



**ÇIKIK KUTUPLU SENKRON GENERATÖRÜN GEOMETRİK
OPTİMİZASYONA DAYALI PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ**

Melda EYÜBOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir,
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Melda EYÜBOĞLU

07/07/2025

ÇIKIK KUTUPLU SENKRON GENERATÖRÜN GEOMETRİK OPTİMİZASYONA DAYALI PERFORMANS İYİLEŞTİRMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Melda EYÜBOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu çalışmada, 600 kVA gücünde çıkık kutuplu senkron generatör, verim, Toplam Harmonik Bozulma (THD) ve akı yoğunlukları gibi kritik performans çıktılarının iyileştirilmesi adına dört farklı q değeri için analitik olarak tasarlanmış ve Ansys Maxwell yazılımı ile modellenerek elektromanyetik Sonlu Eleman Analizleri (SEA) gerçekleştirilmiştir. Kutup ve faz başına stator oluk sayısı (q) değeri tasarımın kritik parametrelerinden biri olup, farklı q değerlerinde başlangıç tasarımlarının elde edilmesi neticesinde generatörlerin rotor kutup ve stator oluk geometrileri değişken olarak tanımlanmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonu doğrultusunda, rotor ve stator geometrisi Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) yöntemiyle optimize edilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda, $q = 3$ olarak belirlenen senkron generatör için verimlilik artırılmış, tam yük altında hat gerilimi THD değeri %10,38'den %4,47'e düşürülmüş, toplam kayıplar %12,4 oranında azaltılmış ve vuruş torku %45,7 oranında iyileştirilmiştir. $q = 4$ olarak tasarlanan generatör veriminde yine verim artışı elde edilirken, THD değeri %10,85'den %3,89'a düşürülmüş, kayıplar %16 oranında azaltılmış ve vuruş torku %8,64 oranında iyileştirilmiştir. $q = 5$ olarak tasarlanan senkron generatörün ise optimizasyon sonrası THD değeri %8,69'dan %3,54'ye düşürülmüş, toplam kayıpları %12,98 oranında azaltılmış ve vuruş torku %41,8 oranında iyileştirilmiştir. Son olarak $q = 6$ olarak elde edilen tasarımda ise THD değeri %7,36'dan %3,26'ya düşürülmüş, toplam kayıplar %13,47 oranında azaltılmış ve vuruş torku %25,6 oranında iyileştirilmiştir. Farklı q değerleri için stator akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu, stator boyunduruk akı yoğunluğu ve oluk doluluk oranı gibi kritik tasarım parametreleri amaç fonksiyonu ile hedeflenen değerleri sağlayacak biçimde elde edilmiştir. Çalışma ile ayrıca, çıkık kutuplu senkron generatör tasarımında farklı q değerinde optimize edilen generatörlerin performansları karşılaştırılarak, q değerinin rotor ve stator değişkenlerine bağlı olarak optimal seçimi gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 93413
Anahtar Kelimeler : Senkron generatörler, geometrik optimizasyon, SEA, performans iyileştirme
Sayfa Adedi : 139
Danışman : Doç. Dr. Cemil OCAK

GEOMETRIC OPTIMIZATION- BASED PERFORMANCE IMPROVEMENT OF A SALIENT POLE SYNCHRONOUS GENERATOR

(M. Sc. Thesis)

Melda EYÜBOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In this study, a 600 kVA salient pole synchronous generator was analytically designed for four different q values, aiming to improve critical performance outputs such as efficiency, Total Harmonic Distortion (THD), and flux densities. Electromagnetic Finite Element Analyses (FEA) were carried out using Ansys Maxwell software. The number of stator slots per pole per phase (q) is one of the critical parameters of the design. As a result of obtaining initial designs at different q values, the rotor pole and stator slot geometries of the generators have been defined as variables. In line with the defined objective function, the rotor and stator geometries were optimized using the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) method, and their performances were compared. As a result of the optimization, for the synchronous generator with $q = 3$, the efficiency was increased, the line voltage THD under full load was reduced from 10.38% to 4.47%, total losses were decreased by 12.4%, and the cogging torque was improved by 45.7%. For the generator designed with $q = 4$, an increase in efficiency was again achieved, the THD value was reduced from 10.85% to 3.89%, total losses were decreased by 16%, and the cogging torque was improved by 8.64%. For the synchronous generator designed with $q = 5$, after optimization, the THD value was reduced from 8.69% to 3.54%, total losses were decreased by 12.98%, and cogging torque was improved by 41.8%. Finally, in the design obtained with $q = 6$, the THD value was reduced from 7.36% to 3.26%, total losses were decreased by 13.47%, and cogging torque was improved by 25.6%. For different q values, critical design parameters such as stator flux density, rotor pole flux density, stator yoke flux density, and slot fill factor were obtained in a way that meets the target values defined by the objective function. In this study, the performances of salient pole synchronous generators optimized at different q values were also compared, and the optimal selection of the q value was achieved based on rotor and stator variables.

Science Code : 93413

Key Words : Synchronous generators, geometric optimization, FEA, performance improvement

Page Number : 139

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cemil OCAK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana rehberlik eden, akademik bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, her aşamada destek ve anlayışını esirgemeyen, sabrıyla yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Cemil OCAK'a ve yardımlarından dolayı Sayın Dr. Burak YENİPİNAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu yoğun ve zorlu süreçte yanımda olan, sevgisiyle güç veren, anlayışı ve sabrıyla en karanlık anlarımı aydınlatan canım eşim Ali Şükrü EYÜBOĞLU'na ve gözlerindeki gülümseme ile tüm yorgunluğumu unutturan, varlığıyla bana her gün ilham olan canım oğlum Barlas EYÜBOĞLU'na, hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgileri ve dualarıyla beni destekleyen, başarımın en kıymetli ortakları olan canım annem ve canım babama tüm kalbimle teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi ile yapılan protokol çerçevesinde yüksek lisans eğitimime başlamama vesile olan, sürecin her aşamasında desteklerini esirgemeyen ve sağladıkları imkanlarla bu akademik yolculuğu mümkün kılan değerli yöneticilerime ve EÜAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ ÜRETİMİNDE GENERATÖRLER.....	11
2.1. Generatörlerin Tarihi.....	11
2.2. Senkron Generatörlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	12
2.3. Senkron Generatörler	12
2.3.1. Senkron generatörün yapısı	14
2.3.2. Stator ve stator sargı yapısı.....	15
2.3.3. Rotor, rotor mili ve kutuplar	18
2.3.4. Kutup nüvesi ve ayakları	19
2.3.5. Kutup sargıları	20
2.3.6. Amortisör sargısı	20
2.4. Senkron Generatörlerin Çalışma Prensibi.....	21
2.5. Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim	21
2.6. Bir Generatörün Endüvi Reaksiyonu ve Eşdeğer Devresi	22
2.7. Senkron Generatörlerin Fazör Diyagramları.....	27
3. SENKRON GENERATÖRÜN BOYUTLANDIRILMASI.....	29
3.1. Kısa Devre Oranı (SCR)	29

	Sayfa
3.2. Geçici Zaman Kararlılığına SCR ve x_d 'nin Etkisi.....	30
3.3. Uyartım Sistemleri ve Tavan Gerilimleri.....	31
3.4. Negatif Faz Sırası Gerilimi ve Akımları	32
3.5. Senkron Generatörde Harmonik Dağıtım	32
3.6. Senkron Generatörün Temel Stator Geometrisinin Belirlenmesi	32
3.7. Stator Oluk Sayısı	34
3.8. Stator Nüve Tasarımı	37
3.9. Stator Paket Uzunluğu.....	39
3.10. Çıkık Kutuplu Rotor Tasarımı	40
3.11. İndüktanslar ve Dirençler	42
3.12. Damper Sargı Parametreleri	43
3.13. Hidrogeneratör Geçici Zaman Parametreleri ve Zaman Sabitleri	44
3.14. Elektromanyetik Alan Zaman Harmonikleri	45
3.15. Oluk Kaynaklı Zaman Harmonikleri	46
3.16. Kayıplar ve Verim	47
4. SENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	49
4.1. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Analitik Tasarımı	50
4.2. Tasarlanan Çıkık Kutuplu Senkron Generatör ve Temel Özellikleri.....	55
5. SENKRON GENERATÖRDE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON	59
5.1. Stator ve Rotor Geometrik Optimizasyonu.....	64
6. ANALİZLER VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI.....	71
6.1. Rotor ve Stator Değişkenleri ile Birlikte Farklı q Değerlerindeki Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Optimizasyon Sonuçları	72
6.2. $q=3$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması	76
6.3. $q=4$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması	87

	Sayfa
6.4. $q=5$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması.....	99
6.5. $q=6$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması.....	110
6.6. Farklı q Değerlerindeki Çıkık Kutuplu Senkron Generatörlerin Performans Değerlendirmesi	121
6.7. Farklı q Değerlerinde Elde Edilen Tam Yük Altındaki Gerilimlerin THD Karşılaştırması.....	125
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ.....	139

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelik çalışmaların karşılaştırılması.....	9
Çizelge 4.1. $q=3$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri	55
Çizelge 4.2. $q=4$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri	56
Çizelge 4.3. $q=5$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri	57
Çizelge 4.4. $q=6$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri	58
Çizelge 5.1. Optimizasyon sürecinde kullanılan geometrik tasarım değişkenleri ve sınır değerleri	66
Çizelge 5.2. Belirlenen amaç fonksiyonuna ait sınır değerleri ve ağırlık katsayıları çizelgesi.....	69
Çizelge 6.1. Farklı q değerlerindeki başlangıç ve optimum parametre değerleri	75
Çizelge 6.2. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması.....	77
Çizelge 6.3. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması.....	88
Çizelge 6.4. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması.....	100
Çizelge 6.5. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması.....	111
Çizelge 6.6. Farklı q değerlerindeki başlangıç ve optimum sonuç değerleri.....	121

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Endüvi reaksiyonunun modellenmesi.	23
Şekil 2.2. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi	24
Şekil 2.3. Senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi	26
Şekil 2.4. Üç fazlı bir senkron generatörün tam eşdeğer devresi	27
Şekil 2.5. Omik bir yükü besleyen senkron generatörün fazör diyagramı	27
Şekil 2.6. Senkron generatörün geri güç faktöründe fazör diyagramı	28
Şekil 2.7. Senkron generatörün ileri güç faktöründe fazör diyagramı.....	28
Şekil 4.1. Proje yönetici arayüzü	51
Şekil 4.2. Makine özellik penceresi.....	52
Şekil 4.3. Stator özellik penceresi	52
Şekil 4.4. Oluk özellikleri penceresi.....	53
Şekil 4.5. Sarım özellikleri penceresi	53
Şekil 4.6. Rotor özellik penceresi	54
Şekil 4.7. Yüksüz çalışma performans verileri.....	55
Şekil 5.1. Optimizasyon akış şeması	65
Şekil 5.2. Senkron generatörün geometrik bileşenleri a) Stator ve rotor geometrisi b) Stator oluk detayı	67
Şekil 6.1. Farklı kutup ve faz başına oluk sayılarındaki sargı dağılımı, (a) $q=3$, (b) $q=4$	73
Şekil 6.2. İterasyon sonuçları	77
Şekil 6.3. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri	78
Şekil 6.4. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte	80
Şekil 6.5. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuru torkunun karşılaştırılması.....	81
Şekil 6.6. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a)yüksüz durumda (b) tam yükte	82

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması(a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	82
Şekil 6.8. Yüksüz durumda başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	83
Şekil 6.9. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	84
Şekil 6.10. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	84
Şekil 6.11. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	85
Şekil 6.12. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım.....	86
Şekil 6.13. İterasyon sonuçları	87
Şekil 6.14. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri	88
Şekil 6.15. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	91
Şekil 6.16. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	92
Şekil 6.17. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruş torkunun karşılaştırılması	93
Şekil 6.18. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	94
Şekil 6.19. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	94
Şekil 6.20. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a)yüksüz durumda (b) tam yükte.....	95
Şekil 6.21. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	96
Şekil 6.22. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	97
Şekil 6.23. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım.....	98
Şekil 6.24. İterasyon sonuçları	99

Şekil	Sayfa
Şekil 6.25. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri	101
Şekil 6.26. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	103
Şekil 6.27. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruş torkunun karşılaştırılması	103
Şekil 6.28. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	104
Şekil 6.29. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	105
Şekil 6.30. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	105
Şekil 6.31. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	106
Şekil 6.32. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	107
Şekil 6.33. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	108
Şekil 6.34. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım.....	109
Şekil 6.35. İterasyon sonuçları	110
Şekil 6.36. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri	112
Şekil 6.37. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	114
Şekil 6.38. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruş torkunun karşılaştırılması	114
Şekil 6.39. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	115
Şekil 6.40. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	116
Şekil 6.41. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	116

Şekil	Sayfa
Şekil 6.42. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	117
Şekil 6.43. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte.....	118
Şekil 6.44. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	119
Şekil 6.45. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım.....	120
Şekil 6.46. Her bir q değerinin başlangıç ve optimum tasarımlara ait verim değerlerinin karşılaştırılması.....	123
Şekil 6.47. Her bir q değerinin başlangıç ve optimum tasarımlara ait THD değerlerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 6.48. Her bir q değerinin optimum tasarımlara ait tam yük çıkış gerilim değerlerinin karşılaştırılması.....	125
Şekil 6.49. $q=3$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	126
Şekil 6.50. $q=4$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	126
Şekil 6.51. $q=5$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	126
Şekil 6.52. $q=6$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım	127

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Bir hidroelektrik santraldeki senkron generatör	13
Resim 2.2. Çıkık kutuplu senkron generatöre ait stator yapısı	16
Resim 2.3. Çıkık kutuplu senkron generatörün stator yapısı	17
Resim 2.4. Çıkık kutuplu senkron generatöre ait rotor örneği.....	18
Resim 2.5. Rotor kutupları ve ikaz baraları	19



1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, iş yapabilme kapasitesini belirleyen ve aynı zamanda toplumların yaşam tarzlarını şekillendiren temel bir enerji türüdür. Elektrik enerjisi doğrudan depolanamasa da uzun mesafelere kolaylıkla iletilebilmesi ve talebe göre kontrol edilebilmesi onu diğer enerji türlerinden ayıran önemli bir özelliktir. Günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılan elektrik enerjisi, yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve buna bağlı olarak enerji talebi hızla artmıştır [1]. Artan enerji talebini karşılamak için enerji üretim kapasitesinin de aynı oranda artırılması gerekmektedir [2]. Ancak enerji üretiminin artışı, çevre kirliliği ve sera gazı emisyonlarında da önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla, dünya genelinde birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının öne çıkan avantajları arasında; karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevreyi korumaları, yerli kaynaklar olmaları nedeniyle dışa bağımlılığı azaltmaları ve istihdamı artırmaları sayılabilir. Başka bir ifadeyle, yenilenebilir enerji kaynakları ulaşılabilirlik, süreklilik ve çevresel kabul edilebilirlik gibi temel kriterleri bir arada sunmaktadır [4]. Türkiye, sahip olduğu enerji potansiyeline rağmen toplam enerji ihtiyacının önemli bir kısmı ithalat yoluyla karşılayan ve bu yönüyle enerjide yüksek oranda dışa bağımlı bir ülkedir. Türkiye'deki birincil enerji kaynaklarının hem sınırlı olması hem de çevresel sorunlara yol açması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz hale getirmektedir [5]. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, özellikle yüksek hidroelektrik potansiyeli ile öne çıkmakta ve bu durum hidroelektrik enerjiyi stratejik bir kaynak haline getirmektedir [6]. Üretilen enerjinin büyük bir kısmı, yaygın kullanım alanları nedeniyle öncelikli olarak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik enerjisine olan talep, dünya nüfusundaki hızlı artışa paralel olarak yükselmektedir. Kişi başına düşen elektrik tüketimi bir ülkenin gelişmişlik düzeyini gösteren önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bu gelişmeler, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını her zamankinden daha önemli hale getirmektedir [7]. Elektrik makineleri arasında yer alan senkron generatörler, elektrik enerjisi üretiminde kritik bir rol oynayan temel bileşenlerdendir. Senkron generatörler, kullanım alanlarına ve bağlı oldukları santral tiplerine göre farklı yapı ve özelliklerde tasarlanmaktadır. Düşük devirli çalışma karakteristikleri nedeniyle genellikle hidroelektrik santrallerde tercih edilen çıkık kutuplu senkron generatörler, genellikle 4 veya daha fazla kutuplu olarak tasarlanmaktadır [8]. Artan

enerji ihtiyacı, elektrikli makinelerin tasarımına yönelik ilgiyi artırmakta; aynı zamanda enerji kaynaklarının bilinen rezervlerinin tükenmesi ve birim enerji maliyetlerindeki artış, daha yüksek performanslı senkron generatörlerin geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmektedir [9]. Enerji verimliliğinin artırılması ve kaliteli elektrik üretiminin sağlanması açısından senkron generatörlerin tasarımsal optimizasyonu büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, düşük verimliliğe sahip ve ekonomik ömrünü tamamlamış santral generatörlerinin, modern ve yüksek verimli tasarımlarla yenilenmesi giderek yaygınlaşmaktadır. Uygulanan optimizasyon teknikleri ile senkron generatör tasarımlarında geometrik parametrelerin iyileştirilmesi, verimliliğin artırılması, kompakt yapı elde edilmesi ve birim hacimde kullanılan aktif malzeme miktarının azaltılması gibi önemli çıktılar elde edilebilmektedir [10]. Ayrıca, santrallerde üretilen gerilim sinyallerindeki harmoniklerin minimize edilerek IEEE 519-2014 standardına uygun sinüzoidal forma dönüştürülmesi için generatör tasarımında çeşitli optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [11].

Literatürde, senkron makinelerin verimlilik ve performanslarını iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalar, genellikle generatör tasarımındaki parametrelerin optimizasyonu, manyetik akı dağılımı, enerji kayıplarının azaltılması ve yüksek verimlilik elde edilmesi gibi alanlara odaklanmaktadır. Ayrıca, senkron makinelerde kullanılan malzemelerin seçimi, sargı yapılandırmaları ve rotor tasarımı gibi faktörlerin performans üzerindeki etkileri de bu çalışmalarda ele alınmaktadır. Bu tür iyileştirmeler, generatörlerin daha verimli, dayanıklı ve ekonomik bir şekilde çalışmasını sağlarken, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, çıkık kutuplu senkron generatörlerin rotor ve stator geometrik optimizasyonuna dayalı çalışmalarda farklı optimizasyon algoritmalarının ve amaç fonksiyonlarının kullanıldığı görülmektedir.

Çıkık kutuplu senkron generatörlerin ön tasarım sürecine yönelik olarak sistematik ve uygulanabilir bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yaklaşım, analitik hesaplamalara dayalı olup, gerekli durumlarda SEA ile desteklenmektedir. Tasarım süreci; rotor ve stator boyutlandırması, sargı tasarımı, yük altındaki performans analizi, verimlilik hesaplamaları ve harmonik analiz gibi adımları kapsamlı bir şekilde içermektedir. Ayrıca, önerilen

yöntemin geçerliliği, örnek bir tasarım üzerinden yapılan SEA ile test edilmiş ve elde edilen sonuçların yüksek doğrulukta olduğu gösterilmiştir [2].

Çıkık kutuplu senkron makinelerin tasarımında geometrik parametrizasyon ve kısıtlı optimizasyon teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada, hava aralığındaki manyetik alan dağılımını optimize etmek amacıyla geometrik şekil optimizasyonu ele alınmıştır. Alan hesaplamaları ve duyarlılık analizleri, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, artırılmış Lagrange çarpanı yöntemi gibi sıralı kısıtsız optimizasyon teknikleri tartışılmış ve mühendislik tasarımında kısıtların önemi vurgulanmıştır. Yapısal haritalama yöntemi kullanılarak geometrik parametrizasyon gerçekleştirilmiş ve bu yöntem kısıtlı optimizasyonu içerecek şekilde genişletilmiştir [8].

Yüzey yerleştirmeli bir Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörün (KMSG) tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma kapsamında Gray Wolf Optimization Algorithm (GWO) ile Parçacık Sürüsü Optimization Algorithm (PSO) yöntemleri kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde yedi bağımsız geometrik tasarım değişkeni seçilerek motor performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Başlangıç tasarımında %92,05 olan motor verimi GWO ile gerçekleştirilen optimizasyon sonrasında %94,20'ye, PSO ile gerçekleştirilen optimizasyon sonrasında %94,16'ya yükseldiği görülmüştür. Motor tasarım çıktıları incelendiğinde motorun toplam ağırlığı ile mıknatıs ağırlığının birbirine yakın olduğu, fazla maliyet farkının olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda yüzey yerleştirmeli KMSG'ler için GWO algoritmasının PSO'ya göre daha iyi performans verdiği görülmüştür [12].

Çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyonu üzerinde inceleme yapılmıştır. Çalışma kapsamında 12 bağımsız değişken belirlenip motor performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu değişkenler optimizasyon süreci sırasında uygulanabilecek min-max kısıtlamalar, doğrusal olmayan kısıtlamalar, doğrusal kısıtlamalar şeklinde 3 farklı kısıtlama yöntemine uyarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu ardışık doğrusallaştırmalarına, doğrusal olmayan kısıtlamalara ve ardından bir simpleks algoritmasına dayandırılmıştır. Çalışma sonucunda Amaç fonksiyonu %8 oranında iyileştiği görülmüştür [13].

Çıkık kutuplu senkron hidrogeneratörlerin dinamik ve geçici zaman analiz koşullarında ardışık karma değişken nonlinear programlama metodu kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan hidrogeneratör modelinde generatöre ait kısa devre oranı (SCR), kutup yay merkezi uzaklıkları, rotor kutup gövde yüksekliği, gövde genişliği, kutup ayak genişliği, kutup ayak yüksekliği, iç çap değerleri değişken olarak seçilip motor performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Motor tasarım çıktıları incelendiğinde en ideal güç faktörü açısı $0,49 < SCR < 0,5$ değeri arasında elde edildiği görülürken, $0,49 < SCR < 0,53$ değeri arasında ise çıkış gücü $500 < kW < 600$ değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Hidrogeneratörün toplam ağırlığı en aza indirildiğinde stator ve rotor bakır kayıplarında azalmalar görülmüştür. Yapılan iyileştirmeler sonucuna 1223 kg olan makine toplam ağırlığının 934 kg'a düştüğü görülmüştür. Çalışma sonucunda ideal bir hidrogeneratör tasarımının ardışık karma değişken nonlinear programlama ile oluşturulabildiği gözlemlenmiştir [14].

Çıkık kutuplu senkron generatörlerde kademeli hava aralığı uygulamasının THD ve hava aralığı akı yoğunluğu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mevcut bir ürün üzerinde bu özelliğin uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve özellikle kaykısız makinelerde THD'yi azaltma potansiyeli incelenmiştir. Artan eşdeğer hava aralığı nedeniyle uyarma akımında meydana gelen artış da dikkate alınarak, 2 boyutlu SEA ile bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, rotor uyarım akımında küçük bir artış karşılığında THD'nin anlamlı ölçüde azaltılabildiğini ve kademeli rotor kutup yapısının önemli performans iyileştirmeleri sağlayabileceğini göstermektedir [15].

Çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılarak senkron relüktans motor optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma kapsamında 4 kW gücündeki senkron relüktans motorun rotor parametreleri değişken olarak belirlenip motorun gücü, verimi, tork ve tork dalgalanmasında iyileştirilmeler çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonları birbirinden farklı bariyer sayılarına göre iyileştirme yapılarak optimizasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda sınır değerleri tork ≥ 34 , tork dalgalanması 0, verim 1 olarak belirlenen amaç fonksiyonunda çıkış gücünde % 0,31 artış, tork dalgalanmasında %31,71 azalma görüldüğü ve bariyer sayısındaki artışın motor performansını artırdığı gözlemlenmiştir [16].

Genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak senkron makine tasarımı ve uygunluk parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında beş adet parametre değişken olarak belirlenip stator için kullanılacak olan bakır ağırlığı ve nüve hacmi küçültülüp, motor kayıpları başlangıç değerlerine göre önemli ölçüde minimize edilmiştir. Çalışma sonucunda çıkış gücü sabit kalarak motor verimi maksimum yapıp motordaki kayıplar minimuma indirilerek güç/ağırlık oranı arttırılmıştır [17].

Analitik yöntem ve evrimsel optimizasyon algoritmaları kullanarak eksenel akılı kalıcı mıknatıs senkron makine tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada sekiz adet parametre değişken olarak belirlenip maksimum hacim tork yoğunluğunu ve ağırlık tork yoğunluğunu, Newton-metre başına minimum sabit mıknatıs hacmini ve ağırlığını ve Newton-metre başına minimum makine fiyatını belirlemek için beş farklı amaç fonksiyonu optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda amaç fonksiyonlarının analitik olarak değerlendirildiği evrimsel optimizasyon SEA ile karşılaştırıldığında tasarım optimizasyonu için gereken hesaplama süresinin önemli ölçüde kısaldığı gözlemlenmiştir [18].

Senkron motorlarda kalıcı mıknatıs düzenlemesinin optimal tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada stator ve rotor üzerindeki parametreler tasarım değişkenleri olarak belirlenip tork ve senkron generatörün maliyeti amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Manyetik kutupların genel bir modeli sunularak hem tek amaçlı hem de çok amaçlı optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda parçacık sürüsü kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda statorun yapısı geçici olarak optimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Optimizasyon süreci tamamlandığında pareto optimal çözüm kümesinden nihai bir optimum çözüm seçilmiştir [19].

