7	803	0,7	828	0,6
Elektrik	533	0,5	439	0,4	339	0,3
Toplam	116.314		120.747		129.217	

* taş kömürü, linyit, asfaltit, p.kok, kok ve türetilmiş gazlar toplamını ifade etmektedir.

** odun, hayvansal ve bitkisel atıklar, biyoyakıtların toplamını ifade etmektedir.

***Tep, ton eşdeğer petrol

Enerji, artık bir nüfusun, ülkenin veya bir bölgede yaşayan insanların, ekonomik ve sosyal ilerlemesini sağlayan, hayat kalitesini iyileştiren veya bunların ne kadar ileri bir değer olduğunun tespitinde kullanılan en önemli faktörlerden biridir. Enerji talebinin miktarını etkileyen en önemli faktörler bir bölgede kullanılan teknoloji, sanayi ve genel olarak enerji kullanan nüfus, sistem ve demografik değişikliklerdir. Enerji ve Tabii kaynaklar bakanlığının yaptığı araştırmaya göre, Tablo 1.1' deki değerler üzerinden, Türkiye açısından bakıldığında enerji kaynakları itibarıyla, mevcut durumda olan birincil enerji arzındaki petrol, doğal gaz ve kömürden oluşan fosil kaynaklı yakıtların ağırlıklı kullanımının gelecek yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. Enerji talebindeki artışın (2014-2040 dönemi) %73,3'lük bölümünün bu kaynaklardan karşılanmasının devam edeceği öngörülmektedir (TEİAŞ, TEİAŞ YTB). Tablo 1.2'de ise Türkiye'de ki kişi başına düşen enerji, elektrik tüketimi olarak verilmiştir.

Tablo 1.2. Türkiye, yıllara göre kişi başına enerji ve elektrik tüketimi

	2013	2014	2015	2014-2015 (değişim)
Nüfus	76.667.864	77.695.904	78.741.053	+ % 1,35
Enerji tüketimi	1.517 kep*	1.554 kep	1.641 kep	+ % 5,60
Elektrik tüketimi (net)	2.568 kWh	2.669 kWh	2.760 kWh	+ % 3,41
Elektrik tüketimi (brüt)	3.132 kWh	3.243 kWh	3.325 kWh	+ % 2,53

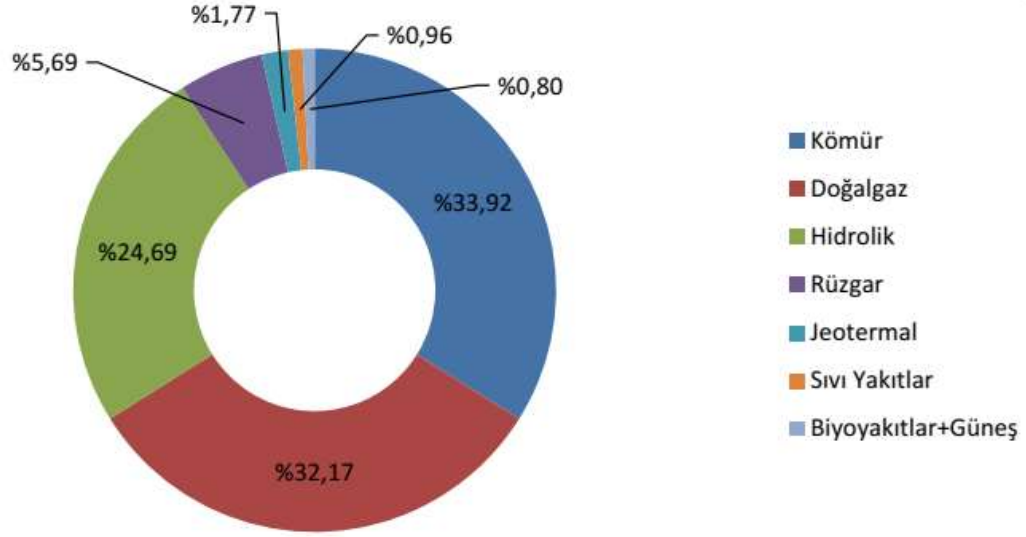
*Kep, Kilogram eşdeğer petrol

Tablo 1.2’de Türkiye’de kişi başına gerçekleşen enerji tüketimi verileri gösterilmiştir. Türkiye’deki 2015 yılındaki elektrik tüketimi 265,7 milyar kWh olup, 2016 yılında elektrik tüketimimiz 2015 yılına göre %4,44 artarak 277,5 milyar kWh olmuştur. Elektrik üretimimiz yine 2015 yılında 261,78 milyar kWh olup, 2016 yılındaki elektrik üretimimiz ise 2015 yılına göre %4,12 oranında artarak 272,56 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının son çalışmalarına bağlı olarak elektrik enerji talebinin yüksek ve düşük talep senaryolarına göre; 2025 yılında Yüksek Talep Senaryosunda (yıllık ortalama %6,2 artış öngörülen) 482,7, Düşük Talep Senaryosunda (yıllık ortalama %3,1 artış) ise 359,6 milyar kWh düzeyine ulaşacağı değerlendirilmektedir.

Türkiye’deki enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, 2016 yılı itibariyle, toplam elektrik üretiminin %33,9’u kömürden, %32,2’si doğalgazdan, %24,7’si hidrolik kaynaklardan, %5,7’si rüzgârdan, %1,8’i jeotermalden, %1,0’i sıvı yakıtlardan, %0,8’i biyoyakıtlar ve güneş enerjisinden elde edildiği görülmektedir. Burada özellikle dışarıya bağımlı bir enerji üretim sektörünün ortadan kaldırılması için özellikle yerli kaynaklara ağırlık verilmeli, elektrik üretiminde kullanılan ve dış ülkelerden tedarik edilen doğalgaz gibi kaynakların oranının enerji üretiminde düşürülmesi gerekmektedir (TEİAŞ, ETBK, TEİAŞ YTM).

Türkiye’de 2016 yılında üretilen enerjinin kaynaklar bazında 2015 yılı ile kıyaslandığında kömür, rüzgâr, jeotermal ve biyoyakıtlardan yararlanma oranı artarken, doğalgaz ve hidrolik kaynaklardan yararlanma oranında düşme görülmüştür. Bu durum Türkiye açısından olumlu olup, yerli kaynakların kullanımının artması ülke ekonomisine büyük katkı sağlamaktadır. Burada özellikle özel sektörün enerji sektörüne yaptığı yatırımlar hızlanmıştır. Çünkü enerji ihtiyacının fazla olması bu sektördeki kazanç oranını

artırmaktadır. Özel sektör ile EÜAŞ'ın üretim bakımından kıyaslandığında EÜAŞ'ın elektrik üretimindeki 2014 yılında sahip olduğu üretim payı %28,0'den, 2015 yılında %21,1'e, 2016 yılında ise %17,1'e düşmüş olup, geri kalan %82,9'luk üretim ise özel sektör tarafından kurulan, işletilen enerji santrallerinden karşılanmıştır.



Şekil 1.1. 2016 yılı sonu Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara dağılımı (TEİAŞ)

Bu değerlerden de görüleceği üzere Türkiye'de özel sektöre yatırım yapma imkânı ile açılan, elektrik üretimi sektöründe özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yapılan yasal düzenlemelerin de etkisiyle; Ocak 2017 itibariyle, özel firmalara hidroelektrik santral (HES) kurulması amacıyla 238 santralda 6.800 MW'lık, rüzgâr santral'ı (RES) kurulumu için 149 santralda 4.640 MW'lık, jeotermal santral (JES) kurulumu içinde 16 santralda 342 MW'lık olmak üzere yeni/ilave kapasite EPDK'dan lisans verilmiş durumdadır. Bu bağlamda, Türkiye'deki rüzgâr enerjisi kurulu gücü ise 2014 yılında 3.627 MW'a, 2015 yılında 4.503 MW'a ve 2016 yılında 5.751 MW'a ulaşmış bulunmakta olup özellikle özel sektör firmalarının bu oranda etkisi büyüktür. EPDK verilerine göre Ocak-2017 itibariyle proje fiili gerçekleşme yüzdesi %10'un üzerinde olan inşa halindeki santrallerin oranı yükselmektedir. Buna göre inşa halindeki santrallerin kapasite değerleri ve yakın zamanda devreye girmesi planlanan kurulu güç kapasitesinin %34,8'inin kömür santrallerine ait olduğu görülmektedir. Ardından doğalgaz (%34,6), hidrolik (%18,8), rüzgâr (%9,9) ile jeotermal (%1,3) santralleri gelmektedir (TEİAŞ). Şekil 1.1'de 2016 yılı sonu itibariyle Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir.

Genel olarak enerji üretiminde kullanılan en temel teçhizatlardan birisi elektrik makinası olarak adlandırılan ana başlık altındaki generatörlerdir. Bir elektrik makinasının tasarımında en önemli kısım elektromanyetik alan teorisidir. İstenilen sonuçların elde edilmesinde ana olgu oluşturulacak elektromanyetik alan sonucunda istenilen cevabın alınıp alınamayacağıdır. Yapılacak mühendislik tasarımının da, istenilen sonuçları vereceğini hem formüsel olarak hem de fiziki olarak görmek imkânı en iyi sonucu elde etmeyi sağlayabileceği gibi fiziki olarak sürekli bir deneme ise maliyeti artıracak bir durumdur. Bu nedenle son dönemde özellikle güçlü süper bilgisayarların gelişmesi ile analizlerin daha kolay yapılıp, fiziki uygulamaya gerek kalmadan veya en aza indirilerek istenilen sonucu verecek elektrik makinası tasarlamak, daha kolay ve maliyeti düşüren bir başlık olmuştur.

1.1 Literatür Taraması

Senkron generatörler günümüzde küçük, orta, büyük ölçekli rüzgâr, hidroelektrik sistemleri enerji üretim tesislerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden generatör türlerini üzerine birçok araştırma, sonlu elemanlar, benzetim programları kullanılarak yapılmıştır.

Üç fazlı bir senkron makinada değişik yük durumlarında değişken yük durumlarında verimlilik, belirlenen devirlerde indüklenen gerilim, faz akımları ve faz gerilimleri, tork miktarı gibi değerleri elektriksel açı değişimine bağlı ayrı ayrı ortaya oluşturulabilir. Makinanın beslediği değişken bir yüke sahip şebeke olduğunda enerji üretim programında önemli bir unsurdur (Varan ve ark., 2017; Arslan, 2014).

Yüzer (2011), senkron bir generatörün, analitik ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, elektromanyetik tasarımını ve boyutlandırma kriterlerini göstermiştir. Yapılan çalışmada radyal akıllı sabit mıknatıslı generatörün, eksenel olanlara göre daha üstün olduğu gösterilmiş, üç boyutlu Maxwell benzetim programları simülasyonu yapılmıştır.

İsmail Topaloğlu ve Osman Gürdal'ın (2009, 2010) yaptığı çalışmalarda enerji üretimindeki kullanılan senkron generatörlerin tasarımlarının her sistem için farklılık göstereceği belirtilmiş, benzetim programları kullanılarak, bir generatörde ana değişkenler üzerinde değişiklik yaparak, makinanın üç boyutlu tasarımları yapılarak, geçici zaman ve dinamik analizleri incelenmiştir. Yapılan tasarımın iyileştirilmesi için ardışık karma değişken nonlinear programlama tekniği kullanılarak tasarlanan hidroelektrik santrali generatörü optimize edilmiştir.

Çıkık kutuplu bir senkron generatörün üçüncü harmonik akımlarının yüksek nötr akımlarını desteklediği ve bu akımların nötr direnç, haberleşme arızalarına, toprak arızalarına sebep olduğunu göstermiştir (Abdullah ve ark., 2014). Özellikle benzetim programlarının yaygın olarak kullanılması ile uygulanabilirlik alanları genişlemiş, problem çözümleri için farklı bir yaklaşım sağlamıştır.

Generatör ikaz sargılarındaki, generatörün çalışması sırasında yüzey sıcaklığındaki değişimleri yeni metodu ile çözerek, benzetim sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ve bunların örtüştüğü görülmüştür (Stipetic ve ark. 2012).

Generatörün yüksüz ve yükte çalışması sırasında dengesiz manyetik alanın mil üzerinde oluşturduğu bozucu etki sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve bu değer yapılan benzetim programı ile yapılan değerler ile örtüştüğü gösterilmiştir (Žarko ve ark. 2012).

İşletmede olan 34 MVA'lık çıkık kutuplu bir senkron generatör modellenerek geçici ve kalıcı durum analizleri yapılarak durum değerleri elde edilmiş, bu değerler işletme şartlarındaki değerler ile karşılaştırılıp benzer olduğu gösterilmiştir (Despalatovi'c ve ark., 2012).

Jiji ve arkadaşları (2014), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak generatör tasarımı aşamasında elektriksel parametrelerin hesaplanması için iki ve üç boyutlu benzetim programı kullanmış, hesaplamaları yapmıştır. Üçüncü harmonik değerleri incelenmiş, elde edilen değerlerin, istenen değerler ile uyduğu görülmüştür. Bu durumun hem zaman hem de ekonomik yönden verimli olacağı gösterilmiştir.

Tessarolo ve arkadaşları (2012) 14 MVA'lık bir generatörün zaman adımli sonlu elemanlar yöntemi temelinde iki ve üç boyutlu benzetim programı kullanarak farklı amartisör sargılarına bağlı olarak elektriksel değişkenlerin analizini yapmış, deneysel ve benzetim değerlerinin birbiri ile örtüştüğünü göstermiştir.

Senkron makinada dikey manyetik alanların kayıplara sebep olduğu bunun miktarının da önceden belirlenip düzeltilmesi yolunda üç boyutlu modelleme yapıp, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış, bu tür değerlerin teçhizatın imalatından önce belirlenmesi adına çalışma yapılmış ve sonuçların örtüştüğü gösterilmiştir (Marcusson ve Lundin, 2015).

Küçük generatör, rüzgar enerji santralleri üzerindeki generatörler üzerindeki çalışmada, 10 MVA'lık bir rüzgar santrali için optimizasyon çalışması yapılmış, iki ve üç boyutlu benzetimi yapılan generatöre rotor ve stator boyutu değiştirilerek istenilen

değerlerin sağlanabilmesi için hangi boyutta olması gerektiğine benzetim üzerinden karar verilmiştir. Yapılan çalışmada 10 MVA'lık bir güç için stator dış çapının 14 metre olması gerektiği hesaplanmıştır (Xu ve ark., 2016). Diğer bir çalışmada 10 MVA'lık bir senkron rüzgâr generatörünün sonlu elemanlar yöntemi ile Maxwell 14.0 programı kullanılarak analizi yapılmıştır. Generatöre ait akı dağılımları, çıkış gerilimleri, faz akımları, moment değeri hesaplanmış, grafik olarak verilmiştir. Stator sargılarının zarar görmeden çalıştığı, optimizasyon çalışmasında herhangi bir önemli akım ve voltaj harmoniğinin olmadığı gösterilmiştir. Yükteki değişime bağlı olarak, generatör performansının değişimi verilmiştir (Liang ve Yang, 2016).

Nuzzo ve arkadaşlarının (2017) yaptıkları çalışmada senkron generatörün ikaz yapısı, modellenmesi, analizin yapılması sonlu elemanlar ve iki boyutlu benzetim programı ile incelenmiştir. Elektriksel değerlerin, gerilim düşümü, fazlar arası gerilim, komutasyon açıları, faz indüktasları, akım değerleri, analitik, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile ayrı ayrı elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin analitik yöntemden özellikle karmaşık konularda daha doğru sonuç verdiği gösterilmiştir. Maksimum hatanın %8,2 olduğu belirtilmiştir. Diğer çalışmada senkron generatörün iki boyutlu modeli üzerinden sonlu elemanlar yöntemi ile kutup eğriliğinin etkilerinin incelenmesi çalışması yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile farklı teknikler ile yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Hata oranlarının %5,6'larda kaldığı gösterilmiştir (Nuzzo ve ark., 2018).

Pals generatörü üzerinde yapılan çalışmada, iki boyutlu ve üç boyutlu modellenen senkron generatör ve homopolar asenkron generatörün sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmıştır. Aynı sistemlerin deneysel olarak sonuçları elde edilip karşılaştırılmıştır. Analitik, matematiksel çözümleri elde edilmiştir. İki ve üç boyutlu modellerin sonuçlarının geçerli ve yakın olduğunu göstermiştir (Liu ve ark., 2017).

Elektrik üretiminde, hidroelektrik santrallerinde senkron generatörlerin kontrol yapısının, kaliteli bir enerji tedarikinde önemli bir etkidir. Diğer bir yapılan çalışmada Türkiye elektrik sistemindeki büyük güçteki tüm hidroelektrik santrallerin hız regülatörü ayarlarının, salınımlara asgari olumsuz etki gösterecek şekilde konfigüre edilmesi gerekmektedir. Örnek alınan sistem sümülasyonunda önerilen ayarların doğruluğu gösterilmiştir (Gençoğlu ve ark., 2010).

Tayfun Gündoğdu (2012), çıkık kutuplu senkron generatör üzerinde kesirli oluk konsantre sargı tekniği ve ilave kalıcı mıknatıslar kullanılarak geliştirme tekniği üzerinde

alışmıştır. Analiz ve optimizasyon için iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, devre olarak da modellenmiştir. Çalışmada mekaniksel analizler de yapılmıştır. İki boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları ve kıyaslamalar sayesinde, tasarlanan ve geliştirilen modellerin basit yapıda, yüksek verimli ve kompakt generetrler olduğu doğrulanmıştır.

zdoğdan (2012), senkron generatörün çalışma prensibi, tahrik makineleri ve g sistemleriyle olan ilişkisi incelemiş, fosil yakıtlı bir enerji santrali için kullanılacak olan yuvarlak kutuplu bir senkron generatörün ve yardımcı ekipmanlarının belirlenmesinde nasıl bir yol izlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

SG'n geçici durumunda, arıza durumlarında, kalıcı durumda performansını etkileyen en önemli faktörlerin başında generatörün eşdeğer devre parametreleri gelmektedir. Sonlu elemanlar yöntemine bağlı olarak farklı yazılımlar ile bu değerler hesap edilmiştir. Deneysel değerler ile elde edilen sonuçların benzer olduğu gösterilmiştir (Chmelicek, 2010).

1.2 Tezin Amacı

Tezde üç fazlı senkron generatörün benzetim programı kullanılarak analizi yapılacaktır. Senkron generatörün iki, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile geçici, sürekli durum akımları gerilimleri, manyetik alan ve akı dağılımları, moment grafiği elde edilmeye çalışılacaktır. Daha sonra elde edilen benzetim sonuçları ile gerçekteki senkron generatöre ait katalog, işletme değerleri karşılaştırılması hedef alınmıştır. Modellemede kullanılan generatör Seyrantepe HES'te bulunan 40 kutuplu, 29 MVA'lık generatördür.

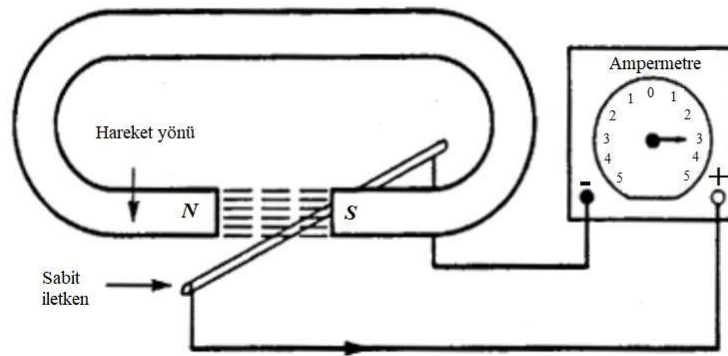
2. MATERYAL ve METOT İle BULGULAR

2.1 Generatörlerin Genel Yapısı, Çalışma İlkesi ve Temel Parametreleri

1819 yılında manyetik ve elektrik akımı arasındaki ilişki Örsted tarafından bulunmuş ve yayınlanmıştır. Örsted bu ilişkiyi şu şekilde tanımlamıştır; eğer bir iletken akım geçirilirse, bu iletken etrafında bir manyetik alan oluşturur. Yine 1831 yılında Faraday tarafından, bir iletkenin manyetik alan içinde hareket ettirilmesi ile bu iletkenin uçlarında bir gerilim indüklendiğini bulunmuştur. Bu indüklenen gerilimin genliği manyetik alanın büyüklüğüne ve bu manyetik alanı kesen iletken oranına bağlıdır. Bu durum bir elektrik makinası olarak motor ve generatörün çalışma prensibinin temelini ve Faraday'ın Elektromanyetik indüksiyon kanunu oluşturmaktadır (Whitby, 2008).

$$V_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

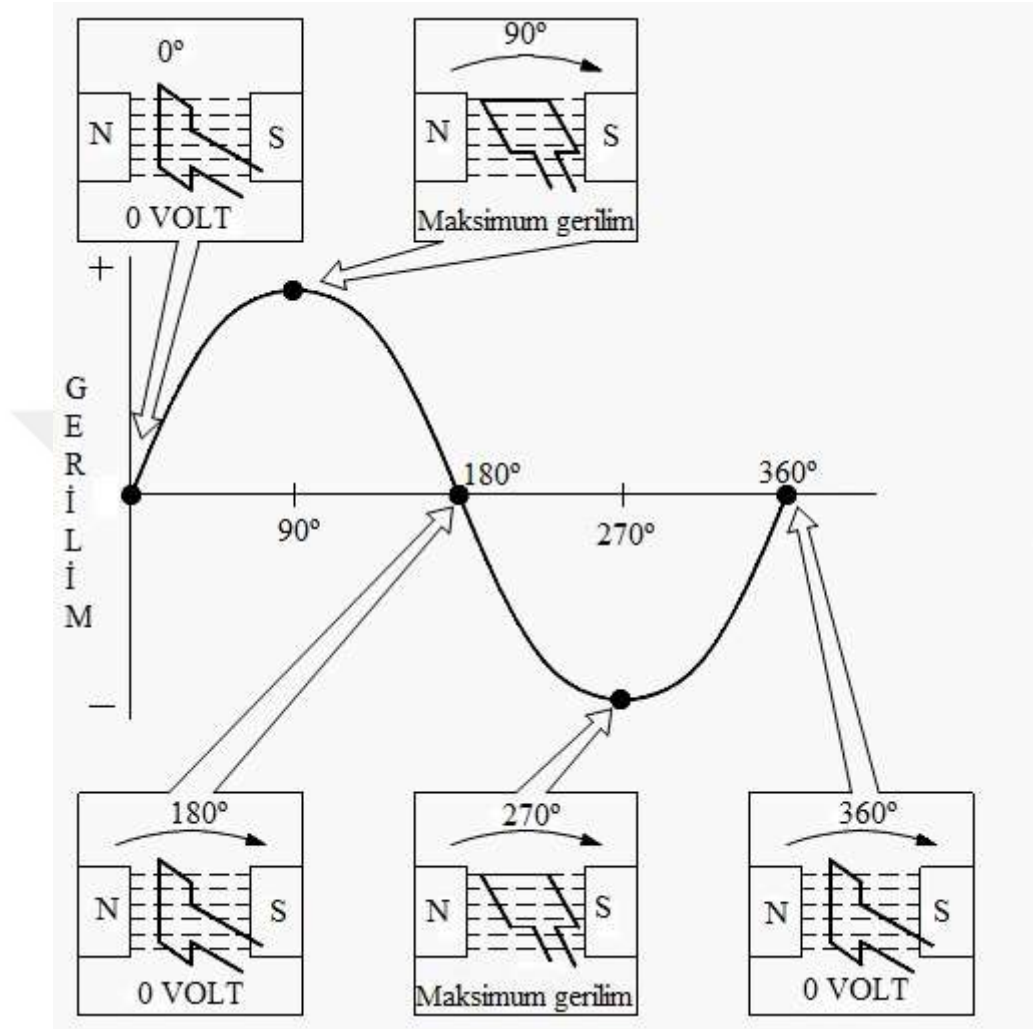
V_{ind} , iletken uçlarında indüklenen gerilim, $\Delta\Phi$, akı yoğunluğundaki değişim ve Δt , zaman değişimi olarak belirtilir. Bu zamanda üretilen, dönen generatör makinaları bu prensibe bağlı olarak tasarımı yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Generatör prensip Şeması (Whitby Hydro, 2008)

Şekil 2.1’de bir generatörün çalışma prensibinin basit şeması verilmiştir. Burada manyetik alanın hareketine bağlı olarak, sabit iletkenin uçlarındaki bir gerilim oluşacak ve iletkenin uçlarına bağlı ampermetrede sapma olacaktır.

ilk anda manyetik alan içindeki iletken dikey konumdadır ve bu durumda manyetik kuvvet çizgilerini kesmediğinden, iletken uçlarında bir gerilim indüklenmesi olmaz (Whitby, 2008).



Şekil 2.4. Sinüzoidal gerilimin iletkenin hareketine bağlı oluşumu (Whitby Hydro, 2008)

Daha sonra ilk 90°'lik harekette, içinde bulunduğu manyetik alanın kuvvet çizgileri maksimum oranda kesildiğinden, iletken uçlarında oluşan gerilimde maksimum değerini alır. 360° 'lik döngüde sinüs şeklinde bir gerilim elde edilir (Alstom, 2007; Whitby Hydro, 2014; Chapman, 2005).

Temel olarak iki tür generator vardır.

- a- DA Generatörler
- b- AA Generatörler
 - b.1. Asenkron Generatörler
 - b.2. Senkron Generatörler

2.2 Senkron Generatörler

SG veya alternatörler, mekanik gücü alternatif akım cinsinden elektrik gücüne dönüştürmek için kullanılan senkron makinalardır. Mekanik bir harekete bağlı olan girişine, uygulanan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinalarına senkron generatör (alternatör) denir. Genaratörler türbinler ile kendisine iletilen mekanik enerji gücünü, elektrik enerjisine dönüştürürler. Dönüştürülen alternatif gerilimin frekansı hem kutup sayısına hem de rotorun dönüş hızına bağlıdır. Generatör çalışma prensibine göre, mıknatıs alanı içerisinde endüksiyon yolu ile bir elektromotor kuvvet (EMK) oluşması ilkesine göre çalışır. İndüklenen gerilimin alternatif gerilim olması için alternatörde bazı düzenlemeler yapılır (Boduroğlu, 1988; Akın, Orhan, 2007). Bunlar;

- 1) Manyetik akıyı sinüs dalga yapmak.
- 2) Endüvi sargılarını kısa adımlı yapmak.
- 3) Endüvi sargılarını oluklara dağıtmak.
- 4) Yuvarlak rotorlu alternatörlerde rotor sargılarını kademeli olarak sarmak.
- 5) Rotor yüzeyinin 2/3 ünü kullanmak.
- 6) Alternatör bağlantısını yıldız yapmak

şeklinde olabilir.

Senkron generatörler iki ana kısımdan oluşur. Bunlar;

- 1) Endüvi (stator)
- 2) Endüktör (rotor)

olarak belirtilir.

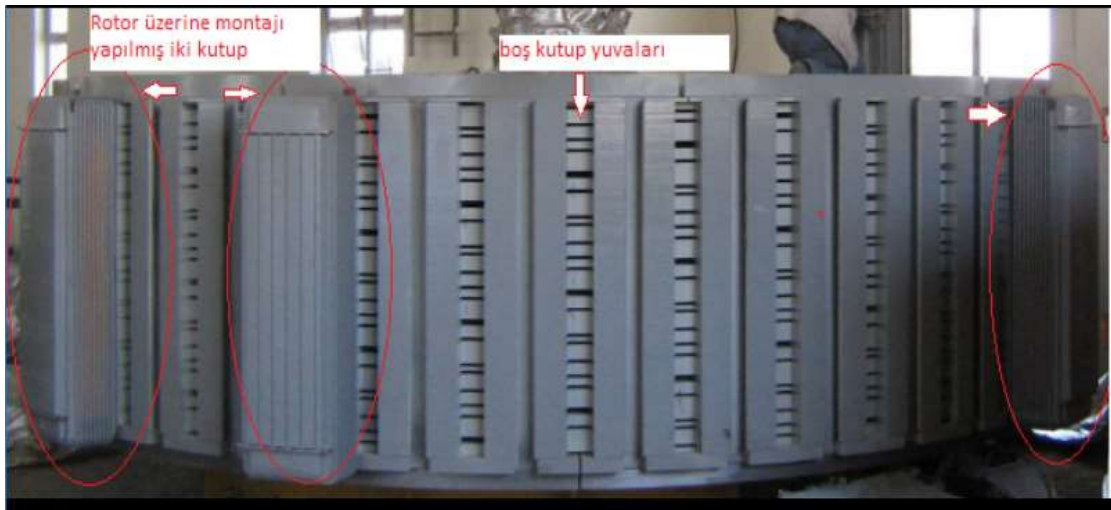
Sabit endüvili generatörlerde stator belli bir noktaya sabitlenmiş, rotor ise dönen, hareket eden kısımdır. Bir senkron generatörde, rotor sargılarına doğru akım uygulanır. Bu uygulanan akım bir rotor manyetik alanı oluşturur. Sonra generatörün rotoru, bir hareket ettirici kaynak ile döndürülür. Böylece makina içinde dönen bir manyetik alan üretilmiş olur. Bu üretilen dönen manyetik alan generatörün statora ait sargılarda üç fazlı gerilim indüklenmesini sağlar.

Genel olarak makinadaki sargıları tanımlamak için iki terim kullanılır. Bunlar; alan sargıları ve endüvi sargılarıdır. Sargılardan 'alan sargıları' terimi makinada ana manyetik alanı üreten sargılar için kullanılır. Senkron generatörlerin alan sargıları rotor üzerinde bulunduğundan, bu sargılara rotor sargısı da denir, benzer şekilde endüvi sargıları stator sargıları olarak da adlandırılır.

Senkron generatörün rotoru, aslında büyük bir elektro mıknatıs olarak adlandırabiliriz. Rotor üzerinde kutuplar bulunur ve bu manyetik kutuplar ya çıkık ya da yuvarlak kutupludur. Çıkıklık kelimesi bir şeyden dışarı çıkmış, dışarıda anlamındadır ve çıkık bir rotor kutbu, rotorun yüzeyinden dışarı doğru olan manyetik kutuptur (Chapman, 2005).



(a)



(b)

Resim 2.1. (a)- Çıkık kutuplu (kutupları yerleştirilmemiş) rotor yapısı (b)- Bazı kutupların montajı yapılmış rotor ve boş kırlangıç kuyruğu yapıları (Orijinal)

Diğer bir kutup çeşidi olan yuvarlak kutup, rotorun yüzeyiyle aynı hizada imal edilmiş olan manyetik bir kutup çeşididir. Çıkık kutuplu bir rotor yapısı da resim 2.1’de gösterilmiştir. Çıkık kutuplu rotorlarda kutup sayısı dört veya daha fazla olmakla beraber, yuvarlak kutuplu rotorlar iki veya dört kutup olarak imal edilirler. Rotorlar değişken manyetik alana maruz kaldıklarından, oluşacak girdap akımı kayıplarını düşürmek için resim 2.1’de görüleceği üzere ince laminasyonlardan imal edilir (Alstom, 2007).

Rotordaki alan devresinden bir doğru akım akması gerektiğinden ve rotor döner bir harekete sahip olduğundan, alan sargılarına doğru akımın aktarılabilmesi için özel bir yapıya gereksinim vardır. Doğru akım gücünü alan sargılarına aktarmak için iki farklı yöntem kullanılır.

1. Bilezik ve fırçalarla rotora harici bir doğru akım kaynağından güç sağlamak,
2. Senkron generatörün rotoru üzerine doğrudan monte edilen özel bir doğru akım kaynağından rotor sargılarını beslemek.

Bilezikler, makinanın milini (rotoru) tam olarak saran fakat milden izole edilmiş metal halkalardır. Rotor yani kutuplar üzerindeki uyarma sargılarının uçları, senkron makinanın üzerindeki bileziğe bağlanır ve her bir bilezik bir fırça ile irtibatlandırılır. Fırçaların en önemli özelliği çok düşük sürtünme ile elektriği serbestçe ileten grafit benzeyen karbon bileşenli çubuklardır. Bilezik ve fırçalar arasındaki sürtünme düşüktür ve sürtünme bileziği aşındırmaz. DA gerilim kaynağının pozitif ucu bir fırçaya, negatif ucu da diğer fırçaya aynı DA kaynağından bağlanır ve bu gerilim rotor hızı veya açısız pozisyonundan bağımsız olarak tüm anlarda alan sargısına uygulanmış olur. Resim 2.2’de generatör bilezik yapısı gösterilmiştir. Bir senkron makinanın alan sargılarına DA gücünü iletmek için bilezik ve fırçaların kullanılması bazı problemler ortaya çıkarmaktadır. Bilezik ve fırça sisteminin dezavantajlarından birisi, ilgili makinanın bakım gereksinimi arttırmasıdır. Çünkü fırçalar aşınmaya karşı düzenli olarak kontrol edilmelidir. Ayrıca fırçadaki gerilim düşümleri, büyük alan akımlarında makine üzerinde büyük güç kayıplarına sebep olabilirler. Bu problemlere rağmen bilezik ve fırçalar küçük güçlü senkron makinelerin tümünde kullanılırlar. Çünkü DA uyarma akımını sağlayan diğer yöntemler yüksek maliyetlidir (Alstom, 2007). Daha büyük generatör ve motorlarda, makinaya DA uyarma akımını sağlamak için fırçasız uyartıcılar kullanılır. Fırçasız bir uyartıcı, alan sargısı stator üzerine ve endüvi devresi rotor mili üzerine monte edilmiş olan küçük bir AA generatördür. Uyartıcı generatörün üç faz çıkışı generatörün mili üzerine monte edilmiş üç fazlı doğrultucu devre ile doğru akıma

dönüştürülür ve sonra ana DA alan sargısını besler (Chapman, 2005; Orhan, Akın, 2007; Alstom, 2007).



Resim 2.2. Generatör bilezik-fırça yapısı örneği (Orijinal)

2.2.1 Stator ve Stator Sargı Yapısı

Senkron generatörlerin duran kısmına (stator) endüvi denir. Endüvi saçtan yapılmış olup, içinde endüvi sargılarının yerleştirilmesinden oluşur. Senkron generatörün endüvi sargıları, asenkron makinaların stator sargılarına benzer. Yani senkron generatör endüvi sargıları da 3 çeşit sarılabilir. Bunlar kalıp sargıları, el sargısı, seri sargılardır. Endüvi sargıları üçgen ya da yıldız bağlanırlar.

