

**HİDROELEKTRİK GENERATÖR TASARIMINDA
OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ**

İsmail TOPALOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009
ANKARA**

İsmail TOPALOĞLU tarafından hazırlanan HİDROELEKTRİK GENERATÖR TASARIMINDA OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Osman GÜRDAL
Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İlhami ÇOLAK
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Osman GÜRDAL
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 05/06/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İsmail TOPALOĞLU

HİDROELEKTRİK GENERATÖR TASARIMINDA OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İsmail TOPALOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2009

ÖZET

Günümüzde sürekli olarak artan elektrik enerjisi talebi, tüm dünyayı gittikçe tükenmekte olan fosil yakıtlara alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak adlandırılan bu kaynaklar içinde en fazla tüketileni su gücüdür. Bu nedenle büyük güçlü hidroelektrik santrallerin yanı sıra küçük ölçekli santraller kurularak dünyada mevcut su potansiyelinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde maksimum fayda sağlamak önemlidir. Kurulmuş ve kurulacak olan bu santrallerde enerji çevrim aracı olarak generatörler kullanılmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan generatörlerin tasarımı oldukça karmaşık ve deneyim gerektiren bir süreçtir. Optimizasyon bilimde, mühendislikte, ekonomide, yönetimde, endüstride ve diğer alanlarda sıklıkla ve artan bir şekilde kullanılan yeni bir konudur. Son yıllarda geliştirilen optimizasyon teknikleri sayesinde hidrogeneratör tasarımında bu tekniklerin kullanılmasıyla beraber generatörlerden maksimum verim alınması, boyutlarının küçülmesi ve hacim başına kullanılan aktif materyal kullanımının azalması gibi önemli sonuçlar elde edilmiştir. Türkiye’de ve dünyada hidroelektrik potansiyeli üzerinde durulmuştur. Çalışmanın konusu içerisinde yer alan hidroelektrik santraller hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Türkiyede enerji verimliliği ve çalışmanın amacı özetlendikten sonra, literatür özeti ve hidrogeneratör tasarımı üzerinde durulmuş, elektromanyetik tasarım,

boyutlandırma ve ısı tasarım konularında bilgi verilmiştir. Elektrik makinalarının tasarımında kullanılan ve çalışmanın amacını oluşturan hidrogeneratör tasarımında kullanılan optimizasyon teknikleri incelenmiş ve bu teknikler hakkında bilgi verilmiştir. İkinci dereceden hassasiyet analizi içeren geliştirilmiş bir tasarım hassasiyet analizi denklemi sunulmuştur. Özellikle hidrogeneratörün fiziki yapısı, karakteristik değerleri ve çalışma parametreleri üzerinde durulmuştur. Generatör çalışma durumunda ve boşta makine performansını etkileyen geçici ve alt geçici reaktanslar, direnç, verim, faz akımları, hava aralığı akı yoğunlukları ve kullanılan malzeme miktarları gibi büyüklükler simülasyon sonucu olarak elde edilmiştir. Giriş tasarımı yapılan hidrogeneratöre ait optimizasyon parametreleri belirlenip boyut optimizasyonu yoluyla maliyet'i azaltmak ve verimi arttırmak için çalışmalar yapıp ilk simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlk tasarımdan elde edilen sonuçlar ve geliştirilen teknikle yapılan sonuçlar sunulmuştur.

Bilim Kodu : 703.3.012

Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik tasarım, optimizasyon, hidroelektrik generatör

Sayfa Adedi : 160

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Osman GÜRDAL

**OPTIMIZATION TECHNIQUES IN DESIGN OF HYDROELECTRIC
GENERATOR**

(M.Sc. Thesis)

İsmail TOPALOĞLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2009

ABSTRACT

Today, continuously increasing electrical energy demand is directed the world to investigate of alternative energy sources instead of fossil fuels. The most consuptioned one of these that called renewable energy sources is hydro-electrical power. Therefore, it is important to maximum benefit from this potential. A hydrogenerator is used for energy conversion in power plants that is established and will be set up. It is very complex and need to experiment to design of hydro generator. Optimization Theory and Methods is a young subject in applied mathematics, computational mathematics and operations research which has wide applications in science, engineering, business management, military and space technology. Last years, optimization theory and techniques are used for design of hydrogenerator. As a result, decrease machine size, increase efficiency and low cost. Hydro-electrical potential is explained in Turkey and also the world. Hydro-electrical power plants, components, and construction stages are described. Energy efficiency has been discussed in Turkey, after summarized the aim of study. Design of hydrogenerator, electromagnetic design, sizing and thermal design subject are explained in detailed. Each methods in design of electrical machines and hydrogenerator are explained in the investigated optimization techniques. An improved second order sensitivity analysis based on numerical approach equation to shape optimization is presented. Technical information are given about hydrogenerator, particularly, physical structure,

characteristic values, curves, and operation parameters of hydrogenerator are analyzed. These values are effects machine performance in generator operating situation, such as transient and sub-transient reactance, effective resistance, voltage regulation, airgap flux density, efficiency etc, are determined by simulation progress. Optimization parameters of hydrogenerator are determined to optimise such as SCR (short circuit ratio) and stator bore diameter. As a result, simulation result and optimisation results are compared. Conclusion information is presented.

Science Code : 703.3.012

Key Words : Electromagnetic design, optimization, hydroelectric generator

Page Number : 160

Adviser : Prof. Dr. Osman GÜRDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Osman GÜRDAL'a ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Hocalarıma ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok kıymetli arkadaşım Cemil OCAK'a ve maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ailemin değerli üyelerine özellikle annem Melihat TOPALOĞLU ve kız kardeşim Gülmin TOPALOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tezin hazırlanması sırasında laboratuvarlarından ve ürünlerinden faydalanma imkanı sağlayan, geçmiş yıllardan elde ettikleri bilgi ve projeleri tez çalışması sırasında kullanılmasına izin veren TEMSAN A.Ş. (Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş.) kurumuna teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
2.1. Giriş	3
2.2. Literatür Özeti	3
2.3. Yenilik Beyanı.....	7
2.4. Türkiye'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli.....	8
2.4.1. Giriş.....	8
2.4.2. Hidroelektrik potansiyelimiz	9
2.4.3. Hidroelektrik potansiyel gelişiminin bugünkü durumu	11
2.4.4. Hidroelektrik santral	12
2.5. Türkiyede Enerji Verimliliği.....	15
2.5.1. Giriş.....	15
2.5.2. Türkiye hidroelektrik enerji üretim hedefleri.....	16
3. HİDROELEKTRİK GENERATÖR TASARIMI.....	17

Sayfa

3.1. Giriş	17
3.2. Güç Sistemleri İçin Hidroelektrik Generatör Belirlenmesi	17
3.2.1. Kısa devre oranı (SCR)	17
3.2.2. Geçici zaman kararlılığına SCR ve x_d' 'nin etkisi	19
3.2.3. Reaktif güç kapasitesi ve uyartım güç faktörü	19
3.2.4. Uyartım sistemleri ve tavan gerilimleri	21
3.3. Çıkış Güç Katsayısı ve Temel Stator Geometrisi.....	24
3.4. Stator Oyuk Sayısı ve Stator Sargı Tasarımı	27
3.5. Stator Nüve Tasarımı.....	31
3.5.1. Stator yığın uzunluğu	33
3.6. Çıkık Kutuplu Rotor Tasarımı	35
3.7. Silindirik Rotor Tasarımı	38
3.8. İndüktans ve Dirençler.....	39
3.8.1. Stator kaçak indüktansı	40
3.8.2. Damper sargısı parametreleri.....	42
3.9. Hidro generatör Geçici Zaman Parametreleri ve Zaman Sabitleri.....	43
3.10. Kayıplar ve Verim	45
3.10.1. Uyartılmış HG'de yüksüz durumda nüve kayıpları.....	46
3.10.2. Hidro generatörlerde verim	46
4. OPTİMİZASYON.....	48
4.1. Giriş	48
4.2. Tasarım Optimizasyonu Tanımlaması.....	49
4.2.1. İdeal tasarım modeli	50

Sayfa

4.2.2. Tanımlar ve çözüm	52
4.2.3. Optimal olma şartları	53
4.2.4. Maliyet fonksiyonu değerlendirmesi	54
4.3. Optimizasyon Tasarım Başlıkları	54
4.3.1. Optimizasyon probleminin matematiksel formülasyonu	56
4.4. Optimizasyon Teknikleri	57
4.4.1. Quasi newton optimizasyon tekniği	58
4.4.2. Pattern search optimizasyon tekniği	59
4.4.3. Sequential nonlinear programming (SNLP)	60
4.4.4. Sequential mixed integer nonlinear programming (SMINLP)	63
4.4.5. Genetik Algoritma	64
4.5. Önerilen ve Geliştirilen Optimizasyon Yöntemi	65
4.5.1. Örnek uygulama çalışması	72
5. HİDROELEKTRİK GENERATÖR'ÜN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU SİMÜLASYONLARI VE HİDROGENERATÖR OPTİMİZASYONU	73
5.1. Giriş	73
5.2. İki Boyutlu Analizler	74
5.2.1. Statik manyetik analiz	74
5.2.2. Statik ısı analiz	78
5.2.3. Elektrostatik analiz	80
5.2.4. Geçici zaman analizi	81
5.3. Üç Boyutlu Analizler	92
5.3.1. Giriş	92

Sayfa

5.3.2. Üç boyutlu hidrogeneratör tasarımı.....	93
5.4. Hidrogeneratör Boyut Optimizasyonu.....	99
5.4.1. Transient analiz koşulları altında SMINLP ve script kullanılarak hidrogeneratör 3D optimizasyonu.....	99
5.4.2. Hidrogeneratör çalışma performansı	101
5.4.3. Optimizasyon sonuçları	105
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	112
KAYNAKLAR.....	116
EKLER.....	120
EK-1. Hidro generatörler için çıkış parametreleri standart tablolar	121
EK-2. Hidro generatör aktif ağırlığının hesaplanması.....	125
EK-3. Tasarlanan hidrogeneratör parametre değerleri.....	127
EK-4. Hidrogeneratör optimizasyon ve hassasiyet analizi script kodları	132
ÖZGEÇMİŞ.....	160

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye hidroelektrik enerji potansiyelinin proje seviyelerine göre dağılımı.....	12
Çizelge 3.1 Elektrik zorlama parametreleri.....	27
Çizelge 6.1. Optimize edilmiş tasarım sonuçları.....	112
Çizelge 6.2. Tasarım parametreleri ve sınırları	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hava aralığı akı dağılımları, optimizasyon değişkenleri $j \leq 4.0 \text{ A/mm}^2$ ve $\delta_0 \geq 0.02\text{m}$ (a) değişkensiz akı dağılımı, (b) $\Phi_L \leq 0.20\Phi_M$ ve (c) $\Phi_L \leq 0.15\Phi_M$	3
Şekil 2.2. Senkron generatör kutup yayı optimizasyon çözümü	6
Şekil 2.3. Optimize edilmiş senkron generatör rotor kutpu	7
Şekil 2.4. Hidroelektrik enerji potansiyelinin gelişme durumu.....	11
Şekil 2.5. Hidroelektrik Enerji üretim hedefleri.....	16
Şekil 3.1. Hidroelektrik Generatörlerin tipik V eğrileri.....	20
Şekil 3.2. Reaktif güç kapasite eğrileri	20
Şekil 3.4. Gerilim/Frekans değişimi uygulaması.....	21
Şekil 3.5. Hidrogeneratörler için çıkış güç katsayıları.....	24
Şekil 3.6. Oyuk tipleri (a) Tek dönüşlü bara sargılı sargı (b) Çift dönüşlü bara sargılı bobin sargısı	34
Şekil 3.7. Değişken hava aralıklı hidrogeneratöre ait çıkık kutup modeli	36
Şekil 3.8. Çıkık kutup ana yapısı ve akı geçiş yolları.....	37
Şekil 3.9. İki kutuplu alan bobinleriyle silindirik rotor	38
Şekil 3.10. Orta ve yüksek güçlü HG’lerde kullanılan tipik oyuk tipleri	40
Şekil 4.1. Popülasyon bazlı arttırımlı öğrenme metoduyla optimizasyon tekniği çözüm akış şeması	59
Şekil 4.2. Generatör çıkış karakteristiklerini veren algoritma akış diyagramı.....	62
Şekil 4.3. SMINLP optimizasyon uygulama aralığı gösterimi	63

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Genetik algoritma ile oluşturulmuş optimum tasarım analizi yapan algoritmanın akış şeması	64
Şekil 4.5. Amaç fonksiyonu değişkenleri çözümü için sınır gösterimi	66
Şekil 4.6. Amaç fonksiyonu çözümü için sınır gösterimi	66
Şekil 4.7. HG için geliştirilen optimizasyon çözüm algoritması.....	71
Şekil 5.1. Tasarlanan hidrogeneratöre ait ana boyutlar ve tasarım değişkenleri	74
Şekil 5.2. Hidrogeneratöre ait (a) Yüzey akı dağılımları, (b) Sonlu eleman metodu çözüm mesh gösterimi	75
Şekil 5.3. Hidrogeneratöre ait yüzey manyetik akı yoğunlukları	76
Şekil 5.4. Hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı	76
Şekil 5.5. Hidrogeneratör rotor ve statoruna ait manyetik akı yoğunlukları.....	77
Şekil 5.6. Hidrogeneratör rotor ve statoruna ait manyetik akı yoğunlukları vektörel gösterimi.....	77
Şekil 5.7. Hidrogeneratör hava aralığı sıcaklık değişimi	78
Şekil 5.8. Stator ve Rotor yüzeyleri sıcaklık dağılımları	79
Şekil 5.9. Hidrogeneratör stator ve rotor yüzeylerine ait m^2 'ye düşen watt olarak sıcaklık dağılımının etkisi	79
Şekil 5.10. Hava aralığı elektrik alanı dağılımı	80
Şekil 5.11. Hava aralığı elektrik alanı değişim grafiği	81
Şekil 5.12. Zamana bağlı tork eğrisi	82
Şekil 5.13. Zamana bağlı zıt emk	82
Şekil 5.14. Zamana bağlı olarak nüve kayıpları	83
Şekil 5.15. Zamana bağlı uyartım akımının değişimi	83
Şekil 5.16. Zamana bağlı güç kayıpları.....	84
Şekil 5.17. Uyartım akımına karşı indüklenen faz gerilimi P.U	84

Şekil	Sayfa
Şekil 5.18. Hidrogeneratöre ait güç faktörü eğrisi.....	85
Şekil 5.19. Stator faz akımı değeri.....	85
Şekil 5.20. Verim değişim grafiği.....	86
Şekil 5.21. Çıkış gücü tork açısıyla değişim grafiği.....	86
Şekil 5.22. Uyarım akımına karşı oluşan stator akımı.....	87
Şekil 5.23. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilimleri	87
Şekil 5.24. Hava aralığı manyetik akı dalga şekli	88
Şekil 5.25. Kutup hava aralığı akı dalga şekli.....	89
Şekil 5.26. Hava aralığı permeans dalga şekli.....	89
Şekil 5.27. Yüksüz durumda indüklenen faz ve hat gerilimi dalga şekilleri.....	90
Şekil 5.28. Tam yük altında indüklenen bobin gerilimleri.....	90
Şekil 5.29. Tam yük altında hava aralığı akı yoğunluğu	91
Şekil 5.30. Kutup indüklenen gerilim dalga şekilleri	91
Şekil 5.31. Tam yük altında indüklenen faz ve hat gerilimleri	92
Şekil 5.32. Hidrogeneratör ana parçaları. (a) Hidrogeneratör yandan görünüş, (b) Hidrogeneratör önden görünüş, (c) Stator, (d) Rotor, (e) Damper sargıları, (f) Rotor damper bar ve damper halkası	93
Şekil 5.33. 3 boyutlu hidro generatör sınır ve geçici zaman için çözüm gösterimi (a) Master (b) Slave sınır koşulları, (c) Stator manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (d) Üç boyutlu oluşturulan mesh gösterimi	95
Şekil 5.34. Hidrogeneratör simülasyon sonuçları, (a) Sargılarda depolanan enerji ve sargı hacim akım yoğunluğu, (b) Verim optimizasyonu sonuçları, (c) Toplam ağırlık optimizasyon sonuçları.....	96
Şekil 5.35. Hidrogeneratör ağırlık, verim ve boyunduruk akı yoğunlukları optimizasyon sonuçları. (a) ve (b) Toplam ağırlık, (c) Verim, (d) Boyunduruk akı yoğunlukları.....	97

Şekil	Sayfa
Şekil 5.36. Hidro generatör optimizasyon sonuçları. (a) Stator sargısı bakır ağırlığı, toplam ağırlık ve verim, (b) Verim, yığın uzunluğu ve toplam ağırlık, (c) Hava aralığı akı yoğunluğu, (d) Stator terminal gerilimi.....	98
Şekil 5.37. Zaman değişken olarak probleme eklenmesi, (a) Başlangıç ve bitiş zamanları, (b) Zaman adımı tespit edilmesi, (c) Çözüm hassasiyeti	100
Şekil 5.38. Dataset ve kaynak gösterimi, (a) Dataset hazırlanması, (b) Sargı kaynaklarının girilmesi sicript (senaryo) kullanılarak	100
Şekil 5.39. Uyartım geriliminin sıcaklık ile değişimi	101
Şekil 5.40. Sıcaklık, uyartım gerilimi ve verim değişimi	102
Şekil 5.41. Uyartım gerilimi, sıcaklık ve uyartım kayıplarının değişimi.....	103
Şekil 5.42. Sıcaklıkla kayıpların değişimi. (a) Alan sargısı kayıpları değişimi, (b) Demir kayıpları, (c) Stator bakır kayıpları, (d) Toplam kayıplar	104
Şekil 5.43. SCR, kutup yayı merkezi uzaklığıyla güç faktörü açısının değişimi	105
Şekil 5.44. Stator çapı, stator boyunduruk akı yoğunluğu ve stator boyunduruk amper-sarım değerinin değişimi	106
Şekil 5.45. Kısa devre oranı, Tork ve çıkış gücünün değişimi.....	107
Şekil 5.46. Çıkış gücü, kısa devre oranı ve generatör toplam ağırlık değişimi.....	108
Şekil 5.47. Optimizasyon çözüm kümeleri	109
Şekil 5.48. Kısa devre oranı ile ağırlık değişimleri	110
Şekil 5.49. Çıkış gücü ve ağırlık değişimleri	110
Şekil 5.50. Ağırlık değişimleri. (a) Stator bakır ağırlığı, (b) Rotor bakır ağırlığı, (c) Stator laminsyon ağırlığı, (d) Rotor laminasyon ağırlığı	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\vec{J}$	Akım yoğunluğu vektörel (A/m ²)
J_{cos}	Stator akım yoğunluğu (A/m ²)
J_{cor}	Rotor akım yoğunluğu (A/m ²)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti vektörel (V/m)
$\vec{B}$	Manyetik akı yoğunluğu vektörel (Tesla)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti vektörel (A/m)
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik (H/m)
μ_0	Boş uzayın geçirgenliği (H/m)
Φ	Manyetik akı (Wb)
$\vec{A}$	Manyetik vektör potansiyeli (Wb/m)
E_0	Yüksüz çalışma gerilimi (volt)
V_1	Faz başına terminal gerilimi (volt)
$x_{d(sat)}$	Tam (d) eksen kaçak reaktansı (ohm)
x_{sl}	Kaçak reaktans (ohm)
x_{ad}	Mıknatıslanma reaktansı (ohm)
ω	Açısal hız (rad/sn)
K_w	Sargı faktörü
W	Faz başına iletken sayısı
P_{elm}	Elektromanyetik güç
C	Çıkış güç katsayısı
B_g	Hava aralığı akısı (Tesla)
n	Devir sayısı (d/dk)
p_1	Kutup sayısı

Simgeler**Açıklama**

f_t	Açısal kuvvet (Nm)
l_i	İdeal yığın uzunluğu (m)
l_{fe}	Aktif yığın uzunluğu (m)
τ	Kutup yayı uzunluğu (m)
N_s	Stator oyuk sayısı
N_{ss}	Segment başına oyuk sayısı
N_c	Segment sayısı
m	Faz sayısı
a	Paralel kol sayısı
D_{is}	Stator iç çapı (m)
S_n	Görünür güç (kVA)
V_n	Terminal gerilimi (volt)
K_{fill}	Oyuk doluluk katsayısı
b_s	Oyuk genişliği (mm)
h_s	Oyuk yüksekliği (mm)
τ_s	Kutup adımı (m)
B_y	Boyunduruk akı yoğunluğu (Tesla)
K_{fv}	Sargı form faktörü
η_{HG}	Hidrogeneratör verimi
T_{shaft}	Şaft torku (Nm)
$\cos\phi$	Güç katsayısı
l_a	A fazı uzunluğu (m)
l_b	B fazı uzunluğu (m)
l_c	C fazı uzunluğu (m)
ρ_{cu}	Bakır yoğunluğu (kg/m ³)

Simgeler ρ_{fe} ρ_{ins} G_{cu} G_{ins} G_{ys} G_{yr} $R_{yr,out}$ $R_{yr,in}$ G_{total} D_{os} **Açıklama**Demir yoğunluğu (kg/m³)İzolasyon malzeme yoğunluğu (kg/m³)

Bakır ağırlığı (kg)

İzolasyon ağırlığı (kg)

Stator boyunduruk ağırlığı (kg)

Rotor boyunduruk ağırlığı (kg)

Rotor boyunduruk dış çapı (m)

Rotor boyunduruk iç çapı (m)

Hidrogeneratör ağırlığı (kg)

Stator dış çapı (m)

Kısaltmalar**3D****2D****HG****SNLP****SMINLP****FEM****SCR****IEEE****IEC****ANSI****GWh****EİE****DSİ****HES****Açıklama**

Üç boyutlu

İki boyutlu

Hidrogeneratör

Sequential nonlinear programming

Sequential mixed integer nonlinear programming

Finite element method

Short circuit ratio

The institute of electrical & electronics engineer

International electrotechnical commission

American national standards institute

Giga watt hour

Elektrik işleri etüd idaresi

Devlet su işleri

Hidro elektrik santral

1. GİRİŞ

Hidrogeneratörlerin tasarım sürecinde, hemen hemen tüm tasarım sürecinde kullanılacak parametreler elektromanyetik tasarımdan elde edilen sonuçlara göre şekillenmektedir. Elektromanyetik teori önemlidir çünkü elektromanyetik olgusunun açıklanmasında ve elektrik, manyetik ve elektromanyetik mühendislik aygıtlarının karakteristikleri ve çalışma prensiplerinin anlaşılmasında temeldir. Bu alanda çalışma yapılırken gelişen her durumun amacını açıklamak bu gelişmeler için zorunlu varsayımların doğruluğunu kanıtlamak ve sınırlarını vurgulamak gelişmenin olduğu ortama dikkati çekmek ve elde edilen eşitlik ve değerleri geometri üzerinde göstermek karmaşık olduğu düşünülen çok zor sistemlerin anlaşılmasına olanak tanıyacaktır [1-3].

Mühendislik Tasarımı, önceden belirlenen koşul ve sınırlamalar yada yükümlülükleri bozmadan içinde bir dizi belirgeni olmayan hedeflerinde gerçekleştirilmeye çalışıldığı özel bir problem çözme yoludur. Bu nedenledir ki, bir tasarım problemini bir optimizasyon problemi gibi görmek doğal gelebilir.

Çağdaş modelleme, simulasyon ve optimizasyon tekniklerini işin içine sokarak tasarımda çok büyük gelişmeler elde edilebilir. Ayrıca, otomasyonda hiçbir optimizasyon stratejisine uymayan, sayıya dökülemeyen fikirler veya insana ihtiyaç duyulacak tasarım süreçleri her zaman olacaktır. Bu çalışmada hidroelektrik generatör tasarımında kullanılan optimizasyon tekniklerini ve Türkiye'deki hidroelektrik potansiyeli, var olan potansiyel içindeki mevcut durumu ve optimizasyonun doğası gereği enerji verimliliği ile ilgili mevcut durumlar hakkında ilgili bölümlerde kısaca bilgi verilecektir. Yapılan çalışmalar ve simülasyonlar sunulacak ve hidrogeneratör tasarımıyla ilgili boyutlandırma eşitlikleri verilecektir. Tasarımda kullanılan optimizasyon teknikleri incelenecek ve uygulamaya katkıları araştırılacaktır. Tez çalışmasında yoğun olarak elektromanyetik tasarım programları kullanılması planlanmaktadır. Kullanılacak elektromanyetik tasarım programları ile

beraber hazırlanacak yazılım kodlarıyla çözümün kalitesinin ve problemi çözme süresinin azaltılması hedeflenmektedir.

Literatürde kullanılan optimizasyon tekniklerinin çokluğu ve kullanım alanlarının hızlı bir şekilde artış göstermesi her ne kadar olumlu görünse de optimizasyon problemlerinin oldukça büyük ve karmaşık yapıları bir çok teknolojik gelişmeyi birbirine bağımlı kılmaktadır. Örneğin değişken sayısı fazla olan ve çözüm aralıklarının çok geniş olduğu problemler için çok gelişmiş bilgisayar sistemlerine ihtiyaç vardır. Dramatik bir şekilde görülmektedirki bilgisayar sistemlerinin gelişmesi de optimizasyon tekniklerinin gelişmesine bağlıdır.

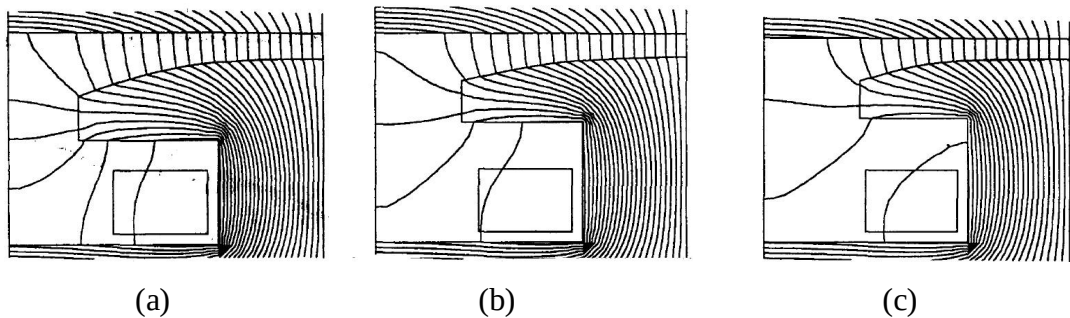
2. ÇALIŞMA İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Giriş

Tarihsel olarak hidroelektrik generatör tasarımında 1930’li yıllarda kullanılan malzemelerin kalitesizliği ve yeterince gelişmemiş olan sayısal teknikler ve deneyim eksikliği az verimli büyük boyut değerlerine sahip generatör tasarımları ortaya çıkarmıştır. 1960’lı yıllara gelindiğinde ise kaliteli malzeme kullanımı ve geliştirilen sayısal teknikler sayesinde 1930’lara göre daha iyi tasarımlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise daha az hacime daha büyük güç ilkesiyle ve geliştirilen sayısal optimizasyon teknikleri sayesinde ilk tasarımlarına göre gelişen malzeme teknolojisini de dikkate alırsak çok büyük gelişmeler kat edilmiştir. Fiziki limitlendirmeler ise mekanik olarak hala yerini korumaktadır [1-3].

2.2. Literatür Özeti

1990’larda H. Hoole ve diğerleri yaptıkları araştırmada geometrik parametre ve değişken optimizasyon tekniği ile çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyonu üzerine çalışmışlar ve yapısal haritalama yöntemi ve ilgili eşitlikleri çalışmalarında sunmuşlardır. Bulgular aşağıdaki gibidir [4].



Şekil 2.1. Hava aralığı akı dağılımları, optimizasyon değişkenleri $j \leq 4.0 \text{ A/mm}^2$ ve $\delta_0 \geq 0.02 \text{ m}$ (a) Değişkensiz akı dağılımı, (b) $\Phi_L \leq 0.20 \Phi_M$ ve (c) $\Phi_L \leq 0.15 \Phi_M$ [4].

Yapılan kutup optimizasyonu sayesinde hava aralığı akı yoğunluğunda iyileşme ve akıda kayıpların azaltılmış olduğu gözlemlenmektedir.

N. FUJII boyut optimizasyon problemlerinin sınıflandırılmasında kullanılacak ikinci dereceden hassasiyet analizi içeren bir optimizasyon metodunu yaptığı çalışmada sunmuştur. Bu metod'da amaç fonksiyonu olarak sınır değerlerin integral biçimi kullanılmıştır [5-8]. Bu yöntem;

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_e} \varpi(x) d\Gamma - \int_{\Gamma} \varpi(x) d\Gamma = & \varepsilon \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{\Re} \omega + \frac{\partial \omega}{\partial n} \right) \rho^2 d\Gamma + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \int_{\Gamma} \left(2 \frac{\partial \omega}{\partial n} \frac{1}{\Re} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} \right) \rho^2 d\Gamma + \\ & \frac{1}{2} \varepsilon^2 \int_{\Gamma} \left(\frac{d\rho}{ds} \right)^2 \omega(x) d\Gamma + o(\varepsilon)^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

ile ifade edilir.

Sonuç olarak elde edilen Khun-Tucker tipi optimizasyon Eşitliği:

$$\begin{aligned} \delta^{(2)} j = & \frac{1}{2} \varepsilon \int_{\Gamma} g(x, u) \left(\frac{d\rho}{ds} \right)^2 d\Gamma + \int_{\Gamma} \frac{\partial g}{\partial x} \cdot \bar{n} \frac{1}{\Re} \rho^2 d\Gamma - \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \frac{\partial g}{\partial u} \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} \rho^2 d\Gamma + \\ & \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \frac{\partial^2 g}{\partial n^2} \rho^2 d\Gamma + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \frac{\partial^2 g}{\partial u^2} \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)^2 \rho^2 d\Gamma - \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \frac{\partial u}{\partial n} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial u^2} \nabla u + \frac{\partial^2 g}{\partial u \cdot \partial x} \right) \cdot \bar{n} \rho^2 d\Gamma \end{aligned} \quad (2.2)$$

dir.

Optimizasyon probleminde sınır değerinin amaç fonksiyonu olarak kullanılmasıyla beraber çok amaçlı optimizasyon probleminde değişkenlerden birinin sabit tutulması imkanı ortaya çıkmıştır.

T.H. Pham ve diğerleri Eş. 2.3 ve 2.5’de manyetik boyut optimizasyonunda kutup yüzeylerini incelemiş ve amaç fonksiyonu olarak hem manyetik vektör potansiyeli hem de akı yoğunluğu terimlerinin bir karşılaştırmasını yapmışlardır [9].

$$F_a = \sum_k \left(\frac{A_k}{A_{opt,k}} - 1 \right)^2 ; \quad \frac{dF_a}{dp_i} = 2 \sum_k \frac{1}{A_{opt,k}} \left(\frac{A_k}{A_{opt,k}} - 1 \right) \cdot \frac{\partial A_k}{\partial p_i} ; \quad A_k = \{ \alpha(x_k, y_k) \}_e^t (A)_e \quad (2.3)$$

Manyetik vektör potansiyeli temelli gradyant optimizasyon tekniği:

$$\frac{\partial A_k}{\partial p_i} = \{ \alpha(x_k, y_k) \}_e^t \frac{\partial \{A\}_e}{\partial p_i} + \frac{\partial \{ \alpha(x_k, y_k) \}_e^t}{\partial p_i} \{A\}_e \quad (2.4)$$

ile ifade edilmektedir.

$$F_b = \sum_k \left(\frac{B_{y,k}}{B_{y,opt,k}} - 1 \right)^2 ; \quad \frac{dF_b}{dp_i} = 2 \sum_k \frac{1}{B_{y,opt,k}} \left(\frac{B_{y,k}}{B_{y,opt,k}} - 1 \right) \cdot \frac{\partial B_{y,k}}{\partial p_i} ; \quad B_{y,k} = - \frac{\partial}{\partial x} A(x_k, y_k) \quad (2.5)$$

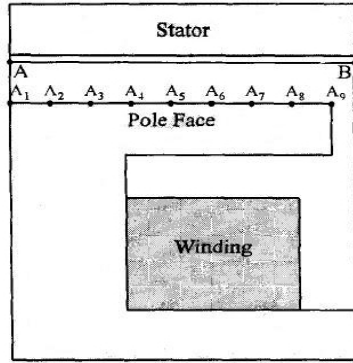
Akı yoğunluğu temelli gradyant optimizasyonu tekniği:

$$\frac{\partial B_{y,k}}{\partial p_i} = - \left(\frac{\partial b}{\partial p_i} \right)^t \cdot \{A\}_e - \{b\}^t \cdot \left\{ \frac{\partial A}{\partial p_i} \right\}_e \quad (2.6)$$

Eş. 2.6 ile ifade edilmektedir.

San Baeck Yoon ve diğerleri 2000’li yıllarda elektromekanik aygıtların boyut optimizasyonunda kullanılabilecek robust boyut optimizasyon tekniğini sunmuşlardır. Bu teknikte Eş. 2.7 ve 2.8 ile ifade edilen çok amaçlı amaç fonksiyonu ardışık karesel programlama optimizasyon tekniği ile problemi çözmek için uygulanmıştır.

Uygulamada Şekil 2.2’de gösterilen senkron generatör kutup yayı için optimum bir çözüm önerisi sunulmuştur [10].



Şekil 2.2. Senkron generatör kutup yayı optimizasyon çözümü [10].

$$\Phi_x = \alpha \cdot \mu_f + (1 - \alpha) \sigma_f$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.7)$$

$$x_l \leq x + \Delta x \leq x_u$$

Minimize edilecek çok amaçlı fonksiyon:

$$g_j^* = g_j + \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial g_i}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (2.8)$$

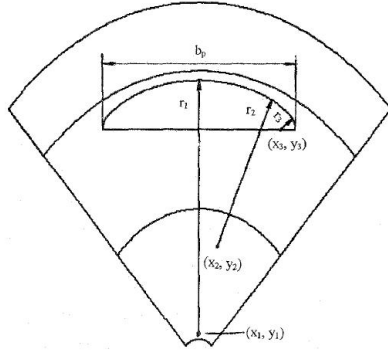
dir.

Yang Shiyong ve diğerleri harmonik uyarımlı bir generatörde kutup optimizasyonu için stokastik algoritma kullanmış ve orijinal uyarıma göre yeni gelişmeler kaydetmişlerdir. Kullandıkları matematiksel algoritma [11];

$$\begin{aligned}
& \max \quad w_1 e_1 + w_3 e_3 \\
& \text{s.t} \quad g_{\min} - g_0 \geq 0 \\
& \quad \quad b_p - b_{p0} \leq 0
\end{aligned} \tag{2.9}$$

ile ifade edilir.

Şekil 2.3'te elde ettikleri senkron generatörün rotor kutbuna ait optimize edilmiş şekil görülmektedir.



Şekil 2.3. Optimize edilmiş senkron generatör rotor kutbu [11].

2.3. Yenilik Beyanı

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan hidroelektrik santraller için enerji üretiminde kullanılan hidrogeneratörlerin tasarımını ve tasarım optimizasyonunda kullanılan tekniklerin incelenmesi üzerine çalışılmıştır. Literatür özetinde görüldüğü üzere hidrogeneratörler için farklı optimizasyon teknikleri ve değişik nümerik çözüm teknikleri boyut optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu çalışmada ise Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama (AKDNP) ile hem stator hem rotorda aynı anda bir optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Kullanılan teknik ile birbirine bağılı değişkenler kullanılmış boyut gözetmeksizin, geniş, orta, mini ve mikro santrallerde generatör tasarımında kullanılabilecek bir optimizasyon eşitliği ifadesi elde edilmiştir. Bölüm 4'te elde edilen Eşitlik sunulmuştur. Buna ek olarak hidrogeneratörlerde hacim başına düşen aktif materyal kullanımı azaltılması sağlanmış bu metodla kayıplarda azalma sağlanmıştır.

Diğer optimizasyon teknikleri de aynı şartlar altında yapılan çalışma ile sonuçların karşılaştırılması amacı ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar çalışmanın sonunda sunulmuştur. Rotorda kutup yayı için bir optimizasyon çalışması yapılırken stator delik çapı da hava aralığı için bir optimizasyon değişkeni olmuştur. Sonuç olarak kullanılan bu yeni teknik ile yeni gelişmeler kaydedilmiştir. Ülkemizde elektrik makinalarının tasarımı alanında yapılmış buna benzer bir çalışma literatürde gözükmemektedir. Ülkemizde ve Dünyada hidroelektrik santralleri potansiyelinin kullanılmasında yüksek verimli hidrogeneratör tasarımında kullanılabilecek yöntemler araştırılmış ve bu potansiyelden maksimum yarar sağlıyacak yüksek verim esasına dayanarak çalışan optimize edilmiş hidrogeneratör tasarımları elde edilmiştir. Kayıpların azaltılmış ve maliyetin azaltılabilir olduğunun uygulanabilir olduğunu ortaya çıkarması bakımından elektrik enerji sektöründe uygulamaya katkı yapan özgün bir çalışmadır.

2.4. Türkiye'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli

2.4.1. Giriş

Ülkemiz hızlı bir sosyal ve ekonomik gelişim göstermektedir. Bu gelişmeye paralel olarak gereksinim duyulan elektrik enerjisini; öncelikle yerli enerji kaynaklarından elde etmek üzere projeler geliştirmeli ve gerekli yatırımlar yapılmalıdır. Kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve ekonomik enerji elde etmek üzere hazırlanan projelerin; çevreye olumsuz etkilerinin en az olmasına dikkat edilmelidir. Elektrik enerjisi üretiminde; fosil ve nükleer yakıtlı termik ve doğalgazlı santraller yanında hidroelektrik santrallerin yenilenebilir ve puant çalışma gibi iki önemli özelliği mevcuttur. Elektrik

enerjisi tüketimi ekonomik gelişmenin ve sosyal refahın en önemli göstergelerinden biridir. Bir ülkede kişi başına düşen elektrik enerjisi üretimi ve/veya tüketimi o ülkedeki hayat standardını yansıtmaları bakımından büyük önem arz etmektedir. 2004 yılı başı itibarıyla Türkiye’de kişi başına elektrik enerjisi tüketimi brüt 2090 kWh’ye ulaşmış olmasına rağmen, bu rakamın Avrupa’da yaklaşık 6500 kWh/kişi ve dünya ortalamasının ise 2350 kWh/kişi olduğu dikkate alınırsa; ülkemiz için kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminin oldukça düşük seviyede olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle, başta hidrolik enerji olmak üzere, elektrik enerjisi arzının artırılmasının gereği ortadadır.

2.4.2. Hidroelektrik potansiyelimiz

Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesinde “brüt potansiyel”, “teknik potansiyel” ve “ekonomik potansiyel” kavramları önem taşımaktadır. Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teorik üst sınırını gösteren brüt su kuvveti potansiyeli; mevcut düşü ve ortalama debinin oluşturduğu potansiyeli ifade etmektedir. Topoğrafya ve hidrolojinin bir fonksiyonu olan brüt hidroelektrik enerji potansiyeli, ülkemiz için 433 milyar kWh mertebesindedir [12-13].

Teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli; bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını göstermektedir. Uygulanan teknolojiye bağlı olarak düşü, akım ve dönüşümde oluşabilecek kaçınılmaz kayıplar hariç tutulmaktadır. Bölgede planlanan hidroelektrik projelerin teknik açıdan uygulanabilmesi mümkün olan tümünün gerçekleştirilmesi ile elde edilecek hidroelektrik enerji üretiminin sınırlarını temsil etmektedir. Bu niteliğiyle teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyel, brüt potansiyelin bir fonksiyonu olmakta ve çoğunlukla onun yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Ülkemizin teknik yönden değerlendirilebilir hidroelektrik enerji potansiyeli 216 milyar kWh civarındadır [12-13].

Ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin ekonomik optimizasyonunun sınır değerini gösteren,

gerek teknik açıdan geliştirilebilmesi mümkün, gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm hidroelektrik projelerin toplam üretimi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, beklenen faydaları (gelirleri), masraflarından (giderlerinden) fazla olan su kuvveti projelerinin hidroelektrik enerji üretimini göstermektedir [12-13].

Hidroelektrik santralların ekonomik yapılabilirliğinin hesaplanabilmesi için; enterkonnekte sistemde aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte ve en ucuz enerji kaynağı belirlenerek hidroelektrik santral (HES) projesi bu kaynakla mukayese edilmekte ve ancak daha ekonomik bulunursa önerilmektedir. Ekonomik HES potansiyeli içindeki tüm projeler; termik santrallara göre avantajları daha yüksek projelerdir. Ülkemizin 2006 yılı başı itibariyle tesbit edilen teknik ve ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli 129,9 milyar kWh'dir. Bu potansiyel; en az ilk etüt seviyesindeki hidroelektrik projelerle, ön inceleme, master plan, fizibilite (planlama-yapılabilirlik), kesin proje, inşa ve işletme aşamalarından oluşan 747 adet hidroelektrik projenin toplam enerji üretim kapasitesini ifade etmektedir [12]. Havza gelişme planlarının farklı zamanlarda hazırlanmış olmalarından dolayı projeler sonraki tarihlerde ekonomik yönden tutarsız duruma gelebilmektedir. Bununla birlikte zaman içinde enerji fayda ve maliyetlerinde meydana gelen değişikliklere göre ekonomik bulunabilecek tesislerin, ilk etütlerde terkedilmiş olmalarına da rastlanılmaktadır. Bu nedenle havza gelişme planlarının belirli aralıklarla, özellikle enerji faydalarına esas teşkil eden alternatif referans santral grubundaki değişikliklerden sonra, tekrar gözden geçirilip değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bunlara karşılık, su kaynaklarının geliştirilmesinde görev üstlenen EİE ve DSİ gibi kuruluşların yapmış oldukları, yeni enerji kaynaklarının yaratılmasına yönelik ilk etüt çalışmalarıyla bu potansiyele her yıl ilaveler olabilmektedir. Bütün bu olumlu ve olumsuz etkilerin de dikkate alınmasıyla, Türkiye'nin ekonomik hidroelektrik potansiyeli yıldan yıla ufak farklılıklar göstermekle birlikte bugün için 129,9 milyar kWh civarında olduğu kabul edilebilir. Türkiye 433 milyar kWh brüt teorik hidroelektrik potansiyeli ile dünya hidroelektrik potansiyeli içinde %1 paya sahiptir.

129,9 milyar kWh ekonomik olarak yapılabilir potansiyeli ile Avrupa ekonomik potansiyeli içinde yaklaşık %15 hidroelektrik potansiyeline sahip bulunmaktadır[12].

2.4.3. Hidroelektrik potansiyel gelişiminin bugünkü durumu

2004 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam kurulu gücü 36,824 MW olup, bunun 24,145 MW 'ı termik, 33,9 MW 'ı jeotermal ve rüzgar, 12,645 MW 'ı hidrolik santrallere aittir. 2004 yılı toplam elektrik enerjisi üretimi ise 150,698 GWh olup, bunun 104,464 GWh'i (%74,2) termik, 151 GWh'i jeotermal ve rüzgar (%0,1), 46,084 GWh'i (%24,9) hidroelektrik santrallerden sağlanmıştır [12].

Hidroelektrik santralların üretimi, yağış koşullarına bağımlı olduğundan her yıl toplam üretim içindeki payı değişim göstermekle birlikte, Türkiye'de elektrik enerjisinin yaklaşık %20-30'u sudan üretilmektedir. Bugün için 129,9 milyar kWh olan ekonomik hidroelektrik potansiyelimizin %35'i (45,930 GWh) işletmede, %8'i (10,518 GWh) inşa halinde ve %57'si (73,459 GWh) ise çeşitli aşamalardan oluşan projeler (ilk etüt ön inceleme, master plan, planlama ve kesin proje) düzeyindedir. Şekil 2.4'te görüleceği üzere 129,9 milyar kWh'lik yıllık ortalama enerji üretim değerini oluşturan 747 adet hidroelektrik santralın 142'si işletmede, 40'ı inşa halinde ve 565 adedi ise proje seviyesindedir [12].



Şekil 2.4. Hidroelektrik enerji potansiyelinin gelişme durumu [12].

Türkiye’de hidroelektrik proje üretimiyle ilgili EİE ve DSİ gibi kuruluşların önemli görevlerinden biri de; ülkenin hidroelektrik potansiyelinin gelişimini temin edecek şekilde; tüm etüt ve proje hizmetlerinin ihtiyacı olan veri toplama faaliyetlerini yürüterek, havza master planlarını, baraj ve santrallerin ön inceleme, planlama ve proje çalışmalarını sürdürmektir. Çizelge 2.1’de proje dağılımları görülmektedir [13].

Çizelge 2.1. Türkiye hidroelektrik enerji potansiyelinin proje seviyelerine göre dağılımı [12].