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların (SMSM) yapısal avantajlarının yanı sıra karakteristik bir sorun olan vuruş torku ele alınmıştır. Bu bağlamda, Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Motor (RASM) üzerinde, vuruş torkunu azaltmaya yönelik olarak stator ve rotor tarafında gerçekleştirilebilecek yapısal iyileştirmeler araştırılmıştır. Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak yapılan 2 boyutlu SEA sonucunda; stator tarafında oluk açıklığının daraltılması ile vuruş torku %36,84, rotor tarafında mıknatıs kalınlığının azaltılması ile ise %42,1 oranında azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte, yapılan iyileştirmelerin ortalama tork üzerinde kısmi bir düşüşe neden olduğu da tespit edilmiştir [20].

Senkron generatörlerin uluslararası standartlara uygun şekilde Alternatif Akım (AA) üretebilmesi amacıyla, stator ve rotorun mekanik yapılarının tasarım aşamasında doğru şekilde belirlenmesinin önemi vurgulanmıştır. Stator oluk yapısı, yerleşimi ve sargı adımı gibi tasarım parametrelerinin yanı sıra rotor kesit geometrisinin de üretilen gerilimin temel ve harmonik bileşenlerini doğrudan etkilediği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, tasarım sürecini hızlandırmak ve üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla elektromanyetik analiz yazılımlarının etkin şekilde kullanılması gerekliliği ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında, hava araçlarının yer besleme sistemlerinde kullanılan 400 Hz frekanslı ve 5 kVA anma gücüne sahip bir senkron generatörün statoru, iki farklı oluk yapısıyla tasarlanarak Ansys-Maxwell/RMxpert yazılımı aracılığıyla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, stator oluk yapısında yapılan mekanik düzenlemelerin, çıkış filtresi gereksinimlerini azaltabilecek düzeyde etkili olduğu gösterilmiştir [21].

4 baralı bir güç sisteminde senkron generatörlerin 2., 3. ve 6. derece dinamik modelleri kullanılarak geçici kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. PSAT yazılımı ile yapılan benzetimlerde, generatör baralarının gerilim değişimleri, generatörlerin açısal hız ve aktif güç değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, daha yüksek derece modellerin sistemin kısa sürede kararlı hale gelmesini sağladığını ve osilasyonları azalttığını göstermektedir [22].

Üç fazlı bir senkron generatörün tasarımı ve karakteristik parametrelerinin analizi, Ansys-Maxwell-RMxpert yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEA tabanlı bu analizde, verimlilik, indüklenen gerilim, faz akımları ve çıkış momenti gibi parametreler, elektriksel açı değişimine bağlı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, generatör tasarımında parametrelerin doğru seçiminin performans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır [23].

Çıkık kutuplu senkron generatörlerde gerilim dalga formunun iyileştirilmesi amacıyla oluk kaydırma ve sönümleyici sargı adımı yöntemlerinin birleşik uygulanması incelenmiştir. Bu yöntemlerin kombinasyonu, üretim kolaylığı sağlarken, sönümleyici kayıpları ve rotor sıcaklığını azaltmada etkili olduğu vurgulanmıştır [24].

Turbogeneratörlerde uyartım alanı harmoniklerini azaltmak amacıyla, Newton-Raphson algoritması kullanılarak rotor oluk pozisyonları ve iletken sayıları optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, THD, malzeme tüketimi ve toplam kayıplar azalmış; güç kalitesi ve güç faktörü iyileşmiş; verimlilikte ise hafif bir artış gözlemlenmiştir [25].

İçten Mıknatıslı Senkron Motorların (IMSM) performansını artırmaya yönelik olarak, Taguchi yöntemi ile PSO algoritmasının birleştirildiği hibrit bir çok amaçlı optimizasyon stratejisi önerilmiştir. 8 kutuplu ve 48 oluklu bir IMSM üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, kalıcı mıknatısın genişliği ve kalınlığı ile rotor köprü yapıları tasarım parametreleri olarak ele alınırken; tork dalgalanması ve nüve kaybı optimizasyon hedefleri olarak belirlenmiştir. Ortogonal deney tasarımı ile uygun parametre kombinasyonları belirlenmiş ve bu kombinasyonlar PSO algoritması aracılığıyla daha ileri düzeyde optimize edilmiştir. SEA ile doğrulanmış sonuçlar, önerilen yöntemin tork dalgalanmasını ve nüve kaybını azaltırken, aynı zamanda çıkış torkunu da artırabildiğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, IMSM tasarımında performans iyileştirmesi için etkin bir yöntem sunmaktadır [26].

Senkron generatörlerin rotor tasarımı THD değerini en aza indirilecek ve manyetik akı yoğunluğu belirlenen sınırlar içinde tutulacak şekilde optimize edilmiştir. Tasarım sürecinde, oluk aralığı, merkez oluk aralığı ve amortisör genişliği gibi parametreler göz önünde bulundurulmuş; Ansys-Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda elde edilen verilerle regresyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, çekirge optimizasyon algoritması ile optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen optimizasyon yaklaşımının THD değerini azaltmada ve manyetik akı yoğunluğunu kontrol altında tutmada başarılı olduğunu ortaya koymaktadır [27].

Bir 2 MVA senkron makinesinin tasarımını iyileştirmek amacıyla PSO algoritması ele alınmıştır. Senkron makinelerin verimliliğini artırmak ve performansını iyileştirmek için tasarım parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışmada, PSO algoritması kullanılarak stator ve rotor parametrelerinin, özellikle manyetik akı yoğunluğu, tork çıkışı, verimlilik ve kayıplar gibi faktörlerin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon süreci, başlangıçta belirlenen tasarım parametrelerinin iteratif bir şekilde iyileştirilmesiyle gerçekleştirilir [28].

6 MW'lık bir doğrudan tahrik edilen Kalıcı Mıknatıs Senkron Generatörü (KMSG) için çok amaçlı tasarım optimizasyonunu ele almaktadır. İlk aşamada, iyileştirilmiş Serçe Arama Algoritması (ISSA) tabanlı bir yanıt yüzeyi modeli kullanılarak vuru torku ve generatör verimliliği optimize edilmiştir. İkinci aşamada ise çok amaçlı optimizasyon modeli, bu iki parametre arasındaki dengeyi sağlamayı hedeflemiştir. Sonuçlar, ISSA modelinin geleneksel modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ve önerilen çok amaçlı optimizasyon

modelinin vuru torkunu %16,67 oranında azaltırken verimde iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir [29].

Rüzgar türbinleri için KMSG tasarımını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen metodoloji, mıknatıs taban yarıçapı ve uzunluğu gibi geometrik sınırlamaları belirleyerek, nominal türbin parametreleri altında maksimum verimlilik elde etmeye odaklanmaktadır. İki temel modelden oluşan bu yöntem, mıknatıs taban yarıçapından generatör parametrelerini hesaplayan bir model ve maksimum verimlilik ile minimum ağırlık kriterlerine göre iki optimum generatör tasarımı belirleyen bir optimizasyon modelini içermektedir. Optimizasyon sürecinde altın oran yöntemi kullanılmıştır. 10 kW'lık bir KMSG prototipi üzerinde doğrulanan model, referans generatöre kıyasla maksimum verimlilik için %1,15, minimum ağırlık için %0,81 verimlilik artışı ve sırasıyla %30,79 ve %39,15 ağırlık azalışı sağlamıştır. Bu sonuçlar, rüzgar türbini tasarım parametrelerine bağlı olarak optimum generatör boyutlandırmasının seçilmesine olanak tanımaktadır [30].

Küçük Rüzgar Türbinlerinin (KRT) kurulumu için ekonomik bir teknoloji geliştirilmiştir. Düşük maliyetli KRT'ler sunarak rüzgar enerjisi pazarına katkı sağlanması hedeflenmiştir. Doğrudan tahrikli KMSG kullanılarak basit bir rüzgar türbini yapısı tasarlanmış ve bu generatörler, dişli kutusunun gerekliliğini ortadan kaldırarak bakım maliyetlerini azaltmaktadır. Ancak, kalıcı mıknatısların yüksek maliyeti en büyük zorluk olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, generatör tasarımının optimizasyonunu ve aktif malzeme maliyetlerinin düşürülmesini amaçlayan bir yaklaşım sunmaktadır. Analitik modeller kullanılarak yapılan çok disiplinli analizler ile generatör için uygulanabilir bir tasarım elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen tasarımın %16 maliyet azaltımı sağladığını göstermektedir [31].

Yapısal optimizasyon tekniklerine alternatif olarak jeneratif tasarım kullanımı, yeni üretim yöntemlerine yönelik önemli fırsatlar sunmaktadır. Jeneratif tasarım teknikleri, 3 MW'lık açık deniz rüzgar türbini elektrik generatör yapısının sertlik ve ağırlığını optimize etmek amacıyla geniş bir kontrol değişkenleri ve başlangıç modelleri setiyle otomatikleştirilmiş iteratif bir süreç olarak kullanılmıştır. Jeneratif tasarımın yapısal optimizasyon sürecine entegre edilmesiyle yapısal kütlede %4'lük bir azalma sağlanmış, ayrıca yapısal geometri üzerinde yapılan değişiklikler, makinelerin operasyonel aralığını genişletmiş ve buna bağlı olarak enerji toplama kapasitesinde artış sağlanmıştır [32].

Çizelge 1.1. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelik çalışmaların karşılaştırılması

Kaynak	Makina Tipi	Optimizasyon Yöntemi	Amaç Fonksiyonları	Optimize Edilen Parametreler	Doğrulama
[33]	Sabit mıknatıslı senkron motor	Derin öğrenme (MLP)	Ortalama moment, moment salınımı, THD, verim	Mıknatıslar arası açı ve akı bariyeri genişliği	SEA
[34]	Çıkık kutuplu relüktans tipi manyetik dişli	Yapay sinir ağı (ANN), NSGA-II	Ortalama moment, moment salınımı, ağırlık	İç çap, kutup uzunluğu ve açısı, dış açısı	SEA
[35]	Çıkık kutuplu senkron generatör	Yarasa algoritması (BAT)	Verim, stator akı yoğunlukları	Stator oluk genişliği ve yüksekliği	SEA
[36]	Paralel manyetik devreli hibrit uyarımlı senkron generatör	Genetik Algoritma (GA)	Yüksüz THD ve indüklenen maksimum gerilim	Kutup genişliği ve yay açısı	SEA ve Test
[37]	Çıkık kutuplu hibrit uyarımlı senkron generatör	Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)	İndüklenen gerilim, vuruğu momenti, hava aralığı akı yoğunluğu	Mıknatıs açısı ve kalınlığı, kutup genişliği ve yüksekliği	SEA ve Test
Bu çalışma	Çıkık kutuplu senkron generatör	Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)	Verim, THD, akı yoğunlukları, oluk doluluk oranı	Stator dış ve oluk ağız genişliği, oluk yüksekliği, kutup yay ofseti, kutup gövde yüksekliği, kutup ayak yüksekliği, kutup ayak genişliği	SEA

Son yıllarda senkron makine tasarımı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına olan ilgi artmış ve özellikle hibrit uyarımlı yapılar, metamodel destekli analizler ve gelişmiş evrimsel algoritmalar öne çıkmıştır. Çizelge 1.1 incelendiğinde, literatürde yer alan [33] numaralı çalışmada, elektrikli araçlar için geliştirilen KMSM tasarımı, derin öğrenme destekli bir metamodel aracılığıyla optimize edilmiştir.

İse relüktans tipi manyetik dişli generatör için Bayes optimizasyonu ile desteklenmiş yapay sinir ağı modeli kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da SEA analiz süresi önemli ölçüde kısaltılırken moment salınımı, verim ve moment yoğunluğu gibi hedeflere odaklanılmıştır [34].

İse Yarasa algoritması kullanılarak verim ve stator akı yoğunlukları iyileştirilmiştir. Diğer taraftan, [35] ve [37] numaralı çalışmalarda farklı hibrit uyarımlı senkron generatör yapıları ele alınmış; genetik algoritma kullanılarak rotor geometrisini oluşturan sınırlı parametreler optimize edilmiştir. İlgili çalışmalarda optimizasyon probleminde değişken olarak tanımlanan parametreler sınırlı düzeyde kalmakla birlikte, bu çalışmada verildiği üzere

verim, THD, akı yoğunlukları ve oluk doluluk oranı gibi bütüncül bir amaç fonksiyonunun kullanılmayarak optimizasyon problemi kısıtlı düzeyde tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise hem rotor hem de stator parametrelerini kapsayan çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle, önerilen yöntem literatürdeki mevcut hibrit ve veri destekli çalışmalara kıyasla geleneksel yapılarda yüksek performans elde etmeyi hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır [35].

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, dört farklı (q) değerine sahip çıkık kutuplu senkron generatör için elektromanyetik modelleme gerçekleştirilmiş ve buna bağlı olarak eşdeğer devre temelli analitik tasarımlar oluşturulmuştur. Senkron generatörlerde tercih edilen malzeme tipi, generatörün performansı ve maliyet etkinliği üzerinde doğrudan etkili olduğundan, malzeme seçimi; manyetik geçirgenlik, mekanik dayanım ve ısı iletkenlik gibi çok boyutlu kriterler dikkate alınarak yapılmıştır. Dört ayrı q değerlerine ait başlangıç tasarımları ANSYS Maxwell/Rmxprt ortamında modellenmiş ve detaylı elektromanyetik analizlerle performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Tasarım sürecinde belirleyici olan rotor ve stator geometrisine ilişkin parametreler, ÇAGA yöntemi kullanılarak optimize edilmiş; bu süreçte amaç fonksiyonu kapsamında verimlilik değerinin yükseltilmesi, THD oranının azaltılması ve elektromanyetik parametrelerin (stator akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu, boyunduruk akı yoğunluğu) belirlenen limitler altında tutulması amaçlanmıştır. Böylece, elektromanyetik performansın bütüncül bir yaklaşımla iyileştirildiği optimize edilmiş tasarım sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, farklı q değerlerinin tasarım üzerindeki etkileri analiz edilerek, her bir q değeri için elde edilen verimlilik, akı yoğunluğu dağılımı ve harmonik bozunum parametreleri karşılaştırılmış; bu sayede q parametresinin senkron generatör performansı üzerindeki rolü kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur. Özet olarak bu tez çalışması ile ; geometrik parametrelerin çok amaçlı optimizasyonu ile verimlilik, vuru torku ve harmonik bozunum gibi farklı performans ölçütlerinin eş zamanlı iyileştirilmesi sağlanmış, rotor ve stator geometrisine ait kritik değişkenlerin birlikte optimize edildiği parametrik bir arama uzayı tanımlanmış ve bu yapı, Pareto optimal çözümler temelinde analiz edilmiş ve optimizasyon çıktıları SEA ile doğrulanarak tasarım süreci bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

2. ENERJİ ÜRETİMİNDE GENERATÖRLER

Enerji, tarih boyunca insanlığın temel ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir rol oynamış, günümüzde ise yaşamın sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir. Artan dünya nüfusu, hızla gelişen sanayileşme, sosyoekonomik büyüme ve dijital teknolojilerin yaşamın her alanında yer bulması, elektrik enerjisine olan talebi önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda, enerji üretiminde kesintisizlik, kalite, güvenilirlik ve ekonomik verimlilik sağlanırken, çevresel etkilerin de minimum düzeyde tutulması hedeflenmelidir. Elektrik enerjisi üretiminde çeşitli mekanik kuvvetler kullanılmaktadır. Hidroelektrik santrallerde suyun potansiyel enerjisi, termik santrallerde kömür yakımı sonucu elde edilen buhar enerjisi, rüzgar santrallerinde rüzgarın kinetik enerjisi ve nükleer santrallerde çekirdek bölünmesiyle açığa çıkan enerjiyle elde edilen buhar gücü, elektrik üretiminde başlıca kaynaklar arasında yer almaktadır. Bu mekanik enerjiler, generatörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [38].

2.1. Generatörlerin Tarihi

Elektrik enerjisi üretiminin temelleri, 1831 yılında Michael Faraday'ın "Faraday disk" olarak adlandırılan ve elektrik üretebilen ilk generatör tasarımını geliştirmesiyle atılmıştır. Ancak bu yenilik, dönemin teknolojik altyapısı nedeniyle kısa vadede yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır. 1850'li yıllara gelindiğinde ise seri üretimi gerçekleştirilen dinamolar, özellikle aydınlatma alanında kullanım imkânı bularak elektrik enerjisinin günlük yaşamdaki önemini artırmaya başlamıştır. 1880 yılında Thomas Edison ve Joseph Swan'ın elektrikli ampulü icat etmeleriyle birlikte, elektrik enerjisine ve generatörlere olan talep belirgin biçimde artmıştır. Bu gelişmelerin ardından Edison, 1882 yılında New York, Londra ve Milano gibi büyük şehirlerde DA temelli enerji üretimi sağlayan santraller kurarak elektrik enerjisinin kent ölçeğinde kullanımını başlatmıştır. Ancak sistemlerin sınırlı mesafe iletimine olan elverişsizliği, AA sistemlerine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. 1890'lı yılların başında Nikola Tesla'nın transformatör ve generatör teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte AA akımın iletimdeki üstünlüklerini göstermesi, elektriksel güç naklinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu sürecin sonucunda, 1895 yılında Niagara Şelalesi'nde kurulan hidroelektrik santral, alternatif akım generatörü kullanılarak büyük ölçekli elektrik üretimi ve iletimi gerçekleştiren ilk tesis olarak tarihe geçmiştir [39].

2.2. Senkron Generatörlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Generatörler, genel olarak sabit bölüm olan stator ve döner kısım olan rotor olarak adlandırılmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu iki ana bileşen, elektrik enerjisinin üretimi ve iletimi açısından hayati öneme sahiptir. Stator, alternatif gerilimin üretildiği ve elektromanyetik etkileşimin gerçekleştiği sabit yapıyı temsil eder. Temel olarak stator gövdesi, stator nüvesi ve stator sargılarından oluşmaktadır. Stator nüvesi, manyetik kayıpların minimum seviyede tutulması amacıyla yüksek permeabiliteye sahip, genellikle 0,5 mm kalınlığında silis katkılı elektrik saclarından imal edilmektedir. Bu saclar, soğuk haddeleme işlemiyle kristal yönlenmeleri sağlanmış şekilde üretilmekte olup, özel kalıplar ve presleme işlemleriyle ankuş adı verilen oluklar açılmak suretiyle şekillendirilmektedirler. Oluşturulan saclar, belirli bir düzen içinde istiflenerek sac paketleri haline getirilir ve bu paketler, statorun hem yapısal bütünlüğünü sağlar hem de içerisindeki hava kanalları sayesinde etkin bir soğutma sistemine olanak tanır. Açılan oluklar içerisine, yüksek dielektrik dayanıma sahip izolasyon malzemeleri ile kaplanmış stator sargıları yerleştirilir. Elektrik üretimi doğrudan bu sargılar vasıtasıyla gerçekleştirilmekte olup, stator çıkış gerilimleri genellikle 6 kV ile 27 kV arasında değişmektedir. Üretilen alternatif gerilimin simetrik ve dengeli olması için stator üzerindeki oluk sayısının üç faz sistemine uygun olarak 3'ün katları şeklinde tasarlanması gerekmektedir. Stator sargıları, uygulamaya bağlı olarak tek katmanlı veya çift katmanlı yapılandırmalarla oluşturulabilmektedir. Özellikle yüksek güçlü generatörlerde, eddy ve bakır kayıplarını azaltmak amacıyla iletkenler arası yalıtım sağlanarak paralel iletken yapısı tercih edilmektedir. Ayrıca, bu iletkenler yüksek sıcaklık ve gerilim koşullarına dayanıklı özel izolasyon malzemeleri ile kaplanarak güvenli çalışma şartları sağlanır [18]. Rotor, generatörün hareket eden kısmıdır. Rotor sargıları, rotor mili üzerine bağlı bilezikler ve fırçalar vasıtası ile DA ile uyarılarak manyetik alan oluştururlar [40].

2.3. Senkron Generatörler

Elektrik makineleri alanında sıkça kullanılan "senkron" terimi, eş zamanlılık anlamına gelmekte olup, bu kavram ilk olarak elektrik makineleri üzerine önemli çalışmalar gerçekleştiren fizikçi Charles Proteus Steinmetz tarafından literatüre kazandırılmıştır. Senkron generatörler, adını rotorlarının sabit devirde çalışmasından almakta ve bu özelliği sayesinde stator alanı ile rotor alanı aynı frekansta dönen makineler olarak

tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, bu makinelerde rotor devri ile stator manyetik alanının devri eşzamanlıdır. Resim 2.1’de bir senkron generatöre ait genel görünüm yer almaktadır.



Resim 2.1. Bir hidroelektrik santraldeki senkron generatör [41]

Senkron generatörlerin stator sargılarında AA, rotor sargılarında ise DA bulunmaktadır. Rotor, senkron hıza eşit hızda döner ve böylece generatörün çıkış frekansı sabit kalmaktadır. Bu karakteristik, özellikle şebeke ile paralel çalışmada büyük bir avantaj sağlamaktadır. Güç kapasiteleri oldukça yüksek olan bu makineler, genellikle büyük enerji üretim tesislerinde tercih edilmekte olup, ekonomik işletme koşulları ve yüksek verimlilik gibi nedenlerle yüksek güçlü olarak tasarlanmaktadır. Günümüzde küçük güçlü senkron generatörlerde rotor kutupları sabit mıknatıs yapısında olurken, büyük güçlü uygulamalarda elektromıknatıs kullanımı yaygındır. Senkron generatörler, birim güç başına düşük maliyet, yüksek verim ve düşük bakım ihtiyacı gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, senkron generatörlerin güç kapasitesini sınırlayan iki temel etken ısı artışı ve rotorun çevresel hızıdır. Isınma, sargı yalıtım malzemelerinin termal sınırlarına ulaşmasına neden olabileceğinden dikkatle kontrol edilmektedir. Diğer yandan, yüksek rotor devirlerinde oluşan merkezkaç kuvvetleri, döner parçalarda ciddi mekanik gerilmelere yol açmakta, bu durum ise rotorun çevresel hızını sınırlayıcı bir faktör haline getirmektedir. Bu nedenlerle, rotor çapı sınırsız

büyütülemediğinden dolayı, generatör gücü de belirli bir seviyenin üzerine çıkamamaktadır [42].

2.3.1. Senkron generatörün yapısı

Senkron generatörün en önemli özelliklerinden biri uyartımın rotoruna uygulanan DA ile sağlanmasıdır. Rotorun mekanik tahriki ise kaynak türüne göre değişmekle birlikte rüzgar, su gibi itici kuvvetlerin etkisiyle sağlamaktadır. Rotorun dönmesiyle makine içerisinde zamana göre değişen manyetik alan oluşturulmaktadır. Oluşan manyetik alan, statorda bulunan 3 faz sargılarını keserek bu sargılarda gerilim indüklenmesini sağlamaktadır. Ana manyetik alanın olduğu sargılar rotor üzerinde bulunur ve alan sargıları veya uyartım sargıları olarak adlandırılır. Gerilimin indüklendiği sargılar ise stator sargıları olarak adlandırılmaktadır.

Küçük güçlü bazı generatörlerde nadiren de olsa stator sargıları dönen kısımda yer alabilmektedir. Büyük güçlü generatörlerde ise stator, her zaman sabit kısımda yer almaktadır.

Döner endüvili generatörler, büyük güç üretimi için uygun değildir. Bu tür generatörlerde akım ve gerilim, dış devreye bilezikler ve fırçalar aracılığıyla aktarılmaktadır. Ancak yüksek akım ve gerilimlerde bu yöntem, bir dizi teknik soruna yol açmaktadır.

Senkron generatörler, rotor tipine göre çıkık kutuplu ve yuvarlak (silindirik) kutuplu olmak üzere ikiye ayrılır. Çıkık kutuplu senkron generatörler hidroelektrik santrallerde, yuvarlak kutuplu senkron generatörler ise daha yüksek anma hız gereksinimine sahip termik santrallerde, buhar türbinli santrallerde ve kombine çevrim santrallerinde kullanılmaktadır.