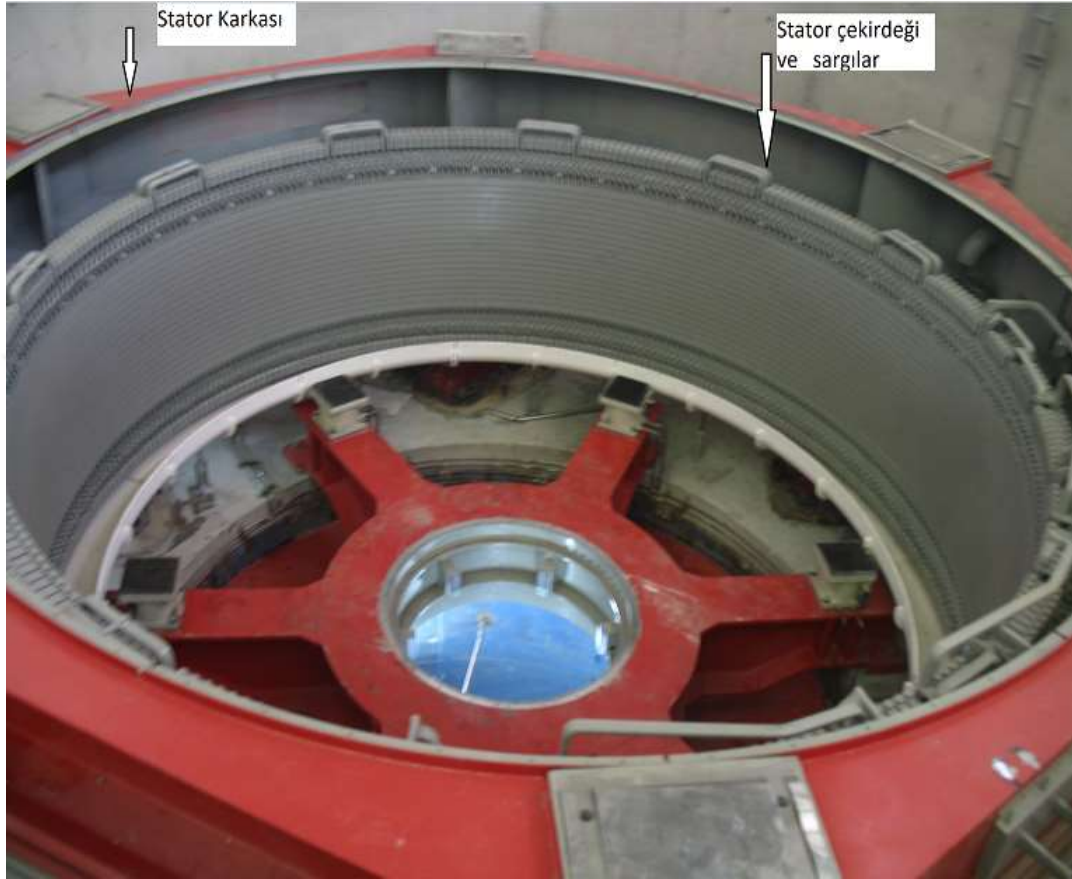
Stator çekirdeği manyetik direncinin küçük olması için ferro-manyetik malzemeden yapılır. Sargılarda akan akımların meydana getirdiği alternatif manyetik alanlardan dolayı, demir malzemede histerizis ve fuko (Foucault) kayıpları meydana gelir. Bunların küçültülmesi için demir gövde saç plakalardan imal edilir. Saçlar silisyum katkılı olduklarından, malzeme manyetik doymaya girmeden, yüksek manyetik alan yoğunluklarının oluşmasına imkân verirler. Genel olarak düşük karbonlu, silikon-alaşımli levhalardan yapılmaktadır. Bunlar 0.5- 2 mm (veya daha kalın) düşük kayıplı yüksek kaliteli saçlardır. Saçların hazırlanma işlemi statorun iç ve dış çapına bağlıdır. Stator, sargıların yerleştirildiği oluklara ev sahipliği

yaptığından, iki ayrı kısımda incelenir. Bunlardan birincisi olukların olmadığı dış çapa yakın olan taraftır. Bu kısma “stator boyunduruğu” adı verilir. Manyetik akının makina çevresinde akması için manyetik direnci küçük olan bir yol sağlar. Bu kısımda rotorda üretilen manyetik akı dişlerin içinden geçer ve stator boyunduruğuna ulaşır. Stator boyunduruğunun manyetik olarak doymasını engellemek için, boyunduruk yüksekliği hesaplanır. Açılan oluk derinlikleri ile boyunduruk yüksekliğinin toplamı statorun kalınlığını verir. Bu kalınlık statorun dış çapı ile iç çapı arasındaki farka eşittir.

İkinci kısım hava aralığına yakın olan, olukları ve dişleri kapsayan kısımdır. Dişler, rotor akısının statora girdiği manyetik direnci küçük olan yerler olmasından dolayı, manyetik dirençleri, oluk içinde kullanılan bakır iletkenlerden ve yalıtım malzemelerinden dolayı çok büyüktür. Bu nedenle dişlerin doymasını engellemek amacıyla dişlerin geniş yapılması gerekir. Bu işlem stator çapının değerine etkiyen diğer bir faktördür. Çünkü yeteri kadar diş ve oluk yapmak için stator çapının büyütülmesi gerekir. Büyük güçteki generatörlerin endüvileri büyük olduğundan, küçük güçlü generatörlerdeki gibi tek parça olarak yapılmayıp, küçük plakaların birleştirilmesi ile yapılır. Statorlar genelde fabrikada iki veya daha çok parça olarak yapılıp daha sonra montaj yapılacak yerde birleştirilir. Stator çekirdeğini saran ve tutan stator karkası bulunur. Karkas sayesinde sac paketleri korunur. Stator karkası aynı zamanda soğutma yüzeyini de genişlettiği için, soğutucu görevini de üstlenir. Fakat karkasa radyatör biçiminde yüzey şekli vermek, çok küçük makinalar dışında uygun olmamaktadır. Sadece maliyet artışına ve ekonomik olmayan yer kaybına neden olur. Özellikle enerji santrallerinde kullanılan çok büyük güçlü makinalarda kesinlikle uygulanmaz. Senkron makinalarda ölçülerin çok büyük olmasından dolayı, kullanılan karkas sade ve düz kalın sacdan imal edilir. Resim 2.3’de bu yapı gösterilmiştir. Çelik evsafı olan bu malzeme, makinanın stator sac paketinin korunmasını, daire yayı biçiminde kesilen sac parçaların bir düzen içinde bulundurulmasını sağlar. Ayrıca herhangi bir hatalı işletme durumunda, oluşabilecek kısa devrede, meydana gelme ihtimali olan çok büyük kuvvetlerin stator sac paketini dağıtmasına engel olmak için kullanılır. Ayrıca karkas üzerine soğutma işlemi için kullanılan radyatör yapılı soğutucular kullanılmaktadır. İçinden su geçirilerek ortam ve makinanın soğutulmasını sağlarlar (Alstom, 2007).

Stator sargılarını bir araya getiren, sargıların içine yerleştirildiği oluklar bölmelerin iç kısımlarına yerleştirilmiştir. Hava akımı ile soğutmanın olduğu statorlarda, soğutmanın etkili olabilmesi için, aktif stator çekirdek bölümünde radyal olarak dışa doğru soğutma kanalları vardır. Stator çekirdeğini ayakta tutan ara elemanların şekilleri ve dağıtımları, hava

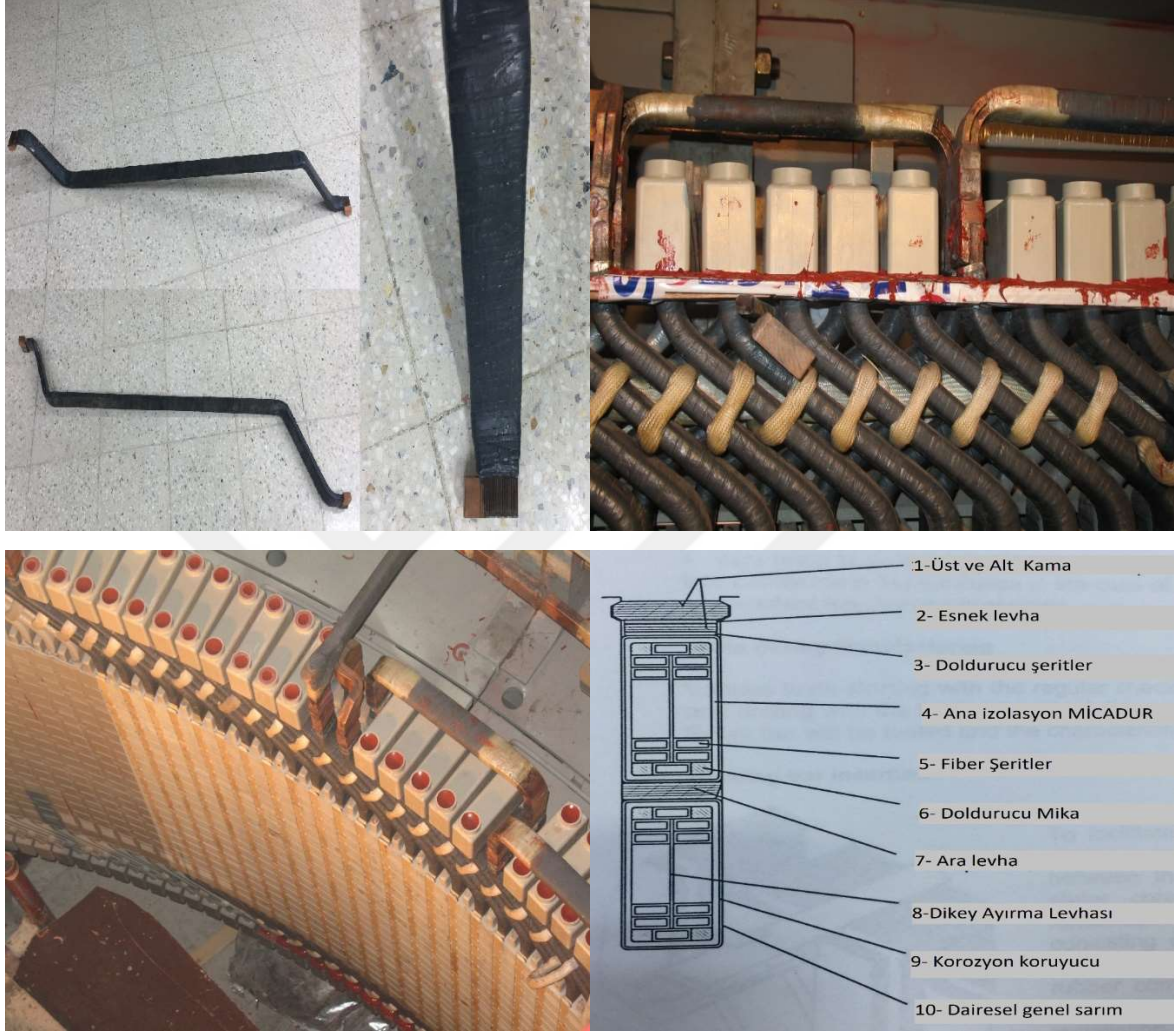
basıncının bir bütün içerisindeki transferini ve havalandırma akışının düzgün bir şekilde akmasını sağlamak için uygun şekilde seçilir. Buda senkron generatörün daha iyi soğutulmasını sağlamaktadır (Andritz hydro, 2010; Boduroğlu,1988; Alstom, 2007).



Resim 2.3. Stator karkası, çekirdeği ve sargıları (Orijinal)

Stator sargısı, stator içindeki oluklara yerleştirilir ve yıldız veya üçgen bağlı olarak spiral, kalıp ve dalga tipli sargı şeklinde olmak üzere resim 2.4'deki gibi tasarlanırlar. Sargı, tasarlanmış sargı diyagramındaki şekliyle birbirine lehim ile tutturulmuş bakır barlardan oluşmuştur. Her bar, boya veya uygun izolasyon malzemesi ile birbirinden izole edilmiş ve yarı çakışık şekilde dışardan birbirlerine bağlanmış olan iplerden oluşmuştur. Bu ipler uygun kalıplarda son şekillerine getirilir ve boydan boya birkaç kat mika kaplı fiberglas bantla izole edilir. Barlar, epoksi reçinenin vakum altında bobinlerin sargı izolasyonuna emdirildiği ve daha sonra reçineli bobinlerin yüksek ısıya verildiği Vakkumlu Vernikleme Sistemi (VPI) işlemine tabi tutulur. Daha sonra ısıtılan barlar levhalı çekirdeğe takılır ve yarıklar sabitleyici kamalar ile kapatılır. Sargı çıkıntıları birbirine geçirilmiş fiberglas

kordonlar ile takviye edilir, bu kordonlar da manyetik güçleri titreşime yol açmadan emilmeyi sağlamak için reçine emmiş ve pişirilmiştir (Alstom, 2007).



Resim 2.4. Stator sargı yapısı, montaj bağlantıları, sargı izolasyon yapısı (Orijinal)

2.2.2 Rotor, Rotor Mili ve Kutuplar

Makinada uyartım sargılarını taşıyan kısma endüktör (rotor) denir. Büyük güce sahip generatörlerde endüktör döner şekilde yapıldığından bu kısma rotor denilmektedir. Rotor kutupları sargılarına uygulanan doğru akım ile manyetik alanı Manyeto Motor Kuvveti (MMK) meydana getirir. Silisli sacların paketlenmesi ve üzerine sargıların sarılması ile meydana gelir. Büyük güçlü generatörlerde kullanılan generatör rotoru genellikle tabaka tip ve çıkık kutupludur. Rotorun ana gövdesi birkaç parça demir aksamın birleştirilmesiyle meydana getirilir. Bu demir parçalar, aksamalar birbirine monte edildiği zaman yıldız

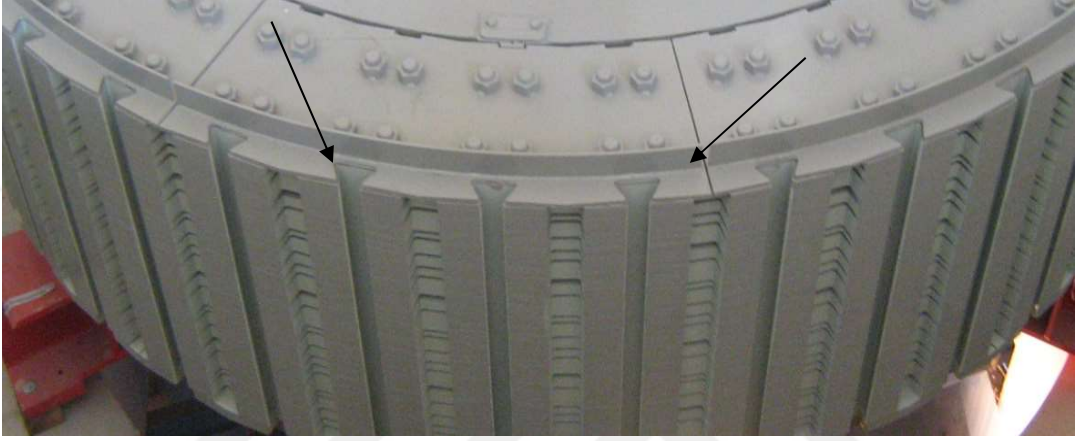
şeklinde ana gövde oluşur. Resim 2.5’de görüldüğü üzere, rotor merkezine yerleştirilen mile sıkı geçen kama ile mile bağlanan rotor göbeği, aynı zamanda kutupların üzerine tespit edilebilmesini sağlayan dairesel bir yapı oluşturur.



Resim 2.5. Çıkık kutuplu senkron generatör rotoru (Orijinal)

Tasarım malzemesi olarak tek parça çelikten veya makinanın gücü ve büyüklüğüne göre dökme demirden yapılır. Çapın büyük olması halinde, ağırlığın azaltılması amacıyla rotor göbeği çok sayıda ayakları olan, birbirlerinden eşit açı ile ayrılan bir yapıya dönüştürülür. Bu kısma rotor göbeği yıldızı denir. Tasarımında kullanılan malzeme dökme çeliktir. Kutup gövdeleri de rotor göbeği gibi tek parça olarak dökme çelik veya dökme demirden imal edilir. Kutupların görevi kutup sargılarını taşımaktır. Rotor, soğutma amacıyla aralarında yeterli sayıda soğutma kanalının olmasına imkân tanıyacak şekilde yerleştirilmiş plakalardan oluşur. Tüm parçalar preslenmiştir ve basınç cıvataları ve somunları ile sabitlenmiş olan baskı plakası tarafından taşınır. Bu istifli rotor kenarı, rotor muylu bloğuna bir set sargı yoluyla konulmuştur. Rotor plakalarının, rotor kenarına kamalı olan rotor kutuplarının kurulmasını sağlamak için dış yüzeyinde işlenmiş resim 2.6’daki gibi

olan “kırlangıç kuyruğu” vardır. Kutuplar rotor kenarına vidalanmış olan durdurma plakaları tarafından bloke edilir ve böylelikle kutuplar kamalandıklarında, kutup ve kamalar hareket edemez. Senkron makinalarda rotor tasarımı, yapısı rotorun hızına bağlıdır. Bunu belirleyen dönme hızı ve rotorun çapıdır. Çünkü bu iki bileşen çevresel hızı verir. Dönen kısımda ilgili malzemeye etkiyen merkezkaç kuvvetlerinin mukavemet hesapları, rotor sargılarının yerleştirilme düzenini belirler.



Resim 2.6. Rotor üzeri kutup bağlantı kısımları, kırlangıç kuyruğu (Orijinal)

Kutup sargılarının merkezkaç kuvvetlerinden etkilenmemesi gerekir. Tersi durumda sargılar yerlerinden oynar dağılır, yalıtımları zedelenir ve olası bir kısa devre olayına sebep olur. Kutup sargılarını sorunsuz olarak yerine muhafaza etmek için, iki değişik rotor tasarımı geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi en yüksek hızda kullanılan “yuvarlak rotor” yapısıdır. Diğeri ise daha küçük hızlarda kullanılan “çıkık kutuplu rotor” yapısıdır. Bu iki yapı arasında hız ve rotor çapı açısından kesin bir sınır yoktur. Burada en belirleyici temel etken, merkezkaç kuvvetlerine karşı koyabilecek malzemelerin, uygun şekillerde, mühendislik biçimlendirmeleri ile kullanılmasıdır. Ancak günümüzde rotor devir sayısının 3000 devir/dakika (d/d) ve rotor çapının küçük olduğu bazı küçük güçlü uygulamalarda “yuvarlak rotor” veya “turbo rotor” kullanılmaktadır. Hızının 1500 (d/d)’ya düşmesine rağmen, rotor çapının büyümesi, merkezkaç kuvveti ve buna karşı direnç gösteren yapısal elemanlarda gerekli direncin sağlanamaması halinde “yuvarlak (turbo) rotor” yapısı kullanımına devam edilir. Bu durum, tasarım ölçütleri olarak mühendislikte mekanik, mukavemet ve malzeme seçimi, tasarımı, çizimi ile ilgili bir konudur. Ayrıca 1500 d/d gibi bir hız, “yuvarlak rotor” yapısından, “çıkık kutuplu rotor” yapısına geçiş olarak kullanılan kesin bir sınır olarak gösterilemez. Burada asıl belirleyici olan, tamamen malzeme ve mukavemet hesaplarının

ilgili tasarıma göre uygun olup olmadığının altında yatmaktadır (Bodunoğlu, 1988; Akın ve Orhan, 2007; Mergen ve Zorlu, 2005; Alstom, 2007).

Yine rotor ana parçalarından olan mil, rotoru tutan, dâhili olarak şekillenmiş iki adet kaplin flanşı olan yüksek kaliteli tek parça çelikten oluşmaktadır. Bu kaplinlerden biri kontak halkası göbeğinin bağlantısı için üst kısımda, diğeri ise türbin şaftına olan bağlantı için alt uçta. Milin boyutları, malzemenin ve malzemenin mekanik karakteristiklerinin kararlılığını onaylamak için yapılan çeşitli testlere tabi tutulan, kritik eğilme ve torsiyon hızı ile belirlenir (Alstom, 2007).

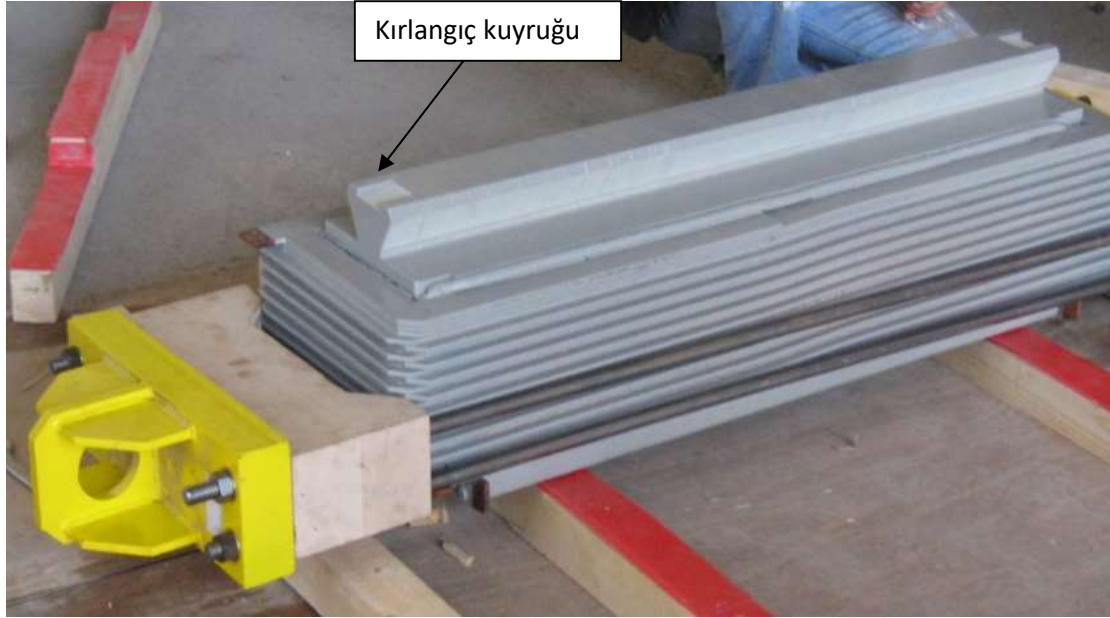
2.2.2.1 Rotor Kutbu

Rotor kenarı üzerine monte edilen her bir kutup, kutup çekirdeği, kutup ayağı, kutup sargıları, kırılma kuyruk bağlantı yapısı (veya çekiç başı) gibi yapıları içeren karmaşık bir yapıdır. Kutup yapısı verilen resim 2.7’ de görülmektedir.

2.2.2.2 Kutup Çekirdeği ve Ayakları

Kutup çekirdeği, çapraz kırımların etrafında istiflenmiş ve kutbun her bir ucundaki sıkıştırma plakaları yoluyla sıkıştırılmış olan çelik levhalardan oluşur. Bu çelik levha ile kutup ayakları yüzey kayıpları minimuma indirecek şekilde tasarlanır ve aynı zamanda kutup ayakları biçimi, sinüzoidal gerilim dalga şeklini tam olarak elde etmek için ana kıstaslar arasında yer alır. Kutup ayakları, senkron generatörlerde istenilen çıkış gerilimi şeklinin elde edilmesinde çok önemlidir. Kutup ayakları statora en yakın, rotor parçası olan demir malzeme olduğundan makina belli bir yük altında çalışırken, stator sargısında oluşan büyük manyetik alanlardan kuvvetli bir şekilde etkilenir. Bu durum sonucunda kutup ayaklarının yüzeylerinde fuko ve histerizis kayıpları meydana gelir. Bu kayıpların azaltılması için yapısında silisyumlu sac malzeme kullanılır. Sacların uygun ölçülerde kesilip, ardışık olarak rotor boyu ölçüsünde dizilmesinden sonra kutup ayakları kutup gövdesine monte edilecek duruma gelir. Kutup sargıları kutup gövdesine yerleştirildikten sonra kutup ayağı montajı yapılır. Kutup ayağı genişliğinin hava aralığına yakın olan yay uzunluğu, yaklaşık bir kutup adımı kadar olmak durumundadır ve bu nedenle geniş bir yer işgal eder. Kutup ayağının yüksekliği ise kullanılan malzemenin B-H eğrisinden yararlanılarak hesaplanır. Kutup yüksekliğinin büyük seçilmesi kutup gövdesinin üzerine

büyük bir kütlenin monte edilmesi anlamına geleceğinden makinanın dönme hareketi sırasında merkezkaç kuvvetinden yüksek derecede etkilenmesine neden olur. Maruz kalınan bu kuvvetler kutup ayağını gövdeden koparmaya, kesmeye çalışır.



(a)

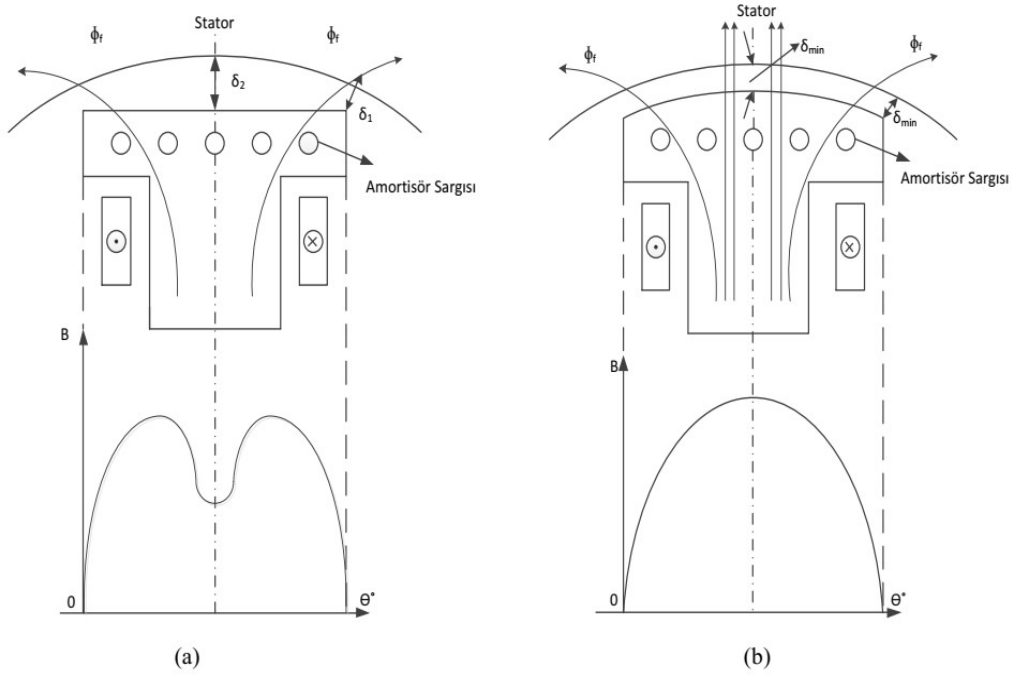


(b)

Resim 2.7. Rotor kenarına montaja hazır kutuplar (a), (b) (Orijinal)

Bu durum bir mekaniksel problemdir ve çıkık kutuplu rotorlarda karşılaşılan sorunların en önemlilerinden biridir. Burada kullanılan sabitleme yöntemleri kırlangıç

kuyruğu tasarımı, saplama veya tarak yapı formudur. Kutup ayakları görevlerinden biri de kutup gövdesinde oluşan, akan manyetik akının statorun manyetik alan devresine ulaştırılmasını ve dağılmasını sağlamaktadır. Manyetik akı, kutup ayağını terk ettiği anda, rotor ve stator arasındaki hava aralığına girer ve manyetik direnci büyük olan ortamı geçerek statora ulaşır. Manyetik akı grafiğinin istenilen şekilde olmasındaki önemli etkilere biri, kutup ayağı yayına ait yarıçap uzunluğunun, stator iç çapı ile eşit olması durumunda, arada kalan hava aralığının genişliği, ayak yayının uzunluğu boyunca sabit kalmasına neden olur. Böyle bir tasarım şeklinde akı çizgilerinin gerek kutup ayağı demirlerinde gerekse hava aralığında gittikleri yolların uzunlukları ve bunların manyetik direnç değerleri dikkate alınacak olursa, manyetik direncin yaklaşık olarak değişmediği gözlemlenecektir. Çünkü birim uzunluk için demirin manyetik direnci havanınkinden çok daha küçüktür.



Şekil 2.5. (a)- Rotor kutbu düz (b)-Rotor kutbu dairesel yapısı (Zorlu ve Mengen, 2005)

Böylece kutup ayağından, hava aralığına geçen manyetik akı, ayağın genişliği boyunca, homojen olarak yayılır ve burada homojen bir manyetik alan yoğunluğu meydana getirir. Bu alan yoğunluğunun dağılımı stator sargısında, Faraday yasasına göre indüklenen gerilimin dalga şeklini belirler.

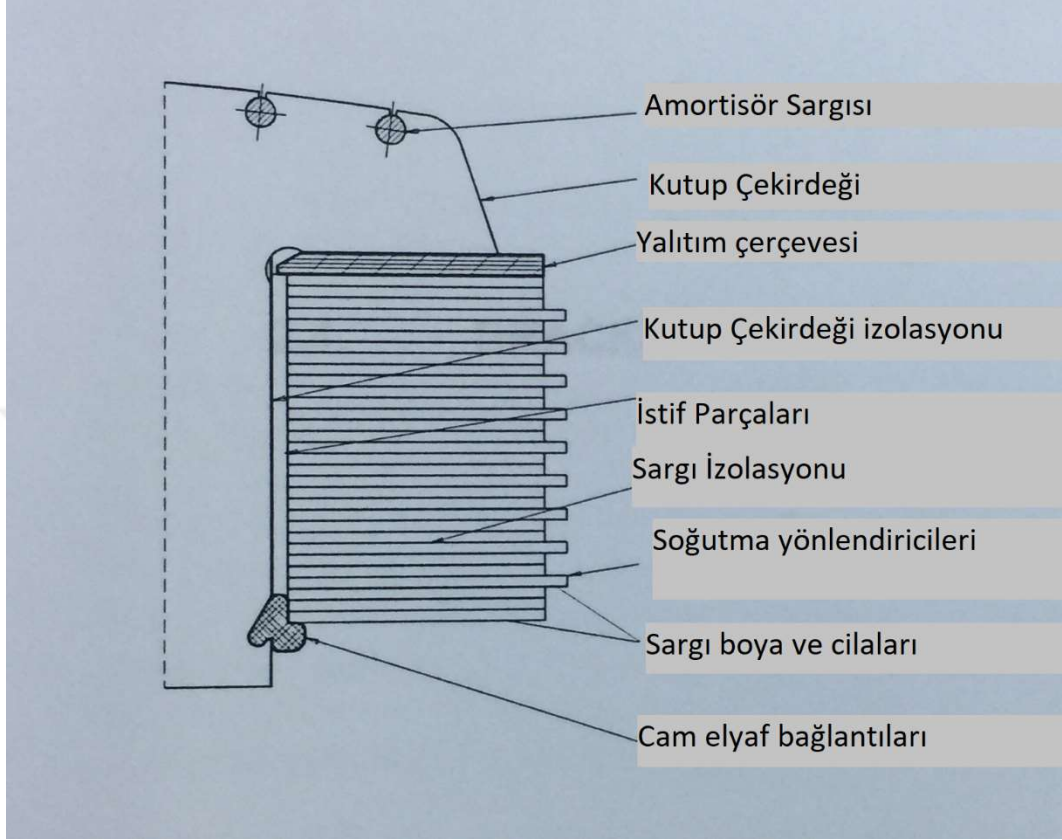
Şekil 2.5(a)'da kutup ayağının dikdörtgen olması ile elde edilen manyetik alan yoğunluğunun hava aralığında dağılımı görülmektedir. Burada kutup eksenindeki hava

aralığının köşelere göre büyük olmasından dolayı, manyetik dirençteki artışın, alan yoğunluğunda meydana getirdiği çökme görülmektedir. Gerilim dalgasında harmoniklerin varlığını tamamen yok etmek gerekirse kutup ayağının yayına şekil 2.5(b)'de görüldüğü gibi sinüzoidal şekil verilmelidir. Günümüz teknolojisi ile bunu başarmak mümkün olsa bile, bu işlem maliyeti arttıran bir işlemdir (Boldea, 2006; Chapman, 2005; Alstom, 2007; Zorlu ve Mergen, 2005).

2.2.2.3 Kutup Sargıları

Rotor üzerinde bulunan kutuplar üzerindeki alan sargısı, mika camla izole edilmiş bakır halattan, barlardan yapılmaktadır. Bunu bir bütün haline getirmek için ve halatlar, barlar arasındaki boşluğu yok etmek için, tüm kutup vakumlu basınçlı tanklara koyulduktan sonra, fırın içerisinde kurutulmaya tabi tutulur. Sargılar, cam elyaf halkaları ve reçine emdirilmiş cam elyaf kordonları konulmak yoluyla demirden izole edilir. Sargıların üst kısmında ve sargının çekirdeğe doğru olan kenarlarında, fiberglas malzemesinden yapılmış olan yalıtkan çerçeveler yine yalıtım amaçlı olarak son montaj aşamasında monte edilerek yerine yerleştirilir. Yüksek mekanik güce ek olarak, üst çerçevenin uygun kayma sağlayacak özellikleri veya alan sargılarının kutup çekirdeğine yayılmalarını sağlayacak ayarları olması gerekir. Kutup üzerindeki alan sargıları, uçları dışa çıkarılmış olan ve ikaz sistemine doğru uzanan bir sargı oluşturmak için bakır plaklar yoluyla ilgili ikazlama yoluna bağlanır. Kutup sargılarının düzlemleri kutup eksenine dik olacak şekilde kutup gövdesine yerleştirilirler. Uyarma sargısında kullanılan gerilim alçak gerilimdir (0-1200 V). Bu nedenle, ikazlamada kullanılan güç dikkate alındığında, uyarma sargılarından akacak akımın da büyük olduğu anlaşılar. Fakat bu akım statorda oluşan akım yanında daha küçüktür. Stator sargı gerilimi 10kV'ye kadar olan makinalarda uyarma amper-sarımını sağlamak amacıyla, endüvi sargısında kullanılan iletkenler yuvarlak, küçük kesitli ve çok sayıda iletkenle oluşturulur. Çıkık kutuplu rotor yapısında, yüksek çevresel hızlarda bu tür sargının merkezkaç kuvvetlerine direnç göstermesi zordur, dağılma, zorlanma eğilimi gösterirler. Bu tür bir mekaniksel sorunun önüne geçmek amacıyla düşey eksen boyunca belirli aralıklarla kelepçeler ile destekleme yapısı oluşturulur. Kutup sargısının, kutup üzerindeki montajı ve yapısı resim 2.8' de verilmiştir. Endüvi akımı belirlenen sınırları aşması halinde, uyarma sargısının iletkenleri dikdörtgen kesitten yapılır. Sargı kesitinin kalınlığı küçük, genişliği ise

büyüktür. Sargı iletkenleri kendi aralarında ve demir gövdeye karşı, aralarına değişik malzemeler konularak izole edilir.