TÜRKİYE HİDROELEKTRİK ENERJİ POTANSİYELİNİN PROJE SEVİYELERİNE GÖRE DAĞILIMI (ŞUBAT-2007)							
Hidroelektrik Santral Projelerinin Mevcut Durumu	Proje Sayısı	Kurulu Güç (MW)	Toplam Yıllık Hidroelektrik Enerji Üretimi				
			Güvenilir Enerji (GWh)	Toplam Enerji (GWh)	Oran (%)	Kümülatif Enerji (GWh)	Oran (%)
1- İşletmede	142	12 788	33 560	45 930	35,5	45 930	35,5
2- İnşa Halinde	41	4 397	8 817	14 351	11,1	60 281	46,6
3- Gelecekte İnşa Edilecek	589	19 359	37 335	69 173	53,4		
3.1 Kesin Projesi Hazır	13	2 356	4 630	6 919	5,3	67 200	51,8
3.2 Planlaması (Fizibilitesi) Hazır	176	7 269	13 239	26 415	20,4	93 615	72,3
3.3 Master Planı Hazır	99	5 260	10 773	18 280	14,1	111 895	86,4
3.4 İlk Etüdü Hazır	301	4 474	8 693	17 559	13,6	129 454	100,0
Toplam Potansiyel	772	36 544	79 712	129 454	100,0	129 454	100,0

2.4.4. Hidroelektrik santral

Hidroelektrik santraller suyun enerjisinden faydalanarak elektrik üreten yapılardır. Hidroelektrik santral, suyun potansiyel enerjisinin mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin de elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yerdir [12].

Hidroelektrik santrallerde özellikler bakımından aşağıdaki tiplendirmeler yapılabilir:

a- *Düşülerine göre:*

- Orta düşümlü santraller: Düşü 15-50 metre arasında.
- Yüksek düşümlü santraller: Düşü 50 metreden büyük.

b- Ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre

1. Baz santraller: Devamlı olarak enerji üreten santraller.
2. Pik santraller: Enerjinin en çok ihtiyaç duyulduğu sürede çalışan santrallerdir.
3. Alçak düşümlü santraller: Düşü 15 metreden az.

c- Kapasitelerine göre

- Küçük kapasiteli: 99 kW'a kadar.
- Düşük kapasiteli: 100-999 kW arası.
- Orta kapasiteli: 1000-9999 kW arası.
- Yüksek kapasiteli: 10 000 kW ve daha fazla.

d- Yapılarına göre

- a) Yeraltı santrali.
- b) Yarı gömülü ve batık santral.
- c) Yerüstü santrali.

e- Depolama özelliklerine göre

Deposuz santraller: Bunlar doğrudan doğruya nehir veya kanal üzerinde kurulmuştur. Su depoları (göller) olmadığından akan suyun enerjisini elektriğe çevirirler. Memleketimizde Erzincan Girlevik Santrali bu tip santrallere örnek olarak gösterilebilir.

- a) Nehir santralleri.
- b) Kanal santralleri.

Doğal veya yapay su deposu (gölü) olan santraller: Bu tip santrallarda suyun depolanması esastır. Genellikle su rejimlerinin düzensiz olduğu akarsularda suyun depolanması zorunluluk haline gelmekte ve böylece bütün yıl boyunca düzenli olarak elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu tip santrale örnek Keban hidroelektrik santralidir.

Pompaj rezervuarlı santraller: Bu santraller, enerjiye ihtiyaç azaldığı saatlerde şebekeden aldıkları enerji ile pompa olarak çalışarak su basarlar. Günün enerjiye en çok ihtiyaç olduğu saatlerde birikmiş suyu türbinleyerek enerji üretirler.

Tipik bir baraj santraline ait yapılar aşağıda sıralanmıştır.

Manyetik alanın döndürülme yöntemlerine göre: Elektrik üretimi genel olarak manyetik alanın generatör içinde döndürülmesi ile sağlanır. Generatör içindeki manyetik alanın döndürülme yöntemlerine göre santraller aşağıdaki tiplere ayrılabilir;

1. Dizel Santraller.
2. Hidroelektrik Santraller.
3. Termik Santraller.
4. Jeotermal Santraller.
5. Doğalgaz Santralleri.
6. Nükleer Santraller.
7. Rüzgar Santralleri.
8. Gel-Git (Med-Cezir) Santralleri.
9. Güneş Enerjisi ile Çalışan Santraller.

Santrallerin çoğu doğası gereği elektrik enerjisi üretmek için generatör kullanılmaktadırlar. Bu generatörler farklı özelliklere sahip çalıştırılacağı alana göre tasarlanmış olabilirler. Bu çalışmada hidrogeneratör tasarımı ve tasarımda kullanılan optimizasyon tekniklerinden bahsedilecektir. Yukarıda anlatılan sebeplerden dolayı var olan enerji üretim potansiyel içinde hidrogeneratörler çok büyük bir öneme

sahiptir. Hidrogeneratörler kullanım alanı itibariyle büyük hidroelektrik santralleri, mini hidroelektrik santralleri, mikro hidroelektrik santralleri ve piko hidroelektrik santrallerinde kullanılabilmektedir. Ancak yapısı itibariyle tasarımında sabit mıknatıs teknolojisi kullanılan generatörler çok amaçlı olarak kullanılabilmektedir [14-15].

Enerji üretim santrallerinde her ne kadar üretim yöntemi farklı olsa da generatör kullanımından günümüz teknolojisiyle vazgeçilememektedir. Bunlardan maliyet bakımından en pahalılarından olan ve generatörün yanında çalışması için birçok elektromekanik teçhizata ihtiyaç duyan bu pahalı elektrik makinesinin en verimli şekilde çalıştırılması kaçınılmazdır. Bu sebepten hidrogeneratör tasarımında optimizasyon çok önemli bir rol oynamaktadır. Boyutların küçültülmesi, verimin artırılması ve hacim başına aktif malzeme kullanımının ve kayıpların azaltılması amacıyla.

2.5. Türkiyede Enerji Verimliliği

2.5.1. Giriş

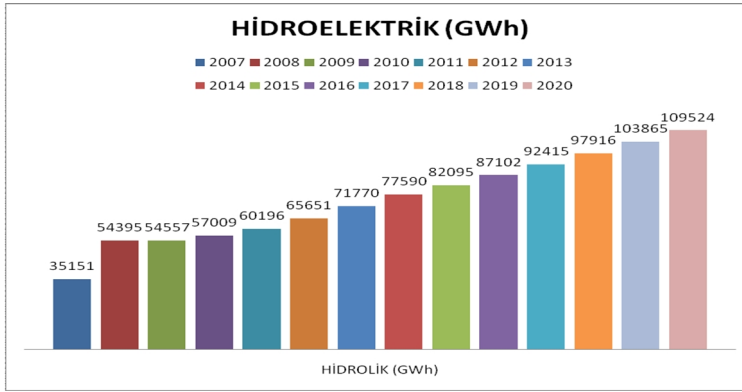
Geçtiğimiz yıllarda, çevresel konulu başlıklarda önemli ölçüde artış olmuştur. Dünya çapında global ısınma ve enerji kaynaklarının verimli kullanılması, gaz emisyonu gibi konular tartışılmaya açılmıştır. Güç istasyonları, endüstriyel üretim yapan firmalar elektrik makinelerinde yüksek verimle çalışan sistemlere geçmeye teşvik edilmek istenmiştir. Enerji üretimi için dizel sistemlerde kullanılan asenkron motorların gaz emisyonundan dolayı dünyada %17 paya sahip oldukları ortaya çıkmıştır. Bu da ortaya çıkartmıştır ki enerji üretmek için kullanılan sistemlerde hem motorlarda hem de generatörlerde optimizasyon tekniklerinin kullanılmasıyla optimum verim alınabilen elektrik makinelerinin yapılmasını gerektirmektedir.

25 Ekim 2008 tarihinde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının yayınladığı bir yönetmelik ile birlikte ülkemizde artık enerji kaynaklarının ve enerji kullanımında verimliliğin arttırılmasına yönelik bir adım atılmıştır. Bu yönetmelik ile enerjinin etkin kullanılması, enerji israfının önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi

üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına sebep olması beklenmektedir [13].

2.5.2. Türkiye hidroelektrik enerji üretim hedefleri

Türkiye'nin uzun vadeli 2007-2020 yılları arasında hidro enerjiden üretmeyi planladığı enerji miktarını gösteren grafik Şekil 2.5'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Hidroelektrik enerji üretim hedefleri [12].

2007 yılında hidroelektrik enerjiden 35151 GWh elektrik üreten Türkiye 2020 yılında 109524 GWh üretmeyi planlamaktadır. 13 yıldaki artış 74373 GWh olarak öngörülmektedir. Bu enerji üretilirken hidrogeneratör kullanıldığı dikkate alındığında verimi yüksek, optimizasyon teknikleri kullanılarak optimum üretim yapabilen verimli hidrogeneratör tasarımlarının ne kadar önem taşıdığı ortaya çıkmaktadır.

3. HİDROELEKTRİK GENERATÖR TASARIMI

3.1. Giriş

Birçok hidroelektrik generatör ürettiği gücü güç sistemleri aracılığıyla çeşitli yüklere iletir fakat çok çeşitli tek başına uygulamalarına da rastlanmaktadır. Başarılı bir HG (hidroelektrik generatör) tasarımı ve çalışması ağırlıklı olarak üretici ve kullanıcının istekleri doğrultusunda varılacak anlaşmaya bağlıdır [1]. Bu konuda uluslararası basılmış teknik standartlar American National Standards Institute (ANSI) C50.13, International Electrotechnical Commission (IEC) 34-1 ve The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) belirlediği [16-17];

- C50.12 Çıkık kutuplu geniş generatörler.
- C50.13 Silindirik rotorlu geniş generatörler.

standartlardır.

Bu bölümde yukardaki basılı standartları da içine alacak şekilde hem çıkık kutuplu hem de silindirik rotorlu hidroelektrik generatör tasarımından detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

3.2. Güç Sistemleri İçin Hidroelektrik Generatör Belirlenmesi

Turbo generatörler elektrik güç sistemlerinin nüvesini oluşturmaktadır. Birincil görevleri aktif güç üretmektir. Ancak, gerekli olduğu zamanlarda reaktif güç üretmek ve bunlara ek olarak güç istasyonlarında nonlinear bir kontrol mekanizmasının bir parçası olarak gerilim sabitleyici ve frekans düzenleyici olarak görev yapmaktadırlar.

3.2.1. Kısa devre oranı (SCR)

Bir generatörün kısa devre oranı doymuş d- eksen reaktansının P.U. (per unit) cinsinden tersine eşittir.

$$SCR = \frac{1}{x_{d(sat)}} \quad (3.1)$$

Hidroelektrik generatörlerde SCR statik kararlılık ve reaktif güç kapasitesinde doğrudan etkilidir. Büyük bir SCR değeri kaçınılmaz bir şekilde küçük bir $x_{d(sat)}$ ile mümkündür. Bu da geniş bir hava aralığına işaret eder. Generatörde alan sargılarıyla aynı görünür gücü elde etmek için daha çok amper-sarım manasına gelmektedir. İzin verilen sıcaklık yükselmesi hidroelektrik generatörlerde diğerlerinde olduğu gibi yalıtım sınıfıyla limitlidir. Daha çok uyarım amper-sarımın manası daha geniş bir rotor hacmi ve buna bağlı olarak daha geniş bir generatör anlamına gelmektedir.

Aynı zamanda SCR hidroelektrik generatörlerde verimide direk olarak etkilemektedir. Örneğin SCR değerinin 0,4'ten 0,5 değerine çıkması verimi yaklaşık olarak 0,02 ile 0,04 arasında azaltmaktadır, aynı zamanda makine hacmini de %5 ile %10 arasında arttırmaktadır [1,3].

SCR'nin statik kararlılığa etkisini göstermek için elektromanyetik tork ifadesinden faydalananarak, kayıpsız bir generatörün sonsuz bir yüke bağlandığı varsayılırsa aşağıdaki ifade elde edilebilir [1].

$$t_e \approx SCR \cdot E_0 \cdot V_1 \sin \delta \quad (3.2)$$

Elektromanyetik tork ifadesi SCR değeri, yüksüz çalışma gerilimi, terminal gerilimi ve yüksüz çalışma gerilimi ile faz başına terminal gerilimleri arasındaki açının sinüsü ile çarpılmasından elde edilir.

Eğer terminal gerilimi azalırsa SCR güç açısı değerinin küçülmesine öncülük edecek bu da torkun artmasına ve alan akımının yükselmesine neden olacaktır. Eğer hesaba iletim hattı reaktansı (generatörün yükseltme transformatörü reaktansını da içerecek şekilde) ve V_g sonsuz nötr gerilimini katarsak elektromanyetik tork ifadesi aşağıdaki şekle dönüşecektir.

$$t_e' = SCR \times E_0 \times V_g \times \frac{\sin \delta'}{(1 + x_e / x_d)} \quad (3.3)$$

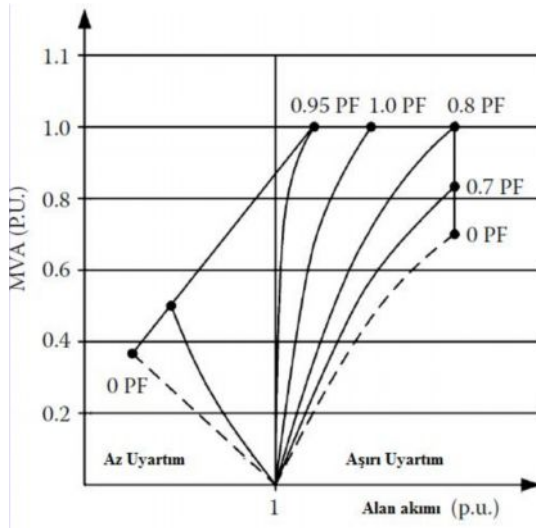
Tarihsel olarak hidroelektrik generatör tasarımında SCR değerlerinin değişimi 1930'lı yıllarda 0,8 ile 1,0 arasında, 1960'lı yıllarda 0,58 ile 0,65 arasında günümüzde ise 0,4 ile 0,5 arasındadır. Düşük SCR daha az generatör hacmi, kayıp ve maliyet demektir [1].

3.2.2. Geçici zaman kararlılığına SCR ve x_d' 'nin etkisi

Üç fazlı sistemlerde yüksek gerilim transformatörünün yüksek gerilim tarafında kritik açıklık zamanı hidroelektrik generatörün sonsuz yük barasına bağlanmasıyla geçici zaman kararlılığını limitlendirir. Eşitlik 3.3'te x_d yerine x_d' konulursa geçici zaman elektromanyetik tork ifadesine ulaşılabilir. Bu durumda $x_e = x_{Tsc}$ transformatörün kısa devre reaktansı ile iletim hattı reaktansı eşit olarak alınır. Küçük x_d' değeri daha büyük kritik açıklık zamanı değerini sağlayacaktır. Hava soğutmalı generatörlerde hidrojen soğutmalı generatörlere göre daha geniş bir başlangıç MW değeri varken buna ek olarak daha büyük bir rotor yapısı da vardır.

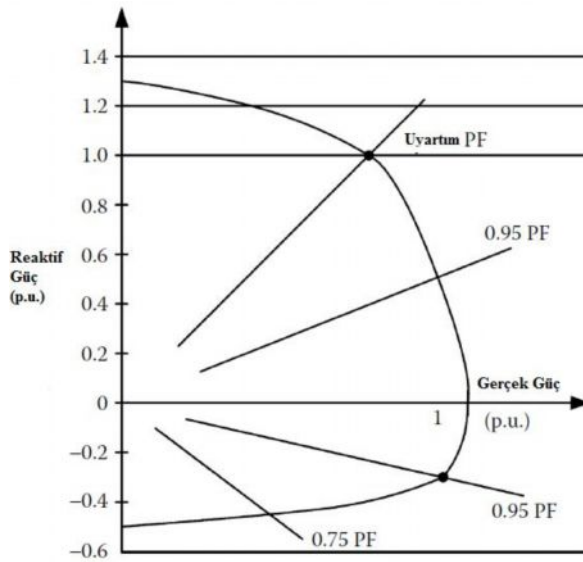
3.2.3. Reaktif güç kapasitesi ve uyartım güç faktörü

Hidroelektrik generatörde uyartım güç faktörü Şekil 3.1 ve 3.2'de görülen ileri yada geri reaktif ve aktif güç kapasitesini belirler. Düşük ve geri güç faktörü uyartım başına düşen MVA başına MW daha azdır. Sonuç olarak uyartım gücü yükselir ve yükseltici transformatör daha yüksek uyartılır.



Şekil 3.1. Hidroelektrik Generatörlerin tipik V eğrileri [IEEE C50.12/13,16-17].

Uyarım güç faktörü tipik olarak genelde 0,90 ile 0,95 arasında alınır. Daha düşük değerlere 0,80 ile 0,85 arasında hidrojen soğutmalı generatör sistemlerinde karşılaşılabılır [1].



Şekil 3.2. Reaktif güç kapasite eğrileri [IEEE C50.12/13,16-17].

Tersine statik uyartıcılar direk olarak HG terminallerindeki gerilimden beslenirler ve nadiren ayrı bir güç kaynağından beslenirler. Sonuç olarak terminal uçlarındaki gerilim düştüğünde statik uyartıcı hızla devreye girerek uyartım akımını arttırmaktadır. Fırçalar, kayma, mekanik hatalar ve bakım düşünüldüğünde hepsi beraber statik uyartıcılara da bir limit getirmektedir.

Armatür gerilimi

Aynı makine geometrileri için prensip olarak 2/1 oranı manyetik akıyı armatür reaksiyon amper sarımına çevirmek için kullanılır. Stator gerilimini seçmek tamamen üreticinin en iyi tasarımı ortaya çıkarması için serbest bırakılabilir tabiki eldeki soğutma sistem tipleri değişkenleri kullanılarak. Örneğin 28 kV yerine 22 kV seçmek hava soğutmalı bir HG için yalıtım maliyetleri ve soğutma maliyetlerini etkileyecektir. Ancak, hava soğutmalı HG’lerde korona etkisi yüzünden yüksek gerilimler seçilmez ama hidrojen soğutmalı bir HG için korona başlangıç değeri büyük olduğundan dolayı yüksek stator gerilimi seçilebilir [1,3,16-17].

Kaçak hız

Kaçak hız rotorun aniden yüksüz durumda boşta kalması gibi durumlarda veya gaz türbinlerinde ani hızlanma olarak ortaya çıkan hız olarak tanımlanabilir. HG sistemlerde regülatör devreye girerek küçük bir zaman aralığında sistemi stabil hale getirir. Turbo generatörlerde kaçak hız 1.25 P.U. iken hidro sistemlerde daha fazladır.

- 1.8 P.U. Pelton (impulse) türbin için (HG)
- 2.0 ile 2.2 P.U. Francis türbin için (HG)
- 2.5 ile 2.8 P.U. Kaplan (reaction) türbin için (HG)

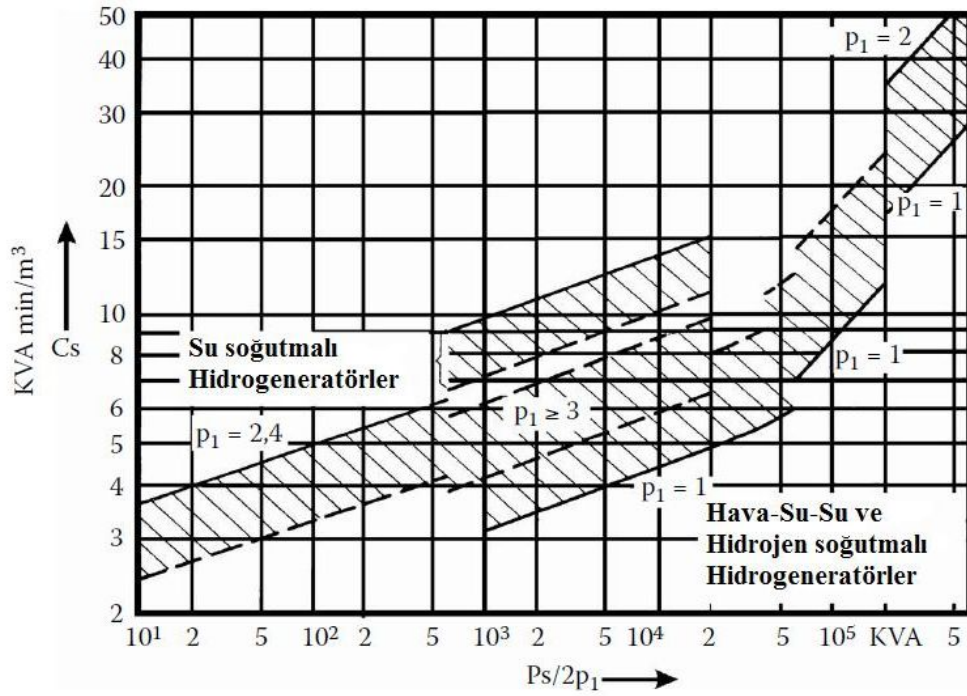
değerleri arasındadır [16-19].

Tasarım başlıkları

HG tasarımı birçok başlık içermektedir. Burada en önemlilerinden birkaçı belirtilecektir.

- Çıkış katsayısı ve temel stator geometrisi.
- Stator slot (oyuk) sayısı.
- Stator sargı tasarımı.
- Stator nüve tasarımı.
- Çıkık kutup rotor tasarımı.
- Silindirik rotor tasarımı.
- Açık devre doyum eğrisi.
- Tam yük alan akım değeri.
- Stator kaçak indüktans, direnç ve senkron reaktans hesaplamaları.
- Kayıplar ve verim hesabı.
- Zaman sabitleri geçici ve altgeçici reaktans hesaplamaları.
- Soğutma sistemi ve ısı tasarımı.
- Fırça ve damper tasarımı.
- Yatak tasarımı.
- Fren tasarımı.
- Uyartıcı tasarımı.

Yukardaki başlıklar sıralama doğrultusunda açıklanmaya ve bu çalışmanın en önemli kısımlarından biri olan tasarım konusuna açıklık getirilmeye çalışılacaktır. Genel olarak HG tasarım metodolojileri bilgisayar kodları yardımıyla optimizasyon kısmını da içerecek şekilde sonlu elemanlar metodu hesaplamaları, ısı ve gerilme analizleri ve en son geometrik optimizasyonu da içerecek şekilde yapılmaktadır.



Şekil 3.5. Hidrogeneratörler için çıkış güç katsayıları [IEEE C50.12/13,16-17].

3.3. Çıkış Güç Katsayısı ve Temel Stator Geometrisi

Çıkış güç katsayısı C HG'lerde rotor hacim başına düşen KVA miktarı olarak tanımlanabilir. C değeri makine güç/kutup, kutup çiftlerinin sayısı p_1 , soğutma tipi ve çoğunlukla geçmişten gelen tecrübelerle dayanmaktadır. Şekil 3.5'te C değerleri için kullanılan bir grafik sunulmuştur.

Çıkış güç katsayısı C makine manyetik ve elektrik yüklemesi terimi olarak gösterilebilir. Elektromanyetik güç P_{elm} :

$$P_{elm} = 3 \cdot \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \cdot (W_1 \cdot K_{w1}) \cdot \Phi_1 \cdot I_1 \quad ; \quad \omega_1 = 2\pi \cdot p_1 \cdot n_n \quad (3.4)$$

dir.

Metre başına amper-sarım yada spesifik elektrik yüklemesi (A_1):

$$A_1 = \frac{6 \cdot W_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D \cdot l_i} (A/m) \quad ; \quad K_{w1} \text{-sargı faktörü} \quad (3.5)$$

Eş. 3.5 ile ifade edilir.

l_i ideal stator yığın uzunluğu ve D stator oyuk veya rotor çapıdır.

Kutup başına düşen akı miktarı Φ_1 :

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot B_{g1} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2 p_1} \cdot l_i \quad (3.6)$$

Eş. 3.6 ile ifade edilir.

Eşitlikleri yerine koyduğumuz zaman P_{elm} :

$$P_{elm} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot K_{w1} \cdot A_1 \cdot B_{g1} \cdot l_i \cdot n_1 \cdot D^2 = C \cdot D^2 \cdot l_i \cdot n_n \quad (3.7)$$

buradan;

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot K_{w1} \cdot A_1 \cdot B_{g1} \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Hava aralığı akı yoğunluğu B_{g1} manyetik spesifik yüklemesiyle (doyum noktası) ile ilişkilidir. A_1 spesifik elektrik yüklemesini tanımlamaktadır. C değeri güç/rotor hacmine eşit değildir fakat onunla orantılıdır [20].

Burada rotorda meydana gelen makas gerilmesini tanımlayacak olursak (metrekare başına düşen açısal kuvvet) N/m^2 ;

$$f_t = \frac{F_t}{\pi \cdot D \cdot l_i} = \frac{T_{elm} \cdot \left(\frac{2}{D}\right)}{\pi \cdot D \cdot l_i} = \frac{P_{elm}}{2\pi \cdot n_1 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot D \cdot l_i} = \frac{1}{\pi^2} C \quad (3.9)$$

Eş. 3.9 ile ifade edilir.

Çıkış güç katsayısı C, elektromanyetik tork tarafından rotor yüzeyinin dışında oluşan spesifik açısal kuvvet ile orantılıdır. HG’lerde geçici rotor çapı D maksimum çevresel hız ile limitlidir (140 ile 150 m/sn arasında). Maksimum çevresel hız U_{max} kaçış hızı n_{max} tarafından aşılabılır.

$$U_{max} = \pi \cdot D_{max} \cdot n_n \cdot \frac{n_{max}}{n_n} \quad (3.10)$$

Hidrogeneratörler için n_{max}/n_n oranı turbo generatörlerden daha büyüktür [20-26].

Aynı zamanda kutup yayı hesaplanacak olursa;

$$\tau \approx \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p_1} \quad ; \quad p_1 = \frac{f_n}{n_n} \quad (3.11)$$

elde edilir. l_i/τ oranı stator bakır yerleşimine yeterince aralık bırakacak şekilde seçilmelidir. Stator uç bağlantı uzunluğu kutup yayı değeri ile orantılıdır. Genel olarak;

- $p_1 = 1$ için $\lambda = l_i/\tau = 1 \div 4$ dir.
- $p_1 > 1$ için $0.5 \div 2.5$ dir.

Bu noktada optimizasyon devreye girer. İyi bir tasarıma sahip olmak için λ değeri optimizasyona başlamak için iyi bir başlangıç noktasıdır. Geçmiş deneyimler ve çalışmalardan hava aralığı akı yoğunluğu değerinin

- $B_{g1} = 0.75$ ile 1.05 T silindirik rotorlu HG'ler için
- $B_{g1} = 0.80$ ile 1.05 T çıkık kutuplu HG'ler için

temel alındığı görülmektedir.

Çizelge 3.1 Elektrik zorlama parametreleri.

Elektrik Zorlama Parametreleri			
	Harici hava soğutmalı sistemler	Harici hidrojen soğutmalı sistemler	Direk soğutmalı sistemler
A (kA/m)	30-80	90-120	160-200
Stator akım yoğunluğu j_{cos} A/mm ²	3-6	4-7	7-10
Rotor akım yoğunluğu j_{cor} A/mm ²	3-5	3-5	Su için 6-13

3.4. Stator Oyuk Sayısı ve Stator Sargı Tasarımı

Stator oyuk sayısını belirlemek için ilk ihtiyaç üç fazlı simetrik elektromanyetik alanları belirlemektir. Faz sayısı, kutup sayısı ve q bir tamsayı olmak üzere N_s stator oyuk sayısını vermektedir.

$$N_s = 2p_1 \cdot q \cdot m ; m=\text{faz sayısı}; p_1 \text{ -kutup çifti} \quad (3.12)$$

Turbo generatörler için tipik olarak q değerleri büyüktür. Düşük hızlı generatörlerde q değeri 3 den küçük değildir. Büyük güçlü hidrogeneratörlerde ise q değeri kesirli olarak alınabilir.

$$N_s = 2p_1 \cdot \left(b + \frac{c}{d}\right) \cdot 3 ; q = b + \frac{c}{d} \quad (3.13)$$

Simetrik elektromanyetik alanı korumak için, oyuk adım sayısı x A, B ve C fazlarında alınır.

$$\frac{2\pi}{N_s} \cdot p_1 \cdot x = K \cdot \frac{2\pi}{3} ; K\text{-tamsayı} \neq 3^p \quad (3.14)$$

Eşitliklerde N_s yerine konulursa;

$$\frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{d}{bd + c}\right) \cdot x = K \cdot \frac{2\pi}{3} ; x = 2 \left(\frac{bd + c}{d}\right) \cdot K \quad (3.15)$$

elde edilir.

Büyük hidrogeneratörlerde stator nüvesi parça parça yapılır. Laminasyon yığınlarının limiti 1 ile 1,1 metre arasındadır. Parça başına düşen oyuk sayısı N_{ss} , parça sayısı N_c ise;

$$N_{ss} = \frac{N_s}{N_c} \quad (3.16)$$

dir.

Dahası büyük hidrogeneratörlerde büyük stator çapı stator nüvesinde parça parça yapılmasına neden olmaktadır. Bu noktada tasarımcı N_c değerinde dikkate alarak en uygun dağılımı yapmak durumundadır.

Büyük güçlü HG'lerde stator sargıları tek sargı baralardan yapılmaktadır. Bu nedenle stator oyuk sayısı N_s üç faz için sargı sayısına eşittir.

$$N_s = 3 \cdot a \cdot W_a \quad (3.17)$$

Eş. 3.17'de a değeri paralel akım kolu sayısını, W_a yol/faz başına sarım sayısını göstermektedir. Diğer taraftan W_a kutup başına düşen akı miktarı ve faz başına sonuç gerilimi E_t ile ilişkilidir. E_t ;

$$E_t = \pi \sqrt{2} \cdot f_n \cdot (W_a \cdot K_{w1}) \cdot \Phi_1 \quad (3.18)$$

ile ifade edilir.

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot B_{g1} \cdot \tau \cdot l_{fe} \quad ; \quad \tau \approx \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p_1} \quad (3.19)$$

Artık bu formülasyonda bir tek sargı faktörü K_{w1} bilinmeyen durumundadır.

$$K_{w1} = K_{y1} \cdot K_{q1} \quad (3.20)$$

$$K_{q1} \approx \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6} q} \quad ; \quad K_{y1} = \sin \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} \quad (3.21)$$

Kaçak reaktans x_{sl} genellikle 0,15 değerinden küçüktür.

$$x_{sl} = x_d' \times (0.35 - 0.4) \quad (3.22)$$

Kaçak reaktans x_{sl} değişkendir; tasarım süreci bittikten sonra tekrar hesaplanması gerekmektedir. Paralel akım kol sayısı sargı tipi, stator parça sayısı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Geçmiş deneyimlerden ve çalışmalardan elde edilen sonuçlarda stator parça sayısı rotor çapına bağlı olarak bölümlere ayrılmıştır [20-26].

D<4m için $N_K=2$

D= 4 ile 8m için $N_K = 4$ (3.23)

D>8m için $N_K = 6$ ile 8

Kesirli sargılarda simetrik bir sargı tasarımı elde etmek için $q = b + \frac{c}{d}$, q değeri $2p_1 / d$ değeri tamsayı çıkmak zorundadır.

$$d \leq \frac{2p_1}{a} \quad (3.24)$$

d değerinin büyük olması yüksek harmonik dağılımını küçültecektir.

$$\frac{3c \mp 1}{d} = \text{tamsayı} \quad (3.25)$$

Bu yüzden en iyi c/d değerleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{c}{d} = \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{2}{7}, \frac{5}{7}, \frac{3}{8}, \frac{5}{8}, \frac{3}{10}, \frac{7}{10}, \frac{4}{11}, \frac{7}{11}, \frac{4}{13}, \frac{9}{13} \dots \quad (3.26)$$

d= 5,7,11,13,... için.

Kesirli sargılarda düşük seviyeli gürültüler için

$$3 \cdot \left(b + \frac{c}{d} \right) \pm \frac{1}{d} \neq \text{tamsayı} \quad (3.27)$$

olmalıdır.

$c/d=1/2$ ($b>3$) ise alt harmonik oluşumu engellenmiş olur.

3.5. Stator Nüve Tasarımı

Stator nüvesi tasarımı için stator delik çapı D_{is} hesaplanması gerekmektedir fakat bundan önce hava aralığının hesaplanması gerekir.

$$D_{is} = D + 2g \quad (3.28)$$

Hava aralığı seçerken dikkat edilmesi ve bilinmesi gereken noktalar:

- SCR değerinin bilinmesi.
- Standartlara uyacak şekilde hava aralığı harmoniklerinin indüklenecek zamana bağlı gerilimdeki harmonikleri limitlendirmesi.
- Büyük hava aralığında uyartım sargılarının büyümesi dolayısıyla kayıpların artması.
- Mekanik ve elektromanyetik limitlerin bilinmesi.

Bugünlerde SCR değerinin 0,4 ile 0,5 arasında alınarak daha küçük hava aralıklarında makinenin çalışmasını sağlamak böylelikle de uyartım sargıları ve boyutu düşürmek önem kazanmıştır [1,20-26].

$$x_d = x_{sl} + x_{ad} \quad (3.29)$$

Bu noktada x_{sl} bir sayısal değer olarak alınabilir. $x_{sl} = 0,1-0,15$ arasında bir değer olarak. Mıknatıslanma reaktansı x_{ad} hesaplanacak olursa [20-26].

$$X_{ad} = K_{ad} \frac{6\mu_0\omega_1(W_d K_{w1})^2 \cdot \tau \cdot l_i}{\pi^2 \cdot g \cdot K_c \cdot (1 + K_{sd})} = x_{ad} \left(\frac{V_n}{I_n} \right)_{faz} \quad (3.30)$$

elde edilir.

K_{ad} d eksenini düşürme katsayısı olarak Eş. 3.31’de tanımlanmıştır. Bu terim sadece çıkık kutuplu HG kullanılıyorsa vardır. Çıkık kutuplu hidrogeneratörlerde stator sargılarından geçerken daha küçük hava aralığı kullanılıyorsa daha düzgün bir sinüsoidal gerilim elde etmek mümkündür.

$$K_{ad} \approx \frac{\tau_p}{\tau} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\tau_p}{\tau} \pi\right) \quad (3.31)$$

Sonuç olarak manyetik doyum noktası bilinmediğinden hava aralığının geleneksel şekli:

$$g = 4.0 \cdot 10^{-7} \frac{A \cdot \tau}{(x_d - 0.1)B_{g1}} \quad (3.32)$$

ifadesi ile elde edilir.

Stator terminal gerilimi seçilirken dikkat edilmesi gereken hususlar:

- İzolasyon maliyeti.
- İzolasyon bakım maliyeti.
- Transformator, güç anahtarları ve koruma maliyetleri.

Genellikle yüksek güçlü HG’lerde yüksek gerilim tercih edilir. Direk hava soğutmalı sistemlerde yüksek gerilim tercih edilirse soğutmanın direk sargılara yapılması gerekecektir. Aşağıda generatör güçlerine göre seçilebilecek gerilim değerleri sunulmuştur [16-17].

- $S_n < 20 \text{ MVA}$ için $V_n = 6-7 \text{ kV}$
- $S_n = 20 \text{ ile } 60 \text{ MVA}$ için $V_n = 10-11 \text{ kV}$
- $S_n = 60 \text{ ile } 75 \text{ MVA}$ için $V_n = 13-14 \text{ kV}$
- $S_n = 175 \text{ ile } 300 \text{ MVA}$ için $V_n = 15-16 \text{ kV}$
- $S_n > 300 \text{ MVA}$ için $V_n = 16-28 \text{ kV}$

temel olarak seçilmektedir.

3.5.1 Stator yığm uzunluğu

Açısal yada açısal-eksenel soğutma kullanılmışsa her soğutma kanalı b_c olmak üzere toplam demir uzunluğu l_1 dir.

$$l_1 = l - n_c \cdot b_c \quad (3.33)$$

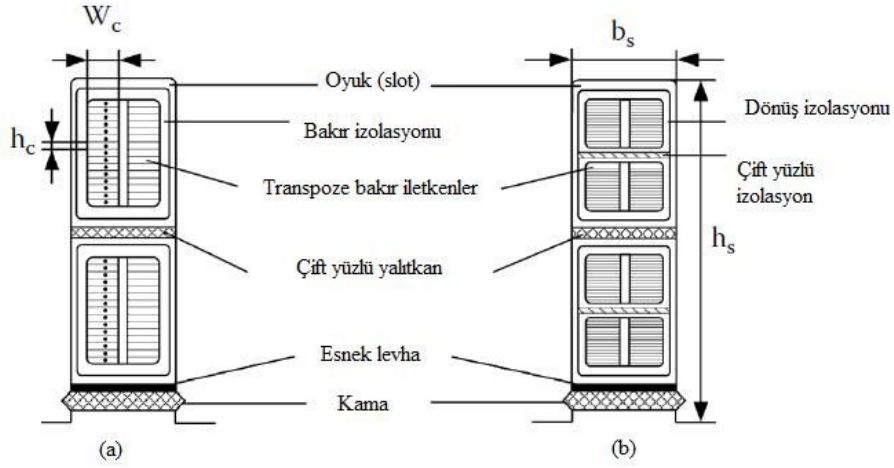
İdeal yığm uzunluğu hesaplanacak olursa:

$$l_i = \left[l - n_c \cdot b'_c - 2a' \cdot \left(1 - \frac{g}{g + c'/2} \right) \right] \cdot k_{fe} \quad (3.34)$$

ifadesi elde edilir.

Şekil 3.6’da görülen sırası değiştirilmiş bakır baralar stator oyuklarında kullanılırken oluşacak eddy akımlarını önlemek ve birbirleri üzerine etkilerini azaltmak için

kullanılmaktadır bu sayede toplam AC skin effect (deri etkisi) değeri azaltılmış olur [1,3].



Şekil 3.6. Oyuk tipleri (a) Tek dönüşlü bara sargılı sargı (b) çift dönüşlü bara sargılı bobin sargısı [1].

Çeşitli izolasyon kalınlıkları stator terminal gerilimi ve stator oyuk sayısına bağlıdır. Genel olarak;

$$\begin{aligned} \frac{2W_c}{b_s} &\approx 0.6 - 0.7 \\ \frac{b_s}{\tau_s} &\approx 0.35 - 0.55 \\ \frac{h_s}{b_s} &\approx 4 - 10 \end{aligned} \quad (3.35)$$

temel alınan değerler olmaktadır.

Toplam oyuk alanı A_{slot} oyuk başına düşen akım miktarı bilinerek hesaplanabilir, tasarımda akım yoğunluğu ve toplam oyuk bakır doluluk oranının seçilmesi gerekmektedir. A_{slot} ;

$$A_{slot} = \frac{6 \cdot W_a \cdot I_n}{N_s \cdot K_{fill} \cdot j_{cos}} ; A_{slot} = b_s \cdot h_s \quad (3.36)$$

ile ifade edilir.

Seçilecek akım yoğunluğu parametresi tamamen tasarımda seçilen soğutma tipi ile alakalıdır. Direk soğutmalı sistemlerde oyuk doluluk oranının küçük seçilmesi önemlidir. Aynı zamanda stator terminal geriliminde HG'nin büyüklüğüne göre akım yoğunluğu parametresi seçiminde ilişkisi vardır [20-26].

Stator boyunduruk yüksekliği hesaplanmasında:

$$h_{ys} \approx \frac{B_{g1}}{B_{y1}} \cdot \frac{\tau}{\pi} ; B_{y1} = 1,3 - 1,7 T \quad (3.37)$$

kullanılır.

Dikdörtgen bir oyuk yapısı varsa sıklıkla oyuk dişleri trapezoidal olmaktadır. Bu yüzden oyuk diş manyetik akı yoğunluğu B_{t1} açısall yönde değişecektir. B_{tmax} ;

$$B_{tmax} = B_{g1} \cdot \frac{\tau_s}{\tau_s - b_s} \approx 1,6 - 2,0 T \quad (3.38)$$

ile ifade edilir.

Diş akı yoğunluğunu düşüren oyuklara etki eden iletim akı çizgileri ihmal edilmiştir.

3.6. Çıkık Kutuplu Rotor Tasarımı

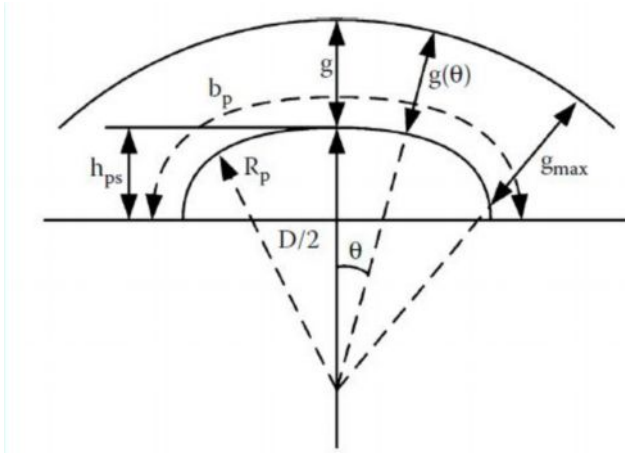
Hidrogeneratörler ve endüstriyel uygulamalar için bir çok generatör hatta bazı rüzgar generatörleri bile çıkık kutuplu yapılıdır. Şekil 3.7'de görülen çıkık kutuplu

hidrogeneratör de rotor kutpu altındaki hava aralığı değişkendir. Alan akımı tarafından oluşturulan hava aralığı akı yoğunluğu ve zamana bağlı olarak indüklenecek emk'nın daha fazla sinüsoidal olmasına olanak tanır. $g(\theta)$;

$$g(\theta) = \frac{g}{\cos(\theta p_1)} \quad (3.39)$$

ile ifade edilir.

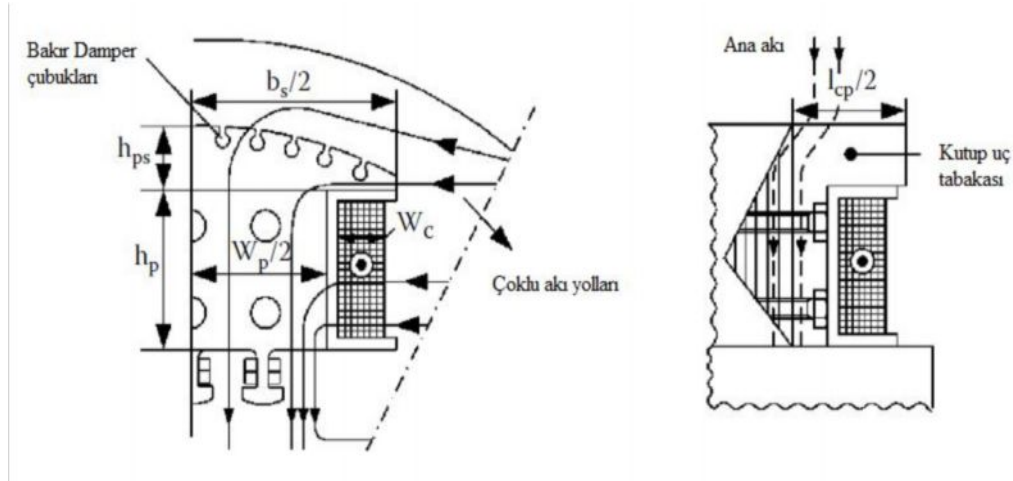
$g_{\max} / g$ oranı genellikle 1,5 ile 2,5 mm arasında olmaktadır. Kutup gövdesi ve kutup yayı alan akımı oluşturacak bobinlere yeteri alan bırakacak şekilde tasarlanmalıdır. Aynı zamanda kutup gövdesi değerinin kutup yayı değerine oranı 5,5 değerinden büyük olursa stator oyuklarında indüklenen emk'da dalgacıklara neden olacaktır.



Şekil 3.7. Değişken hava aralıklı hidrogeneratöre ait çıkık kutup modeli [1].

Hava aralığının çıkık kutuplu makinede değişken olmasından dolayı stator sargılarında indüklenen gerilim sinüsoidale daha yakındır fakat bu durum da çıkık kutup tasarımında oluşan elektromanyetik alanlarında aynı hat üzerinde farklı değerler almasından dolayı titreşimler ve mekanik zorlamalar meydana gelecektir.

Bunun için tasarımcı oluşan bu kuvvetleri önleyecek önlemler almak zorundadır [16-26].



Şekil 3.8. Çıkık kutup ana yapısı ve akı geçiş yolları [1].