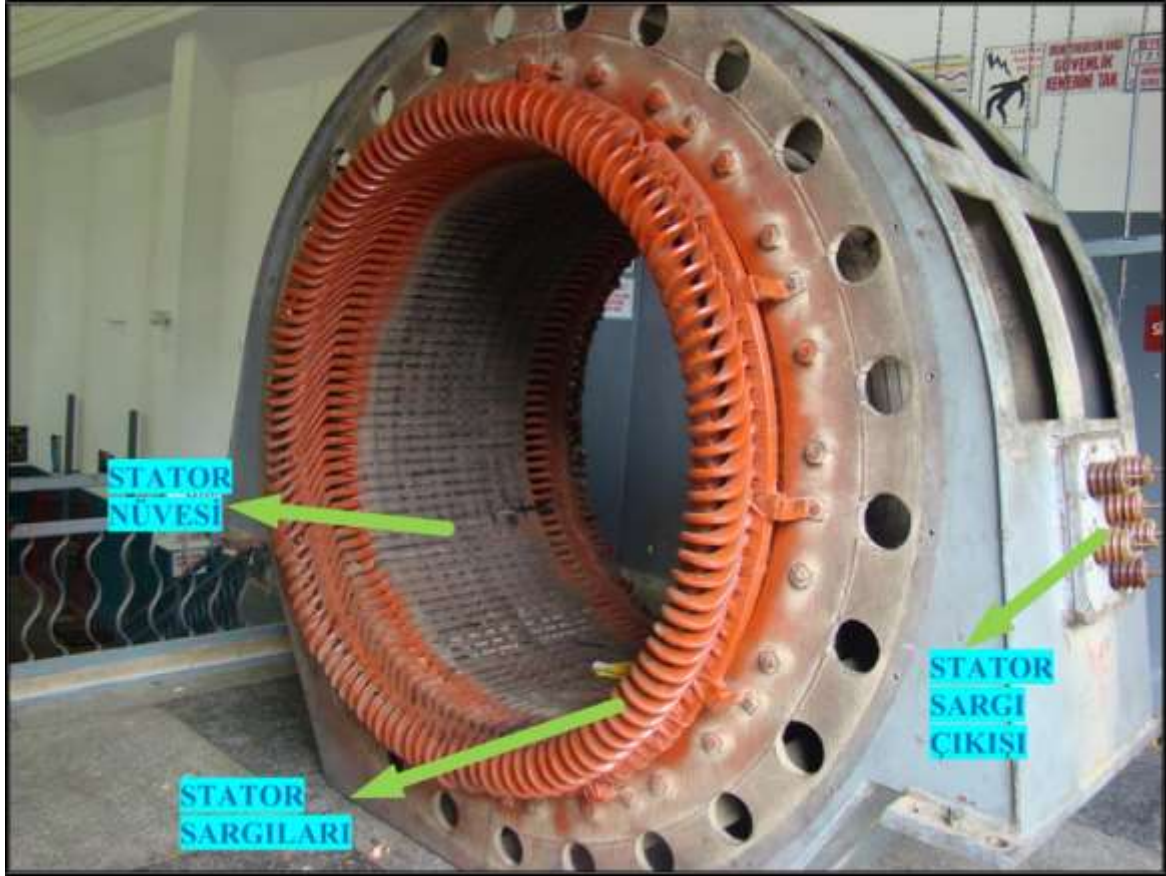
Çıkık kutuplu senkron generatörlerde, kutup başları yalıtılmış ince sac levhalardan oluşan paketler şeklinde yapılırken, kutup ayakları DA uyartımındaki düşük kayıp davranışı sebebiyle dökme demirden veya daha yüksek kalınlıktaki saclardan imal edilmektedir. Çıkık kutuplu senkron generatörler stator ile rotor arasındaki hava aralığı, rotor kutup hizalarında küçük, kutup aralarında ise büyüktür. Çıkık kutuplu generatörler çok kutuplu olarak üretilmektedirler. Bunların rotor çapları büyük, rotor uzunlukları ise küçüktür. Rotorun yapım şekline bağlı olarak mekanik dayanımları sınırlı olduğundan yüksek merkezkaç

kuvveti sebebiyle bu tip generatörler yüksek devirlerde kullanılmamaktadırlar. Çıkık kutuplu senkron generatörlerde hava aralığı, kutup taksimatının $1/50$ ile $1/60$ katı değerindedir.

Yuvarlak kutuplu generatörlerde rotor ve stator arasındaki hava aralığının radyal yöndeki boyu sabittir. Genel olarak rotor boyları uzun, çapları küçüktür. Bu tür generatörlere turbo generatörler de denir. Kutup sargıları mile paralel açılan oluklara yerleştirilerek rotor mili üzerinde bulunan bileziklere bağlanarak yatay milli olarak çalışmaktadırlar. Yuvarlak kutuplu generatörlerde rüzgâr kayıpları çok az olup çoğunlukla 2 veya 4 kutuplu olarak üretilmektedirler [40].

2.3.2. Stator ve stator sargı yapısı

Senkron generatörün sabit kısmı olan stator, silisli saclardan yapılarak içinde stator sargıları bulundurulur. Stator sargıları kalıp sargılar, el sargısı, seri sargılar olmak üzere 3 şekilde sarılır ve üçgen ya da yıldız olarak bağlanırlar. Stator nüvesi manyetik direnci azaltmak için ferro-manyetik malzemeden yapılırlar. Sargılarda akan akımların meydana getirdiği alternatif manyetik alanlar demir malzemede histerizis ve eddy kayıplarına sebep olmaktadır. Oluşan kayıpları azaltmak için lamine sac paketlerinden imal edilmektedirler. Silisyum katkılı saclar, manyetik doyuma girmeden yüksek manyetik alan yoğunlukları oluştururlar. Düşük karbonlu, silikon-alaşımli levhalardan yapılan saclar, 0,5- 2 mm veya daha kalındırlar. Bu saclar düşük kayıplı ve yüksek kalitelidirler. Sac levhalarının hazırlanma süreci, statorun iç ve dış çaplarına bağlı olarak şekillenirler. Bu levhalar, stator sargılarının yerleştirileceği olukları oluşturulmaktadır. Resim 2.2’de bir senkron generatörün stator yapısına ait görsel yer almaktadır.

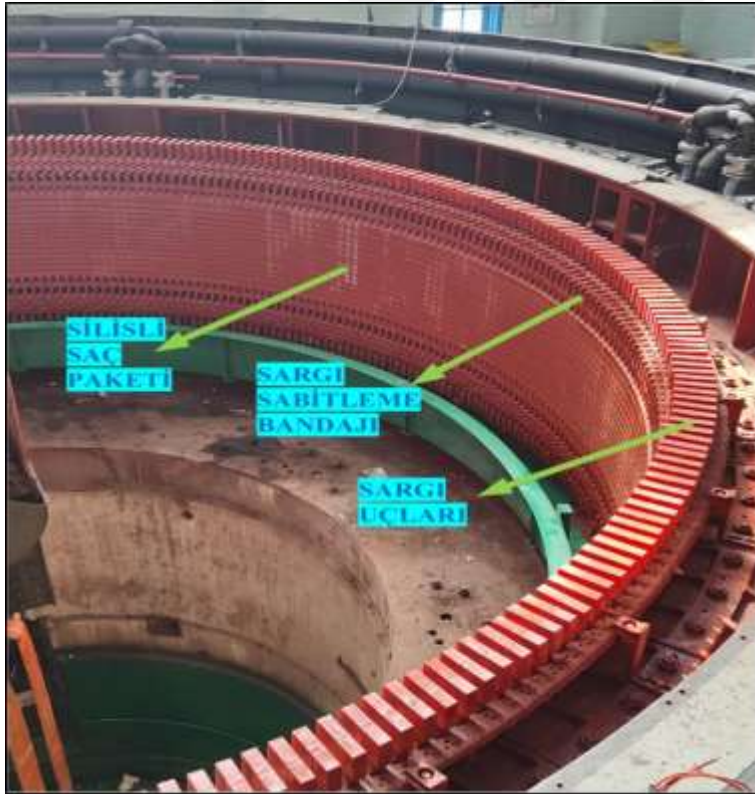


Resim 2.2. Çıkık kutuplu senkron generatöre ait stator yapısı

Stator iki ayrı kısımda incelenmektedir. Bunların ilki “stator boyunduruğu” olarak adlandırılan olukların olmadığı dış çapa yakın olan kısımdır. Manyetik akının makine çevresinde devreyi tamamlaması için, relüktansı düşük olan bir yol oluşturmaktadır. Rotorda üretilen manyetik akı, dişler aracılığıyla geçerek stator boyunduruğuna ulaşmaktadır. Stator boyunduruğunun manyetik olarak doymasını önlemek amacıyla, boyunduruk yüksekliği hesaplanarak stator kalınlığı belirlenmektedir. Bu hesaplanan kalınlık, statorun iç ve dış çapları arasındaki farkla eşdeğerdir ve artan kutup sayısı ile birlikte azalır.

İkincisi ise hava aralığına yakın olan, olukları ve dişlerin bulunduğu bölümdür. Dişler, rotor akısının statora girdiği manyetik direnci küçük olan yerlerdir. Oluk içinde kullanılan bakır iletkenler ve yalıtım malzemeleri nedeniyle diş mesafesi sınırlı bir büyüklükte yapılırken, dişlerin doymasını engellemek için ise yeterli kesit alanına sahip olmalıdır. Stator çapının değerine etkiyen bu durum için yeteri kadar diş ve oluk yapılarak stator çapı büyütülmektedir. Büyük güçteki generatörlerin statorları büyük ve küçük güçteki generatörler gibi tek parça olarak yapılmayıp, küçük plakaların birleştirilmesi ile

yapılmaktadır. Stator karkası olarak adlandırılan bölüm stator nüvesini sarar, tutar ve sac paketlerini korumaktadır. Stator karkası soğutma yüzeyini genişleterek soğutucu görevini de üstlenmektedir. Karkasa radyatör biçiminde yüzey şekli vermek, maliyet artışına ve ekonomik olmayan yer kaybına neden olduğu için çok küçük generatörler dışında uygulanmamaktadır. Senkron generatörlerin boyutlarının oldukça büyük olmasından ötürü, kullanılan karkas genellikle sade ve düz, kalın sacdan yapılmaktadır. Çelik özelliklere sahip bu malzeme, makinenin stator sac paketini koruyarak, daire şekline kesilmiş sac parçalarının düzenli bir şekilde yerleştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, olası bir hatalı işletme durumunda, kısa devre nedeniyle ortaya çıkabilecek büyük kuvvetlerin stator sac paketini bozmasına engel olmak amacıyla da kullanılmaktadır. Karkas üzerine soğutma işlemi için içerisinden su geçirilerek ortam ve makinenin soğutulmasını sağlayan radyatör yapılı soğutucular kullanılmaktadır [43].



Resim 2.3. Çıkık kutuplu senkron generatörün stator yapısı

Sargı birbirine lehim ile tutturulmuş bakır barlardan yapılmaktadır. Her bir bar birbirinden izole edilmiş şekilde birbirine bağlanmış iplerden oluşmaktadır. Bu ipler boydan boya birkaç kat mika kaplı fiberglas bantla izole edilmektedir. Barlar epoksi reçinenin vakum altında bobinlerin sargı izolasyonuna emdirildiği ve reçineli bobinlerin yüksek ısıya verildiği

Vakumlu Basınç Altında Vernikleme (VPI) işlemine tabi tutulmaktadır. Isıtılan bu barlar levhalı nüveye takılarak yarıklar sabitleyici kamalar ile kapatılmaktadır. Sargı çıkıntıları ise birbirine geçirilmiş, manyetik güçleri titreşime yol açmadan emilmeyi sağlayan fiberglas kordonlar ile takviye edilmektedir [43].

2.3.3. Rotor, rotor mili ve kutuplar

Büyük güce sahip generatörlerde dönen ve uyartım sargılarını taşıyan kısma rotor denilmektedir. Rotor kutupları sargılarına uygulanan DA ile Manyeto Motor Kuvveti (MMK) meydana getirmektedir. Silisli sac lar paketlenerek üzerine sargı sarılmaktadır. Birkaç parça demir aksamın birleştirilmesiyle oluşan ana gövde, birbirine yıldız şeklinde monte edilmiş aksamlardan oluşmaktadır. Generatörün gücü ve boyutlarına bağlı olarak, tasarımda kullanılan malzeme dökme demir tercih edilir. Eğer çap büyükse, rotorun ağırlığını hafifletmek için rotor göbeği, eşit açılarla birbirinden ayrılmış çok sayıda ayağa sahip ve "rotor göbeği yıldızı" olarak bilinen bir yapıya dönüştürülmektedir. Görevi kutup sargılarını taşımak olan kutup gövdesi de dökme demirden yapılmaktadır. Rotoru tutan, dâhili olarak şekillenmiş iki adet kaplin flanşı olan yüksek kaliteli tek parça çelikten oluşan mil, rotorun ana parçalarından oluşmaktadır. Bu kaplinlerden biri kontak halkası göbeğinin bağlantısı için üst kısımda, diğeri ise türbin şaftına olan bağlantı için alt uçta yer almaktadır. Milin boyutları, malzemenin ve malzemenin mekanik karakteristiklerinin kararlılığını onaylamak için yapılan çeşitli testlere tabi tutulan, kritik eğilme ve torsiyon hızı ile belirlenmektedir [43].

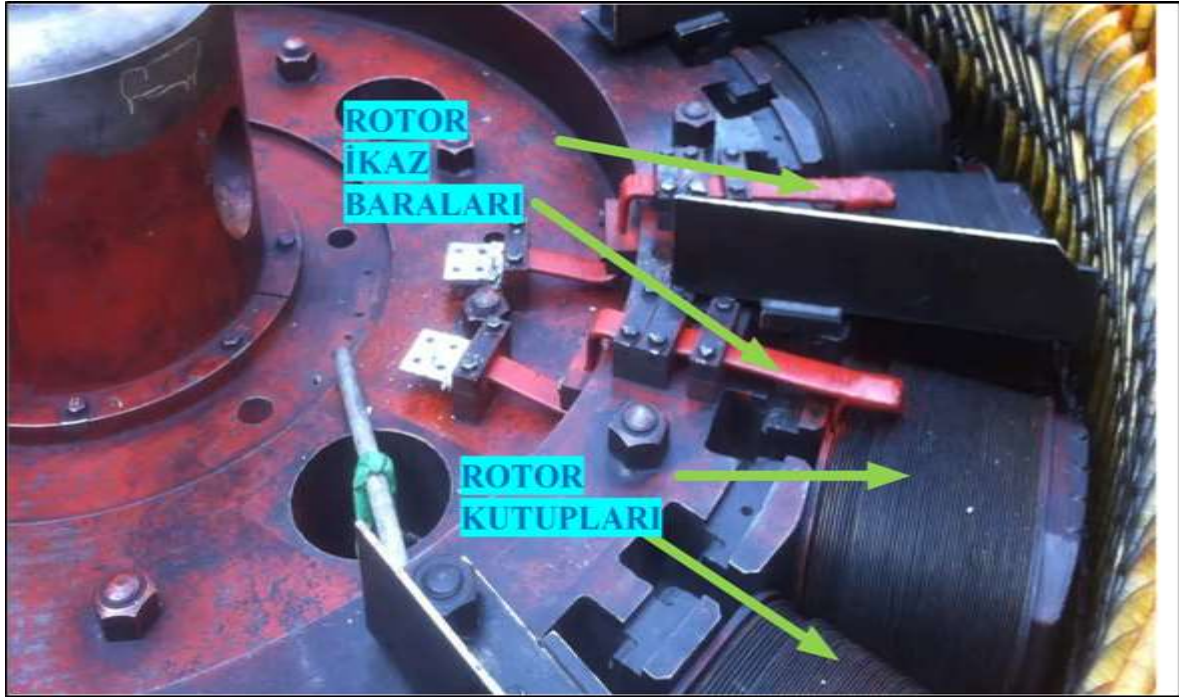


Resim 2.4. Çıkık kutuplu senkron generatöre ait rotor örneği

Rotor kenarı üzerine monte edilen her bir kutup, kutup nüvesi, kutup ayağı, kutup sargıları, kırılmaç kuyruk bağlantı yapısı (veya çekiç başı) gibi yapıları içeren karmaşık bir yapı bulunmaktadır.

2.3.4. Kutup nüvesi ve ayakları

Kutup nüvesi, çapraz kirişlerin etrafında istiflenmiş ve kutbun her bir ucundaki sıkıştırma plakaları yoluyla sıkıştırılmış olan çelik levhalardır. Çelik levhalar ile kutup ayakları yüzey kayıpları minimuma indirecek şekilde tasarlanmaktadır. Sinüzoidal gerilim dalga şeklini tam olarak elde etmek için ana kıstaslar arasında kutup ayakları biçimi yer almaktadır. Senkron generatörlerde istenilen çıkış gerilimi şeklinin elde edilmesinde kutup ayakları çok önemli rol oynamaktadır. Statora en yakın rotor parçası olan kutup ayakları, demir malzeme olduğundan makina belli bir yük altında çalışırken stator sargısında oluşan büyük manyetik alanlardan etkilenmektedir. Bu durum kutup ayaklarının yüzeylerinde eddy ve histerizis kayıpları meydana getirmektedir. Yaklaşık bir kutup adımı kadar olan yay uzunluğu geniş bir yer işgal etmektedir. Kullanılan malzemenin B-H eğrisinden yararlanılarak kutup ayağının yüksekliği hesaplanmaktadır.



Resim 2.5. Rotor kutupları ve ikaz baraları [44]

Çıkık kutuplu rotorlarda karşılaşılan en önemli sorunlardan biri makinanın dönme hareketi sırasında merkezkaç kuvvetinden yüksek derecede etkilenmesinden oluşan mekaniksel problemlerdir. Maruz kalınan bu kuvvetler kutup ayağını gövdeden koparmaya, kesmeye çalışmaktadır. Kırılma kuyruğu tasarımı, saplama veya tarak yapı formu gibi sabitleme yöntemleri kullanılmaktadır. Kutup ayakları görevlerinden biri de kutup gövdesinde oluşan manyetik akının statorun manyetik alan devresine ulaştırılmasını ve dağılmasını sağlamaktadır. Manyetik akı, kutup ayağını terk ettiği anda, rotor ve stator arasındaki hava aralığına girer ve manyetik direnci büyük olan ortamı geçerek statora ulaşmaktadır. Manyetik akı grafiğinin istenilen şekilde olmasındaki önemli etkilerden biri, kutup ayağı yayına ait yarıçap uzunluğunun, stator iç çapı ile eşit olması durumunda, arada kalan hava aralığının genişliği, ayak yayının uzunluğu boyunca sabit kalmasına neden olmaktadır. Böyle bir tasarım şeklinde birim uzunluk için demirin manyetik direnci havanınkinden çok daha küçük olduğundan manyetik direnç yaklaşık olarak değişmemektedir. Bu yapı sayesinde, kutup ayağından hava aralığına geçen manyetik akı, ayağın genişliği boyunca düzgün şekilde dağılır ve bu bölgede homojen bir manyetik alan yoğunluğu oluşmaktadır. Elde edilen bu alan yoğunluğunun dağılımı, stator sargılarında indüklenen gerilimin dalga formunu doğrudan etkilemektedir [43, 45-47].

2.3.5. Kutup sargıları

Senkron generatörlerin rotor kısmında yer alan ve manyetik alan üretmek için kullanılan sargılardır. Kutup sargıları genellikle bakır tellerden yapılır ve genellikle bir veya daha fazla katman halinde sarılmaktadır. Bu sargıların geometrik yapısı, manyetik alanın kalitesini ve güçlü bir elektromanyetik etkileşimi sağlamak için önemlidir. Kutup sargılarının sayısı, generatörün çıkış gücüyle ilişkilendirilmektedir. Daha fazla kutup sargısı, daha fazla manyetik alan üretilmesini sağlamak ve bu da daha yüksek güç çıkışı anlamına gelmektedir [43].

2.3.6. Amortisör sargısı

Senkron generatörlerde rotor üzerinde bulunan özel sargı türlerinden biridir. Amortisör sargılarının başlıca amacı, makinenin çalışmasında meydana gelebilecek salınımları ve titreşimleri engellemektir. Bu sargılar, rotorun düzgün ve sabit çalışmasını sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır [48].

2.4. Senkron Generatörlerin Çalışma Prensipleri

Senkron makineler çalışma şekillerine göre hem generatör olarak hem de motor olarak çalıştırılması mümkündür. Faraday yasasına göre manyetik alan oluşmadıkça, statora yerleştirilen iletkenler hareket etmedikçe iletkenlerde gerilim indüklenmemektedir. Rotor bir tahrik aracı tarafından döndürülerek kutuplarda genliği değişmeyen doğru alan oluşturmaktadır. Rotorun dönmesi statordaki iletkenleri keserek bu iletkenlerde gerilim indüklenmesini sağlamaktadır. DA ile uyartılan kutup rotoruna mekanik enerji verilip statordan elektrik enerjisi elde edildiği zaman senkron makine generatör olarak çalıştırılmış olmaktadır. Statordaki çok fazlı alternatif akım sargısına akım uygulanırsa, statorda $n_s = 60 \cdot f_1 / p$ hızında döner bir manyetik alan oluşturulmuş olmaktadır. Kutup rotorunun doğru akım ile uyartılarak bir dış tahrik aracı ile n_s devrine getirilip serbest bırakılması senkronizasyon olarak adlandırılmaktadır. Senkronizasyon sağlandığında stator ve rotor alanları birbirine kenetlenerek rotor statoru n_s hızında takip etmektedir. Motor olarak çalıştırılmasında ise; n_s hızında, rotor bir dış fren makinası ile az miktarda yüklenerek rotorun S kutbunu N kutbundan küçük bir açı ile geride bırakmaktadır. Generatör çalışma koşullarında ise durum motorlardan farklıdır. Bu durumda rotorun oluşturduğu manyetik alan, stator akımlarının meydana getirdiği döner manyetik alandan önde seyretmektedir. Rotor tarafından iletilen mekanik enerji, stator üzerinden dış yüke aktarılan elektriksel güce karşı bir direnç oluşturmaktadır. Eğer rotor sabit bir momentle döndürülüyorsa, statordan çekilen elektrik gücü arttıkça statorun döner alanı rotorun kutup alanının gerisinde kalmaktadır. Bu durum sonucunda, yük açısı pozitif bir değere ulaşmaktadır ($\delta > 0$) [46].

2.5. Bir Senkron Generatörde İndüklenen Gerilim

Generatör statorun bir fazında indüklenen gerilim genliği senkron makinadaki akıya, frekansa veya dönme hızına ve makinanın yapısına bağlı olarak,

$$E_A = 2 \cdot \pi \cdot N_c \cdot f \cdot \Phi \quad (2.1)$$

ifadesiyle hesaplanır. Oluşan E_A gerilimi rotor alan devresinden akan DA'ya bağlı olan manyetik akıyla ve hızla orantılıdır. Yani E_A uyarma akımına bağlıdır [49].

2.6. Bir Generatörün Endüvi Reaksiyonu ve Eşdeğer Devresi

Eş. 2.1’de ifade edilen E_A gerilim değeri senkron generatörün 1 fazında meydana gelen gerilim ifadesidir. Boşta çalışan senkron generatörün çıkış-uç gerilim değeri E_A gerilim değerine eşittir. Senkron generatörün uçlarına bir yük bağlandığında ise çıkış-uç gerilim değeri V_Φ ’i olur ve E_A ile V_Φ değeri birbirine eşit değildir. Bu fark;

- Statordan akım akmasıyla hava aralığı manyetik alanın bozulmasından (buna endüvi reaksiyonu denir),
- Endüvi sargılarının öz direncinden,
- Endüvi sargılarının direncinden,
- Rotorun çıkık kutuplu olmasının etkisinden kaynaklanmaktadır.

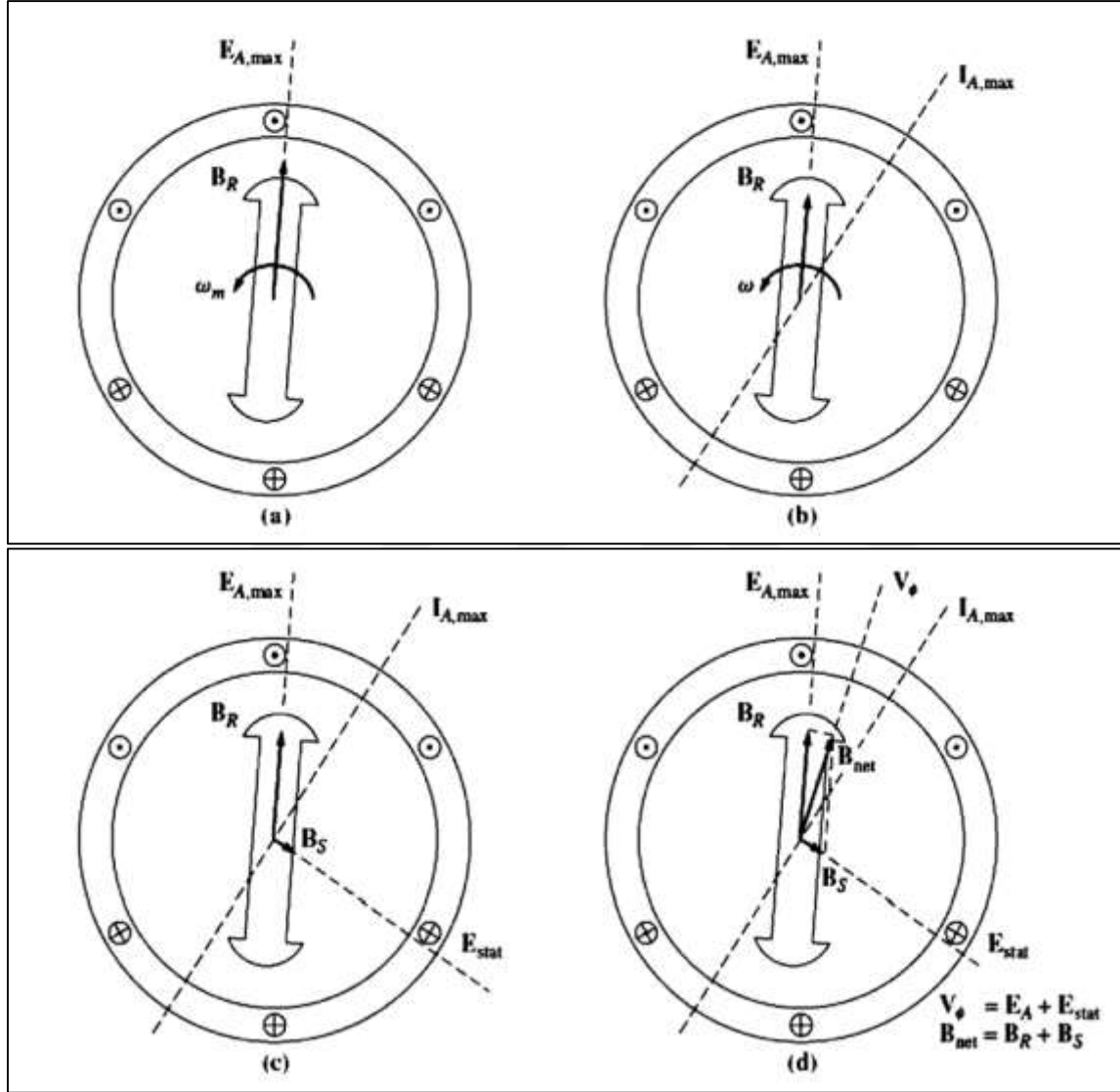
3 fazlı bir generatörde sargılarda akan akım kendi etrafında bir manyetik alan oluşturmaktadır. Statorda oluşan bu manyetik alan rotor manyetik alanını bozucu bir etki yapmaktadır. Bu etki, endüvi (stator) akımının manyetik alanı etkilemesi sonucunda ortaya çıktığından endüvi reaksiyonu ya da ilk olduğu yer armatür sargılarında olduğu için armatür reaksiyonu olarak isimlendirilmektedir.