Resim 2.8. Çıkık kutuplu senkron generatör kutup ve kutup sargısı yapısı örneği (Alstom, 2007)

Sarım sayısının büyük olması durumunda, kutup ekseninde yerleştirilen birinci iletken grubuna ek olarak ikinci veya üçüncü gruplar ilave edilebilir. Bunlara “tabaka” denir. Bu tür sargı kullanılması durumunda tabakalar arasında yalıtkan malzeme kullanılır. Tabakayı oluşturan ve kutup eksenini boyunca yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilen iletkenlerin arasına ise mika veya eşdeğer bir yalıtkan koyulur. Bu tür sargılarda iletken grubunun soğumasını kolaylaştırmak amacıyla bazı sarımlara, sargının bittiği eksenini taşıyarak çıkıntı yaptırılır ve böylece soğumaya daha fazla katkı yapması sağlanır. Sarımı atölyede tamamlanan bobin, tasarımda belirlenen merkezkaç kuvvetine eşit olan basınçta preslenir ve yalıtkan banyosundan sonra kurutulur. Hazırlanan silindirik uyarma bobini kutup gövdesine kutup ayağı yerleştirilmeden önce monte edilir. Kutup sargısını meydana getiren büyük bakır kütle, rotorun dönme hareketi esnasında, büyük merkezkaç kuvvetleri tarafından zorlanır. Bu baskı sonucunda sargıda bulunan iletkenlerin hareket etmemelerinin sağlanması gerekir. Yuvarlak rotor yapısında iletkenler, sargı oluklarına yerleştirilir ve dönme hareketi sırasında

oluşan merkezkaç kuvvetinin etkisinden, hava aralığına kaymalarını engellemek amacıyla, oluk ağızlarına aksiyal eksen boyunca çelik veya sarı yumuşak (pirinç alaşım) malzemeden yapılmış takozlar yerleştirilir. İletkenler birbirleriyle seri bağlı oldukları için, oluklara yerleştirme işlemi, bobin yanlarının tek tek oluklara yerleştirilmesi ile yorucu ve zaman alıcı bir işçilik oluşturmaktadır. Bütün sargılara oluklara yerleştirildikten sonra açıkta kalan iki adet uç, uyarma sargısını besleyen ikaz sisteminin doğru akım kaynağına, pozitif ve negatif uçlarına bağlanır (Alstom, 2007).

2.2.2.4 Amortisör Sargısı

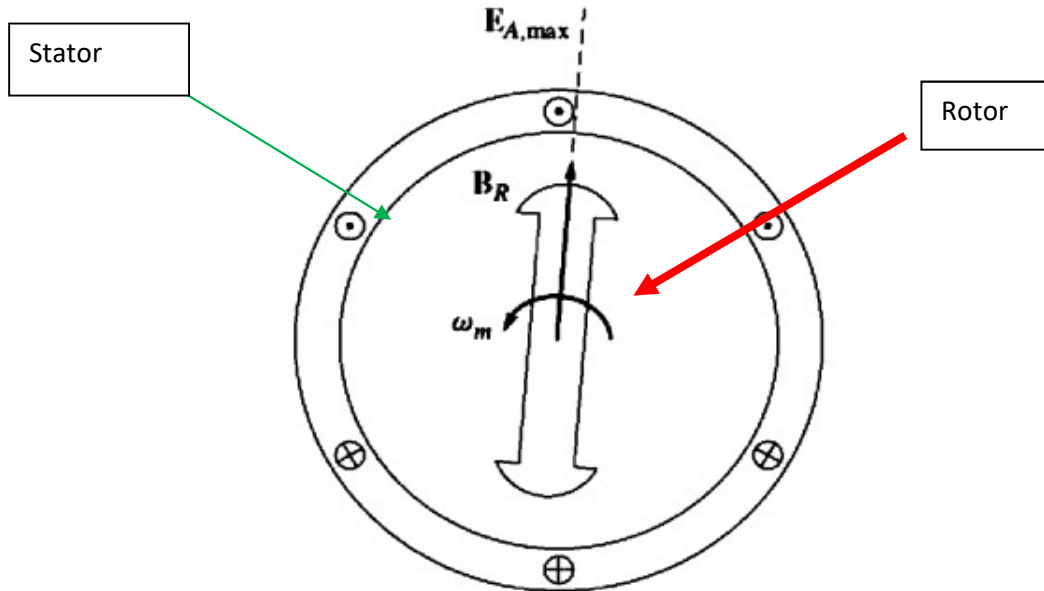
Hidroelektrik santrallerinde SG'ler de Amortisör sargısı kararlılığı yükseltir. Amortisör sargısı, uygun sayı, uygun boyutta ve rotor üzerindeki kutup pabuçlarına yerleştirilmiş olan bakır çubuklardan oluşur. Her bir kutupta bulunan bu bakır çubukların uçları bakır parçalar ile bağlanır ve bunlar kapalı bir amortisör sargı halkası oluşturmak için yine bakır iletkenler ile birbirlerine bağlanırlar ve bir kısa devre ağ kafesi meydana getiriler. Ayrıca bu sargılar, senkron makinanın motor olarak işletilmesi durumunda asenkron olarak yol almasını imkân tanımaktadır. Bu sargıların boyutlandırılması için yol alma şartlarının ve yol alma momentinin bilinmesi gereklidir (Alstom, 2007; Andritz Hydro, 2010; Mergen ve Zorlu, 2005).

Amortisör sargısı, generatörün çalışmasında oluşan moment salınımlarının ve dengesiz yüklenme sırasında negatif bileşenin azaltılması için kullanılır. Generatör çalışmasında oluşan, periyodik olarak değişen küçük genlikli bir moment, makinanın sürekli rejimde dönmekte olduğu hıza katkıda bulunarak, makinanın yine periyodik bir şekilde hızlanmasına ve yavaşlamasına neden olur. Bu durum, kutup ekseni ile rotor ekseni arasında var olan ve yük açısı (δ) olarak bilinen açının toplamı, teorik olarak, 90° 'yi aşarsa, generatör senkron olarak çalışma şartının sürdüremez. Çalışma kararlılığını, yani dengeli çalışmasını kaybeder. Sistem ile paralel çalışma esnasında, paralel çalışma şartını yitirir ve senkron çalışmadan kopar. Bu tip oluşan salınımlar makinanın içinde f_s , salınım frekansının oluşmasına sebep olur ve amortisör sargı iletkenlerinde bir EMK ve akım oluşumuna sebep olarak, joule kayıplarına sebep olurlar. Bu salınımlardan dolayı ortaya çıkan gereksiz fazla kinetik enerji, ısı enerjisi olarak bu amortisör sargısında tüketilir ve bu nedenle bu sargılara söndürüm sargısı da denir. Bu duruma bağlı olarak amortisör sargısı gerek yol verme ve gerekse salınımlardan kaynaklanan büyük akımların üretebileceği yüksek sıcaklıklara

dayanıklı olacak şekilde tasarımı yapılmalıdır. Bu sargıdaki çubuk iletkenlerin kısa devre iletkenleri ile bağlantısında kaynak kullanılır. Kutupların önünde ve arkasında bulunan kısa devre iletkenleri yine maruz kalacakları merkezkaç kuvvetine ve yüksek sıcaklık derecelerinden dolayı perçin veya cıvata yapı formatı ile emniyetli şekilde bağlanırlar. Amortisör sargısı montajı kutup ayaklarında açılan oluklara yerleştirme şeklinde olacaksa, iki oluk arasındaki oluk adımı, endüvi oluk adımına eşit yapılır. Böylece manyetik alan harmoniklerinin, kalın bakırdan imal edilmiş, amortisör sargısı iletkenlerinde büyük değerlerde fuko kaybı meydana getirmesi engellenmiş olur. Ayrıca sargı iletkenlerinin yerleştirildiği olukların ağzı yarı-açık imal edilerek, iletkenlerden akabilecek büyük akımlarda, oluk çevresinde meydana gelebilecek büyük kaçak akıların oluşması engellenir (Mergen ve Zorlu, 2005).

2.2.3 Bir Senkron Generatörün Çalışma İlkesi ve İndüklenen Gerilim

Bir SG’de, önceden de belirtildiği üzere rotor alan sargılarına ikaz sistemi üzerinden bir ikaz doğru akımı (I_f) uygulanır. Bu uygulanan akım doğru akım olduğu için onun oluşturduğu Φ_f manyetik akısı da doğru akıdır ve sabit değerlidir.



Şekil 2.6. Senkron generatör çalışma prensibi modeli (Chapman, 2005)

Şekil 2.6’da senkron generatörün çalışma prensibi modeli basitçe verilmiştir. Bu akının esas büyük bölümü statorun çelik çekirdeğinden geçerek kapanır (Φ_d), küçük bir kısmı ise ikaz sargısı etrafında kaybolur (Φ_{sf}). Bu durumda çekirdeği geçerek kapanan Φ_d akısı statorda bulunan üç faz sargıları keser. Rotor, tahrik makinası (türbin) yardımıyla döndürüldüğünde stator sargılarında periyodik olarak değişen (E_{A1} , E_{A2} , E_{A3}) EMK’ları oluşur. Eğer stator sargılarının uçlarına yük bağlanır ise bu durumda, bu sargılardan I_{A1} , I_{A2} , I_{A3} alternatif akımları geçer. Bu akımlar faz sargılarında alternatif Φ_{A1} , Φ_{A2} , Φ_{A3} manyetik akılarının oluşmasına sebep olurlar.

Bu akıların küçük bir kısmı sargılar etrafında kaçak olarak kaybolurlar (Φ_σ), esas büyük kısmı ise rotorun çelik çekirdeğinden kapanır (Φ_a). Stator oluklarına yerleştirilmiş A, B, C faz sargıları birbirinden $2\pi/3$ radyan açısı kadar kaydırılmış oldukları için sargıların EMK’ları, akımları ve akıları da birbirinden $2\pi/3$ saniye kadar farklı açılarda olacaktır. Oluşan bu durum sonucunda rotorda kapanan Φ_{A1} , Φ_{A2} , Φ_{A3} akılarının, toplam değeri sabit olan, “ $\Phi_a = 1,5 \cdot \Phi_m \sin\omega t$ ” sabit akısını oluştururlar. Burada Φ_m sinüzoidal olarak değişen akının en büyük tepe değeridir. Burada belirtilen toplam akı Φ_a rotorla aynı yönde ve aynı senkron hızla döner. Böylece görüldüğü üzere, makinanın kararlı çalışma durumunda SG de sabit değeri olan ve senkron hızla dönen iki temel manyetik akı oluştuğu görülür.

Generatörlerin çalışma prensibi açıklama amaçlı, şekil 2.3 ve 2.4’te alan içinde dönen bir iletkenin uçlarında indüklenen gerilim belirtilmiş ve grafiksel olarak gerilimin maksimum ve minimum değerleri gösterilmişti. Buradan her bir dönüş parçası için ayrı ayrı gerilimler gösterilerek iletken üzerindeki toplam indüklenen gerilimleri hesaplayabiliriz. Generatörün fazında indüklenen gerilim; kutup çifti sayısı $2P$ olmak üzere, bir kutbun meydana getirdiği sinüzoidal akı Φ (wb) olarak belirtilirse ve dakikadaki devir sayısı n (d/d) olmak üzere, herhangi bir iletken saniyede 108×10^6 makswellik (bir weberlik) akıyı keserse, bu iletkende indüklenen EMK’nın ortalama değeri 1 volttur. Stator oluklarındaki bir iletkende indüklenen EMK için öncelikle generatör kutuplarının bir devrinde iletkenin kestiği akı;

$$\text{Kesilen akı} = \Phi \cdot 2P \text{ dir.} \quad (2.2)$$

$$\text{Bu iletkenin bir saniyede kestiği akı} = (\Phi \cdot 2P \cdot n)/60 \text{ maksweldir.} \quad (2.3)$$

Kutuplar doğru gerilimle uyarıldığında, rotor dönüyorsa, kutupların oluşturduğu bir döner alan sabit olan statordaki sargıları keser. Veya rotor sabit ve doğru gerilimle uyarıldıysa, dönen stator sargıları kutup sargılarının oluşturduğu manyetik alan tarafından kesilir. Belirtilen bu hareket sistemi üzerinden, döner alan içerisinde kalan bir bobinde veya sabit alan içerisinde dönen bir bobinde Faraday kanununa göre gerilim indüklenmesi de verilen denklemde olduğu gibi hesaplanır. Bölüm 2’de (2.1) denklemi ile verilmiştir.

$$V_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} = N_f \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \quad (2.4)$$

V_{ind} , iletken uçlarında indüklenen gerilim (Volt), $d\Phi$, endüvi sargısını kesen akı yoğunluğu değeri (Wb), dt , zaman değişimi, N_f endüvi sarım sayısı olarak belirtilir. Gerilimin sinüs dalga formu; $V_{max} \cdot \sin(\omega t)$ şeklinde alınır ise, çekirdek nüvede oluşan manyetik akı sinüs dalgası olarak düşünüldüğü takdirde;

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.6)$$

f , endüvide oluşan gerilim frekansı (Hz), Φ_{max} nüvedeki akının maksimum değeri (Wb), ω ise açısal hız (rad/sn) dir. Burada N_f sarımlı bir endüvide indüklenen gerilimin denklemi;

$$V(t) = \omega N_f \Phi_{max} \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

$$V_{max} = \omega N_f \Phi_{max} \quad (2.8)$$

olarak alındığı 2.7 deki denklem;

$$V(t) = V_{max} \cos(\omega t) \quad (2.9)$$

olur. Endüvide oluşan gerilimin kararlı olması durumunda, gerilimin ani veya maksimum değeri yerine etkin değeri (RMS) kullanılır. Sinüzoidal bir dalganın RMS’i, maksimum değerin 2’ye bölümüdür. Endüklenen gerilimin maksimum değeri;

$$V_{rms} = N_f \Phi_{max} \quad (2.10)$$

olarak ifade edilir. Generatörlerin sargılarında indüklenen gerilimin sinüzoidal bir dalga şekline daha yakın olmasını sağlamak için kutup adımı ve sarım şeklinde yapılan değişiklikler indüklenen gerilim denkleminde sabit çarpan olarak eklenirse eşitlik;

$$V_{rms} = 4.44 N_f k_p k_d f \Phi_{max} \quad (2.11)$$

formülü elde edilir ve burada k_p , adım katsayısı, k_d , dağıtım katsayısıdır. Üstteki verilen hesaplamalara bağlı olarak üç fazlı bir senkron generatörde fazlarda oluşan gerilimler şekil 2.4 dikkate alınarak tekrar değerlendirilecek olunursa, N_f sarımlı üç sargının her birinden elde edilen gerilimler,

$$E_{A1} = N_f \Phi_{A1} \omega \sin \omega t \quad (2.12)$$

$$E_{A2} = N_f \Phi_{A2} \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.13)$$

$$E_{A3} = N_f \Phi_{A3} \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (2.14)$$

şeklinde olur. Rotor üzerindeki uyarma sargılarına uygulanan DA ile makinanın statorunda düzgün dönen bir manyetik alan ve düzgün dönen bir manyetik alanda da bir statorda üç fazlı gerilimler üretilebilir (Akın ve Orhan, 2007; Chapman, 2005; Şerifoğlu, 2007).

2.2.4 Senkron Generatörün Hızı

SG'ler tabirinde kullanılan senkron kelimesinin bir generatörde kullanılma nedeni, elektriksel frekansın mekanik dönme hızı ile eşzamanlı, birbirine bağlı veya kilitli olması nedeniyledir.

Bir SG'nin rotoru DA ile beslenen bir elektro mıknatıstan ibarettir. Bir rotorda oluşan manyetik alan, o rotorun hangi yönde döneceğini de gösterir. Bir senkron makinadaki manyetik alanın dönüş hızı ile statordaki elektriksel frekans arasındaki bağıntı denklem 2.15 ile verilir.

$$f_e = \frac{n_{mp}}{120} \quad (2.15)$$

Burada; f_e , elektriksel frekans (Hz), n_m (d/d), manyetik alanın mekanik hızıdır. Manyetik alan hızı bir senkron makine için rotor dönme hızına eşittir. P , ise kutup sayısını göstermektedir.

Rotor hızı ile manyetik alan hızı aynı olduğundan, yukarıda belirtilen bu denklem rotor hızı ve elektriksel frekans arasındaki ilişkiyi de verir. Ülkeler arasında farklılıklar olmakla beraber genel olarak elektrik gücü 50 Hz veya 60 Hz’de üretilir. Yukarıda belirtilen denklemden de görüleceği üzere generatör, üzerindeki kutup sayısına göre sabit hızda döndürülmelidir. Örneğin kırk kutuplu bir senkron makinada 50 Hz üretmek için bu senkron makine 150 d/d ile döndürülmelidir. Dört kutuplu bir senkron makinada ise 50 Hz’lik bir güç üretmek için rotor 1500 d/d ile döndürülmelidir. Belirli bir frekansta elektrik üretmek için gereken dönme hızı denklem (2.15) kullanılarak hesaplanabilir.

2.2.5 Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim

Generatör statorunun bir fazında indüklenen gerilim genliği;

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \Phi f \quad (2.16)$$

şeklindedir. Bu gerilim, formülden de görüleceği üzere, senkron makinadaki akıya, frekansa veya dönme hızına ve makinenin yapısına bağlıdır. Senkron makinalar ile ilgili problemlerin çözümünde, bu denklem makinenin yapısına bağlı olarak, bazen makinenin çalışma esnasında değişebilen nicelikleri vurgulayacak şekilde basitçe tekrar yazılır. Bu basitleştirilmiş yazım,

$$E_A = K \Phi \omega \quad (2.17)$$

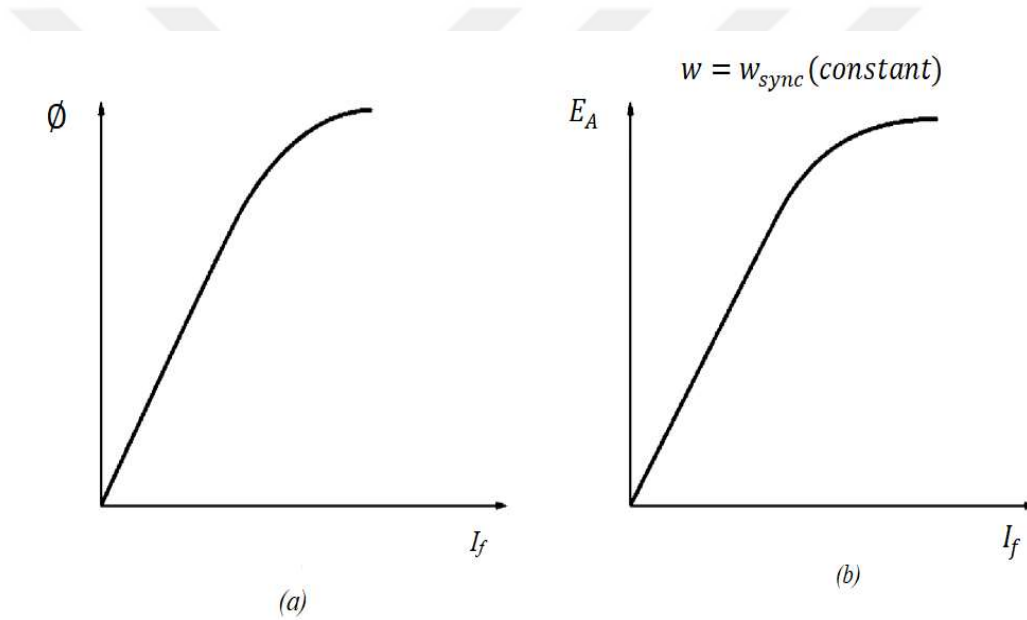
şeklindedir. Burada K makinenin yapısını gösteren bir sabittir. Burada ω , elektriksel radyan/saniye olarak verilirse,

$$K = \frac{N_C}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

şeklinde yada ω mekanik radyan / saniye olarak verilirse,

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

şeklinde elde edilir. Stator fazında indüklenen gerilim E_A doğrudan manyetik akı ve hızla orantılıdır. Fakat manyetik akı rotor alan devresinden akan DA bağlıdır. Yani uyarma akımı I_F , Φ akısıyla doğru orantılıdır. E_A , doğrudan akıyla orantılı olduğundan ve oluşan manyetik akıda uyarma akımına bağlı olduğundan indüklenen gerilim E_A uyarma akımına bağlıdır denir. Şekil 2.7’de akının ve indüklenen gerilimin uyarma akımına bağlı değişimi verilmiştir. Buradan elde edilen değişime, makinanın açık devre (boşta çalışma) karakteristiği veya mıknatıslanma eğrisi denir (Akın ve Orhan, 2007).



Şekil 2.7. (a)- Bir senkron generatör için akının uyarma akımına göre değişimi (b)- Senkron generatör için mıknatıslanma eğrisi (Chapman, 2005)

2.2.6 Bir Generatörün Endüvi Reaksiyonu ve Eşdeğer Devresi

E_A gerilim, SG’nin bir fazında indüklenen gerilimdir. Bununla birlikte SG’nin çıkış uçlarında elde edilen gerilim, E_A gerilimi ile aynı değerde değildir. E_A gerilimi, sadece bir fazdan endüvi faz akımı akmadığında, çıkış gerilimi V_ϕ ile aynı olur. Faz çıkış gerilimi V_ϕ , neden E_A ’ya eşit değildir, farklı olmasının temel sebebi nedir ve iki gerilim arasındaki ilişki nedir? Bu sorunun cevabını aslında bir senkron generatörün modelinde yatmaktadır. Yine de E_A ile V_ϕ , arasındaki farka neden olan birkaç faktör vardır. Bunlar,

1. Statordan akım akmasıyla hava aralığı manyetik alanın bozulma (buna endüvi reaksiyonu denir),
2. Endüvi sargılarının öz direnci,
3. Endüvi sargılarının direnci,
4. Rotorun çıkık kutuplu olmasının etkisi,

şeklinde ifade edilir. Burada öncelikle önemli olan ilk üç faktörün senkron makinadaki etkilerini inceleyerek bir makine modeli elde edeceğiz. Bir senkron makinanın analizinde çıkık kutup etkilerini ihmal edeceğiz, makinayı yuvarlak kutuplu olarak değerlendireceğiz ve eğer makine çıkık kutuplu ise bu kabulün yapılması hesaplamalarda hatalara neden olacaktır, fakat hatalar, göreceli olarak düşüktür.

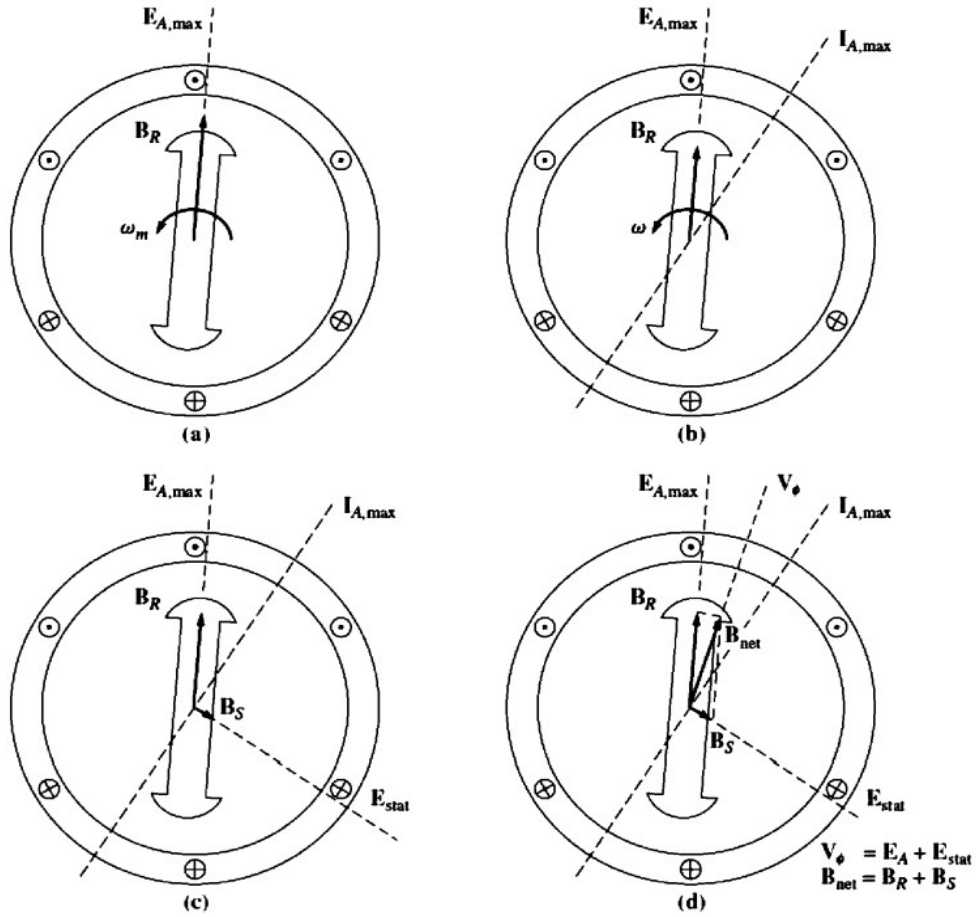
Üstte belirtilen maddelerden ilki ve normalde en büyük etkisi olan, endüvi reaksiyonudur. Bahsedildiği üzere SG'nin mili bir hareket sağlayıcı ile döndürüldüğünde ve uyarım sargılarına bir DA uygulandığında, rotor tarafından bir dönen manyetik alan oluşacak ve generatörün stator sargılarında bu manyetik alanın etkisi ile E_A indüklenenecektir. Generatörün uçlarına bir yük bağlanırsa, stator fazlarından yüke doğru bir akım akar. Üç fazlı stator sargılarından akan bu akımlar senkron makina içinde ikinci bir manyetik alan üretir. Bu oluşan stator manyetik alanı, ilk aşamada oluşan faz gerilimini değiştirecek, orijinal rotor manyetik alanını bozacaktır. Bu etki, endüvi (stator) akımının manyetik alanı etkilemesi sonucunda ortaya çıktığından endüvi reaksiyonu olarak isimlendirilir.

Aşağıda verilen şekil 2.8'e bağlı olarak endüvi reaksiyonunu açıklar isek;

- (a) Dönen bir manyetik alan stator fazlarında indüklenen gerilim E_A 'yı üretir.
- (b) Oluşan bu E_A gerilim, geride güç faktörlü bir yük bağlandığında geride bir akım üretir.
- (c) Geri stator akımı, B_S manyetik alanını ve o da stator sargılarında E_{stat} gerilimini üretir.
- (d) B_S Alanı B_R 'ye eklenir ve onu etkileyerek eklenir ve onu etkileyerek B_{net} 'i oluşturur. E_{stat} gerilimi E_A 'ya eklenir böylece faz çıkışında V_ϕ elde edilir (Chapman, 2005).

Döner rotor manyetik alanı B_R tepe değeri B_R 'nin yönünde olan iç gerilim E_A 'yı üretir. Son bölümde gösterildiği gibi gerilim üstteki iletkenlerin çıkışında pozitif ve şeklin en altındaki iletkenlerin girişinde negatif olacaktır. Generatör yüksüz iken endüvi fazlarında bir akım akmayacak ve E_A , faz gerilimi ve çıkış gerilimi olan V_ϕ 'ye eşit olacaktır. Generatörün geri güç faktörüne sahip bir yüke bağlandığını kabul ederek, yük geride

olduğundan akımın tepe değeri gerilimin tepe değerinin gerisinde olacaktır. Bu şekil 2.8b’de gösterilmiştir. Stator sargılarından akan faz akımları bir manyetik alan üretir ve bu stator manyetik alanı B_S olarak isimlendirilir ve yönü şekil 2.8c’de gösterildiği gibi sağ el kuralıyla belirlenir.



Şekil 2.8. (a), (b), (c), (d) Endüvi reaksiyonunun oluşumu (Chapman, 2005)

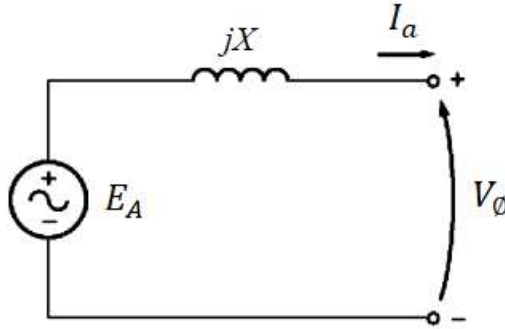
Oluşan bu stator manyetik alanı B_S stator sargısında bir gerilim indüklenmesine neden olur ve bu gerilimin şekilde görüldüğü gibi E_{stat} olarak isimlendirilir. Stator bir fazdaki toplam gerilim, stator sargılarındaki mevcut iki gerilimden oluşur ve indüklenen gerilim E_A ile endüvi reaksiyon gerilimi E_{stat} ’ın toplamıdır.

$$V_\phi = E_A + E_{stat} \quad (2.20)$$

Net manyetik alan B_{net} rotor ve stator manyetik alanların toplamı olur.

$$B_{net} = B_R + B_S \quad (2.21)$$

E_A ile B_R 'nin ve E_{stat} ile B_S 'nin açıları aynı olduğundan oluşan manyetik alan B_{net} , gerilim V_ϕ ile aynı fazdadır. Oluşan bu gerilim ve akımlar şekil 2.8(d)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi (Chapman, 2005)

Endüvi reaksiyonunu bir devre şekli ile modellemek istersek; ilk olarak E_{stat} gerilimini, maksimum akım I_a 'nın 90° gerisinde olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca E_{stat} gerilimi I_a akımıyla doğru orantılıdır. Şekil 2.9'da SG'nin basit eşdeğer devresi verilmiştir. Eğer X bir orantı sabiti olursa o zaman endüvi gerilim reaksiyonu;

$$E_{stat} = -jXI_a \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Böylece bir fazdaki gerilim

$$V_\phi = E_A - jXI_a \quad (2.23)$$

olur. Şekil 2.9'daki devre için Kirchoff'un gerilim kanunun uygulanmasıyla;

$$V_\phi = E_A - jXI_a \quad (2.24)$$

elde edilir. Bu elde edilen denklem, endüvi reaksiyon gerilimini tanımlayan denklemle tam olarak aynıdır. Dolayısıyla endüvi reaksiyon gerilimi indüklenen gerilimle seri bağlı bir indüktans ile ifade edilebilir. Endüvi reaksiyon etkilerine ek olarak, bilindiği üzere stator sargıları bir öz indüktans ve bir dirence sahiptirler. Stator direnci R_A ve stator öz indüktansı

da L_A olarak ve karşılık gelen reaktans da X_A olarak isimlendirilirse E_A ve V_ϕ arasındaki toplam fark,

$$V_\phi = E_A - jXI_a - jX_A I_a - R_A I_a \quad (2.25)$$

denklem 2.25 ile verilir. Hem makinadaki öz indüktans ve hem de endüvi reaksiyonu etkileri reaktanslar ile gösterilmiştir ve ayrıca bu iki etki tek bir reaktans ile modellenir ve makinanın senkron reaktansı olarak isimlendirilir;

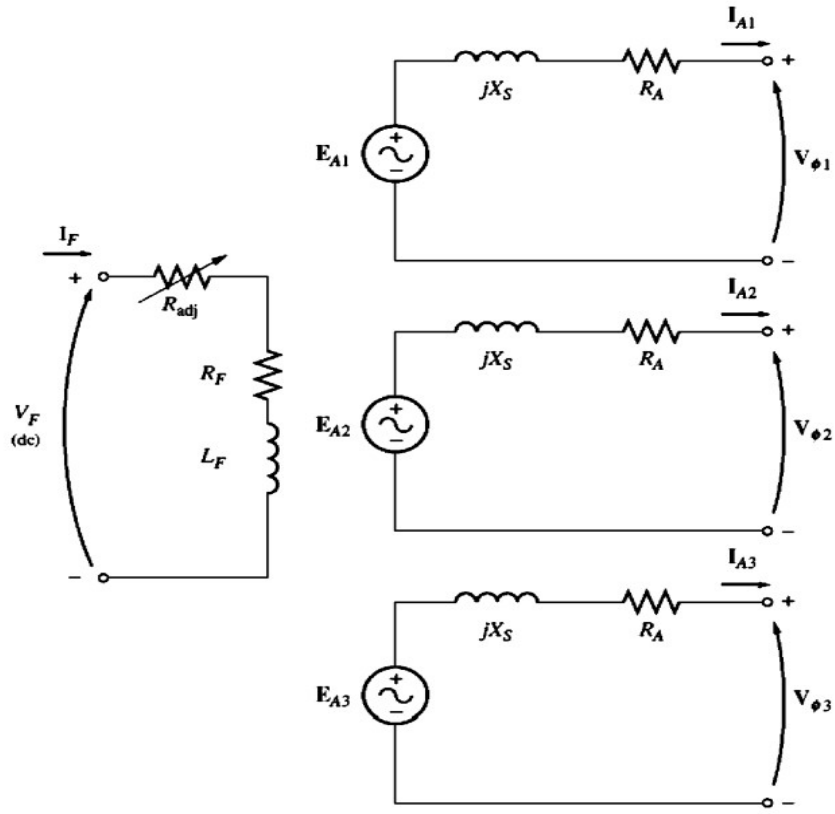
$$X_S = X + X_A \quad (2.26)$$

Dolayısıyla V_ϕ 'yi tanımlayan son eşitlik;

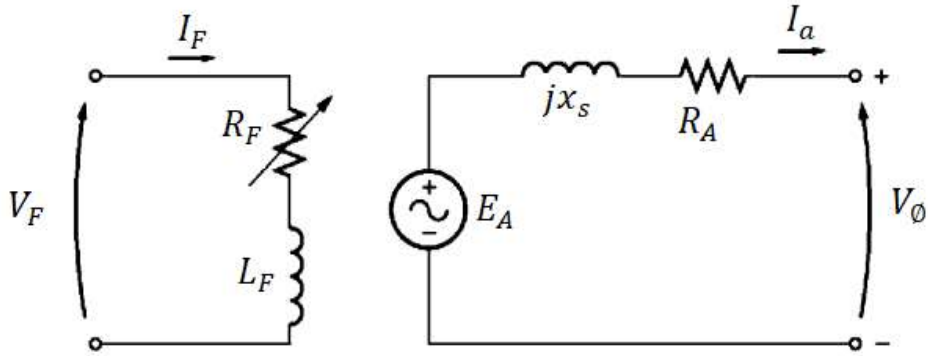
$$V_\phi = E_A - jX_S I_a - R_A I_a \quad (2.27)$$

olur. Bu denklemler elde edildikten sonra üç fazlı bir SG'nin eş değer devresini çizmek mümkün olmaktadır. Elde edilen bu denklemlerdeki ifadelerle göre senkron generatörün tam eşdeğer devresi şekil 2.10 ve 2.11' de gösterilmiştir. Bu şekilde rotor alan devresi de doğru akım kaynağından beslenecek şekilde, alan sargı indüktansı ve seri bağlı olan sargı direnç ile oluşturularak, model şeklinde verilmiştir. Yine rotor alan devresinde uyarma akımını kontrol etmek için R_F direncine seri bağlı ayarlı bir direnç R_{adj} bağlanmıştır. Eşdeğer devrenin diğer kısımları statora ait her bir fazın modellerinin resmidir. Her bir faz indüklenen gerilime seri bağlı X_S , endüvi reaktansı ve bobinlerin öz reaktanslarının toplamından ibaret olan senkron reaktansa ve seri bağlı R_A direncine sahiptir. Üç fazlı gerilimler ve akımlar arasında sadece 120° faz farkı bulunmaktadır (Chapman, 2005).