Merkez ve maksimum hava aralığı değerleri, rotor çapı ve rotor kutup gövdesi değerleri kullanılarak rotor kutup yayı yarı çapı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

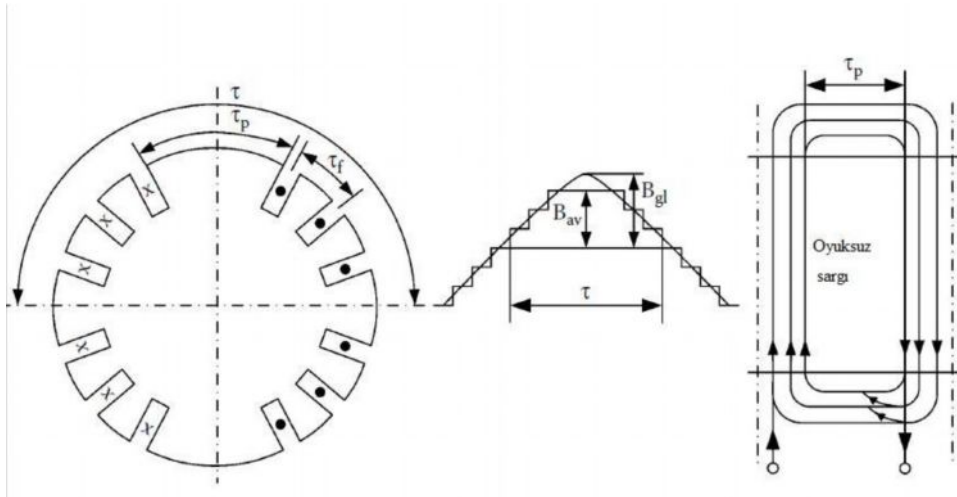
$$R_p = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{4 \cdot D \cdot (g_{\max} - g)}{b_p^2}\right)} < \frac{D}{2} \quad (3.40)$$

Laminasyon yığın faktörü genellikle 0,95 ile 0,97 değerleri arasında alınır. Büyük hidrogeneratörlerde gerçekte kutup gövdeleri 1 ile 1,8 mm arasında değişen laminasyon saclarından yapılır. Bu durum da makinenin boyutlarının artmasına ve soğutma sistemine daha çok ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır fakat mekanik kuvvetler ve uzun ömürlü bir sistemde günümüzde bu aşılamamıştır. Alan sargısı tasarımında, uyarım gerilimi ve peak gerilim bilindiğine göre artık tam yük altında tam gerilim ve tam uyarım güç faktörüyle istenilen uyarım akımı elde edilebilir.

Görüldüğü üzere iyi bir tasarım için kullanılan tasarım metodolojilerinde çok karmaşık analitik hesaplamalar ve tecrübe en önemli faktörü oluşturmaktadır.

3.7. Silindirik Rotor Tasarımı

Silindirik rotorlar genellikle katı demirlerden yapılırlar. Katı demirlerde rotor üzerine kutup sayısına göre alan akımı oluşturmak için gereken alan sargılarının yerleşeceği kanallar açılarak yapılmaktadır. Laminasyon sacından ender de olsa özel uygulamalar için yapılmaktadır. Silindirik rotorda rotor üzerindeki oyuklar açısaldır. Hava aralığı akı yoğunluğu dağıtılmış alan sargıları tarafından üretilir. Eş. 3.41’de ifade edilmiştir [1,3].



Şekil 3.9. İki kutuplu alan sargılarıyla silindirik rotor [1].

$$B_{gv}(x) = K_{fv} \cdot B_{gav} \cdot \cos v \frac{\pi}{\tau} x \quad (3.41)$$

Rotor koordinatleri de dikkate alınarak:

$$K_{fv} \cong \frac{8}{v^2 \cdot \pi^2} \frac{\cos v \frac{\tau_p}{\tau} \frac{\pi}{2}}{1 - v \frac{\tau_p}{\tau}} \quad (3.42)$$

Eş. 3.42’de form faktörü tüm kutupların dengeli olduğu varsayılarak sadece ilk harmoniğin oluşmasına izin verilecek şekilde yazıldı. Rotor uyarım oyuk yayıyla stator oyuk yayı birbiri ile ilişkili olarak seçilirse stator da indüklenenecek harmonikler ve katı rotor yüzeyindeki eddy akım kayıpları minimize edilmiş olacaktır.

3.8. İndüktans ve Dirençler

HG’e ait indüktans, reaktans ve direnç değerleri aşağıda gösterilmiştir.

- Senkron mıknatıslanma indüktansı ve reaktansı $L_{ad}(X_{ad})$ ve $L_{aq}(X_{aq})$
- Stator faz kaçak indüktansı ve reaktansı $L_{sl}(X_{sl})$
- Homopolar stator indüktansı $L_0(H_0)$
- Stator faz direnci $R_s[\Omega]$
- Rotor kafes kaçak indüktansı ve reaktansı $L_{Dl}(X_{Dl})$ ve $L_{Ql}(X_{Ql})$
- Rotor kafes direnci R_D, R_Q
- Uyarıcı kaçak indüktansı ve reaktansı $L_{fl}(X_{fl})$
- Uyarıcı direnci R_f

Senkron mıknatıslanma indüktansını ve reaktansını basitçe formülize edecek olursak:

$$\begin{aligned} L_{ad} &= L_m \cdot \frac{(K_{ad} \cdot K_f)}{1 + K_{sd}^e} & X_{ad} &= \omega_1 \cdot L_{ad} ; x_{ad} = X_{dm} \cdot \frac{I_n}{V_n} \\ L_{aq} &= L_m \cdot \frac{(K_{aq} \cdot K_f)}{1 + K_{sq}^e} & X_{aq} &= \omega_1 \cdot L_{aq} ; x_{aq} = X_{qm} \cdot \frac{I_n}{V_n} \\ L_m &= \frac{6 \cdot \mu_0}{\pi^2} \cdot \frac{\tau \cdot l_i \cdot (W_1 \cdot K_{w1})^2}{g \cdot K_c} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Eş. 3.43 ifadesi elde edilir.

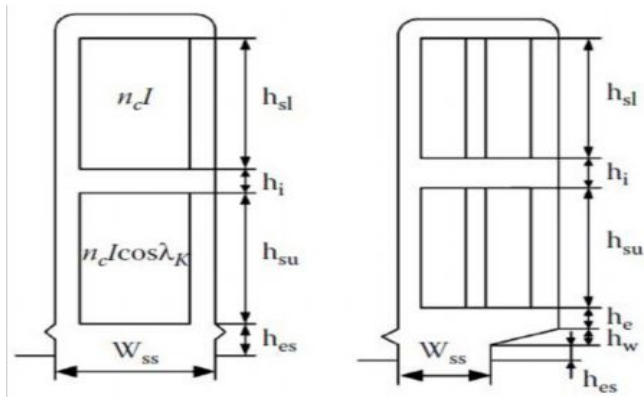
L_m hava aralığı indüktansını temsil etmektedir. I ve V değerleri HG'e ait RMS faz akım ve gerilimlerini temsil etmektedir [16-26].

3.8.1. Stator kaçak indüktansı

Stator kaçak indüktansı dört farklı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar oyuk kaçağı, hava aralığı kaçağı, uç bağlantı kaçağı ve diferansiyel harmonik kaçakları.

$$L_{sl} = L_{ssl} + L_{szl} + L_{sel} + L_{sdl} ; X_{sl} = \omega_1 \cdot L_{sl} ; x_{sl} = L_{sl} \cdot \omega_1 \cdot \frac{I_n}{V_n} \quad (3.44)$$

İki katmanlı sargılar için HG'lerde dikdörtgensel oyuk tipi kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır. Kısa sargılar kullanılmaktadır, Şekil 3.10'da akım üst tabakadan giderken alttaki tabakadan geçen akımla arasında genellikle λ_K kadar bir faz farkı olmaktadır.



Şekil 3.10. Orta ve yüksek güçlü HG'lerde kullanılan tipik oyuk tipleri [1].

Ortalama geometrik oyuk permeansını kullanarak stator kaçak indüktansı tekrar yazılacak olursa:

$$L_{sl} \approx 2\mu_0 \cdot \frac{W_1^2 \cdot l}{p_1 \cdot q} (\lambda_{ss} + \lambda_{sz} + \lambda_{se} + \lambda_{sd}) \quad (3.45)$$

elde edilir.

Oyuk kaçak permeans oranı da:

$$\lambda_{ss} = \frac{1}{4} \left[\frac{h_{sl} + h_{su} \cos^2 \gamma_K}{3W_{ss}} + \frac{h_{su}}{W_{ss}} + \frac{h_{su} \cos \gamma_K}{W_{ss}} + \frac{h_i}{W_{ss}} + (1 + \cos \gamma_K)^2 + \left(\frac{h_{os}}{W_{ss}} + \frac{h_w}{W_{ss}} + \frac{h_o}{W_{ss}} \right) \right] \quad (3.46)$$

$$\lambda_{sz} = \frac{1}{\pi} \cdot l_{er} \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2g \cdot K_c}{W_{ss}} \right)^2}}{2} + \frac{g \cdot K_c}{W_{ss}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \frac{2g \cdot K_c}{W_{ss}} \right) \quad (3.47)$$

$$\lambda_{se} \approx 0.34 \cdot \frac{g}{l_i} \cdot (l_{ec} - 0.64y) \quad (3.48)$$

$$\lambda_{sd} = \sigma_{dso} \cdot \frac{3}{\pi^2} \cdot \frac{\tau \cdot q}{K_c \cdot g} \cdot \frac{l_i}{l} \quad (3.49)$$

olur.

Diferansiyel harmonik permeans oranı standart kiriş sargılar için:

$$\sigma_{dso} \approx \frac{2\pi^2}{9 \cdot K_{KW1}^2} \cdot \frac{5g^2 + 1 - \frac{3}{4} \left(1 - \frac{y}{\tau} \right) \cdot \left[9q^2 \left(1 - \frac{y^2}{\tau^2} \right) + 1 \right]}{12q^2} \quad (3.50)$$

ile ifade edilir.

Stator ve rotor laminasyonları doyumdan dolayı makinede ek kayıplar üretmektedir.

Az uyartımlı durumlarda uç bağlantı noktalarında uç bağlantı kaçak permeansı olmakta bu da akım oluşmasına neden olmaktadır, bu yüzden uç bağlantı noktalarına yakın parçalardan bir akım geçmesine neden olmaktadır [20-21].

3.8.2. Damper sargısı parametreleri

d- ve q- eksenli damper sargısı kaçak reaktansları aşağıda P.U. cinsinden gösterilmiştir.

$$x_{Dl} \approx x_{ad} \cdot \left[\frac{\frac{K_{ad}}{\pi \cdot K_D^2} \frac{\alpha_b \cdot N_2 \cdot (1 - K_b)}{4 \sin^2 \frac{\alpha_b}{2}} \cdot \left(2 + \frac{\cos N_2 \alpha_b - K_b \cos \alpha_b}{1 - K_b} \right)}{\left(1 + \frac{2 \cdot \lambda_{De} \cdot K_c \cdot g}{l_i} \right) - 1 + \frac{N_2 \cdot (1 - K_b) \cdot K_{ad} \cdot l_{pi} \cdot g \cdot K_c}{l_i \cdot \tau \cdot K_D^2} \cdot (\lambda_{SD} + \lambda_{zD})} \right] \quad (3.51)$$

$$\alpha_b = \frac{\pi \cdot \tau_b}{\tau} \quad (3.52)$$

$$K_b = \frac{\sin(N_2 \alpha_b)}{N_2 \sin \alpha_b} \quad (3.53)$$

$$K_D \approx \frac{N_2}{\pi} (1 - K_b) \quad (3.54)$$

$$\lambda_{De} \approx \frac{3.32}{\pi} \cdot \log \frac{2.35 \cdot D_{halka}}{(a + 2b)} \quad (3.55)$$

a ve b değerleri damper halkası kesit alanını ifade etmektedir. D ortalama halka çapını ifade etmektedir.

Zigzag ve damper oyuğu kaçak permeansları:

$$x_{Ql} = x_{ql} \cdot \left\{ \left[\frac{K_{aq}}{\pi K_Q^2} \frac{\alpha_b N_2}{4 \sin^2 \frac{\alpha_b}{2}} \right] \cdot \left[\cos N_2 \alpha_b - K_b \cos \alpha_b + \frac{\alpha_i \pi + \pi(1 - \alpha_i) \frac{g K_c}{2 g_{\max}}}{N_2 \cdot \alpha_b} \right] \times \right. \\ \left. \left(1 + 2 \lambda_{De} \cdot \frac{g \cdot K_c}{l_i} \right) - 1 + \frac{N_2 \cdot (1 + K_b) \cdot K_{ad} \cdot l_{pi} \cdot g \cdot K_c \cdot (\lambda_{SQ} + \lambda_{zQ})}{l_i \cdot \tau \cdot K_D^2} \right\} \quad (3.56)$$

$$K_Q \approx \frac{N_2}{\pi} \cdot (1 + K_b) - \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{4}{\pi} \frac{\sigma \cdot g \cdot K_c}{g_{\max}} \right) \cdot \cos \frac{\alpha_i \cdot \pi}{2} \cdot \left(\frac{\sin \left(\frac{N_2}{2} \cdot \alpha_b \right)}{2 \sin \left(\frac{\alpha_b}{2} \right)} \right) \quad (3.57)$$

ile ifade edilir.

3.9. Hidrogeneratör Geçici Zaman Parametreleri ve Zaman Sabitleri

d- ekseni geçici zaman reaktansı:

$$x_d' = x_{sl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fl}}} \text{ P.U.} \quad (3.58)$$

Eş. 3.58 ile ifade edilir.

d- eksenli damper kafesi geçici zaman reaktansı:

$$x_D' = x_{Dl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fl}}} \text{ P.U.} \quad (3.59)$$

Eş. 3.59 ile ifade edilir.

d-q eksenli alt-geçici zaman reaktansları:

$$x_d'' = x_{sl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{Dl}} + \frac{1}{x_{fl}}} \text{ P.U.} \quad (3.60)$$

Eş. 3.60 ile ifade edilir.

q- eksenli için:

$$x_q'' = x_{sl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{ql}}} \text{ P.U.} \quad (3.61)$$

olur.

Toplam uyartım zaman sabiti:

$$T_f \approx \frac{x_{ad} + x_{fl}}{r_f \cdot \omega_n} \text{ (saniye)} \quad (3.62)$$

Eş. 3.62 ile ifade edilir.

d- ekseni kısa devre zaman sabiti:

$$T_d' = T_f \cdot \frac{x_d'}{x_d} \text{ (saniye)} \quad ; \quad x_d = x_{sl} + x_{ad} \quad (3.63)$$

Eş. 3.63 ile ifade edilir.

d- ekseni alt-geçici zaman sabiti:

$$T_d'' = T_D \cdot \frac{x_d''}{x_d'} = \frac{x_D'}{r_D \cdot \omega_n} \cdot \frac{x_d''}{x_d'} \text{ (saniye)} \quad (3.64)$$

Eş. 3.64 ile ifade edilir.

3.10. Kayıplar ve Verim

HG'lerde oluşan kayıplar dört ana bölümde incelenmektedir.

- Sargı (bakır) kayıpları.
- Nüve (demir) kayıpları.
- Mekanik kayıplar.
- Fırça ve halka kayıpları.

Bakır kayıpları stator sargılarında ve eğer uyartıcı mil üzerinde yani rotorda ise uyartıcı bakır kayıpları olarak oluşmaktadır. Stator laminasyonlarından dolayı

histeresis ve edyy akım kayıpları nüve kaybı olarak değerlendirilmektedir. Yataklardan dolayı meydana gelen kayıplar mekanik kayıp ve fırçalarda ve damper sargılarında meydana gelen kayıplar da bu kategoridedir [3]. Ek kayıplar olarak elektromanyetik harmoniklerin rotor yüzeyinde ve sargılarda meydana getirdiği kayıplar söylenebilir.

3.10.1. Uyartılmış HG’de yüksüz durumda nüve kayıpları

Hidrogeneratörlerde yüksüz durumda nüve kayıpları dört temel kayıptan oluşmaktadır. Bunlar;

- Stator nüvesi temel histeresis kayıpları.
- Edyy akım kayıpları.
- Rotor kutup gövdesi ek kayıpları
- Stator nüvesi laminasyon yığının arasındaki ek kayıplar.

$$P_{fe} = P_h + P_{eddy} = \left[K_h \cdot P_0 \cdot \left(\frac{f}{50} \right) + K_{ed} \cdot P_{edo} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{B}{1.0} \right)^2 \cdot G \quad (3.65)$$

Yukarda anılan kayıpları HG’de tek bir kayıp yada başka bir deyişle toplam kayıplar [25-26]:

$$\sum \text{kayıplar} = P_{fe} + P_{sc} + P_{mec} + P_{excsh} \quad (3.66)$$

Eş. 3.66 ile gösterilir.

3.10.2. Hidrogeneratörlerde verim

Hidrogeneratörlerde verim çıkış elektrik gücünün giriş mekanik gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_{HG} = \frac{(P_2)_{elektrik}}{(P_1)_{mekanik}} = \frac{(P_2)_{elektrik}}{(P_2)_{elektrik} + \sum \text{kayıplar}} \quad (3.67)$$

Endüstride verim hesabı beş farklı yük altında hesaplanmaktadır. %25, %50, %75, %100 ve %125. Gerilim ve hız sabitken mekanik kayıp, nüve kaybı, uyarıcı kaybı ve ek kayıplar da eklenecek olursa verim formülü [26]:

$$\eta_{HG} = \frac{K_{load} \cdot S_n \cdot \cos\varphi}{K_{load} \cdot S_n \cdot \cos\varphi + p_{feo} + p_{mec} + p_{scn} \cdot K_{load}^2 + p_{exch} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{fn}}\right)^2 + p_{brush} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{fn}}\right) + p_{stray}} \quad (3.68)$$

Eş. 3.68 ile elde edilmektedir.

Direk soğutmalı HG'lere göre günümüzde harici soğutma sistemine sahip HG'ler kullanılmaya başlanmıştır buda verimi önemli ölçüde arttırmıştır. Buna ek olarak soğutma sisteminin maliyetleri de kaçınılmaz olarak artmıştır.

4. OPTİMİZASYON

4.1. Giriş

Optimizasyon metodları bağımlı veya bağımsız değişkenlerden oluşan fonksiyonların maksimum ve minimum noktalarının bulunmasını arar. Optimizasyon, burada bahsedilen şekliyle, simulasyon sonuçlarına dayanır. Problem ayrıca, hem sürekli değişkenlerin varlığı hem de ayrı ayrı bileşenlerin kataloglardan ve veritabanlarından seçimi olarak tanımlanır. Bunun sonucu olarak problem doğrusal değildir [27].

Karmaşık Metod ya da genetik algoritma gibi derece derece değişmeyen metodların uygulanmasının bir nedeni de budur. Diğer ana neden, bu metodlar çok modelli araştırma alanlarında yerleştirildiğinde genel uygunluğu daha sağlıklıdır. Bu metodlar algoritmalarda hiçbir değiştirme yapmaksızın geniş bir problem sahasına uygulanabilirler. Optimizasyonun bir tarafı tasarım taslaklarının değerlendirilmesidir. İkinci tarafı yeni ve daha umut vadeden tasarımların meydana getirilmesidir. Böylece, optimizasyon hem analizi (değerlendirme) hem de sentezi (yeni çözümlerin üretimi) içerir. Değerlendirme genellikle tasarım taslağının ne kadar iyi olduğunu belirleyen ve değer biçimini içeren hedef fonksiyon vasıtasıyla yapılır. Her optimizasyon probleminde olduğu gibi hedef fonksiyonun biçimlendirilmesi optimizasyonun sonuçları noktasında çok can alıcıdır [27-29].

Optimizasyon bilimde, mühendislikte, ekonomide, yönetimde, endüstride ve diğer alanlarda sıklıkla ve artan bir şekilde kullanılan bir konudur. Amaç birçok seçenek arasında en iyi olanı seçmektir [27-29].

Yeni çözümlerin üretilmesi optimizasyon stratejisine bağlıdır. Teknik olarak konuşmak gerekirse bizler sadece zaten ortada bulunmak için bekleyen (optimum) çözümleri buluyoruz. Tabii ki, ortada araştırma yapılacak alanla ilgili yaratıcı bir şey yok, ama çözüm alanı devasa büyüklükte olabilir ve bu büyüdükçe en iyi ya da en azından iyi çözümler bulmak için karmaşık araştırmalara olan ihtiyaç gittikçe artar.

“Problemin tanımı” farklı çözüm kavramları üretmek için beklentiler listesi oluşturulmasını sağlar. Kavramlar yeteri kadar açık hale getirildiğinde, modelleme ve simulasyon bazı belirli sistem çözümlerinin niteliklerini tahmin etmek üzere kullanılır. Her çözüm sonrasında optimizasyon, sistem çözümlerinin değerlendirilmesinin otomatikleştirilmesi için ve yeni sistem taslakları üretmek için kullanılır. Süreç, optimizasyon birleştirilene ve en uygun sistem bulunana kadar devam eder. Genellikle ilk optimizasyon çalışmasında nihai tasarım elde edilemez.

Modelleme ve simulasyonun kullanılmasının nedenlerinden biri tasarlanmak istenen sistemi anlamaktır. Diğer neden ise sistemden beklentilerimizi anlamak ve hedefler arasındaki önceliklerimizi belirlemektir. Bu iki durum da aynı derecede önemlidir. Schrage’inde ifade ettiği gibi, “genellikle simulasyonlar beklentilerimizin gerçekçi olmadığını ya da yanlış planlanmış olduğunu teyit eder”. Bunun tersine, beklentilerimizin yeterince yaratıcı ve gerçekçi olmadığı da ortaya çıkabilir. Eğer optimizasyon ile düşünülen istenilen sonuç elde edilemiyorsa kavram değiştirilmeli ya da yeni bir hedef fonksiyonuyla problem yeniden formüle edilmelidir [27-29].

Elektrik makinelerinin tasarım optimizasyonu, farklı amaçları aynı anda dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Örneğin motor&generatör boyutları küçük olmalı, maliyeti düşük olmalı, verimi ve güç faktörü yüksek olmalı gibi amaçlar sıralanabilir. Bütün bunlar düşünüldüğünde çok kriterli optimizasyonun önemi ortaya çıkmaktadır.

Öncelikle tasarımın iyi olup olmadığına karar verebilmek için amaç fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Amaç fonksiyonu motor&generatörün bütün fiziksel ve geometrik boyutlarını kapsayacak şekilde tanımlanmalıdır. Ayrıca amaç fonksiyonuna, tasarımın genel standartları ve müşteri istekleri doğrultusunda belirlenecek kısıtlar da dahil edilmelidir.

4.2. Tasarım Optimizasyonu Tanımlaması

Bu bölümde sistemlerin optimum tasarımı ile ilgili bazı temel kavramlar anlatılacak. İlk olarak, bir genel tasarım optimizasyon modelinin tanımlanmasının yapılması

yararlı olacaktır. Yerel ve genel minimum tanımları yapıp; tasarım optimizasyon modeli için bir çözümün varlığı araştırılacaktır. Model için en uygunluk koşulu ortaya konup sonuçları paylaşılacaktır. Aşağıda değineceğimiz kavramlar pratik uygulamada önemli bir yere sahiptir çünkü faydalı bir çözüm üretmede başarısız olan optimizasyon proseslerindeki durumlar için bir bakış açısı verirler. Optimizasyon için sayısal metodların çoğu bu kavramlara dayandığından önemli bir yere sahiptirler [27-29].

4.2.1. İdeal tasarım modeli

Problemin formülasyonu tasarım optimizasyon işleminde önemli bir adımdır. Statik ve dinamik tepki problemleri, elektrik makinelerinin şekil optimizasyonu, güvenilir tasarım, sistemlerin optimal kontrolü ve bir çok diğerleri nonlinear programlama problemleri olarak (NLP) formüle edilebilir.

Problem formülasyon işlemi tasarım değişkenlerinin tanımlanmasını gerektirir. Bir maliyet fonksiyonu veya bir objektif fonksiyon ve sistemin uygun performansı ve güvenliği için kısıtlılıklar problemin sınıfına ve ihtiyaçlara bağlı olarak tasarım değişkenlerinin bir kaç tipi ve maliyet fonksiyonları tanımlanabilir. Kısıtlılıklar genellikle fiziksel limitleri, malzeme doyumu, burkulma yükü, titreşim frekansları, harmonikler ve diğer böyle tepki miktarlarını içerir. Bu problemler bir standart NLP modele kaydedilebilir [27-29].

Bir “ $\leq$ ” formda ifade edilen denk olan ve olmayan kısıtlılıklara maruz bir fonksiyonun minimizasyonu olarak uygun x ile bir maliyet fonksiyonu:

$$S = \left\{ x : \begin{array}{l} g_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, p; \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = p+1, p+2, \dots, m \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

$F(x)$: En aza indirmek için n boyutlu bir tasarım değişken vektör x 'i bul.

$g_j(x) = -G_j(x) \leq 0$ ile sayısal optimizasyon işleminde kolayca etkiliyebilir. Bu yüzden, verimliliği arttırmak için algoritmaların bilgisayar uygulamalarında ayrık olarak uygulanabilir. Ancak sunum basitliğinden dolayı, böyle basit sınır kısıtlılıkları denk olmayan kısıtlılıklarda $g_j(x) \leq 0$ olarak kabul edilir.

Bir denk olmayan kısıt $g_j(x) \leq 0$ aktif olarak tasarım noktası x de belirtilen noktada yani $g_j(x) = 0$ 'da bir denklik olarak sağlanırsa aktif değil denilir; eğer negatif değerli ise belirtilen noktadaki pozitif değerde bozulursa aktif olarak kabul edilir.

Eğer problemin maliyet ve kısıtlılık fonksiyonları değişken terimlerde sayısal problem bir sayısal programlama (LP) olarak adlandırılır, eğer maliyet fonksiyonu ikinci mertebeden denklem ve kısıtlar sayısal problem bir ikinci dereceden denklem programlama (QP) problemi olarak adlandırılır. Nonlinear problemler de, sayısal algoritmaların çoğu yineleme işlemlerinde ya bir LP veya QP alt problemini çözer bu yüzden, bu problem alanları oldukça önemlidir ve araştırmanın ana büyüklüğü nonlinear problemler için özel metodlar geliştirmeye yönelmiştir [27-29].

Elektrik makinelerinin tasarım problemlerine bağlı olarak NLP modeller için aşağıdaki noktaları not etmek önemlidir;

1. Model sürekli tasarım değişkenleri ile tüm problemlere uygulanabilir. Çok nesnel ve ayrık değişken problemler belli bir aşamadan sonra tatbik edilebilir.
2. Problemin fonksiyonları iki kez türetilabilir kabul edilir. Türetilabilir fonksiyonları olmayan problemler ilave hesaplama yöntemleri ile uygulanabilir.
3. Maliyet ve kısıtlılık fonksiyonları genellikle tasarım değişkenlerinin açık fonksiyonları olarak kesindir. Ancak bu fonksiyonlar çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak da değerlendirilebilir. Bu da yaygın olarak tasarım hassasiyet analizi olarak bilinir ve bu bölüm içerisinde aşağıda değinilecektir.

4.2.2. Tanımlar ve çözüm

Tasarım optimizasyonu ile ilgili çeşitli kavramları sunmadan önce, fonksiyon $F(x)$ için bir minimum nokta tanımının yapılması, problem için optimum çözümün varlığını tartışılabilmesi için gereklidir.

Yerel minimum maliyet fonksiyonu $f(x)$ bir yerel minimuma sahiptir ve görelî minimum olarak da adlandırılır. Kısıtlılık setinde bir x noktasında eğer x^* noktasının uygun küçük bir komşuluğunda tüm x için, eğer sıkı eşitsizlik varsa yani;

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (4.2)$$

ise;

$f(x^*) < f(x)$ tüm $x \neq x^*$ için, x^* sıkı veya yalıtılmış yerel minimum olarak adlandırılır.

Genel minimum maliyet fonksiyonu $F(x)$ genel bir minimuma sahiptir, (Mutlak minimum olarak da adlandırılır). Bir x^* noktasında eğer denklem 4.2 izlenirse, yani; $f(x^*) \leq f(x)$ kısıtlılık seti S' 'de tüm x için. Eğer kesin (Strict) eşitsizlik varsa yani; $f(x^*) < f(x)$ tüm $x \neq x^*$ ise, o zaman x^* kesin veya tek, genel minimum olarak adlandırılır. Bu tanımlardan anlaşıldığı üzere, yerel minimum için, x^* noktası civarında S' 'de küçük bir uygun grup tamamen n -boyutlu uzaydır. Önceki tanımlar böyle kısıtlılığı olmayan problemleri de açıklanmasına yardımcı olur [27-29].

Ayrıca fonksiyon S $f(x)$ birçok genel minimum noktası fonksiyon değerlerini sıçratabilir (aşırı şekilde değiştirebilir). Noktaların tümünde aynı olan, ancak bir tane kesin genel minimum olabilir ve bu da yerel minimumun yalıtılmış olmadığını gösterir. Genel olarak problemin bir çözümünün varlığını bilmek zordur. Önemli olan çözümün varlığının sorgulanmasıdır, ancak gelecek olan teorem bu konuda yardımcı olabilir.

Genel minimum'un varlığı, Eğer $f(x)$ boş olmayan uygun bir grup S , kapalı ve sınırlı, grup üzerinde süreklidir, o zaman S 'de $f(x)$ için bir genel minimum vardır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta yukarıdaki teorem bir genel minimum noktanın varlığı için sadece yeterli şartları verir. Bu şartların sağlanması gerekli değildir çünkü problem için bir genel minimum şartlara ihtiyaç olmayabilir. Diğer deyişle, yukarıdaki teorem “gerek ve yeter şart” durumunu belirtmez. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kapalı ve sınırlı bir S grubunda $f(x)$ sürekli olduğundan, sınırlı fonksiyondur. Gelecek teoremi kullanmak için, S grubunun kapalı, sınırlı ve boş olmadığı belirtilmelidir. Eğer tüm kısıtlı fonksiyonlar $g_i(x)$ sürekli ise ve problem formülasyonunda kesin eşitsizlik yoksa $[g_i(x) \leq 0]$, o zaman S grubu kapalıdır. Bu yüzden, bu şartı kontrol etmek zordur. S grubu boş değildir. Eğer uygun tasarımlar varsa, yani, kısıtlılıkta karışıklık yoktur ve problem fazla kısıtlanmamıştır. Çözüm işlemini başlatmadan bu şartı kontrol etmek zordur. Eğer çözüm işlemi uygun noktaya uğramazsa, o zaman S grubunun boş olduğu düşünülebilir. Bu durumda, problem formülasyonu uygun tasarımların varlığı için yeniden incelenmeye ihtiyaç duyar. S 'in sınırsızlığını da kontrol etmek zordur ve öyle bir R sayısı vardır ki S de herhangi x için, $(x, x^*) < R$ dir [27-29,35-37].

4.2.3. Optimal olma şartları

Yerel ve genel minimum'un aşağıdaki tanımları problem için minimum noktaları bulmanın pratik bir yolunu vermez. Aşağıdaki tanımlar, sonsuz hesap ile verilen bir noktanın optimalliğini kontrol etmek için de kullanılamaz. Ancak, tanımlar şartları türetmek için kullanılır ki bu da bir minimum nokta karakterize eder. Bunlar optimallik koşulları olarak adlandırılır. İki tip optimallik koşulu vardır; gerekli ve yeterli. Bir yerel minimum nokta gerekli şartları sağlamalıdır; yoksa o minimum nokta olamaz. Burada önemli olan nokta bu şartları sağlayan nokta bir minimum nokta olmamalıdır, yani noktalar minimum nokta olmadan gerekli koşulları sağlayabilmelidir. Gerekli koşulları sağlayan noktalar sadece minimuma aday, veya basitce sabit noktalardır. Yeterli şartlar minimum noktaları diğerlerinden ayırır. Hem gerekli hem de yeterli şartların tanımlaması yapılacaktır [35-37].

Optimallik şartları iki yönden önemlidir:

- 1) Minimum noktaları bulmak için nümerik yöntemler geliştirmede kullanılabilirler; bu konuya literatürde genişçe değinilmiştir.
- 2) Verilen bir noktanın optimalliğini kontrol için kullanılabilir.

4.2.4. Maliyet fonksiyonu değerlendirilmesi

Çoğu zaman problem için maliyet fonksiyonu pozitif bir sabit ile ölçeklendirilmeye ihtiyaç duyar. Bu ölçeklendirme optimum noktayı etkilememesine rağmen, maliyet fonksiyonu değerini ve kısıtlılık için Lagrange çarpanlarını değiştirir. Kısıtlılık şartlarını kullanarak Lagrange çarpanlarının tümü de aynı ölçekteki faktörler ile çarpılabilir. u_j^* ; orijinal maliyet fonksiyonu ile j , kısıtlılık için Lagrange çarpanı olsun. Maliyet fonksiyonu $f^{new} = q \cdot f$ olarak yazılabilir, $a > 0$ için verilen bir sabittir, ve u_j^{new} : optimum da j kısıtlılık için Lagrange çarpanının yeni değeri olsun. Yeni ve eski Lagrange çarpanları aşağıdaki şekilde ilişkilidir [35-37].

$$u_j^{new} = a u_j^*, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4.3)$$

4.3. Optimizasyon Tasarım Başlıkları

Optimizasyonun tanımını yaptıktan sonra bu tez de çalışma konusu olan hidrogeneratör tasarım optimizasyonunda kullanılacak parametreler sunulacaktır. Buna ek olarak şimdiye kadar boyutlandırma ve özel eşitliklerden bahsedilmişti şimdi bu eşitlikler kullanılarak hangi parametrelerin optimize edileceği konusu tartışılacaktır [30-31].

Giriş başlangıç tasarımı ve genel optimizasyon amaçları belirlendikten sonra bu amaçlar içindeki motor&generatör tasarım değişkenleri ;

- Stator delik çapı D_{is}
- Oyuk genişliği W_{ss}
- Stator akım yüklemesi (A/m)
- Stator yüzey yüklemesi W / m^2
- Stator dişi akı yoğunluğu B_{ts}
- Stator boyunduruk akı yoğunluğu B_{ys}
- Rotor kutup gövdesi akı yoğunluğu (gerekliyorsa) B_p
- Rotor yüzey yüklemesi W / m^2

Optimizasyon işlemi sırasında her değerin kendine ait maksimum ve minimum değerlerinin ayrı ayrı oluşturulması gerekmektedir.

Literatürde kullanılan ve motor&generatör geometrisini birinci derecede etkileyen değişkenler optimizasyon tasarım parametreleri olarak seçilmiştir. İlk giriş tasarımından elde edilen sayısal veriler ile alt ve üst sınır değerleri girilerek girilen aralıkta en uygun sonuçları elde etmek mümkündür.

Bu optimizasyon problemini çözmek için literatürde kullanılan optimizasyon teknikleri şunlardır;

- Quasi Newton Optimizer (Quasi Newton Optimizasyon metodu).
- Pattern Search Optimizer (Pattern Search Optimizasyon metodu).
- Sequential Nonlinear Programming (SNLP) Optimizer (Ardışık Nonlineer Programlama metodu).
- Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINLP) Optimizer (Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama metodu).
- Genetic Algorithms (Genetik Algoritma).

Her bir optimizasyon tekniği optimum sonuç hesaplamak için kullanılabilir. Quasi Newton ve Pattern Search tekniklerinde seçilen optimizasyon parametreleri

arasındaki ilişki lineer olmak zorundadır. SNLP, SMINLP ve Genetik algoritma tekniklerinde ise amaç fonksiyonu için seçilen optimizasyon parametreleri arasındaki ilişki lineer yada nonlinear olabilir. Kullanılan bu beş optimizasyon tekniklerinin hepsinde belirlenen amaç fonksiyonu için optimum değerler bulunabilmektedir. Hangi tekniğin kullanılacağı araştırmacının çözeceği optimizasyon probleminin niteliğine bağlıdır.

4.3.1. Optimizasyon probleminin matematiksel formülasyonu

Elektrik makinelerinin optimizasyonu genel olarak tek bir değişkenden fazla olarak birçok değişkenli olarak formüle edilebilir. Bunlar;

- Maliyet minimizasyonu
- Aktif materyal kullanımının azaltılması
- Verimin artırılması
- Motorun çıkış gücünün artırılması

Optimize edilecek fonksiyonun ekstremumunun bulunması aşağıdaki gibi tanımlanabilir [32-33].

$$Extr F(\vec{x}) = Extr [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})] \quad (4.4)$$

Burada;

$$F : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^k \quad g_i, h_j : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R} \quad \vec{x} \in \mathfrak{R}^n \quad \vec{x} = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (4.5)$$

Eşitlik ve eşitlik olmayan değişkenlerin tanımlaması;

$$\begin{aligned} g_i(\vec{x}) &\leq 0, & i &= 1, 2, 3, \dots, m \\ h_j(\vec{x}) &= 0, & j &= 1, 2, 3, \dots, p \end{aligned} \quad (4.6)$$

Eş. 4.6 ile ifade edilir.

Değişkenlerin limitleri ise:

$$\vec{x}_{\min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{\max} \quad (4.7)$$

Eş. 4.7 ile ifade edilir.

Yukardaki eşitliklerde minimize edilecek $f_i(\vec{x})$ fonksiyonunun vektör amaç fonksiyonu $F(\vec{x})$ 'dur. $\vec{x}$ vektörü optimizasyon problemindeki tasarım değişkenidir.

g_i nonlinear değişken, h_j de eşitlik değişkenidir. $x_{\min}$ ve $x_{\max}$ da optimizasyon aralığı sınırlarıdır.

Optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu $f_i(\vec{x})$ ile $\vec{x}$ arasında bir uyumsuzluk vardır. $\vec{x}$ çözümü olmasa bile $f_i(\vec{x})$ varlığını sürdürmektedir. Vektör optimizasyon problemleri çok amaçlı fonksiyonları ağırlık amaç yada maliyet yada verim fonksiyonuna dönüştürülerek tek amaçlı bir probleme dönüştürülebilir. Optimizasyon problemleri içinde en pratik seçim tek amaç fonksiyonunu minimize yada maksimize etme seçeneği gibi gözükmektedir.

4.4. Optimizasyon Teknikleri

Bu bölümde literatürde kullanılan optimizasyon teknikleri anlatılacaktır. Çeşitli özellikleri, algoritmaları, avantajları ve dezavantajları gibi bilgiler sunulacaktır.

Başlıca kullanılan optimizasyon teknikleri:

- Quasi Newton Optimizer (Quasi Newton Optimizasyon metodu).
- Pattern Search Optimizer (Pattern Search Optimizasyon metodu).
 - Tabulation Method (Çizelgeleme metodu).

- o Sequential Method (Ardışık metodu).
- o The Simplex Method (Tek yönlü metodu).
- o Linear Method (Lineer metodu).
- Sequential Nonlinear Programming (SNLP) Optimizer (Ardışık Nonlinear Programlama metodu).
- Sequential Mixed Integer NonLinear Programming (SMINLP) Optimizer (Ardışık Karma Değişken Nonlinear Programlama metodu).
- Stochastic Methods (Stokastik Metodlar).
 - o Genetic Algorithms (Genetik Algoritmalar).
 - o Popülasyon bazlı arttırımsal öğrenme metodu.

Yukarda sayılan metodlar hidrogeneratör tasarımında yaygın olarak kullanılan optimizasyon teknikleridir.

4.4.1. Quasi newton optimizasyon tekniği

$F(\vec{x})$ optimizasyon amaç fonksiyonunun ikinci dereceden Taylor Serileri açılımını kullanarak fonksiyonunun sıfır, bir ve ikinci türevlerine ihtiyaç duyar. Çözüme ulaşmak için her iterasyondan sonra bilgiler güncellenmektedir. Optimizasyon problemi çözüm işlemi sırasında çözümde meydana gelecek ufak sayısal sapmalar önemsizse ve Ardışık Nonlinear Programlama (ANP) ile işlem yapmak zor ise sonlu eleman metodu hesaplamalarını içeren optimizasyon amaç fonksiyonu çözümü yapılabilir. Ama bu metod'da çözüm sayısal sapmalar içerecektir [39]. Değişken;

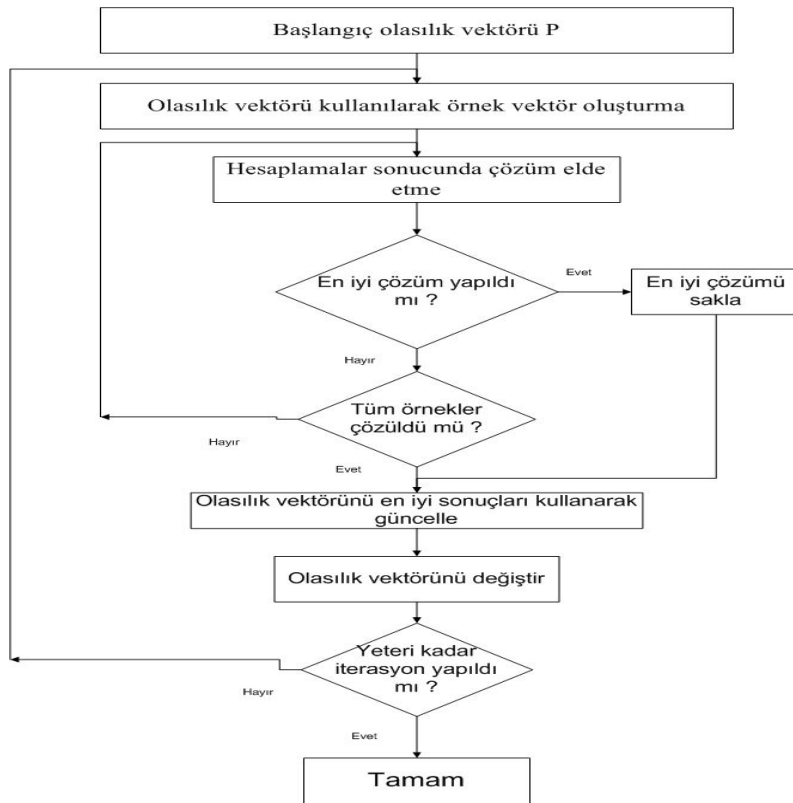
$$F(\vec{x} + 1) \leq F(\vec{x}_i) \quad \vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + h_i \vec{s}_i \quad (4.8)$$

Eş. 4.8 ile ifade edilir.

4.4.2. Pattern search optimizasyon tekniği

Pattern search tekniğinde herhangi bir şekilde optimizasyon amaç fonksiyonunun türevinin bilinmesine gerek yoktur.

Fakat bu teknik de amaç fonksiyonunun sınırları $x_{\min}$ ve $x_{\max}$ 'nin çözüme en yakın değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Optimizasyon problemi çözüm işlemi sırasında çözümde meydana gelecek ufak sayısal sapmalar önemli ise sonlu eleman metodu hesaplamalarını içeren grid bazlı tek yönlü çözümler yapılabilir. Optimizasyon problemi iki boyutlu bir modelden oluşuyorsa üçgenler eğer üç boyutlu katı bir modelden oluşuyorsa dörtyüzlüler grid temelli olarak oluşturulur. Çözüm işlemi modelin durumuna göre 2D veya 3D olması durumunda sonuç iyileştirilene kadar devam eder. Sonuç geliştirilmemişse pattern search bir sonraki yüzeyden işleme devam eder gridler yenilenir eğer sonuç geliştirilmiş ise çözüm adımı kabul edilip ilk çözüm olarak adlandırılır. Popülasyon bazlı arttırımsal öğrenme optimizasyon problemi çözüm algoritması bir akış şeması halinde sunulmuştur [39].



Şekil 4.1. Popülasyon bazlı arttırımsal öğrenme metodu optimizasyon tekniği çözüm akış şeması.

Çizelgeleme metodu

Çizelgeleme metodunda belirlenen sınır içinde en küçük alanın bilindiği varsayılarak optimizasyon probleminin çözümü optimum aralıkta yapılır. Çözüm sırasında rastgele bir arama yapıldığından ve öte yandan da bu rastgele seçimin optimum aralıkta yapılıyor olmasından çözüm geniş sayılar yerine daha dar bir aralıkta devam etmektedir. Çok değişkenli problemi çözmek için bu metotta genelleştirilmiş bir Fibonacci arama tekniğinden yararlanılır [28].

Ardışık metod

Amaç fonksiyonunun incelenmesi ve irdelenmesiyle oluşturulan fonksiyonun bazı geometrik yapıları ve değişkenlerden oluşur. Bu metodun orijini faktöriyel açılamdan gelmektedir. Amaç fonksiyonu uzayda bağımsız değişkenleri olan bir hypercube'e indirgenir. Hypercube'ün tam merkezi optimizasyon probleminde aradığımız minimum değere denk gelmektedir [28].

Tek yönlü metod

Bu metotta n tane bağımsız değişkeni $n+1$ tane mutasyona uğratarak amaç fonksiyonu ile optimizasyon problemine çözüm arar. Eğer çözümde tek yönlü arttırmılardan herhangi birinde artma olmaz ise artık o yönde arttırım yapılmaz ve arttırımın boyutu küçültülür. Bu optimizasyon problemindeki minimum'u aramayı daha dar bir alanda yapmaya olanak tanır [28].

4.4.3. Sequential nonlinear programming (Ardışık nonlinear programlama)

SNLP tekniğinin optimizasyon problemlerini çözmede en iyi teknik olduğuna dair genel bir görüş birliği olmamakla beraber bu teknikte hem değişken hem de amaç fonksiyonunun nonlinear olabilmesi diğer tekniklere göre bir üstünlük sağlamaktadır.

SNLP'nin Quasi Newton metoduna göre ana avantajı problemi daha derinlemesine ele alması ve bu teknikte optimizasyon değişkenlerinin sürekli uzayda kabul etmesidir. Optimizasyon tekniği olarak SNLP Quasi ve Pattern search tekniğine göre daha hassas ve kesin olmayan çözümlemelerde amaç fonksiyonuna en yakın sonucu verebilmektedir. Optimizasyon değişkenlerinin nonlinear olmasına izin vermesi en büyük avantajı olarak söylenebilir [39].