3 faz sargıları bulunan ve rotoru 2 kutba sahip olan bir generatörde endüvi reaksiyonunu oluşumu açıklanacak olursa;

- Dönen bir manyetik alan stator fazlarında indüklenen gerilim E_A ’yı üretmektedir.
- Oluşan bu E_A gerilim, geride güç faktörlü bir yük bağlandığında geride bir akım üretmektedir.
- Geri stator akımı B_S , manyetik alanını ve o da stator sargılarında E_{stat} gerilimini üretmektedir.
- B_S alanı B_R ’ye eklenir ve onu etkileyerek B_{net} ’i oluşturmaktadır. E_{stat} gerilimi E_A ’ya eklenir böylece faz çıkışında V_Φ elde edilmektedir [37].

Döner rotor manyetik alanı B_R tepe değeri B_R ’nin yönünde olan iç gerilim E_A ’yı üretmektedir. Gerilim üst iletken çıkışında pozitif, en alt iletken girişinde negatif olmaktadır. Generatör yüksüz iken endüvi fazlarında bir akım akmayacağı için E_A ile V_Φ birbirine eşit olmaktadır. Generatörün geri güç faktörüne sahip bir yüke bağlandığını kabul ederek,

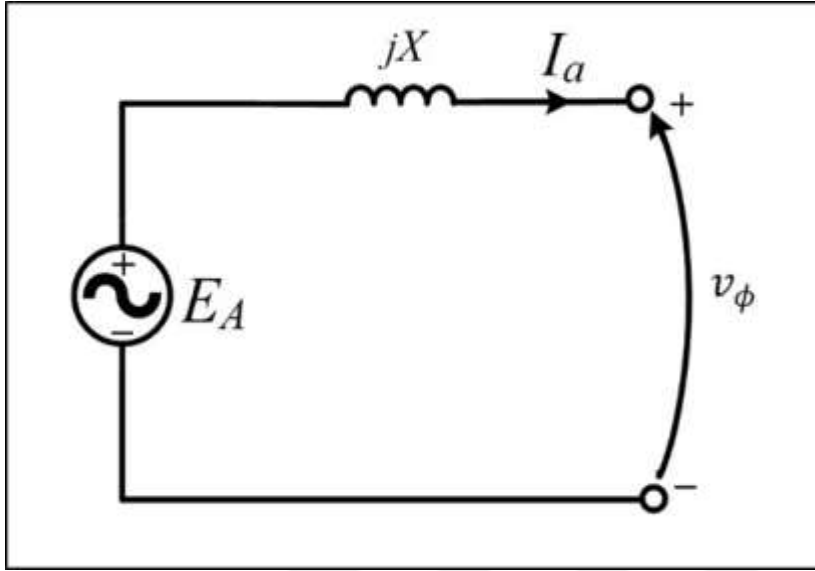
Şekil 2.1b’de gösterildiği gibi yük geride olduğundan akımın tepe değeri gerilimin tepe değerinin gerisinde olmaktadır. Stator sargılarından akan faz akımları stator manyetik alan olan B_S ’yi üretmekte ve yönü Şekil 2.1c’de gösterildiği gibi sağ el kuralıyla belirlenmektedir.



Şekil 2.1. Endüvi reaksiyonunun modellenmesi: (a) Dönen manyetik alan, E_A iç üretilmiş gerilimini indükler. (b) Generatöre GF değeri geri olan bir yük bağlandığında bileşke gerilim vektörü geri fazlı bir akım üretir. (c) Stator akımları B_S değerinde bir manyetik alan üretir. Bu alanda stator sargılarında E_{stat} değerinde bir gerilim indükler. (d) B_S stator manyetik alanı B_R rotor manyetik alanına eklenerek B_{net} değerinde bir bileşke manyetik alan oluşur. E_{stat} gerilimi E_A gerilimine eklenerek V_Φ generatör faz gerilimini oluşturur [47].

Meydana gelen stator manyetik alanı B_S stator sargılarında bir elektromotor kuvvet (EMK) indüklenmesine yol açar ve bu gerilim literatürde şekilde gösterildiği üzere E_{stat} olarak

adlandırılmaktadır. Statorun bir fazına ait toplam gerilim ise, sargılarda oluşan iki bileşenin birleşiminden meydana gelmektedir. Bu bileşenler, indüklenen gerilim E_A ile endüvi reaksiyon gerilimi E_{stat} 'ın toplamı olarak elde edilmektedir.



Şekil 2.2. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi

$$V_{\Phi} = E_A + E_{stat} \quad (2.2)$$

Rotor ve stator manyetik alanların toplamı olan B_{net} Eş. 2.3'teki gibi ifade edilmektedir.

$$B_{net} = B_R + B_S \quad (2.3)$$

E_A ile B_R 'nin ve E_{stat} ile B_S 'nin açıları aynı olduğundan oluşan manyetik alan B_{net} , gerilim V_{Φ} ile aynı fazda oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim ve akımlar Şekil 2.1(d)'de gösterilmektedir.

Endüvi reaksiyonunu bir devre şekli ile modellemek istersek; ilk olarak E_{stat} gerilimini, maksimum akım I_A 'nın 90° gerisinde olduğuna dikkat edilmektedir. Ayrıca E_{stat} gerilim

$[I]$ akımıyla doğru orantılı olmaktadır. Şekil 2.2'de senkron generatörün basit eşdeğer devresi verilmektedir. Eğer X bir orantı sabiti olursa o zaman endüvi gerilim reaksiyonu;

$$E_{stat} = -jXI_a \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bir fazdaki gerilim,

$$V_{\Phi} = E_A - jX I_a \quad (2.5)$$

olmaktadır.

Bu elde edilen denklem, endüvi reaksiyon gerilimini tanımlayan denklemle tam olarak aynı olmaktadır. Dolayısıyla endüvi reaksiyon gerilimi indüklenen gerilimle seri bağlı bir indüktans ile ifade edilmektedir. Endüvi reaksiyon etkilerine ek olarak, bilindiği üzere stator sargıları bir öz indüktans ve bir dirence sahip olmaktadır. Stator direnci R_A ve stator öz indüktansı L_A olarak ve karşılık gelen reaktans da X_A olarak isimlendirilirse E_A ile V_{Φ} arasındaki toplam fark;

$$V_{\Phi} = E_A - jX I_a - jX_A I_a - R_A I_a \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Makinanın senkron reaktansı ;

$$X_S = X + X_A \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Böylece V_{Φ} ,

$$V_{\Phi} = E_A - jX I_a - jX_S I_a - R_A I_a \quad (2.8)$$

olmaktadır.

Elde edilen bu denklemlerle senkron generatörün tam eşdeğer devresi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu şekilde rotor alan devresi de doğru akım kaynağından beslenecek şekilde, alan sargı indüktansı ve seri bağlı olan sargı direnç ile oluşturularak modellenmiştir.

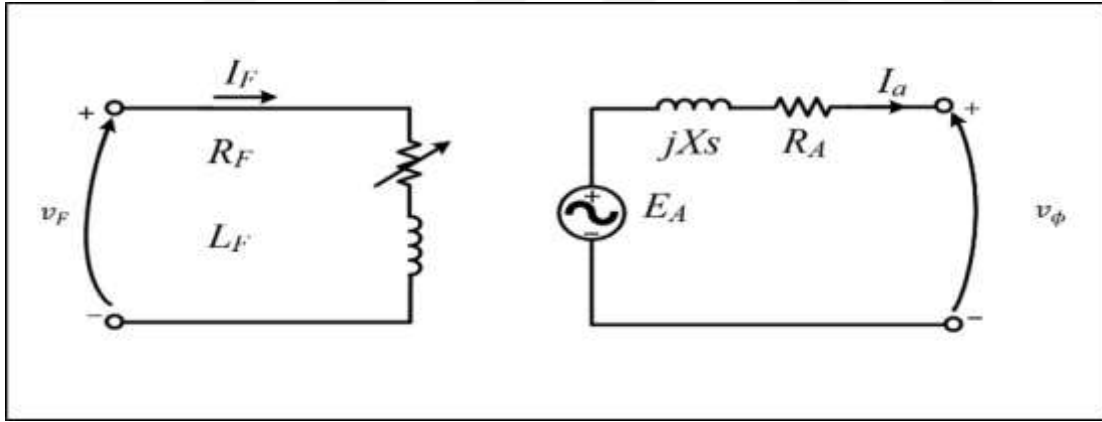
R_{adj} ayarlanabilir bir direnç olup uyarma akımını kontrol etmek için R_F direncine seri bağlı olmaktadır. Her bir faz indüklenen gerilime seri bağlı X_S , endüvi reaktansı ve bobinlerin öz reaktanslarının toplamından ibaret olan senkron reaktansa ve seri bağlı R_A direncine sahip olmaktadır. Üç fazlı gerilimler ve akımlar arasında sadece 120° faz farkı bulunmaktadır [47].

Stator kısmında ise her bir faz için elde edilen gerilimler E_{A1} , E_{A2} , E_{A3} olarak adlandırılmaktadır. Statordaki 3 faz sargıları yıldız ya da üçgen olarak bağlanmaktadır.

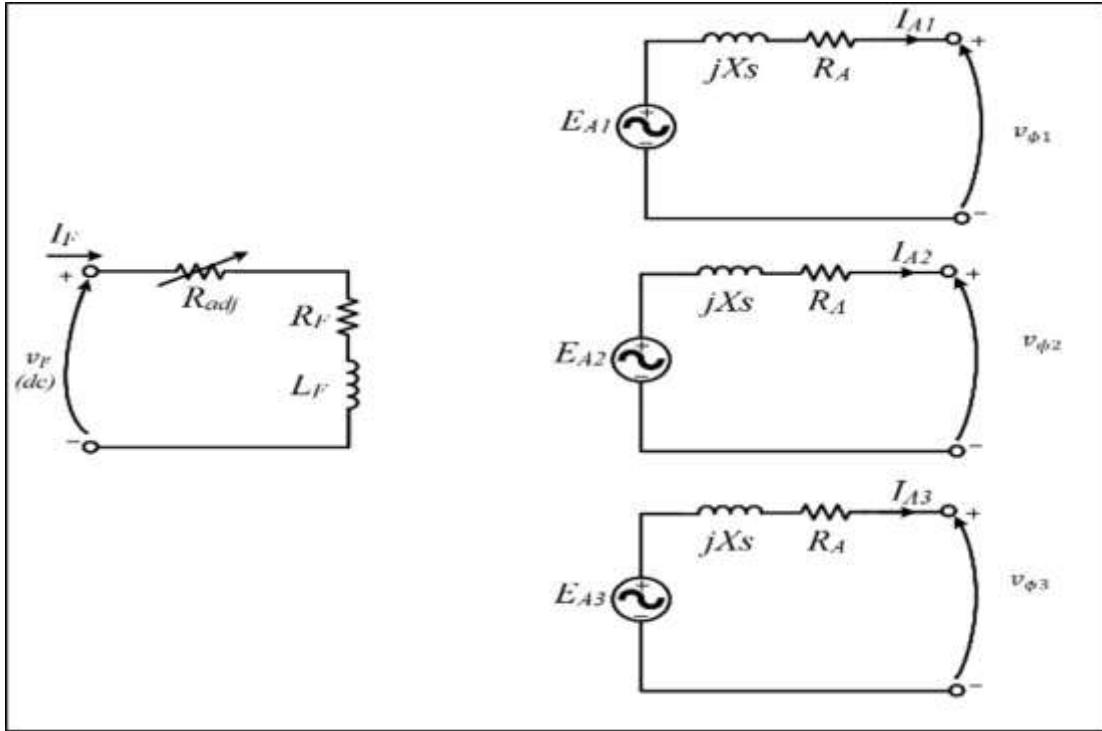
$$V_T = \sqrt{3} V_\Phi \text{ (yıldız bağlantı için)}$$

$$V_T = V_\Phi \text{ (üçgen bağlantı için)}$$

İdealde 3 faza bağlanan yükün dengeli olduğu kabul edilmektedir. Dengeli değilse de her bir faz ayrı değerlendirilmektedir.



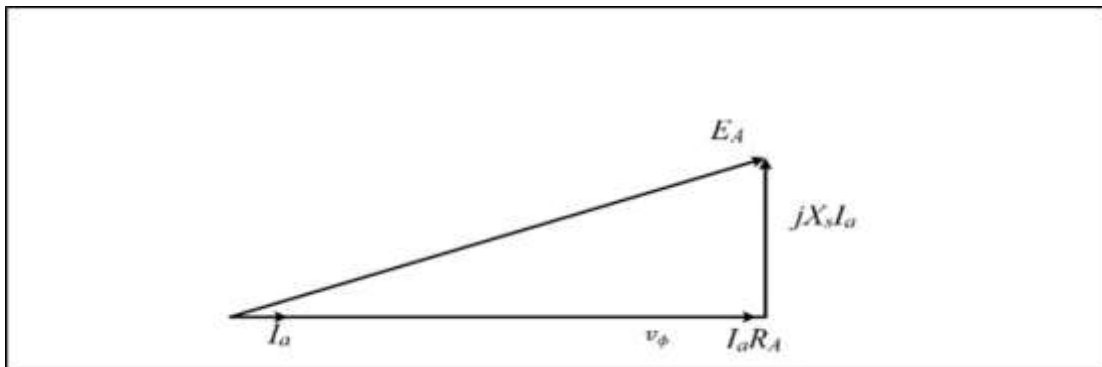
Şekil 2.3. Senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi



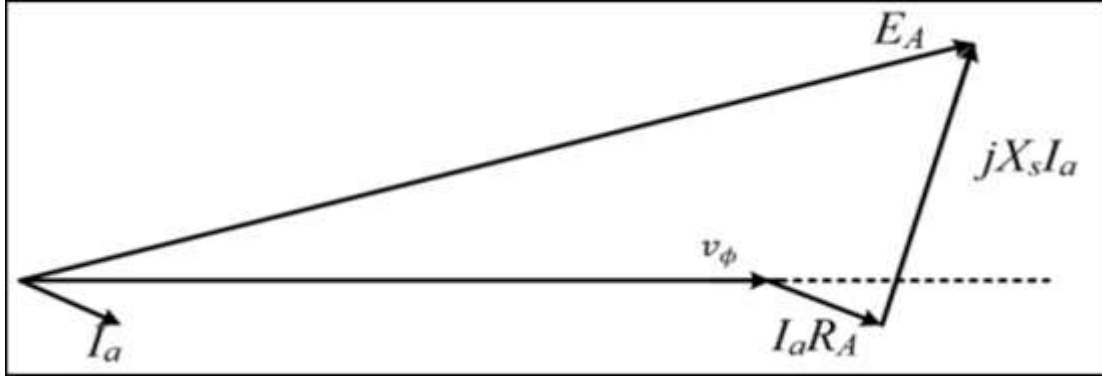
Şekil 2.4. Üç fazlı bir senkron generatörün tam eşdeğer devresi

2.7. Senkron Generatörlerin Fazör Diyagramları

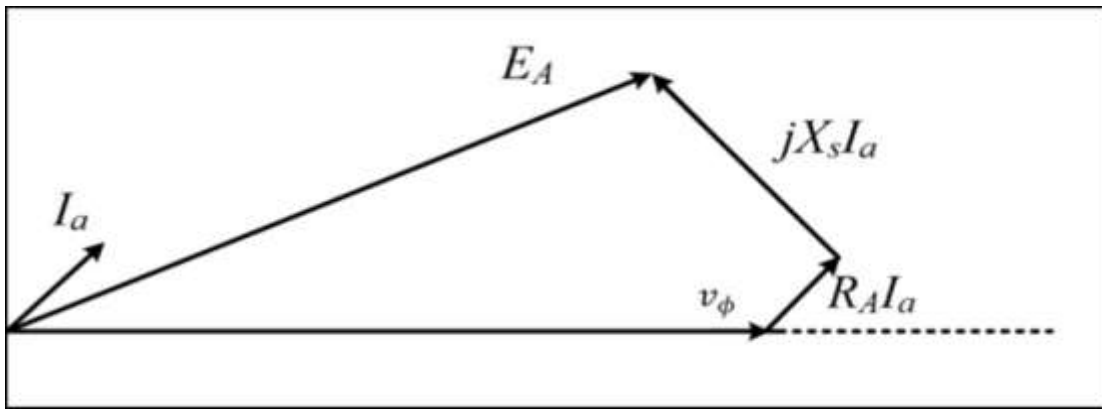
Genlik ve açı bilgisini bir arada içeren fazör diyagramlar genellikle fazlara ait gerilimlerin daha anlaşılabilir olması için kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te, Şekil 2.6'da, Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.5. Omik bir yükü besleyen senkron generatörün fazör diyagramı



Şekil 2.6. Senkron generatörün geri güç faktöründe fazör diyagramı



Şekil 2.7. Senkron generatörün ileri güç faktöründe fazör diyagramı

Endüktif yük durumu pozitif yüke göre daha fazla E_A gerilimine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak $E_A = k\Phi\omega$ denklemiindeki frekans ($\omega = 2\pi f$) değeri sabit olduğundan E_A geriliminde sabit olmaktadır. Sonuç olarak generatörün uç gerilimi kapasitif yük hali endüktif yük haline göre daha yüksek olmaktadır [50].

3. SENKRON GENERATÖRÜN BOYUTLANDIRILMASI

Senkron generatör tasarımında ilk adım, faz sayısı, anma gücü, nominal hız, frekans, güç faktörü ve anma gerilimi gibi temel tasarım parametrelerinin belirlenmesidir. Hava aralığında izin verilen kesit alanına göre oluşabilecek paralel gerilmeler dikkate alınarak rotor dış çapı hesaplanır ve böylece generatörün ilk boyutlandırması gerçekleştirilir. Rotor boyutu belirlendikten sonra, alan sargısının yerleştirileceği bölge tanımlanarak iletken yüzeyi ve sarım sayısı gibi parametreler belirlenmektedir. Statorun genel boyutlandırması tamamlandıktan sonra, olukların geometrisi belirlenerek stator tasarımı tamamlanmaktadır. Stator tasarımı tamamlandıktan sonra, rotor ile stator arasındaki hava aralığı uzunluğu mekanik toleranslar da dikkate alınarak belirlenmektedir. Hava aralığı, rotor ve stator arasında manyetik akının optimum şekilde geçişini sağlayacak biçimde belirlenerek bu bölgede oluşacak manyetik akı yoğunluğu hesaplanmaktadır. Bu aşamaya kadar yapılan tasarım hesaplamaları, generatörün yüksüz çalışma koşulları altında olduğu varsayımıyla gerçekleştirilmektedir. Tam yük koşullarına ilişkin analizlere geçilmeden önce, elde edilen çıkış gücünün kabul edilebilir düzeyde olup olmadığı doğrulanmaktadır. Tasarlanan rotor ve stator parametreleri ile hedeflenen çıkış gücüne ulaşamıyorsa, eksenel uzunluk gibi yapısal parametreler yeniden düzenlenerek uygun akım yoğunluğu değerine ulaşılarak generatör çıkış gerilimi hesaplanmaktadır [51]. Çıkış geriliminin istenen seviyeye ulaşmasının ardından, generatördeki yaklaşık kayıplar bulunur ve buna bağlı olarak generatörün verimliliği hesaplanmaktadır. Damper sargıları, uzay harmoniklerini azaltarak dönüş sırasında oluşabilecek geçici değişimlere karşı sönümleyici tork üreterek geçiş performansını artırmaktadır [52]. Verimlilik hesabının tamamlanmasının ardından, tasarlanan senkron generatörün belirlenen tasarım kriterlerini sağlayıp sağlamadığı SEA ile doğrulanmaktadır.

3.1. Kısa Devre Oranı (SCR)

Statik kararlılık ve reaktif güç kapasitesinde doğrudan etkili olan büyük bir SCR değeri, küçük bir $X_{d(sat)}$ değeri ile mümkün olmaktadır. Bu durum ise geniş bir hava aralığına sebep olmaktadır. Generatörde alan sargılarıyla aynı görünür gücü elde etmek için daha çok amper-sarım, geniş bir rotor hacmine ve dolayısıyla daha büyük bir generatör hacmine neden olmaktadır. SCR değeri hacme ek olarak verim ile de doğrudan ilgilidir.

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

Kayıpsız bir generatör sonsuz bir yüke bağlandığı varsayılarak elektromanyetik tork ifadesinden faydalanarak, SCR'nin statik kararlılığa etkisini,

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

İfadesi ile anlamak mümkün olmaktadır. E_0 yüksüz çalışma gerilimi, V_1 terminal gerilimidir [45].

Terminal geriliminin azalması ile SCR değeri küçülmektedir. Böylece tork artarak alan akım değeri yükselmektedir. Generatör çıkışındaki yükseltici transformator reaktansını da içerecek şekilde iletim hattı reaktansı x_e ise ve V_1 x_e reaktansı ardındaki sonsuz şebeke gerilimi V_g ile değiştirilirse elde edilecek generatör tork ifadesi,

$$t'_e = SCR \cdot E_0 \cdot V_g \cdot \frac{\sin \delta'}{(1 + x_e/x_d)} \quad (3.3)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Hidroelektrik generatörlerin tasarımında SCR değerlerinin zaman içerisindeki değişimi incelendiğinde, 1930'lu yıllarda bu oranın 0,8 ile 1,0 arasında olduğu, 1960'lara gelindiğinde ise 0,58 ile 0,65 aralığına gerilediği görülmektedir. Günümüzde ise SCR değerleri 0,4 ile 0,5 seviyelerine kadar düşmektedir. Bu azalma, generatör hacminde küçülmeye, toplam kayıplarda azalmaya ve üretim maliyetlerinde düşüşe olanak sağlamaktadır [44].

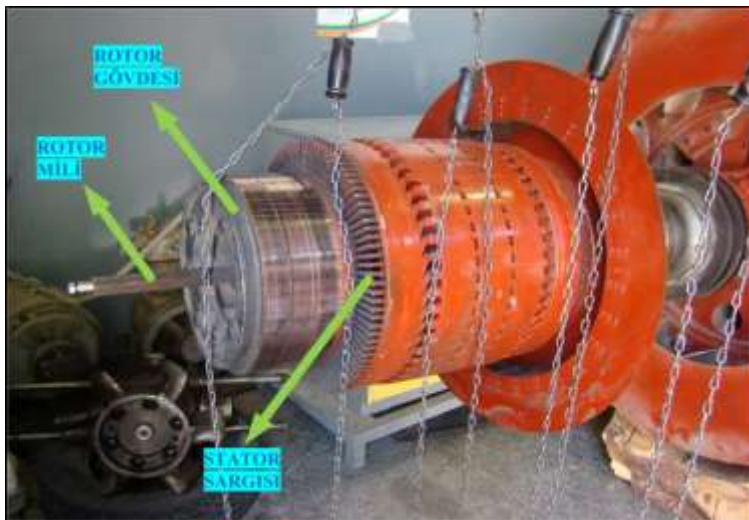
3.2. Geçici Zaman Kararlılığına SCR ve x_d 'nin Etkisi

Geçici zaman kararlılığı, bir generatörün anlık şebeke koşullarındaki değişimlere, özellikle kısa devre ve ani yük değişimlerine karşı gösterdiği tepkidir. Bu tür değişiklikler sırasında generatörün stator akımları, elektriksel sistemin kararlılığını etkileyecek şekilde tepki vermesine sebep olmaktadır. Yüksek SCR değerine sahip bir generatör, genellikle daha yüksek kararlılık göstermektedir. Çünkü yüksek SCR, generatörün yük değişimlerine karşı daha az hassas olduğu anlamına gelmektedir. Ancak düşük SCR, generatörün daha çabuk kararsız hale gelmesine yol açmakta ve bu da geçici zaman kararlılığını olumsuz

etkilemektedir. İdeal olarak, yüksek SCR ve x_d uygun değerleri, generatörün geçici zaman kararlılığını iyileşmesine sebep olmaktadır. Bu iki parametrenin optimizasyonu, generatörün şebekedeki geçici bozulmalara karşı daha dayanıklı hale gelmesine olanak tanımaktadır.