Bir faz eşdeğer devresi kullanımı durumunda unutulmaması gereken nokta, bu senkron generatörün fazlarında sadece üç fazlı dengeli bir yük bağlandığında, generatörün fazlarında aynı gerilim ve akımların bulunma gerçeğidir. Eğer generatörün yükü dengeli değilse, istenilen değerlerin hesaplanmasında çok karmaşık analiz tekniklerine ihtiyaç duyulur (Chapman, 2005; Çolak, 2003).



Şekil 2.10. Üç fazlı bir senkron generatörün tam eşdeğer devresi (Chapman, 2005)



Şekil 2.11. Senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi (Chapman, 2005)

2.2.7 Senkron Generatörlerin Fazör Diyagramları

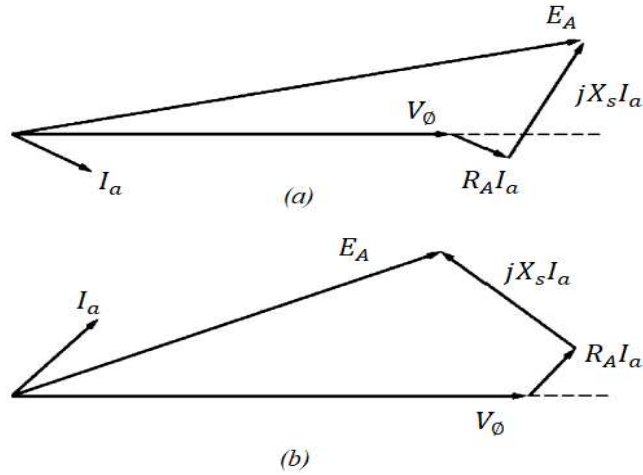
SG'lerde üretilen gerilimler AA olduğundan, fazlara ait gerilimleri anlaşılır olacak şekilde genellikle fazör diyagramı ile gösterebiliriz. Fazörler hem genlik hemde açı bilgisi içermektedir. Bir fazdaki gerilimler ve faz akımı arasındaki bağıntıyı elde edecek şekilde

izildiklerinde, elde edilen çizim fazör diyagramı olarak adlandırılır. Omik yükü besleyen SG'nin fazör diyagramı ekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Omik bir yükü besleyen senkron generatörün fazör diyagramı (Orijinal)

Bir senkron generatörün omik bir yükü besleme durumuna göre fazör diyagramı (2.27) formülü dikkate alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.13. Senkron generatörün (a) geri ve (b) ileri g faktöründe fazör diyagramları (Orijinal)

Toplam gerilim E_A , indüktif ve omik yük gerilim düşümleri kadar, uç gerilimi V_ϕ 'den farklıdır. Tüm gerilim ve akımlar, keyfi olarak yerleştirilen ve açısı sıfır derece kabul edilen V_ϕ ıkış gerilimi referans alınarak çizilmiştir. Şekil 2.13' de senkron generatörün belirli bir faz gerilimi ve endüvi akımında, geride yk için gereken E_A geriliminin, ileri yk faktörlü yükler için gerekenden daha büyük olduğu görülmektedir. Buradan elde edilen sonuç, geri g faktörlü yüklerde aynı uç gerilimini elde etmek için daha büyük bir uyarma akımına gereksinim duyulur. Çünkü,

$$E_A = K\Phi\omega \quad (2.28)$$

olup, sabit bir frekans elde etmek için ω sabit tutulmalıdır. Belirli bir uyarma akımı ve yük akımının genliği için, uç gerilimi, geri güç faktörlü yükler için daha düşük ve ileri güç faktörlü yükler için daha yüksektir (Chapman, 2007; Kimbark, 1956; Akın ve Orhan, 2007).

2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) için “Geleceği öngörme sanatıdır.” denilmektedir (Bathe, 2014). SEY son yıllarda önemi fark edilmiş ve mühendislik analizlerinde yoğun bir şekilde kullanılmakta olup, gelecek yıllarda daha fazla önem kazanacağı beklenmektedir. Yaygın olarak katı madde ve yapılarda, akışkanlarda, ısı transfer sistemlerinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, aslında tüm mühendislik analizlerinde kullanılabilecek bir sayısal çözüm yöntemidir. SEY’in mühendislik çözümlerinde kullanılması, daha çok bilgisayarlarda yaşanan gelişimler ile olmuştur.

SEY, Elektrik ve Elektronik Mühendisliğinde önemli oranda kullanılmaya başlanmış veya bu sayısal analiz yöntemi temelinde çalışan programlar üzerinden kullanılmaktadır. Tezde SEY, elektrik alan analizinde kullanılacak programların temel çözüm yöntemi olduğundan, SEY bu konuya bağlı olarak incelenecektir. SEY’in tarihsel gelişimi, ilgili çalışmalar, temelleri, çözüm şekli, uygulama alanları, farklı boyutlar için açıklanacaktır.

2.3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

SEY’in gelişiminin, ortaya çıkışının, uygulama yöntemi tarihinin ne ve nasıl olduğunu tam olarak bilmek gerçekte zor olsa da sonlu elemanlar yönteminin kökenini üç grupta takip edebiliriz; matematikçiler tarafından uygulanmaları, fizikçiler tarafından uygulamaları ve mühendisler tarafından uygulamaları. Gerçekte yayınlanan prensiplerin çoğu, mühendislerin çalışmalarıyla olmuştur (Bathe, 2014).

SEY’in matematiksel alanda uygulanma çalışmalarına son 60-70 yıllık dönemde fazlaca rastlanmaktadır. Matematik problemlerinin, çözüm aşamalarında diferansiyel denklemlerin çözümünde yaklaşım metodunun kullanılması genel olarak daha eskilere dayanmaktadır. 1870 yıllarında Lord Rayleigh, 1909 yılında W. Ritz diferansiyel problem

Çözümlerinde yaklaşım çözüm tekniklerini kullanmışlardır. 1915 yılında Galerkin yine aynı yaklaşımı kullanmıştır. Bu eski çözüm yöntemlerinin, günümüzdeki sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmasında görünen eksikliği, yönteminin çözülecek problemin geçerli olduğu tüm alana uygulanması gerektiğidir. SEY'in en önemli çalışmalarından 1943 yılında Courant tarafından ortaya konmuş, çözüm olarak ortaya konulan, alt tabanlara uygulanan yeni parçalı-devamlı fonksiyon metodu ile gerçek önemini kazanmıştır (Hutton, 2004).

1940'ların sonlarında uçak mühendisleri yeni jet motorlarının geliştirilmesi üzerine çalışmaktaydılar ve uçak gövdesinin ağır yüklerde, yüksek hızlarda dayanımını incelemek için çok yönlü, ileri bir analiz metoduna ihtiyaç duymuşlardır. Bu mühendisler gelişmiş bilgisayar yazılımları olmadan, kuvvetlerin matris metoduyla analizini geliştirdiler, bu da genel olarak bilinen esneklik metodudur ki burada bilinmeyenler kuvvetler, bilinenler yer değiştirenlerdir. SEY olarak bilinen ve en sık kullanılan şekliyle yer değiştirme metoduna karşılık gelmektedir. Yer değiştirme terimi sonlu elemanlar yönteminde yaygın olup, akışkan hızlarında, sıcaklık analizlerinde, fiziksel değişimlerde kullanılmaktadır (Hutton, 2004).

Sonlu elemanlar ifadesi ilk olarak Clough tarafından 1960 yılında "Uçakların Gerilme Analizi" alışmasında kullanılmış olup günümüze kadar bu kullanım devam etmektedir. 1960-1970 yıllarında sonlu elemanlar yöntemi plaka b kmelerinde, akışkan mekaniğinde, bükme uygulamalarında, basınç kaplarında ve 3 boyutlu plastik yapılarda, ısı transfer uygulamalarında genişçe uygulanmaya başlanmıştır. Bu zamanda ayrıca büyük sapmalı çalışmalarda, dinamik analizlerde de kullanılmıştır (Hutton,2004).

Mühendis alanında sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapı mekaniğindeki problemlerin analizlerinin, fizik temelinde geliştirilmesi ile başlamıştır. Daha sonra bu tekniğin diğer mühendislik uygulamaları içindeki problemlerin çözümünde aynı doğrulukta uygulanabileceği görülmüştür. SEY çok karmaşık yapıdaki matematiksel modellerin çözümünde kullanılsa da, bu yöntem içerdiği matematiksel modelin sahip olduğu cevabın dışında daha fazla bilgi vermez (Bathe,2014).

SEY, büyük matrisli işlemlerde gerekli olan, hesaplanması gereken işlemler nedeniyle yoğun, karmaşık bir hesaplama yöntemidir. SEY'in son yıllarda uygulamalarda kullanılması, işlemlerin uzun, hatasız yapılmasını sağlayan bilgisayarların yardımı ile mühendislik uygulamalarında mühendislerin en büyük yardımcısı olmuşlardır. İstenilen çözümlerin bu yöntem ile hesaplanmasını kolaylaştıran ilk temel yazılım, 1960'lı yıllarda sonlu elemanlar yazılım kodu olan NASTRAN, Amerikan uzay keşif çalışmalarına bağlı

olarak ilk defa mühendisler tarafından geliştirilmiştir. NASTRAN, ilk büyük sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım kodudur. NASTRAN programının geliştirilmesinden sonra yıllar içinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan, bu çözüm yöntemini temel alan değişik ticari program paketleri geliştirilmiştir. ANSYS, ALGOR, COSMOS/M bunlardan bir kaçısı olarak verilebilir. Son yıllarda masaüstü veya mühendislik çalışmaları da kullanılan bilgisayarlar ve bu programlar yardımı ile büyük ölçekli statik - dinamik yapı analizleri, ısı transfer analizleri, elektromanyetik analizler, sıvı akış analizleri, sismik analizler kolaylıkla yapılmaktadır (Saeed, 2015; Bathe, 2014; Hutton, 2004; Arıkan, 2002).

2.3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi Çalışma İlkesi

SEY veya Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) olarak da anılan yöntem, mühendislikteki karmaşık problemlerde kullanılan sayısal bir metottur. Bu yöntemin temel yaklaşımı, mühendislik problemini belirli sınırlar içinde yaklaşık olarak hesap etmektir. Bazı kaynaklarda bu yöntem için sınır değer problemleri, alan problemleri olarak da adlandırılmaktadır. Çözümlerde kullanılan alan tabiri, burada çözümü yapılan ilgili bölüm, parça olarak belirtilen sınırlı alandır, çoğu zamanda çözülecek olan fiziksel nesneyi tanımlamaktadır. Değişik mühendislik dalları içinde, bu yöntem üzerine temelinde çalışan genel bir bilgisayar yazılımının sadece giriş verileri değiştirilerek, herhangi bir özel problemin çözümü için aktif, etkin olarak kullanılabilmesi bu yöntemin kullanılabilirliğini artırmıştır. Bu yöntem, analiz edilecek teçhizat, ana yapı, sınırlı alan, değişken, davranışı daha önce belirlenmiş birçok küçük bileşene, sonlu elemanlar adı verilen alt bölgelere ayırarak problemi basit, küçük alanlar üzerinden, belli bir duruma küçülterek, indirgeyerek çözüme ulaşmaktır. Sonlu elemanlar yönteminin bir sınırlı alan, parça veya donanım için uygulanma biçimi, aşağıdaki şekil 3.1'e göre açıklanmaktadır. Aşağıda verilen basit bir şekil ile ilgili dairesel bölge alanı veya bu alanın sınırları bir materyalin sınırları olduğu, özellikleri bilinen bu materyali temsil eden bir yapı kabul edilmiştir. Bu şekil ile çizilen sınırlar çözümün yapılması gereken materyali, alanı, maddenin hacmini temsil etmektedir. Tanımlanan bu kapalı alan içinde her $P(x,y)$ noktası için tanımlı olan, iki boyutlu bir fonksiyon tanımlanır. Bu yaklaşım yöntemi matematiksel bir çözümün elde edilmesi için gerekmekte olup ayrıca bu belirtilen çözüm bağımsız değişkenlerin kapalı matematiksel bir ifadesidir. Çözülecek problemlerde çözülecek alanın, materyalin şekli, yapısı karmaşık

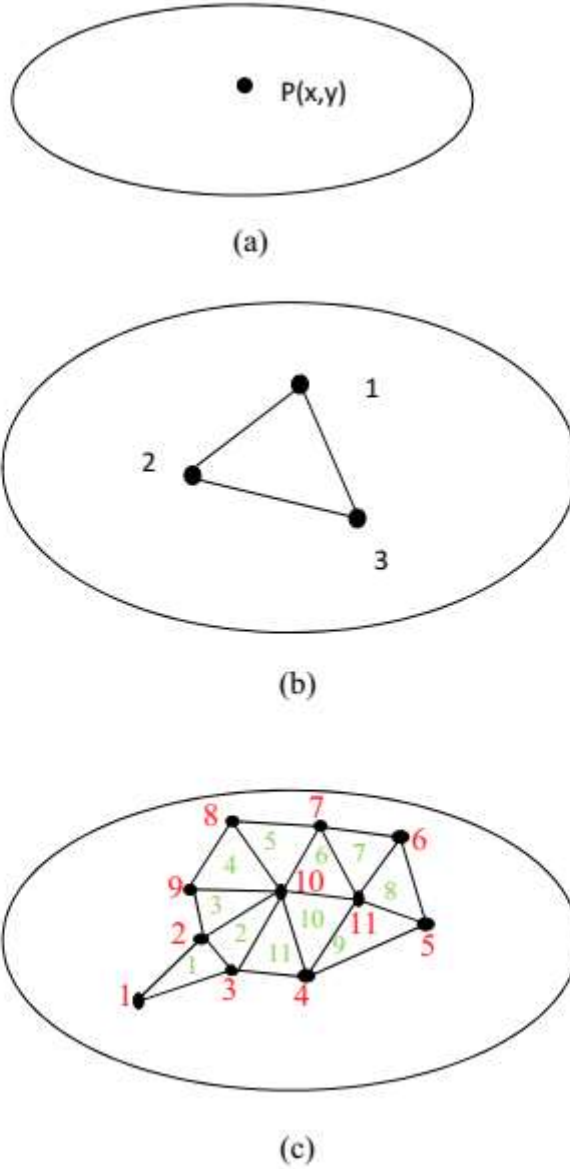
olabilmektedir. Bu tür materyallere ilişkin durumlardaki elde edilen çözümlerin doğruluğu, ana fonksiyonlarının elde edilmesi ve sisteme uygulanması ile yüksek oranda olmaktadır. Bu nedenle bu türden sayısal hesaplamalar veya sayısal teknikler temelinde yaklaşık çözüm, karmaşık mühendislik problemlerinde gerçek çözüme uygun, yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar tekniği, yaklaşık çözümü en yakın doğrulukla eden edebilen bir teknik olup bu doğruluk uygulanan sonlu elemanlar ağına bağlı olarak daha da büyümekte ve gerçek çözüm değerine yaklaşmaktadır. İlgili materyale ve bunun sınırları ile tanımlı olan bir alana uygulanan üçgen sonlu elemanı şekil 2.14(b)'de çizilmiş, ifade edilmiştir. Bu üçgen sonlu elemanı ile tanımlanan kapalı alan $dx.dy$ boyutunda bir diferansiyel denklem olmayıp, sonlu bir elemandır. Burada belirtilen yapı, materyal iki boyutlu düşünüldüğünden, uygulanan sonlu eleman yapısının kalınlığı yani z boyutu sabittir ve denklemlerde ifade edilmesine gerek duyulmamaktadır.

Belirtilen üçgende birleşme noktaları NOD adı verilen, İngilizcede nokta kelimesinin karşılığı olan *node* kelimesinin belirttiği noktalarlardır. Bu noktalar sonlu eleman ağı için özel noktalar çünkü bu noktalara bağlı olacak şekilde bir denklem takımı ifade edilmektedir. Sınırları belli materyal veya bu materyalin tanımladığı alan içinde, tanımlanan her sonlu eleman üzerinde alınacak noktalar diğer sonlu elemanlar ile bağlantı oluşturacaktır. Tanımlanan sonlu eleman sınırları üzerindeki noktalar dış noktalar, sonlu eleman sınırları içinde olup diğer elemanlar ile bağlantı yapılamayan noktalar ise içsel noktalar olarak ifade edilecektir.

Şekil 2.14'teki örnek olarak verilen tanımlı sınırlı alan içindeki üçgen sonlu elemanı, dışsal noktalardan oluşmuştur. Bu durumda açıklığa kavuşturulması gereken bir nokta da, alan değişkenlerinin değerleri sadece noktalara göre hesap edilebiliyorsa, sonlu elemanlar içinde kalan diğer noktaların değerlerinin nasıl elde edilmesidir. Burada bulunacak cevap aslında sonlu elemanlar yönteminin, bahsedildiği üzere temel özelliğini oluşturmaktadır ki bu da düğüm noktalarında hesaplanan alan değişkenlerinin değeri, bu değerlerin interpolasyonu ile düğüm noktaları dışındaki tanımlı alan içindeki düğümler için de yaklaşık değerler elde etmek için kullanılır. Yukardaki şekilde tanımlanan sonlu eleman üzerindeki dışsal düğümlere ve içindeki kalan diğer düğümler de dâhil, üçgen sonlu elemanı için alan değişkenleri yaklaşık olarak şu şekilde tanımlanabilmektedir;

$$\Phi(x,y) = N_1(x,y)\Phi_1 + N_2(x,y)\Phi_2 + N_3(x,y)\Phi_3 \quad (2.29)$$

Bu verilen 2.29 denkleminde Φ_1, Φ_2, Φ_3 düğüm noktalarındaki alan değişkenlerinin değeri, N_1, N_2 ve N_3 interpolasyon denklemleri ya da başka kaynaklarda da şekil fonksiyonları olarak da isimlendirilmektedir.



Şekil 2.14. (a)- SEY'in uygulanacağı sınırlı alan (b)- Sınırlı alan içinde sonlu üçgen elemanın tanımlanması (c)- Sınırlı alan içinde sonlu üçgen elemanlı ağ yapısı (Orijinal)

Sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımında, alan değişkenlerinin düğümlerdeki değerleri hesaplanacak bilinmeyen sabitler olarak ele alınır. İnterpolasyon denklemleri, genellikle düğümlerde kesin zorunlu şartları yerine getirmek için türetilen bağımsız değişkenlerin polinom fonksiyonlarıdır. Burada interpolasyon denklemlerinin, önceden belirlenmiş

bağımsız değişkenlerin bilinen bir fonksiyonudur ve bu fonksiyonlar sonlu eleman içindeki alan değişkeninin varyasyonudurlar (Yahnioğlu, 2005; Saeed, 2015; Kutucu, 2009; Ünal, 2008).

Bu sonlu eleman temelindeki yöntemin çalışması; şekil 2.14(c)'deki şekilden de anlaşılabilir gibi her sonlu elemanın sınırları üzerindeki dışsal düğümleri, diğer yanındaki sonlu elemanların sınırları üzerindeki dışsal düğümleri ile bağlanır. Sonlu elemanlar denklemleri, düğüm noktasındaki bağlantılarda, herhangi bir bağlantıdaki alan değişkeninin değeri, düğüme bağlı her eleman için aynı olacak şekilde formüle edilir. Bu hesaplama yoluyla düğüm noktalarındaki alan değişkenlerinin devamlılığı, birbiri ile bağlantısı sağlanır. Aslında, sonlu elemanlar formülasyonları ara eleman sınırları boyunca alan değişkeninin sürekliliği de sağlanacak şekildedir. Bu özellik sınırlı alan içinde fiziksel olarak kabul edilemeyecek veya geçersiz boşlukların oluşmasını önler. Yapısal çalışmalarda, bu tür boşluklar, maddenin fiziksel olarak ayrılmasını ifade eder. Isı transfer sistemlerinde ise bu tür boşluklar, aynı fiziksel noktalarda farklı ısı değerleri olarak kendini gösterir. Alan değişkeninin elemandan elemana sürekliliği, sonlu elemanlar formüllerine özgü olsa da, alan değişkenlerinin ara elemanlarının türevlerinin sürekliliği yoktur. Çoğu durumda türevler, alan değişkenlerinin değerlerinden daha önemli olmaktadır. Örneğin yapısal, inşaat çalışmalarında alan değişkeni yer değiştirmedir ama inşaat veya benzer özellikli sistemler asıl önemli olan gerilme, gerinme ve zorlamadır. Burada gerilme yer değiştirmenin ilk türevidir ve gerilme eleman sınırları boyunca devamlı olmamaktadır (Saeed, 2015).

Sonlu elemanlar yönteminde yukarıda belirtilen durumlar dikkate alınarak, bir sınırlı alan veya materyal üzerinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilmesi için;

- 1- Çözümü yapılacak sistemin kapalı bir alan, hacimden oluşması
- 2- Sistemde tanımlı tüm maddelerin fiziksel özelliklerinin tanımlı olması
- 3- Çözümü aranan fonksiyonun bu alan veya hacim içinde her noktada tanımlı olması gerekmektedir (Yahnioğlu, 2005; Saeed, 2015; Kutucu, 2009; Ünal, 2008).

Sonlu elemanlar yöntemi uygulanan, ilgili fiziksel materyali oluşturulan denklem takımı incelenen sonlu elemana bağlı olarak çok fazla sayıda olabilir. Bu nedenle bu denklemlerin çözümünde bilgisayar programı kullanılır. Sonlu elemanlar şeklinde alt bölgelere ayrılıp, bu ayrılan alt bölümlerde aranan fonksiyonun ifadesi polinom olacak şekilde seçilerek polinom çözümüne ait katsayılar bulunmaya çalışılır. Bu yöntemde indirgenmiş sistemin çözümünde iyileşme yapılarak, daha sıkı bir sonlu elemanlar yapısı ilgili alana uygulanarak gerçek, kesin

özme yaklaşma hatta kesin çözümü bulma ihtimali varma durumu mevcuttur (Arıkan, 2002; Hutton, 2004; Kutucu, 2009).

Sonlu elemanlar çözüm yönteminin avantajlarını şöyle sıralaya biliriz;

1. Karmaşık şekilli elemanların incelenmesi, bu elemanların analizinde kolaylık sağlar, karmaşık yapılar alt bölgelere ayrılarak daha hassas analizler yapılır,
2. Karmaşık ve değişik malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanır,
3. Sınır koşulları basit şekilde denklem sistemine dâhil edilebilir,
4. Hem matematiksel hem de fiziksel temeli mevcuttur.

Dezavantajları ise;

1. Elde edilen çözümün doğruluğu verilerin doğruluğuna bağlıdır,
2. Özellikle karmaşık yapılı sistemlerin çözümünde bilgisayar programları ile çözüm gerektirir,
3. Doğru sonucun elde edilebilmesi için bölgenin ayırık hale getirilmesi deneyim gerektirir,
4. Çıkarılacak sonuç önceden kestirilmeli ve sonuç ona göre test edilmelidir.

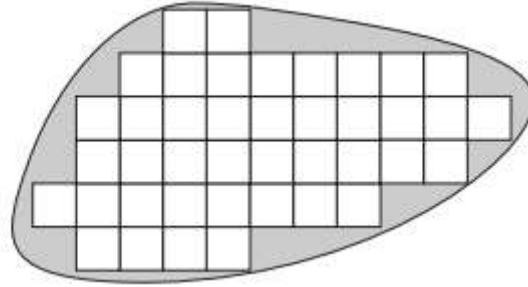
Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm yapan çeşitli paket programlar geliştirilmiş olup, bu programlar ile birçok mühendislik alanındaki problemlerin analizi mümkün olmuştur, analizlerin daha doğru bir çözüme ulaşması sağlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan, bu yöntemi kullanan alanlara örnek olarak;

- 1- Darbe analizi
- 2- Yorulma analizi
- 3- Isı iletimi
- 4- Genleşme
- 5- Dalga yayılımı
- 6- Elektrik, Manyetik alan
- 7- Medikal uygulamalar
- 8- Aerodinamik
- 9- Akışkanlar mekaniği
- 10- Gürültü, titreşim analizi

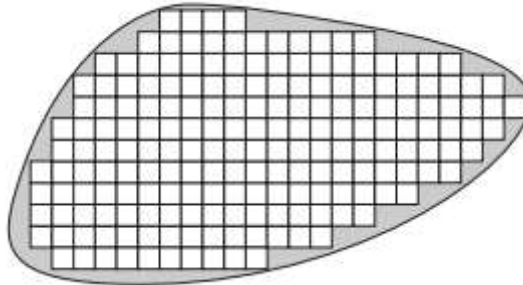
gibi çeşitli problem analizlerinde kullanılmaktadır.

2.3.3 Sonlu Elemanlar Çözümünün Gerçek Çözüm ile Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar ile bir fiziksel materyalin alanının ifadesi sonlu elmanlar ile bir ağ olarak yapılandırılması demektir ve ilgili alana uygulanarak elde edilen bu sonlu eleman kümesi, sonlu elemanlar ağı olarak isimlendirilir. Genel olarak kullanılan iki boyutlu veya üç boyutlu olsun, ilgili yüzeyleri, alanları düz olmasına karşın, eğri yapıda sınırları olan alanların, materyallerin geometrilerinde, ilgili tüm alanının sonlu elemanlar ağ örgüsüne dâhil edilmesi mümkün olmamaktadır. Şekil 2.15'te görüldüğü üzere eğri sınırlara sahip alanın sonlu elemanlar ağ yapısı, kare elemanları ile yapılmıştır. Daha küçük ve ayrıntılı olarak, daha fazla sayıda kare tipi sonlu eleman kullanılarak aynı eğri sınırlarına sahip alana şekil 2.16'da olduğu gibi yine sonlu elemanlar ağ yapısı uygulanmıştır. Bu iki çizim karşılaştırılacak olunursa ikinci şekilden de açıkça görüleceği gibi sınırları belli alanın, daha fazla bir kısmı sonlu elemanlar ağ örgüsüne katılmıştır yani alanın gerçek boyutuna, sınır değerlerine daha fazla yaklaşmıştır.

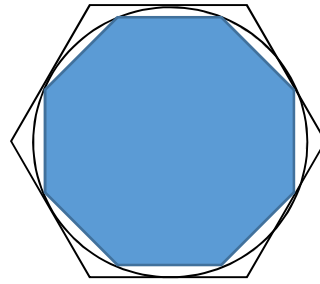


Şekil 2.15. Ağ yapısı – 1

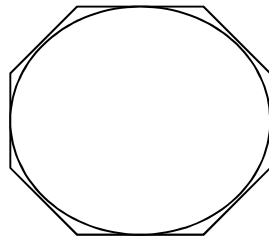


Şekil 2.16. Ağ yapısı – 2

Küresel sonlu eleman yerine üçgen sonlu elemanı kullanılmış olması durumunda, ilgili alanın gerçek boyutunun, çözüme aranan probleme daha fazla dâhil olmasından dolayı, gerçek çözüm değerine daha fazla yaklaşılabilecektir. Buna en güzel örneklerden biri yüzyıllar öncesinde bir dairenin çevresinin bulmak için o zamanın bilim adamları, dairenin etrafına ve içine poligonlar çizerek bulmaya çalışmasıdır. Dairenin iç ve dış taraftan çevresine çizilen poligonların uzunluğu dairenin çevresinin alt ve üst sınırını belirlemektedir. Ve sınırlar içerisinde daireye uygulanan poligonların köşe sayısı arttıkça çemberin çevresinin gerçek değerine daha çok yaklaşılmaktaydı. Şekil 2.17’de sekizgenin kullanılması sonucun, dairenin çevre uzunluğunun gerçek değerine yaklaşılmamasını sağlamaktadır. Eğer bir alan ile ilgili problemin çözümünde ilgili alana uygulanan yaklaşma fonksiyonları, bu alan için geçerli olan gerçek matematiksel değerlere ne kadar yakın olur ise, bu belirli problemin sonlu elemanlar uygulanarak elde edilen çözümü, problemin gerçek çözümüne o kadar yakın olur. İlgili materyal, alan üzerinde çözüm için ne kadar çok sonlu eleman uygulanır ise, sonlu elemanın örgüsünün fiziksel olarak kapladığı boyut, gerçek alana yaklaşır ve sonlu elemanlar çözümü kademeli olarak artar, değişir ve gerçek çözüme yaklaşır. Bu değişim artışı ağ örgüsünün iyileştirilmesi ile azalır ve gerçek çözüme asimtotik olarak yaklaşır (Saeed, 2015).



(a)



(b)

Şekil 2.17. (a)- Dairenin çevresini bulmak için altıgenin kullanılması (b)- Sekizgen kullanılması (Orijinal)

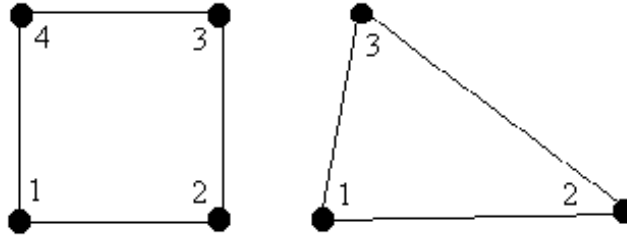
2.3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi yapılacak malzeme, alan üzerinde en doğru sonuca veya gerçek çözüme en çok yaklaşıpacak şekilde bir çözüm elde edebilmek ilgili yapının, malzemenin, tüm alanı veya hacmi yapılacak çözüme dâhil olabilecek şekilde sonlu elemanlara ayrılması gerekmektedir. Buda uygulanacak sonlu elemanın ilgili alanın geometrisine en uygun şekilde seçilmesine bağlıdır. Bu seçilecek sonlu elemanların sınırları, uygulanan geometriye bağlı olarak düz olmayabilir ve ayrıca farklı boyutlarda da olabilirler. Uygulacak sonlu elemanlara, ilgili alana bağlı olarak, üzerinde çalışılacak olan geometri, bunun yükleri, yer değiştirmeleri, gerilmeleri gibi özellikleri bir bağımsız uzay koordinatı cinsinden ifade edilebiliyorsa şekil 2.18'deki gibi bir boyutlu sonlu eleman kullanılır (Yahnicioğlu, 2005; Ünal, 2008).



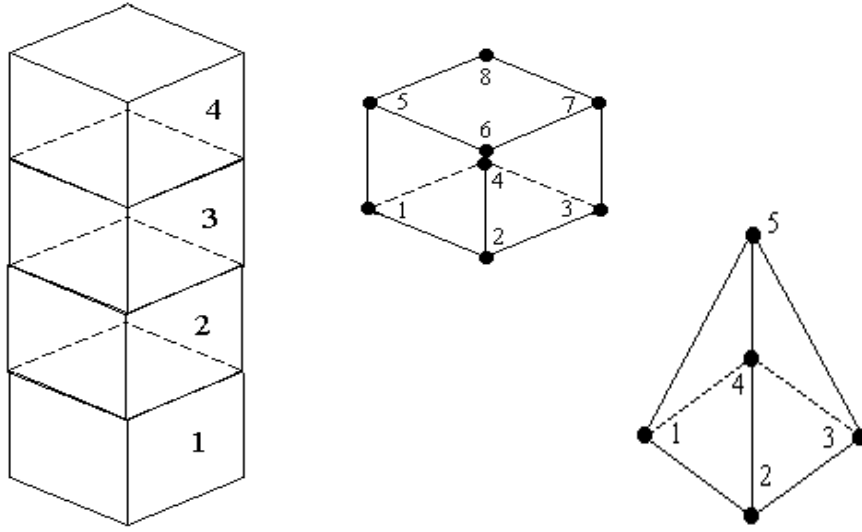
Şekil 2.18. Bir boyutlu sonlu eleman (Orijinal)

İki boyutlu yapıların, alanların analizinde ise yine uygulanacak alana uygun olarak, birçok problemde iki boyutlu dörtgen, iki- dört üçgenli dörtgen, dikdörtgen kullanılmaktadır.