Optimizasyon teknikleri nümerik çözümler olarak birinden diğerine oldukça fazladır. SNLP adı altında oldukça fazla sayısal çözüm tekniği vardır. Bunlardan bazıları:

- Newton's Methods –Newton metodu.
- Conjugate Gradient Method –Eşlenik gradyan metodu.
- Trust-Region and Conic Model Methods –Konik model metodu.
- Nonlinear Least-Squares Problems –En küçük kareler metodu.
- Theory of Constrained Optimization –Değişken optimizasyon metodu.
- Quadratic Programming –Karesel programlama metodu.
- Penalty Function Methods –Ceza fonksiyonu metodu.
- Feasible Direction Methods –Uygulanabilir yön metodu.
- Sequential Quadratic Programming –Tek yönlü quadratic programlama.
- TR Methods for Constrained Problems –TR metodu.
- Nonsmooth Optimization –Düzgün olmayan optimizasyon.

Matematiksel olarak tanımlanacak olursa:

$\|\bullet\|$ bu ifade norm olarak anılacak ve aşağıdaki özellikleri sağlıyor olacaktır.

1. $\|x\| \geq 0, \quad \forall x \in \mathfrak{R}^n : \|x\| = 0$ sadece ve sadece $x = 0$ ise.
2. $\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|, \quad \forall \alpha \in \mathfrak{R} : x \in \mathfrak{R}^n;$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|, \quad \forall x, y \in \mathfrak{R}^n.$

Bu tanımlamalardan yola çıkılarak en iyi bilinen vektör normları aşağıdaki gibidir:

$$\|x\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i|, \quad l_{\infty} - \text{norm} \quad (4.9)$$

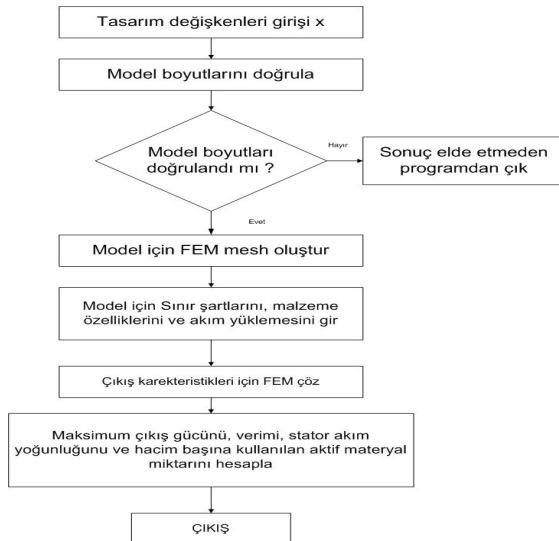
$$\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|, \quad l_1 - \text{norm} \quad (4.10)$$

$$\|x\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2}, \quad l_2 - \text{norm} \quad (4.11)$$

Yukardaki vektör normları kullanılarak x değişkeninin genel olarak ifade edilişi aşağıdaki gibidir:

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p}, \quad l_p - \text{norm} \quad (4.12)$$

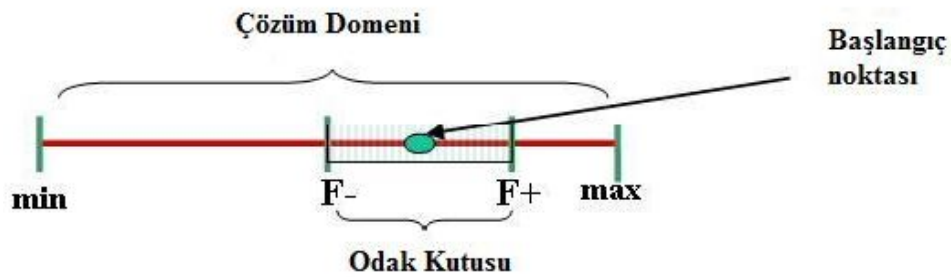
Nonlinear programlama tekniği ile hazırlanmış ve generatör çıkış karakteristik değerlerini verecek bir algoritma aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.2. Generatör çıkış karakteristiklerini veren algoritma akış diyagramı.

4.4.4. Sequential mixed integer nonlinear programming (Ardışık karma değişken nonlinear programlama)

SMINLP optimizasyon tekniğinde SNLP gibi sadece sürekli zamanda değişkenler kullanılacağı gibi birbirine bağımlı değişkenlerde tasarım değişkeni olarak kullanılabilir. Örneğin N bir optimizasyon tasarım değişkeni ise N'e bağlı olarak başka bir tasarım değişkeni tanımlanabilmektedir. $K=2,345*N$, veya $K=\sin(30*N)$ gibi. Bu yolla K süreksiz bir değişken olarak tanımlandığı gibi N'i direk olarak tek başına tasarım değişkeni olarak tanımlamakda mümkündür. SNLP ve SMINLP optimizasyon teknikleri için çözüm aralığında istenilen alt çözüm aralıkları da girilebilmektedir. Bu optimal sonucun olduğunu tahmin ettiğiniz aralık olarak girilmelidir optimizasyon çözümü esnasında elde edilen sonuçlar yorumlanarak girilebilir [39].



Şekil 4.3. SMINLP optimizasyon uygulama aralığı gösterimi.

SMINLP'de kullanılan lineer değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\sum_i \alpha_{ij} x_i < c_j \forall j \quad (4.13)$$

Eş. 4.13'te:

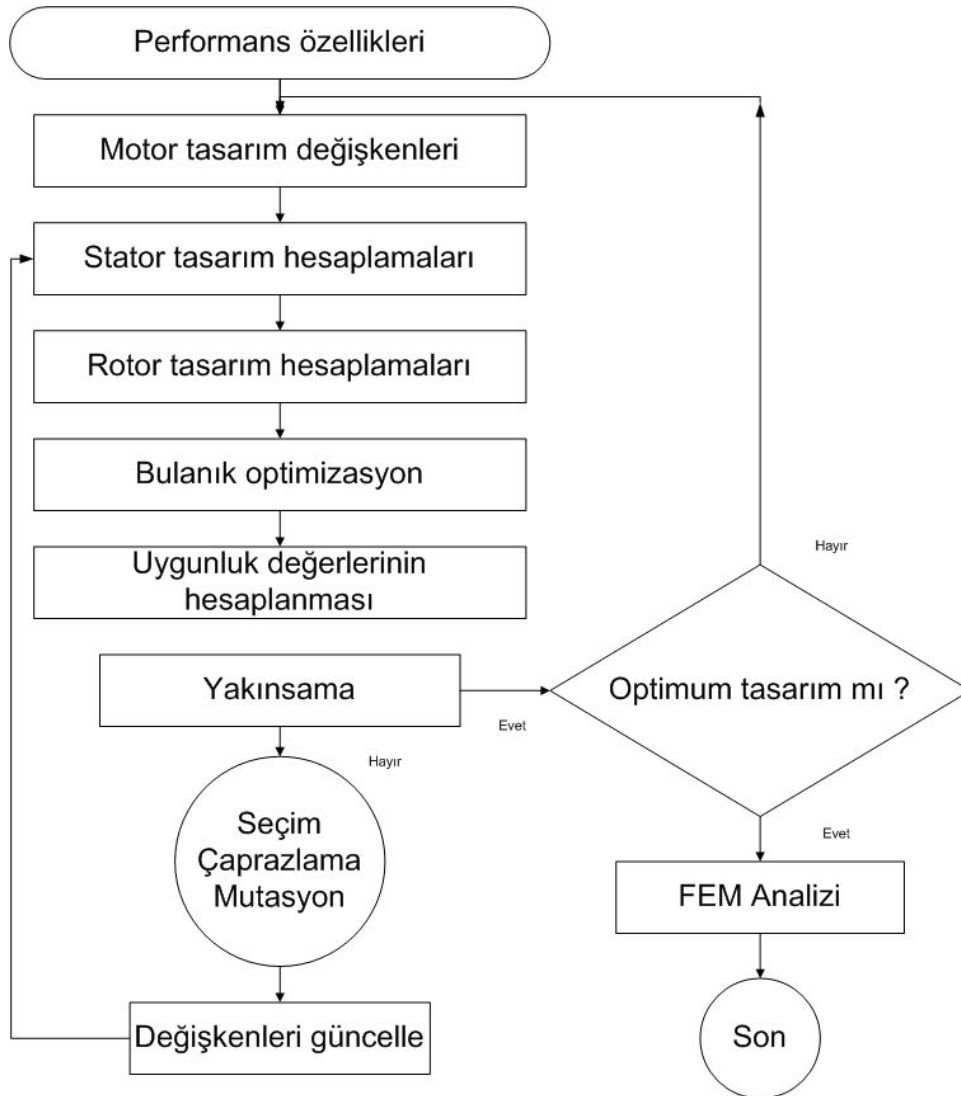
α_{ij} ; Katsayıları ifade eder.

c_j ; j^{th} ci Lineer değişken için karşılaştırma değeridir.

x_i ; i'nci tasarım parametresidir.

4.4.5. Genetik Algoritma

Bu optimizasyon sonuç arama mekanizması kökünde doğal genetik alanında uygun çiftleri rastgele birleştirme ve sonuç elde etme yöntemine dayanmaktadır. Genetik algoritma rastgele optimizasyon sınırları içinde popülasyonlar oluşturur ve bu aralıklar içinde en uygun sonucu arar [28].



Şekil 4.4. Genetik algoritma ile oluşturulmuş optimum tasarım analizi yapan algoritmanın akış şeması.

4.5. Önerilen ve Geliştirilen Optimizasyon Yöntemi

Matematiksel olarak karma değişken kullanılarak amaç fonksiyonunu $f(y(x_k))$ minimize yada maksimize eden yöntem aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [40-48].

$$\text{Min } f(y(x_k)) \text{ veya Max } f(y(x_k)) \quad (4.14)$$

$$h_i(y(x_k))=0, \quad i=1,2,3,\dots,m, \quad (4.15)$$

$$g_j(y(x_k))\leq 0, \quad j=1,2,3,\dots,j, \quad (4.16)$$

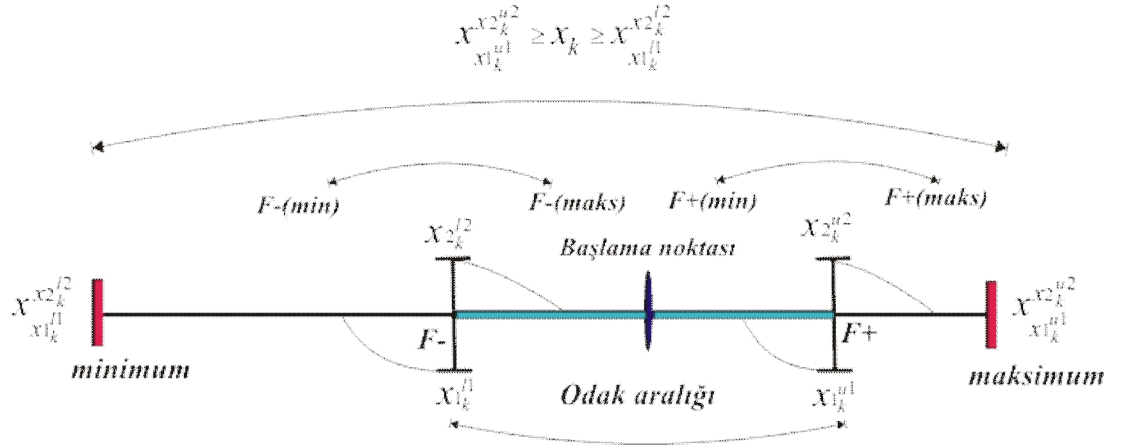
$$X_{x_k}^{x_k^{u2}} \geq X_k \geq X_{x_k}^{x_k^{l2}} \quad k=1,2,3,\dots,n, \quad (4.17)$$

Burada,

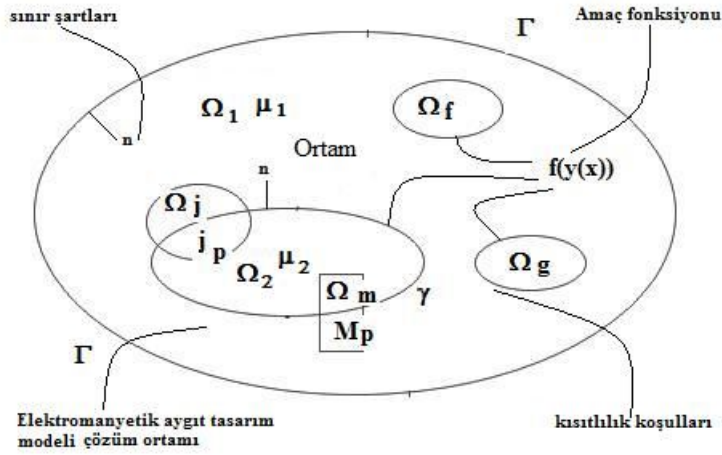
$$f(y(x_k)) = \{f_1(y_1(x_k)), f_2(y_2(x_k)), f_3(y_3(x_k)), \dots, f_n(y_n(x_k))\} \quad (4.18)$$

$f(y(x_k))$ amaç fonksiyonu, “ g_j ” ve “ h_i ” eşitsizlik ve eşitlik değişkenleri, “ x_k ” tasarım değişkenleri vektörü, “ y ”, “ x_k ” değerine bağlı olan ikinci tasarım değişkeni x_k^u ve x_k^l alt ve üst indisleri, alt ve üst limitlerdir. “ u ” ve “ l ” alt ve üst limit indisleri içinde odak noktaları limitleridir. Genel problem Eş. 4.18’de tanımlanmıştır. Bu tür denklemler genellikle analitik (belirleme, arama) yöntemiyle yada stokastik bir yöntemle çözülebilmektedir. Bilindiği üzere klasik optimizasyon yöntemlerinde değişken alt ve üst limiti belirlendikten sonra çözüm bu alt ve üst limitin oluşturduğu çözüm domeninde aranır. Geliştirilen bu yöntemde ikinci dereceden hassasiyet denklemlerini içeren ve alt ve üst limitleride kendi içerisinde odak noktaları olarak adlandırdığımız noktalar arasında belirlenen sınırlar dahilinde çözümü arar, burda yöntemin etkili olmasının sebebi ve aynı zamanda bilgisayarın işlem zamanını düşürmesi şöyle açıklanabilir. Çok geniş bir aralıkta sonuç aramak ve çok sayıda

iterasyon yapmak yerine eğer ilk yapılan iterasyonlar sonucunda çözüm odak sınırları içinde çıkmışsa geniş çözüm aralığı yerine belirlenen bu daha küçük çözüm domeni kullanılır. Bu şekilde hem hız hemde çözümde daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak mümkün olabilmektedir.



Şekil 4.5. Amaç fonksiyonu değişkenleri çözümü için sınır gösterimi.



Şekil 4.6. Amaç fonksiyonu çözümü için sınır gösterimi.

Bu çalışmada, aşağıda tanımlanan optimizasyon problemine çözüm aramak için; iki boyutlu öklid uzayında R^2 bir düzlem seçtik. Oluşturulan çözüm domeni $\Omega \in R^2$ için

amaç fonksiyonunun istenilen maksimum veya minimum değerini içermeli, amaç fonksiyonu $J(\Omega, u)$ tanımlanacak olursa [5-8];

$$J(\Omega, u) = \int_{\Gamma} f \left(X_{X_k^{u_1}}^{X_k^{u_2}} \geq X_k \geq X_{X_k^{l_1}}^{X_k^{l_2}}, u(x_k) \right) dx_k, \quad (4.19)$$

Burada, Γ , Ω için çözüm sınırı ($\Gamma \equiv \partial\Omega$) ve $u(x_k)$ de sınır değer problemi için çözümü ifade etmektedir;

$$\begin{aligned} \Delta u(x_k) - Kx_k \cdot u(x_k) &= g(x_k) & (x_k \in \Omega), \\ u(x_k) &= K(\text{const.}) & (x_k \in \Gamma). \end{aligned} \quad (4.20)$$

burada, verilen fonksiyon $K(x_k) \geq 0$, $g(x_k)$ ve $f \left(X_{X_k^{u_1}}^{X_k^{u_2}} \geq X_k \geq X_{X_k^{l_1}}^{X_k^{l_2}}, u(x_k) \right)$ birbirlerinin (x_k) argümanları için sürekli yeter olduğunu varsayarsak. Aynı zamanda Ω domeninin sürekli çözümü barındırdığı sağlanmalı.

$$I(\Omega) \equiv \int_{\Omega} h \left(X_{X_k^{u_1}}^{X_k^{u_2}} \geq X_k \geq X_{X_k^{l_1}}^{X_k^{l_2}} \right) dx_k = c(\text{const}), \quad (4.21)$$

Bu değişken çözüm sınırları içinde sabit olarak genelleştirilmiştir.

Bir elektrik makinesinin sargılarına akım uygulandığı zaman akım yoğunluğu oluşmaktadır ve enerji, kuvvet ve indüktans manyetik vektör potansiyeli ile bağlantılıdır A, çözüm domeni içindeki sınırlarda. Şimdi çözüm domeni içinde manyetik vektör potansiyelini bir değişken olarak tanımlayabiliriz $J(\Omega, u)$ amaç fonksiyonu için istenilen minimum yada maksimum değerini içerecek şekilde [5-8,40-48].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r \mu_0} (\nabla \times \bar{A} - \bar{B}_r) = \bar{J} \quad (4.22)$$

Lineer sistem eşitlikleri üretmek için Galerkin'in yaklaşımı manyetik vektör potansiyeline uygulanırsa [34];

$$[R] = \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right] [\bar{A}] - [Q] \quad (4.23)$$

Eş. 4.23 ifadesi elde edilir.

Tasarım hassasiyet'i amaç fonksiyonunun tasarım değişkenleriyle beraber toplam türevi olarak Eş. 4.24'de tanımlanmıştır.

$$\frac{df}{d \left[\begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{u_2} \\ X_{x_1 k}^{u_1} \end{pmatrix} \geq X_k \geq \begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{l_2} \\ X_{x_1 k}^{l_1} \end{pmatrix} \right]^T} = \frac{\partial f}{d \left[\begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{u_2} \\ X_{x_1 k}^{u_1} \end{pmatrix} \geq X_k \geq \begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{l_2} \\ X_{x_1 k}^{l_1} \end{pmatrix} \right]^T} + \frac{\partial f}{\partial [\bar{A}]^T} \frac{d[\bar{A}]}{d \left[\begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{u_2} \\ X_{x_1 k}^{u_1} \end{pmatrix} \geq X_k \geq \begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{l_2} \\ X_{x_1 k}^{l_1} \end{pmatrix} \right]^T} \quad (4.24)$$

Eş. 4.23'ün her iki tarafının diferansiyeli alınarak ve ek değişken $[\chi]^T$ ile çarpılarak, Eş. 4.25 ve 4.26 elde edilir.

$$[\chi]^T ([K] + [\bar{K}]) \frac{d[A]}{d \left[\begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{u_2} \\ X_{x_1 k}^{u_1} \end{pmatrix} \geq X_k \geq \begin{pmatrix} X_{x_1 k}^{l_2} \\ X_{x_1 k}^{l_1} \end{pmatrix} \right]^T} \quad (4.25)$$

ve,

$$= -[\chi]^T \left(\left(\frac{\partial[R]}{\partial \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T} \right) \right) \bigg|_{\frac{1}{\mu_r \mu_0}} - \frac{\partial[R]}{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}} \frac{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T} \quad (4.26)$$

ifadeleri elde edilir.

Matrisler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$[\bar{K}]^T = \frac{\partial \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right]}{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}} \frac{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial [A]^T} \cdot [\bar{A}] \quad (4.27)$$

$$\left(\frac{\partial[R]}{\partial \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T} \right) \bigg|_{\frac{1}{\mu_r \mu_0}} = \frac{\partial \left[K \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \right) \right]}{\partial \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T} \cdot [\bar{A}] - \frac{\partial[Q]}{\partial \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial[R]}{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}} = \frac{\partial[K]}{\partial \frac{1}{\mu_r \mu_0}} \cdot [\bar{A}] \quad (4.29)$$

Eğer $[\chi]$ katsayı olarak alırsak $d[A] / \left[\left(\mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k u_2} \geq \mathbf{X}_k \geq \mathbf{X}_{x_1^k}^{x_2^k l_2} \right) \right]^T$ için Eş. 4.24 ve

4.26 birbirine eşit olmaktadır.

Ek değişken aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

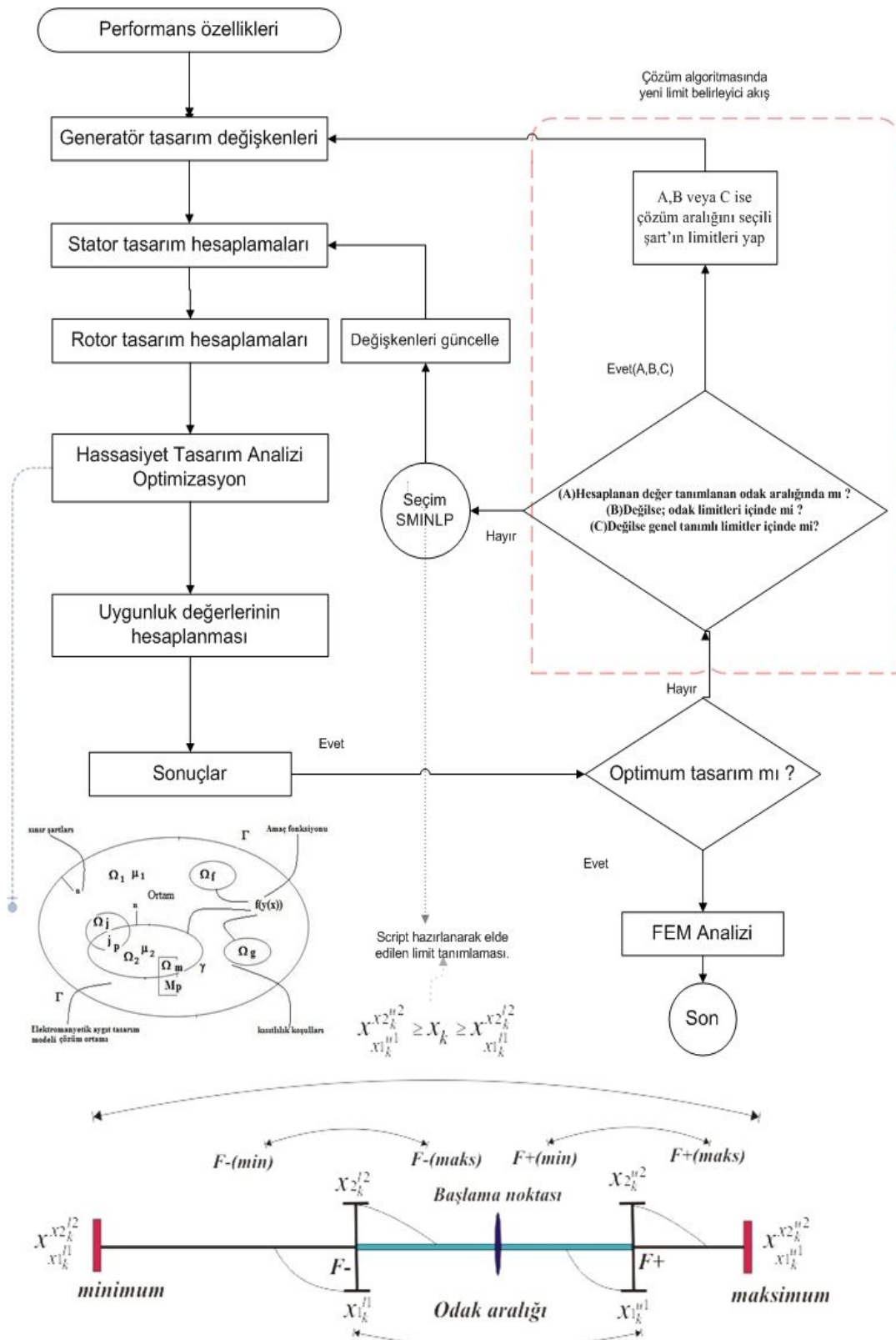
$$[K + \vec{K}]^T [\chi] = \frac{\partial f}{\partial [A]} \quad (4.30)$$

Sonuç olarak tasarım hassasiyet denklemi:

$$\frac{df}{d \left[\left(X_{x_k^{u2}}^{x_k^{u2}} \geq X_k \geq X_{x_k^{l2}}^{x_k^{l2}} \right) \right]^T} = \frac{df}{d \left[\left(X_{x_k^{u2}}^{x_k^{u2}} \geq X_k \geq X_{x_k^{l2}}^{x_k^{l2}} \right) \right]^T} [\chi]^T \left(\begin{array}{c} \frac{d[R]}{d \left[\left(X_{x_k^{u2}}^{x_k^{u2}} \geq X_k \geq X_{x_k^{l2}}^{x_k^{l2}} \right) \right]^T} - \frac{1}{\mu_r \mu_0} \\ \frac{d[R]}{\mu_r \mu_0} \frac{\partial \frac{1}{\partial B^2}}{\partial \left[\left(X_{x_k^{u2}}^{x_k^{u2}} \geq X_k \geq X_{x_k^{l2}}^{x_k^{l2}} \right) \right]^T} \end{array} \right) \quad (4.31)$$

Eş. 4.31 ile ifade edilir.

Aşağıda optimizasyon için hassasiyet analizini içeren ve klasik geniş aralıkta çözüm arayan ve çözüm için çok fazla iterasyon yapılması gereken optimizasyon yerine daha kuvvetli ve hassas yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Yapılan her iterasyonda sonucun çözüm limitleri sorgulanarak aralığın olabildiğince küçülmesi sağlanmaya çalışılmış ve amaç fonksiyonunun minimize yada maksimize edecek optimum değeri içeren aralık daraltılmıştır. Elde edilen çözüm aralığı ile Eş. 4.31’de kullanılan malzemenin manyetik geçirgenliğide dikkate alınarak Şekil 4.6’da verilen elektromanyetik sınır koşulları içinde çözüm aranmıştır. Şekil 4.7’de çözüm akış şeması yer almaktadır.



Şekil 4.7. HG için geliştirilen optimizasyon çözüm algoritması

4.5.1. Örnek uygulama çalışması

Yapılan çalışmalar sırasında Şekil 4.3'te sunulan Maxwell programının Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama metoduna ait optimizasyon algoritmasına ait limit tanımları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çözüm sürelerinin uzun olması daha pratik ve hassas bir yaklaşımın daha iyi sonuçlar vereceği gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Örneğin optimizasyon probleminin çözüm şartı; verimi maksimum değere çıkarmak olduğunda var olan metod yaklaşık 53 saat'te normal bir çözüm elde ederken (verim sonuç: %92,785) hazırlanan script (senaryo) sayesinde aynı problemi aynı şartlar altında yaklaşık 41 saat'te daha hassas bir çözüm elde edilmiştir (verim sonuç: %95,276). Verimi yükseltmek için hazırlanmış hassasiyet analizini de içinde barındıran script (senaryo) örnek olması açısından ekler kısmına eklenmiştir. Çalışmada hazırlanılan diğer scriptler (senaryolar) toplam ağırlık minimizasyonu, dinamik üç boyutlu transient mil torku ve uyartım akımı optimizasyonu ve statikmanyetik üç boyutlu optimizasyon ile indüktans matrisi optimizasyonunu içermektedir.

5. HİDROELEKTRİK GENERATÖR'ÜN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU SİMÜLASYONLARI VE HİDROGENERATÖR OPTİMİZASYONU

5.1. Giriş

Hidrogeneratörün bu bölümde temel boyutlandırma işleminden sonra iki boyutlu ve üç boyutlu statik manyetik analizleri, elektrostatik, geçici zaman ve statik termal analizleri yapılmıştır. Analizler iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu içeren Ansoft Maxwell 2D&3D programları ile yapılmıştır. Hidrogeneratörü boyutlandırmak için çalışmanın üçüncü bölümündeki boyut eşitlikleri ve tablolardan yararlanılmıştır. Elde edilen değerler ile Ansoft Rmxprt programıyla analitik çözümler elde edilmiştir. Tasarlanan hidrogeneratöre ait değerler tablolar halinde ekler kısmında sunulmuştur.

Elde edilen simülasyon sonuçları kullanılarak aktif materyal kullanımını azaltmak bu yolla ağırlığı ve kayıpları azaltmak ve verimi de yükseltmek için tasarlanan hidrogeneratörde boyut optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen değerler doğrulanmıştır. Hidrogeneratörde kullanılan malzemelerin karakteristiklerindeki kısıtlılıklar yüksek sıcaklıklarda kayıpların artması, verimin azalması gibi konular derinlemesine irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda görülmüştür ki aktif materyal kullanımını azaltmak üzerine kurulan bir optimizasyon probleminin sonucu kullanılan malzeme miktarı azaltılabilmekte fakat verimde çok küçük değişiklikler elde edilebilmektedir. Optimizasyonda birbirine bağımlı değişkenler kullanılmıştır d- eksenli doymuş reaktansı çıkık kutup rotor yayıyla birlikte kullanılmış, stator çapı stator boyunduruk akı yoğunluğuna bağlı olarak iyileştirilmeye çalışılmış ve tasarımdaki en iyi sonuçlar hidrogeneratör için elde edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan optimizasyon tekniği ile birbirine bağımlı ardışık karma değişken nonlinear programlama tekniği olarak literatürde geçen teknik sayesinde tasarım parametreleri en üst düzeyde sonuca katkı sağlayacak şekilde formülize edilmiştir.

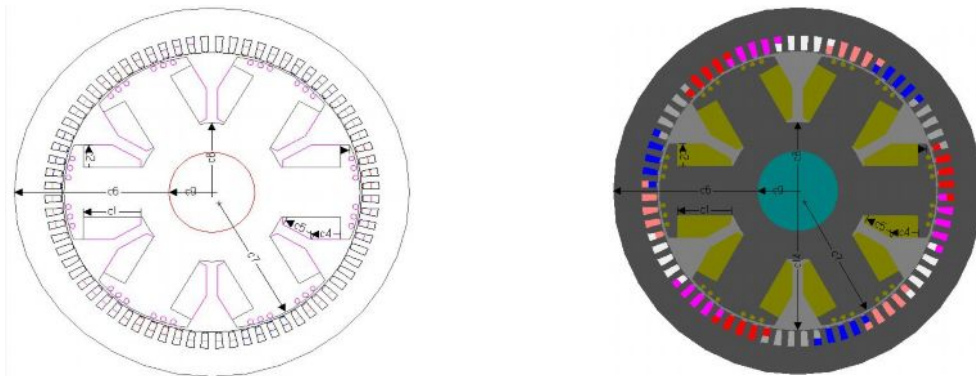
5.2. İki Boyutlu Analizler

Ansoft Maxwell paket programı temel olarak bir yönetici penceresi ve buna ait alt birimlerden oluşmuştur. Modellemeyi düşündüğümüz aygıtın ilk önce ölçüler, yapısında kullanılan malzemeler gibi özellikleri belirledikten sonra, yönetici penceresinden yapacağımız modellemeye ait çözüm tipini seçmeliyiz. Bu seçim aynı zamanda bizim çözüm sonunda hangi parametrelerle karşılaşacağımızıda belirler. Çözüm tipi şu bölümlerden oluşur:

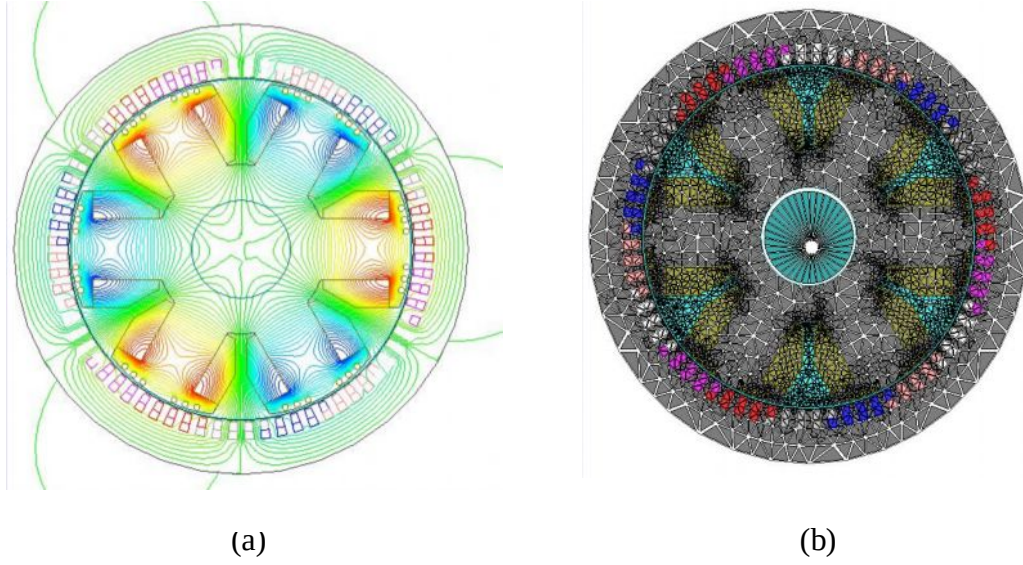
- Electrostatic (Elektrostatik)
- Magnetostatic (Manyetostatik)
- Eddy current (Girdap akımları)
- Transient (Geçici rejim)

5.2.1. Statik manyetik analiz

Bu çalışmada Magnetostatic (manyetostatik), Electrostatic (Elektrostatik), Transient (geçici rejim) çözüm tipleri kullanılmıştır. Çözüm tipi seçildikten sonra çizim menüsüne geçilir. Elde edilen boyut değerleriyle ilk tasarım modeli oluşturulur ve simülasyonu yapılır.



Şekil 5.1. Tasarlanan hidrogeneratöre ait ana boyutlar ve tasarım değişkenleri.



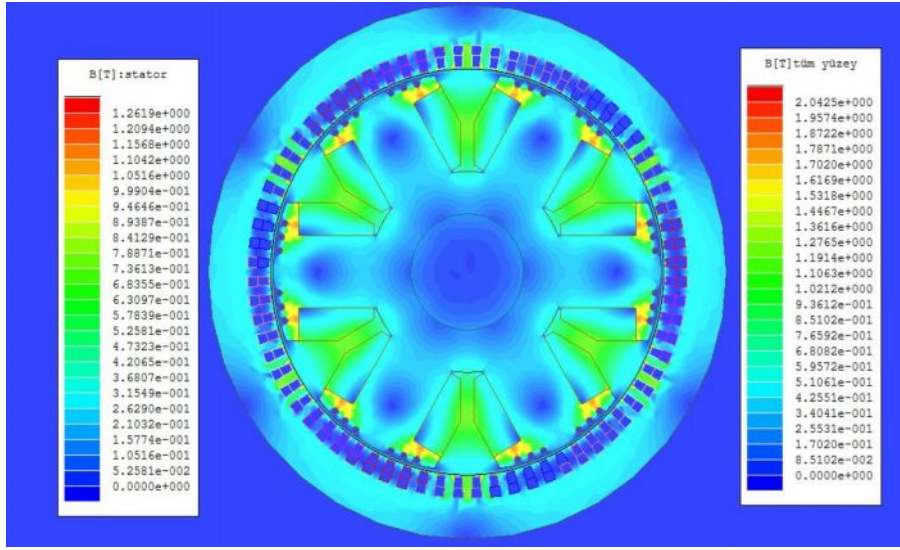
Şekil 5.2. Hidrogeneratöre ait (a) yüzey akı dağılımları, (b) sonlu eleman metodu çözüm mesh gösterimi.

Mevcut analitik teknikler kişilerin oluşturduğu kavramsal modeller üzerinde güçlü etki taşıdığından bu yeni analiz teknikleri tasarımcının probleme yaklaşımını son derece etkiler. Bu paket programlar analiz ve tasarım prosedürünü üç temel aşamada oluşturmaktadır.

Giriş: Bu aşamada eleman cinsleri, eleman sabitleri, elemanların özellikleri, yapılacak analiz çeşidi ve model geometrisi belirlenerek temel hazırlıklar tamamlanır.

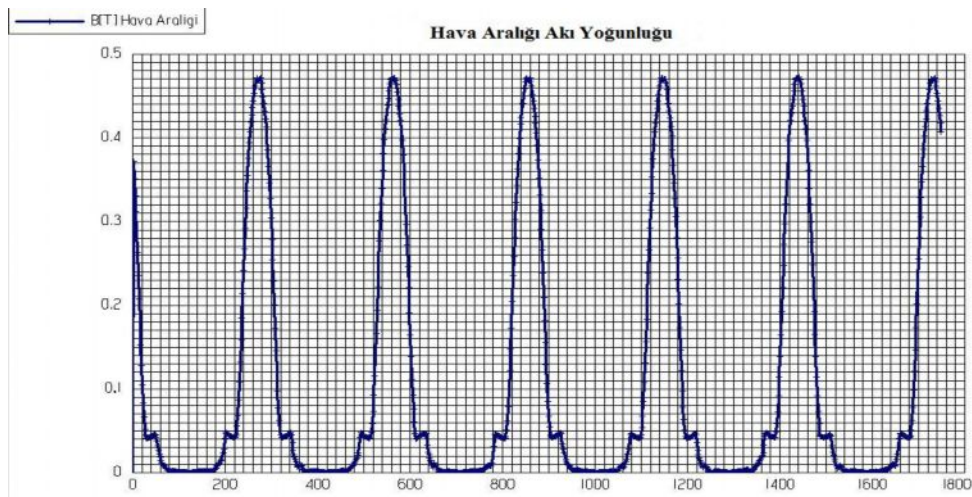
Çözüm: Bu aşamada sınır değerleri ve elemanlara ait kaynak bilgileri belirlenir. Kaynak değerleri için gerekli fonksiyon tanımları ve harici devre uygulamaları da yine bu aşamada gerçekleştirilir.

Çıkış: Bu aşamada çözümler yapılır. Sonuçlar rakamsal veya grafik olarak okunur.



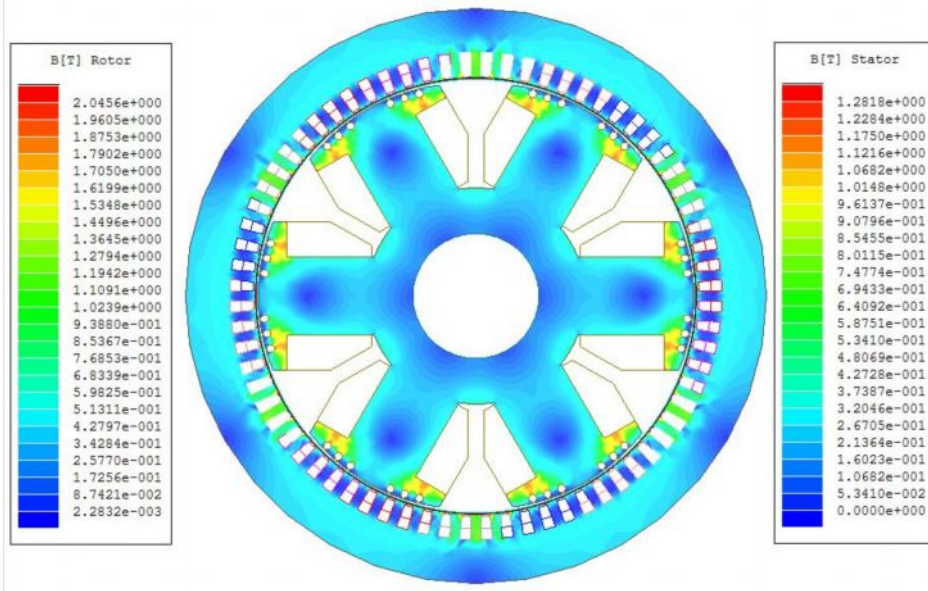
Şekil 5.3. Hidrogeneratöre ait yüzey manyetik akı yoğunlukları

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere tüm yüzeyde maksimum manyetik akı yoğunluğu 1,2 Tesla iken uyartım sargılarına yakın rotor yüzeylerinde bu değer 1,8 ile 2,0 Tesla değerlerine ulaşabilmektedir. Tam kutup yayı merkezlerinin statora bakan yüzlerinde dönel hareketin sonucu olarak akı geçişi minimum düzeyde olmaktadır.

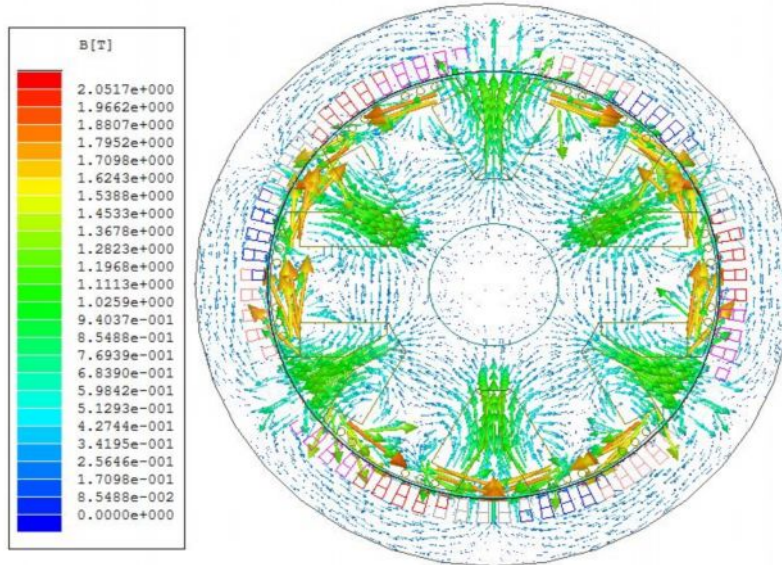


Şekil 5.4. Hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı (yüksüz çalışma).

Hidrogeneratör hava aralığı akı yoğunluğu gösterene Şekil 5.4'ten görülmektedir ki çıkık kutpa ait kutup yapısına benzer bir akı değişimi elde edilmektedir.



Şekil 5.5. Hidrogeneratör rotor ve statoruna ait manyetik akı yoğunlukları

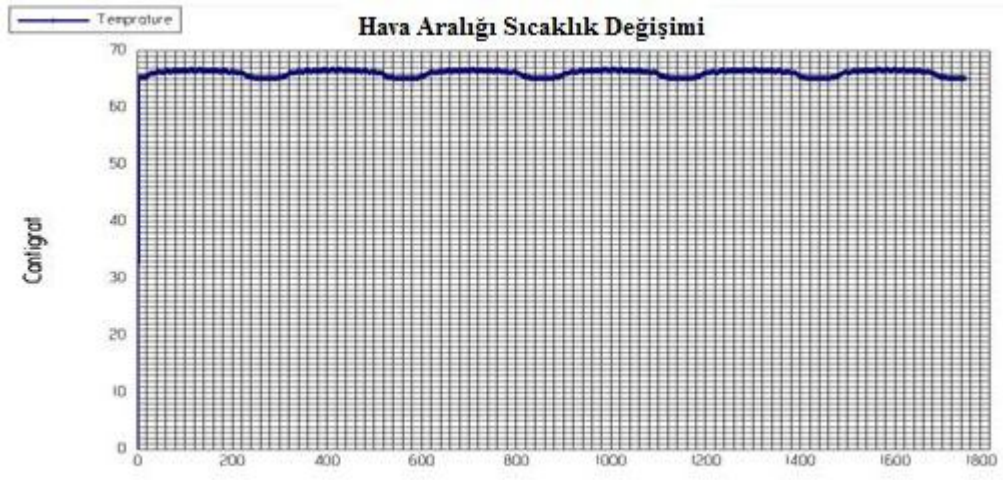


Şekil 5.6. Hidrogeneratör rotor ve statoruna ait manyetik akı yoğunlukları vektörel gösterimi.

Şekil 5.5 ve şekil 5.6 karşılaştırma amaçlı olarak aynı anda hem rotorda hem de stator yüzeyindeki oluşan anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımları incelenmiş ve görülmüştür ki statik uyartım karşısında her iki ana parçada oluşan değerler her iki şekilde de aynı çıkmaktadır.

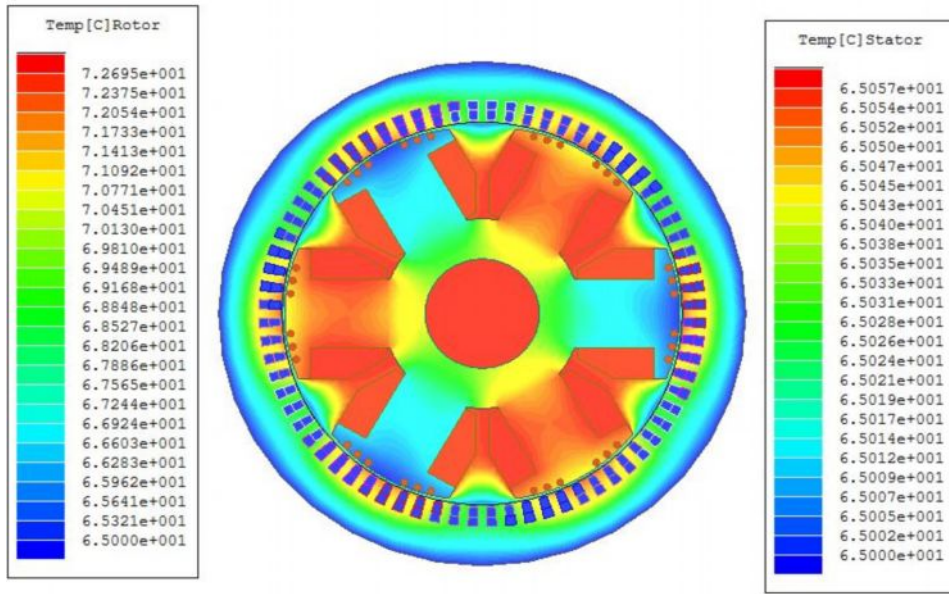
5.2.2. Statik ısı analiz

Statik termal analizde hidrogeneratörün tasarımda kullanılan çalışma sıcaklığı ve bunun çalışma performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca stator ve rotor yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımları görsel olarak gösterilmiştir.