3.3. Uyarım Sistemleri ve Tavan Gerilimleri

Geçici zaman kararlılığını korumak ve uyarım akımının kontrolünü hızlı sağlayabilmek için gerilimin kontrol edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek tavan uyarım geriliminin sağlanabilmesi, uyarım sisteminin düşük bir elektriksel zaman sabitine sahip olmasını gerektirmektedir. Bu durum, sistemin daha hızlı tepki verebilmesi ve geçici rejimlerde kararlılığın korunabilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu durum ise hızlı uyarım akım kontrolü sağlamaktadır. Genellikle generatör tasarımında tavan gerilimleri 1,6 ile 3,0 p.u. arasında tercih edilmektedir. Yüksek değerli tavan gerilimi uyarım sisteminin yalıtımını, büyüklüğünü ve maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir [38]. Fırçasız AA uyarıcıların ve statik uyarıcıların zaman sabitleri çok düşük değerde olmamaktadır. AA fırçasız uyarıcılarla uyarım akımı kontrol etmek maksimum 50 milisaniye de yapılabiliyorken statik uyarıcılarla bu zaman daha kısa sürede gerçekleştirilmektedir. Tersine statik uyarıcılar nadiren de olsa ayrı bir güç kaynağından beslenmelerine rağmen genellikle direk olarak generatörün terminallerindeki gerilimden beslenmektedirler. Sonuç olarak terminal uçlarındaki gerilim değeri düştüğü zaman statik uyarıcı hızla devreye girerek uyarım akımını artırmaktadırlar. Fırçalar, kayma, bakım, mekanik hatalar açısından düşünüldüğünde statik uyarıcılar da sınırlandırılırlar.



Resim 3.1. Rotor yapısı (uyarım sistemine ait bileşenlerin yerleşimi)

3.4. Negatif Faz Sırası Gerilimi ve Akımları

Şebeke kodları negatif dizi voltaj bileşenini %1 oranında sınırlama eğilimindedirler. Üretici ve bağlantı sağlayıcısı arasındaki önceden anlaşmaya bağlı olarak %2'ye kadar olan pikler kısa süreli olarak kabul edilirler. Tasarlanan senkron generatör, negatif dizi stator akımının ürettiği rotor sönümleyici kafesinde, uyarma sargısında ve stator sargısında oluşan ek kayıplara dayanmaktadır [11].

3.5. Senkron Generatörde Harmonik Bozulma

Senkron generatörlerin bağlı olduğu yüksek gerilimli güç sistemlerinde, şebeke kodları 400 kV seviyelerinde THD sınırını %1,5, 275 kV seviyelerinde ise %2 olarak tanımlamaktadır. Bununla birlikte, sistem esnekliği ve artan harmonik yüklemeler göz önüne alındığında, bu sınırların gerilim harmonik bozulması açısından %3 ila %3,5 düzeyine çıkarılması önerilmektedir [45]. Senkron generatör çıkışlarında gözlemlenen gerilim THD'si, sistem empedansları üzerinden akım THD'sine dönüştürülmektedir. Ayrıca, harmonik bileşenlerin sistem üzerindeki etkileri, ters reaktans değerleri aracılığıyla her harmonik için eşdeğer bir harmonik akım olarak modellenmektedir. Bu durum, senkron generatörlerin harmonik performans analizinde dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. [11].

3.6. Senkron Generatörün Temel Stator Geometrisinin Belirlenmesi

Rotor hacmi başına düşen kVA miktarı olarak tanımlanan çıkış güç katsayısı (C), makine güç/kutup, kutup çiftlerinin sayısı p_1 , soğutma tipi ve çoğunlukla geçmişten gelen tecrübelerle dayanmaktadır.

C makinenin manyetik ve elektriksel yüklemeleri açısından ifade edilmektedir. Elektromanyetik güçten başlayarak P_{elm} :

$$P_{elm} = 3 \cdot \frac{w_1}{\sqrt{2}} \cdot (W_1 \cdot K_{w1}) \cdot \Phi_1 \cdot I_1; w_1 = 2\pi p_1 \cdot n_n \quad (3.4)$$

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

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

Eş. 3.5’de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir. l_i ideal stator paket uzunluğu, D stator oluk veya rotor çapıdır.

Kutup başına düşen akı miktarı olarak tanımlanan Φ_1 ;

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

şeklinde ifade edilmektedir.

Eş. 3.5. ile Eş. 3.6’yı kullanarak yeni P_{elm} denklemi elde edilmektedir.

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

Çıkış güç katsayısını ise

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

Eş. 3.8’de ki gibi ifade edilmektedir. B_{g1} hava aralığı akı yoğunluğu, A_1 spesifik elektrik yüklemesi olarak tanımlanmaktadır. B_{g1} manyetik doyum noktası ile C ise güç/rotor hacmi ile orantılı olmaktadır. Orantılılık katsayısı ise $\pi/4$ ’tür [54].

Rotorda oluşan kayma gerilimi olarak tanımlanan f_t ;

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

Eş. 3.9 ile ifade edilmektedir.

Çıkış güç katsayısı C, elektromanyetik tork tarafından rotor dış yüzeyine uygulanan özgül teğetsel kuvvet ile orantılı olmaktadır. Maksimum çevresel hız olan U_{max} , belirlenen aşırı hız olan n_{max} elde edilmektedir.

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

n_{max}/n_n oranı hidrogeneratörlerde yüksek olmaktadır.

Seçilen çap, türbin tasarımında istenilen volan etkisini vermektedir. Eylemsizlik sabiti olan H,

$$H = J \cdot \left(\frac{w_1}{p_1}\right)^2 / 2S_n \quad (3.11)$$

Eş. 3.11’de ifade edilmektedir. J rotor sabiti, S_n nominal görünür güçtür.

3.7. Stator Oluk Sayısı

Stator oluk sayısı, senkron generatörlerin elektromanyetik performansını doğrudan etkileyen temel tasarım parametrelerinden biri olmaktadır. Oluk sayısının belirlenmesi, hem manyetik doyum hem de sargı düzeniyle uyumlu şekilde ele alınmalı, optimum verim ve minimum harmonik bozulma hedeflenerek seçilmektedir.

Stator oluk sayısı N_s ,

$$N_s = 2p_1 \cdot q \cdot m \quad (3.12)$$

Eş. 3.12’de ifade edilmektedir. p_1 kutup çifti, m faz sayısı, q kutup başına faz başına oluk sayısıdır.

Turbo generatörler için $2p_1 = 2, 4$; $q > 4 - 6$ ’dır. Büyük güçlü hidrogeneratörlerde ise q değeri Eş. 3.13’deki gibi kesirli olabilmektedir.

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

Büyük güçlü hidrogeneratörlerde stator sargıları tek sargı baralardan oluştuğundan oluk sayısı N_s üç faz için sargı sayısına eşit olmaktadır.

$$N_s = 3 \cdot a \cdot W_a \quad (3.14)$$

a değeri paralel kol sayısı, W_a yol/faz başına sarım sayısıdır. Faz başına gerilim olan E_t ;

$$E_t = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_n \cdot (W_a \cdot K_{w1}) \cdot \Phi_1 \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

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

Sargı faktörü K_{w1} ise;

$$K_{w1} = K_{q1} \cdot K_{y1} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

$$K_{q1} \approx \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) / q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6q}\right) ; K_{y1} = \sin\left(\frac{y\pi}{\tau 2}\right) \quad (3.17)$$

y/τ sargı açıklığı / kutup adımı,

Kesirli için $q = (bd + c)/d$,

$$E_t \approx V_1 \cdot \sqrt{(1 + x_{sl}(2\sin\varphi_n + x_{sl}))} \approx (1.07-1.1) \cdot V_n \quad (3.18)$$

Senkron reaktans x_{sl} genellikle 0,15 değerinden küçük tercih edilmektedir.

$$x_{sl} \approx x_d' \cdot x(0,35 - 0,4) \quad (3.19)$$

x_{sl} değeri yaklaşık olarak belirlenerek tasarımın ilerleyen süreçlerinde tekrar hesaplanmaktadır.

Anma akımı I_n ;

$$I_n = \frac{P_n}{3 V_n \cos \varphi_n} \quad (3.20)$$

φ_n anma güç faktörü açısıdır.

Rotor çapına bağlı olarak stator parça sayısı;

$$\begin{aligned} N_K &= 2 \text{ için } D < 4 \text{ m} \\ N_K &= 4 \text{ için } D = 4 \div 8 \text{ m} \\ N_K &= 6 \text{ (8) için } D > 8 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.21)$$

şeklinde bölümlere ayrılmaktadır.

Kesirli sargılar için simetrik bir tasarım $q = b + (c/d)$, q değeri $2p_1/d$ tam sayı tercih edilmektedir.

$$d \leq 2p_1/a \quad (3.22)$$

Yüksek harmonik dağıtım faktörünün küçük olması için d değeri büyük seçilmektedir.

$$(3c \pm 1)/d = \text{tamsayı}$$

Böylece en iyi c/d değerleri;

$c/d = 2/5, 3/5, 2/7, 5/7, 3/8, 5/8, 3/10, 7/10, 4/11, 7/11, 4/13, 9/13 \dots$ olmaktadır.

$d = 5, 7, 11, 13, \dots$ için ;

$$(6c \pm 1)/d = \text{tamsayı}$$

$c/d = 1/5, 4/5, 1/7, 6/7, 2/11, 9/11, 2/13, 11/13, \dots$

Kesirli sargılarda düşük seviyeli gürültü oluşturmak için;

$3.(b+c/d) \pm 1/d \neq$ tamsayı olmaktadır.

$c/d = \frac{1}{2}(b > 3)$ ifadesinde harmonik oluşumu engellenmektedir [54-59].

3.8. Stator Nüve Tasarımı

Stator nüvesi, senkron generatörün manyetik devresinin temel bileşeni olup, elektromanyetik enerji dönüşüm sürecinde manyetik akının yönlendirilmesi ve kayıpların en aza indirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Stator nüve tasarımında ilk olarak stator iç çapı D_{is} ;

$$D_{is} = D + 2g \quad (3.23)$$

eşitliği ile bulunmaktadır.

Bu ifadedeki hava aralığı belirlenirken;

- SCR oranı bilinmeli,
- Standartlara uyacak şekilde hava aralığı harmoniklerinin indüklenecek zamana bağlı gerilimdeki harmonikleri sınırlandırılmalı,
- Büyük hava aralığında uyartım sargılarının büyümesine ve dolayısıyla kayıpların artmasına yol açacağı bilinmeli,
- Mekanik ve elektromanyetik limitlerin bilinmesine dikkat edilmektedir.

SCR değerini 0,4 ile 0,5 arasında bir değer seçilmesi daha küçük hava aralıklarında makinenin çalışmasını sağlayarak uyartım sargılarının önemi artırılmış ve boyutu düşürülmüş olmaktadır.

x_d değerini önceden belirlemek hava aralığının belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.

$$x_d = x_{sl} + x_{ad} \quad (3.24)$$

x_{sl} değeri belirlenirken 0,1-0,15 arasında tercih edilmektedir.

Mıknatıslanma reaktansı olan x_{ad} ;

$$X_{ad} = K_{ad}(6 \cdot \mu_0 \cdot w_1 \cdot (W_a K_{w1})^2 \cdot \tau \cdot l_i) / (\pi^2 \cdot g \cdot K_c \cdot (1 + K_{sd})) = x_{ad} (V_n / I_n)_{faz} \quad (3.25)$$

$$(I_n)_{faz} = S_n / 3(V_n)_{faz} \cos \varphi_n \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

d eksen katsayısı olan K_{ad} ;

$$K_{ad} \approx (\tau_p / \tau) + (1/\pi) \cdot \sin(\tau_p \cdot \pi / \tau); \tau_p: \text{rotor kutup açıklığı} \quad (3.27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Genellikle homojen hava aralığı için $\tau_p / \tau \approx 0,62-0,75$, $K_{ad} > 0,9$ değer aralıkları tercih edilmektedir. Stator nüve yığımındaki radyal kanalların etkisi tam olarak bilinmediğinden Carter katsayısı olan K_c , genellikle 1,15'ten küçük seçilmektedir.

Hava aralığı için genel ifade;

$$g = 4.0 \cdot 10^{-7} \frac{A \cdot \kappa}{(x_d - 0.1) B_{g1}} \quad (3.28)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. A lineer akım yükleme değeri (A/m), B_{g1} hava aralığı akı yoğunluğu, τ kutup adımıdır. İstenilen x_d değeri sağlanmadığında ya da mekanik, emk harmonikleri, ek kayıp kısıtlamalarından bazıları karşılanmadığında hava aralığı değeri değiştirilmektedir.

Stator terminal gerilimi seçilirken izolasyon maliyetine, izolasyon bakım maliyetine ve transformatör, güç anahtarları ve koruma maliyetlerine dikkat edilmektedir [42-47].

Stator terminal gerilimi belirlenirken genellikle generatör anma gücünden yararlanılır ve genellikle gerilim değeri artan güç ile birlikte artmaktadır.

$$\begin{aligned}
 S_n < 20 \text{ MVA için } V_{nl} &\approx 6 - 7 \text{ kV} \\
 S_n &\approx (20 - 60) \text{ MVA için } 10-11 \text{ kV} \\
 S_n &\approx (60 - 75) \text{ MVA için } 13-14 \text{ kV} \\
 S_n &\approx (175 - 300) \text{ MVA için } 15-16 \text{ kV} \\
 S_n > 300 \text{ MVA için } &16-28 \text{ kV}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

3.9. Stator Paket (Yığın) Uzunluğu

Toplam stator nüve uzunluğu olan l_1 ;

$$l_1 = l - n_c \cdot b_c \tag{3.30}$$

b_c soğutma kanal genişliği, n_c radyal kanaldır.

İdeal paket uzunluğu ise

$$l_i = \left[1 - n_c \cdot b_c' - 2a' \cdot \left(1 - \frac{g}{g+c'/2} \right) \right] \cdot k_{fe} \tag{3.31)}$$

ifadesi ile bulunmaktadır.

b_c' değeri hava aralığına bağlı olarak b_c değerinden daha küçük eşdeğer bir soğutma kanalı genişliğidir. Hava aralığı ne kadar büyükse b_c'/b_c değeri o kadar küçük olmaktadır. Genellikle $b_c = 8 - 12\text{mm}$, $l_s = 45 - 60\text{mm}$ aralığında tercih edilmektedir. Büyük saçak akısından dolayı hava aralığı b_c' 'den büyük olduğu zaman $b_c'/b_c < 0,2 - 0,3$ olmaktadır. $K_{Fe} \approx 0,93 - 0,95$ değerine göre belirlenmektedir. Transpozisyon, her bir temel iletkenin, paket uzunluğu boyunca diğer iletkenlerin tüm pozisyonlarına yerleştirilmesini sağlamaktadır. Paket uzunluğu boyunca transpozisyon adımı 30 mm'nin üzerinde olmaktadır ve bir dönüş yapmak için kullanılan temel iletken sayısı kadar transpozisyon olmaktadır [45].

Çeşitli yalıtım katmanlarının kalınlığı terminal gerilimine ve oluk sayısına bağlı olmaktadır.

$$\begin{aligned}
\frac{W_c}{b_s} &\approx 0,6 - 0,7 \\
\frac{b_s}{\tau_s} &\approx 0,35 - 0,55 \\
\tau_s &= \pi \cdot D_{is} / 6p_1q_1 \\
\frac{h_s}{b_s} &\approx 4 - 10
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Toplam oluk alanı olan A_{slot} oluk başına toplam akımın bilinmesi ile hesaplanmaktadır.

$$A_{slot} = \frac{6 \cdot W_a \cdot I_n}{N_s \cdot j_{cos} \cdot K_{fill}} ; A_{slot} = b_s \cdot h_s \tag{3.33}$$

j_{cos} tasarım akım yoğunluğu, K_{fill} oluk doluluk faktörüdür.

Stator boyunduruk yüksekliği olan h_{ys} ;

$$h_{ys} = \frac{B_{g1}}{B_{y1}} \cdot \frac{\tau}{\pi} ; B_{y1} = 1,3 - 1,7 \text{ T} \tag{3.34}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır.

Oluklar dikdörtgen olduğundan dişler daha çok trapezoidaldir. Bu nedenle diş akısı yoğunluğu olan B_{t1} radyal yön boyunca değişir. B_{tmax} değeri,

$$B_{tmax} \approx B_{g1} \cdot \frac{\tau_s}{\tau_s - b_s} \approx 1,6 - 2,0 \text{ T} \tag{3.35}$$

şeklinde bulunmaktadır [49-54].

3.10. Çıkık Kutuplu Rotor Tasarımı

Hidrogeneratörler ve endüstriyel generatörlerin çoğu çıkık kutuplu rotorlardan oluşmaktadır.

Rotor kutbunun altındaki hava aralığı kutbun kenarlarına doğru büyümektedir.

Genellikle uyartım akımı tarafından oluşturulan hava aralığı akı yoğunluğu indüklenecek emk'nın daha fazla sinüzoidal olmasını sağlamaktadır ($g_{max}/g = 1,5 - 2,5$).

İdeal $g(\theta)$;

$$g(\theta) = \frac{g}{\cos(\theta_{p1})} \quad (3.36)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Rotor kutup yayı yarı çapı R_p ,

$$R_p = \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{4 \cdot D \cdot (g_{max} - g)}{b_p^2}\right)} < \frac{D}{2} \quad (3.37)$$

merkez ve maksimum hava aralığı değerleri, rotor çapı ve rotor kutup gövdesi değerleri kullanılarak Eş. 3.37'de ki gibi hesaplanmaktadır.

Rotor kutbunun toplam ideal uzunluğu;

$$l_{pi} = l - (0,05 - 0,08) + l_{ep} > l \quad (3.38)$$

Rotorun etkin nüve uzunluğu;

$$l_{pFe} \approx l_{pi} \cdot K_{Fe} \quad (3.39)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Laminasyon kalınlığı 1 mm'den 1,8 mm'ye kadar olanlar için laminasyon yığın faktörü olan $K_{Fe} \approx 0,95 - 0,97$ arasında tercih edilmektedir.

Rotorun toplam uzunluğu l_{pi} , stator paket uzunluğu olan l 'den daha büyük olmaktadır. Böylece rotor kutup gövdesindeki akı yoğunluğu daha da azaltılmış olmaktadır [40, 48-57].

$$W_p \approx (0,45 - 0,55) \cdot \tau \quad (3.40)$$

3.11. İndüktanslar ve Dirençler

Senkron mıknatıslanma indüktansı ve reaktansı olan L_{ad} (X_{ad}) ve L_{aq} (X_{aq});

$$\begin{aligned} L_{ad} &= L_m \cdot \frac{(K_{ad} \cdot K_f)}{1 + K_{sd} e} X_{ad} = \omega_1 \cdot L_{ad} ; x_{ad} = X_{dm} \cdot \frac{I_n}{V_n} \\ L_{aq} &= L_m \cdot \frac{(K_{aq} \cdot K_f)}{1 + K_{sq} e} X_{aq} = \omega_1 \cdot L_{aq} ; x_{aq} = X_{qm} \cdot \frac{I_n}{V_n} \\ L_m &= \frac{6\mu_0 \tau \cdot l_i (W_1 \cdot K_{w1})^2}{\pi^2 p_1 g \cdot K_c} \end{aligned} \quad (3.41)$$

şeklinde elde edilmektedir.

Stator faz senkron indüktansı ve reaktansı olan $L_{sl}(X_{sl})$;

$$L_{sl} = \lambda_{sd} + L_{szl} + L_{sel} + L_{sdl} X_{sl} = \omega_1 \cdot L_{sl} ; x_{sl} = L_{sl} \cdot \omega_1 \cdot \frac{I_n}{V_n}$$

L_{ssl} oluk kaçağı, L_{szl} hava aralığı kaçağı, L_{sel} uç bağlantı kaçağı, L_{sdl} diferansiyel harmonik kaçağıdır. L_{sl} değeri başka bir formülle ifadesi ise,

$$L_{sl} \approx 2\mu_0 \cdot \frac{W_1^2 \cdot l}{p_1 q} (\lambda_{ss} + \lambda_{sz} + \lambda_{se} + \lambda_{sd}) \quad (3.42)$$

şeklinde ifade edilmektedir [33-45].

Oluk senkron permeansı oranı,

$$\lambda_{ss} = \frac{1}{4} \left[\frac{h_{sl} + h_{su} \cos^2 \gamma_K}{3W_{ss}} + \frac{h_{su}}{W_{ss}} + \frac{h_{su} \cos \gamma_K}{W_{ss}} + \frac{h_i}{W_{ss}} + (1 + \cos \gamma_K)^2 + \left(\frac{h_{os}}{W_{ss}} + \frac{h_w}{W_{ss}} + \frac{h_o}{W_{ss}} \right) \right] \quad (3.43)$$

$$\lambda_{sz} = \frac{1}{\pi} \cdot l_{er} \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2g \cdot K_c}{W_{ss}} \right)^2}}{2} + \frac{g \cdot K_c}{W_{ss}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} \frac{2g \cdot K_c}{W_{ss}} \right) \quad (3.44)$$

$$\lambda_{se} \approx 0.34 \cdot \frac{g}{l_i} \cdot (l_{ec} - 0.64y) \quad (3.45)$$

$$\lambda_{sd} = \sigma_{dso} \cdot \frac{3}{\pi^2} \cdot \frac{\tau \cdot q}{K_c \cdot g} \cdot \frac{l_i}{l} \quad (3.46)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Harmonik permeans fark oranı,

$$\sigma_{dso} \approx \frac{2\pi^2}{9K^2_{KW1}} \cdot \frac{5g^2+1-\frac{3}{4}\left(1-\frac{y}{\tau}\right) \cdot \left[9q^2\left(1-\frac{y^2}{\tau^2}\right)+1\right]}{12q^2} \quad (3.47)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

3.12. Damper Sargı Parametreleri

Damper sargılar, senkron generatörlerde rotor salınımlarını sönmölemek, ani yük değışimlerine karşı sistem kararlılığını artırmak ve asenkron çalışma koşullarında rotorun korunmasını sağlamak amacıyla kullanılan önemli bir yardımcı yapıdır. Damper sargısı senkron reaktansı,

$$x_{Dl} \approx x_{ad} \cdot \left[\frac{K_{ad}}{\pi \cdot K^2_D} \cdot \frac{a_b \cdot N_2 \cdot (1-K_b)}{4 \sin^2 \frac{a_b}{2}} \cdot \left(2 + \frac{\cos N_2 a_b - K_b \cos a_b}{1-K_b} \right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \lambda_{De} \cdot K_C \cdot g}{l_i} \right) - 1 + \frac{N_2 \cdot (1-K_b) \cdot K_{ad} \cdot l_{pi} \cdot g \cdot K_C}{l_i \cdot \tau \cdot K^2_D} \cdot (\lambda_{SD} + \lambda_{ZD}) \right] \quad (3.48)$$

$$a_b = \frac{\pi \cdot \tau_b}{\tau} \quad (3.49)$$

$$K_b = \frac{\sin(N_2 a_b)}{N_2 \sin a_b} \quad (3.50)$$

$$K_D \approx \frac{N_2}{\pi} (1 - K_b) \quad (3.51)$$

$$\lambda_{De} \approx \frac{3.32}{\pi} \cdot \log \frac{2.35 \cdot D_{halaka}}{(a+2b)} \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Zigzag ve damper oluk senkron permeansları,

$$x_{Ql} = x_{ql} \cdot \left\{ \frac{K_{ad}}{\pi \cdot K^2_D} \cdot \frac{a_b \cdot N_2}{4 \sin^2 \frac{a_b}{2}} \cdot \left[\cos N_2 a_b - K_b \cos a_b + \frac{a_i \pi + \pi(1-a_i) \left(\frac{g K_C}{2 g_{max}} \right)}{N_2 \cdot a_b} \cdot x(1 + 2 \cdot \lambda_{De} \cdot \frac{g \cdot K_C}{l_i}) \right] - 1 + \frac{N_2 \cdot (1+K_b) \cdot K_{ad} \cdot l_{pi} \cdot g \cdot K_C}{l_i \cdot \tau \cdot K^2_Q} (\lambda_{SQ} + \lambda_{ZQ}) \right\} \quad (3.53)$$

$$K_Q \approx \frac{N_2}{\pi} \cdot (1 + K_b) - \frac{4}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{g \cdot K_C}{g_{max}} \right) \cdot \cos \frac{a_i \pi}{2} \cdot \frac{\sin \left(\left(\frac{N_2}{2} \right) \cdot a_b \right)}{2 \sin(a_b/2)} \quad (3.54)$$

şeklinde ifade edilmektedir [45].