Şekil 2.19. Dörtgen ve üçgen tipi sonlu eleman örnekleri (Orijinal)

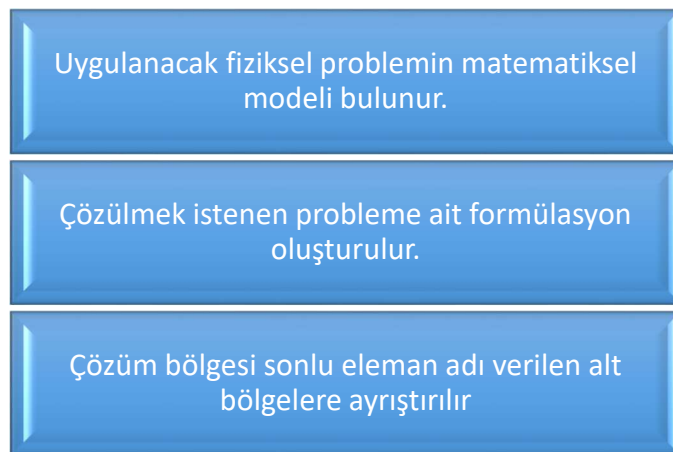
Yine üç boyutlu geometriye sahip alanların analizi için şekil 2.20'de verilen veya bunlara benzer sonlu elemanlar kullanılmaktadır.



Şekil 2.20. Üç boyutlu sonlu eleman (Orijinal)

2.3.5 Sonlu Eleman Yöntemi İşlem Aşaması

Çözümü istenilen probleme bağlı olarak, analiz edilen sistemin, materyalin, ekipmanın şekli itibari ile bu yapıya karşılık gelecek birebir yapıda bir geometrik şekil elde etmek mümkün olmayabilir ve burada bazı kısımlar sonlu elemanlar uygulanan bölümlerin dışında kalabilir. Buna ayırıklaştırma hatası denir. SEY temelinde bir probleme uygulanacak analizin çözüm adımları ve akış diyagramları aşağıdaki şekillerde ki gibi verilebilir.



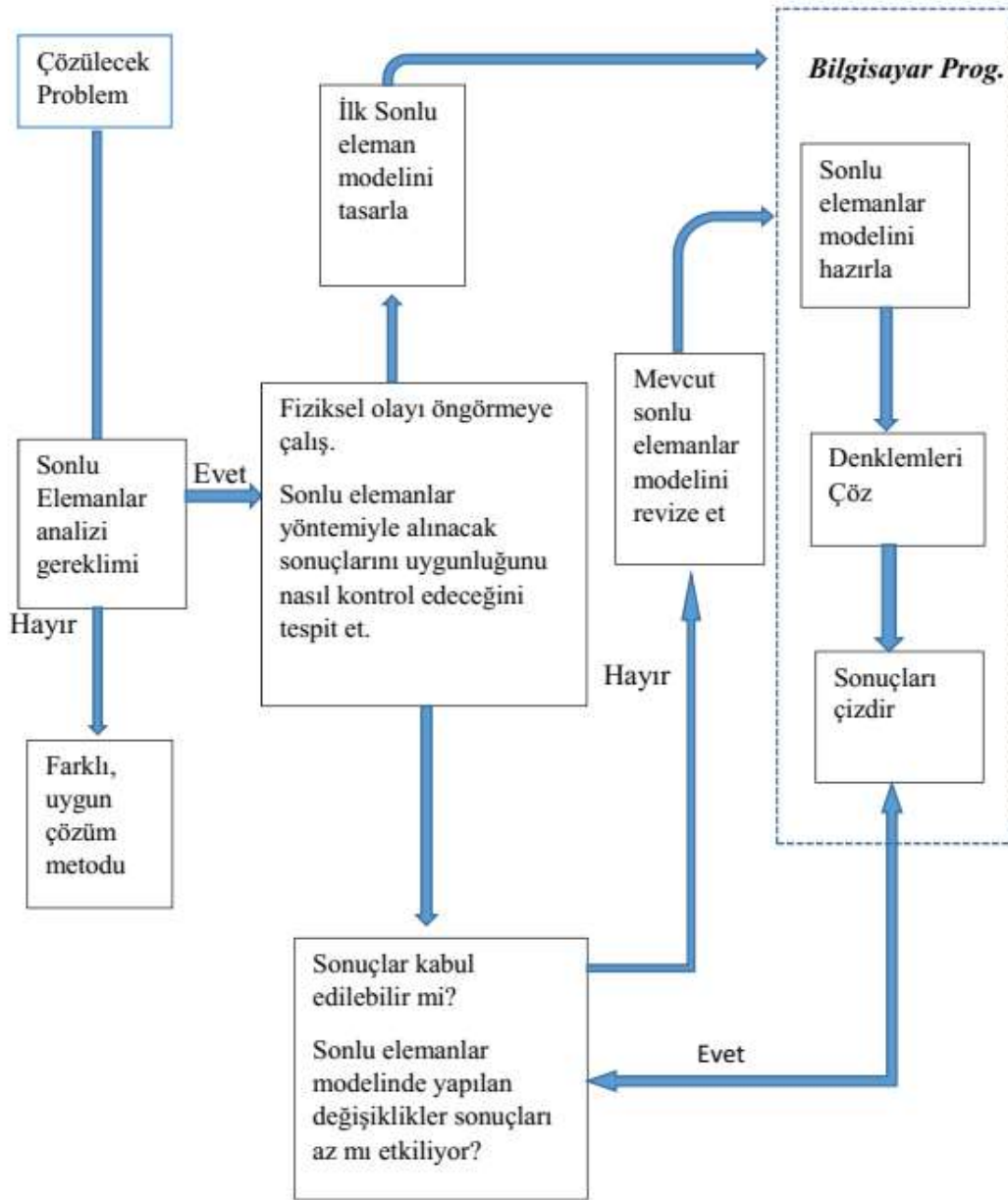
Şekil 2.21. Sonlu elemanlar yöntemi çözüm adımları (Orijinal)

2.3.6 Sonlu Elemanlar Yönteminin Manyetik Alan Analizine Uygulanması

Elektrik makinaları temel konularından olan elektromanyetik alanlar için, sonlu elemanlar yönteminin bu konuya bağlı olarak elektrik alan ve manyetik alan analizlerinde kullanımının ne ölçüde ve nasıl olduğu incelenecektir. Yukardaki bölümler de bahsedildiği üzere sonlu elemanlar yönteminin, kullanılacağı malzeme geometrisine, yapısına, alan sınırlarına bağlı olduğundan bir, iki, üç boyutlu problem analizleri yapılmaktadır. Alan analizleri genel olarak iki ve üç boyutlu geometriler üzerinde incelenmekte olduğundan uygulanan sonlu eleman yine iki ve üç boyutlu olmak zorundadır. Eksenel simetrisinin mevcut olduğu durumlardaki geometriler için iki boyutlu analiz, üzerinde çalışılacak geometrinin karmaşık yapıda olduğu ve simetrik olmadığı durumlarda üç boyutlu analiz kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde çözüm yapılırken şu işlem takip edilmelidir.

- Problemin çözümünde ilk önce problem geometrisinin oluşturulması,
- Problemden kullanılan elemanların malzemelerinin özelliklerinin tanımlanması
- Problemin uygulanacağı sınır koşullarının belirlenmesi (fiziksel sınırlamaların belirlenmesi)
- Problem çözümünde kullanılacak geometriye uygun sonlu eleman türünün belirlenmesi
- Çözüm bölgesinin belirlenen sonlu elemanlara bölünmesi (ağ örgüsünün oluşturulması, ayrıklaştırılması)
- Her bir eleman noktalarına bağlı olarak temel denklemin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki sonlu elemanların birleştirilmesi
- Yukarıdaki aşamalardan sonra elde edilen doğrusal denklem takımının çözümünün yapılması şeklindedir.

Şekil 2.22’de bu yöntemin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Sonlu elemanlar analiz akış blok diyagramı (Orijinal)

2.3.6.1 Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar yönteminde fiziksel olarak üç sınır koşulu bulunmaktadır.

- Dirichlet Türü (Birinci Tür)

Bir geometri alanın sınırları üzerindeki potansiyel değeri belirlidir. Bu koşulda tanımlı olan potansiyel fonksiyonu Φ_s sınırın belirli bir kısmında veya bütün sınır boyunca belirli bir değerdedir. Eğer bu sonlu elemanlar yöntemi sınır koşulunda, sınır koşulu sıfır ise

buna homojen Dirichlet sınır koşulu denir.

- Neumann Türü (İkinci Tür)

Bu sonlu eleman sınır koşulunda, sınırlar üzerindeki potansiyelin türevi belirlidir. Alanın sınırları üzerine dik doğrultuda gelen akı yoğunluğu ile ilgili bir sınır koşuludur. Eğer ortam izotropik ise sınıra dik doğrultuda gelen akı genel olarak,

$$K(s) \frac{\partial \Phi}{\partial n} = h(s) \quad (2.30)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada formülde n , sınırın dışına doğru birim vektörü göstermektedir. Bu ifade çözüm uygulanan bölgedeki alandan bağımsızdır. $h(s) = 0$ olması durumunda homojen Neumann sınır koşulu denir.

- Robbins Türü (Karma)

Bu sonlu elemanlar sınır koşulunda, sınır üzerindeki potansiyel ve türev belirlidir. Sınırdaki bulunan iletken bir malzeme, sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkiler. Sınırdaki bu değişimler lineer değişimler ise bu sınır koşulu genel olarak,

$$K(s) \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \sigma(s) (\Phi_{0(s)} - \Phi_{(s)}) \quad (2.31)$$

ile ifade edilir. Burada $\sigma(s)$ sınırdaki elektriksel iletkenlik fonksiyonunu göstermektedir.

Bu sınır koşulu yeniden düzenlenerek

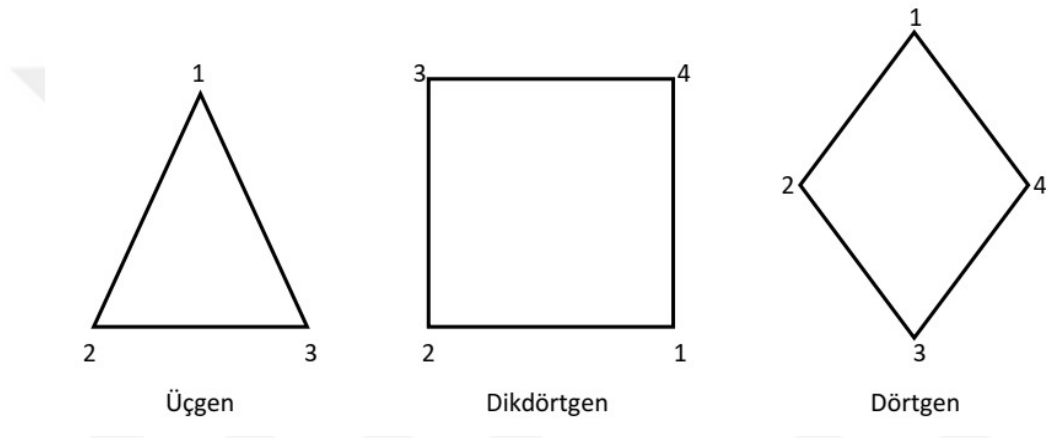
$$K(s) \frac{\partial \Phi}{\partial n} + \sigma(s) \Phi_{(s)} = \sigma(s) \Phi_{0(s)} \quad (2.32)$$

$$K(s) \frac{\partial \Phi}{\partial n} + \sigma(s) \Phi_{(s)} = h(s) \quad (2.33)$$

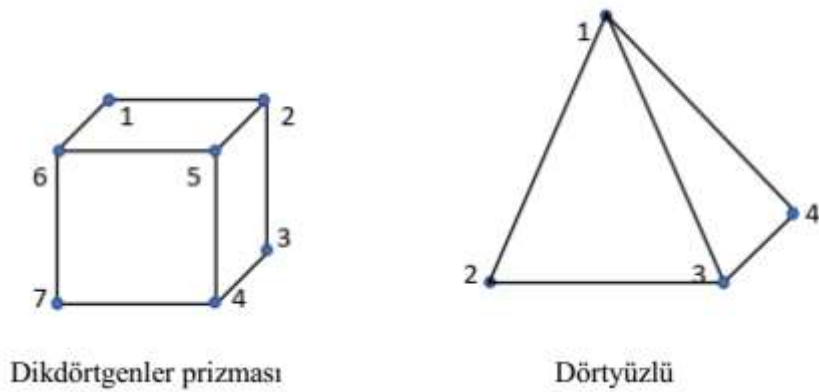
yazıldığında daha önceki koşulları da içeren bir bağıntı elde edilir (Saeed, 2015; Bathe, 2014; Ünal, 2009).

2.3.6.2 Sonlu Elemanlar Yapısının Belirlenmesi

Uygulanacak sonlu elemanlar yapısının belirlenmesinde temel koşul problemin sahip olduğu geometriye bağlıdır. Geometrinin oluşturulduğu boyuta, geometrinin alanının çözüme dâhil olabileceği maksimum değere göre sonlu eleman belirlenir. Eğer çözümü istenen geometri bir boyutlu ise bir boyutlu sonlu eleman kullanılması zorunludur. Bu duruma bağlı olarak sonlu elemanlar bir, iki ve üç boyutlu elemanlar olarak gruplandırılır. Bir boyutlu sonlu eleman, iki düğüm noktasından oluşan bir çizgiden oluşmaktadır.



Şekil 2.23. İki boyutlu sonlu eleman örnekleri (Orijinal)



Şekil 2.24. Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri (Orijinal)

İki boyutlu sonlu elemanlar ise çözüm uygulanan geometrinin elvereceği şekilde seçilebilir, bir boyutlu eleman gibi herhangi bir kısıtlama yoktur. Üçgen, kare, çokgen veya herhangi bir geometri tanımına uymayan kapalı bir yüzey sonlu eleman olarak tanımlanabilir ki burada asıl nokta çözüm için çalışılan geometrinin sahip olduğu tüm alanın çözüme dâhil edilebilmesidir. Çalışmalarda kullanılan bazı iki boyutlu sonlu eleman örnekleri şekil 2.23'te verilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanların seçimi için de iki boyutlu elemanlar da olduğu gibi, aynı durum söz konusudur. Sonlu eleman oluşturmada herhangi bir kısıtlama mevcut değildir. Yine çalışmalarda kullanılan bazı üç boyutlu sonlu elemanlar şekil 2.24'te gösterilmiştir (Kutucu, 2009).

2.3.6.3 Eleman İçindeki Temel Denklemin Yazılması

Bir problemin çözümüne ait temel denklemin yazılabilmesi için yaklaşıklık fonksiyonlarının tanımlanması gerekmektedir. (u, v, w) genel koordinat sisteminde tanımlanan yaklaşıklık değişkenleri olarak alınırsa;

$$\Phi_m(u, v, w) = \sum_{k=0}^{N_t^2} a_k u^i v^j w^s \quad i + j + s \leq M \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada M polinomun derecesi olarak ifade edilir. N_t toplam terim sayısı olarak ifade edilirse;

$$N^2 = \frac{[(M + 1)(M + 2)]}{2} \quad (2.35)$$

denklemleri ile bulunur. $M = 1$ olduğu, birinci dereceden yaklaşıklık işlevi için bir, iki, üç boyut için sırası ile,

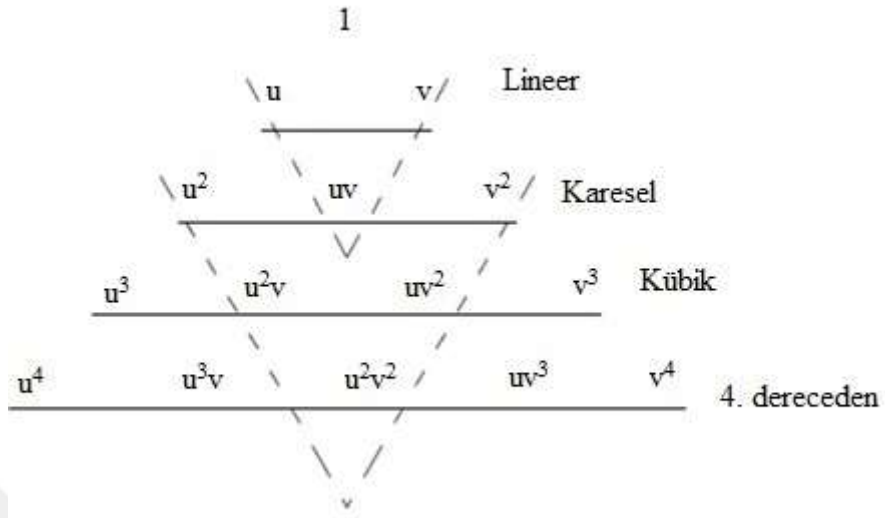
$$\varphi(u) = a_1 + a_2 u \quad (2.36)$$

$$\varphi(u, v) = a_1 + a_2 u + a_3 v \quad (2.37)$$

$$\varphi(u, v, w) = a_1 + a_2 u + a_3 v + a_4 w \quad (2.38)$$

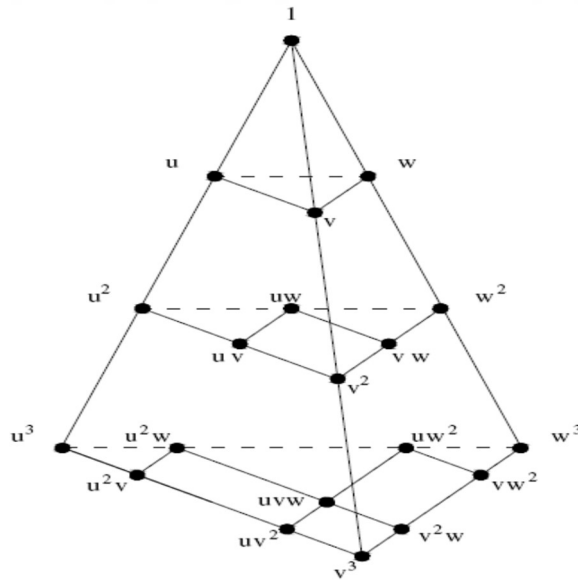
formülleri ile ifade edilir. İki boyutlu yaklaşıklık ifadesi koordinatlara bağlı terimlerinin

bulunması için yardımcı olacak Pascal üçgeni şekil 2.25’de gösterilmiştir.

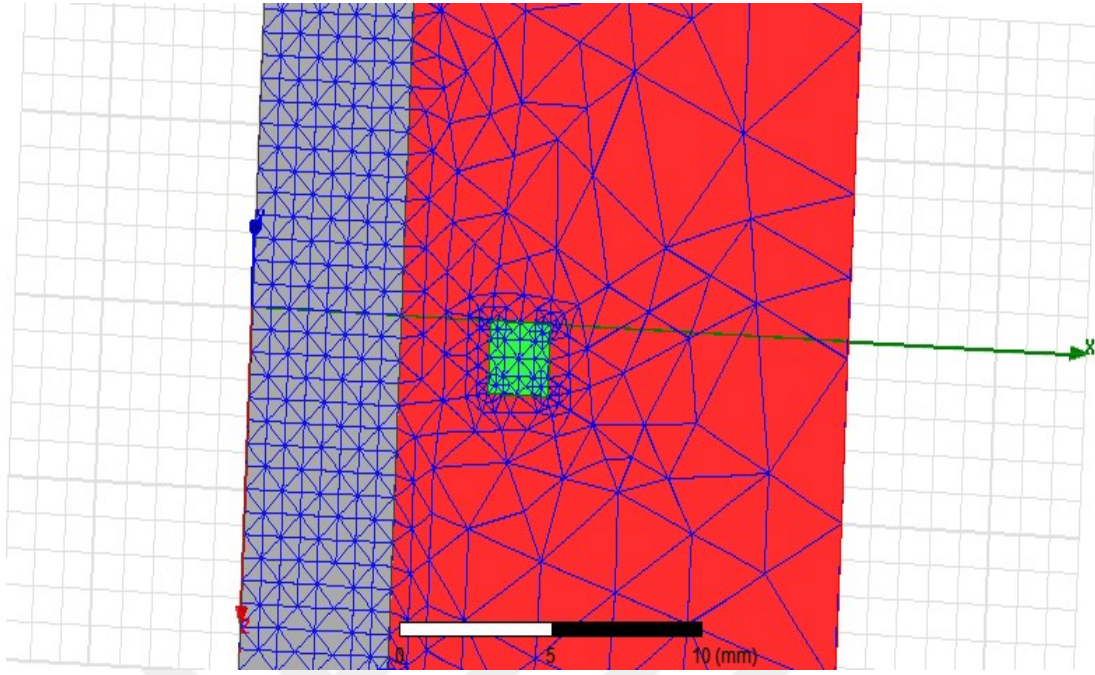


Şekil 2.25. Pascal üçgeni (Kutucu, 2009)

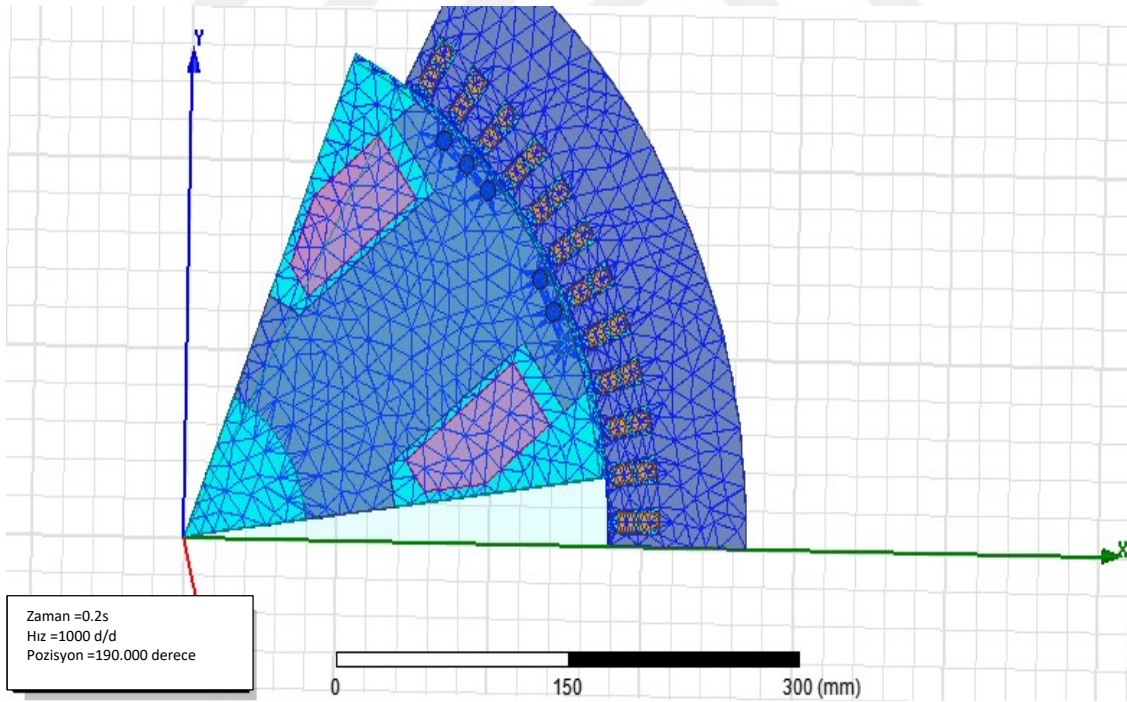
Üç boyutlu yaklaşıklık ifadesi koordinatlara bağlı terimlerinin bulunması için ise Pascal piramidi şekil 2.26’da gösterilmiştir (Kutucu, 2009).



Şekil 2.26. Pascal piramidi (Kutucu, 2009)



Şekil 2.27. Maxwell ağ örgüsü yapısı (Orijinal)



Şekil 2.28. Senkron generatör ağ örgüsü yapısı (Orijinal)

Şekil 2.27’de Ansys maxwell programında eddy current hesaplaması için tasarlanan yapıya uygulanmış bir ağ örgüsü yapısı görülmektedir. Şekil 2.28’de 6 kutuplu bir generatörün ayrıştırılarak, 60° kısmına uygulanan ağ örgüsü yapısı görülmektedir. Her iki

şekilde de görüldüğü üzere, etkileşimin fazla olduğu yerlere daha sık bir ağ örgüsü uygulanmıştır. Uygulanan sonlu elemanlar ağ örgüsü ne kadar sık olursa, gerçek çözüme o kadar yakın olmakta ve sık bir ağ örgüsü ise çözüm süresini, hesaplama boyutunu önemli oranda artırmaktadır.

2.4 Ansys Maxwell Programı

Ansys Maxwell programı ile istenilen problemlerin güvenli, verimli, kullanışlı elektromanyetik tasarımlar gerçekleştirme imkânı veren bir programdır. Maxwell 3D/2D olarak geçici manyetik çözüm, elektromanyetizma, manyeto statik, elektrostatik DA iletkenlik, kuvvet, tork, indüktans, empedans, kapasitans, direnç gibi olan parametreler için geçici çözüm hesaplamaları yapar. Lineer olmayan bir devreye ilişkin formülleri, alan-uzay modelleri daha sonra devre analizlerinde kullanılmak üzere alan parametrelerinden otomatik olarak oluşturulur. Ansys Maxwell’de seçtiğimiz materyale, geometriye ve istenilen çıkışa uygun olarak otomatik uygulanabilir bir ağ örgüsü (mesh) oluşturulur. Bu kanıtlanmış çözüm yöntemi veya teknik, yapıların karmaşıklığını ve sonlu elemanlar örgüsünü sadeleştirerek bütün seviyedeki çalışmalar için ileri sayısal çözümler yapılabilir. Bu Mesh tekniği yüksek doğrulukla hacimsel teknikleri kullanır (Ansys, 2012).

Ansys Maxwell programının özelliklerinin anahtarı, farklı tabanlı sistem simülasyonları içinde yüksek doğrulukta, hazır modeller oluşturabilmesidir. Bu güçlü elektromanyetik temelli tasarım akışını kullanarak, yüksek performanslı elektromekanik, mekatronik, güç elektroniği sistemlerini yüksek doğrulukla karmaşık devreler ile birleştirebilme imkânları sunmaktadır.

Ansys Maxwell kullanıcılarını çalışma alanlarına bağlı olarak üç grup altında toplayabiliriz,

- a) Genel Elektro-mekanik yani elektrik makinaları üreticileri, motor ve generatör üreticileri vb.
- b) Lineer ve rotasyonel donanım üreticileri ki bunlar tetikleme mekanizmaları, röle üreticileri gibi,
- c) Diğerleri yani sensör, transformatör, biyomedikal üreticileri gibi gruplayabiliriz.

Maxwell programının uygulama alanları çeşitlilik göstermektedir.

- Elektrik motorları, generatörler, çalıştırma-tetikleme mekanizmaları, mems (mikro elektromekanik sistemler)

- Transformatörler, IGBT'ler ve türevleri
- Bara, Busbar, Kablo, Hat uygulamaları
- Mıknatıslar, bobinler, sensörler
- İzolasyon çalışmaları, elektrostatik deşarj, biyomedikal gibi

uygulama alanlarına cevap verebilmektedir.

Ansoft Ansys ürün paketleri bir materyale, malzemeye ilişkin problemin çözümünde SEY ile maxwell denklemlerini çözmektedir. İlgili problemlerin yüksek frekans ile ilgili tarafında maxwell denklemlerinin integral formlarını çözmekte, düşük frekans ile ilgili tarafında ise maxwell denklemlerinin diferansiyel formlarını çözmektedir. Uygun sınır koşulları oluşturularak ve bu sınırları kullanarak sonlu bir bölgede çalışır. Problem çözümlerinde statik ve dinamik manyetik alan analizleri için kullanılır. Yüksek performanslı interaktif bir program olup, başka programlar ile birlikte çalışma özelliğine sahiptir. Yani ansoft ansys ürünleri eş zamanlı olarak çalışabilmekte, birinin sonuç değerleri diğer bir programın giriş değerleri olmaktadır.

Maxwell programı sonlu elemanlar yönteminde bir düğüm noktasında Maxwell denklemlerinden;

- Faraday'ın indüksiyon yasasını

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.39)$$

- Manyetizma için Gauss yasasını

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.40)$$

- Amper yasasını

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.41)$$

- Gauss yasasını

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.42)$$

denklemlerini çözerek sonuca ulaşmaktadır.

Maxwell üzerinde kendimiz geometri oluşturabileceğimiz gibi dışardan da başka bir proje amacı ile çizilmiş uygun formatta geometri çizimlerini Maxwell ortamına alabiliriz. Bu geometriler üç boyutlu veya 2 boyutlu oluşturulabilir. İki boyutlu XY Kartezyen düzleminde olabildiği gibi, z ekseninde simetrik (RZ düzleminde) olabilir (Ansys, 2015).

Program ile oluşturduğumuz geometriler üzerine nasıl analizler yapabileceğimizi seçebiliriz. Örneğin, elektrik alan çözümleri, manyetik alan çözümleri, zamana bağlı çözümler, frekansa bağlı çözümler, eddy current, transient çözümleri yapma imkânını verir. Maxwell programının diğer elektro manyetik çözüm yapan programlara göre en önemli özelliklerinden biri, kendinden uyarlamalı bir sonlu elemanlar ağ örgüsü (Auto-adaptive meshing) oluşturabilmesidir. Maxwell oluşturduğumuz geometriye, tüm geometriyi kapsayacak şekilde ilk ağı uygular. Daha sonra programda bizim belirlediğimiz “hata oranı (*percent error*)” değerine bakar. Eğer belirlenen hata payı, Maxwell’in geometriye uyguladığı sonlu elemanlar ağına göre belirlediği hata payından düşük ise Maxwell sonlu elemanlar ağ yapısını iyileştirme işine başlar ve uyguladığı sonlu elemanlar ağını daha sık örmeye başlar. Sonuçta ağ örgüsünün sonucunda elde ettiği hata oranı, belirlenen hata oranının altında kaldığında veya eşit olduğunda doğruca çözümü verir. Ayrıca ağı iyileştirme işinin kaç defa yapılacağını yani döngünün kaç defa olacağını seçebilme imkânı (*maximum number of the passes*) ve sonraki iyileştirme işinde sonlu elemanlar ağının yüzde kaçını iyileştireceğini belirlenebilir (*refine per passes*). Maxwell programının dikkat edilecek noktalarından biride elektrik alan veya manyetik alan etkileşiminin çok olduğu yere, alanlara daha sık bir sonlu elemanlar ağı uygulamasıdır. Maxwell’de çözümün elde edilme süresini etkileyen noktalardan biri, tüm geometriye uygulanan sonlu elemandır. Tüm geometriye hep aynı ölçüt ile üçgen veya piramit sonlu elemanlar ağı kullanılırsa çözüm süresi uzayacak, çözüm için kullanılan bilgisayarın RAM gibi özelliklerini zorlayacaktır. Maxwell’de asıl etkileşimin olduğu yerler sık sonlu elemanlar ağı ile etkileşimin az olduğu yerler ise seyrek sonlu elemanlar ağı ile örülmüştür ve böylece çözüm süresini kısaltma yönünde etki edilmiş olunur. Maxwell işlem akış diyagramı aşağıdaki şema ile gösterilmiştir. Maxwell iki boyutlu geometrilerde üçgen sonlu elemanlarını, üç boyutlu geometrilerde ise piramit sonlu elemanlarını kullanır. Bu tanımlanmış sonlu elemanları Maxwell’de değiştirme seçeneği bulunmamaktadır. Maxwell hata fonksiyonlarını Possion denkleminde enerji fonksiyonu çıkartır, bunu girdiğimiz hata oranına veya altına sıfıra yaklaştırmaya çalışır. Bu şekilde hata oranını minimize eder. Maxwell’de çizim özellikleri yardımı ile kendi geometrilerimizi

oluşturabileceğimiz gibi, Maxwell içinde tanımlı olan örneğin transformatör çekirdeği, elektrik motorları, bunlara ait stator, rotor, sargı gibi özellikleri ve diğer özellikleri tanımlı olan tablolarda, değerleri girilerek ilgili makinamızı Maxwell ortamında kolaylıkla oluşturabilme imkânı sunmaktadır. ANSYS Maxwell’de çalışma şeklini,

- Optimizasyonu yapması, gerekli olan düzeltmelerin hassasiyetin, parametrik, optimetrik ve istatistiksel analizlerin eklenmesi,
- Sistem simülasyonu, burada kullanılan simplorer yüksek performanslı sistem dizaynı modelleme, analiz, optimizasyon içindir,
- Sistemin çözümünün oluşturulması,
- Devre modelinin otomatik olarak oluşturulması

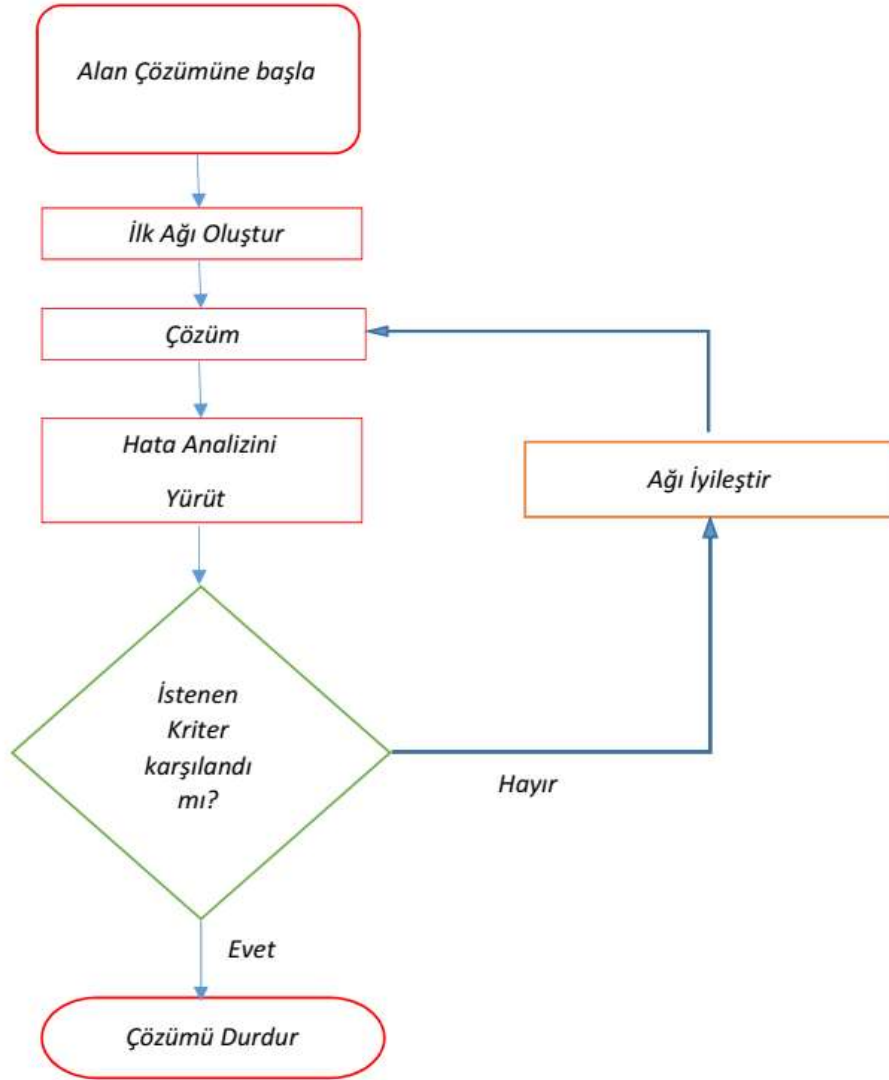
olarak tarif edebiliriz (Ansys, 2012).