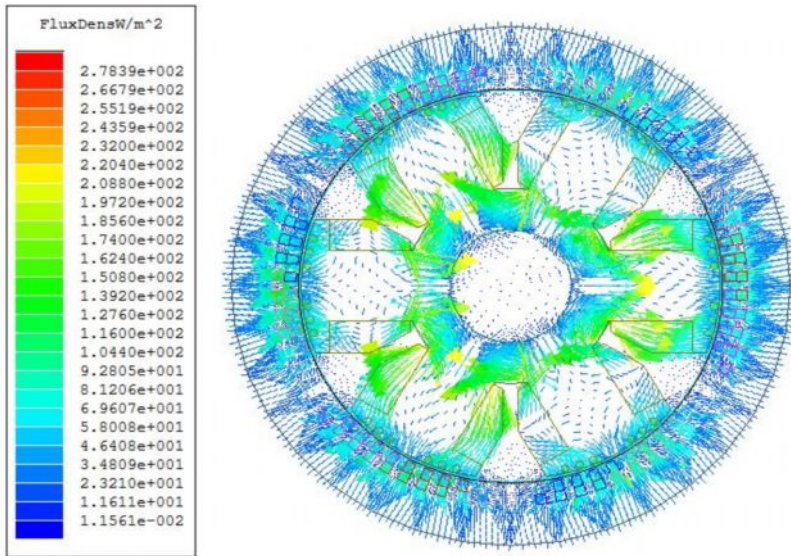


Şekil 5.7. Hidrogeneratör hava aralığı sıcaklık değişimi.

Çalışma sıcaklığı 115 C° olarak hesaplanan hidrogeneratörde ilk çalışma anında hava aralığında oluşan sıcaklık değişimi gösteriyorki stator ve rotor sargıları 115 C° için tasarlanmış olsada durarak çalışmada ortalama 65 C° bir çalışma sıcaklığı oluşmaktadır.



Şekil 5.8. Stator ve Rotor yüzeyleri sıcaklık dağılımları



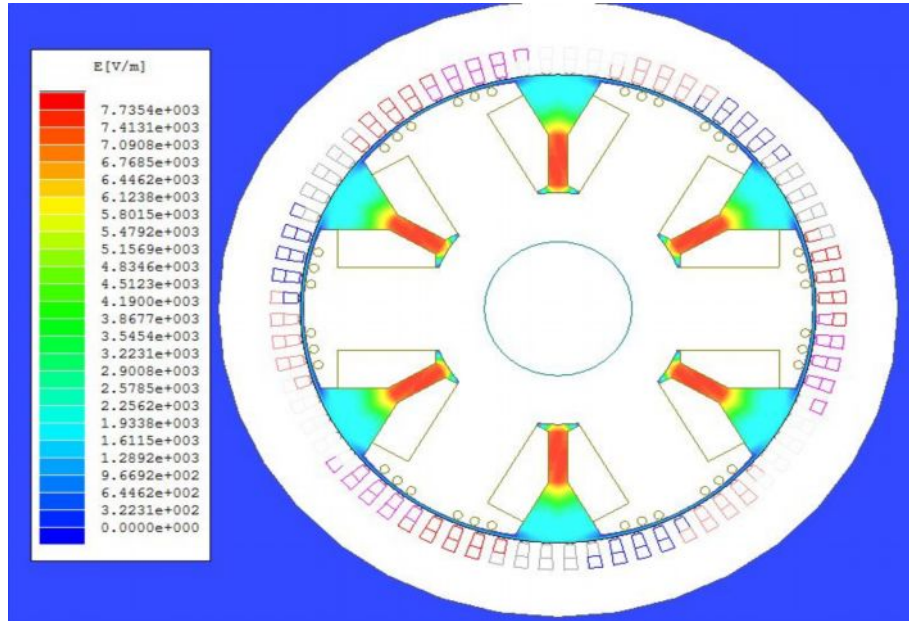
Şekil 5.9. Hidrogeneratör stator ve rotor yüzeylerine ait m^2 'ye düşen watt olarak sıcaklık dağılımının etkisi.

Şekil 5.8'de görülmektedir ki uyartım sargılarını taşıyan rotorda stator yüzeyine göre sıcaklık artışı daha fazla gerçekleşmektedir. Tasarlanan modelde dış ortamın sıcaklığı

ortalama 25 C° olarak düşünülmüştür. Soğutma sistemi tasarımında stator yığının parçalı yapılması ve hava sirkülasyonunu her iki yönlü artırıcı olarak gerçekleştirebilmesi hidrogeneratör içi çalışma sıcaklığına olumlu etki yapmıştır. Dolayısıyla makine performansı bundan olumlu etkilenmiştir.

5.2.3. Elektrostatik analiz

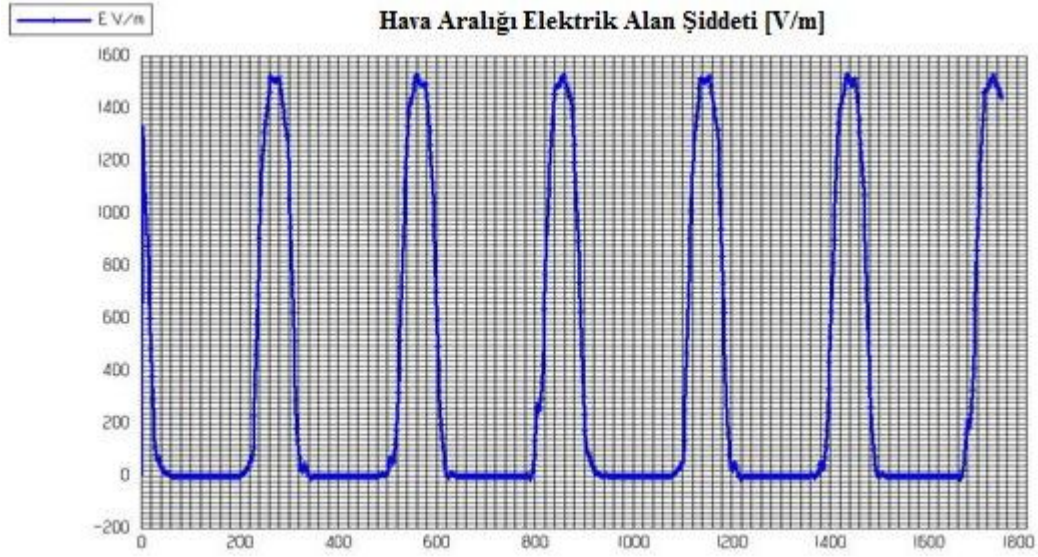
Hidrogeneratörlerde elektrostatik analiz çok önemlidir. Stator ve rotor sargılarının yalıtımında kullanılacak malzemelerin seçimi, sargı uçlarında ve yüzeylerinde meydana gelebilecek corona etkilerini aza indirmek ve bölgesel aşırı yük birikimleri olup olmadığının anlaşılması için tasarımın özellikle çalışılacak gerilim türüne bağlı olarak büyük oranda etkilemektedir.



Şekil 5.10. Hava aralığı elektrik alanı dağılımı.

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere uyartım sargıları arası en çok elektrik alanının olduğu gözükmemektedir. Uyartım sargılarından geçen akıma bağlı olarak oluşan elektrik alanı maksimum olduğu yerde 7735 V/m olarak değer almıştır. Uyartım

sargısı tasarımında sargıdan 76 volt DC gerilim geçecek şekilde tasarım yapılmıştır. Kullanılacak izolasyon malzemesi simülasyon sonuçlarına göre ve standart yalıtım sınıfına göre seçilecektir.

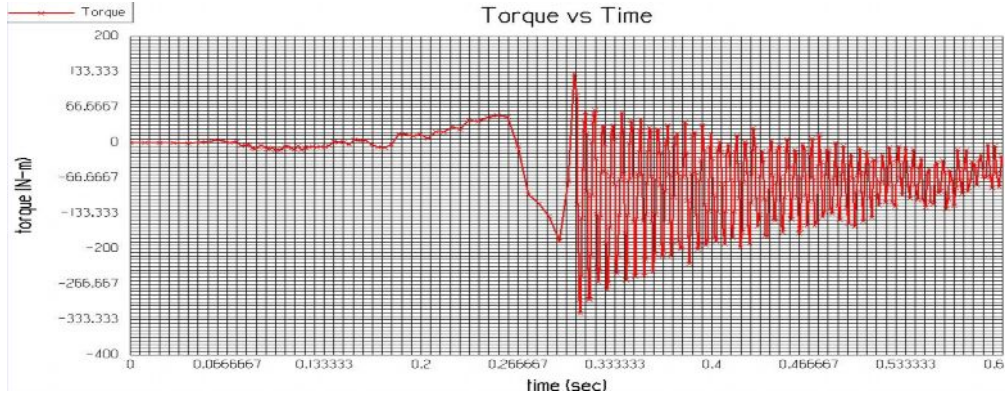


Şekil 5.11. Hava aralığı elektrik alanı değişim grafiği.

5.2.4. Geçici zaman analizi

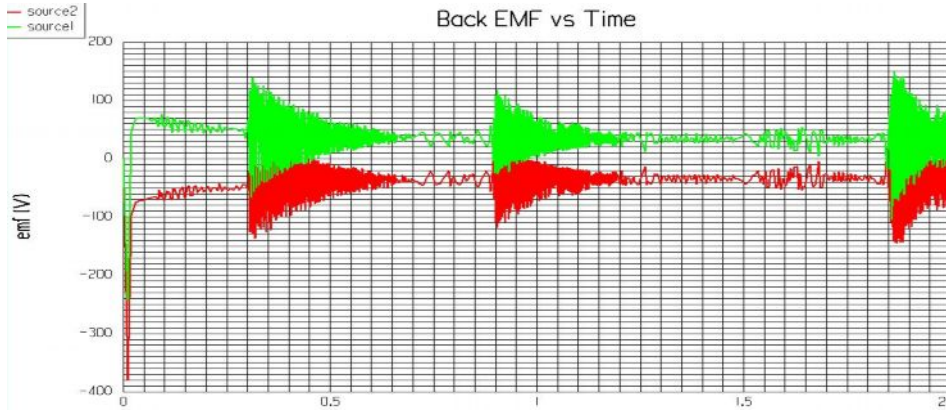
Geçici zaman analizinde hidrogeneratöre ait çalışmanın ilk iki saniyelik sürede verdiği tepkileri görebilmek için simüle edilmiştir. Amaç statik manyetik analiz ve analitik analizlerden elde ettiğimiz dataları kullanarak geçici zaman domenindeki analizleri yapmaktır.

Geçici zaman çözümünde harekete bağlı parametreler ve hidrogeneratör parametre değerleri analitik hesaplamalar ve simülasyonlar sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 5.12. Zamana bağlı tork eğrisi.

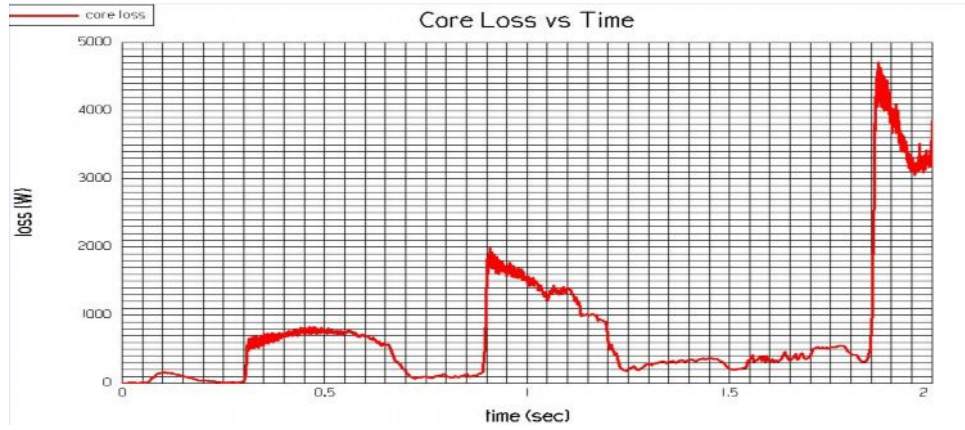
Şekil 5.12’de görüldüğü üzere ilk mekanik kuvvetin uygulanmasından sonra hidrogeneratör kararsız bir tork üretmektedir, aslında türbinin sağladığı mekanik kuvvetin etkisiyle makine generatör olarak çalışmaya başladığı anda hemen tork değeri kararlı bir hala gelmemektedir.



Şekil 5.13. Zamana bağlı zıt emk.

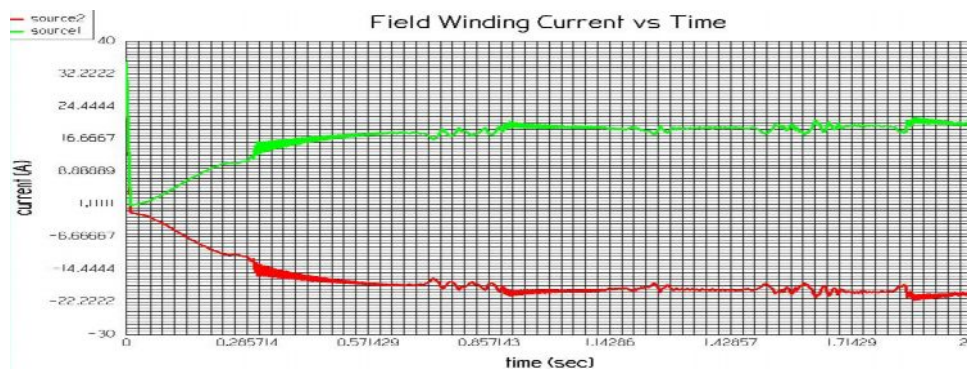
Zamana bağlı zıt emk grafiğinden görüldüğü üzere hidrogeneratörün başlangıç çalışmasında değer kararsız bir özellik göstermektedir. Uyarımın yani kaynağın

durumuna göre ve rotorun hareketine bağlı olarak indüklenmektedir ve işaret almaktadır.



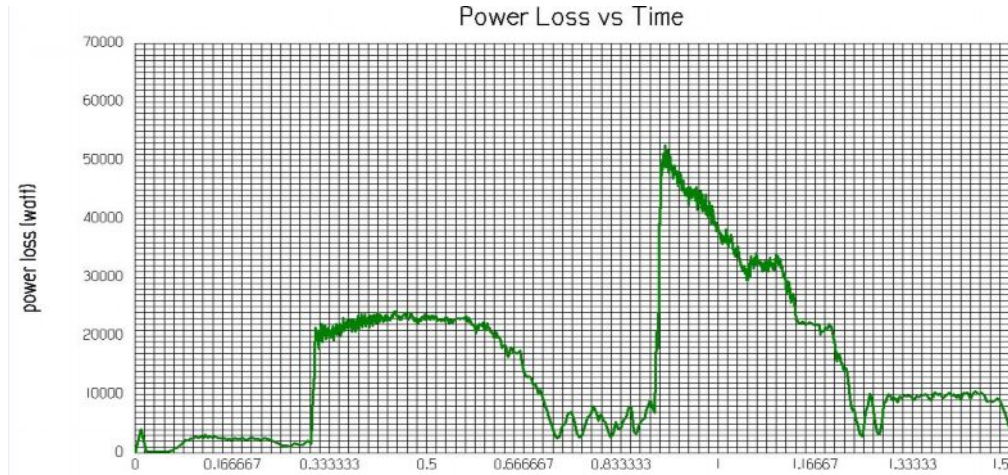
Şekil 5.14. Zamana bağlı olarak nüve kayıpları

Nüve kayıpları ilk çalışmaya başladıktan kısa bir süre sonra sıcaklık'ın da etkisiyle hızlı bir artış göstermiştir. Hidrogeneratör doyuma ulaşınca kadar stator ve rotor yüzeyinden geçen akı miktarı bir artış gösterebilir, doyumdan sonra akı geçişi sınırlanmış ve malzeme karakteristiğinde belirtilen şekilde nüve kayıpları oluşmuştur.



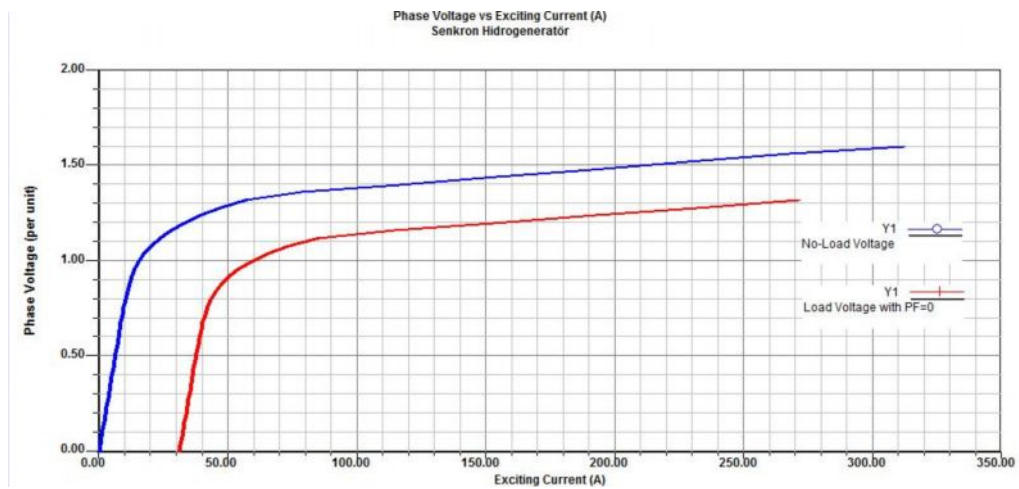
Şekil 5.15. Zamana bağlı uyarım akımının değişimi.

Uyartım akımı başlangıç rotor hızına bağlı olarak statik olarak kontrol edilmektedir. Kararlı durum çalışmasına geçildikten sonra uyartım sargısı akımlarında çok büyük değişimler gözlenmemiştir.



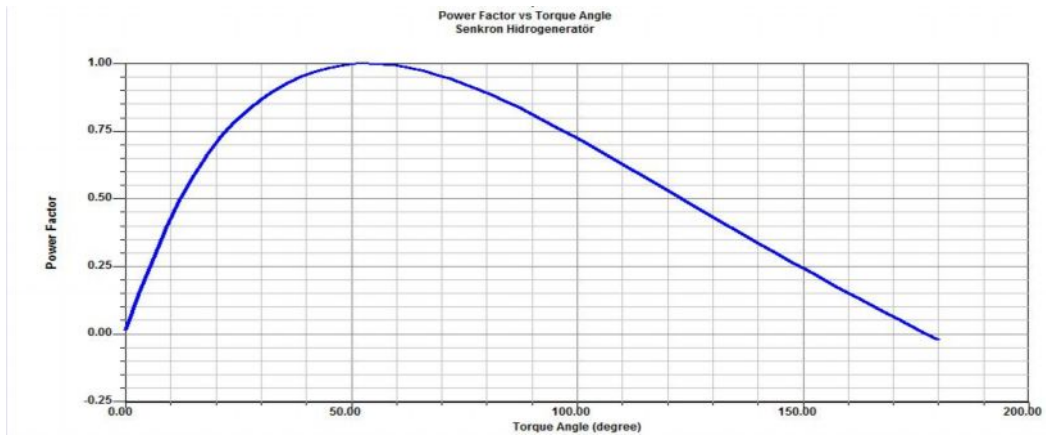
Şekil 5.16. Zamana bağlı güç kayıpları.

Güç kaybı değişim grafiğinden görüldüğü üzere maksimum güç kaybı doyumdan hemen önce 50000 Watt olarak gözükmektedir. Bundan daha önce yapılan analitik hesaplamalarda bu kaybın 53550 Watt olarak tespit edilmişti. Simülasyon sonuçlarıyla analitik hesaplamalar bir hata sınırı içinde yaklaşık değerler vermektedir.



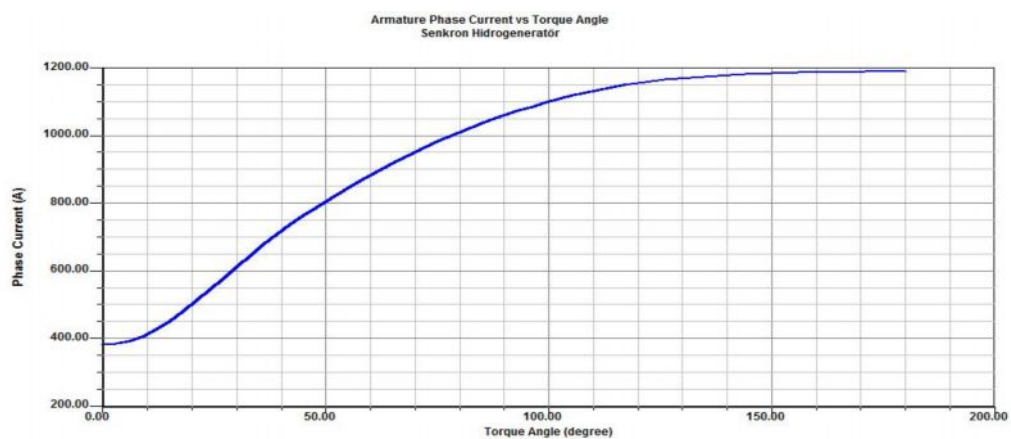
Şekil 5.17. Uyartım akımına karşı indüklenen faz gerilimi P.U.

Uyartım akımına karşılık oluşan faz gerilimi doyuma kadar neredeyse lineer bir artış gösterirken laminasyonda kullanılan malzemenin nonlineer özelliğine yakın bir özellik göstermiştir.

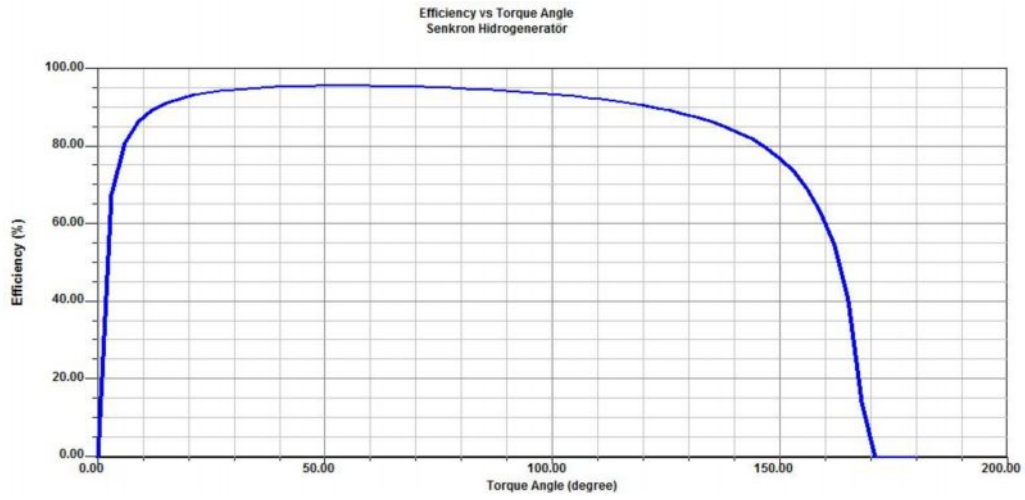


Şekil 5.18. Hidrogeneratöre ait güç faktörü eğrisi.

Hesaplanan stator faz akımı değeri 776 Amper değerindedir, aşağıdaki stator faz akımı grafiğinden anlaşıldığı üzere güç faktörü ve faz akımının maksimum olduğu değerler elektriksel olarak 50° denk gelmektedir.

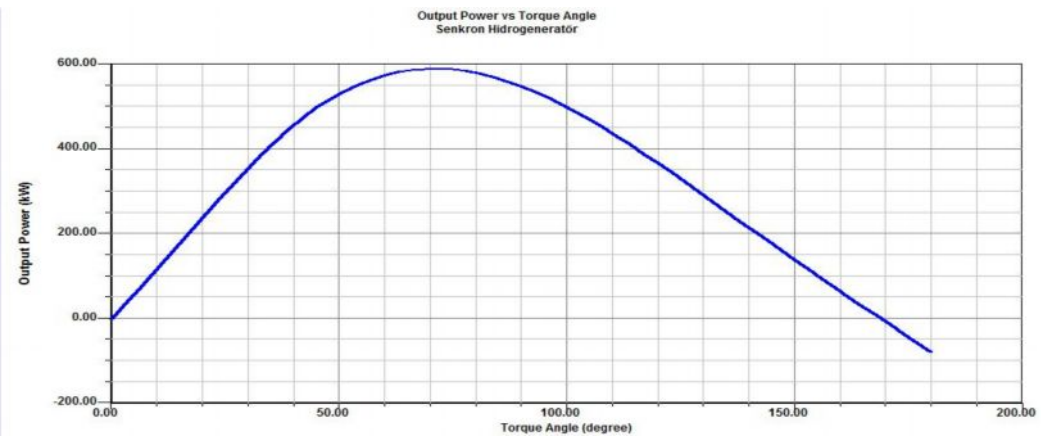


Şekil 5.19. Stator faz akımı değeri.



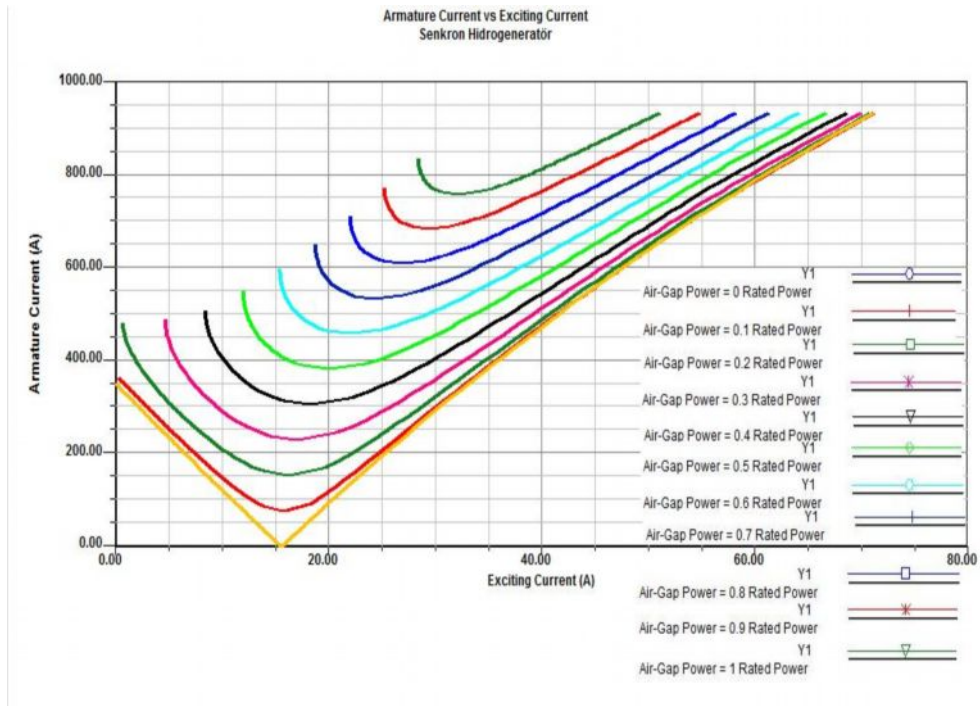
Şekil 5.20. Verim değişim grafiği.

Hidrogeneratörde verim değeri birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Farklı analitik hesaplamalar sonucunda tasarımı gerçekleştirilen generatörün verim düzeyi Şekil 5.20’den görüldüğü üzere %95 civarındadır.



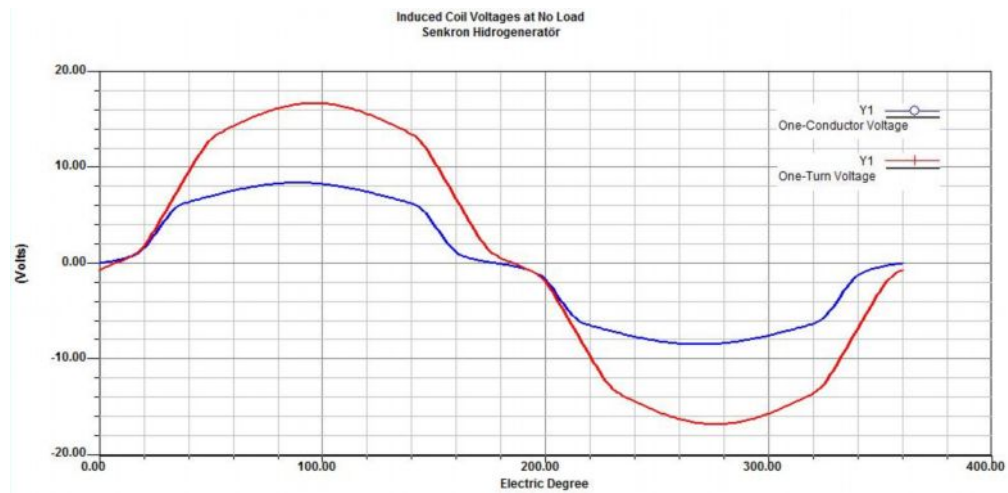
Şekil 5.21. Çıkış gücü tork açısıyla değişim grafiği.

Çıkış gücünün tork açısıyla değişim grafiğinden görülmektedir ki tasarlanan generatör sürekli çalışma dışında maksimum 600 kW çıkış gücü sağlayabilmektedir.



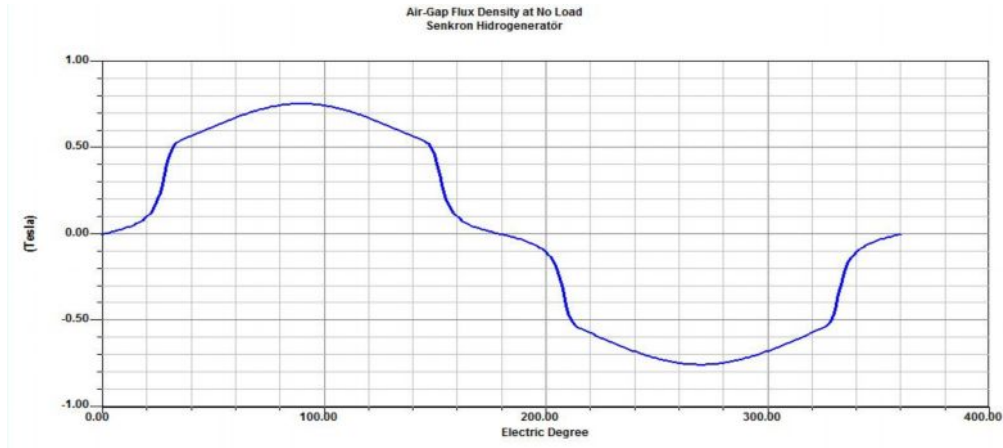
Şekil 5.22. Uyartım akımına karşı oluşan stator akımı.

Uyartım akımına karşı oluşan stator akımı grafiği, bu grafik hazırlanırken farklı hava aralığı güçlerinde uyartım akımları ve karşılık gelen stator akımları tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere uyartım akımı 35 Amper civarında tüm güç aralıklarında stator akımı elde edilebilmektedir.



Şekil 5.23. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilimleri.

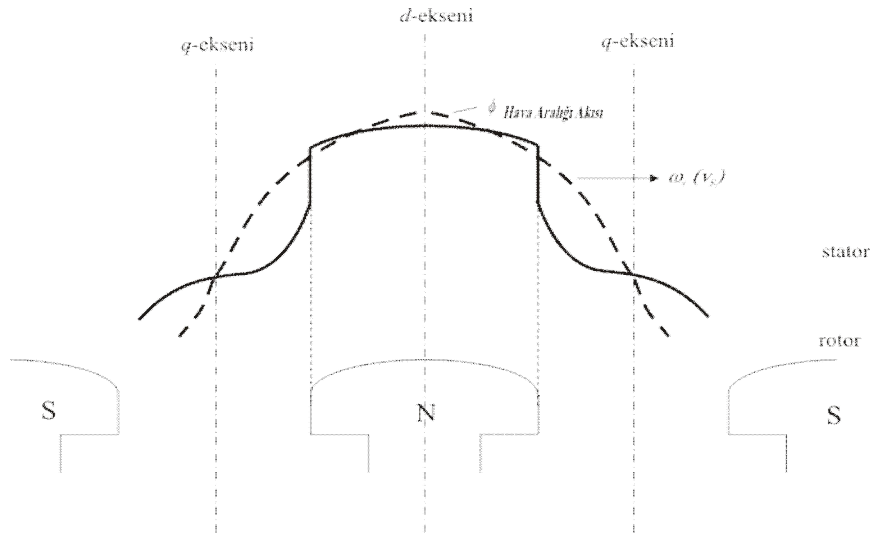
Generatör yüksüz durumda iken indüklenen tek bobin gerilimi dalga şekli olarak tamamen rotor çıkık kutupun şekline benzemektedir. Kutup altında kalan iletkende indüklenen gerilimin dalga şekli de başka bir deyişle kutup şekline benzemektedir.



Şekil 5.24. Hava aralığı manyetik akı dalga şekli.

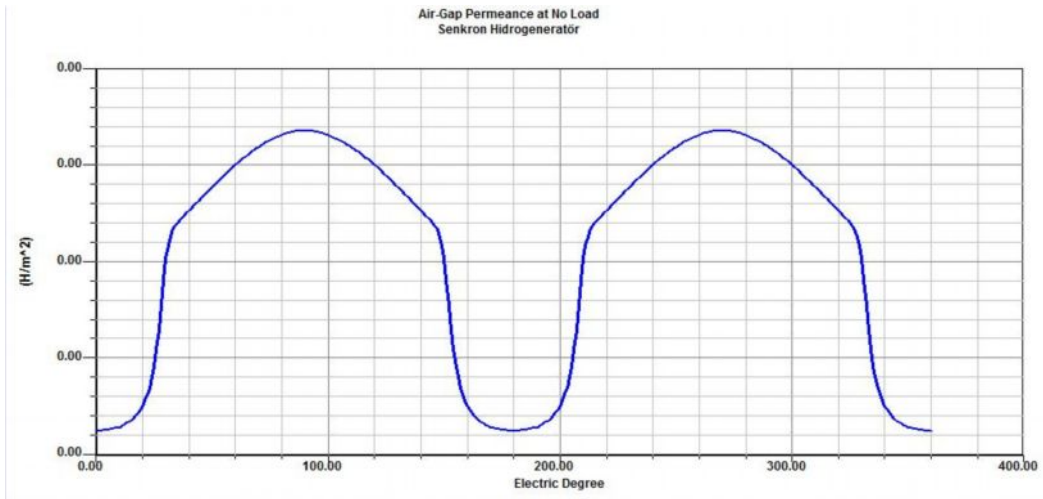
Hava aralığındaki akı tamamen rotordaki uyarım sargılarından geçen akıma bağlı olarak oluşmaktadır. Dalga şeklinin de rotordaki çıkık kutupların yapısından kaynaklanan bir şekli sahip olduğu açıktır. Hava aralığının maksimum olduğu yerde akı minimum akının maksimum olduğu yerde ise hava aralığının en küçük değere sahip olduğu söylenebilir. Şekil 5.24'te akı değerinin 0,75 Tesla değerinde maksimum olduğu görülmektedir.

Hava aralığı akısını çıkık kutuplu bir hidrogeneratörde modellemek için d- ve q- eksen kullanılarak aşağıdaki şekilde modellenenabilir. Buna ek olarak hava aralığı akısının içerdiği harmonik miktarı indüklenerek emf'de dalga şekli bozulmalarına da neden olacaktır.

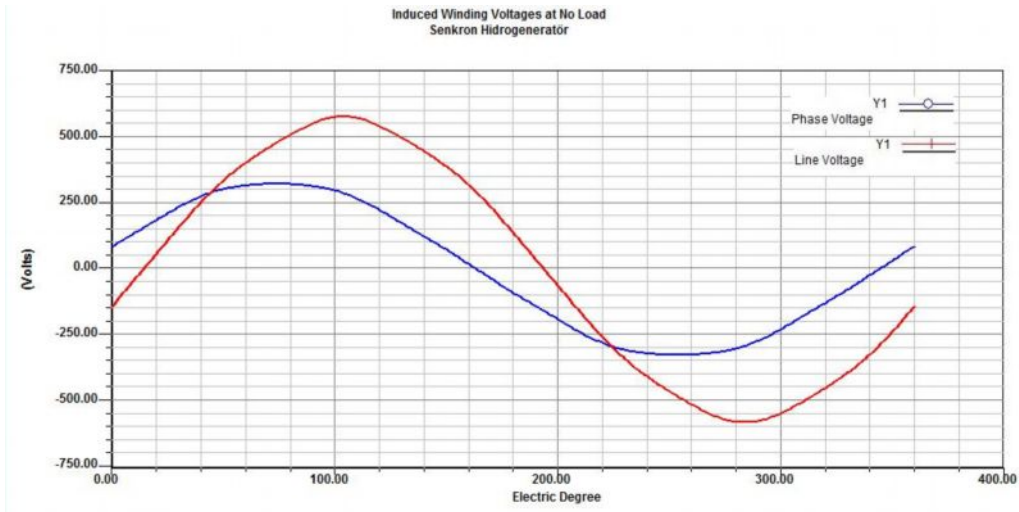


Şekil 5.25. Kutup hava aralığı akı dalga şekli.

İki çeyrek eksen arasında Şekil 5.25’de görüldüğü üzere tam N kutbunun merkez noktası direk eksene denk gelmektedir. Açısal hızla beraber V_s stator çıkış gerilimi dalga şeklini ifade etmektedir.

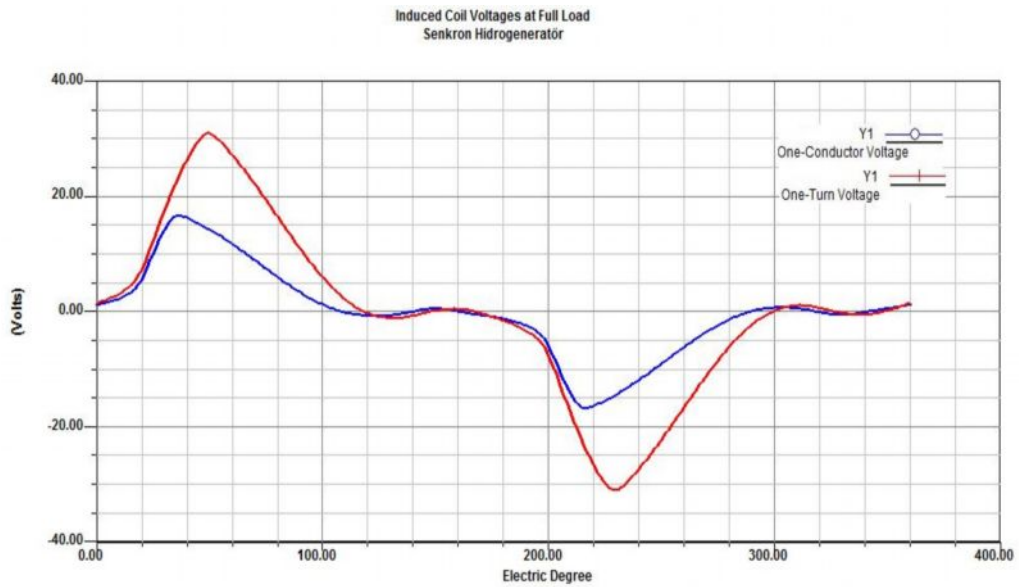


Şekil 5.26. Hava aralığı permeans dalga şekli.

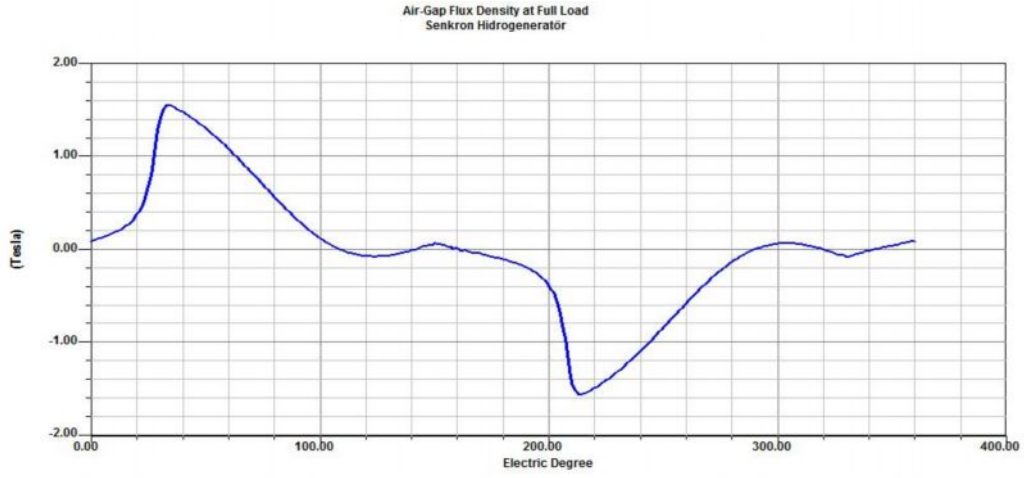


Şekil 5.27. Yüksüz durumda indüklenen faz ve hat gerilimi dalga şekilleri.

İndüklenen faz gerilimi ve hat gerilimi dalga şekilleri ile beraber aldıkları değerleri gösteren Şekil 5.27’de hat geriliminin 600 volt tepe değerine kadar ulaştığı görülmektedir. Faz gerilimi ise yüksüz durumda içerdiği harmonikler yüzünden hat gerilimine göre dalga şekli tam sinüsel değildir.

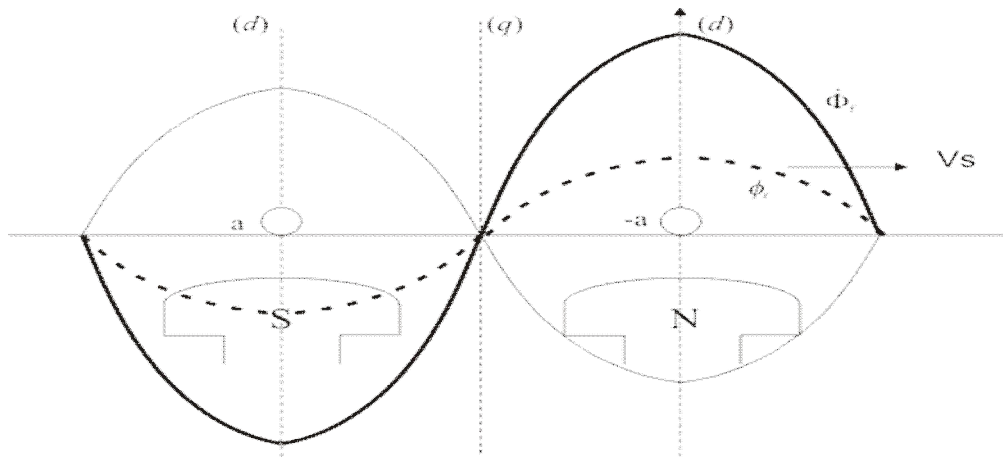


Şekil 5.28. Tam yük altında indüklenen bobin gerilimleri.



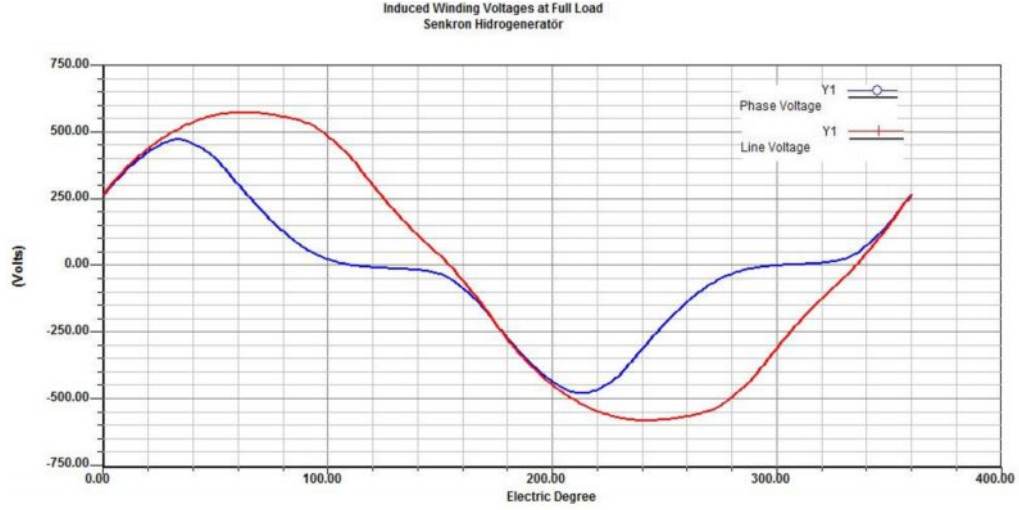
Şekil 5.29. Tam yük altında hava aralığı akı yoğunluğu.