3.13. Hidrogeneratör Geçici Zaman Parametreleri ve Zaman Sabitleri

Hidrogeneratörün geçici zaman parametreleri ve zaman sabitleri için kritik parametreler;
d-ekseni geçici zaman reaktansı olan x'_d ;

$$x'_d = x_{sl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fl}}} \text{ (p.u.)} \quad (3.55)$$

d- eksen damper kafesi geçici zaman reaktansı x'_D ;

$$x'_D = x_{Dl} + \frac{1}{(1/x_{ad}) + (1/x_{fl})} \text{ (p.u.)} \quad (3.56)$$

d-q eksen alt-geçici zaman reaktansı x''_d ;

$$x''_d = x_{sl} + \frac{1}{(1/x_{ad}) + (1/x_{Dl}) + (1/x_{fl})} \text{ (p.u.)} \quad (3.57)$$

q- eksen için x''_q ;

$$x''_q = x_{sl} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_{aq}}\right) + \left(\frac{1}{x_{ql}}\right)} \text{ (p. u.)} \quad (3.58)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Toplam uyartım zaman sabiti T_F ;

$$T_F \approx \frac{x_{ad} + x_{fl}}{r_f \cdot \omega_n} \text{ (saniye)} \quad (3.59)$$

d- eksen kısa devre zaman sabiti T'_d ;

$$T'_d = T_f \cdot \frac{x'_d}{x_d} \text{ (s); } x_d = x_{sl} + x_{ad} \quad (3.60)$$

d- eksen alt-geçici zaman sabiti T''_d ;

$$T''_d = T_D \frac{x''_d}{x'_d} = \frac{x'_D}{r_D \cdot \omega_n} \text{ (saniye)} \quad (3.61)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

q- ekseni olarak ele alındığında zaman sabiti T_Q ;

$$T_Q \approx \frac{x_{Ql} + x_{aq}}{r_Q \cdot \omega_n} \text{ (saniye)} \quad (3.62)$$

q- ekseni alt-geçici zaman sabiti T''_q ;

$$T''_q = T_Q \cdot \frac{x''_q}{x_q} = \frac{(x_{Ql} + x_{aq})}{(x_{sl} + x_{aq})} \cdot \frac{x''_q}{r_Q \cdot \omega_n} \text{ (saniye)} \quad (3.63)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

3.14. Elektromanyetik Alan Zaman Harmonikleri

Güç sistemine bağlanıldığı zaman generatörün iyi performans gösterebilmesi için açık devre gerilim dalga biçiminin sinüs dalgasına çok yakın olması gerekmektedir. Şebeke kodları yaklaşık 400 kV'da ve yaklaşık 275 kV güç sistemlerinde sırasıyla %1,5 ve %2'lik THD_v belirtilmektedir. Bu değerlerin gerilim THD'sinde %3 (3,5)'e yükseltilmesi için önerilerde bulunmaktadır. THD değerini azaltma olanaklarını analiz etmek için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır.

$$E = \omega_1 \cdot \sum_{v=1}^{\infty} K_{Wv} \cdot W_a \cdot \Phi_v \quad (3.64)$$

$$\Phi_v = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tau}{v} \cdot B_{gv} \cdot l_i \quad (3.65)$$

$$K_{Wv} = K_{dv} \cdot K_{yv} = \frac{\sin(\theta\pi/6)}{q \cdot \sin(\theta\pi/6q)} \cdot \sin\left(\frac{v \cdot y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.66)$$

Kesirli q sargıları için;

$$q = b + c/d = (bd + c)/d$$

$$K_{dv} = \frac{\sin(\theta\pi/6)}{(bd + c) \cdot \sin(\theta\pi/6(bd + c))} \quad (3.67)$$

olmaktadır.

Böylece hava aralığı akı yoğunluğunda harmonikler meydana gelmektedir. Azaltmak için ise;

- Çıkık kutuplu rotor için τ_p/τ oranı ayarlanmaktadır.
- Çıkık kutuplu rotor merkezinden kenarlara doğru hava aralığını g değerinden g_{max} değerine değiştirilmektedir.
- Düzgün hava aralığına sahip rotor kutupları τ oranında her bir kutup aralığı τ_p şeklinde ayarlanmaktadır.

Sabit hava aralığı için uyarma hava aralığı akı yoğunluğundaki harmonik katsayıları;

$$K_{fv} \approx \frac{4}{\pi \cdot v} \sin\left(v \cdot \frac{\tau_p}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \text{ (belirgin kutuplar)} \quad (3.68)$$

$$K_{fv} \approx \frac{4}{\pi^2 \cdot v^2} \frac{\cos\left(v \cdot \frac{\tau_p}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{1 - v \cdot \frac{\tau_p}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \text{ (belirsiz kutuplar)} \quad (3.69)$$

şeklinde ifade edilmektedir [45, 53-62].

3.15. Oluk Kaynaklı Zaman Harmonikleri

Rotor manyeto-motor kuvvetinin temel bileşeni F_{f1} , stator referansına göre;

$$F_{f1}(\theta_s) = F_{f1m} \cdot \sin(p_1 \cdot \theta_s - \omega_r \cdot t) \quad (3.70)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hava aralığı manyetik iletkenlik değişimi;

$$P_{gy1} = \frac{\mu_0 \cdot K_{fm}}{g} \cdot \sin v_1 N_s \theta_s \quad (3.71)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu B_g ;

$$B_g = P_{gy1} \cdot F_{f1} \quad (3.72)$$

$$B_g = \frac{\mu_0 \cdot K_{fm}}{g} \cdot F_{f1m} \cdot \{\cos[(v_1 N_s - p_1)\theta_s + p_1 \cdot \omega \cdot t] - \cos[(v_1 N_s - p_1) - p_1 \cdot \omega \cdot t]\}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Rotor çubuğu kaynaklı interpolar akımlar kendi mmk'lerini üretmektedirler.

$$F_{1d} = K_{1d} [\cos(p_1 \theta_s - v_1 N_s \omega t) - \cos(p_1 \theta_s + v_1 N_s \omega t)] \quad (3.73)$$

Mmk hava aralığında kendi reaksiyon akı yoğunluğunu üretmektedirler.

$$B_{d1} = K_{1d} \cdot [\cos(p_1 \theta_s - (v_1 N_s + p_1) \omega t) - \cos(p_1 \theta_s - (v_1 N_s + p_1) \omega t)] \quad (3.74)$$

Bu akı yoğunluğunun f' frekansında, emk zaman harmonikleri tarafından üretildiği anlaşılmaktadır [45].

$$f' = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \left(\frac{v_1 N_s}{p_1} \pm 1 \right) \quad (3.75)$$

3.16. Kayıplar ve Verim

Senkron generatörlerde kayıplar dört ana başlıkta incelenmektedir.

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

Stator sargılarındaki kayıplar bakır kaybı, rotordaki kayıplar ise uyartım bakır kaybı olarak tanımlanmaktadır. Histeresis ve eddy akım kayıpları nüve kayıplarıdır. Mekanik kayıplar; fırçalar, damper sargıları ve yataklardan kaynaklanan kayıplardır.

Verim ise çıkış elektrik gücünün giriş mekanik gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_{HG} = \frac{(P_2)_{elektrik}}{(P_1)_{mekanik}} = \frac{(P_2)_{elektrik}}{(P_2)_{elektrik} + \Sigma \text{ kayıplar}} \quad (3.76)$$

Verim hesabı %25, %50, %75, %100 ve %125 beş farklı yük altında hesaplanmaktadır. Soğutma sistemleri maliyet artışına sebep olmasına rağmen verimi önemli ölçüde artmaktadır. Verim mekanik kayıp, nüve kaybı, uyarıcı kaybı ve ek kayıplar eklenerek;

$$\eta_{HG} = \frac{K_{load} \cdot S_n \cdot \cos \varphi}{K_{load} \cdot S_n \cdot \cos \varphi + p_{feo} + p_{mec} + p_{scn} \cdot K^2_{load} + p_{exch} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{fn}}\right)^2 + p_{brush} \cdot \left(\frac{I_f}{I_{fn}}\right) + p_{stray}} \quad (3.77)$$

şeklinde ifade edilmektedir [59].

4. SENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Senkron generatörlerin elektromanyetik davranışlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve performans parametrelerinin doğrulukla elde edilebilmesi için SEA dayalı nümerik modelleme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Ansys Maxwell; akışkanlar dinamiği, yapısal ve elektromanyetik sistem modelleme gibi birçok disiplini destekleyerek, 3 boyutlu ve 2 boyutlu çoklu fizik analizlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan ve elektromanyetik ile elektromekanik cihazların tasarımı ve analizinde etkin olarak kullanılan bir yazılım türüdür. Devre analizlerinde kullanılmak için lineer olmayan bir devreye ilişkin formüller otomatik olarak oluşturulmaktadır. Kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç şartları ve sınır koşulları doğrultusunda Maxwell denklemleri kullanılarak analizler sınırlı uzay geometrisinde sonuç alınmaktadır. Ansys Maxwell’de seçtiğimiz materyale, geometriye ve istenilen çıkışa uygun olarak otomatik uygulanabilir çözüm ağı (mesh) olarak adlandırılan bir ağ örgüsünde üçgen ve dörtgen küçük parçalarda işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu mesh tekniği yüksek doğrulukla hacimsel teknikleri kullanılmaktadır. Geniş çözüm ağına sahip yüksek verimli interaktif bir yazılım olan Ansys Maxwell programı, manyetik ve elektriksel temelli analizler için SEA metodu kullanılır ve Maxwell denklemleri kullanılarak sonuca ulaşılmaktadır. Maxwell’de geometrileri tasarımcının oluşturmasına ek olarak uygun formatta oluşturulmuş olan farklı çizim araçları ile oluşturulmuş 3 boyutlu veya 2 boyutlu şekilde Maxwell ortamına aktarılmaktadır. Program içeriğinde elektrik alan çözümleri, manyetik alan çözümleri, zamana bağlı çözümler, frekansa bağlı çözümler, eddy current, zaman bağlı çözümler gibi pek çok çözüm seçeneği sunmaktadır. Diğer elektro manyetik çözüm yapan programlara göre Maxwell, kendinden uyarlamalı bir sonlu elemanlar ağ örgüsü (Auto-adaptive meshing) oluşturmaktadır.

Maxwell yazılımında analizin çözüm aşamaları,

- Ön işleme (pre processing),
- Analizi çalıştırma (run analysis),
- Çözüm ağı oluşturma (meshing),
- Çözüm (solve)

- Sonuçların elde edildiği işlem sonrası adı verilen (post processing) kısımlardan oluşmaktadır.

Çözücünün seçildiği, modelin sınır şartlarının tanıtılması gibi işlemlerin yapıldığı, sonlu bölgenin oluşturulduğu ve malzeme tanımlamalarının yapıldığı yer ön işleme kısmıdır. Analiz aşamasına geçilmeden önce modelde yapılan tanımlamalar kontrol edilmektedir. Çözüm ağı oluşturma kısmında ise SEA kullanılarak mesh bölgelerinin tanımları yapılmaktadır. Çözüm denklemleri hesaplanarak çözüm aşaması tamamlanmış olmaktadır. Modelin tork, güç, gerilim, akım ve manyetik alan yoğunluğu gibi faydalı bilgilerin alındığı kısım ise sonuç bölümünden oluşmaktadır.

Elektromanyetik alanları içeren beklenmeyen durumlara karşı, uyarlanabilir çözüm ağı tekniğinde belirli bir iterasyon sayısı ve elektromanyetiğin temel denklemleri olan Maxwell denklemlerinin çözümünü içeren bir hata payı belirlenmektedir. Belirlenen hata payı, programın belirlediği hata payından düşükse program sonlu elemanlar ağı yapısını iyileştirme işlemine başlamakta ve uyguladığı sonlu elemanlar ağını daha sık kurmaya devam etmektedir. Doğru çözüme ise belirlenen hata oranının altında kalındığında veya eşit olduğunda ulaşılmaktadır. Grafiksiz sonuçlar analiz sonucunda alınabilir hale gelmektedir. Tork, kuvvet, indüktans, rezistans, kapasitans gibi hesaplamaların yapılabildiği gibi manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan, akım yoğunluğu, elektrik alan, gerilim gibi veriler skaler ve vektörel olarak elde edilmektedir [63-66].

4.1. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Analitik Tasarımı

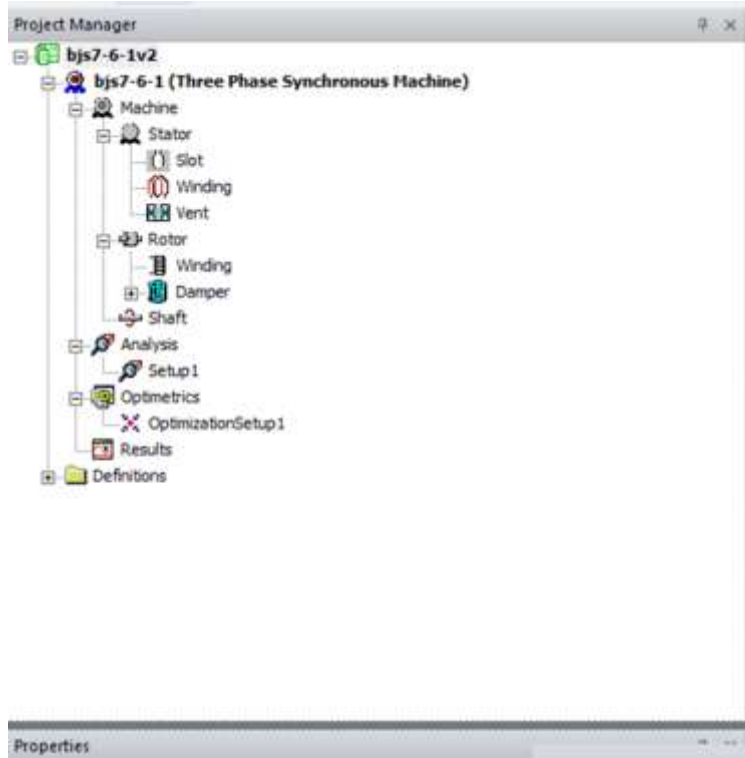
Ansys RMXprt yazılımı aracılığıyla çözümlenecek elektrik makinasına ilişkin gerekli tüm parametreler, ilgili sekmelerdeki veri giriş alanına eksiksiz biçimde girilerek model oluşturulmaktadır. AA ve DA döner makine tiplerinin yer aldığı makine seçim ekranından makine tipi belirlenmektedir. Seçilen makine türüne göre otomatik olarak model, boyut ve mekanik özellikler tanımlanmaktadır.

Programın arayüzü;

- Proje yöneticisi bölümü,
- Özellikler arayüzü,

- Mesaj yöneticisi ekranı,
- İlerleme gösterge ekranı
- Model pencereleri olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır.

Tasarlanacak makinenin alt bileşenlerinin tanımlandığı, analiz ve kurulum ayarlarının belirlendiği pencere proje yöneticisidir.



Şekil 4.1. Proje yönetici arayüzü

Proje başlığı ve makine ana bileşenlerini içeren açılır liste, pencere listesinin içinde yer almaktadır. Makine bölümünde, stator, rotor ve şaft özellikleri tanımlanmaktadır. Analiz kurulum parametrelerinin girildiği alan analiz kısmı olarak adlandırılmaktadır. Değişken tanımlamalarının yapıldığı ve çoklu analizlerin gerçekleştirildiği bölüm olarak tanımlanmıştır. Makine karakteristiklerinin tanımlanıp grafik ve verilerinin elde edildiği bölüm ise sonuçlar kısmı olarak isimlendirilmiştir [63-66].

Makine bileşenlerinin niteliklerini görüntüleme ve düzenleme işlemi, proje yöneticisi üzerinden sağlanan bir arayüz aracılığıyla gerçekleştirilen makine özellik kontrol penceresi ile mümkün olmaktadır. Tasarım sürecinde belirlenen üç fazlı senkron generatörün kutup

sayısı 6 olarak belirlenmiş olup, bu özellik Şekil 4.2'deki özellik penceresinde gösterilmektedir.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Machine Type	Three Phase Synchronous Machine				☒
Number of Poles	6			Number of poles of the machine	☐
Frictional Loss	2600	W	2600W	The frictional loss measurement	☐
Windage Loss	0	W	0W	The windage loss measurement	☐
Reference Sp...	1000	rpm		The reference speed at...	☐

Show Hidden

Tamam İptal Uygula

Şekil 4.2. Makine özellik penceresi

Stator dış çapı, iç çap, paket boyu ve çelik yığın faktörü gibi parametrelerin yer aldığı, stator çeliği üzerine işlenecek oluk sayısı, oluk şekli ve nüve uzunluğu boyunca oluk kaykısı açısı (skew) tanımlamalarının yapıldığı sekme stator özellik penceresidir. Bu ara yüzde stator çelik materyalinin türü tanımlanmış malzeme kütüphanesinden seçilebileceği gibi malzemenin B-H verileri, nüve kayıpları, kütle yoğunluğu gibi parametreleri biliniyorsa yeni materyal tanımlaması da yapılabilmektedir [54-57]. Tasarlanan senkron generatörün dış çapı 760 mm, iç çapı 568 mm, stator paket uzunluğu 440 mm, yığın faktörü 0,9, oluk sayısı 72 olarak belirlenmiş olup, bu özellik Şekil 4.3'deki stator özellik penceresinde gösterilmektedir.

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Outer Diam...	760	mm	760mm	Outer diameter of t...	☐
Inner Diam...	568	mm	568mm	Inner diameter of t...	☐
Length	440	mm	440mm	Length of the stator...	☐
Stacking Fa...	0.9			Stacking factor of t...	☐
Steel Type	JFE_Steel_50JN400			Steel type of the st...	☐
Number of ...	54			Number of slots of ...	☐
Slot Type	3			Slot type of the stat...	☐
Lamination ...	1			Number of laminati...	☐
Press Boar...	0	mm		Magnetic press bo...	☐
Skew Width	0		0	Skew width measu...	☐

Şekil 4.3. Stator özellik penceresi

Stator özellik penceresinde, seçim özelliği bulunan altı adet oluk tipi yer almaktadır. Oluk genişliği parametreleri, tasarım tercihine göre otomatik tasarım kutucuğu işaretlenerek

modele uygun şekilde atanabilmektedir. Yükseklik parametreleri ise kullanıcı tarafından belirlenmekte olup, diş genişliği 13,5 mm, Hs0 0,75 mm, Hs1 2 mm, Hs2 36 mm ve Bs0 4 mm olarak belirlenmektedir.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Auto Design	☐			Auto design Hs2, Bs1 a...	☐
Parallel Tooth	☒			Design Bs1 and Bs2 ba...	☐
Tooth Width	13.5	mm	13.5mm	Tooth width for parallel	☐
Hs0	0.75	mm	0.75mm	Slot dimension: Hs0	☐
Hs1	2	mm	2mm	Slot dimension: Hs1	☐
Hs2	36	mm	36mm	Slot dimension: Hs2	☐
Bs0	4	mm	4mm	Slot dimension: Bs0	☐
Ra	0	mm	0mm	Slot dimension: Ra	☐

☐ Show Hidden

Tamam İptal Uygula

Şekil 4.4. Oluk özellikleri penceresi

Olukların katman sayısı, sargı tipi, paralel kol sayısı, bir oluktaki iletken sayısı, sargı adımı, bir iletkende bulunan damar sayısı, tel sarma genişliği, tel boyutu gibi parametreler, stator sekmesinin altında bulunan sarım özellik penceresindeki sarım sekmesinden girilmekte olup, Şekil 4.5'te sarım özellikleri gösterilmektedir.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Winding Layers	2			Number of winding layers	☐
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	☐
Parallel Branch	6			Number of parallel bran...	☐
Conductors per	10		10	Number of conductors ...	☐
Coil Pitch	12			Coil pitch measured in ...	☐
Number of Strs	2		2	Number of strands (tru...	☐
Wire Wrap	0	mm		Double side wire wrap t...	☐
Wire Size	Diameter: 3.655mm			Wire size, 0 for auto-de...	☐

☐ Show Hidden

Tamam İptal Uygula

Şekil 4.5. Sarım özellikleri penceresi

Rotor ana parametreleri olan dış çap, iç çap, rotor uzunluğu, rotor çelik tipi, yığın faktörü, kutup tipi gibi parametrelerin yer aldığı sekme rotor özellik penceresidir. Çelik tipi tanımlanmış malzeme kütüphanesinden seçilir ya da materyal ekleme özelliğinden kullanıcı kendi materyalini oluşturulmaktadır. Rotor kesit alanının, laminasyonlar arasındaki

yalıtılmış çelik alanına oranı olarak tanımlanan yığın faktörü yer almaktadır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi rotor dış çapı 560 mm, rotor iç çapı 150 mm, rotor uzunluğu 440 mm, yığın faktörü 0,96 olarak belirlenmiştir.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	560	mm	560mm	Outer diameter of the ro...	☐
Inner Diameter	150	mm	150mm	Inner diameter of the ro...	☐
Length	440	mm	440mm	Length of the rotor core	☐
Steel Type	steel_1008			Steel type of the rotor c...	☐
Stacking Factor	0.96			Stacking factor of the r...	☐

☐ Show Hidden

Tamam İptal Uygula

Şekil 4.6. Rotor özellik penceresi

Ana özellikleri tanımlanan makinede; stator iç çap, rotor iç çap, dış çap, paket boyu ve malzeme bilgilerinin özeti analiz penceresinin altındaki makine sekmesinde bulunmaktadır. Tasarlanan makinenin motor veya generatör olduğunu tanımlayan operasyon türü, sonsuz bara veya bağımsız generatör seçiminin mevcut olduğu mekanik yük tipi, makinanın mekanik veya elektriksel nominal çıkış gücü, nominal hat gerilimi, nominal hızı ve çalışma sıcaklığı gibi parametrelerin yer aldığı genel analiz kurulumu sekmesi analiz penceresinin altında yer almaktadır [63-66].

Analiz çıktıları, çözüm verisi (solution data) ekranı yardımıyla grafik ve tablo verileri olarak RMxpert çözüm tamamlandıktan sonra görüntülenmektedir.

	Name	Value	Units	Description
1	Stator Teeth Flux Density	1.24716	tesla	
2	Stator Yoke Flux Density	1.49729	tesla	
3	Rotor Shoe Flux Density	0.659979	tesla	
4	Rotor Pole Flux Density	1.51795	tesla	
5	2nd Air-Gap Flux Density	1.51795	tesla	
6	Rotor Yoke Flux Density	1.18066	tesla	
7	Air-Gap Flux Density	0.542997	tesla	
8	Stator Teeth Ampere Turns	15.6923	A.T	
9	Stator Yoke Ampere Turns	174.891	A.T	
10	Rotor Shoe Ampere Turns	13.3012	A.T	
11	Rotor Pole Ampere Turns	187.72	A.T	
12	2nd Air-Gap Ampere Turns	0	A.T	
13	Rotor Yoke Ampere Turns	31.4127	A.T	
14	Air-Gap Ampere Turns	1794.84	A.T	
15	Total Exciting Ampere Turns	2257.81	A.T	
16	Exciting Current	11626.1	mA	
17	Leakage Flux Factor	1.0943		
18	Stator Yoke Correction Factor	0.347075		
19	Cogging Torque	1.218519	NewtonMeter	

Şekil 4.7. Yüksüz çalışma performans verileri

Performans sekmesi; verilerin ana başlıklar halinde özetini, tasarım sekmesi; tasarlanan makinenin giriş çıkış tüm verilerini, eğriler sekmesi; kritik makine parametrelerinin grafik olarak incelenebildiği bölümdür.

4.2. Tasarlanan Çıkık Kutuplu Senkron Generatör ve Temel Özellikleri

Bu bölümde, belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda boyutlandırılan, dört farklı q değerlerine sahip çıkık kutuplu senkron generatöre ait temel yapısal ve elektromanyetik özellikler ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Generatörün geometrik parametreleri ile performans üzerinde etkili olan temel tasarım bileşenlerine ilişkin veriler sunulmaktadır. Çizelge 4.1’de, $q = 3$ değeri için tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatöre ait temel boyutlandırma parametreleri ve performans çıktıları sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. $q=3$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		Stator ve Rotor Parametreleri	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	54
Nominal Güç Faktörü	0,9	Stator Dış Çapı (mm)	760
Giriş Gücü (kW)	567,198	Stator İç Çapı (mm)	568

Çizelge 4.1. (devam) $q=3$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Çıkış Gücü (kW)	540	Güç Faktörü	0,9
Nominal Gerilim (V)	400	h_{s0} (mm)	0,75
Sipir Sayısı	12	h_{sw} (mm)	2
Adım Sayısı	9	h_s (mm)	30
Kutup Sayısı	6	W_{s0} (mm)	4
Frekans (Hz)	50	W_{st} (mm)	15,38
Nominal Hız (rpm)	1000	W_{sb} (mm)	18,87
Çalışma Sıcaklığı (C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgar Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Rotor Uzunluğu (mm)	440
Stator Sargısı Tel Kesiti (mm)	3,3	Rotor Kutup Ayak Genişliği (mm)	230
Nüve Malzemesi	M400-50A	Rotor Kutup Ayak Yüksekliği (mm)	50
Kısa Devre Oranı	0.48	Rotor Kutup Gövde Genişliği (mm)	100
Uyartım Sargısı Tel Kesiti (mm)	5	Kutup Başına İletken Sayısı	190
Faz Gerilimi (V)	230,94	Faz Akımı (A)	866,03
Uyartım Akımı (A)	40,23	Uyartım Gerilimi (V)	93,87
Toplam Net Ağırlık (kg)	1229,23	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

$q=3$ değerinde tasarlanmış çıkık kutuplu senkron generatörün rotor ve stator geometrisine ait görsel, Şekil 6.3.(a)'da verilmektedir. Bir önceki çizelgeye benzer şekilde, Çizelge 4.2'de $q = 4$ değeri için elde edilen senkron generatöre ait temel boyutlandırma parametreleri ve performans çıktıları sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. $q=4$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		Stator ve Rotor Parametreleri	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	72
Nominal Güç Faktörü	0.9	Stator Dış Çapı (mm)	760
Giriş Gücü (kW)	568,92	Stator İç Çapı (mm)	568
Çıkış Gücü (kW)	540	Güç Faktörü	0,9
Nominal Gerilim (V)	400	h_{s0} (mm)	0,75
Sipir Sayısı	10	h_{sw} (mm)	2
Adım Sayısı	12	h_s (mm)	30
Kutup Sayısı	6	W_{s0} (mm)	4
Frekans (Hz)	50	W_{st} (mm)	11,53

Çizelge 4.2. (devam) $q=4$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Nominal Hız (rpm)	1000	$W_{sb}(\text{mm})$	14,67
Çalışma Sıcaklığı (C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgar Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Rotor Uzunluğu (mm)	440
Stator Sargısı Tel Kesiti (mm)	3,3	Rotor Kutup Ayak Genişliği (mm)	230
Nüve Malzemesi	M400-50A	Rotor Kutup Ayak Yüksekliği (mm)	50
Kısa Devre Oranı	0.35193	Rotor Kutup Gövde Genişliği (mm)	100
Uyartım Sargısı Tel Kesiti (mm)	5	Kutup Başına İletken Sayısı	190
Faz Gerilimi (V)	230,94	Faz Akımı (A)	866,03
Uyartım Akımı (A)	40,05	Uyartım Gerilimi (V)	93,45
Toplam Net Ağırlık (kg)	1242,15	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

$q=4$ değerinde tasarlanmış çıkık kutuplu senkron generatörün rotor ve stator geometrisine ait görsel, Şekil 6.14.(a)'da verilmektedir. Çizelge 4.3, $q = 5$ değeri esas alınarak yapılan tasarıma ilişkin parametreleri ve analiz sonuçlarını kapsamaktadır.