2.4.1 Ansys Maxwell ile Ansys Rmxprt Birleştirerek En Uygun Elektrik Makinası Tasarımı Oluşturmak

Elektrik makinaları, motorlar, generatörlerin tasarımında Maxwell programı ANSYS RMxprt ile çalıştırılabilir. ANSYS RMxprt kalıp tabanlı bir yardımcı programdır. Bu program paketi piyasa için en verimli, düşük maliyetli elektrik makinası tasarımında müşterinin veya tasarımcının isteklerini karşılamaktadır. ANSYS RMxprt, tasarımda oluşturulan tablolarda veya istenilen çıktıların elde edilmesinde, tasarım parametrelerine kolaylıkla ulaşmayı sağlar ve burada yapılacak değişiklik ile istenilen değerlerin elde edilmesinde kolaylık sağlar. Tasarım dokümanlarında ilgili bütün girişlerin ve hesaplanmış değerler listelenir. Grafiklerde tork, akım, gerilim ve sarımlara ilişkin detaylar bulunur. Bunlar Excel formatında kullanıcının kolaylıkla inceleyebileceği düzendedir.

RMxprt’ta tasarımı yapılacak makinalara özel, çizim parametrelerinin girileceği şablonlar büyük kolaylık sağlamaktadır.

- * Rotorlara ait özellikler
- * Statora ait özellikler
- * Oyuklara ait özellikler
- * Çalışma sistemine ait özellikler
- * Sürücü devreleri gibi başlıklar altında makinaya ait özel tasarım parametreleri girilerek istenilen makinanın modelini oluşturma imkânı sunmaktadır.



Şekil 2.29. Maxwell sonlu elemanlar ağ çözümü akış diyagramı (Orijinal)

ANSYS Rmxprt tasarımı yapılabilinecek makinalar çeşitlidir, bunlar kolaylıkla makine giriş şablonu üzerinden seçebilme imkânı sunar. Bunlar;

- Asenkron makinalar
- Tek fazlı motorlar
- 3 fazlı motorlar
- Senkron makinalar
- PM makinalar
- Çıkı kutuplu senkron makinalar
- Yuvarlak rotorlu senkron makinalar

- DA motorları / generatörleri
- Universal motorlar

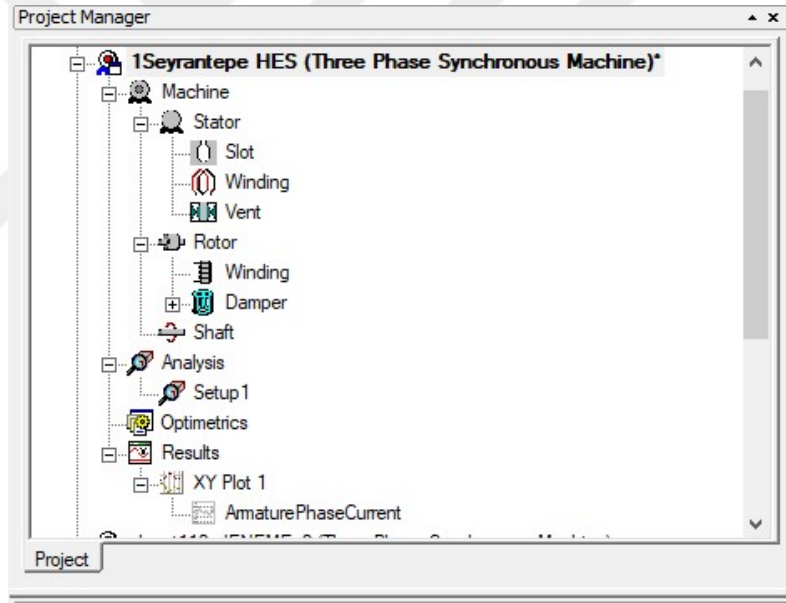
gibi birçok seçenek sunmaktadır.

Program çıktısı olarak dizayn edilecek makinaya ilişkin sonuçlar elde edilebilir. Bunlar akım, gerilim, tork, hava aralıklarındaki akı değişimi vb. değerler kolaylıkla elde edilebilir. Burada tasarımda modelleme için kullanılan farklı yardımcı editörler, ara yüzler bulunmaktadır. Kesit editörleri, ANSI/IEC uygun kablo kütüphanesi, grafiksel sargı editörleri gibi modelleme için kullanılan farklı yardımcı editörler, ara yüzler bulunmaktadır. Rmxprt üzerinde tasarımı yapılmak istenilen makina seçilerek, seçilen makinaya ait temel arayüz otomatik olarak oluşur. Temel boyutlandırma parametreleri (stator boyutları, rotor boyutları, sargı parametreleri, vb.) girilerek analiz yapmasının yanı sıra bazı temel kısıtlar (doldurma faktörü, sipir sayısı, iletken çapı, oyuk şekli ve oyuk boyutları) altında uygun tasarıma ulaşılabilmektedir. Böylece elektromanyetik tasarıma geçilmeden tasarlanan makinanın tahmini performans analizi gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, elde edilen sonuçlar makinanın uygulamadaki performans sonuçlarını tam anlamıyla yansıtmamaktadır.

Çünkü tasarlanan makinanın gerek nüve (ve/veya mıknatıs malzemenin lineer olmayan davranışı) materyalinin lineer olmayan davranışı gerekse, iletkenlerde meydana gelen deri-yakınlık etkisi ve diğer faktörler analitik çözümü gerçekleştirilen makinanın nümerik olarak çözülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi nümerik çözüm için kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Rmxprt ile analitik analizi gerçekleştirilen makina 2D/3D (iki boyutlu/üç boyutlu) sonlu elemanlar çözümü için otomatik olarak tasarım parametreleri ile geçici zaman analizi Maxwell 2D/Maxwell 3D ara yüzüne aktarılır. Bu ara yüzde temel düzenlemeler (nüve kaybı/eddy kayıplarının da hesaplanmasının kabulü) yapılarak çözüm gerçekleştirilir. Eğer kullanıcı sürekli hal tasarımı yapmak istiyor ise Maxwell 2D/ Maxwell 3D aktarılan kısımdan çözüm tipi kısmından sürekli hal (*magnetostatic*) çözüm tipini seçmelidir. Eğer yine kullanıcı tasarlanan makinanın girdap akımları veya elektrostatik çözümlerini gerçekleştirmek istiyor ise yine çözümden ilgili seçeneği seçerek gerekli düzenlemeler ile tasarımı gerçekleştirebilir (Ansys, 2012; Fenercioğlu, 2006).

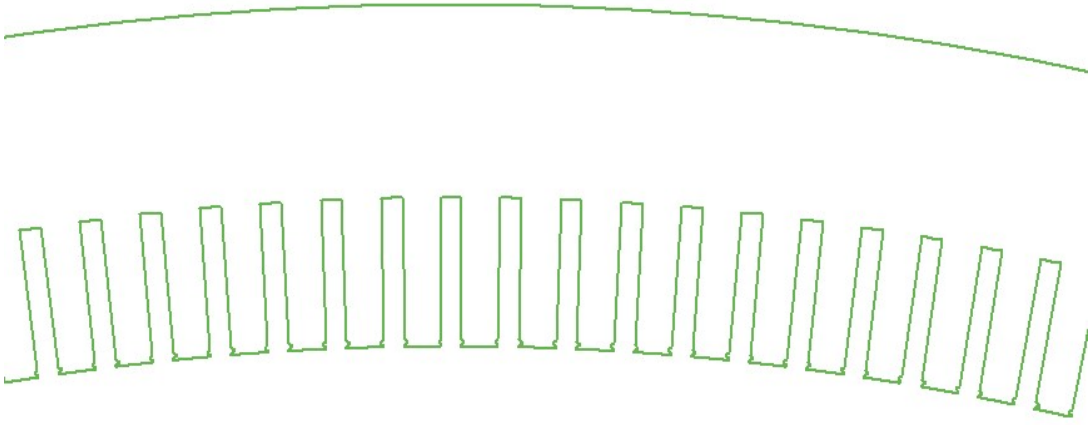
2.4.2 Ansys Rmxprt ile Bir Generatör Modelinin Oluşturulması

Ansys Rmxprt ile çözümü yapılacak elektrik makinasına ilişkin istenilen bilgiler tablo doldurulur gibi girilerek elektrik makinası oluşturulur. Seçilen makinanın girilmiş olan verileri ile ilk analiz işlemleri oluşturulup değerler elde edilebilir. Daha sonra analiz sonucuna göre, Rmxprt tasarımında Maxwell'e geçiş sağlanarak iki boyutlu veya üç boyutlu makine oluşturulup analiz tipine göre çözümler yapılır. Kırk kutuplu, 11 KV uç gerilime sahip, 3 fazlı, çıkık kutuplu bir SG modelinin oluşturulması için RMXprt yazılımında istenilen veriler girilip generatörün modeli oluşturulmuştur. Öncelikle RMXprt ikonundan girilerek, modellenmek istenilen makine çeşidi seçilir. RMXprt çok çeşitli makine tasarımına, değişik tipteki motor, generatör modellemesine imkân tanımaktadır (Rmxprt, 2012).



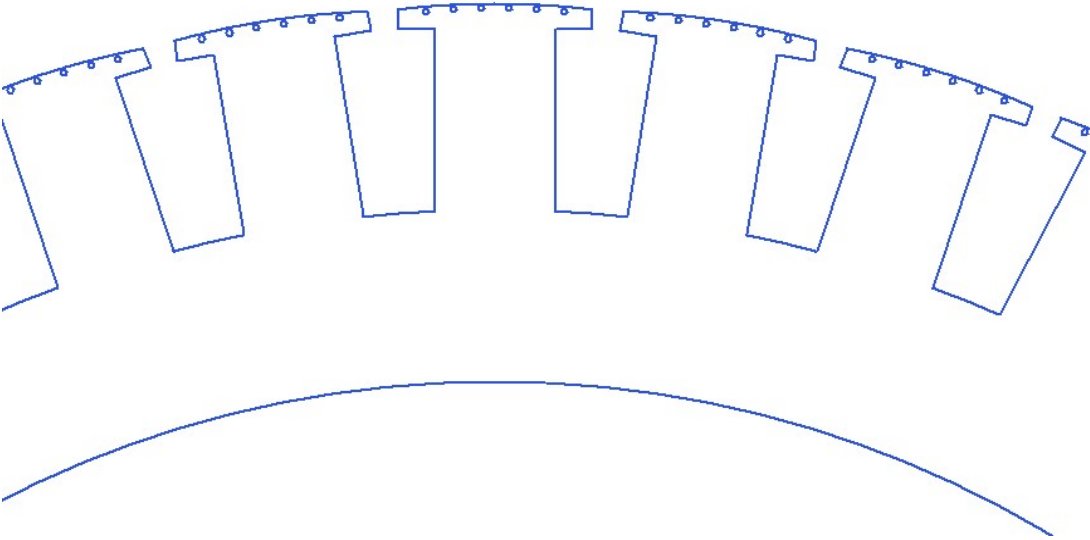
Şekil 2.30. Rmxprt ana menü

Bu kısımda bize uygun, çözümü yapılacak olan makine seçilir. Açılan ana menü kısmından ilgili makineye ilişkin rotor, rotor sargı, stator, stator sargı, oluk, havalandırma yapısı, kutup bilgileri ve bunlara ait istenilen bilgiler girilir. Yine rotor sekmesi altında rotora ilişkin kutup, malzeme, alan sargılarına ilişkin istenilen bilgiler girilir. Girilen değerlere bağlı olarak ilgili makine görseli oluşur ve bunu ilgili pencereden gözlenebilir.



Şekil 2.31. Rmxprt stator çekirdek yapısı

Şekil 2.31 ve 2.32’de ek tablodaki değerlere göre modellenen stator ve rotor yapısı görülmektedir. Şekil 2.33’ te ise makinanın genel yapısı verilmiştir.

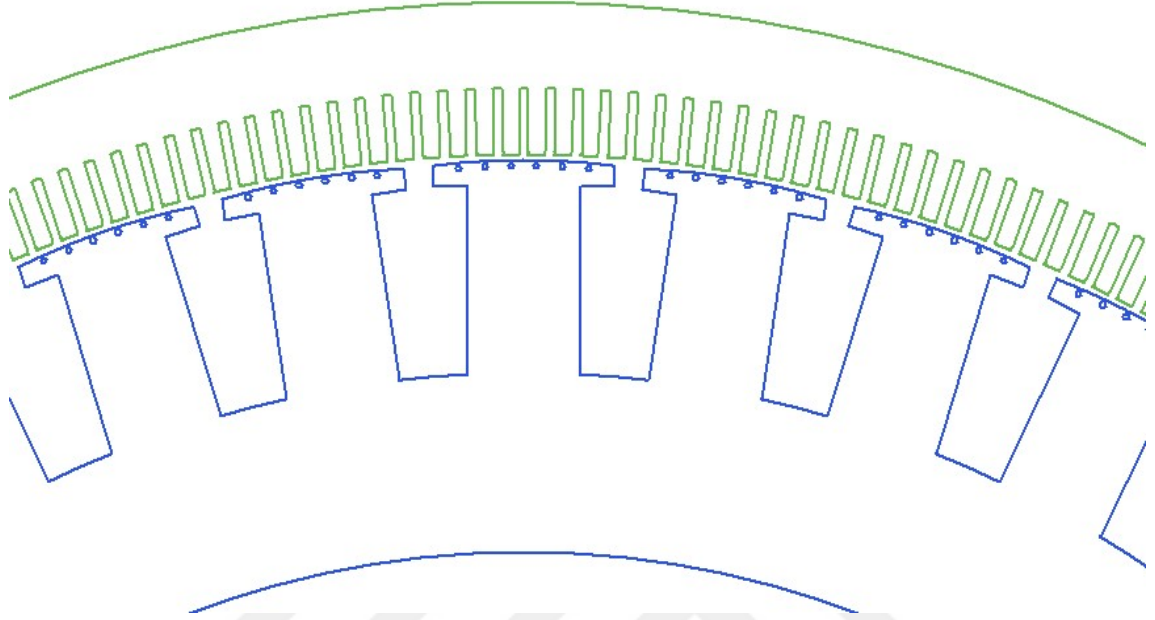


Şekil 2.32. Rmxprt' ta modellenen rotor yapısı

Rmxprt programıyla oluşturulan generatör tasarımı, Maxwell 2D’ye geçişte daha önceden de bahsedildiği üzere farklı çözüm tiplerine gidilebilmektedir. Bunlar;

- Elektrostatik
- Manyetostatik

- Girdap akımları
- Geçici rejim analizleridir.

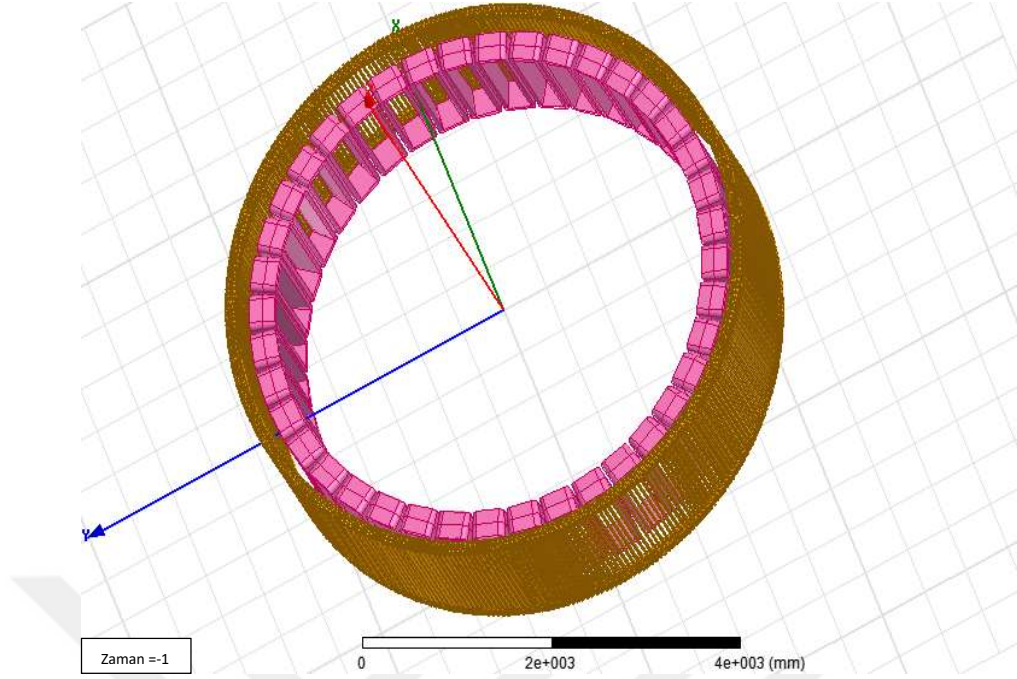


Şekil 2.33. Rmxprt generatör yapısı görünüşü

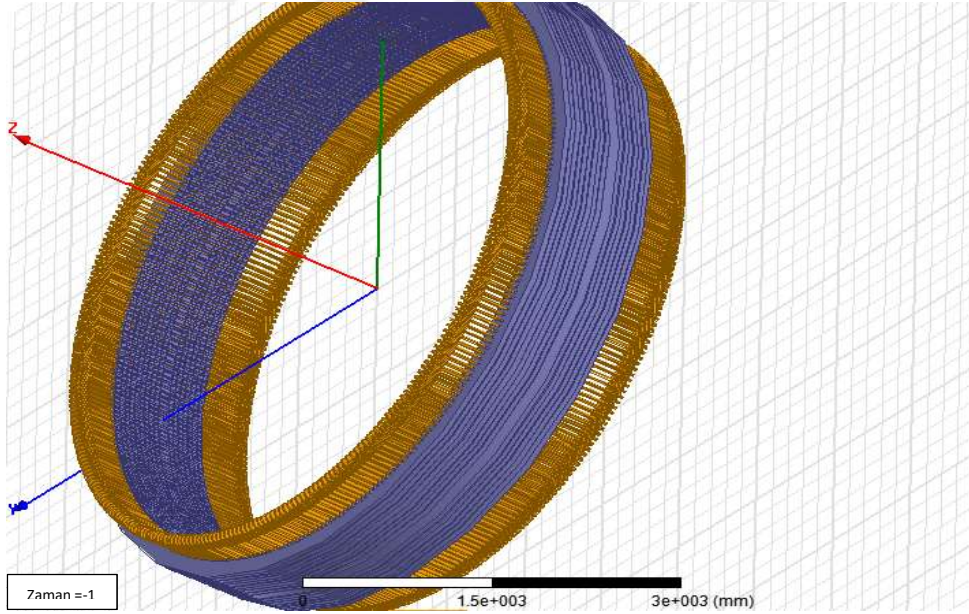
2.4.3 Maxwell 2D/3D Benzetim ve Analiz

RMxprt ile yardımcı ile oluşturulan generatörün maxwell 2D/3D 'de oluşturulmasında üste belirtilen çözüm tiplerinden biri seçilerek çözüme gidilir. Maxwell 2D/3D ilgili çözüm tipini, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar kullanarak analiz eder. Benzetimi yapılan generatöre ilişkin bilgiler ek kısmında verilmiştir. Maxwell 2D/3D ile yapılan analiz çalışmalarında özellikle uygulanan ağ örgüsüne, istenilen çözüm doğruluk oranına, generatörün yapısal özelliklerine, yapının karmaşık oluşu gibi nedenlerden dolayı çözüm uzun zaman almaktadır. Özellikle bu çalışmalarda seçilen bilgisayar yapısının, performansının üst sınıfta olması, istenilen çözümlere ulaşmada daha kolaylık sağlamaktadır. Üç Boyutlu tasarımı yapılan generatöre ilişkin ana parçalar, rotor, stator, stator sargıları, rotor alan sargıları, amartisör sargıları ve olukların yapısı aşağıda verilmiştir.

Bu yapıların görselleri, anlaşılır çözümlerin uygulanması, imalattan önce teçhizatın görselinin elde edilmesi gibi imkânlar sunmaktadır. Şekil 2.34 ve 2.35'te üç boyutlu modeli oluşturulan SG'nin stator çekirdeği, sargıları ve alan sargıları modeli verilmiştir.



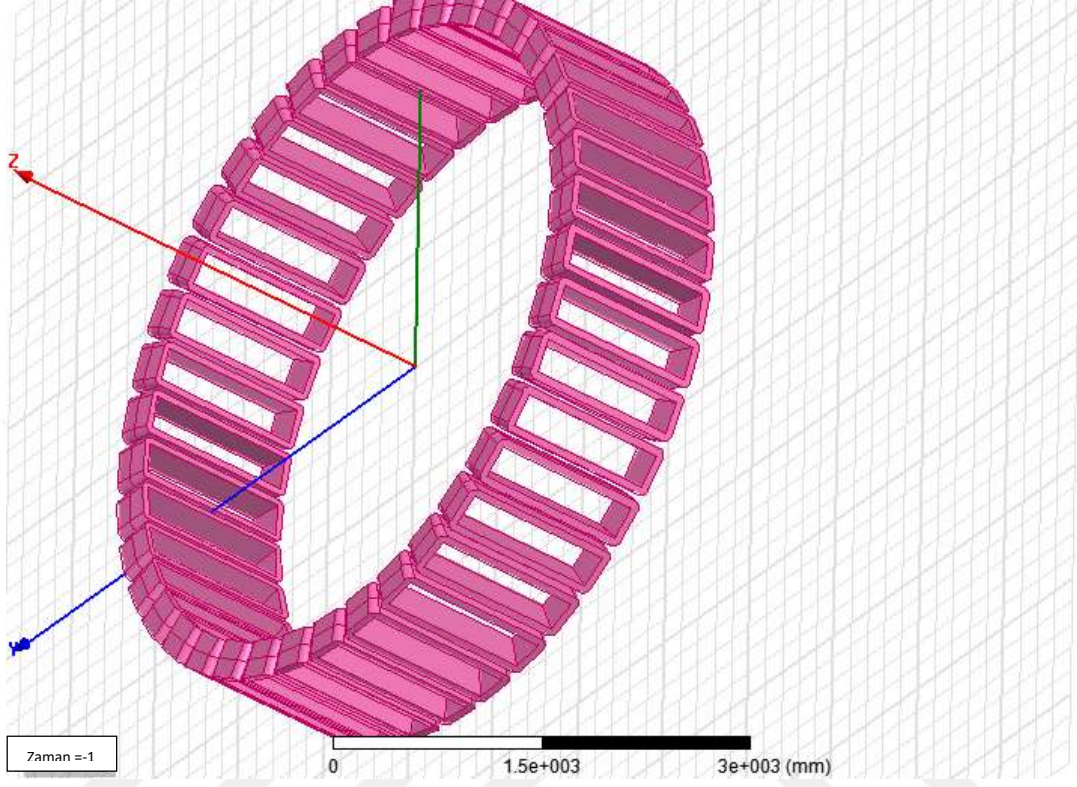
Şekil 2.34. Maxwell 3D stator sargıları



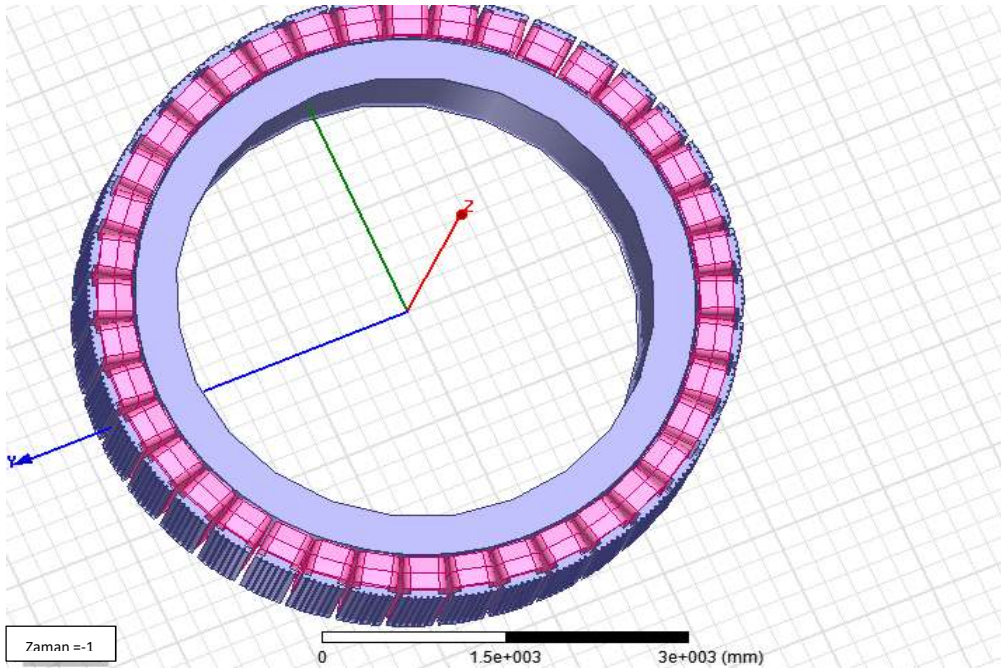
Şekil 2.35. Stator çekirdeği ve stator sargıları

Şekil 2.36, 2.37 ve 2.38’de alan sargıları, kutuplar, amartisör sargıları ve bunların kutuplar ve rotor üzerindeki üç boyutlu model üzerindeki yerleşimleri verilmiştir. Bu yapıların büyük olması yapılacak üç boyutlu analizde çözüm süresinin uzun olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle çözüm çalışmasında istenirse makine eşdeğer parçalara ayrılarak tek bir parça üzerinde analiz yapıp, diğer parçalarında bulunan değerlere sahip olduğundan

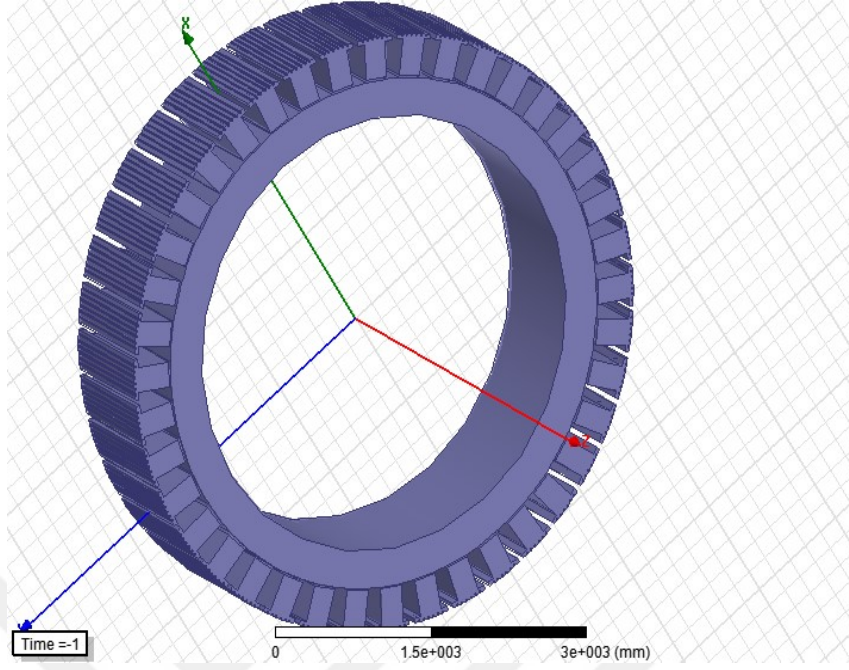
özüm daha kısa zamanda çözebiliriz. Şekil 2.39’ da ise stator yapısı ve oluk yapısı verilmiştir.



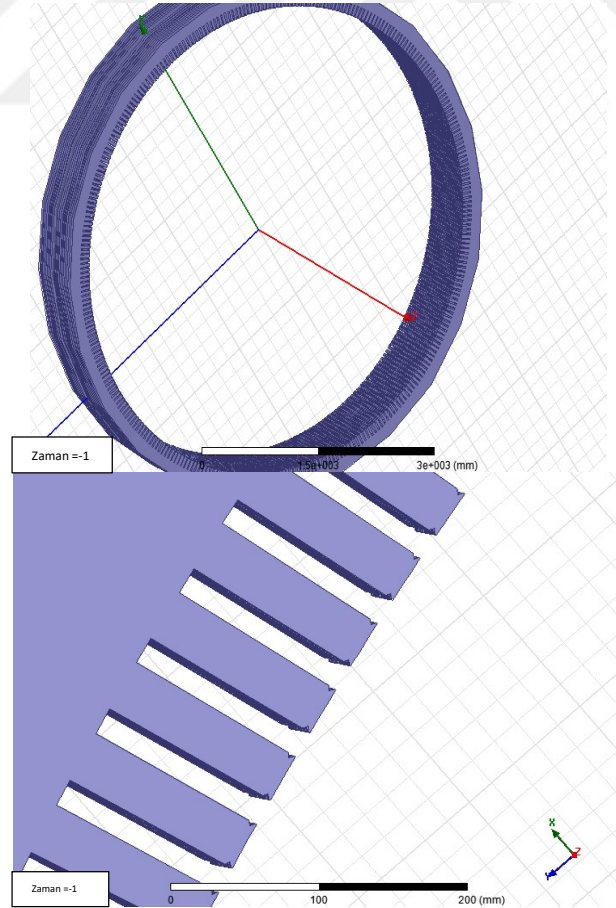
Şekil 2.36. Generatör alan sargıları



Şekil 2.37. Generatör rotor, kutuplar ve alan sargıları



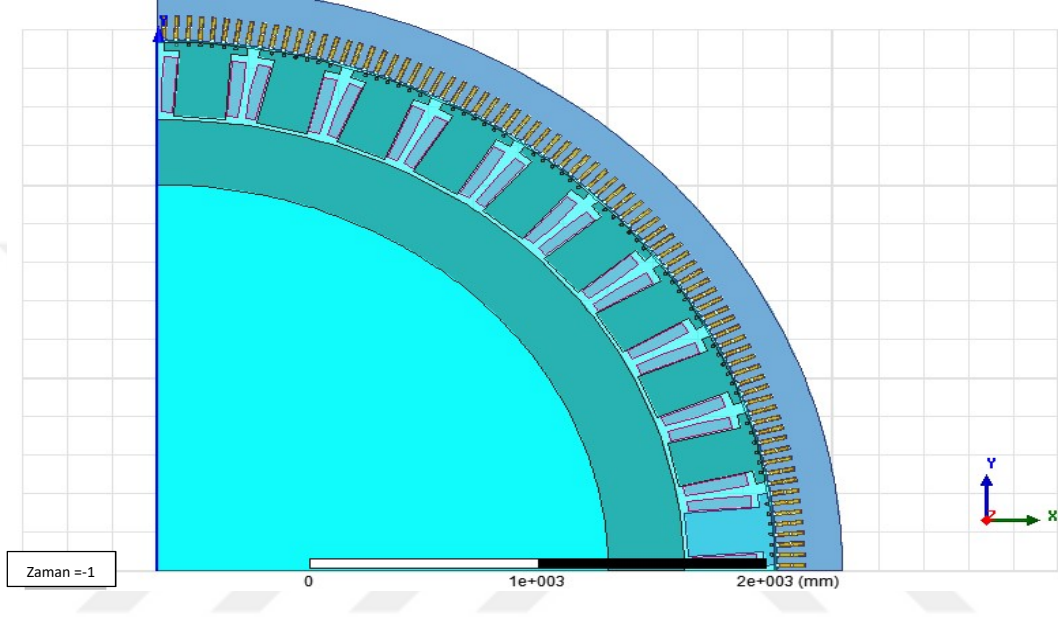
Şekil 2.38. Generatore ait rotor yapısı



Şekil 2.39. Stator çekirdeği ve oluk yapısı

2.4.4 Maxwell Çözümleri

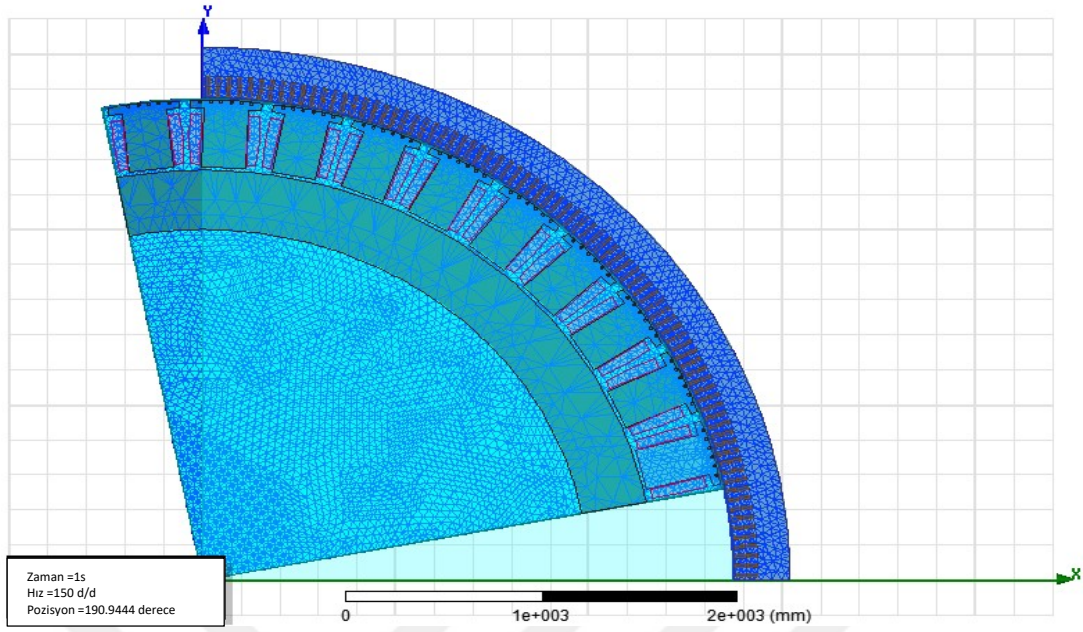
Rmxprt'tan, Maxwell 2D/3D geçici rejim çözümüne geçerken gerekli ayarlamaları otomatik şekilde yapar. Bunlar sınır koşulları, ikaz yapısı, ağ örgüsü değerlerini otomatik olarak belirler. İstenilirse ilgili sekmeler üzerinde değişiklik yapıp analizler değiştirilir.