Hava aralığı akı yoğunluğu tam yük altında iken dalga şeklinde bozulmalar gözlenmektedir. Tam yük altında maksimum hava aralığı akısı değeri anlık olarak 1,55 Tesla olabilmektedir.



Şekil 5.30. İdeal stator sargılarında indüklenen gerilim dalga şekili.

Şekil 5.30'da hidrogeneratörün a fazına ait direk ve çeyrek eksen gösterimi olarak indüklenen stator gerilimi dalga şeklini göstermektedir. V_s stator gerilimi, Φ hava aralığı akısını temsil etmektedir.



Şekil 5.31. Tam yük altında indüklenen faz ve hat gerilimleri.

Tam yük altında indüklenen hat gerilimi dalga şekli Şekil 5.30'da çıkık kutuplu makinada temsili olarak oluşması gereken stator gerilimi dalga şekline benzemektedir. Yaklaşık olarak hidrogeneratör dtator dalga şekli rotor hızına da bağlı olarak 600~580 Volt gerilim vermektedir. Bu değer tepe değeridir.

5.3. Üç Boyutlu Analizler

5.3.1. Giriş

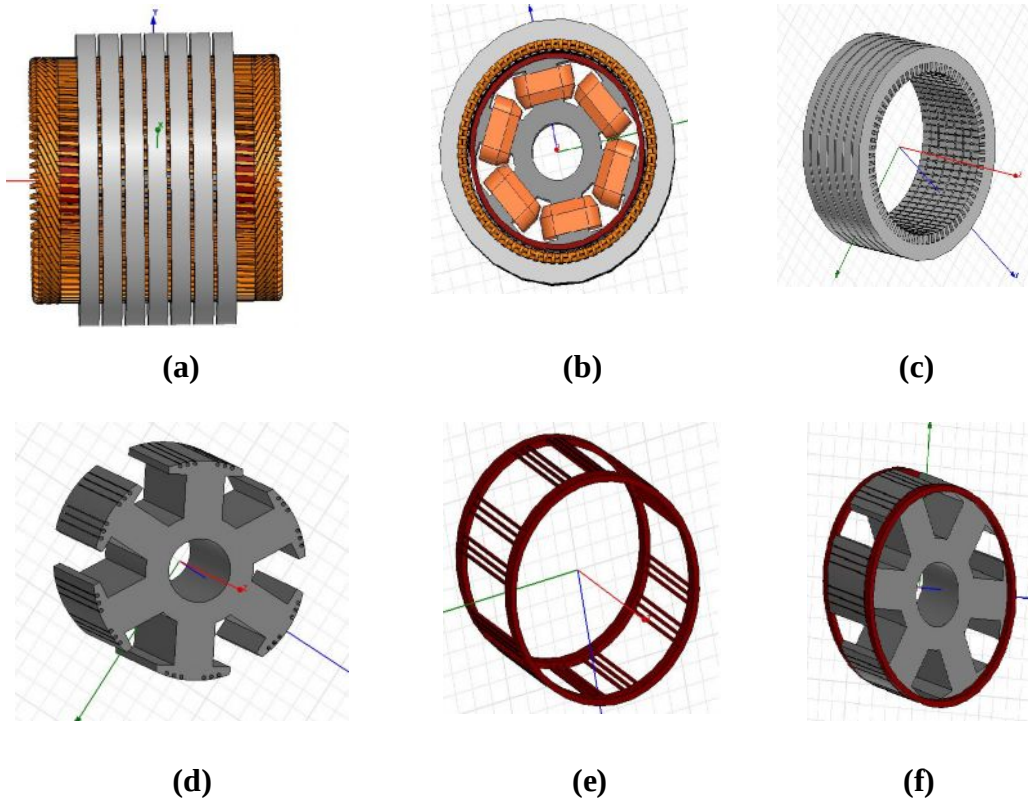
Bilgisayar destekli tasarım manyetik aygıt endüstrisinde kendini ispatlamıştır. Manyetik çalışmalar ile mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan ABAQUS, ANSYS, FEMLAB, PAFEC, LUSAS, ANSOFT MAXWELL ve INFOLYTICA MAGNET gibi birçok paket yazılım vardır. Mevcut gereksinim bu yeni ve çok güçlü yazılımların nasıl ve etkili kullanılacağını anlamaktır.

- Metodların doğasında hangi yaklaşımlar bulunmaktadır,
- Hangi miktarlar hesaplanabilir,
- Hesaplanan sonuçlar tasarımcının ihtiyacı ile nasıl ilişkilendirilebilir.

Mevcut analitik teknikler kişilerin oluşturduğu kavramsal modeller üzerinde güçlü etki taşıdığından bu yeni analiz teknikleri tasarımcının probleme yaklaşımını son derece etkiler.

5.3.2. Üç boyutlu hidrogeneratör tasarımı

Üç boyutlu tasarlanan ve analizleri yapılan hidrogeneratöre ait ana parçalar aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.32. Hidrogeneratör ana parçaları. (a) Hidrogeneratör yandan görünüş, (b) Hidrogeneratör önden görünüş, (c) Stator, (d) Rotor, (e) Damper sargıları, (f) Rotor damper bar ve damper halkası.

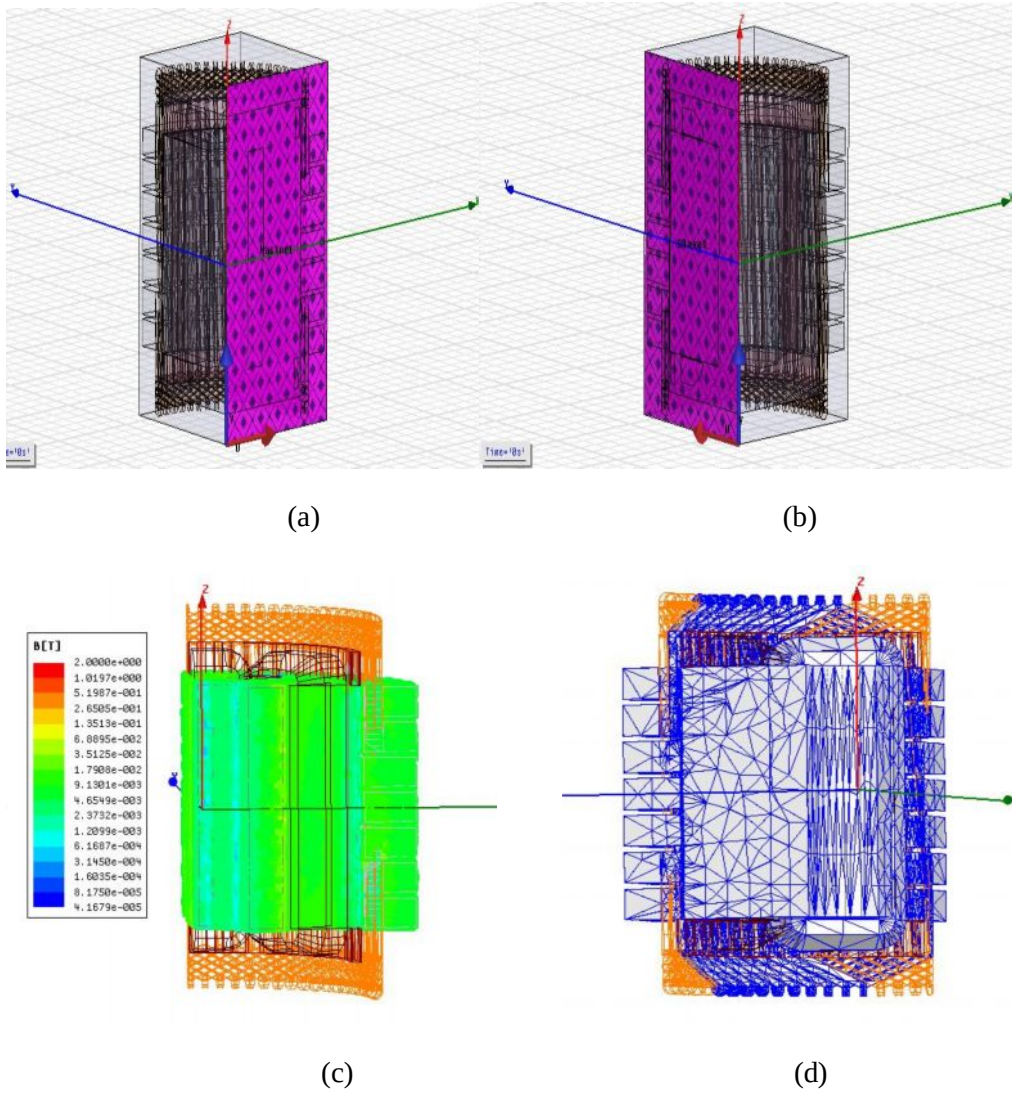
Maxwell ile tasarım basit bir prensibe dayanır; şayet aygıt yapılabiliyorsa bu onun modellenebileceğini gösterir. Bunun terside önemlidir; şayet aygıt yapılamıyorsa bu durumda aygıtın benzetim modelinin de yapılamıyacağı bilinmektedir.

Maxwell çözücüleri en yüksek doğruluk ile modellenen bir aygıtın karmaşıklığına bir sınır koyarlar. Bu nedenden dolayı her geometrik detayın tam olarak gösterildiği pratik bir aygıtın modellenmesi teşebbüsü tavsiye edilmez. Başlangıçta karmaşık modellerden kaçmak için pratik nedenler de vardır. İlk model hemen hemen hatalar içerecek şayet çok detaylı ise çözümü zaman alacak ve çözüm hatalar ortaya çıkmışsa modelin yeniden oluşturulması zaman alacaktır. Bunun yerine daha basit bir benzetim ile yaklaşık bir analiz tercih edilmelidir.

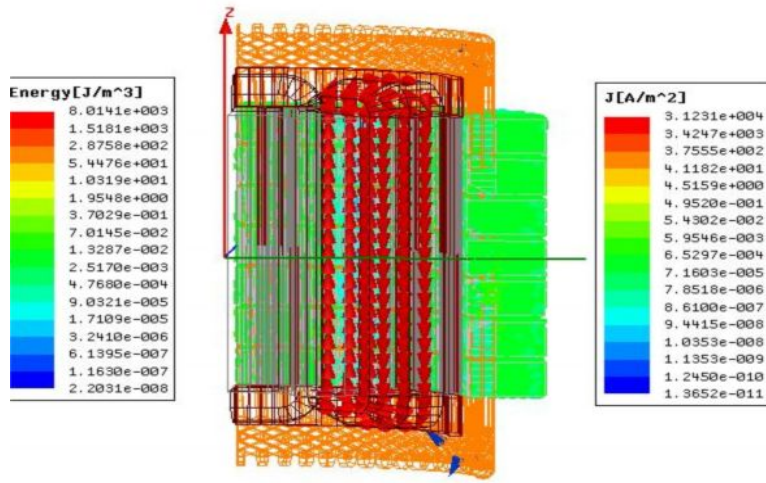
Bir aygıtın temel özelliklerini koruyan basit bir model ile başlamak genelde en iyidir. Biçimler ve ölçüler basitleştirilebilir. Bu çalışmada gerçek sargılar aygıtın çelik nüvesinden sargıyı ayırmak için manyetik olmayan yalıtkanlara sahiptir. Böyle yalıtkanların modellenmesine gerek yoktur. Sargılar bariz bir hataya neden olmayacak şekilde çelik gövdeye birleşik modellenebilir. İlk çözümlerden sonra gene de çok hassas bir modellenme isteniyorsa bu yalıtkanlar benzetim modeli üzerinde gösterilebilir.

Bu çalışmada modelin ilk çözümü için doğruluk pahasına hız tercih edilmiş, iki boyutlu hidrogeneratör modeli incelenmiş ve elde edilen akı çiziminden modelin yapısındaki hatalar ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Herhangi bir sayısal metodla mükemmel doğruluğa ulaşılamaz. Hatta en yüksek hassasiyet seviyesinde bile Maxwell ile yapılacak çözümlerde hata içerecektir. Çoğu durumlarda bu hatalar önemsiz olacak ve üretim toleransları ve manyetik malzemelerin özelliklerindeki değişimden muhtemelen düşük olacaktır. Maxwell ile hesaplamalar yapılırken model sınırlarının dış hattı boyunca enerjinin sıfır olduğu kabul edilir. Bu nedenle modelin sınırları doğru olarak belirlenemez ise hesaplamalarda yanlışlıklar olacağı muhakkaktır. Sınır değer analizi yapılırken üzerinde çalışılacak model geometrisi esas alınarak, sınırlar model sınırlarına eşit ve model sınırının birkaç katından büyük

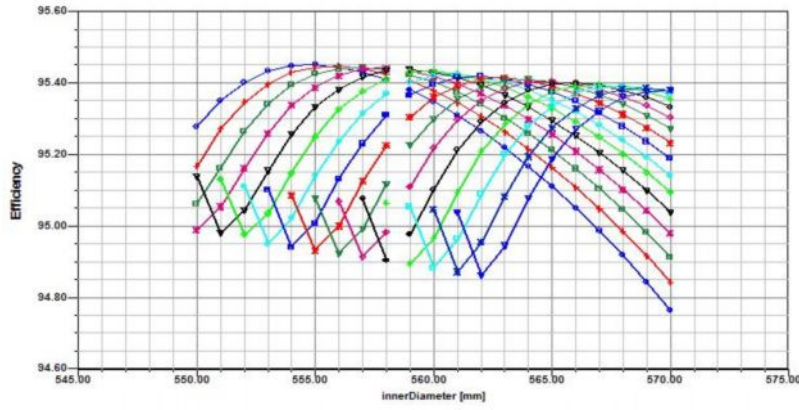
olacak biçimde benzetimler yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Çeşitli sınır değerlerde sonuçların kaydedilmesinin sebebi farklı sınırlardaki çözümlerin sonuçları karşılaştırılarak sonraki yapılacak olan çözümlerde standart bir sınır değer elde etmektir.



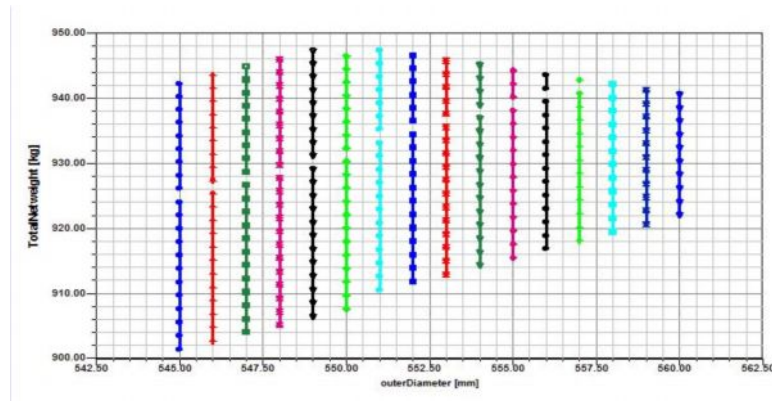
Şekil 5.33. 3 Boyutlu hidro generatör sınır ve geçici zaman için çözüm gösterimi (a) Master (b) Slave sınır koşulları, (c) Stator manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (d) Üç boyutlu oluşturulan mesh gösterimi.



(a)

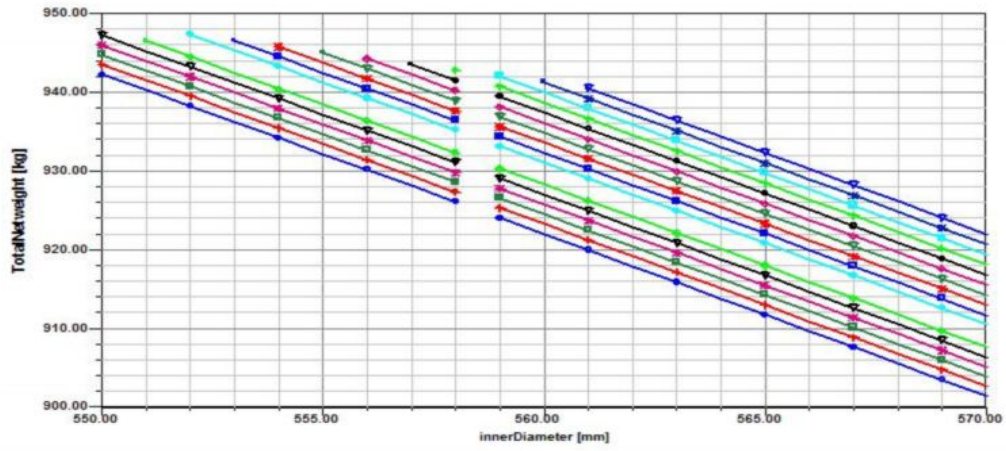


(b)

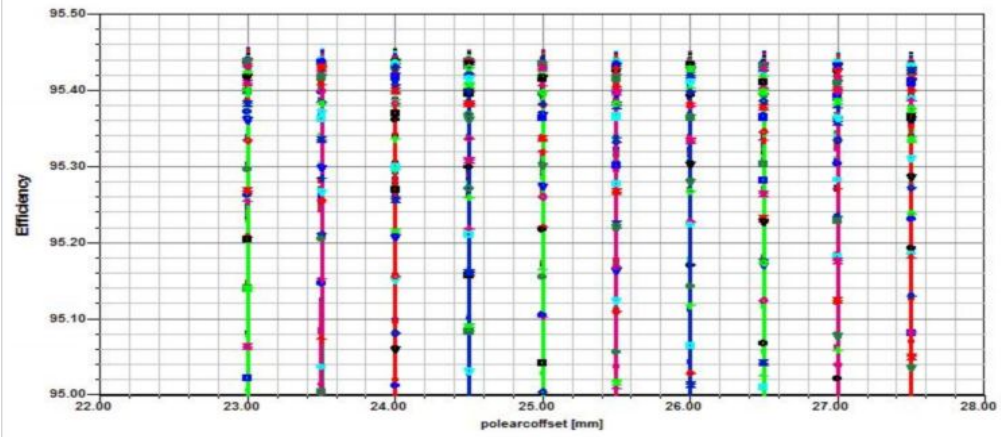


(c)

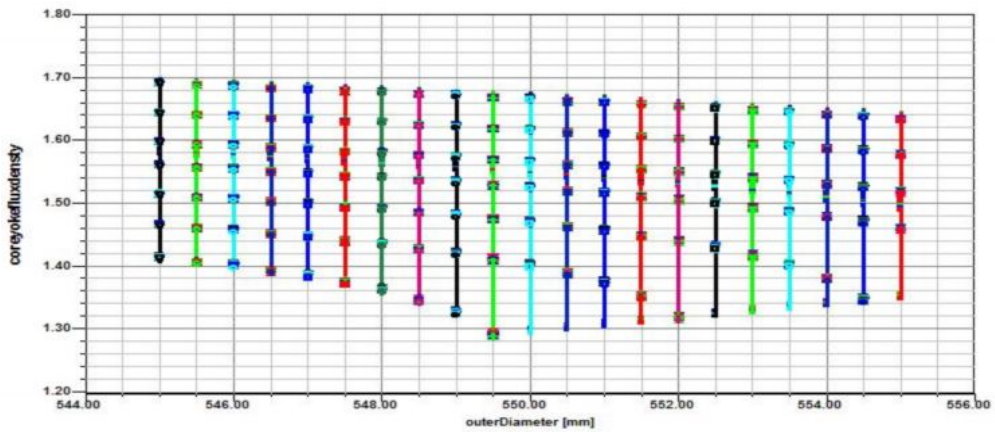
Şekil 5.34. Hidrogeneratör simülasyon sonuçları, (a) Sargılarda depolanan enerji ve sargı hacim akım yoğunluğu, (b) Verim optimizasyonu sonuçları, (c) Toplam ağırlık optimizasyon sonuçları.



(a)

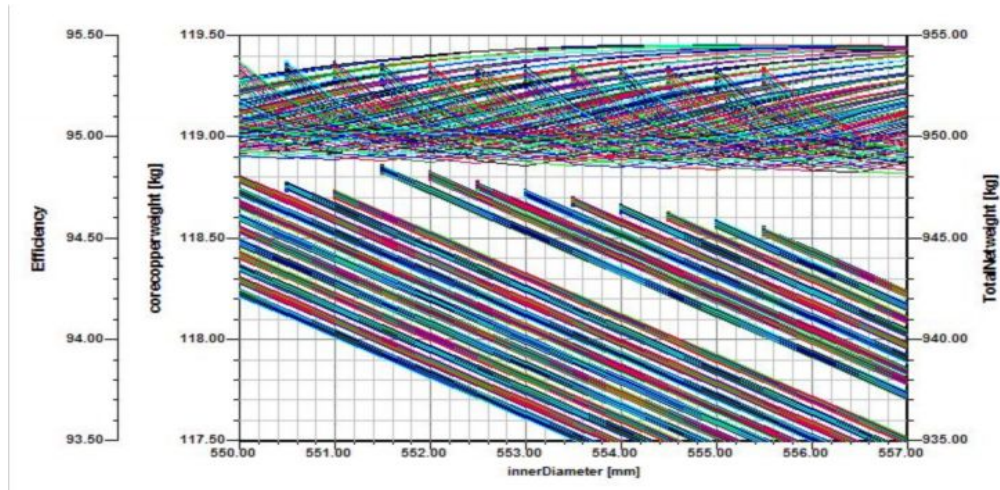


(b)

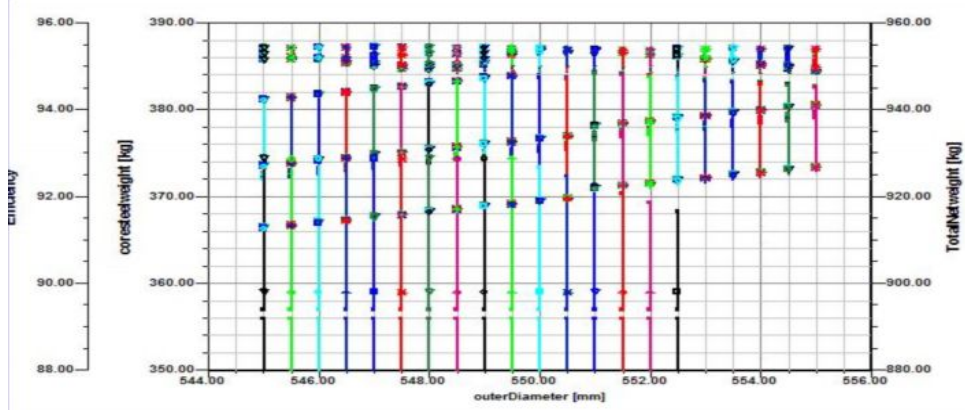


(c)

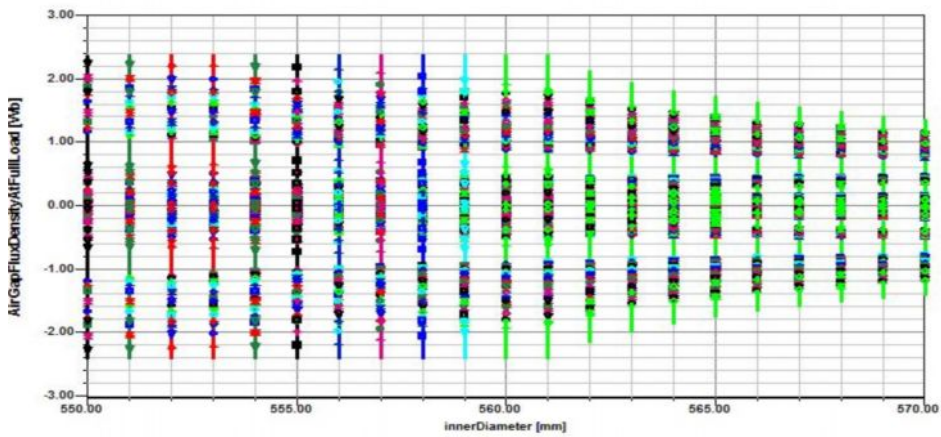
Şekil 5.35. Hidro generatör ağırlık, verim ve boyunduruk akı yoğunlukları optimizasyon sonuçları. (a) Toplam ağırlık, (b) Verim, (c) Boyunduruk akı yoğunlukları.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.36. Hidro generatör optimizasyon sonuçları. (a) Stator sargısı bakır ağırlığı, toplam ağırlık ve verim, (b) Verim, yığın uzunluğu ve toplam ağırlık, (c) Hava aralığı akı yoğunluğu.

5.4. Hidrogeneratör Boyut Optimizasyonu

5.4.1. Transient analiz koşulları altında SMINLP ve script kullanılarak hidrogeneratör 3D optimizasyonu

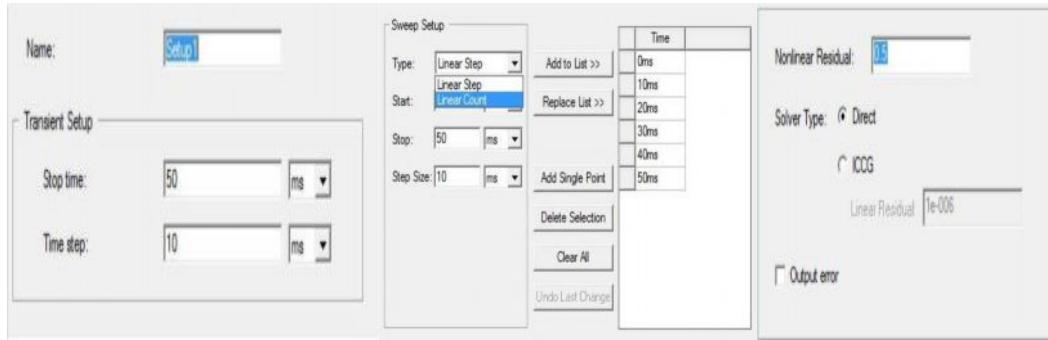
3 Boyutlu model boolean komutları kullanılarak $\frac{1}{4}$ kalacak şekilde tek bir model oluşturulur. Modelin geometrik yapısına göre simetriden faydalanmak için daha küçük bir parçası analiz edilebilir. Örneğin altı kutuplu bir motorda $\frac{1}{6}$ kalacak şekilde simetriden yararlanılabilir. Bu çalışmada model dörde bölündükten sonra simetri çarpanı olarak 4 olarak kullanıldı. Sistemde hareketli kısımlar belirlenir ve ilk tasarımdan elde edilen bilgiler (hız(rpm), mil torku, moment initeria gibi mekanik bilgiler girilir). Sistemde simetriden yararlanılarak, rotorun hareket yönü baz alınarak master ve slave boundary (sınır) şartları eklenir.

Model transient çözüm için seçilen değişkenler:

- 1- Zaman (dataset hazırlanabilir, yada problem kurulumunda girilebilir).
- 2- Gerilim yada akım (uyartıcı gerilimi, ilk tasarımdan elde edilen uyartıcı değerleri direnci, indüktansı gibi değerler girilmelidir). Dataset hazırlanmalıdır, script kullanılarak kullanılmalıdır.
- 3- Boyut değişken parametreleri (optimizasyon için seçilen parametrelerden oluşur). Kullanılacak optimizasyon yöntemi seçilmelidir, parametrelerin değiştireceği yani optimize edilecek parametreler belirlenmelidir.
- 4- Seçilen parametrelerin çözüm aralıkları girilmelidir. (SMINLP kullanıldığında nonlinear değişkenler tanımlanabilmekte ve odak aralığı girilebilmektedir, hazırlanacak script sayesinde model geometrik parametre değişkenleri sınırlarını çözümün durumuna göre sınır aralığı küçültülebilir hale getirilebiliyor, çözümün hassasiyeti, süresi ve karmaşıklığı giderilebiliyor).
- 5- Optimize edilecek parametrelerin kıyas şartları belirlenmelidir. (bir sistemde bir tane maksimize edilecek parametre seçilmelidir).

6- Mesh oluşturmada hassasiyet için derinlik temelli yaklaşım kullanılabilir, model derinliği yada parça bazlı seçim yapıldıktan sonra skin effect frekansı hesaplanmalı ve girilmelidir). Yada daha önceden çözülmüş geliştirilmiş bir mesh seçilip link ile çözüme dahil edilmelidir.

7- Çözüme geçilir.

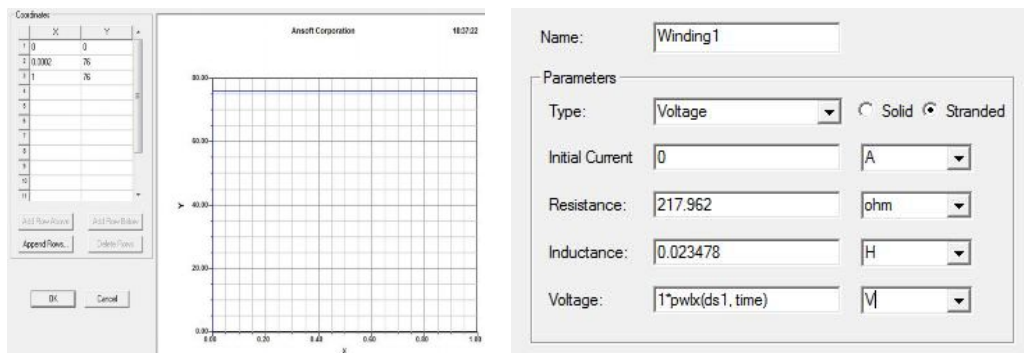


(a)

(b)

(c)

Şekil 5.37. Zaman değişken olarak probleme eklenmesi, (a) Başlangıç ve bitiş zamanları, (b) Zaman adımı tespit edilmesi, (c) Çözüm hassasiyeti.



(a)

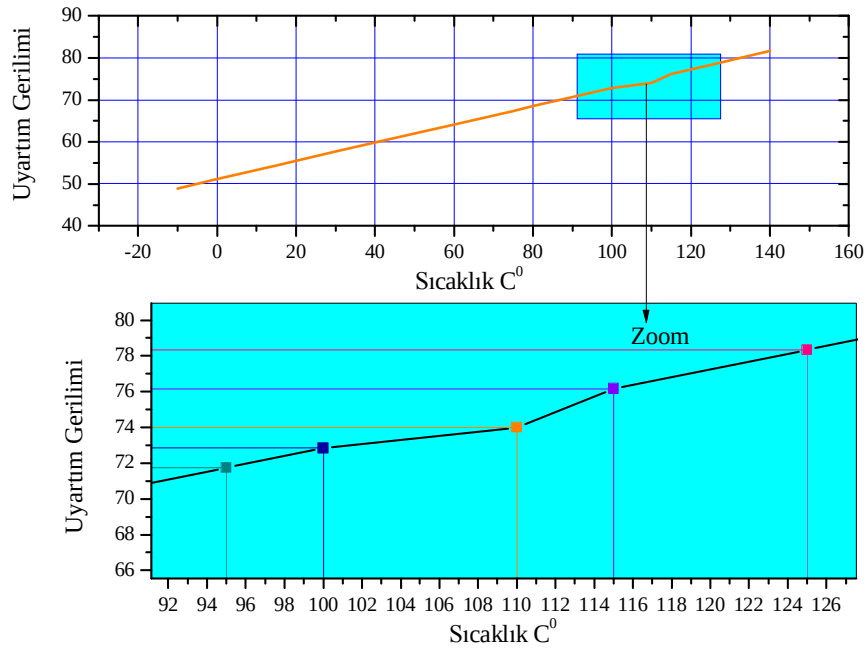
(b)

Şekil 5.38. Dataset ve kaynak gösterimi, (a) Dataset hazırlanması, (b) Sargı kaynaklarının girilmesi sicript (senaryo) kullanılarak.

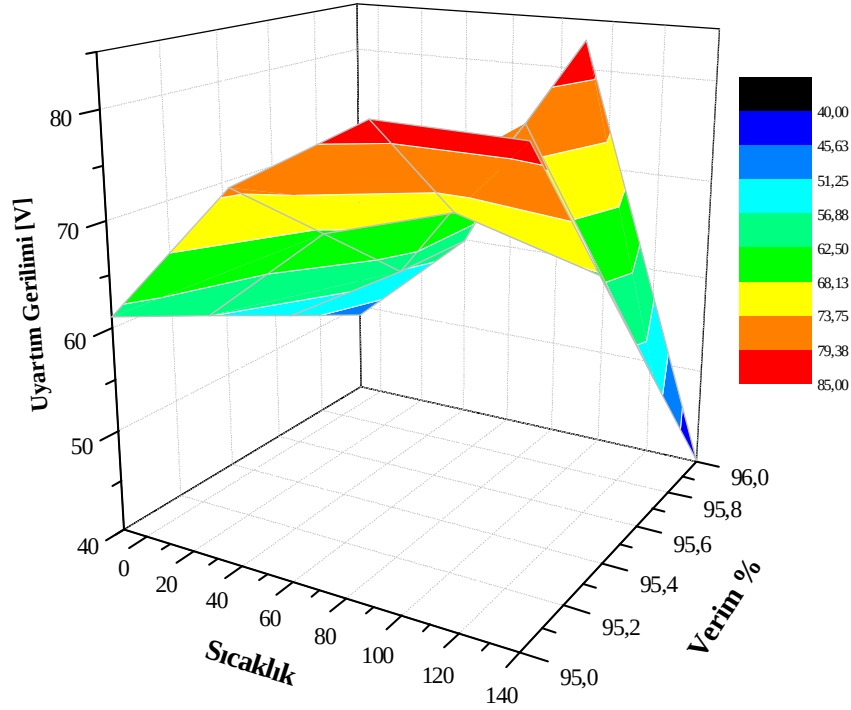
5.4.2. Hidrogeneratör çalışma performansı

Makine bileşenlerinin şekil ve tasarım hassasiyet analizi sadece optimizasyon algoritmalarında tasarım hassasiyetini kullanmada değil aynı zamanda etkileşimli tasarım için bilgisayar destekli mühendislik ortamında tasarım hassasiyetini kullanımında da aşırı ihtiyaç duyulan bir araçtır. Hidrogeneratörde boyut optimizasyonuna geçmeden önce makinenin farklı sıcaklık ve uyarım değerlerindeki çeşitli karakteristikleri elde edilmiştir.

Makinenin çalışacağı doğal ortamı modelleyebilmek ve hidrogeneratör üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için sıcaklık, uyarım gerilimi, verim ve kayıplar incelenmiştir.



Şekil 5.39. Uyarım geriliminin sıcaklık ile değişimi.

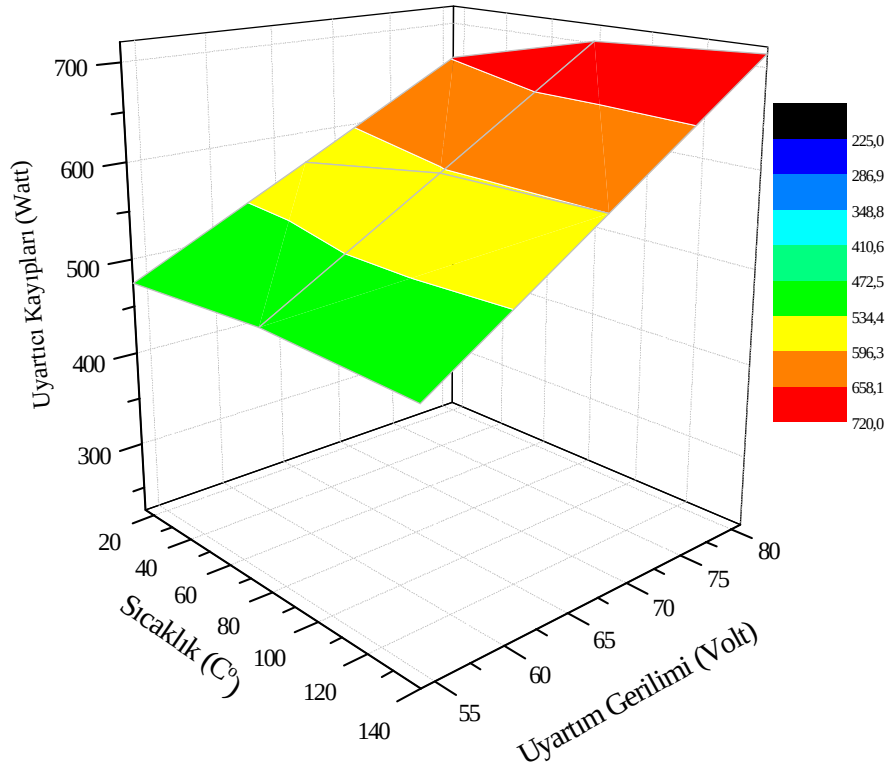


Şekil 5.40. Sıcaklık, uyartım gerilimi ve verim değişimi.

Yapılan analiz ve simülasyonlarda görülmüştür ki sıcaklık tasarım sıcaklığını geçtiği anda uyartım gerilimide yukarı yönde artış göstermekte çalışma sıcaklığı düştükçe uyartım gerilimi de azalmaktadır. Verim ise çalışma sıcaklığının artmasından olumsuz etkilenmektedir.

Uyartım gerilimi ilk tasarımda 76 volt DC değerindeyken sıcaklığın artmasıyla beraber 82 volt değerine çıkarken verim %95,8 değerinden %95 değerine gerilemektedir. Buna ek olarak sıcaklığın düşmesi ise uyartım geriliminin değerini -10C° değeri için 45 volt değerine kadar aşağı çekebilmektedir fakat bunun uyartım ikaz sisteminin çalışması üzerine etkileri de hesaba katılmalıdır. Sıcaklık değişimi ile beraber uyartım gerilimi ve verime etkileri şekil 5.40'da görülebilmektedir. Uyartım geriliminin düşmesiyle beraber uyartım akımı bir artış göstermekte ve 35 Amper olan değeri -10C° çalışma koşulunda 59,11 Ampere kadar çıkmaktadır.

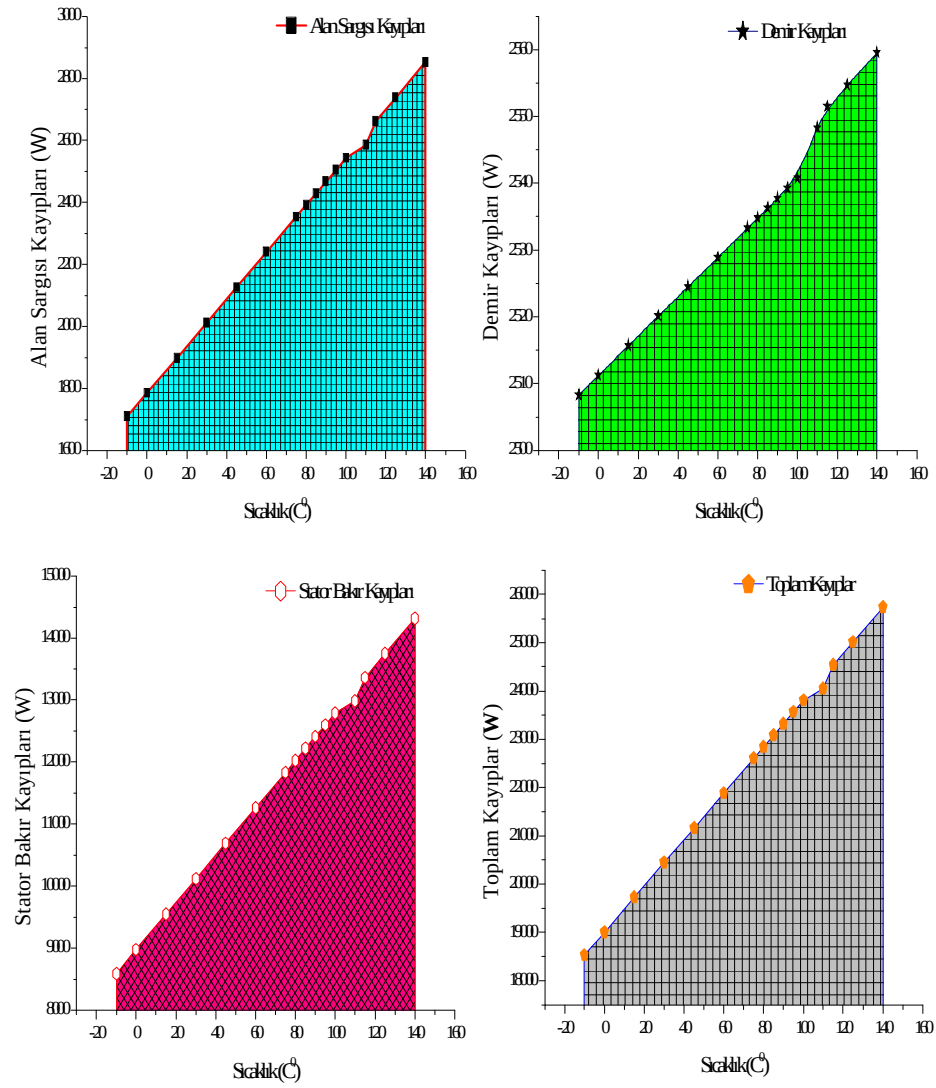
Dikkat çekici olan nokta ise tasarım çalışma sıcaklığının dışındaki aralıklarda da hidrogeneratörün karakteristiklerinde aşırı bir değişme olmayışıdır. Analizlerde hidrogeneratör dışı ortam sıcaklığı 25 C° olarak hesaba katılmış ve hidrogeneratör çalışma sıcaklığı olarak -20 C°~140 C° arasındaki aralık tercih elde edilmiştir.



Şekil 5.41. Uyartım gerilimi, sıcaklık ve uyartım kayplarının değişimi.

Sıcaklıkla beraber hidrogeneratörde uyartım geriliminin değiştiğini Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da görülmüştü bununla orantılı olarak uyartıcı kayıpları da sıcaklıkla beraber artmakta ve çalışma sıcaklığının azalmasıyla beraber hidrogeneratör uyartıcı kayıpları da azaltmaktadır. Şekil 5.39'da görüldüğü üzere sıcaklık, uyartım gerilimi ve uyartıcı kayıplarının değişimi arasında neredeyse lineer bir ilişki vardır. Uyartım

geriliminin maksimum olduğu noktada uyartıcı kayıpları da en yüksek değerine ulaşmaktadır.

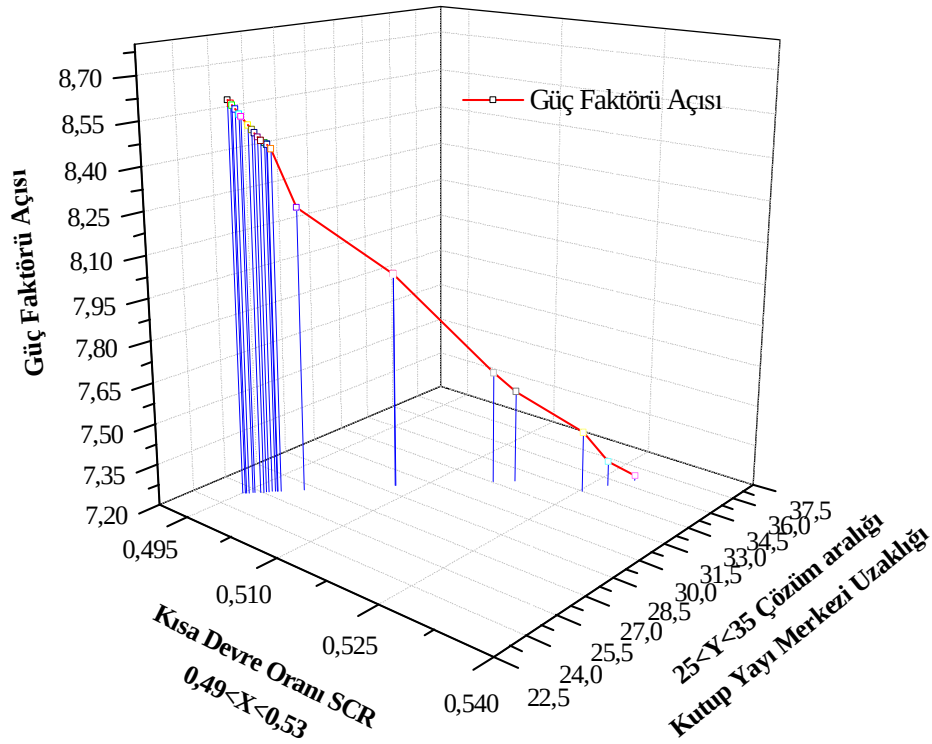


Şekil 5.42. Sıcaklıkla kayıpların değişimi. (a) Alan sargısı kayıpları değişimi, (b) Demir kayıpları, (c) Stator bakır kayıpları, (d) Toplam kayıplar.