Çizelge 4.3. $q=5$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		Stator ve Rotor Parametreleri	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	90
Nominal Güç Faktörü	0.9	Stator Dış Çapı (mm)	760
Giriş Gücü (kW)	568,34	Stator İç Çapı (mm)	568
Çıkış Gücü (kW)	540	Güç Faktörü	0,9
Nominal Gerilim (V)	400	$h_{s0}(\text{mm})$	0,75
Sipir Sayısı	8	$h_{sw}(\text{mm})$	2
Adım Sayısı	15	$h_s(\text{mm})$	30
Kutup Sayısı	6	$W_{s0}(\text{mm})$	4
Frekans (Hz)	50	$W_{st}(\text{mm})$	9,22
Nominal Hız (rpm)	1000	$W_{sb}(\text{mm})$	11,32
Çalışma Sıcaklığı (C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgar Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Rotor Uzunluğu (mm)	440
Stator Sargısı Tel Kesiti (mm)	3.3	Rotor Kutup Ayak Genişliği (mm)	230
Nüve Malzemesi	M400-50A	Rotor Kutup Ayak Yüksekliği (mm)	50
Kısa Devre Oranı	0,34	Rotor Kutup Gövde Genişliği (mm)	100

Çizelge 4.3. (devam) $q=5$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Uyartım Sargısı Tel Kesiti (mm)	5	Kutup Başına İletken Sayısı	190
Faz Gerilimi (V)	230,94	Faz Akımı (A)	866,03
Uyartım Akımı (A)	40	Uyartım Gerilimi (V)	92,81
Toplam Net Ağırlık (kg)	1237,12	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

$q=5$ değerinde tasarlanmış çıkık kutuplu senkron generatörün rotor ve stator geometrisine ait görsel, Şekil 6.25.(a)'da verilmektedir. Son olarak, $q = 6$ değeri için gerçekleştirilen tasarım süreci sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. $q=6$ değerinde tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		Stator ve Rotor Parametreleri	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	108
Nominal Güç Faktörü	0,9	Stator Dış Çapı (mm)	760
Giriş Gücü (kW)	568,92	Stator İç Çapı (mm)	568
Çıkış Gücü (kW)	540	Güç Faktörü	0,9
Nominal Gerilim (V)	400	h_{s0} (mm)	0,75
Sipir Sayısı	6	h_{sw} (mm)	2
Adım Sayısı	18	h_s (mm)	30
Kutup Sayısı	6	W_{s0} (mm)	4
Frekans (Hz)	50	W_{st} (mm)	7,68
Nominal Hız (rpm)	1000	W_{sb} (mm)	9,43
Çalışma Sıcaklığı (C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgar Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Rotor Uzunluğu (mm)	440
Stator Sargısı Tel Kesiti (mm)	3,3	Rotor Kutup Ayak Genişliği (mm)	230
Nüve Malzemesi	M400-50A	Rotor Kutup Ayak Yüksekliği (mm)	50
Kısa Devre Oranı	0,35	Rotor Kutup Gövde Genişliği (mm)	100
Uyartım Sargısı Tel Kesiti (mm)	5	Kutup Başına İletken Sayısı	190
Faz Gerilimi (V)	230,94	Faz Akımı (A)	866,03
Uyartım Akımı (A)	39,18	Uyartım Gerilimi (V)	91,43
Toplam Net Ağırlık (kg)	1227,74	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

$q=6$ değerinde tasarlanmış çıkık kutuplu senkron generatörün rotor ve stator geometrisine ait görsel, Şekil 6.36.(a)'da verilmektedir.

5. SENKRON GENERATÖRDE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON

Optimizasyon bir hedef fonksiyonunun maksimum veya minimum değerlerini bir amaç doğrultusunda en uygun şekilde elde etmek için bir dizi kısıtlama altında çözüm arama sürecidir. Çeşitli uygulama alanlarında farklı amaçlarla matematiksel modelleme ve yöntemsel analiz gerektirmektedir. Optimizasyon problemleri, doğrusal ve doğrusal olmayan birçok farklı yapıdaki hedeflerle çözülür ve kullanılan yöntemler problemin doğasına göre değişmektedir. Optimizasyon problemleri genellikle; amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlamalar ve çözüm uzayı şeklinde dört temel bileşenlere sahiptir.

Senkron generatörlerde optimizasyon, elektrik üretim sistemlerinde kullanılan senkron generatörlerin performansını optimize etmeyi, generatörün verimliliğini artırmayı, enerji üretiminde kayıplarını azaltmayı, maliyetleri düşürmeyi, sistemin güvenilirliğini artırmayı, şebeke ile uyumlu çalışmayı amaçlamaktadır. Böylelikle generatörlerin yüksek verimli olması, uzun ömürlü olması, güvenilirliğinin artırması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi sağlanmış olmaktadır. Optimizasyon gerçekleştirilirken çeşitli matematiksel modeller ve gelişmiş kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [67-69]. Ansys Elektromagnetic Suite programında kullanılan optimizasyon yöntemleri;

Arama tabanlı tarama (search-based search)

Optimizasyon ve problem çözme alanlarında kullanılan bu yöntem, karmaşık problemleri çözmek ve çözüm alanını sistematik bir şekilde keşfetmek için kullanılmaktadır. Çok çeşitli problemlerin çözülmesinde etkili olan bu teknik büyük çözüm uzaylarında en iyi çözümü aramak için kullanılmaktadır. Arama tabanlı tarama, çözümde "keşfi" ve "değerlendirilmesi" aşamalarını içeren bir optimizasyon yöntemidir. Başlangıçta rastgele bir çözüm seçilir, ardından bu çözüm iterasyonlarla iyileştirilir veya farklı çözüm adayları taranır ve değerlendirilir.

İkinci dereceden lagrangian (second-order lagrangian)

İkinci dereceden lagrangian optimizasyonu, doğrusal olmayan hedef fonksiyonları ve doğrusal olmayan kısıtlamaları içeren optimizasyon problemlerini ifade eden doğrusal

olmayan programlama (Nonlinear Programming, NLP) problemlerinin çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Lagrange çarpanları ile ilişkili şekilde kararlaştırılmış kısıtlamalar altında optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılan Hessian matrisi ile çözümün doğruluğu artırılarak daha karmaşık optimizasyon problemleri için daha güçlü bir araç haline getirilmektedir. Hem hedef fonksiyonu hem de kısıtlamalar, Lagrangian fonksiyonu ile birleştirilerek Lagrangian fonksiyonunun birinci ve ikinci türevleri alınmaktadır. İkinci dereceden türevlerin ve Hessian matrisinin analizi yapılmaktadır. Kısıtlamalar, Lagrange çarpanları ile çözümde dahil edilerek sonuçlar çözümün optimumluğunu ve geçerliliğini doğrulamak için incelenmektedir.

Karma tamsayılı ardışık ikinci dereceden programlama (mixed-integer sequential quadratic programming, mi-sqp)

Karma tamsayılı ardışık ikinci dereceden programlama (MI-SQP), ikinci dereceden yaklaşımlar ve tamsayılı karar değişkenlerini içeren doğrusal olmayan programlama (NLP) problemlerini çözmek için kullanılan bir optimizasyon tekniğidir. Her iterasyonda, doğrusal olmayan hedef fonksiyonu ve kısıtlamalar, ikinci dereceden model ile yaklaşıklanmaktadır. Kısıtlamalar, doğrusal olmayan kısıtlamalardan doğrusal hale getirilmektedir. İkinci dereceden bir problem elde edilir ve bu problem çözülmektedir. Çözüm adım adım iyileştirilerek orijinal doğrusal olmayan problemi çözmektedir.

Uyarlanabilir çoklu hedef optimizasyonu (adaptive multi-objective optimization, amo)

Birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesi gereken problemlerde, çözüm sürecini dinamik olarak uyarlamayı amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. Optimizasyon sürecinin hedeflerin ve çözüm uzayının değişen koşullarına göre dinamik olarak adapte olabilmesi anlamına gelen uyarlanabilir kelimesi, optimizasyon sürecinin çözüm arayışında çevresel faktörlere ve algoritmanın geçmiş çözümlerine göre nasıl dinamik olarak şekillendiğini ifade etmektedir.

Uyarlanabilir tek hedef optimizasyonu (adaptive single-objective optimization, aso)

Optimizasyon probleminin çözümü sırasında tek bir hedef fonksiyonunu optimize etmek için kullanılan ve çözüm sürecini dinamik olarak uyarlayabilen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım,

özellikle hedef fonksiyonun veya çözüm uzayının değişken olduğu, belirsizliğin ve çevresel faktörlerin etkili olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

Sıralı doğrusal olmayan programlama (sequential nonlinear programming, snlp)

Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir yöntem olan SNLP, genellikle kısıtlamalı doğrusal olmayan programlama problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Ardışık bir yaklaşım benimser ve çözüm sürecinde her adımda doğrusal olmayan problemleri doğrusal olmayan alt problemler olarak yaklaşıklamaktadır. Her iterasyonda daha doğru çözüm noktaları elde edildiği için doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yüksek doğruluk sağlamaktadır. İterasyonlar sonucunda, yerel optimuma oldukça yakın çözümler bulmaktadır.

Sıralı karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama (sequential mixed-integer nonlinear programming, sminlp)

Doğrusal olmayan ve karışık tamsayılı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir teknik olan SMINLP, özellikle tamsayı karar değişkenlerinin ve doğrusal olmayan hedef fonksiyonlarının ve kısıtlamalarının olduğu karmaşık problemlerde kullanılmaktadır. Çözüm sürecinin adım adım, ardışık bir şekilde yapıldığını ve her iterasyonda doğrusal olmayan problemin bir yaklaşık modelle çözülmeye çalışıldığını ifade eden terim sıralı ifadesidir. Bu yöntem hem sürekli hem de tamsayı karar değişkenlerini içeren, ayrıca doğrusal olmayan amaç fonksiyonları ve kısıtlamalar içeren optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır. SMINLP genellikle karmaşık çok amaçlı problemlerde yerel optimum çözümler bulduğundan global optimuma ulaşmak zorlaşmaktadır. Yanlış başlangıç tahminleri, kötü sonuçlar doğurmaktadır. Doğrusal olmayan ve tamsayılı optimizasyon problemleri, büyük çözüm uzaylarına sahip olduğundan çözüm süreci zaman alıcı ve hesaplama açısından maliyeti yüksek olmaktadır.

Quasi-Newton yöntemleri

Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bu yöntem türev tabanlıdır. Özellikle büyük ve karmaşık optimizasyon problemlerinde Hessian matrisi gibi hesaplama açısından pahalı olan ikinci dereceden türev bilgilerini yaklaşık olarak

hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntem, farklı adım büyüklükleri ve yakınsama hızları ile çözüm bulmaya çalışırken, aynı zamanda Hessian matrisinin doğrudan hesaplanmasındaki zorlukları ve hesaplama maliyetlerini azaltmaktadır.

Desen araması (pattern search)

Türevlerin alınmasının zor olduğu veya türevlerin mevcut olmadığı problemlerde etkili olan bu yöntem, türev bilgisi kullanmadan çözüm arayan yönsüz bir optimizasyon yöntemidir. Desen araması, her iterasyonda çözüm kalitesini değerlendirerek çözüm uzayını keşfetmek için belirli bir desen veya yapı kullanılmaktadır. Genellikle karmaşık, doğrusal olmayan ve kesikli problemlerde, çok sayıda yerel minimum bulunan veya gürültülü fonksiyonlar için kullanılmaktadır. Bu yöntemin ana avantajı, türev gerektirmemesi ve çözüm arayışında global bir iyileşme sağlayabilecek esnekliğe sahip olmasıdır.

Genetik algoritma (genetic algorithm, GA)

Genetik algoritmalar, çözüm uzayında evrimsel bir arama yaparak, karmaşık ve yüksek boyutlu problemlerde etkili sonuçlar elde etmeyi amaçlayarak biyolojik evrim süreçlerinde geliştirilen doğrusal olmayan optimizasyon arama yöntemidir. Oluşturulan algoritmalar tamsayı, kesikli ve karmaşık optimizasyon problemleri için uygundur. Genetik algoritmalar, doğal seleksiyon ve genetik miras ilkelerini kullanarak, çözüm uzayındaki çözümleri evrimsel süreçlerle iyileştirilir. Bu süreçte genetik operatörler (seçim, çaprazlama, mutasyon) kullanılarak çözüm popülasyonu geliştirilir. Genetik algoritmalar, özellikle yerel minimumlara takılmadan global optimum arayışında önemli bir avantaj sunmaktadır.

İlk adımda, çözüm uzayında rastgele bir popülasyon oluşturularak her birey belirli bir genetik temsil ile ifade edilmektedir. Oluşturulan her birey için bir bireyin ne kadar iyi bir çözüm sunduğunu belirleyen uyum fonksiyonu hesaplanmaktadır. Yüksek uyum fonksiyonu değeri ise daha iyi bir çözümü temsil etmektedir. Popülasyondan, rulet tekerleği veya turnuva seçimi gibi yöntemlerle en iyi bireyler seçilmektedir. Seçilen bu bireyler, gelecekteki popülasyonun oluşmasına katkı sağlamaktadır. Seçilen bireylerin genetik materyalleri karıştırılarak yeni bireyler oluşturulur. Mutasyon oranı düşük tutularak genetik çeşitliliği artırmak ve çözüm uzayında daha geniş bir keşif yapmak için genetik materyalin bir kısmı rastgele değiştirilmektedir. Oluşturulan yeni popülasyon, bir sonraki iterasyona

geçmek için kullanılmaktadır. Bu süreç belirli bir durdurma kriterine kadar devam etmektedir. Genetik Algoritmalar, yönsüz ve türev gerektirmemesi, global optimuma yaklaşması, çeşitlilik sağlaması ve esnek olması avantaj sağlamaktadır. Popülasyonlar ve çok sayıda iterasyon gerektirmesi ise hesaplama maliyetini artırdığı için dezavantaj sağlamaktadır [67-69].

Çok amaçlı genetik algoritma (multi-objective genetic algorithm, MOGA)

Amaç fonksiyonunun içerisinde yer alan birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesi gereken problemlerde ve bir hedef fonksiyon için çözüm uzayını etkili bir şekilde keşfetmek amacıyla kullanılan bir evrimsel optimizasyon yöntemidir. Bu tür problemler bir hedefin iyileştirilmesi, diğer hedefin kötüleşmesine yol açabilen çelişkili hedefler içermektedir. ÇAGA, her bir çözümü genetik operatörlerle (seçim, çaprazlama, mutasyon) evrimleştirerek daha iyi çözümler bulmak için güçlü bir yaklaşım amaçlamaktadır. Rastgele Arama (Random Search), çözüm uzayında rastgele çözüm arayarak, optimum veya yakın optimum çözüme ulaşmaya çalışan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Rastgele arama, çok amaçlı genetik algoritmalar ile birleştirildiğinde, çözüm uzayındaki çeşitliliği artırmayı ve farklı bölgeleri keşfetmeyi, yerel optimumlardan kaçınmayı, çeşitli çözümler elde etmeyi sağlamaktadır.

ÇAGA'nın temel adımları;

- Başlangıç Popülasyonu Oluşturma
- Fitness Değerlerinin Hesaplanması
- Seçim
- Çaprazlama
- Mutasyon
- Yeni Popülasyon Oluşturma
- Durdurma Kriteri şeklinde sıralanmaktadır.

ÇAGA çoklu hedeflerin aynı anda optimize edilmesini sağlayarak, çelişen hedefler arasında bir denge kurmayı mümkün kılan pareto optimal çözümler sunmaktadır. Türev bilgisi gerektirmediği için karmaşık, doğrusal olmayan ve kesikli problemlerde etkili bir yöntemdir.

Ancak yüksek hesaplama maliyeti hesaplama süresinin artması, yerel optimumlardan kaçınma zorluğu, her zaman global optimuma ulaşamaması, çaprazlama oranı, mutasyon oranı gibi parametrelerin doğru seçilme gerekliliği bu yöntemde dezavantaj sağlamaktadır.

Genel olarak ÇAGA'yı;

$$\min/\max f_i(\mathbf{x}), i = 1, 2, \dots, I$$

Kısıt

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, J$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0, k = 1, 2, \dots, K$$

$$x_p^L \leq x_p \leq x_p^U \quad p = 1, 2, \dots, P$$

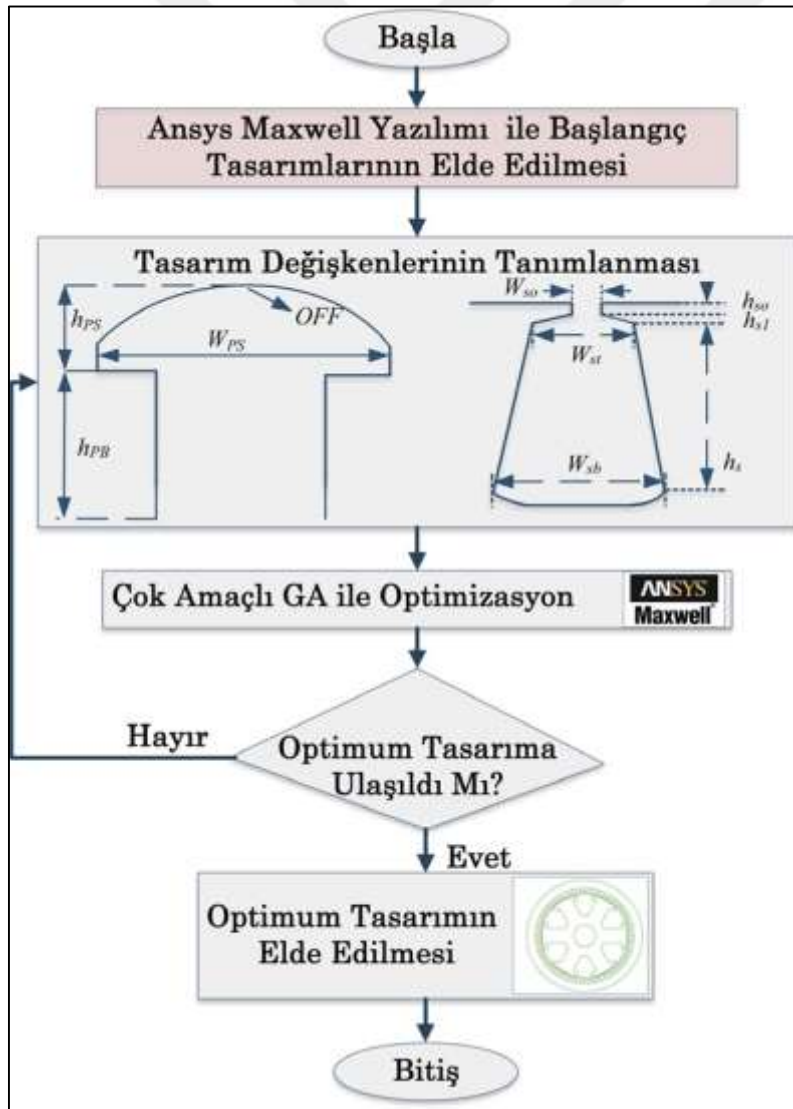
denklemleri ile ifade etmek mümkündür. Burada $f_i(\mathbf{x})$ birden fazla sayıdaki amaç fonksiyonunu, $h_j(\mathbf{x})$ ile $g_k(\mathbf{x})$ sırasıyla eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını temsil etmektedir. Optimizasyon sürecinde bazı amaç fonksiyonlarının minimizasyonu, bazılarının ise maksimizasyonu hedeflemesi mümkündür.

5.1. Stator ve Rotor Geometrik Optimizasyonu

Optimizasyon, belirli kısıtlar çerçevesinde tanımlanan bir hedef fonksiyonun en iyi değerine ulaşmayı hedefleyen sistematik bir çözüm yöntemidir. Çeşitli mühendislik alanlarında, probleme özgü matematiksel modeller ve yöntemsel analizler doğrultusunda farklı optimizasyon yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Optimizasyon problemleri; doğrusal veya doğrusal olmayan yapıdaki hedef fonksiyonlara göre farklı yöntemlerle çözülebilmekte ve kullanılan teknikler problemin doğasına göre şekillenmektedir. Genel olarak bir optimizasyon problemi; amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlayıcı koşullar ve çözüm uzayı olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır [70]. Başlangıç tasarımı tamamlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimum geometrik yapısını elde etmek amacıyla, Ansys Maxwell yazılımı üzerinden ÇAGA yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışmaları

gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde temel hedef, birbirleriyle çelişebilen birden fazla performans kriterini aynı anda optimize edebilecek en uygun çözüm kümesini elde etmektedir. Karar vericinin aktif olarak sürece dahil olmadığı durumlarda, çok amaçlı bir optimizasyon problemi için tek bir nihai çözüm seçimi çoğunlukla zordur. Bu nedenle yaygın olarak tercih edilen yaklaşım, karar vericiye birden fazla çözüm içeren Pareto optimal çözüm kümesinin sunulmasıdır. Genetik algoritmalarda tüm Pareto optimal çözümlerin elde edilebilmesi için, her nesilde popülasyon çeşitliliğinin korunması büyük önem taşımaktadır [70].

Çalışmada tasarım ve optimizasyon aşamalarında izlenen işlem adımlarını gösteren akış şeması Şekil 5.1’de sunulmaktadır.



Şekil 5.1. Optimizasyon akış şeması

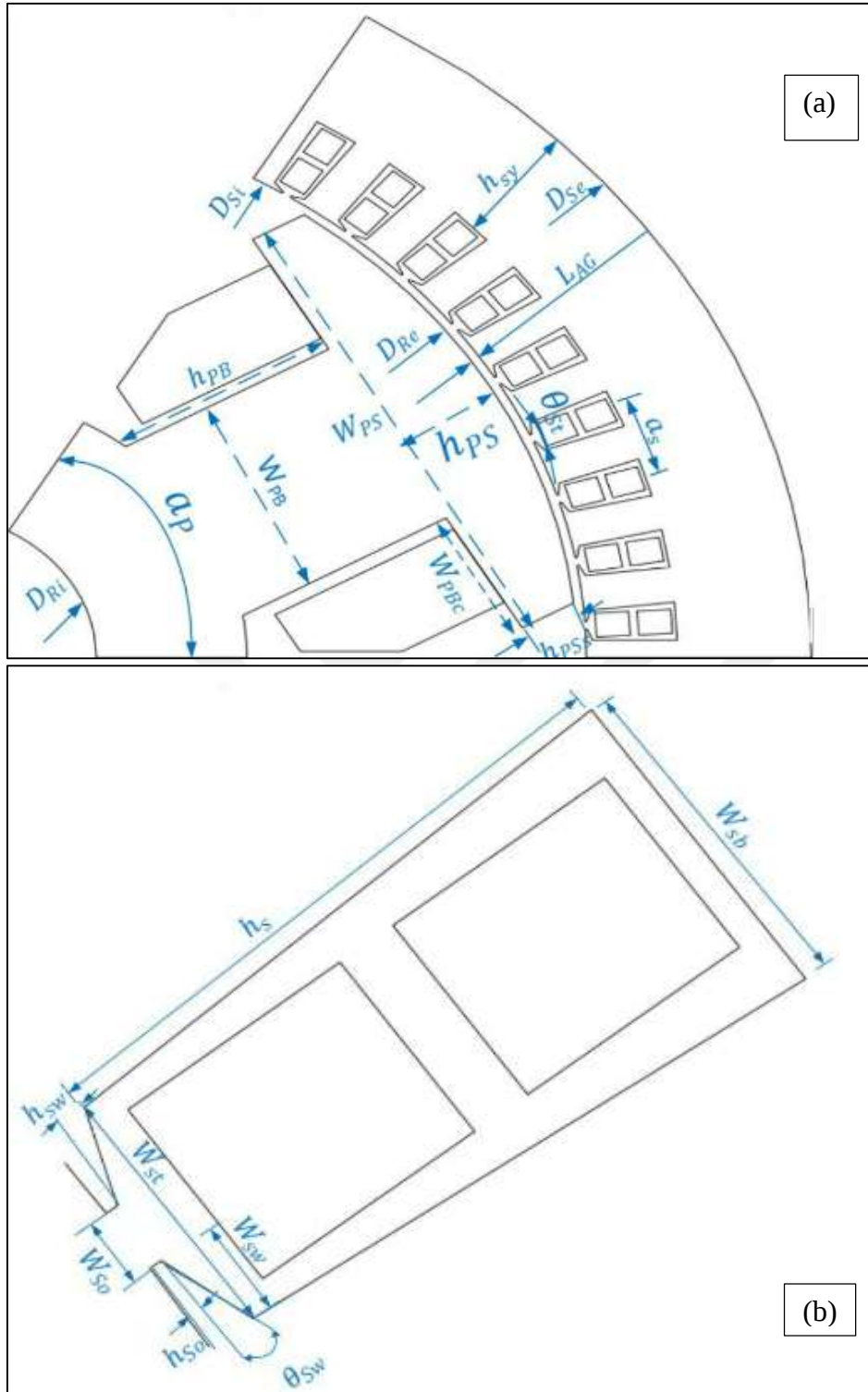
Çalışmadaki optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenler ve arama uzayı aşağıdaki Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Akış şemasında yer alan tüm adımlar her q değeri için tekrarlanmıştır.