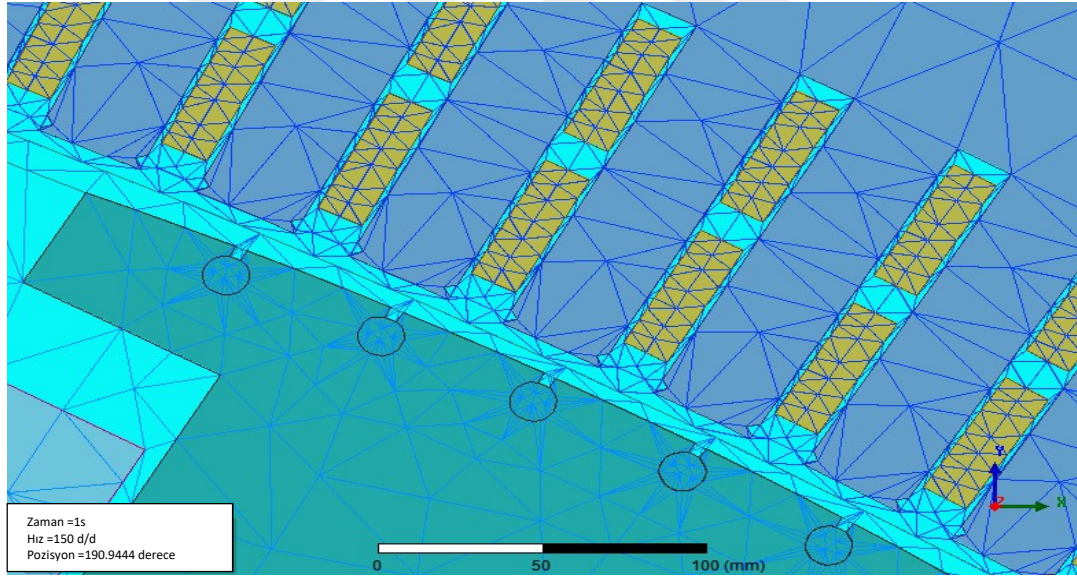
Şekil 2.40. Generatör Maxwell 2D modeli

Şekil 2.40'da Rmxprt'tan Maxwell 2D'ye geçirilen modellemiş olduğumuz generatörün yapısı verilmiştir. Maxwell programı model üzerinde istenilen çözümleri elde edebilmek için ilgili alanlar boyunca sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2.41'de görüldüğü üzere etkileşimin fazla olduğu noktalara Maxwell programı daha sık bir ağ örgüsü uygulamıştır. Şekil 2.42'de hava aralığındaki üçgen sonlu eleman ağ örgüsü verilmiştir. Maxwell programı iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlarını, benzetiminde kullanılan donanım yapısına göre uygular.

Yapılan analiz sonucunda faz akımı 1590 A'lık akım değeri olan generatörün, transient akım değerleri elde edilmiştir. Maxwell 2D elde edilen değerler tepe değerlerdir. İlk başta oluşan akım değeri nominal değerın yaklaşık olarak 3.125 katına denk gelmektedir.

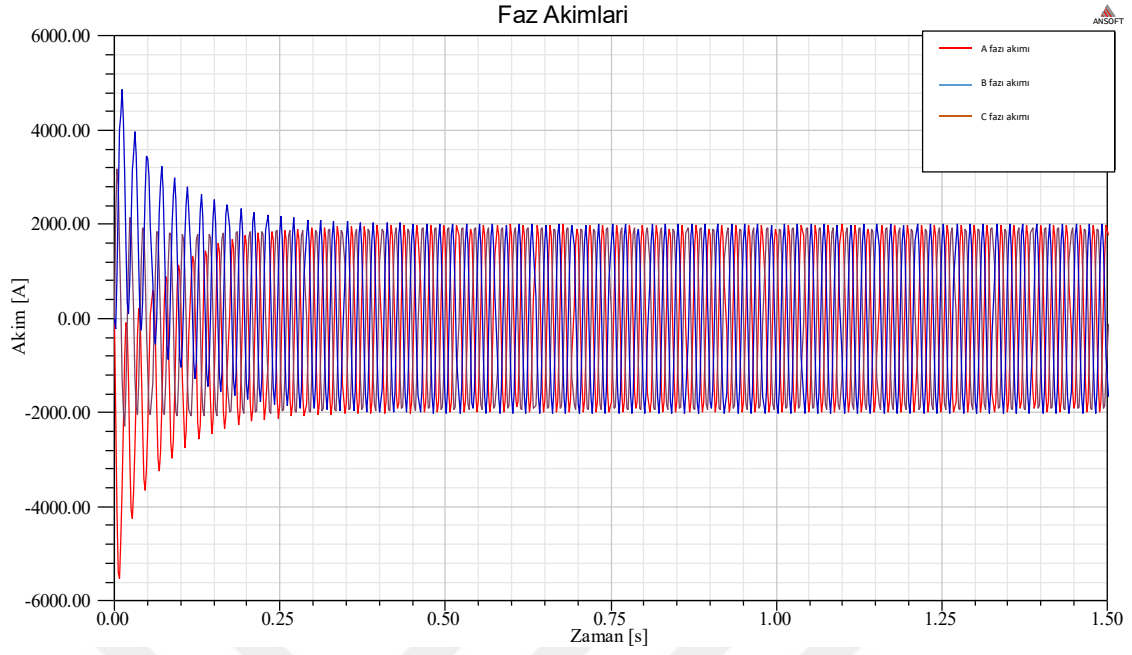


Şekil 2.41. Generatör modeline uygulanan sonlu elemanlar ağ yapısı

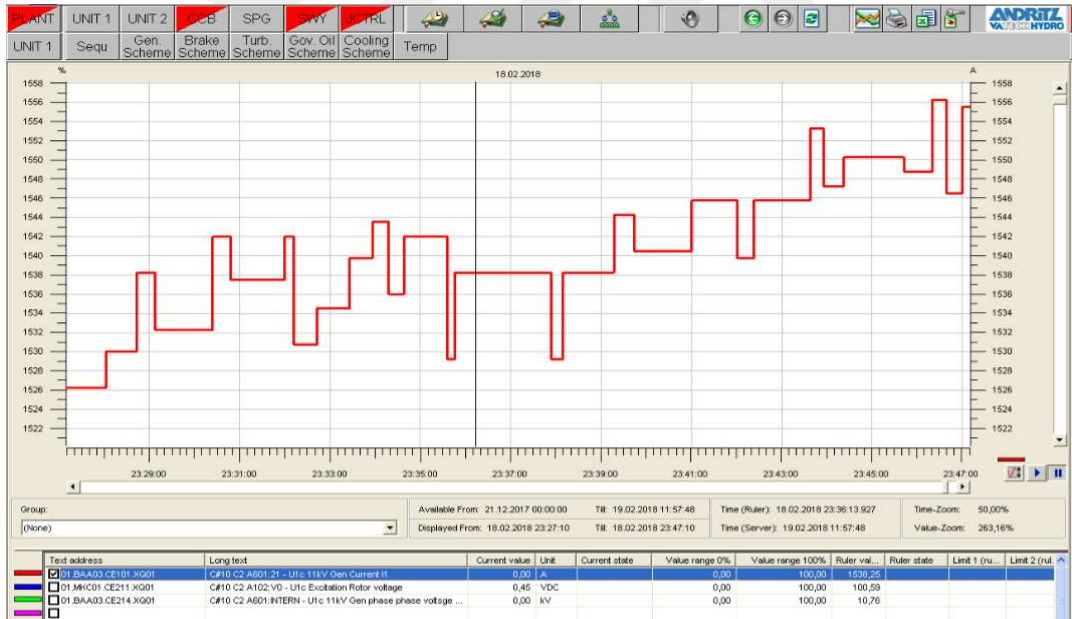


Şekil 2.42. Hava aralığı sonlu elemanlar ağ örgüsü

Şekil 2.43’de generatöre ait Maxwell 2D benzetim üzerinden alınmış akım grafiği verilmiştir. Generatörün ilk çalışma anının 1.5 saniyelik kısmında verdiği akım tepkisi. İlk 0,25 saniyede kararsız akım değerlerine ulaşmış, 0,25 saniyeden sonrada kararlı duruma geçmiştir. Şekil 2.44’de ise modellenen generatörün santral SCADA sisteminden alınmış akım grafiği verilmiştir.

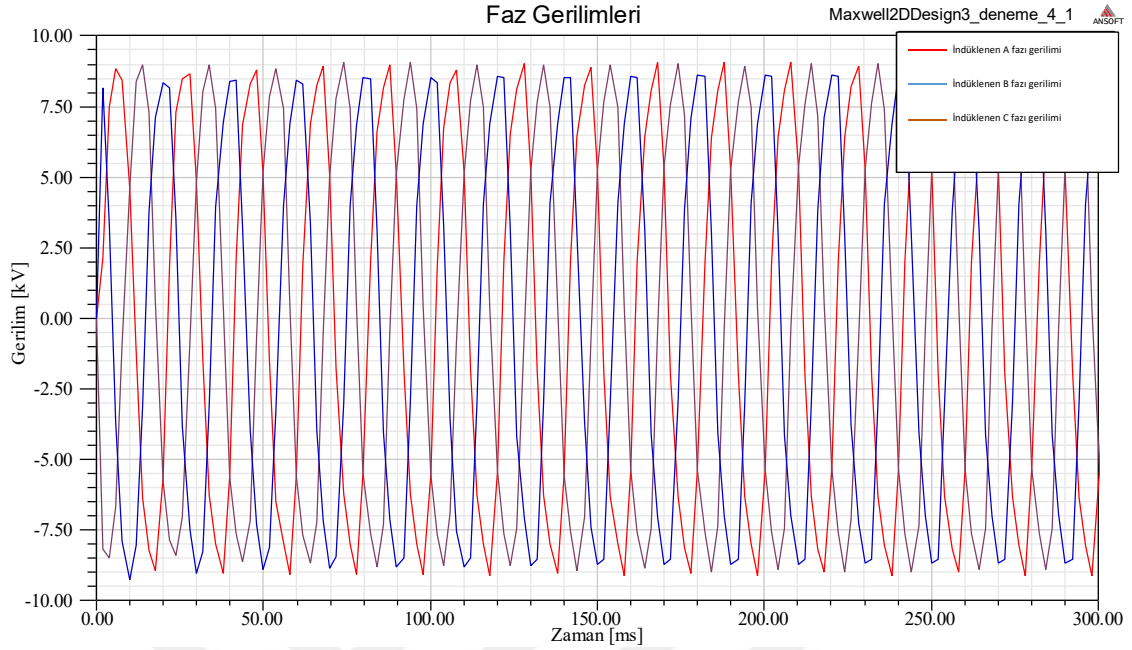


Şekil 2.43. Geçici rejim akım değerleri

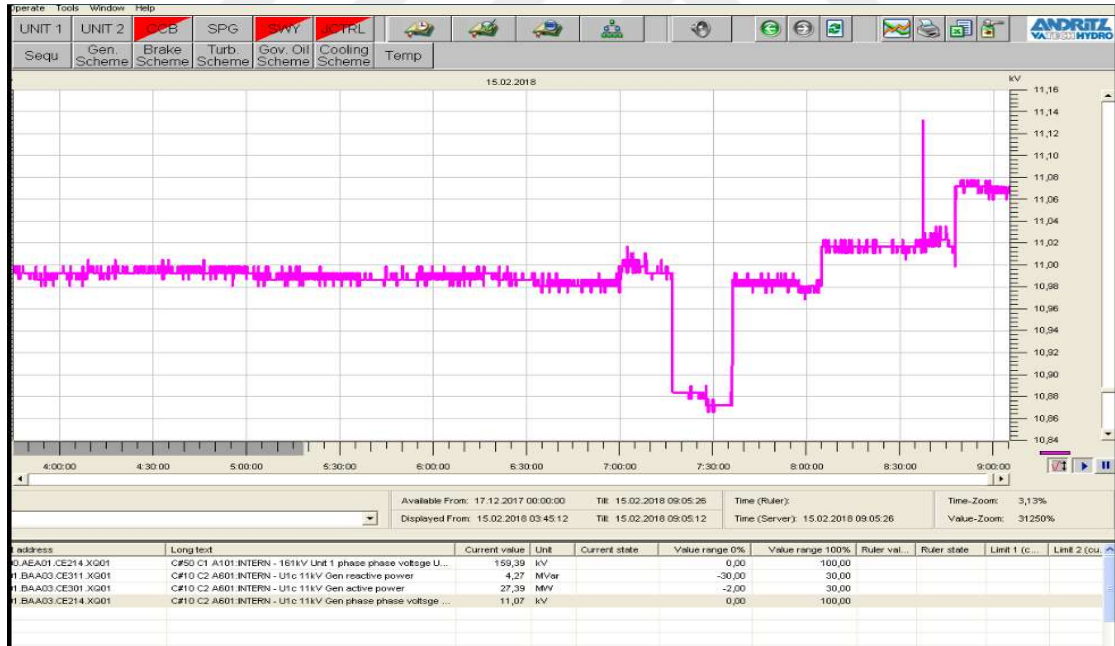


Şekil 2.44. SCADA generatör akım grafiği

Modellenen generatöre ait indüklenen faz gerilimleri şekil 2.45'te verilmiştir. Modellenen generatör gerilim değeri fazlar arası gerilim 11 kV'tur. Model sonuçları ise faz-nötr geriliminin tepe değeri olarak elde edilmektedir. SCADA sisteminden alınan generatöre ait gerilim değeri ise 2.46'da verilmiştir. Bu gerilim değeri 11kV civarında dalgalanmaktadır.

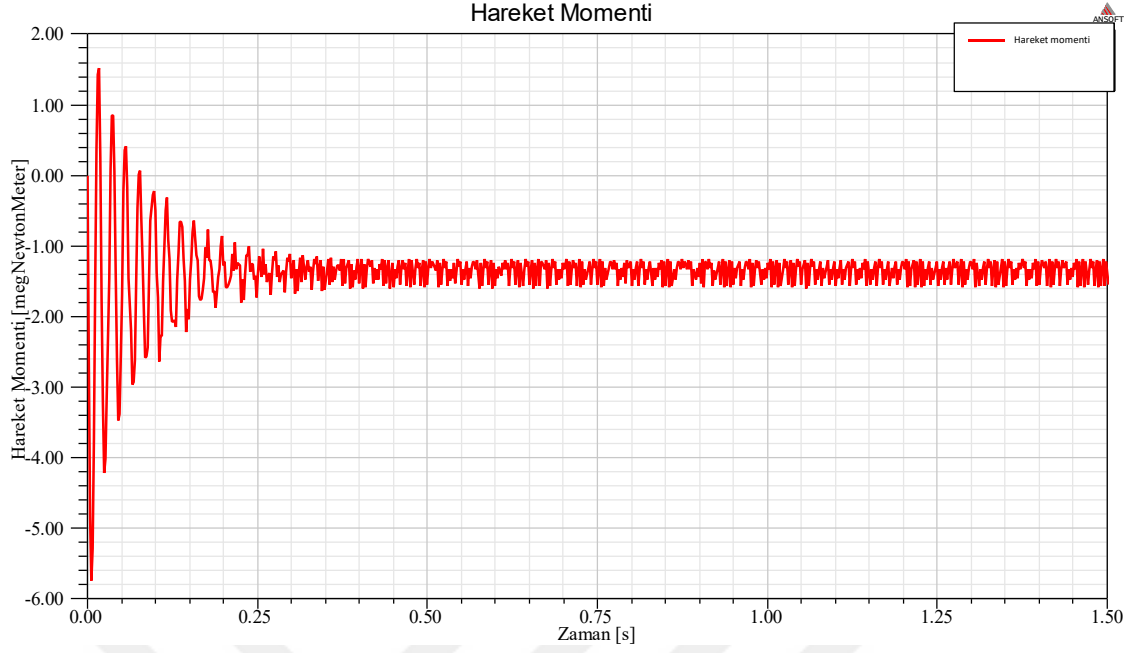


Şekil 2.45. Geçici rejim faz gerilimleri



Şekil 2.46. SCADA generatör Vab gerilimleri

Generatöre ait yükte çalışma sırasındaki fazlar arası çıkış gerilimi 11 kV'tur ve grafikteki dalgalanmalar reaktif güç kontrolüne bağlıdır. Generatörde çıkış gerilimi kontrol edilerek reaktif güç dengeleme sistemine uyulmaktadır. Aşırı ve düşük ikazlama ile sisteme reaktif güç verilmekte veya alınmaktadır. Şekil 2.47'de generatör momentleri verilmiştir.

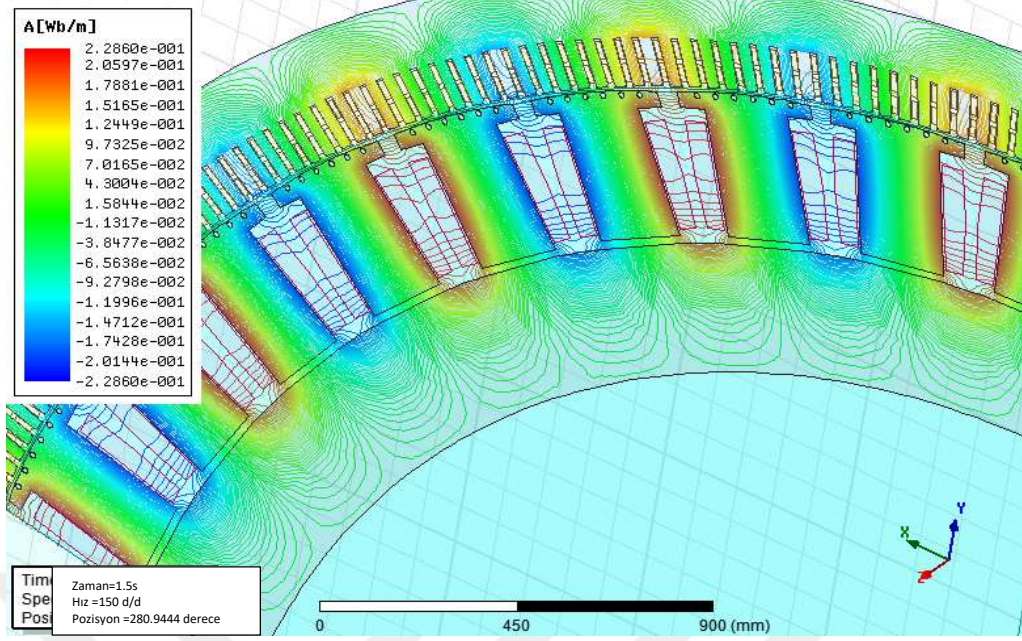


Şekil 2.47. Geçici rejim moment grafiği

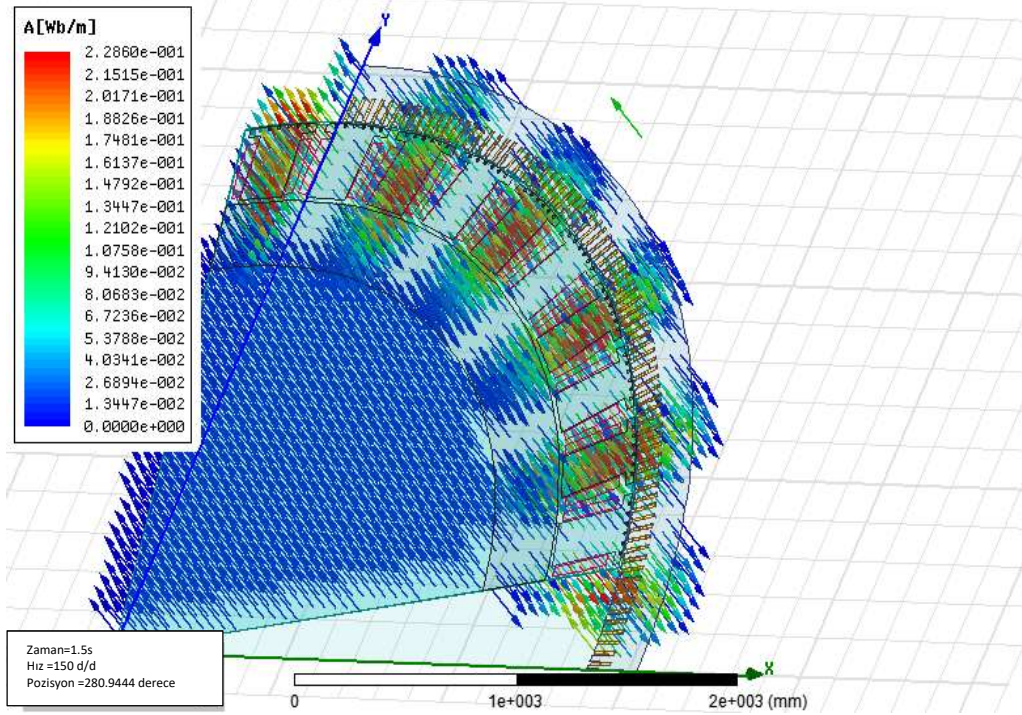
Generatörün ilk uygulanan kuvvet ile kararsız bir moment üretmekte, yaklaşık 0.25s’den sonra ise kararlı hale gelmektedir. Maxwell benzetim çalışmasında alınan değerler ilgili akım veya gerilim değerinin, faz-faz, faz-nötr değerlerinin tepe değerleridir. Şekil 2.48 akı çizgilerinin dağılımı ve vektörel gösterimi verilmiştir. Şekil 2.49’da manyetik alan şiddetinin dağılımı ve vektörel gösterimi verilmiştir.

Maxwell programı üzerinden, tanımlanan hareketli kısma istenilen ölçüde hareket etmesi sağlanarak, manyetik alan, akı değişimi, manyetik alan şiddeti ve diğerlerin bu harekete bağlı değişimlerini görebiliriz. Buda soyut olan kavramların, bir görüntü üzerinden anlaşılmasına kolaylık sağlamaktadır. Bu elde edilen grafikler üzerinde, programın sağlamış olduğu grafik editörü üzerinden istenilen bölgenin veya tamamı üzerinde istenilen çalışmalar yapılabilmektedir.

Maxwell’de modellenen generatörün stator dış çapı 6000 mm olduğundan, dört eş parçaya bölünerek bir parça üzerinde çalışma yapılmıştır. Programdaki bu özellik daha karmaşık olan yapıların analizlerinde kolaylık sağlamaktadır. Bu tür ayrıştırma yine kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir (Ansys, 2012). Modellenen generatöre ilişkin katalog değerleri ek tablo 1.1’de verilmiştir. Ayrıca bu veriler generatörün işletmede olduğu sürelerde grafiksel olarakta verilmiştir.

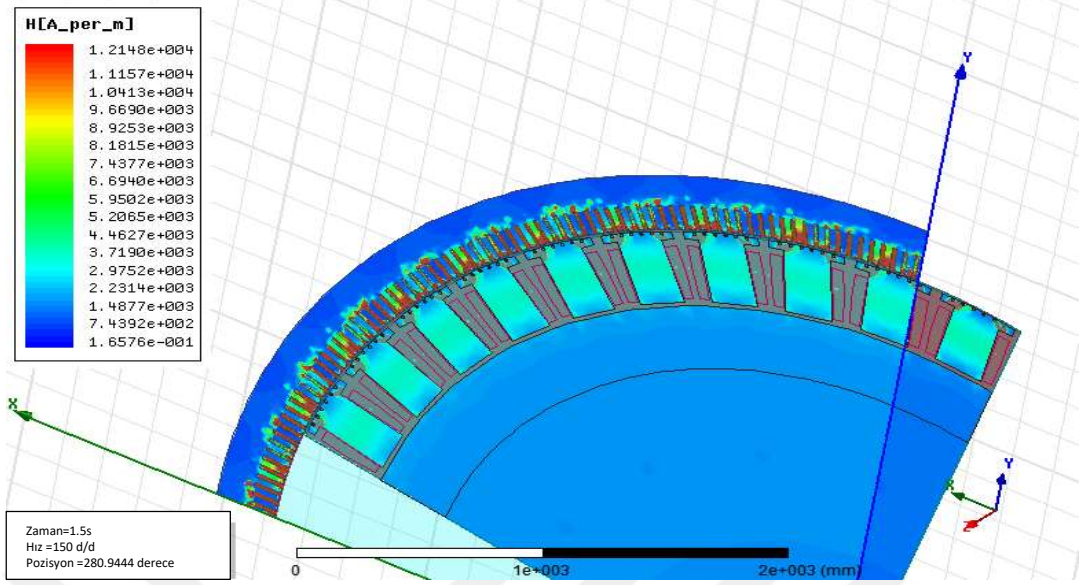


(a)

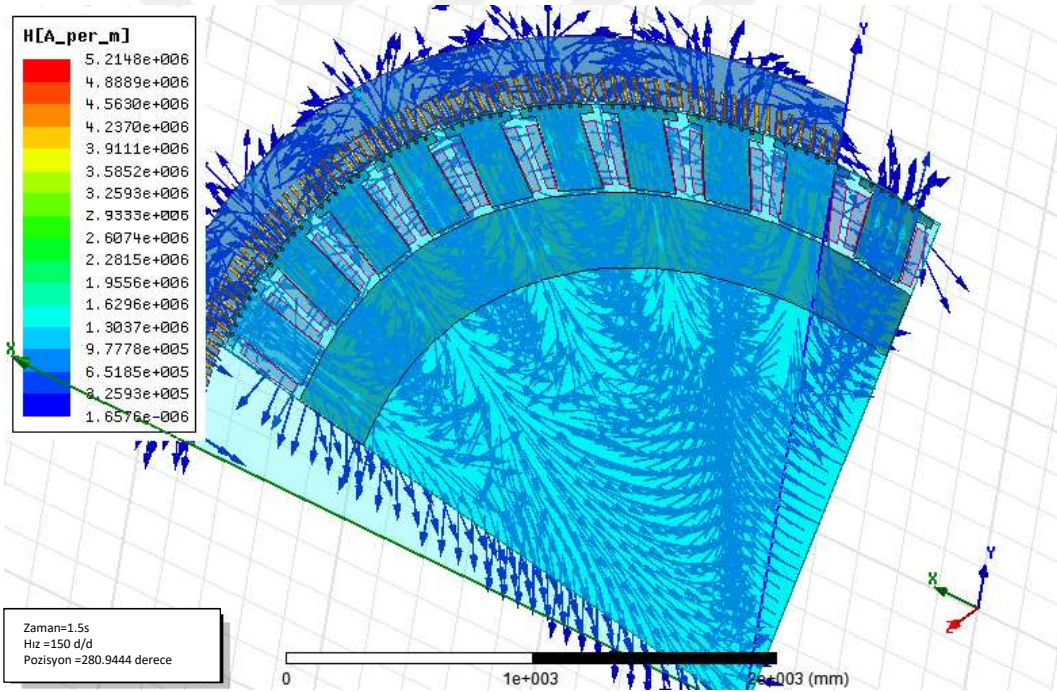


(b)

Şekil 2.48. (a)- Akı çizgileri (b)- Akı vektörel değişimi



(a)

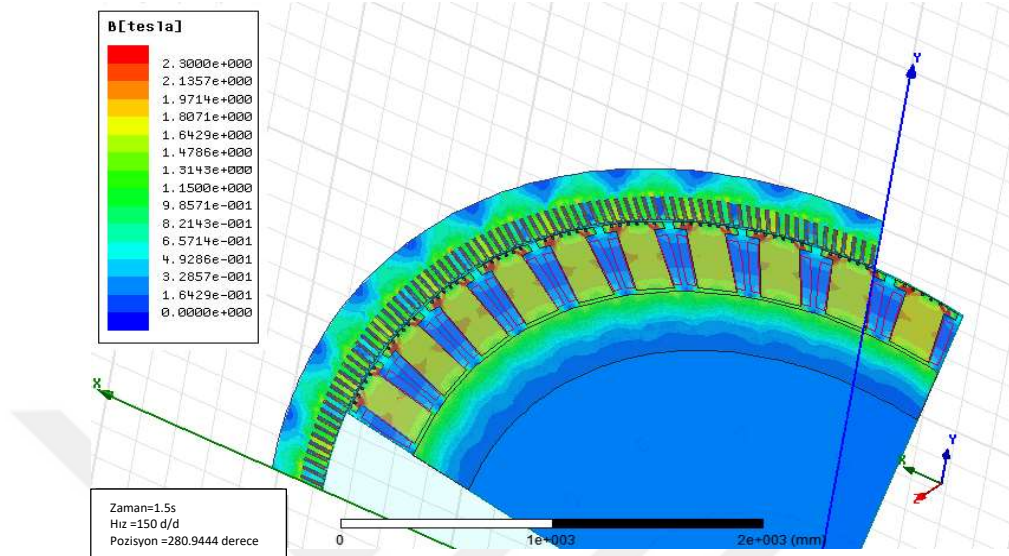


(b)

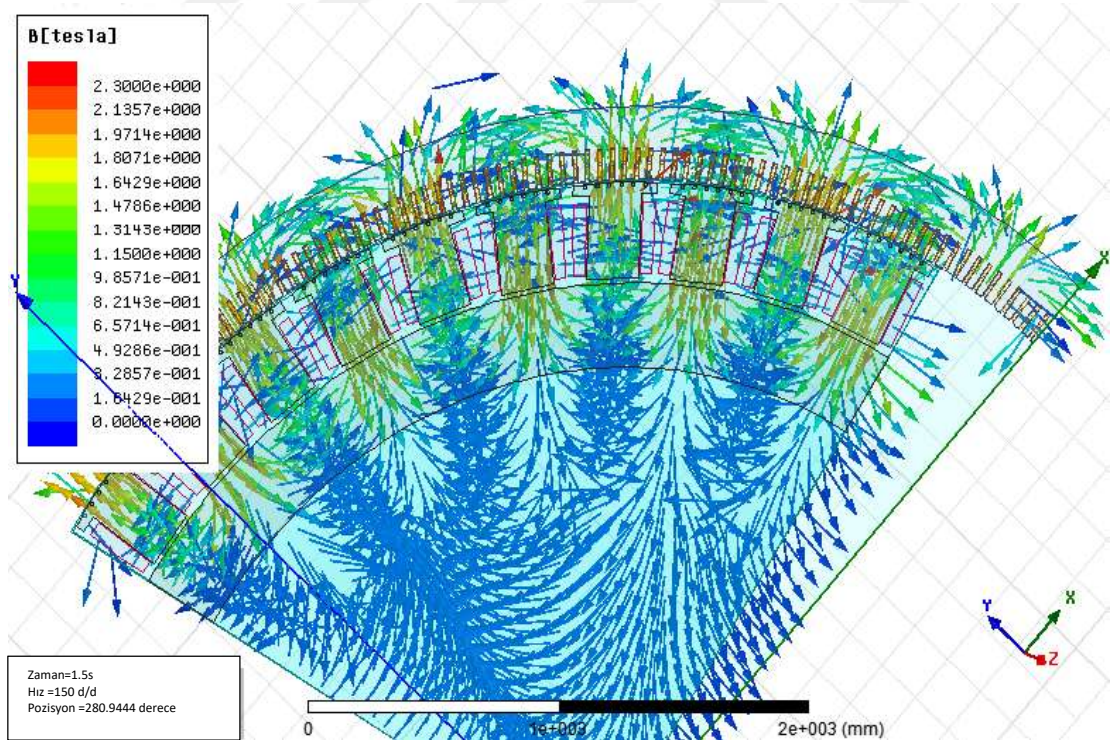
Şekil 2.49. (a)- Manyetik alan şiddeti (b)- Manyetik alan şiddeti vektörel değişimi

Benzetimi yapılan generatöre ait akı değişimi, akı yoğunluğu vektörel değişimleri şekil 2.50’de verilmiştir. Yaklaşık 1.8 Tesla’lık bir maksimum akı değişimi olduğu görülmüştür. İndüklenen generatör geriliminin hesaplanabilmesi için hava aralığındaki akı

yoğunluğu değerlerinin bilinmesi önemlidir. Sargı oluklarına rotor kutupları kısımlarında en yüksek değerini almaktadır.