Sıcaklıkla hidrogeneratörde kayıpların arttığı ve yapılan hidrogeneratör tasarımında sıcaklık ile çalışma karakteristiği elde edilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında görülmektedir ki makinenin çalışma sıcaklığına göre uygulanacak uyartım gerilimleri ve kayıpların nasıl değişeceği bilinmektedir.

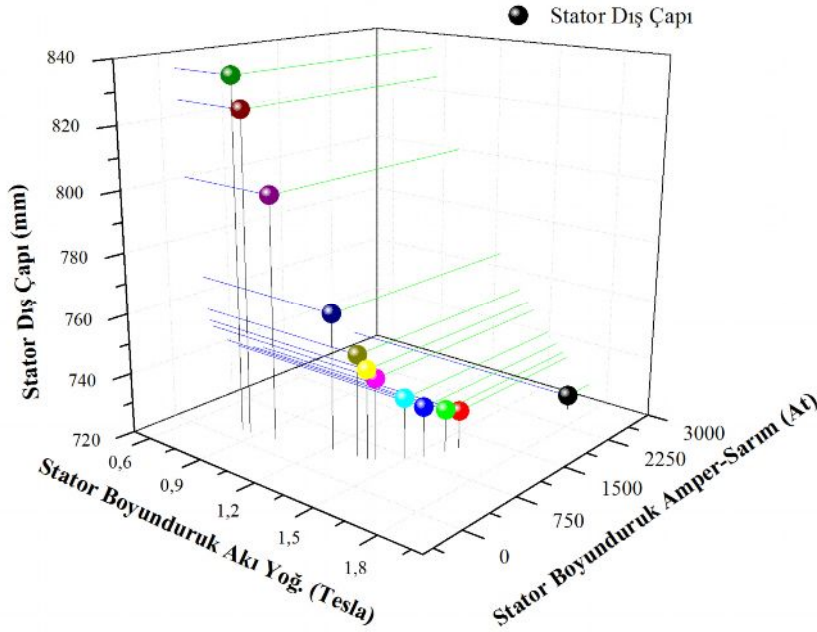
5.4.3. Optimizasyon sonuçları

Kısa devre oranının makine boyutlarını direk etkilediği üçüncü bölümde belirtilmişti. $0,49 < SCR < 0,53$ kısa devre oranı çözüm aralığı ve $25 < \text{Kutup Yayı Merkezi} < 35$ mm aralığında değişken alarak güç faktörü açısının en ideal değeri için çözüm yapılmıştır.



Şekil 5.43. SCR, kutup yayı merkezi uzaklığıyla güç faktörü açısının değişimi.

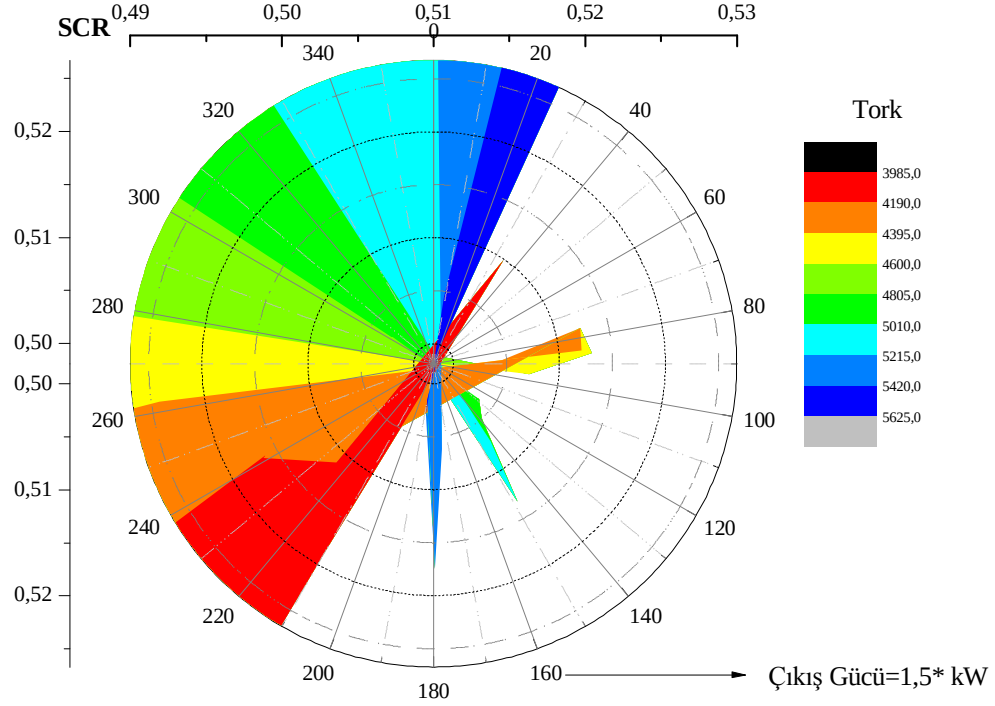
Elde edilen sonuçlardan görülmektedir ki $0,49 < SCR < 0,50$ değeri arasında en ideal güç faktörü açısı elde edilmiştir. Bu grafikte 23 ayrı çözüm yapılmış ve iki değişken 22532 değişik değerde sonuç almıştır. Her bir problemin çözümü bilgisayar saatiyle ortalama 4 saat 32 dakika zaman almıştır. Daha iyi sonuçlar elde etmek ve hassasiyet analizini geliştirebilmek için gelişmiş bilgisayar sistemlerinden yararlanmak gerekmektedir. Problemde kutup yayı merkezi uzaklığı değiştirilerek aynı zamanda stator dalga şekli ve hava aralığı dalga şeklininde en ideal sinüs şekline ulaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 5.44. Stator çapı, stator boyunduruk akı yoğunluğu ve stator boyunduruk amper-sarım değerinin değişimi.

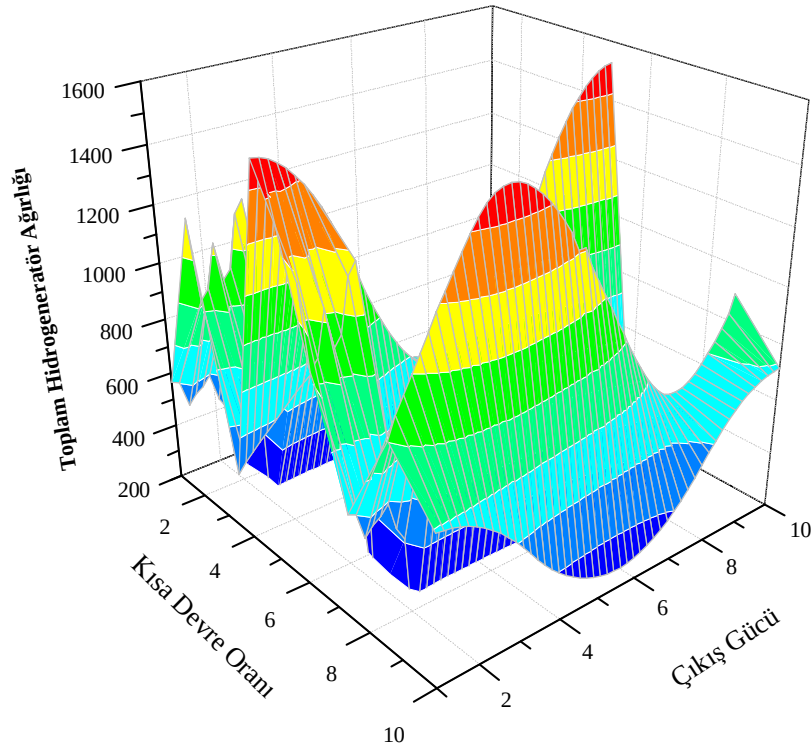
Bu optimizasyon probleminde stator çapı değişken alınarak stator boyunduruk akı yoğunluğunu ve karşılığı olarak stator boyunduruk amper-sarım değerinin değişimi elde edilmiştir. Stator boyunduruk akı yoğunluğu stator çapının değişimi ile beraber artış göstermiştir. Yapılan oniki çözümün ardından stator çapının en ideal değeri ve stator boyunduruk akı yoğunluğunun en ideal değerleri tespit edilmiştir. Stator çapı

726,60 mm değerinde iken stator boyunduruk akı yoğunluğu 1,58~1,65 Tesla arasında değer almaktadır.



Şekil 5.45. Kısa devre oranı, Tork ve çıkış gücünün değişimi.

Tork değeri mil torkunu temsil etmektedir. 0° ~ 360° arasında açı değerleri 1,5 kW ile çarpılarak generatör gücü elde edilebilir. Bu optimizasyon probleminde kısa devre oranıyla en uygun mil torku ve ideal çıkış gücünü elde etmek için çözümler yapılmıştır. Şekil 5.45'te bu çözümün grafiksel gösterimidir. $4000 < \text{tork} < 5750$ değeri arasında tork değerleri değişmiştir. En uygun mil torkunun 5028 Nm olduğu yapılan çözümler sonucunda elde edilmiştir. Bu giriş mekanik gücüne karşın elde edilen elektriksel güç 506 kW civarındadır. Bu noktada idealleştirilen kısa devre oranı ise 0,496 değerine denk gelmektedir.



Şekil 5.46. Çıkış gücü, kısa devre oranı ve generatör toplam ağırlık değişimi

Bu optimizasyon probleminde tasarlanan hidrogeneratörün ağırlığını minimize etmek ve kullanılan aktif materyal kullanımını düşürmek aynı anda verimin azalmasını ve bu yolla çıkış gücünün değerinin azaltmamaya yönelik olarak çözümler yapılmıştır. Kısa devre oranına bağlı olarak çıkış gücü değeri ve bu yolla hidrogeneratör toplam ağırlığı ideal değere ulaştırılmıştır.

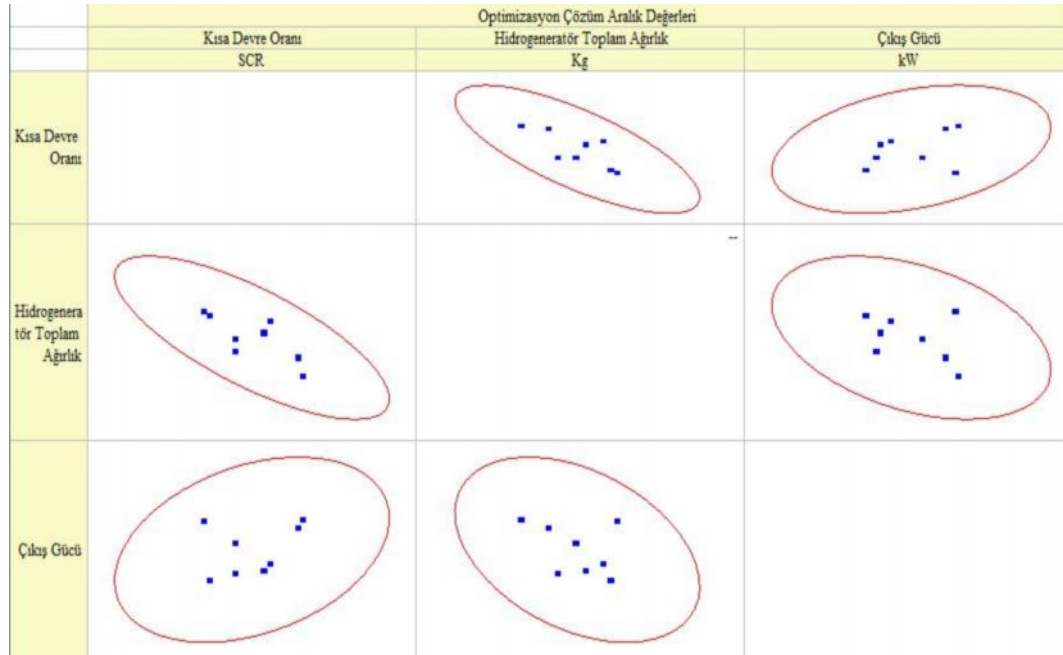
$$G_{total} = G_{cu} + G_{fe} + G_{ins} \quad (5.1)$$

Minimize edilen hidrogeneratör toplam ağırlık fonksiyonu. Ağırlık hesaplamaları detaylı olarak eklerde sunulmuştur. Hidrogeneratör toplam ağırlığının minimize edilmesi sonucunda stator ve rotor bakır kayıplarında azalmalar görülmektedir. Yapılan çözümde $0,49 < SCR < 0,53$ değeri arasında değişirken çıkış gücü ise

500<kW<600 değerleri arasında değişmiştir. Sağlanan iyileştirme 1223 Kg olan makine toplam ağırlığı 934 Kg düşürülmüştür. Denklem 5.1’de ;

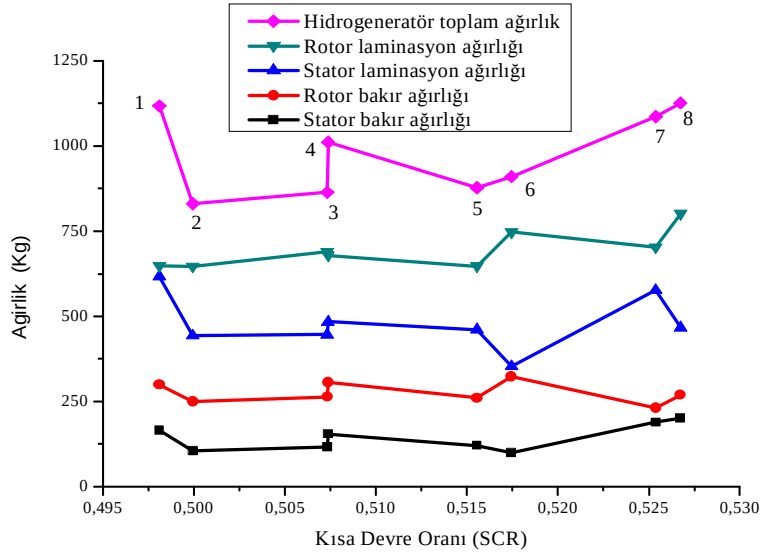
- G_{cu} : Bakır ağırlığı.
- G_{fe} : Demir ağırlığı.
- G_{ins} : İzolasyon ağırlığı.

ifade etmektedir.



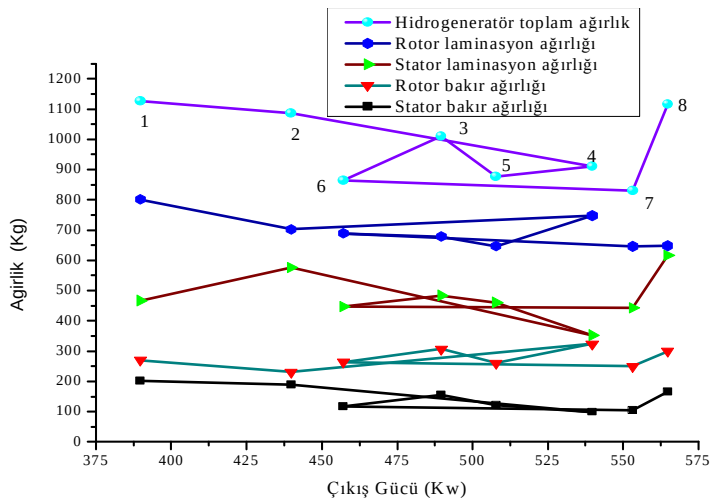
Şekil 5.47. Optimizasyon çözüm kümeleri.

Optimizasyon problemlerinde ağırlığı ideal değerine ulaştırmak için yapılan çözümlerde farklı güç değerlerinde sekiz farklı sonuç elde edilmiştir. Şekil 5.47’de elipsler optimizasyon problemi çözüm aralığını gösterirken kısa devre oranı, çıkış gücü ve generatör toplam ağırlığı için farklı aralıklar ve elde edilen çözümleri göstermektedir.



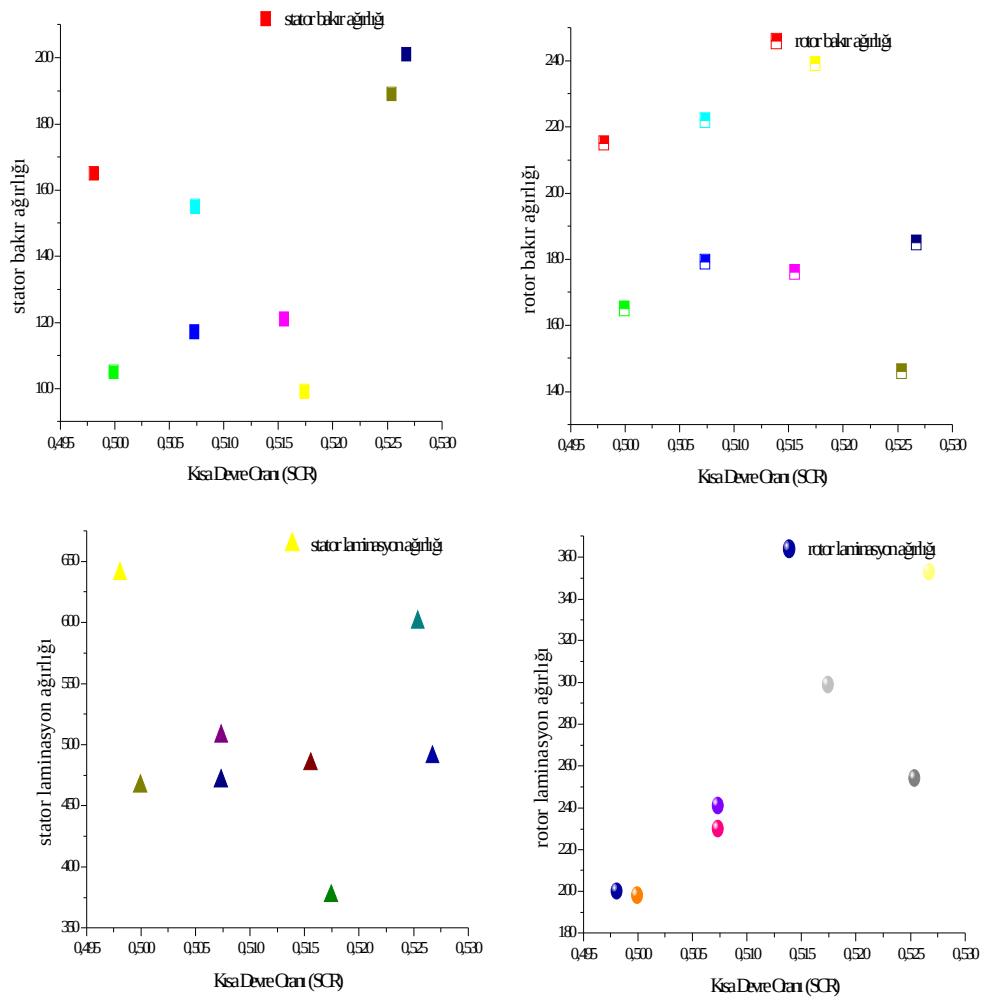
Şekil 5.48. Kısa devre oranı ile ağırlık değişimleri.

Şekil 5.46’da üç boyutlu olarak görülen grafikte toplam ağırlığın içindeki değişkenlerin değişimini gösteren grafikler Şekil 5.48 ve Şekil 5.49’dur. Her iki grafikte de optimizasyon problemi sonucunda elde edilen ideal ağırlık değerinin problemin çözümü sırasında aldıkları değerleri gösterir grafiklerdir. Şekil 5.48’de görülmektedir ki stator ve rotor bakır ağırlıkları ve stator ve rotor laminasyon ağırlıkları çözüm aralığı içinde grafikte beş numarayla gösterilen değerde en ideal sonuca ulaşmıştır.



Şekil 5.49. Çıkış gücü ve ağırlık değişimleri.

Hidrogeneratörün toplam ağırlığının idealleştirilmesi sürecinde kullanılan kısa devre oranı makinenin boyutlarını direk olarak nasıl etkilediği de açıkça ortaya çıkmıştır. Son yıllarda 0,4~0,5 değerleri arasında seçilen oran yapılan tasarımda da bu aralıkta değişmektedir.



Şekil 5.50. Ağırlık değişimleri. (a) Stator bakır ağırlığı, (b) Rotor bakır ağırlığı, (c) Stator laminasyon ağırlığı, (d) Rotor laminasyon ağırlığı.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada hidroelektrik generatör tasarımında kullanılan optimizasyon teknikleri incelenmiştir. Hidroelektrik enerji üretimi için bir generatör tasarımı yapılmış ve yapılan tasarımın iyileştirilmesi için ardışıl karma değişken değiştirme yöntemiyle nonlinear programlama yoluyla tasarlanan hidro generatör optimize edilmiştir. İlk tasarıma göre iyileştirilen parametreler ve ilk tasarım değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 6.1. Optimize edilmiş tasarım sonuçları

Performans Listesi	Hedef	Prototip Tasarım	Optimize Edilmiş Tasarım			
			Stator1	Rotor1	Stator2	Rotor2
% η	maksimum	% 84,37	% 92,232		%95,369	
$\cos\phi$	$\geq 0,95$	0,88	0,96912		0,98989	
G_{total}	≤ 1000 Kg	1223 Kg	946,34 Kg		934 Kg	
SCR ($1/X_{dsat}$)	$\leq 0,53$	0,537	0,49913		0,49012	
D_i stator iç çapı	≤ 600 mm	603 mm	560 mm		558,8 mm	
V_f uyarım gerilimi	≤ 80 Volt	82 Volt	76,34 Volt		76 Volt	
T_s şaft torku	≤ 6000 Nm	6011 Nm	5039.26 Nm		5028 Nm	
B_y stator boyunduruk akı yoğunluğu	$\geq 1,5$ Tesla	1,3369 T	1,58 T		1,63 T	
τ_s rotor yayı merkez uzaklığı	≤ 30 mm	32,33 mm	28,856mm		28,859mm	

Yapılan optimizasyonlar sonucunda ideal bir hidrogeneratör tasarımı elde edilmiştir. Yapılan optimizasyonlar sonucu elde edilen diğer parametreler eklerde tablolar halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Tasarım parametreleri ve sınırları.

Tasarım Parametreleri			Başlangıç Noktası	Alt Sınır	Üst Sınır	Odak Noktası Alt Sınır	Odak Noktası Üst Sınır	Odak Noktası Alt Sınır-2	Odak Noktası Üst Sınır-2	Gürültü	Sonuçlar
c1	Stator iç çapı (mm)	D_i	550,8632	450	600	500	580	530	565	0,1	558,80
c2	Stator oyuk yüksekliği (mm)	H_{s2}	28,26832	20	45	25	33	26,5	32,2	0,1	29,4
c3	Stator alt oyuk genişliği (mm)	B_{s1}	10,86458	8,5	13,5	10	12	10,4	11,8	0,001	11,4
c4	Kutup gövde yüksekliği (mm)	P_{s1}	105,68	90	130	98	120	101	117	0,01	110
c5	Kutup gövde genişliği (mm)	P_{s2}	86,5	80	110	90	105	94	100	0,01	99,1
c6	Kutup ayak yüksekliği (mm)	P_{h1}	31,82	30	45	33	40	36	39	0,01	36,6
c7	Kutup ayak genişliği (mm)	P_{h2}	186	175	225	185	195	187	192	0,001	189,5
c8	Minumum hava aralığı (mm)	g_{min}	2,6826	2	5,5	2,5	4,2	2,8	4,12	0,01	3,55
c9	Stator dış çapı (mm)	D_0	718,65	710	850	720	755	724	742	0,1	736,60
c10	Stator oyuk ağız genişliği (mm)	B_{s0}	2,98646	2	6	3	5	3,2	4,8	0,01	3,9
c11	Stator üst oyuk genişliği (mm)	B_{s2}	11,8614	10	20	12	18	14	16,8	0,01	15
c12	Kutup yay merkezi uzaklığı (mm)	p_{arc}	24,22648	22,5	29	24	27	24,4	26,8	0,001	25,85
c13	Rotor boyunduruk genişliği (mm)	h_{yr}	189,23	185	215	190	205	192	200	0,001	195,75
c14	Yığın uzunluğu (mm)	l_i	385,4	380	425	380	405	384	401	0,01	395
c15	Stator dış genişliği (mm)	B_{th}	10,7832	10	15	11	14	12	13,8	0,001	13,238

Tezin ilk bölümünde hidrogeneratörlerin kullanım alanı olan hidroelektrik potansiyel ve bu alandaki gelişmeler üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde tasarım ve optimizasyon alanında yapılan çalışmalara değinilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde hidrogeneratör tasarımı üzerinde durulmuş ve dördüncü bölümde ise tasarımda kullanılan optimizasyon teknikleri incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde elektrik makinalarının tasarım optimizasyonunda kullanılabilecek var olan bir optimizasyon algoritmasına farklı bir açıdan yaklaşarak yeni gelişmeler kayıt edilmiştir. Bir ileriki çalışmada tezde hazırlanan script kodları ve kullanılan nümerik yaklaşımlar iyileştirilerek yeni geliştirilmiş bir metod elde edilebilir.

Beşinci bölümde ise hidrogeneratör simülasyonları ve analizleri yapılmış elde edilen ilk tasarım değerleriyle ilk tasarım optimize edilmiştir. Yapılan çalışmada görülmüştür ki elektrik makinalarının tümü ilk tasarımlarından sonra çıkış parametrelerinin idealleştirilebilmesi için optimize edilmesi gereklidir. Özellikle güç büyüdükçe hidrogeneratörde %90 olan verimin %95~98 çıkarılması maliyeti minimize ederek ekonomik olarak çok büyük katkılar sağlayacaktır. Ülkemizdeki hidroelektrik potansiyel global bakıldığında dünyadaki hidroelektrik potansiyel göz önüne alındığında tez çalışması sonucunda elde edilen bilgiler ile yorumlandığında elde edilen kazanımlar;

- Var olan malzemenin optimum kullanılmasını sağlayacak.
- Hacim başına malzeme kullanımı düşürüldüğünden aktif kayıplar azaltılacak.
- Verim artışı sağlanacak.
- Tasarlanan hidrogeneratörün en ideal çalışma şartları belirlenmiş olacak.
- Hidrogeneratör tasarımı için yurtdışına aktarılabilecek dövizin ülkede kalmasına olanak sağlayabilecek.
- Hazırlanan script kodlar sayesinde problem çözümünde zaman kazancı ve daha hassas çözümlerin elde edilmesi.

olarak söylenebilir.

Çalışmanın özellikle hidrogeneratörlerde uygulanmış olması ülkemizdeki ve dünyadaki potansiyeli optimum kullanıma yöneliktir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda diğer elektrik makinalarına da optimizasyon uygulanarak tüm dönel elektrik makinalarının motorlarda enerjiyi optimum kullanması generatörlerde ise maksimum verim elde edecek şekilde kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir. Bununla beraber hergün gelişen malzeme özellikleri dikkate alınarak daha özel tasarımlar ve çalışmalar yapılabilir.

Geliştirilen tasarım hassasiyet analizi tekniğini elektromanyetik alanındaki tüm cihazlara uygulanabilir hale getirebilecek görsel arayüzlü bir yazılım geliştirilebilir.

Buna ek olarak teknik hali hazırda iki boyutlu olarak analiz yapabilmekte bunu üç boyutlu hale getirebilmek için çalışılabilir. Optimizasyon alanında genelde kullanılan malzeme türüne göre eddy akım hesaplamalarını da içeren bir başka ifadeyle malzemenin karakteristik özelliklerini hesaplamaya dahil eden çözüm süreçleri klasik tekniklerde olduğu gibi hassasiyet analizlerine de eklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Boldea, I. “Synchronous generators” **Taylor & Francis Group LLC**, New York, A.B.D., ISBN 0- 8493-5725-X, 1.1-8.23 (2006).
- [2] Gürdal, O. “Elektromanyetik Alan Teorisi”, **Nobel Yayın Dağıtım**, Türkiye, Ankara, ISBN 975-591-178-2, (2000).
- [3] Gürdal, O. “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, **Atlas Yayın Dağıtım**, Türkiye, Ankara, ISBN 975-6574-07-0, (2001).
- [4] Hoole, H. “Geometric Parametrization and Constrained Optimization Techniques in the Design of Salient Pole Synchronous Machines” **IEEE Transactions On Magnetism**, 28(4):, (1992).
- [5] Fujii, N. “Second Order Sensitivity Analysis for a Class of Shape Optimization Problems”, **IEEE Transactions On Magnetism**, ID 0-7803-1328-3, (1994).
- [6] Fujii, N., “Second variation and its application in a domain optimization problem”, in **Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Control of Distributed Parameter Systems**, Los Angeles, 431-436, (1986).
- [7] Fujii, N., “Second-order necessary conditions in a domain optimization problem”, **Journal of Optimization Theory and Applications**, 65:223-244, (1990).
- [8] Fujii, N., “Domain optimization problems with a boundary value problem as a constraint”, in **Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Control of Distributed Parameter Systems**, Los angeles, 49, (1986).
- [9] Pham, T.H. ve Hoole, H. “Comparison of Vector Potential and Flux Density Based Object Functions in Magnetic Shape Optimization”, **IEEE Transactions On Magnetism**, 32(3):, May, (1996).
- [10] Yoon, S-Baeck. “Shape Optimization Of Solenoid Actuator Using The Finite Element Method And Numerical Optimization Technique”, **IEEE Transactions On Magnetism**, 33(5):, September, (1997).
- [11] Shiyu, Y. ve Guangzheng, N. “Shape optimization of ole Shoes in Harmonic Exciting Synchronous Generators Using a Stochastic Algorithm”, **IEEE Transactions On Magnetism**, 33(2):1920-1923, March, (1997).
- [12]internet: Elektrik İşleri Etüd İdaresi, “HES ilgili dosyalar”, http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/HES/proje/HES_index.html , (2009)

- [13] internet: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı “2007-2008 Türkiye'nin Hidroelektrik Potansiyeli ve Gelişme Durumu, ilgili dökümanlar”, <http://www.enerji.gov.tr/index.php?sf=webpages&b=hidrolik&bn=232&hn=12&nm=384&id=387>, (2008)
- [14] Paish O., “Small Hydro Power: Technology and Current Status”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Science Ltd.***, 6: 537-556, (2002).
- [15] Yörükören N., Katırcıoğlu A., “Küçük Akarsu Santralleri ile Enerji Üretimi” ***Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye Enerji Kongresi***, O.D.T.Ü., Ankara, (1997).
- [16] Uluslararası standart C50.12 “IEEE Standard for salient pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generators/Motors for hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above” ***IEEE Power Engineering Society***, New York, (2005).
- [17] Uluslararası standart C50.13 “IEEE Standard for Cylindrical Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above” ***IEEE Power Engineering Society***, New York, (2005).
- [18] Gott, B.E.B. Mc Cown, W.R. ve Michalec, J.R. “Progress in Revision of IEEE/ANSI C 50 Series of Standards for Steam and Combustion Turbine Generators and Harmonization with the IEC 60034 Series”, ***Record of IEEE–IEMDC–2001*** Conference, MIT. (2001).
- [19] Nelson, R.J. “Conflicting Requirements for Turbogenerators from Grid Codes and Relevant Generator Standard”, ***Record of IEEE–IEMDC–2001***, Meeting, MIT, 63–68. (2001).
- [20] Znidarich, M. M. “Hydro generator stator cores part 1 - constructional features and core losses”, ***Power Engineering Conference, 2008. AUPEC apos;08. Australasian***, 14(17):1 – 8, Dec, (2008).
- [21] Znidarich, M. M. “Hydro generator stator cores part 2 - core losses, degradation mechanisms, testing and specification”, ***Power Engineering Conference, 2008. AUPEC apos;08. Australasian***, 14(17): 1 – 9, Dec, (2008).
- [22] Stephan, C.E. ve Baba, Z. “Specifying a Turbogenerator’s Electrical Parameters by Standards and Grid Codes”, ***Record of IEEE–IEMDC–2001***, Meeting, MIT, 57–62. (2001).
- [23] Forgarty, J.M. “Connection Between Generator Specifications and Fundamental Design Principles”, ***Record of IEEE–IEMDC–2001***, Meeting, MIT, 51–56. (2001).

- [24] Ghai, K.N. “Comparision of International and NEMA Standards for Salient Pole Synchronous Machines” **IEEE Trans. On Energy Conversion**, 14(1): 8- 15, March, (1999).
- [25]Fogarty, J.M. “Connections Between Generator Specifications and Fundamental Design Principles” **IEEE Trans. On Energy Conversion**, (2001).
- [26]Amendment, L. “Rotating Electrical Machines, Part 1: Rating and Performance.” **IEC 34–1**, (1997).
- [27]Arora, J.S. ,”Computational Design Optimization:A Review and Future Directions.” **Structural Safety**, 7: 131-148, (1990).
- [28] Gieras .F.J. ve Wing M. “Permanent Magnet Motor Technology”, **Mc Graw Hill**, New York, (1999).
- [29]Arora, J.S., “Introduction to Optimum Design”, **McGraw-Hill**, New York, (1989).
- [30]Mandic, I. “Optimization of large electrical salient pole synchronous generators”, **IEEE Journal for Computation and Mathematics** 20(3);, (2001).
- [31] Andersen, O.W. “Optimized Design of Salient Pole Synchronous Generators”, **Record of ICEM–2000**, Espoo, Finland, August, 987–989, (2000).
- [32] Besnerais, J.L.; Lanfranchi, V.; Hecquet, M.; Brochet, P. “Multiobjective Optimization of Induction Machines Including Mixed Variables and Noise Minimization”, **IEEE Transactions on Magnetics**, 44(6): 1102 –1105 (2008).
- [33] Xie, D. Sun, X. Bai, B. Yang, S. “Multiobjective Optimization Based on Response Surface Model and Its Application to Engineering Shape Design” **IEEE Transactions on Magnetics**, 44(6): 1006 –1009, (2008).
- [34] Parent, G., Dular, P., ve Piriou, F. “Using a Galerkin Projection Method for Coupled Problems” **IEEE Transactions on Magnetics**, 44(6): 830- 833, (2008).
- [35] Pahl G. ve Beitz W., “Engiiner Design – Systematic Approach”, **Springer-Verlag**, London, (1996).
- [36] Roozenburg N. ve Gero J. S., “Product Design : Fundemantals and Methods”, **John Wiley & Sons Inc**, (1995).
- [37] Coelho, R. “Multicriteria Optimization with Expert Rules for Mechanical Design”, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 5: 537-543, (2004).

- [38] Reynolds, D., McConnachie, J., Bettess, P., Christie, W.C. ve Bull, J.W. "Reverse Adaptivity- A new evolutionary tool for structural optimization", ***International Journal for Numerical Methods in Engineering***, 45(5): 529-552, (1999).
- [39] Ansoft Corporation Maxwell 3D&2D, Optimetrics® ve RMXprt help files, "Setting Up An Optimization Problem", "Getting Started with Maxwell and RMXprt" **Ansoft Corporation**, U.K. (2006).
- [40] Koh, C.S. Hahn, S.Y. Chung, T.K. ve Fung, H.K. "A sensitivity analysis using boundary element method for shape optimization of electromagnetic devices," ***IEEE Trans. on Mag.***, 28(2): 1577-1580, (1992).
- [41] Weeber, K. ve Hoole, S.R.H. "The subregion method in field analysis and design optimization," ***IEEE Trans. On Mag.*** 28(2): 1561-1564, (1992).
- [42] Enokizono, M. Totaka, T. ve Eioh, H. "Three dimensional boundary element method with shape modification," ***International Journal of Applied Electromagnetics in Materials***, 73-79, (1991).
- [43] Kim, D.-H. ve Lee, S.-H., "Derivation of a general sensitivity formula for shape optimization of 2-D magnetostatic systems by continuum approach," ***IEEE Trans. On Magn.***, 38: 1125–1258, (2002).
- [44] Bastos, J.P.A. ve Sadowski, N., "Electromagnetic Modeling By Finite Element Method" , Universidade Federal De Santa Catarina Florianopolis, Brazil, **McGraw-Hill**, New York, ISBN 0-8247-4269-9, (2003).
- [45] Rong, R. ve Lowther, D. A. . "Applying response surface methodology in the design and optimization of electromagnetic devices," ***IEEE Trans. Magn.***, 33: 1916–1919, (1997).
- [46] Ryu, J.S. Yao, Y. ve Koh, C.S. "Optimal Shape Design of 3-D Nonlinear Electromagnetic Devices Using Parameterized Design Sensitivity Analysis", ***IEEE Transactions On Magnetcs***, 41(5): 1792-1795, (2005).
- [47] Kim, D-H. ve Sykalski, J. K. "Applying Continuum Design Sensitivity Analysis Combined With Standard EM Software to Shape Optimization in Magnetostatic Problems" ***IEEE Transactions On Magnetcs***, 40(2): 1156 -1159, (2004).
- [48] Schlemmer, E. Harb, W. Lichtenecker ve Kleinhaentz, R. "Optimization of Large Salient Pole Generators Using Evolution Strategies and Genetic Algorithms", ***Record of ICEM–2000***, Espoo, Finland, 1030–1034, (2000).

EKLER

EK-1 Hidrogeneratörler İçin Çıkış Parametreleri Standart Tablolar

Çıkış gücü: NEMA MG1 generatörler için çıkış gücü kVA ve kilowatt cinsinden standart bir tablo yapmıştır. Bu tablolar sayesinde yapılan tasarımların standartlara uyup uymadığı kontrol edilebilecektir.

Çizelge 1.1. Generatörler için kVA ve kW uyartım tablosu

kVA	kW	kVA	kW	kVA	kW
1.25	1.0	250	200	4375	3500
2.5	2.0	312	250	5000	4000
3.75	3.0	375	300	5625	4500
6.25	5	438	350	6250	5000
9.4	7.5	500	400	7500	6000
12.5	10	625	500	8750	7000
18.7	15	750	600	10000	8000
25	20	875	700	12500	10000
31.3	25	1000	800	15625	12500
37.5	30	1125	900	18750	15000
50	40	1250	1000	25000	20000
62.5	50	1563	1250	31250	25000
75	60	1875	1500	37500	30000
93.8	75	2188	1750	43750	35000
125	100	2500	2000	50000	40000
156	125	2812	2250	62500	50000
187	150	3125	2500	75000	60000
219	175	3750	3000		

EK-1 (Devam) Hidrogeneratörler İçin Çıkış Parametreleri Standart Tablolar

Frekans: IEC ve NEMA MG1 standardı hidrogeneratörlerin 50 Hz ve 60 Hz olmaları konusunda uygulanmışlardır.

Güç Faktörü: NEMA standardı generatörler için güç faktörünü minimum 0,8 geri olarak belirlemişlerdir.

Gerilim: IEC 34-1 standardında hidrogeneratörler için seçilen gerilim ve güç ilişkisi standardı.

Çizelge 1.2. Generatörler için stator gerilimi tablosu

Stator gerilimi kV	Minumum çıkış gücü kW veya kVA
2<gerilim<3.3	100
3.3<gerilim<6.6	200
6.6<gerilim<11	1000

Hız ve Kutup sayısı: IEC 34-1 Standardı generatörler hız ve kutup sayısını belirlemiştir. Bu tüm güçteki generatörler için geçerlidir.

Çizelge 1.3 Generatörler için güç hız standardı tablosu

kW Aralığı	60 Hz'deki Hızlar
1.0--40	3600, 1800, 1200
50--200	3600, 1800, 1200, 900
250--400	3600, 1800, 1200

EK-1 (Devam) Hidrogeneratörler İçin Çıkış Parametreleri Standart Tablolar

Çizelge 1.4 Generatörler için devir sayıları

Devir sayısı d/dk

3600	600	327	225	138
1800	514	300	200	
1200	450	277	180	
900	400	257	164	
720	360	240	150	

Not: Çizelge 1.3 ve 1.4'deki değerler 60 Hz uygulamalar içindir. 50 Hz uygulamalara çevirmek için 5/6 değeri ile çarpılması gerektir.

İzolasyon sınıfları: Generatörler için belirlenmiş sıcaklık artışı ve izolasyon sınıfları standartı IEC 34-1, NEMA MG1 ve IEEE C50.12-C50.13 tür.

Çizelge 1.5. Generatör izolasyon sınıfları

Güç	Class A	Class E	Class B	Class F	Class H
P<600W	65 C ^o	75 C ^o	85 C ^o	110 C ^o	130 C ^o
600W-200kW	60 C ^o	75 C ^o	80 C ^o	105 C ^o	125 C ^o
200kW-5000kW	60 C ^o	75 C ^o	80 C ^o	105 C ^o	125 C ^o
200kW-5000kW	65 C ^o		90 C ^o	110 C ^o	130 C ^o
P>5000kW	60 C ^o		80 C ^o	100 C ^o	125 C ^o
P>5000kW	65 C ^o		85 C ^o	105 C ^o	130 C ^o

Not: Stator gerilimi 11 kV aştığında her 1000 volt için sıcaklık 1 Derece artırılmalıdır.

EK-1 (Devam) Hidrogeneratörler İçin Çıkış Parametreleri Standart Tablolar

Frekans ve Gerilim Değişimleri: izin verilen gerilim ve frekans değişimleri IEC ve NEMA tarafından standart olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1.6 Generatörler için gerilim ve frekans değişimleri

Alan A		Alan B	
Gerilim %	Frekans %	Gerilim %	Frekans %
105	102	105	103
103	98	103	95
100	102	100	103
100	98	100	95
95	100	92	100
97	102	95	103

Harmonik ve İletim Etki Faktörü: NEMA ve IEC 34-1 generatörler için bu standartları belirlemişlerdir.

Çizelge 1.7 Generatörler için içerebilecekleri toplam harmonik oranları

Generatör Uyarım kVA veya kW	Toplam Harmonik Oranı %
300-1000	5
1001-5000	3
5000 üstü	1.5

EK-2 Hidrogeneratör Aktif Ağırlığının Hesaplanması

Hidrogeneratör ana boyutları belirlendikten sonra kullanılan aktif malzemenin ağırlığı hesaplanabilir. Kullanılan bakır ağırlığı G_{cu} aktif bakır alanı $k_{fill}A_{ss}$, faz sargılarının uzunluğu ve bakır yoğunluğunun çarpımıyla elde edilebilir.

$$G_{cu} = \rho_{cu} (l_a + l_b + l_c) h_{ss} b_{ss} k_{fill} \quad (2.1)$$

Sargı izolasyon ağırlığı hesabında bakır için kullanılan alandan geriye kalan alanın izolasyon ile dolu olduğu düşünülerek hesaplama yapılır.

$$G_{ins} = \rho_{ins} (l_a + l_b + l_c) h_{ss} b_{ss} (1 - k_{fill}) \quad (2.2)$$

Stator boyunduruğunun ağırlığı G_{ys}

$$G_{ys} = \rho_{fe} \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{N_{seg}} \frac{1}{2} \frac{\pi - \xi}{N_{seg}} [R_{ys,out}^2 - R_{ys,in}^2] l_{st,r}(k) \quad (2.3)$$

Rotor boyunduruğunun ağırlığı G_{yr}

$$G_{yr} = \rho_{fe} \left\{ 2\pi R_m (\pi - \xi) [R_s^2 (R_s - h_{yr})^2] + \frac{4\pi \sin \xi}{3} [R_s^3 (R_s - h_{yr})^3] \right\} \quad (2.4)$$

İç ve dış stator boyunduruk çapları:

$$R_{yr,out} = (R_s + g + h_m + h_{ss} + h_{ys}) \quad (2.5)$$

$$R_{yr,in} = (R_s + g + h_m + h_{ss})$$

EK-2 (Devam) Hidrogeneratör Aktif Ağırlığının Hesaplanması

Stator oluk dış kalınlıkları:

$$\tau_{ss2} = \alpha_{p,s} (R_s + g + h_m + h_{ss}) \quad (2.6)$$

$$b_{ts2} = \tau_{ss2} - b_{ss}$$

Stator oluk dışlarının toplam ağırlığı:

$$G_{ts} = \rho_{fe} \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{N_{seg}} \frac{1}{2} (b_{ts1} + b_{ts2}) h_{ss} l_{st,r}(k) \quad (2.7)$$

Hidrogeneratörde kullanılan toplam demir ağırlığı artık hesaplanabilir.

$$G_{fe} = G_{yr} + G_{ys} + G_{ts} \quad (2.8)$$

Hidrogeneratörde kullanılan aktif malzemenin ağırlığı artık aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$G_{total} = G_{cu} + G_{fe} + G_{ins} \quad (2.9)$$

EK-3 Tasarlanan Hidrogeneratör Parametre Değerleri

Çizelge 3.1. Tasarım başlangıç parametreleri.

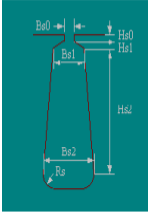
HİDROGENERATÖR TASARIM GENEL BAŞLANGIÇ PARAMETRELERİ		
Uyartım görünür güç	kVA	550
Uyartım güç faktörü		0.8
Stator gerilimi	Volt	400
Bağlantı tipi		Yıldız
Kutup sayısı		6
Frekans	Hz	50
Hız	Rpm	1000
Çalışma sıcaklığı	C°	115
Uyartıcı verimi	%	80
Uyartım akımı	Amper	35

Çizelge 3.2. Rotor tasarım sonuç değerleri.

HİDROGENERATÖR ROTOR BİLGİLERİ		
Minimum hava aralığı	mm	3,55
İç çap		160
Rotor uzunluğu	mm	395
Yığın faktörü		0,96
Kutup yay başlangıç noktası		25,85
İkinci hava aralığı	mm	0
Kutup ayak genişliği	mm	189,5
Kutup ayak yüksekliği	mm	36,6
Kutup gövde genişliği	mm	99,1
Kutup gövde yüksekliği	mm	110

EK-3 (Devam) Tasarlanan Hidrogeneratör Parametre Değerleri

Çizelge 3.3. Stator tasarım sonuç değerleri.

HİDROGENERATÖR STATOR BİLGİLERİ		
Stator oyuk sayısı		72
Stator dış çapı		mm 736,60
Stator iç çapı		mm 558,80
h _{s0}		mm 0,76
h _{s1}		mm 2,17
h _{s2}		mm 29,4
b _{s0}		mm 3,9
b _{s1}		mm 11,4
b _{s2}		mm 15
Stator üst dış genişliği		mm 13,2379
Stator alt dış genişliği		mm 12,2036
Stator uzunluğu		mm 395
Stator yığın faktörü		0,9
Hava kanalı sayısı		6
Hava aralığı genişliği		mm 9,5

Çizelge 3.4. Önemli parametreler ve malzeme kullanımı.

HİDROGENERATÖR ÖNEMLİ PARAMETRELER VE MALZEME KULLANIMI		
Kısa Devre Oranı	SCR	0,49763
Yüksüz hava aralığı akısı harmonik miktarı	%	13,4396
Yüksüz faz gerilimi toplam harmonik miktarı	%	1,79831
Yüksüz hat gerilimi toplam harmonik miktarı	%	1,57409
Yüklü faz gerilimi toplam harmonik miktarı	%	36,9371

EK-3 (Devam) Tasarlanan Hidrogeneratör Parametre Değerleri

Çizelge 3.4. (Devam) Önemli parametreler ve malzeme kullanımı.

Yüklü hat gerilimi toplam harmonik miktarı	%	3,1528
Stator sargıları bakır ağırlığı	kg	104,836
Uyartım sargıları bakır ağırlığı	kg	165,34
Damper bar bakır ağırlığı	kg	10,2072
Damper halkası bakır ağırlığı	kg	7,07483
Stator nüve ağırlığı	kg	356,351
Rotor nüve ağırlığı	kg	290,575
Toplam ağırlık	kg	934,384
Bakır yoğunluğu	kg/m ³	8900
Nüve çelik yoğunluğu	kg/m ³	7730
Damper malzemesi yoğunluğu	kg/m ³	8900

Çizelge 3.5. Tam yük çalışma bilgileri.

HİDROGENERATÖR TAM YÜK BİLGİLERİ		
Stator faz akımı	Amper	776,536
Stator termal yüklemesi	A ² /mm ³	3657,96
Spesifik elektrik yüklemesi	A/mm	530,807
Stator akım yoğunluğu	A/mm ²	6,89133
Uyartım akımı	Amper	34,9436
Uyartım akım yoğunluğu	A/mm ²	2,41814
Uyartım gerilimi	Volt	76,1636
Nüve demir kaybı	Watt	2551,49
İletim ve rüzgar kayıpları	Watt	2600

EK-3 (Devam) Tasarlanan Hidrogeneratör Parametre Değerleri

Çizelge 3.5. (Devam) Tam yük çalışma bilgileri.

Ek kayıplar	Watt	2690
Stator bakır kayıpları	Watt	13362,8
Alan sargısı bakır kayıpları	Watt	2661,43
Uyartıcı kayıpları	Watt	665,357
Toplam kayıplar	Watt	24531,1
Giriş gücü	kW	529,953
Çıkış gücü	kW	505,422
Verim	%	95,3711
Mil torku	Nm	5028,91
Güç faktörü		0,989121

Çizelge 3.6. Geçici ve alt-geçici zaman parametreleri ve zaman sabitleri.

GEÇİCİ ZAMAN PARAMETRELERİ VE ZAMAN SABİTLERİ		
D-ekseni Damper kaçak reaktansı	Ω	0,0653635
D-ekseni Damper direnci	Ω	0,0232048
Q-ekseni Damper kaçak reaktansı	Ω	0,0347543
Q-ekseni Damper direnci	Ω	0,0106844
D-ekseni Geçici reaktansı	Ω	0,109394
D-ekseni Alt-geçici reaktansı	Ω	0,0661807
Q-ekseni Alt-geçici reaktansı	Ω	0,0620621
Alan kaçak reaktansı	Ω	0,0881614
Negatif bileşen reaktansı	Ω	0,0640552
Sıfır bileşen reaktansı	Ω	0,0304163
Alan sargısı zaman sabiti (Stator açık devre)	sn	2,50733

EK-3 (Devam) Tasarlanan Hidrogeneratör Parametre Değerleri

Çizelge 3.6. (Devam) Geçici ve alt-geçici zaman parametreleri ve zaman sabitleri.

D-ekseni Geçici zaman sabiti	sn	0,347808
D-ekseni Alt-geçici zaman sabiti (Stator açık devre)	sn	0,0197999
D-ekseni Alt-geçici zaman sabiti	sn	0,0119784
Q-ekseni Alt-geçici zaman sabiti (Stator açık devre)	sn	0,115761
Q-ekseni Alt-geçici zaman sabiti	sn	0,0186984

EK-4 Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```
' -----
' Script Recorded by Ansoft Maxwell 11.1
' 9:42 May 01, 2009
' -----

Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule

Set oAnsoftApp = CreateObject("AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface")
Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()
oDesktop.RestoreWindow

Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("hydrogenerator")
Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("hydrogen")
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "Local Variables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:OuterDiameter", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"736.6mm"))))
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("Machine")
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", _ "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Outer
Diameter", "Value:=", _ "OuterDiameter"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "Local Variables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:InnerDiameter", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"558.8mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", _ "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Inner
Diameter", "Value:=", _ "InnerDiameter"))))
```


EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Length", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"395mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", _ "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Length",
"Value:=", "Length"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Hs0", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "0.76mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs0", "Value:=", "Hs0"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Hs1", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "2.17mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs1", "Value:=", "Hs1"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", "LocalVariables"),
Array("NAME:NewProps", Array("NAME:Hs2", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _
true, "Value:=", "29.4mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs2", "Value:=", "Hs2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Bs0", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "3.9mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs0", "Value:=", "Bs0"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Bs1", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "11.4mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs1", "Value:=", "Bs1"))))

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:Bs2", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "15mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs2", "Value:=", "Bs2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:ConductorsPerSlot", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"10"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Winding",
Array("NAME:PropServers", _ "Winding"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Conductors per Slot", "Value:=", _ "ConductorsPerSlot"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:NumberOfStrands", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"9"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Winding",
Array("NAME:PropServers", _ "Winding"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Number of Strands", "Value:=", _ "NumberOfStrands"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:DuctWidth", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"9.5mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Vent",
Array("NAME:PropServers", _ "Vent"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Duct
Width", "Value:=", "DuctWidth"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Rotor",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Outer
Diameter", "Value:=", _ "Outerdiameter"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:outerDiameter2", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"551.8"))))

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Rotor",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Outer
Diameter", "Value:=", _ "outerDiameter2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:InnerDiameter2", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"160mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Rotor",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Inner
Diameter", "Value:=", _ "InnerDiameter2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:PoleArcOffSet", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"25.85mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Pole",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Pole Arc
OffSet", "Value:=", _ "PoleArcOffSet"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:PoleShoeWidth", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"189.5mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Pole",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Pole Shoe
Width", "Value:=", _ "PoleShoeWidth"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:PoleShoeHeight", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"36.6mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Pole",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Pole Shoe
Height", "Value:=", _ "PoleShoeHeight"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:PoleBodyWidth", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"99.1mm"))))

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Pole",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Pole Body
Width", "Value:=", _ "PoleBodyWidth"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:PoleBodyHeight", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"110mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Pole",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Pole Body
Height", "Value:=", _ "PoleBodyHeight"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:ConductorsPerPole2", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true,
"Value:=", "380"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Winding",
Array("NAME:PropServers", _ "Winding"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Conductors per Pole", "Value:=", _ "ConductorsPerPole2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:SlotPitch", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"4.57deg"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Damper",
Array("NAME:PropServers", _ "Damper"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Slot
Pitch", "Value:=", "SlotPitch"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:CenterSlotPitch", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"13.71deg"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Damper",
Array("NAME:PropServers", _ "Damper"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Center
Slot Pitch", "Value:=", _ "CenterSlotPitch"))))
Set oModule = oDesign.GetModule("ParameterSetup")
oModule.AddParameter Array("NAME:Efficiency", "Keyword:=", "Efficiency")
oModule.AddParameter Array("NAME:AirGapFluxDensity", "Keyword:=", _
"Air-Gap Flux Density")

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```
oModule.AddParameter Array("NAME:Torque", "KeyWord:=", "Rated Torque")
oModule.AddParameter Array("NAME:TotalNetWeight", "KeyWord:=", "Total Net Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:RMSPhaseCurrent", "KeyWord:=", "RMS Phase Current")
oModule.AddParameter Array("NAME:TotalLoss", "KeyWord:=", "Total Loss ")
oModule.AddParameter Array("NAME:ArmatureCopperWeight", "KeyWord:=",
"Armature Copper Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:ArmatureCoreSteelWeight", "KeyWord:=", "Armature
Core Steel Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:FieldCopperWeight", "KeyWord:=", "Field Copper Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:NoLoadPhaseVoltageTHD", "KeyWord:=", "No-Load
Phase-Voltage THD")
oModule.AddParameter Array("NAME:PowerFactor", "KeyWord:=", "Power Factor")
oModule.AddParameter Array("NAME:ExcitingCurrent", "KeyWord:=", "Exciting Current")
oModule.AddParameter Array("NAME:ExcitingVoltage", "KeyWord:=", "Exciting Voltage")
oModule.AddParameter Array("NAME:CoggingTorque", "KeyWord:=", "Cogging Torque")
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:General",
Array("NAME:PropServers", "AnalysisSetup:Setup1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Load Type", "Value:=", "IndepEndent Generator"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:OperatingTemperature", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true,
"Value:=", "115cel"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:General",
Array("NAME:PropServers", "AnalysisSetup:Setup1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Operating Temperature", "Value:=", "OperatingTemperature"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:SlotPitch", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:CenterSlotPitch", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:OperatingTemperature", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:ConductorsPerPole2", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:PoleBodyHeight", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:PoleBodyWidth", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:PoleShoeHeight", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:PoleShoeWidth", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

Array("NAME:PoleArcOffSet", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:InnerDiameter2", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:outerDiameter2", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:DuctWidth", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:NumberOfStrands", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:ConductorsPerSlot", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:Bs2", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Bs1",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Bs0",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Hs2",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Hs1",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Hs0",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Length",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:InnerDiameter",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:OuterDiameter",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Bs2", Array("NAME:Sensitivity",
"Included:=", true)), Array("NAME:OuterDiameter", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=",
true)), Array("NAME:InnerDiameter", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)),
Array("NAME:Length", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:Hs0",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:Hs1", Array("NAME:Sensitivity",
"Included:=", true)), Array("NAME:Hs2", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)),
Array("NAME:Bs0", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:Bs1",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:ConductorsPerSlot",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:NumberOfStrands",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:DuctWidth",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:outerDiameter2",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:InnerDiameter2",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:PoleArcOffSet",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:PoleShoeWidth",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:PoleShoeHeight",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:PoleBodyWidth",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:PoleBodyHeight",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:ConductorsPerPole2",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:SlotPitch",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:CenterSlotPitch",

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:OperatingTemperature",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true))))))
oDesign.AddOutputVariable "eff", "Efficiency"
oDesign.AddOutputVariable "agf", "AirGapFluxDensity"
oDesign.AddOutputVariable "trq", "Torque"
oDesign.AddOutputVariable "tnw", "TotalNetWeight"
oDesign.AddOutputVariable "rmspc", "RMSPhaseCurrent"
Set oModule = oDesign.GetModule("Optimetrics")
oModule.InsertSetup "OptiOptimization", Array("NAME:OptimizationSetup1",
Array("NAME:StartingPoint", "Bs0:=", _ "2.9mm", "Bs1:=", "9.4mm", "Bs2:=", "17mm",
"CenterSlotPitch:=", "17.71deg", "ConductorsPerPole2:=", _ "480", "ConductorsPerSlot:=", "15",
"DuctWidth:=", "14mm", "Hs0:=", _ "0.86mm", "Hs1:=", "4.17mm", "Hs2:=", "34.4mm",
"InnerDiameter:=", "578.4mm", "InnerDiameter2:=", _ "180mm", "Length:=", "425mm",
"NumberOfStrands:=", "11", "OperatingTemperature:=", "125cel", "OuterDiameter:=", _
"786.2mm", "PoleArcOffSet:=", "23.85mm", "PoleBodyHeight:=", "123mm", "PoleBodyWidth:=", _
"119.1mm", "PoleShoeHeight:=", "46.6mm", "PoleShoeWidth:=", "209.5mm", , "SlotPitch:=",
"6.57deg", "outerDiameter2:=", _ "571.8mm"), "Optimizer:=", "SMINLP", "MaxIterations:=",
1000, "CostFuncNormType:=", _ "L2", "PriorPSetup:=", "", "PreSolvePSetup:=", true,
Array("NAME:Variables", "Bs0:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "1.95mm", "Max:=",
"5.85mm", "MinStep:=", _ "0.039mm", "MaxStep:=", "0.39mm", "MinFocus:=", "2.95mm",
"MaxFocus:=", "4.85mm"

If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "3.5mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "4.5mm",
Else
"MinFocus:= ", "2.95mm", "MaxFocus:= ", "4.85mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"Bs1:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "5.7mm", "Max:=", "17.1mm", "MinStep:=",
"0.114mm", "MaxStep:=", _ "1.14mm", "MinFocus:=", "9.7mm", "MaxFocus:=", "15.1mm"

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

```

If i>="MinFocus" Then
    "MinFocus:= ", "11mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
    "MaxFocus:= ", "13mm",
Else
    "MinFocus:= ", "9.7mm", "MaxFocus:= ", "15.1mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"Bs2:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "7.5mm", "Max:=", "22.5mm", "MinStep:=",
"0.15mm", "MaxStep:=", _ "1.5mm", "MinFocus:=", "9.5mm", "MaxFocus:=", "20.5mm"
If i>="MinFocus" Then
    "MinFocus:= ", "11mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
    "MaxFocus:= ", "17.5mm",
Else
    "MinFocus:= ", "9.5mm", "MaxFocus:= ", "20.5mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"CenterSlotPitch:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "6.855deg", "Max:=", "20.565deg",
"MinStep:=", _ "0.1371deg", "MaxStep:=", "1.371deg", "MinFocus:=", "8.855deg", "MaxFocus:=",
_ "16.565deg"
If i>="MinFocus" Then
    "MinFocus:= ", "9.5deg",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
    "MaxFocus:= ", "14.355deg",
Else
    "MinFocus:= ", "8.855deg", "MaxFocus:= ", "16.565deg",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"ConductorsPerPole2:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "190", "Max:=", "570",
"MinStep:=", "3.8", "MaxStep:=", "38", "MinFocus:=", _ "250", "MaxFocus:=", "450"
If i>="MinFocus" Then

```


EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

```
"MinFocus:= ", "310",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "400",
Else
"MinFocus:= ", "250", "MaxFocus:= ", "450",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"ConductorsPerSlot:=", Array("i:=", true, "int:=", _ true, "Min:=", "5", "Max:=", "15", "MinStep:=",
"0.1", "MaxStep:=", "1", "MinFocus:=", _ "7", "MaxFocus:=", "12"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "9",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "11",
Else
"MinFocus:= ", "7", "MaxFocus:= ", "12",
End If
' Continue optimization process.),
"DuctWidth:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "4.75mm", "Max:=", "14.25mm",
"MinStep:=", "0.095mm", "MaxStep:=", "0.95mm", "MinFocus:=", _
"6.75mm", "MaxFocus:=", "10.25mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "7.5mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "9.55mm",
Else
"MinFocus:= ", "6.75mm", "MaxFocus:= ", "10.25mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"Hs0:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "0.38mm", "Max:=", _ "1.14mm", "MinStep:=",
"0.0076mm", "MaxStep:=", "0.076mm", "MinFocus:=", _ "0.78mm", "MaxFocus:=", "1.04mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "0.8mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

"MaxFocus:= ", "0.95mm",

Else

"MinFocus:= ", "0.78mm", "MaxFocus:= ", "1.04mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"Hs1:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "1.085mm", "Max:=", "3.255mm",
"MinStep:=", "0.0217mm", "MaxStep:=", "0.217mm", "MinFocus:=", _ "1.885mm", "MaxFocus:=",
"2.255mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "2mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "2.15mm",

Else

"MinFocus:= ", "1.885mm", "MaxFocus:= ", "2.255mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"Hs2:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "14.7mm", "Max:=", "44.1mm", "MinStep:=",
"0.294mm", "MaxStep:=", "2.94mm", "MinFocus:=", _ "16.7mm", "MaxFocus:=", "40.1mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "18mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "35.5mm",

Else

"MinFocus:= ", "16.7mm", "MaxFocus:= ", "40.1mm",

End If

‘ Continue optimization process.),

"InnerDiameter:=", Array("i:=", true, "int:=", _ true, "Min:=", "279.4mm", "Max:=", "838.2mm",
"MinStep:=", "5.588mm", "MaxStep:=", _ "55.88mm", "MinFocus:=", "299.4mm", "MaxFocus:=",
"738.2mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "325mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "650mm",

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

Else

"MinFocus:= ", "299.4mm", "MaxFocus:= ", "738.2mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"InnerDiameter2:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "80mm", "Max:=", "240mm",
"MinStep:=", "1.6mm", "MaxStep:=", _ "16mm", "MinFocus:=", "100mm", "MaxFocus:=",
"190mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "120mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "175mm",

Else

"MinFocus:= ", "100mm", "MaxFocus:= ", "190mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"Length:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "197.5mm", "Max:=", "592.5mm",
"MinStep:=", _ "3.95mm", "MaxStep:=", "39.5mm", "MinFocus:=", "217.5mm", "MaxFocus:=", _
"492.5mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "230mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "450mm",

Else

"MinFocus:= ", "217.5mm", "MaxFocus:= ", "492.5mm",

End If

‘ Continue optimization process.),

"NumberOfStrands:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "4.5", "Max:=", "13.5",
"MinStep:=", "0.09", "MaxStep:=", _ "0.9", "MinFocus:=", "6.5", "MaxFocus:=", "10.5"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "8",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "9",

Else

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

"MinFocus:= ", "6.5", "MaxFocus:= ", "10.5",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"OperatingTemperature:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "57.5cel", "Max:=",
"172.5cel", "MinStep:=", _ "1.15cel", "MaxStep:=", "11.5cel", "MinFocus:=", "75.5cel",
"MaxFocus:=", _ "130.5cel"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "85cel",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "120cel",

Else

"MinFocus:= ", "75.5cel", "MaxFocus:= ", "130.5cel",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"OuterDiameter:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "368.3mm", "Max:=", "1104.9mm",
"MinStep:=", "7.366mm", "MaxStep:=", "73.66mm", "MinFocus:=", _ "400.3mm", "MaxFocus:=",
"950mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "435mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "865mm",

Else

"MinFocus:= ", "400.3mm", "MaxFocus:= ", "950mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"PoleArcOffset:=", Array("i:=", true, "int:=", _ true, "Min:=", "12.925mm", "Max:=", "38.775mm",
"MinStep:=", "0.2585mm", "MaxStep:=", _ "2.585mm", "MinFocus:=", "14.925mm",
"MaxFocus:=", "29.775mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "18mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "27mm",

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

Else

"MinFocus:= ", "14.925mm", "MaxFocus:= ", "29.775mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"PoleBodyHeight:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "55mm", "Max:=", "165mm",
"MinStep:=", "1.1mm", "MaxStep:=", _ "11mm", "MinFocus:=", "75mm", "MaxFocus:=",
"125mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "85mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "115mm",

Else

"MinFocus:= ", "75mm", "MaxFocus:= ", "125mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"PoleBodyWidth:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "49.55mm", "Max:=", "148.65mm",
"MinStep:=", _ "0.991mm", "MaxStep:=", "9.91mm", "MinFocus:=", "69.55mm", "MaxFocus:=", _
"118.65mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "75mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "110mm",

Else

"MinFocus:= ", "69.55mm", "MaxFocus:= ", "118.65mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"PoleShoeHeight:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "18.3mm", "Max:=", "54.9mm",
"MinStep:=", "0.366mm", "MaxStep:=", "3.66mm", "MinFocus:=", _ "28.3mm", "MaxFocus:=",
"44.9mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "30mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script
(senaryo) kodları

"MaxFocus:= ", "40mm",

Else

"MinFocus:= ", "28.3mm", "MaxFocus:= ", "44.9mm",

End If

‘ Continue optimization process.),

"PoleShoeWidth:=", Array("i:=", true, "int:=", _ true, "Min:=", "94.75mm", "Max:=", "284.25mm",

"MinStep:=", "1.895mm", "MaxStep:=", _ "18.95mm", "MinFocus:=", "104.75mm", "MaxFocus:=",
"200.25mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "107.5mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "195mm",

Else

"MinFocus:= ", "104.75mm", "MaxFocus:= ", "200.25mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"SlotPitch:=", Array("i:=", _ true, "int:=", true, "Min:=", "2.285deg", "Max:=", "6.855deg",

"MinStep:=", _ "0.0457deg", "MaxStep:=", "0.457deg", "MinFocus:=", "3.285deg", "MaxFocus:=",
_ "5.855deg"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "3.565deg",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

"MaxFocus:= ", "5.125deg",

Else

"MinFocus:= ", "3.285deg", "MaxFocus:= ", "5.855deg",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"outerDiameter2:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", _ "275.9mm", "Max:=", "827.7mm",

"MinStep:=", "5.518mm", "MaxStep:=", "55.18mm", "MinFocus:=", _ "325.9mm", "MaxFocus:=",
"727.7mm"

If i>="MinFocus" Then

"MinFocus:= ", "350mm",

ElseIf i<="MaxFocus" Then

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör verimi optimizasyon ve hassasiyet analizi script (senaryo) kodları

```

"MaxFocus:= ", "685mm",
Else
"MinFocus:= ", "325.9mm", "MaxFocus:= ", "727.7mm",
End If
End If
' Continue optimization process.)),
Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals", Array("NAME:Goal", "Solution:=", "Setup1 :
Parameter", "Calculation:=", "eff", "Context:=", "", Array("NAME:Ranges"), "Condition:=",
"Maximize", Array("NAME:GoalValue", "GoalValueType:=", "IndepEndent", "Format:=", _
"Real/Imag", "bG:=", Array("v:=", "[0]")), "Weight:=", "[1]")), "Acceptable_Cost:=", _ 0, "Noise:=",
0.0001, "UpdateDesign:=", true, "UpdateIteration:=", 5, "KeepReportAxis:=", true,
"UpdateDesignWhEndone:=", true)
oModule.InsertSetup "OptiSensitivity", Array("NAME:SensitivitySetup1",
Array("NAME:StartingPoint", "MaxIterations:=", _ 10, "PriorPSetup:=", "", "PreSolvePSetup:=",
true, Array("NAME:Variables"), Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals",
Array("NAME:Goal", "Solution:=", _ "Setup1 : Parameter", "Calculation:=", "eff", "Context:=", "",
Array("NAME:Ranges"))), "Master Goal:=", _ 0, "MasterError:=", 0.0001)
oProject.Save
oModule.SolveAllSetup "All Optimetrics"

```

Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo) Kodları

```

' -----
' Script Recorded by Maxwell Version 11.1
' 6:16 May 02, 2009
' -----

Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule
Set oAnsoftApp = CreateObject("AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface")
Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()
oDesktop.RestoreWindow

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```

Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("ek_d_opti_sensi")
Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("hydrogenerator")
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:OuterDiameter", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"736.6mm"))))
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("Machine")
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Outer
Diameter", "Value:=", "OuterDiameter"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:innerdiameter", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"558.8mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", _ "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Inner
Diameter", "Value:=", _ "innerdiameter"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:length", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=", "395mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Stator",
Array("NAME:PropServers", _ "Stator"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Length",
"Value:=", "length"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:hs0",
"PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "0.76mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs0", "Value:=", "hs0"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:hs1",
"PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "2.17mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs1", "Value:=", "hs1"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",

```


EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```

Array("NAME:hs2", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "29.4mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Hs2", "Value:=", "hs2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:bs0",
"PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "3.9mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs0", "Value:=", "bs0"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:bs1",
"PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "11.4mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs1", "Value:=", "bs1"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps", Array("NAME:bs2",
"PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=", _ true, "Value:=", "15mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Slot", Array("NAME:PropServers",
_ "Slot"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Bs2", "Value:=", "bs2"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:rotorouterdia", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"551.7mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Rotor",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Outer
Diameter", "Value:=", _ "rotorouterdia"))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:NewProps",
Array("NAME:innerdia", "PropType:=", _ "VariableProp", "UserDef:=", true, "Value:=",
"160mm"))))
oEditor.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:Rotor",
Array("NAME:PropServers", _ "Rotor"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:Inner
Diameter", "Value:=", "innerdia"))))
Set oModule = oDesign.GetModule("ParameterSetup")
oModule.AddParameter Array("NAME:P1", "KeyWord:=", "2nd Air-Gap Ampere Turns")

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```

oModule.AddParameter Array("NAME:P2", "KeyWord:=", "2nd Air-Gap Flux Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P3", "KeyWord:=", "Additional Loss")
oModule.AddParameter Array("NAME:P4", "KeyWord:=", "Air-Gap Ampere Turns")
oModule.AddParameter Array("NAME:P5", "KeyWord:=", "Air-Gap Flux Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P6", "KeyWord:=", "Armature Copper Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P7", "KeyWord:=", "Armature Copper Loss")
oModule.AddParameter Array("NAME:P8", "KeyWord:=", "Armature Copper Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:P9", "KeyWord:=", "Armature Core Steel Consumption")
oModule.AddParameter Array("NAME:P10", "KeyWord:=", "Armature Core Steel Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P11", "KeyWord:=", "Armature Current Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P12", "KeyWord:=", "Cogging Torque")
oModule.AddParameter Array("NAME:P13", "KeyWord:=", "D-Axis Ampere Turns at PF=0")
oModule.AddParameter Array("NAME:P14", "KeyWord:=", "D-Axis Armature Ampere Turns")
oModule.AddParameter Array("NAME:P15", "KeyWord:=", "Efficiency")
oModule.AddParameter Array("NAME:P16", "KeyWord:=", "Exciting Current")
oModule.AddParameter Array("NAME:P17", "KeyWord:=", "Exciting Current Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P18", "KeyWord:=", "Exciting Voltage")
oModule.AddParameter Array("NAME:P19", "KeyWord:=", "Input Power")
oModule.AddParameter Array("NAME:P20", "KeyWord:=", "Field Copper Weight")
oModule.AddParameter Array("NAME:P21", "KeyWord:=", "No-Load Line-Voltage THD")
oModule.AddParameter Array("NAME:P22", "KeyWord:=", "No-Load Phase-Voltage THD")
oModule.AddParameter Array("NAME:P23", "KeyWord:=", "Rotor-Yoke Flux Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P24", "KeyWord:=", "Stator-Yoke Flux Density")
oModule.AddParameter Array("NAME:P25", "KeyWord:=", "Total Loss ")
oModule.AddParameter Array("NAME:P26", "KeyWord:=", "Total Net Weight")
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:General",
Array("NAME:PropServers", _ "AnalysisSetup:Setup1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Load Type", "Value:=", "IndepEndent Generator"))))
oProject.Save
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:OuterDiameter", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:innerdiameter", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)),
Array("NAME:length", Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:hs0",

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```

Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:hs1",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:hs2",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:bs0",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:bs1",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:bs2",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:rotorouterdia",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:innerdia",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true))))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:OuterDiameter", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)),
Array("NAME:innerdiameter", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)),
Array("NAME:length", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:hs0",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:hs1", Array("NAME:Sensitivity",
"Included:=", true)), Array("NAME:hs2", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)),
Array("NAME:bs0", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:bs1",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", true)), Array("NAME:bs2", Array("NAME:Sensitivity",
"Included:=", true)), Array("NAME:rotorouterdia", Array("NAME:Sensitivity", "Included:=",
true))))))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:OuterDiameter", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)),
Array("NAME:innerdiameter", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)),
Array("NAME:length", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)), Array("NAME:hs0",
Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)), Array("NAME:hs1", Array("NAME:Statistical",
"Included:=", true)), Array("NAME:hs2", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)),
Array("NAME:bs0", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)), Array("NAME:bs1",
Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)), Array("NAME:bs2", Array("NAME:Statistical",
"Included:=", true)), Array("NAME:rotorouterdia", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)),
Array("NAME:innerdia", Array("NAME:Statistical", "Included:=", true)),
Array("NAME:OuterDiameter", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")),
Array("NAME:innerdiameter", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")),
Array("NAME:length", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:hs0",
Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:hs1", Array("NAME:Statistical",

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```
"Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:hs2", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")),
Array("NAME:bs0", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:bs1",
Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:bs2", Array("NAME:Statistical",
"Dist:=", "Gaussian")), Array("NAME:rotorouterdia", Array("NAME:Statistical", "Dist:=",
"Gaussian")), Array("NAME:innerdia", Array("NAME:Statistical", "Dist:=", "Gaussian"))))
oDesign.AddOutputVariable "totnetweight", "Parameter26"
Set oModule = oDesign.GetModule("Optimetrics")
oModule.InsertSetup "OptiOptimization", Array("NAME:OptimizationSetup1",
Array("NAME:StartingPoint", "OuterDiameter:=", _ "736.6mm", "bs0:=", "3.9mm", "bs1:=",
"11.4mm", "bs2:=", "15mm", "hs0:=", _ "0.76mm", "hs1:=", "2.17mm", "hs2:=", "29.4mm",
"innerdia:=", "160mm", "innerdiameter:=", _ "558.8mm", "length:=", "395mm", "rotorouterdia:=",
"551.7mm"), "Optimizer:=", "SMINLP", "MaxIterations:=", 1000, "CostFuncNormType:=", "L2",
"PriorPSetup:=", _ "", "PreSolvePSetup:=", true, Array("NAME:Variables", "OuterDiameter:=",
Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "368.3mm", "Max:=", "1104.9mm", "MinStep:=",
"7.366mm", "MaxStep:=", "73.66mm", "MinFocus:=", "368.3mm", "MaxFocus:=", "1104.9mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "375mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "984.5mm",
Else
"MinFocus:= ", "368.3mm", "MaxFocus:= ", "984.5mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"bs0:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "1.95mm", "Max:=", "5.85mm", "MinStep:=",
"0.039mm", "MaxStep:=", "0.39mm", "MinFocus:=", "1.95mm", "MaxFocus:=", "5.85mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "2mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "5mm",
Else
"MinFocus:= ", "1.95mm", "MaxFocus:= ", "5.85mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```
"bs1:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "5.7mm", "Max:=", "17.1mm", "MinStep:=", "0.114mm", "MaxStep:=", "1.14mm", "MinFocus:=", "5.7mm", "MaxFocus:=", "17.1mm")
```

```
If i>="MinFocus" Then
```

```
"MinFocus:= ", "7.5mm",
```

```
ElseIf i<="MaxFocus" Then
```

```
"MaxFocus:= ", "16.5mm",
```

```
Else
```

```
"MinFocus:= ", "5.7mm", "MaxFocus:= ", "17.1mm",
```

```
End If
```

```
End If
```

```
‘ Continue optimization process.),
```

```
"bs2:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "7.5mm", "Max:=", "22.5mm", "MinStep:=", "0.15mm", "MaxStep:=", "1.5mm", "MinFocus:=", "7.5mm", "MaxFocus:=", "22.5mm")
```

```
If i>="MinFocus" Then
```

```
"MinFocus:= ", "8.5mm",
```

```
ElseIf i<="MaxFocus" Then
```

```
"MaxFocus:= ", "20.5mm",
```

```
Else
```

```
"MinFocus:= ", "7.5mm", "MaxFocus:= ", "22.5mm",
```

```
End If
```

```
End If
```

```
‘ Continue optimization process.),
```

```
"hs0:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "0.38mm", "Max:=", "1.14mm", "MinStep:=", "0.0076mm", "MaxStep:=", "0.076mm", "MinFocus:=", "0.38mm", "MaxFocus:=", "1.14mm")
```

```
If i>="MinFocus" Then
```

```
"MinFocus:= ", "0.46mm",
```

```
ElseIf i<="MaxFocus" Then
```

```
"MaxFocus:= ", "1.05mm",
```

```
Else
```

```
"MinFocus:= ", "0.38mm", "MaxFocus:= ", "1.14mm",
```

```
End If
```

```
End If
```

```
‘ Continue optimization process.),
```

```
"hs1:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "1.085mm", "Max:=", "3.255mm", "MinStep:=", "0.0217mm", "MaxStep:=", "0.217mm", "MinFocus:=", "1.085mm", "MaxFocus:=", "3.255mm")
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

If i>="MinFocus" **Then**

"MinFocus:= ", "1.23mm",

ElseIf i<="MaxFocus" **Then**

"MaxFocus:= ", "2.72mm",

Else

"MinFocus:= ", "1.085mm", "MaxFocus:= ", "3.255mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"hs2:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "14.7mm", "Max:=", "44.1mm", "MinStep:=",
"0.294mm", "MaxStep:=", "2.94mm", "MinFocus:=", "14.7mm", "MaxFocus:=", "44.1mm"

If i>="MinFocus" **Then**

"MinFocus:= ", "16mm",

ElseIf i<="MaxFocus" **Then**

"MaxFocus:= ", "42mm",

Else

"MinFocus:= ", "14.7mm", "MaxFocus:= ", "44.1mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"innerdia:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "80mm", "Max:=", "240mm", "MinStep:=",
"1.6mm", "MaxStep:=", "16mm", "MinFocus:=", "80mm", "MaxFocus:=", "240mm"

If i>="MinFocus" **Then**

"MinFocus:= ", "84mm",

ElseIf i<="MaxFocus" **Then**

"MaxFocus:= ", "220mm",

Else

"MinFocus:= ", "80mm", "MaxFocus:= ", "240mm",

End If

End If

‘ Continue optimization process.),

"innerdiameter:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "279.4mm", "Max:=", "838.2mm",
"MinStep:=", "5.588mm", "MaxStep:=", "55.88mm", "MinFocus:=", "279.4mm", "MaxFocus:=",
"838.2mm"

If i>="MinFocus" **Then**

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```
"MinFocus:= ", "340mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "750mm",
Else
"MinFocus:= ", "279.4mm", "MaxFocus:= ", "838.2mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"length:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "197.5mm", "Max:=", "592.5mm", "MinStep:=",
"3.95mm", "MaxStep:=", "39.5mm", "MinFocus:=", "197.5mm", "MaxFocus:=", "592.5mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "201mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "588mm",
Else
"MinFocus:= ", "197.5mm", "MaxFocus:= ", "592.5mm",
End If
End If
' Continue optimization process.),
"rotorouterdia:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "275.85mm", "Max:=", "827.55mm",
"MinStep:=", "5.517mm", "MaxStep:=", "55.17mm", "MinFocus:=", "275.85mm", "MaxFocus:=",
"827.55mm"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "286mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "785mm",
Else
"MinFocus:= ", "275.85mm", "MaxFocus:= ", "827.55mm",
End If
End If
' Continue optimization process.)),
Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals", Array("NAME:Goal", "Solution:=",
"Setup1 : Parameter", "Calculation:=", "totnetweight", "Context:=", "", Array("NAME:Ranges"),
"Condition:=", "Minimize", Array("NAME:GoalValue", "GoalValueType:=", "IndepEndent",
"Format:=", "Real/Imag", "bG:=", Array("v:=", "[0]")), "Weight:=", "[1]")),
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Toplam Ağırlık Minimizasyonu Script (Senaryo)

Kodları

```
"Acceptable_Cost:=", 0, "Noise:=", 0.0001, "UpdateDesign:=", false, "UpdateIteration:=", 5,
"KeepReportAxis:=", _ true, "UpdateDesignWhEndone:=", true)
oDesign.AddOutputVariable "totnetweightsensi", "Parameter26"
oModule.InsertSetup "OptiSensitivity", Array("NAME:SensitivitySetup1",
Array("NAME:StartingPoint", "innerdia:=", "160mm"), "MaxIterations:=", 10, "PriorPSetup:=", "",
"PreSolvePSetup:=", true, Array("NAME:Variables"), Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals",
Array("NAME:Goal", "Solution:=", "Setup1 : Parameter", "Calculation:=", "totnetweightsensi",
"Context:=", "", Array("NAME:Ranges"))), "Master Goal:=", 0, "MasterError:=", 0.0001)
oProject.Save
oModule.SolveSetup "All Optimetrics"
```

Hidrogeneratör Dinamik 3D Transient Uyarım Akımı ve Mil Torku Optimizasyonu Script (Senaryo) Kodları

```
' -----
' Script Recorded by Maxwell Version 11.1
' 6:53 May 04, 2009
' -----

Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule

Set oAnsoftApp = CreateObject("AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface")
Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()
oDesktop.RestoreWindow

Set oProject = oDesktop.SetActiveProject("HydroGen_")
Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("Hydro_538Kva")
Set oModule = oDesign.GetModule("3D Modeler")

oModule.EditMotionSetup Array("NAME:Band", "Move Type:=", "Rotate", "Coordinate System:=",
"Global", "Axis:=", "Z", "Is Positive:=", true, "InitPos:=", "30deg", "HasRotateLimit:=", false,
```


EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Dinamik 3D Transient Uyartım Akımı ve Mil Torku Optimizasyonu Script (Senaryo) Kodları

```

"NonCylindrical:=", false, "Consider Mechanical Transient:=", true, "Angular Velocity:=",
"1000rpm", "Moment of Inertia:=", "28", "Damping:=", "0", "Load Torque:=", "6011NewtonMeter")
oModule.EditMotionSetup Array("NAME:Band", "Move Type:=", "Rotate", "Coordinate System:=",
"Global", "Axis:=", "Z", "Is Positive:=", true, "InitPos:=", "30deg", "HasRotateLimit:=", false,
"NonCylindrical:=", false, "Consider Mechanical Transient:=", true, "Angular Velocity:=",
"1000rpm", "Moment of Inertia:=", "28.12Kgm2", "Damping:=", "0", "Load Torque:=",
"6011NewtonMeter")
Set oModule = oDesign.GetModule("BoundarySetup")
oModule.EditSymmetry "Symmetry1", Array("NAME:Symmetry1", "IsOdd:=", false)
oModule.EditSymmetry "Symmetry2", Array("NAME:Symmetry2", "IsOdd:=", false)
oModule.AssignInsulating Array("NAME:Insulating1", "Objects:=", Array("Cylinder1"))
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:MaxwellTab",
Array("NAME:PropServers", "BoundarySetup:CoilTerminal1"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Number of Conductors", "Value:=", "180"))))
Set oModule = oDesign.GetModule("MaxwellParameterSetup")
oModule.AssignTorque Array("NAME:Torque1", "Is Virtual:=", true, "Coordinate System:=",
"Global", "Axis:=", "Z", "Is Positive:=", true, "Objects:=", Array("rotorcore"))
Set oModule = oDesign.GetModule("MeshSetup")
oModule.AssignSkinDepthOp Array("NAME:SkinDepth1", "Objects:=", Array("SalientPoleCore2",
"PhA0", "PhA1", "PhA2", "PhA3", "rotorcore", "StatorCore", "Cylinder1", "Band", "Region"),
"RestrictElem:=", true, "NumMaxElem:=", "1000", "SkinDepth:=", "2.28836373802878mm",
"SurfTriMaxLength:=", "151.266933757159mm", "NumLayers:=", "2")
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array("NAME:LocalVariableTab",
Array("NAME:PropServers", _ "LocalVariables"), Array("NAME:ChangedProps",
Array("NAME:Lind", Array("NAME:Optimization", "Included:=", false)), Array("NAME:Lind",
Array("NAME:Optimization", "Included:=", true)), Array("NAME:Lind",
Array("NAME:Sensitivity", "Included:=", false)), Array("NAME:Lind", Array("NAME:Sensitivity",
"Included:=", true))))))
Set oModule = oDesign.GetModule("AnalysisSetup")
oModule.InsertSetup "Transient", Array("NAME:Setup1", "NonlinearSolverResidual:=", 0.005,
"SolverType:=", 0, "linearSolverResidual:=", 1E-006, "ContinueToSolve:=", true, "StopTime:=",
"0.01s", "TimeStep:=", "0.002s", "OutputError:=", false, "UseControlProgram:=", false,
"ControlProgramName:=", " ", "ControlProgramArg:=", " ", "CallCtrlProgAfterLastStep:=", false,
"HasSweepSetup:=", false, "OutputVarCalTimeStep:=", "0.002s", outputVarCalNumOfSolveSteps:=",
1, "OutputVarCalTimeMethod:=", 0, "NumberOfOutputVars:=", 0,

```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Dinamik 3D Transient Uyartım Akımı ve Mil Torku Optimizasyonu Script (Senaryo) Kodları

```
"TransientHcNonLinearBH:=", true, "TransientComputeHc:=", false, "PreAdaptMesh:=", false)
oDesign.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs", Array(Array("NAME:PropServers",
"AnalysisSetup:Setup1"), Array("NAME:ChangedProps", Array("NAME:NonlinearSolverResidual",
"MustBeInt:=", false, "Value:=", "0.05"))))
oDesign.AddOutputVariable "induktans", "Lind"
oDesign.AddOutputVariable "trq", "Torque"
oDesign.AddOutputVariable "indvolt", "InducedVoltage"
oDesign.AddOutputVariable "magflxdenst", "Mag_B"
Set oModule = oDesign.GetModule("Optimetrics")
oModule.InsertSetup "OptiOptimization", Array("NAME:OptimizationSetup1",
Array("NAME:ProdOptiSetupData", "SaveFields:=", true, "CopyMesh:=", true),
Array("NAME:StartingPoint", "Lind:=", "0.02378H"), "Optimizer:=", "SMINLP", "MaxIterations:=",
100, "CostFuncNormType:=", "L2", "PriorPSetup:=", "", "PreSolvePSetup:=", true,
Array("NAME:Variables", "Lind:=", Array("i:=", true, "int:=", true, "Min:=", "0.01189H", "Max:=",
"0.03567H", "MinStep:=", "0.0002378H", "MaxStep:=", "0.002378H", "MinFocus:=",
"0.012387989898787556H", "MaxFocus:=", "0.0312854695641254H"
If i>="MinFocus" Then
"MinFocus:= ", "0.0172387965456585mm",
ElseIf i<="MaxFocus" Then
"MaxFocus:= ", "0.029856548565475mm",
Else
"MinFocus:= ", "0.01238798989789755mm", "MaxFocus:= ", "0.031285469564125mm",
End If
' Continue optimization process.)),
Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals", Array("NAME:Goal", "Solution:=",
"Setup1 : Winding1", "Calculation:=", "indvolt", "Context:=", "", Array("NAME:Ranges"),
"Condition:=", ">=", Array("NAME:GoalValue", "GoalValueType:=", "IndepEndent", "Format:=",
"Real/Imag", "bG:=", Array("v:=", "[600]")), "Weight:=", "[1]"), Array("NAME:Goal", "Solution:=",
"Setup1 : Motion", "Calculation:=", "trq", "Context:=", "", Array("NAME:Ranges"), "Condition:=",
"<=", Array("NAME:GoalValue", "GoalValueType:=", "IndepEndent", "Format:=", "Real/Imag",
"bG:=", Array("v:=", "[6e-006]")), "Weight:=", "[1]")), "Acceptable_Cost:=", 0, "Noise:=", 0.0001,
"UpdateDesign:=", false, "UpdateIteration:=", 5, "KeepReportAxis:=", true,
"UpdateDesignWhEndone:=", true)
```

EK-4 (Devam) Hidrogeneratör Dinamik 3D Transient Uyartım Akımı ve Mil Torku Optimizasyonu Script (Senaryo) Kodları

```
oModule.InsertSetup "OptiSensitivity", Array("NAME:SensitivitySetup1",
Array("NAME:ProdOptiSetupData", "SaveFields=", true, "CopyMesh=", true),
Array("NAME:StartingPoint", "Lind=", "0.02378H"), "MaxIterations=", _
10, "PriorPSetup=", "", "PreSolvePSetup=", true, Array("NAME:Variables", "Lind=", Array("i=",
true, "int=", false, "Min=", "0.01189H", "Max=", "0.03567H", "IDisp=",
"0.00178989236642201278H")),
Array("NAME:LCS"), Array("NAME:Goals", Array("NAME:Goal", "Solution=",
"Setup1 : Winding1", "Calculation=", "indvolt", "Context=", "", Array("NAME:Ranges")),
Array("NAME:Goal", "Solution=", _ "Setup1 : Motion", "Calculation=", "trq", "Context=", "",
Array("NAME:Ranges"))), "Master Goal=", _ 0, "MasterError=", 0.001)
oProject.Save
oDesign.AnalyzeAll
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı , adı : TOPALOĞLU İsmail

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 14/05/1983 ADANA

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 536 746 09 44

E-mail : iso2442@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Eğitim Bölümü	2007
Lise	Adana Anadolu Teknik Lisesi	2001

Yabancı Dil

İngilizce