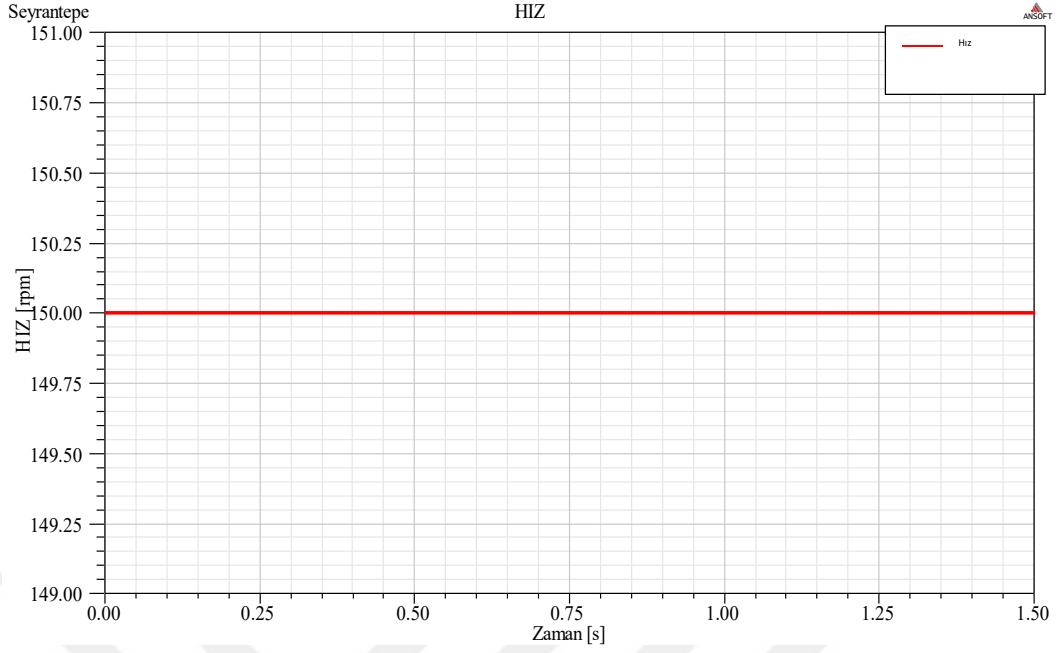


(a)

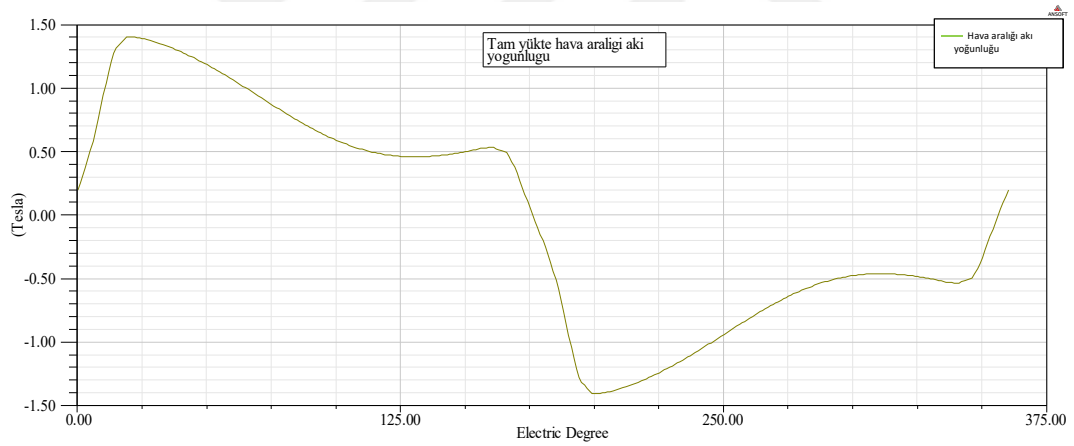


(b)

Şekil 2.50. (a)- Generatör benzetim modeli manyetik akı yoğunluğu (b)- Vektörel gösterimi



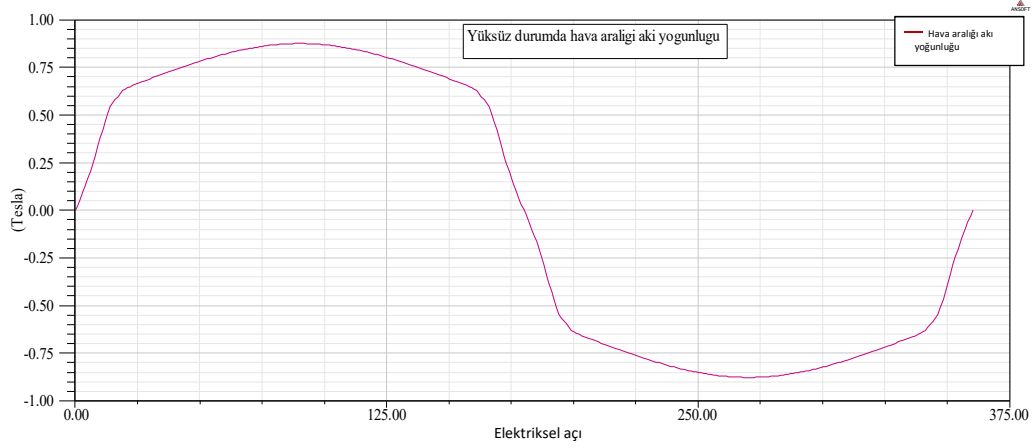
Şekil 2.51. Generator hız grafiği



Şekil 2.52. Generator tam yükte iken hava aralığındaki akı değişimi

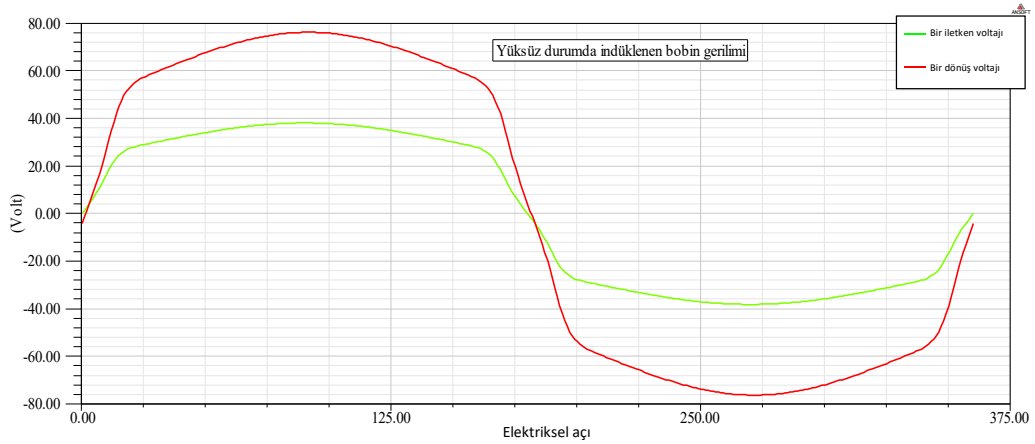
Şekil 2.51'de generatorün hız grafiği verilmiştir. Şekil 2.52 ve 2.53'te Rmxprt'tan alınan generator hava aralığındaki yükte ve yüksüz durumlarında oluşan akı dağılımları gösterilmiştir.

Yükte akı değeri 1.4 Teslaya yakın değer almakta, yüksüz durumda ise 0.9 Teslaya yakın olmaktadır. Şekil 2.50'den de görüleceği üzere 2D simülasyonda ise bu değer 1.8 Tesla civarında olmaktadır. Etkileşimin yakın olduğu noktalarda bu değer 2 civarında olmaktadır.



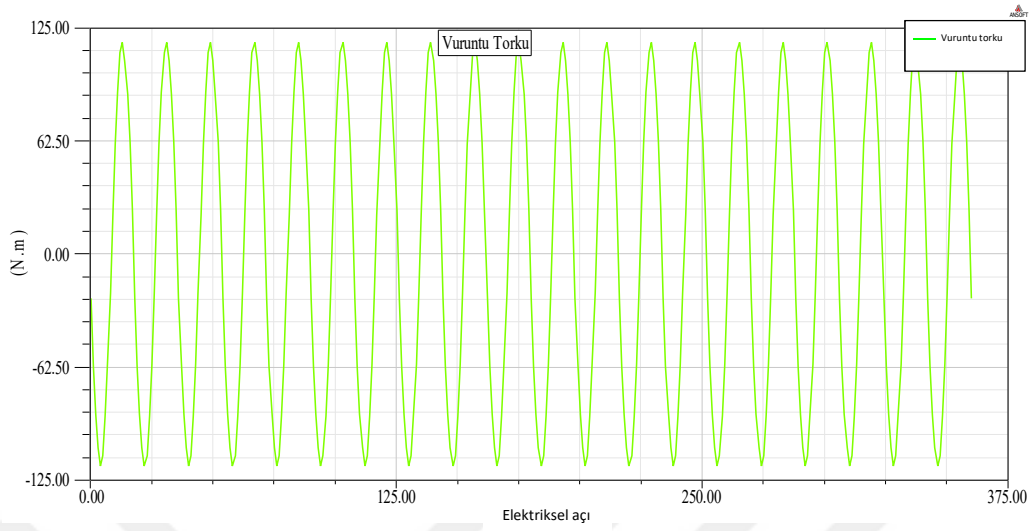
Şekil 2.53. Generatör yüksüz durumda iken hava aralığındaki akı değişimi

Stator ve rotor arasındaki hava aralığındaki akı kutup ayak çapının, rotor çapı ile olan ilişkisi yakından belirlemektedir. Maxwell’de rotor çapı ile kutup ayak çapının bir “offset” üzerinden alındığında sinüse yakın olmakta, sıfır alındığında ise akı değerinin tepe değerleri düz olmakta, karesel yapıya yakın durmaktadır.



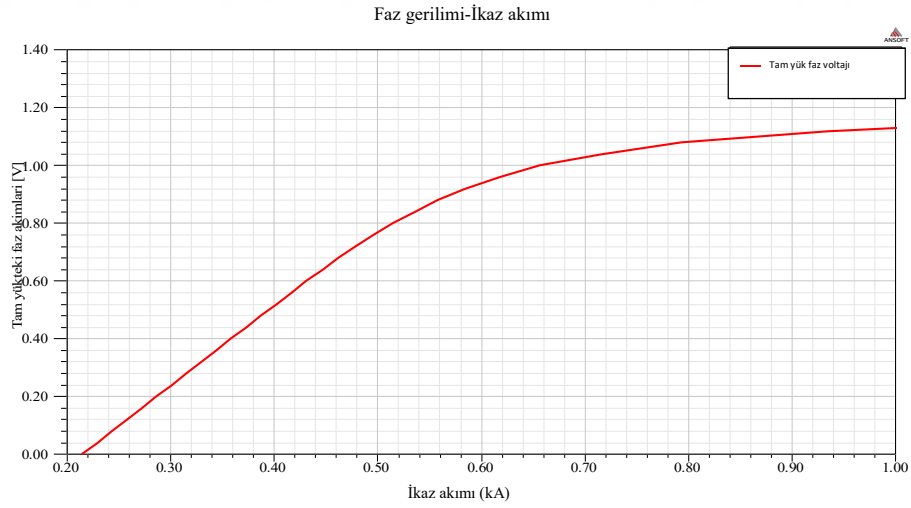
Şekil 2.54. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilimleri

Şekil 2.54’te yüksüz durumda iken analitik çözümde alınan, bir bobinden ve bir döngüde oluşan gerilim değerleri verilmiştir. Ünite yüksüz iken titreşim değerleri yüksektir. Ünite yüke bindikten sonra titreşim değerleri kademeli olarak düşmektedir. Yüksüz durumda generatör yataklarında oluşan titreşim değerleri üst yatakta 0.21 mm/s, alt yatakta ise 0.34 mm/sn’dir. Bu durumda türbinde meydana gelen titreşim ise 1.02 mm/s’dir. Yük altında ise ünitedeki titreşim değerleri 0.21 mm/s, 0.35 mm/s’dir. Yük altında türbindeki titreşim değeri ise 0.4 mm/s olmaktadır. Şekil 2.55’de generatör vuru torku verilmiştir.



Şekil 2.55. Generatör vuruntu torku

İki boyutta yapılan analiz sonucunda elde edilen reaktans değerleri ise tabloda verilmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak, ilgili generatör verilerindeki değerler ile örtüşmektedir.



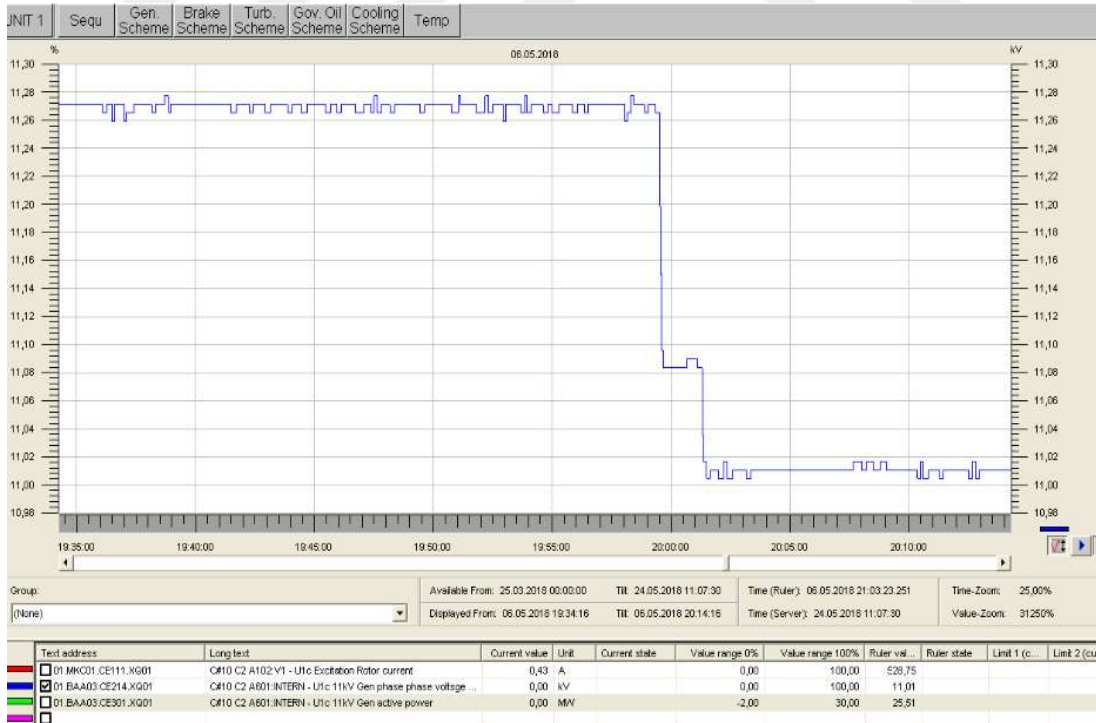
Şekil 2.56. Faz gerilimi-ikaz akımı grafiği

Seyrantepe generatöründe tam yükteki ünitenin yaklaşık olarak ikaz akımı 658 A'dır. Şekil 2.56'da faz geriliminin, ikaz akımına göre değişimi verilmiştir. Grafikte yaklaşık olarak 660 A karşılık gelmektedir. Normal çalışma şartlarında ünite yaklaşık 27 MW yükte

iken ikaz akımı 650 A ciavarında, ünite gerilimi ise yine 11kV civarında olmaktadır. Aşağıdaki şekillerde SCADA grafik çıktıları verilmiştir.



Şekil 2.57. Generatör ikaz akımı SCADA grafiği

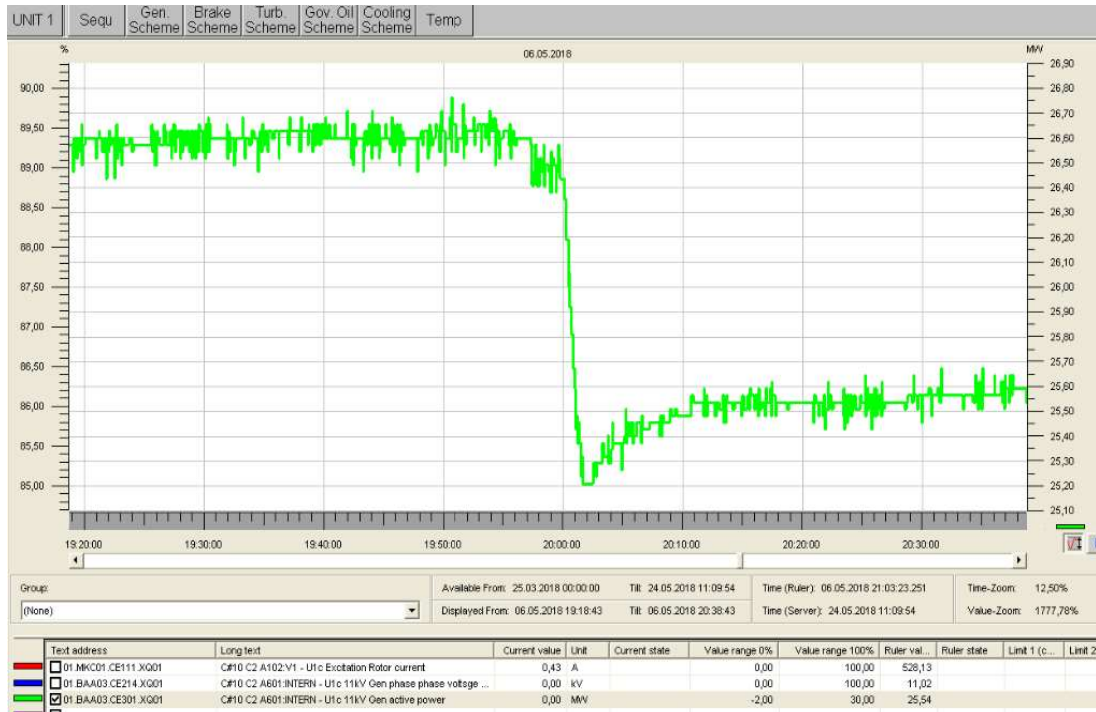


Şekil 2.58. Generatör fazlar arası gerilim SCADA grafiği

Şekil 2.57’de generatör 26MW güçte çalışırken ikaz akımı grafiği verilmiştir. İkaz akımı 640 A’lık değerde çalışmaktadır. Grafikteki değişimi reaktif güç kontrol sisteminden kaynaklı dalgalanmadır.

Şekil 2.58’de ise 11 kV terminal gerilimine sahip generatör 26 MW çalışma durumundaki uçlarındaki gerilim değişimi verilmiştir. Dalgalanmalar daha çok reaktif güç kontrol sisteminden kaynaklı, sisteme reaktif güç verme veya almayı sağlamak için generatör terminal gerilimi üzerinden yapılan kontrolden kaynaklanmaktadır.

Şekil 2.59’da ise generatörün sisteme vermiş olduğu aktif güç değerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 2.59. Generatör aktif güç SCADA grafiği

3. SONUÇ, DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER

Bu çalışmada halen işletmede olan kırk kutuplu, üç fazlı çıkık kutuplu senkron generatör, Ansys firmasının geliştirmiş olduğu Maxwell programında iki boyutlu ve üç boyutlu tasarım yöntemi kullanılarak modellenmiş, SEY ile analiz edilmiş, geçici ve kalıcı durum, moment, akım, gerilim, manyetik akı dağılımları ortaya konmuş ve incelenmiştir.

İşletmede olan SG'ye ait, santral otomasyon sisteminden alınan değerler, generatör üretici firmasından sağlanmış olan generatör katalog değerleri verilmiştir.

Elde edilen benzetim değerleri ile katalog değerleri karşılaştırılmış ve örtüştüğü görülmüştür.

Benzetim sonuçları ile modellenen SG'ye ait katalog verileri arasındaki fark, yapılan bilgisayar analizinde hata oranının en küçük olarak seçilmesi, donanıma uygulanan sonlu elemanlar ağ örgüsü sıklık değerinin ise en üst seviyede olması bu fark değerini azaltmaktadır. Bu durumda özellikle bilgisayarın, problemi çözmek için daha uzun zaman harcamakta, oluşturulan çözüm dosyaları daha büyük olmaktadır. Bu nedenle eğer daha doğru, hassas bir çözüm isteniyorsa, kullanılan donanımın, bilgisayar donanımının, işlemci, hafıza, ekran kartı vb. özelliklerinin üst noktalarda olması daha doğru sonuçlara, kısa çözüm zamanına imkân tanımaktadır.

KAYNAKLAR

- Andritz Hydro**, 2010. Installation, Operation & Maintenance Manuel – Excitation System Of Alkumru, Project num. : H110.080084, Document num.: ALK08-GEN-9318.
- Alstom Hydro**, 2007. Operation, Maintenance Manuel of Senkron Generator, Seyrantepe HEPP.
- Akın, E., Orhan, A.**, 2007. Elektrik Makinalarının Temelleri, Birinci baskı, Çağlayan Kitapevi.
- Arıkan, A. S.**, 2002. Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, ODTÜ.
- Abdullah, M. F., Baharudin, Z., Hamid, N. H.**, 2014. The Third Harmonic Model for Salient Pole Synchronous Generator Under Balanced Load, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 29, No. 2.
- ANSYS INC.**, 2012. Maxwell 2D User's Guide.
- ANSYS INC.**, 2012. Maxwell 3D User's Guide.
- ANSYS INC.**, 2012. RMXprt User's Guide.
- ANSYS China**, 2010. Multiphysics Solution for Wind Turbine System Design.
- Arslan, S.**, 2014. Yüksek Hızlı Kalıcı Mıknatıslı Generatör Tasarımı ve Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi.
- Boduroğlu, T.**, 1988. Elektrik Makinaları Dersleri, Üçüncü Baskı, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., 4-41.
- Bathe, K. J.**, 2014. Finite Element Procedures, MIT, Prentice Hall.
- Boldea, I.**, 2006. Synchronous Generators, Taylor & Francis Group, LLC, ISBN 0-8493-5725-X, New York, USA.
- Varan, M., Öylek, İ., Dereli, S.**, 2017. Üç Fazlı Senkron Bir Makinenin Değişken Yük Durumları için Geçici Hal Sonlu Eleman Analizi, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD)*, 2017.
- Cisneros, M., Hernandez, C., Morales-Caporal, R., Bonilla-Huerta, E., Arjona, M. A.**, 2013. Parameter Estimation of a Synchronous-Generator Two-Axis Model Based on the Standstill Chirp Test, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 28, No. 1.

- Chapman, J. C.**, 2005. Electric Machinery Fundamentals, Fourth edition, Mc Graw Hill.
- Chmelicek, P.**, 2010. Synchronous Generator Reactance Prediction Using FE Analysis, *Master's Thesis*, Faculty Of Electrical Engineering and Communication Department Of Power Electrical and Electronic Engineering.
- Çolak, İ.**, 2003. Senkron Makinalar, Birinci Baskı, Seçkin Yayıncılık, 18-119.
- Dobrea, C., Greconici, M., Madescu, G., Mot, M., Biriescu, M.**, 2017. FEM Analysis of a Synchronous Generator with Inset Permanent Magnet Rotor, IEEE, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017 International Conference*, Romania.
- Despalatović, M., Jadrić, M., Terzić, B.**, 2012. Modeling of Saturated Synchronous Generator Based on Steady-State Operating Data, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 48, No. 1.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, EÜAŞ.** Elektrik Üretim Sektör Raporu, Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı İstatistik ve Araştırma Müdürlüğü, 2017.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C.**, 1961. Electric Machinery, Second Edition, Mc Graw Hill.
- Fenercioğlu, A., Tarımer, İ.**, 2006, Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3d Alan Simülatörü ile Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri, *Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi*, Cilt 6, Sayı:3.
- Gençoğlu, C., Tör, O., B., Tanıdır, Ö.**, 2010. Türbin Hız Regülatörü Parametre Optimizasyonu ile Hidrolik Santrallerin Kararlı İletim Kriterlerinin Sağlanması, 2x150 MW Borçka Hidrolik Santrali Örneği, IEEE, *National Conference on (ELECO) Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Bursa, Turkey.
- Giosio, D. R., Henderson, A. D., Walker, J. M., Brandner, P. A.**, 2017. Physics-Based Hydraulic Turbine Model for System Dynamic Studies, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 32, No. 2.
- Guorui, X., Yiping, H., Yang, Z., Haisen, Z., Jinping, K.**, 2017. Parameter Identification of Synchronous Generator Based on The Results of Time Stepping Finite Element Model, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, USA.

- Gündoğdu, T.**, 2012. Çıkık Kutuplu Senkron Makinaların Kesirli Oluklu Konsantre Sargı Tekniği Ve İlave Kalıcı Mıknatıslar Kullanılarak Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ
- Hamann, A., Hug, G., Rosinski, S.**, 2017. Real-Time Optimization of the Mid-Columbia Hydropower System, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 32, No. 1.
- Hutton, D. V.**, 2004. Fundamentals of Finite Element Analysis, Mc Graw Hill.
- IEEE Standard**, 1983. Test Procedures for Synchronous Machines, IEEE Standard 115.
- Iamamura, B. A. T., Le Menach, Y., Tounzi, A., Sadowski, N., Guillot, E., Jacq, T., Langlet J.**, 2012. Study of Synchronous Generator Static Eccentricities – FEM Results and Measurements, IEEE, *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference*, Marseille, France.
- Ishida, K., Muranishi, J., Aoki, T., Ohashi, S.**, 2016. The Generation Characteristics of the Improved Configuration of the Stator and the Mover in the Linear Generator Using Vibration Energy, *IEEE, Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore.
- Jiji, K. S., Jayadas N. H., C. A. Babu**, 2013. FEM Based Design of Third Harmonic Excitation System for Low Voltage Salient Pole Synchronous Generators. *IEEE, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 15th International Conference*, Japan
- Jiji, K. S., Jayadas, N. H., Babu, C. A.**, 2014. FEM-Based Virtual Prototyping and Design of Third Harmonic Excitation System for Low-Voltage Salient-Pole Synchronous Generators, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 50, No. 3.
- Jiawu, H.**, 2011. Some Discussions About Turn-To-Turn Protection Configuration And Setting of Large Hydraulic Generator, *IEEE, The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, Beijing, China.
- Krause, O. P. , Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D.**, 2002. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 2. Edition, *IEEE*.
- Kundur, P. and Dandeno, P.L.**, 1983. Implementation of Synchronous Machine Models into Power System Stability Programs, *IEEE Trans.*, 102, 2047-2054.
- Kürüm, H., Omaç, Z.**, 2001. Anahtarlı Relüktans Motorun Ürettiği Momentin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanması, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 54-57, Kocaeli.

- Kutt, F., Racewicz, S., Michna, M.,** 2014. SSFR Test of Synchronous Machine for Different Saturation Levels using Finite-Element Method, *Industrial Electronics Society, IECON 2014- 40th Annual Conference of the IEEE*, Dallas, Texas, USA.
- Kutucu, K.,** 2009. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Elektrik Alan Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kerszenbaum, I.,** 1996. Inspection of Large Synchronous Machines Checklists, Failure Identification and Troubleshooting, Department of Electrical Engineering California State University, Long Beach, *IEEE Press Power Systems Engineering Series*, USA.
- Kimbark, E.W.,** 1956. Power System stability, Vol.III: Synchronous Machines, John Wiley & Sons.
- Koutný, M., Kačor, P., Bernat, P., Pavelek, T.,** 2016. FEM Electromagnetic Simulation and Operational Testing of The Adams Electric D.C. Motor-Generator, *IEEE, Strbske Pleso*, Slovakia.
- Liang, Y., Yang, Y.,** 2016. Performance Analysis of 10-MW HTS Wind Generator Based on 2D Transient FEA, *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*.
- Liu, G., Ye, C., Yang, J., Liang, X., Xu, W.,** 2017. The Control Strategy and Experiment Research of Integrated Energy Storage Pulsed Alternator, *IEEE Transactions On Plasma Science*, Vol. 45, No. 7.
- Logan, D. L.,** 2010. A First Course in The Finite Element Method, Fifth Edition, University of Wisconsin-Platteville.
- Marcusson, B., Lundin, U.,** 2015. Axial Magnetic Fields at the Ends of a Synchronous Generator at Different Points of Operation, *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 51, No. 2.
- Mazur, D.,** 2013. Thermal Analysis of the Permanent Magnet Synchronous Generator with the Use of Ansys Fluent, *IEEE, Electrodynamic and Mechatronic System (SELM), 2013 International Symposium*, NY, USA.
- Mergen, A.F., Zorlu, S.,** 2005. Elektrik Makineleri III Senkron Makineler, BirsenYayınevi.
- Nuzzo, S., Degano, M., Galea, M., Gerada, C., Gerada, D., Brown, N.,** 2017. Improved Damper Cage Design for Salient-Pole Synchronous Generators, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 3.

- Nuzzo, S., Galea, M., Gerada, C., Gerada, D., Brown, N.,** 2017. A Fast Method for Modeling Skew and Its Effects in Salient-Pole Synchronous Generators, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 10.
- Nuzzo, S., Galea, M., Gerada, C., Brown, N.,** 2018. Analysis, Modeling, and Design Considerations for the Excitation Systems of Synchronous Generators, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 4.
- Özdoğan, U.,** 2012. Enerji Santrallerinde Yuvarlak Kutuplu Senkron Generatör ve Yardımcı Ekipmanlarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ.
- Rastogi, S., Kumar, R.K., Singh, S. K.,** 2016. Design, Analysis and Optimization Of Permanent Magnet Synchronous Generator, *IEEE, 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, India.
- Reddy, A. A., Bhat, S. S., Ugale, R. T.,** 2017. Design and FEM Analysis of Dual Excited Synchronous Generator, *IEEE, 2017 National Power Electronics Conference (NPEC) College of Engineering Pune*, India.
- Saeed, M., çev. Ayhan, A. O.,** 2015. Sonlu Elemanlar Analizi Teorisi ve Ansys ile Uygulamalar, Palme.
- Setiyoso, A., Purwadi, A., Halimi, B., Rizqiawan, A.,** 2016. Design of Synchronous Generator 10625kV A for Small Power-plant in Indonesia, *The 3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy ICPERE, Indonesia*.
- Spargo, A., Ilie, S., Chan, J.,** 2017. Salient-Pole Rotor Optimisations for Synchronous Generators Using FEA Software, *IEEE, Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2017 IEEE Workshop*, London, UK.
- Stipetic, S., Kovacic, M., Hanic, Z., Vrazic, M.,** 2012. Measurement of Excitation Winding Temperature on Synchronous Generator in Rotation Using Infrared Thermography, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5.
- Şerifoğlu, N.,** 2007. Elektrik makinaları Cilt II, Senkron makinalar ve Doğru Akım Makinaları, Birinci Baskı, Nobel Yayın Dağıtım Ltd.Şti., 1193.
- Tessarolo, A., Bassi, C., Giulivo, D.,** 2012. Time-Stepping Finite-Element Analysis of a 14MVA Salient-Pole Shipboard Alternator for Different Damper Winding Design Solutions, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 6.
- Tikhonova, O., Malygin, I., Plastun, A.,** 2016. The Modeling and the Calculation of the Subexciter with Permanent Magnets by Dint of ANSYS Maxwell, *IEEE, 2016 2nd*

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Russia.

Tsotie, J. W., Wamkeue, R., 2014. An Efficient Model of Synchronous Generator for Hydraulic Power Plant Dynamic Simulations, *IEEE, Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference, Germany.*

Tutelea, L. N., Deaconu, S.I., Boldea, I., 2015. Classical DC Excited Synchronous Generator for High Power Direct Driven Wind Turbine: Optimal Design and FEM Validation, *IEEE, Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference, Geneva, Switzerland.*

Topaloğlu, İ., 2009. Hidroelektrik Generatör Tasarımında Optimizasyon Teknikleri, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*

Topaloğlu, İ., Gürdal, O., 2010. Çıkık Kutuplu Senkron Hidrogeneratörlerin Dinamik Ve Geçici Zaman Analiz Koşullarında Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No. 2, 355-361, 2010.*

TEİAŞ. Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2016-2020), 2016.

TEİAŞ Yük Tevzi Daire Başkanlığı (YTM), 2016 Yıl Sonu Kurulu Güç Değerleri, <http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx>, 2017.

Ünal, B., 2008. JIB Portal Kren Konstraksiyonunun Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.*

Vaezi, M., Deldar, M., Izadian, A., 2016. Hydraulic Wind Power Plants: A Nonlinear Model of Low Wind Speed Operation, *IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 24, No. 5.*

Yahnioğlu, Prof. Dr. N., 2005. Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları, YTÜ.

Yang, N., Cao, W., Hu, Y., 2015. New Machine Design for Easy Insertion of Excitation Coils in Synchronous Generators, *IEEE, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015 IEEE International, Coeur d'Alene, ID, USA.*

Yüzer, E., Ö., 2011. Düşük Düşülü Mikro Hidro Elektrik Santralleri için Sabit Mıknatıslı Bir Senkron Generatör Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.*

Žarko, D., Ban, D., Vazdar, I., Jari', V., 2012. Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in a Salient-Pole Synchronous Generator Using Finite-Element Method and Measured Shaft Orbit, *IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 59, No. 6.*

- Zhang, M., Fräger, C., Mertens, A.,** 2015. Control and Dynamic Behavior of The Doublegenerator System for Hydraulic Power Plants, *IEEE, Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015 IEEE 6th International Symposium*, Aachen, Germany.
- Zhong, D.,** 2010. Finite Element Analysis of Synchronous Machines, *PhD Thesis*, The Pennsylvania State University the Graduate School, 2010.
- Whitby Hydro,** 2008. Energy Services Corporation, Engineering & Construction Services, Generator & Exciter Basics, Canada.
- Xu, Y., Maki, N., Izumi, M.,** 2016. Optimization Study of Machine Parameters for 10-MW Salient-Pole Wind Turbine HTS Generators, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 3.

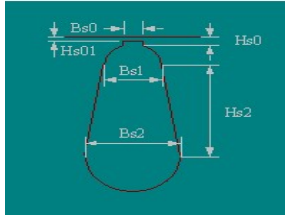
EKLER

Ek Tablo 1.1. Senkron generatör tasarım parametreleri

SENKRON GENERATÖR TASARIM BAŞLANGIÇ PARAMETRELERİ		
Generatör Görünür Güç	MVA	29
Stator Gerilimi	kV	11
Kutup Sayısı		40
Frekans	Hz	50
Bağlantı Tipi		Yıldız
Hız	rpm	150
Çalışma Sıcaklığı	C°	85
Uyartım Akımı	Amper	358
Güç Faktörü		0.9

Ek Tablo 1.2. Senkron generatör rotor parametreleri

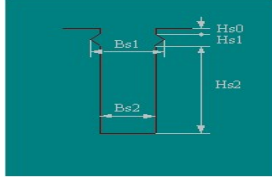
SENKRON GENERATÖR ROTOR PARAMETRELERİ		
Rotor Dış Çap	mm	5480
Rotor İç Çap	mm	4000
Rotor uzunluğu	mm	1194
Yığın Faktörü		0.98
Kutup Yay Başlangıç noktası	mm	1214
Kutup ayak genişliği	mm	370
Kutup ayak yüksekliği	mm	50
Kutup gövde genişliği	mm	230
Kutup gövde yüksekliği	mm	335
İkinci hava aralığı	mm	20
Kutup Başına Damper sargısı	adet	6
hs0	mm	4
hs1	mm	0
hs2	mm	0
bs0	mm	4
bs1	mm	14.5
bs2	mm	14.5



Ek Tablo 1.3. Senkron generatör stator parametreleri

SENKRON GENERATÖR STATOR BİLGİLERİ

Stator dış çapı	mm	6080
Stator iç çapı	mm	5500
Stator oluk sayısı		324
hs0	mm	1
hs1	mm	4.9
hs2	mm	120.1
bs1	mm	25.4
bs2	mm	19.2
Stator uzunluğu	mm	1000
Stator yığın faktörü		0.98
Hava kanalı sayısı		19
Hava aralığı genişliği	mm	9,5



ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Bingöl’de doğdu. Lise öğrenimini Karakoçan ilçesinde tamamladı. 1997 yılında Fırat üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2001 yılında bu bölümden Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Bir müddet yurtdışında bulunduktan sonra, askerlik görevini tamamlayıp EÜAŞ bünyesindeki Özlüce barajında işletme ve bakım mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2007 yılı şubat ayından bu yana özel şirkete ait olan Seyrantepe Hidroelektrik Santralinde işletme müdürü olarak görevine devam etmektedir. Evli ve üç çocuk babasıdır.