Çizelge 5.1. Optimizasyon sürecinde kullanılan geometrik tasarım değişkenleri ve sınır değerleri

<i>Semboller</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç Değeri</i>	<i>Minimum Değeri</i>	<i>Maksimum Değeri</i>
W_{SO}	Oluk Ağız Açıklığı	5.97 mm	2mm	6 mm
h_S	Stator Dış Yüksekliği	36 mm	18 mm	40 mm
OFF	Kutup Yay Ofseti	0 mm	0 mm	50 mm
h_{PB}	Kutup Gövde Yüksekliği	100 mm	75 mm	125 mm
h_{PS}	Kutup Ayak Yüksekliği	50 mm	19 mm	55 mm
W_{PS}	Kutup Ayak Genişliği	150 mm	140 mm	180 mm
TW	Stator Dış Genişliği	10 mm	9 mm	17 mm

Başlangıç tasarımına ait alt ve üst sınır değerleri, çözüm uzayını daraltmayacak şekilde ve parametrelerin birbirleriyle çakışmasını engelleyerek çözümlerin durmasını engelleyecek biçimde, çözüm yapılabilecek en geniş aralığı kapsayan algoritma oluşturulmuştur. Sargıların yerleşimi için minimum bir açıklık gerektiğinden, oluk ağız açıklığı değişken olarak seçilmiştir. Ayrıca, oluk ağız açıklığı; stator dış akı yoğunluğu ve hava aralığı MMK formu üzerinde etkili bir parametredir. Sargıların benzer oluk doluluk oranına sahip olabilmesi amacıyla, stator dış yüksekliği ve stator dış genişliği değişken olarak belirlenmiştir. Kutup yay ofseti, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dalga şekli üzerinde doğrudan etkili bir değişken olup, THD değerinin düşürülmesi amacıyla kutup kenarlarının hava aralığıyla olan mesafesini ayarlamaktadır. Kutup ayak yüksekliğinin değişimiyle toplam rotor çapının sabit kalabilmesi için kutup gövde yüksekliği değişken olarak tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonunda yer alan akı yoğunluklarını doğrudan etkiledikleri için kutup gövde yüksekliği, kutup ayak yüksekliği ve kutup ayak genişliği değişken olarak tanımlanmıştır.

Değişkenlerin generatör üzerindeki fiziksel konumları aşağıdaki Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Senkron generatörün geometrik bileşenleri a) Stator ve rotor geometrisi b) Stator oluk detayı

Çıkık kutuplu senkron generatörlerin verimliliği; manyetik akının dağılımı, güç kapasitesi, termal davranış, manyetik doyum, tork karakteristikleri ve sargı yapısı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Rotorun çıkık geometrisinin uygun şekilde optimize

edilmesi, hava aralığı manyetik akısının istenilen dalga formunda elde edilmesi için oldukça önemlidir. Stator sargılarının düzgün ve dengeli biçimde yerleştirilmesi, sargı kayıplarını azaltarak verimliliğin artırılmasına doğrudan katkı sunmaktadır. THD, elektriksel sistemlerdeki harmonik bileşenlerin temel frekansa oranını temsil eden ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilen bir güç kalitesi göstergesidir. THD'nin yüksek olması, düşük güç kalitesi, azalmış sistem verimliliği ve genel performansın düşmesi anlamına gelmektedir. Stator dış akı yoğunluğu, stator dışından geçen manyetik akının birim alana düşen değeridir ve yüksek seçilmesi durumunda generatör daha fazla güç üretmektedir. Ancak yüksek akı yoğunluğu, artan iç ısı oluşumuna ve manyetik kayıpların yükselmesine sebep olur; bu da sistemin verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Rotor kutup akı yoğunluğu, rotor yüzeyinden geçen manyetik akının yoğunluğunu tanımlamakta ve bu parametre, verimlilik, güç üretimi, manyetik kayıplar ve ısıl yönetim üzerinde doğrudan etkilemektedir. Vuruntu torku, generatör rotorunun dönüşü sırasında oluşan ani ve geçici tork dalgalanmalarıdır; bu değer yüksek olması, mekanik zorlanmalar, aşınma ve titreşim gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Rotor geometrisi, manyetik akı dağılımı, damper sargılarının yerleşimi ve sargı yapısının optimize edilmesi, vuruntu torkunun azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, sistemdeki titreşim kontrolü ve mekanik dengeleme önlemleri, tork dalgalanmalarının azaltılmasına ilave katkı sunmaktadır. Stator boyunduruk akı yoğunluğu, manyetik akının boyunduruk malzemesinden geçerken ulaştığı yoğunluğu ifade etmektedir. Bu değer uygun aralıkta tutulması, nüve kayıplarının azaltılmasına ve generatörün verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Rotor ve statorun geometrik parametreleri, generatörün verimi, üretilen gerilim dalga formu ve THD üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyon sürecinde; verimlilik, tam yük hattı gerilimi, THD, stator dışı akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğunu içeren çok amaçlı bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

$$F_{\text{amaç}} = (\text{THD} * 35) + (\text{Stator Dışı Akı Yoğunluğu} * 5) + (\text{Rotor Kutup Akı Yoğunluğu} * 5) \\ + (\text{Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu} * 5) + ((100 - \text{Verim}) * 50)$$

Belirlenen amaç fonksiyona ilişkin sınır değerler ve her parametreye atanan ağırlık katsayıları Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

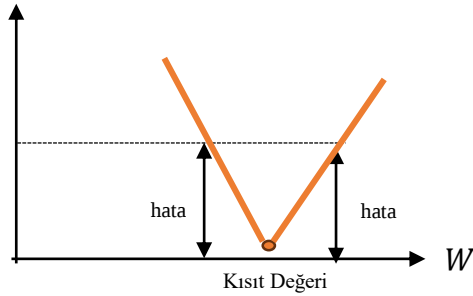
Çizelge 5.2. Belirlenen amaç fonksiyonuna ait sınır değerleri ve ağırlık katsayıları çizelgesi

Parametreler	Sınır Değerleri	Ağırlıkları
Verim	≥ 96	[50]
THD _v	≤ 3	[35]
Stator Dişi Akı Yoğunluğu	$\leq 1,5$	[5]
Rotor Kutup Akı Yoğunluğu	$\leq 1,5$	[5]
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu	$\leq 1,5$	[5]

Optimizasyon sürecinde her bir iterasyonda üretilen geometrik tasarım değişkenlerine karşın amaç fonksiyonu içerisinde yer alan performans parametreleri elde edilmektedir. Bu performans parametrelerinin kısıtlara uygunluğuna göre bir maliyet hesabı yapılmaktadır. Gerçekleştirilen bu maliyet hesabı;

$$\text{Maliyet} = \sum_{i=1}^N W_i \cdot \epsilon_i^2$$

şeklinde gösterilir. Burada W değeri ağırlığı, ϵ değeri ise amaç fonksiyonundaki hatayı ifade etmektedir. Hata durumu aynı zamanda grafik formunda;



şeklinde ifade edilmektedir. Amaç fonksiyonundaki ağırlıklar, her bir performans kriterinin senkron generatör tasarımı üzerindeki etkisi dikkate alınarak belirlenmiştir. Verim, enerji dönüşüm sistemlerinde en kritik parametrelerden biri olduğu için en yüksek öncelik verilerek %50 ağırlıkla tanımlanmıştır. THD, güç kalitesi ve elektromanyetik performansı doğrudan etkilediği için %35 ağırlıkla ikinci öncelikli kriter olarak ele alınmıştır. Stator dişi, rotor kutbu ve stator boyunduruk bölgelerindeki manyetik akı yoğunlukları ise sistemin doyum karakteristiğinin kontrol altında tutulması açısından önemli olmakla birlikte, diğer performans kriterlerine göre toplam maliyet içerisinde daha düşük etkiye sahip olduğu için her biri %5 ağırlıkla seçilmektedir. Amaç fonksiyonunda yer alan ağırlıklar optimizasyon sonucunun etkili sonuçlar bulması, literatürdeki çalışmaları, mühendislik kabulleri ve sistem

tasarım öncelikleri temel alınarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonundaki sınır değerler ise, literatürde kabul gören referans aralıklar, endüstri standartları ve senkron generatörün güvenli ve verimli çalışmasını sağlayacak kriterler dikkate alınarak belirlenmiştir. Verim için alt sınır %96 olarak alınmış olup, bu değer generatörlerin ulaşması beklenen minimum verim düzeyini ifade etmektedir. THD için üst sınır %3 olarak tanımlanmıştır. Bu değer güç kalitesi açısından kabul edilebilir seviyenin üst noktası olduğu için %3 seçilmiştir. Manyetik akı yoğunluğu sınırları ise nüve kayıplarını ve doyum riskini en aza indirmek amacıyla amaç fonksiyonunda yer alan akı yoğunluk sınır değerleri 1,5 T olarak belirlenmiştir. Bu sınırlar, hem elektromanyetik performans hem de termal güvenlik açısından kritik olup, optimizasyonun fiziksel ve mühendislik gerçekliğini koruyacak şekilde belirlenmiştir.



6. ANALİZLER VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

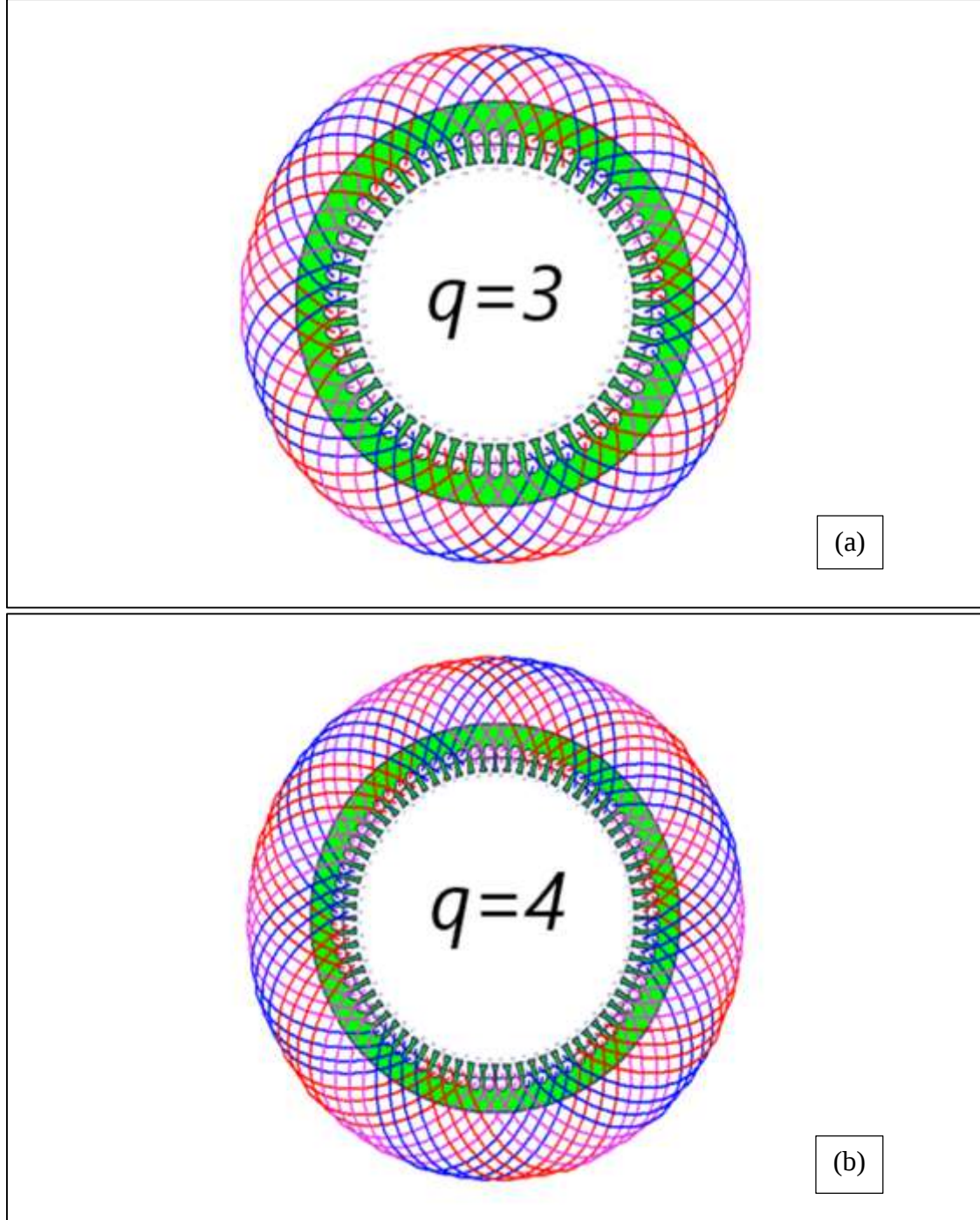
Bu bölümde, farklı q değerlerine sahip çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım süreci ve Ansys Maxwell yazılımında ÇAGA yöntemi kullanılarak yürütülen optimizasyon çalışmalarının çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Senkron generatörlerde rotor yapısı ile stator oluk geometrisi; moment üretimi, verimlilik, termal performans ve harmonik davranış üzerinde belirleyici rol oynayan temel parametrelerdir. Rotor ve stator geometrilerinin bütünleşik ve karşılıklı etkileşim içinde optimize edilmesi; yalnızca teorik performans artışı amacıyla değil; aynı zamanda enerji kalitesi, üretim maliyeti ve uzun ömür gibi çok sayıda mühendislik hedefinin dengelenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Rotor yapısı ile stator oluk geometrisi optimizasyon süreci kapsamında değişken parametreler olarak tanımlanmış olsa da, makine performansına etki eden unsurlar yalnızca bu parametrelerle sınırlı değildir. Senkron generatörün elektromanyetik performansını doğrudan etkileyen temel boyutsal oranlardan biri olan q değeri tork üretimi, gerilim formu, verim, harmonik içeriği ve termal performans gibi birçok kritik parametre üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Her bir q değeri için generatörün geometrisi ve elektromanyetik davranışı farklılaştığından, her q değeri için ayrı bir optimizasyon süreci gerekmektedir. Özellikle sargı dağılımı, farklı q değerlerinde önemli performans değişikliklerine neden olduğundan dört ayrı q değeri için başlangıç tasarımları oluşturulmuştur. Her bir başlangıç tasarımı için rotor ve stator geometrisine ilişkin tasarım parametreleri değişken olarak tanımlanmış ve bu doğrultuda farklı q değerlerindeki senkron generatöre Çizelge 5.2'de sunulan çok amaçlı hedef fonksiyonu çok amaçlı genetik algoritma yöntemi uygulanarak performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Senkron generatörlerin optimizasyon sürecinde, elektromanyetik ve geometrik parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu süreçte, genellikle birbiriyle çelişen çok sayıda performans kriterinin eşzamanlı olarak optimize edilmesi zorunluluğu doğmaktadır. Bu bağlamda, ÇAGA, aynı anda birden fazla amaç fonksiyonunu dikkate alabilen ve bu fonksiyonlar arasında Pareto-optimal çözümler üretebilen etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. ÇAGA'nın sunduğu bu yapı sayesinde, tasarımcı her bir performans kriteri için ödünleşim (trade-off) ilişkilerini gözeterek daha dengeli ve uygulanabilir tasarım kararları alabilmektedir. Optimizasyon tekniği ve geometrik tasarım değişkenlerinin uygun biçimde iyileştirilmesiyle performans parametrelerinde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Rotor ve stator geometrisinin optimize

edilmesi sonucunda, özellikle THD oranı ve verimlilik değerlerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır.

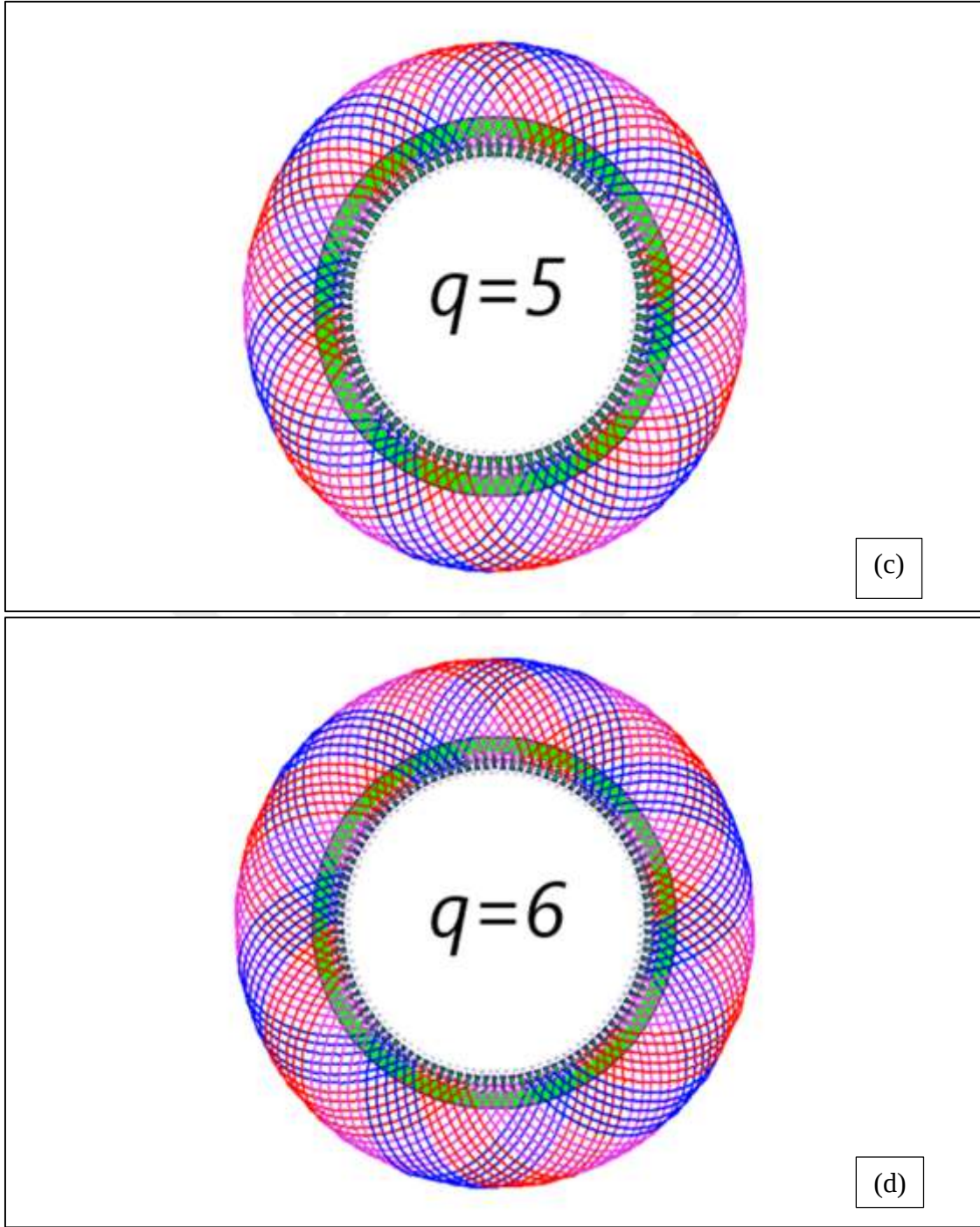
6.1. Rotor ve Stator Değişkenleri ile Birlikte Farklı q Değerlerindeki Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Optimizasyon Sonuçları

Faz başına kutup başına oluk sayısı, toplam stator oluk sayısının kutup sayısı ve faz sayısına bölünmesiyle elde edilen bir parametre olup, " q " harfiyle gösterilmektedir. Bu değer, senkron generatörlerde stator sargılarının yerleştirildiği olukların her bir faz için belirli bir sayısına karşılık gelmektedir. Faz başına kutup başına oluk sayısının doğru belirlenmesi, kutup altındaki toplam oluk sayısını ve fazör olarak toplanan oluk iletkenlerindeki gerilimlerinin hem genlik hem de sonuç dalga formu üzerinde etkilidir. Manyetik alanın uygun ve etkin bir şekilde oluşturulması için stator sargılarının düzgün bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Stator sargılarının gerilim üretme kapasitesi, oluk sayısından doğrudan etkilenmektedir. Yüksek bir oluk sayısı, her bir olukta indüklenen gerilim vektörel olarak toplanarak daha sinüzoidal bir form elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Belirlenen oluk sayısı, sargıların verimli çalışması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük q değerinin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Düşük q değerine sahip tasarımlarda, sargıların daha sık aralıklarla ve birbirine daha yakın konumlandırılması mümkün olduğundan, daha yüksek bölgesel manyetik akı yoğunlukları elde edilerek sargı yapısı daha sade hâle gelmektedir. Bu durum üretim ve işçilik maliyetini ve sürecin karmaşıklığını azaltırken, elektromanyetik kuvvetin artmasıyla birlikte tork üretimindeki dalgalanmayı artırmaktadır. Ancak düşük q değeri, harmonik bileşenlerin artmasına neden olur; bu da titreşim ve gürültünün yükselmesine, nüve kayıplarının artmasına, ısının stator sargılarından iletilmesinin zorlaşmasına ve noktasal sıcak bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, manyetik alanın bölgesel yoğun dağılımı, verimliliğin azalmasına ve işletme kararlılığının düşmesine neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek q değeri, manyetik alan dağılımını daha düzenli hâle getirerek titreşim ve gürültü seviyelerini düşürerek tork dalgalanmalarını minimize eder ve harmonik kayıpları azaltarak genel verimliliği artırmaktadır. Ancak bu durumda sargıların geniş alana yayılması üretim sürecini zorlaştırmakta, makine boyutlarında artışa neden olmakta ve maksimum manyetik akı yoğunluğunun bir miktar düşmesine yol açmaktadır. Yüksek q değeri, ısı açısından değerlendirildiğinde; başlıca ısı kaynağı olan stator sargılarında ısının daha geniş bir alana yayılması, ısının stator dışına daha kolay aktarılmasını ve dolayısıyla generatörün

soğutulmasının iyileşmesini sağlamaktadır. Bu sebeple, faz başına oluk sayısının doğru belirlenmesi, verimlilik, THD, vurutu torku, kayıplar gibi parametreler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Farklı q değerleri için gerçekleştirilen tasarımların sargı dağılımı ve stator yapısı üzerindeki fiziksel gösterimi Şekil 6.1'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Farklı kutup ve faz başına oluk sayılarındaki sargı dağılımı, (a) $q=3$, (b) $q=4$



Şekil 6.1. (devam) Farklı kutup ve faz başına oluk sayılarındaki sargı dağılımı, (c) $q=5$, (d) $q=6$

Dört ayrı q değerine sahip çıkık kutuplu senkron generatörün başlangıç parametre değerleri ile optimizasyon sonucunda elde edilen parametre değerlerinin karşılaştırılmalı olarak Çizelge 6.1’de sunulmuştur. q değerlerinin 3 ve 6 aralığında belirlenmesi mevcut generatör büyüklüğü için uygulanabilir ve gerçekçi bir aralık hedeflenmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin q değerinin 1 olarak belirlenmesi de teorik olarak mümkündür fakat gerçekçi bir

tasarımı sunmamaktadır. Diğer taraftan q değerinin 6'dan çok daha büyük değerler için seçilmesi ise fiziksel olarak çok küçük stator oluklarına sebep olacağı ve beklenen iyileşmenin artık bir doyuma ulaşması söz konusu olacağından tercih edilmemiştir.

Çizelge 6.1. Farklı q değerlerindeki başlangıç ve optimum parametre değerleri

PARAMETRELER			
Parametreler	Faz Başına Oluk Sayısı	Başlangıç Tasarımı	Optimum Tasarım
Oluk Sayısı	$q=3$	54	54
	$q=4$	72	72
	$q=5$	90	90
	$q=6$	108	108
Oluk Ağız Açıklığı(mm)	$q=3$	4	5,91
	$q=4$	4	5,92
	$q=5$	4	5,93
	$q=6$	4	5,25
Oluk Üst Genişliği (mm)	$q=3$	15,37	15,53
	$q=4$	11,52	12,87
	$q=5$	9,22	10,91
	$q=6$	7,68	7,82
Oluk Alt Genişliği (mm)	$q=3$	18,87	20,05
	$q=4$	14,15	16,32
	$q=5$	11,31	13,50
	$q=6$	9,43	10,03
Oluk Ağız Derinliği (mm)	$q=3$	0,75	0,75
	$q=4$	0,75	0,75
	$q=5$	0,75	0,75
	$q=6$	0,75	0,75
Oluk Alt Derinliği (mm)	$q=3$	2	2
	$q=4$	2	2
	$q=5$	2	2
	$q=6$	2	2
Oluk Yüksekliği (mm)	$q=3$	30	38,87
	$q=4$	30	39,55
	$q=5$	30	37,07
	$q=6$	30	37,95
Oluk Alanı (mm ²)	$q=3$	536,07	717,45
	$q=4$	403,6	600,42
	$q=5$	324,25	473,83
	$q=6$	271,36	355,71
Sargı Adımı	$q=3$	9	9
	$q=4$	12	12
	$q=5$	15	15
	$q=6$	18	18
Tel Çapı (mm)	$q=3$	3,3	4,12
	$q=4$	3,3	4,12
	$q=5$	3,3	4,12
	$q=6$	3,3	4,12

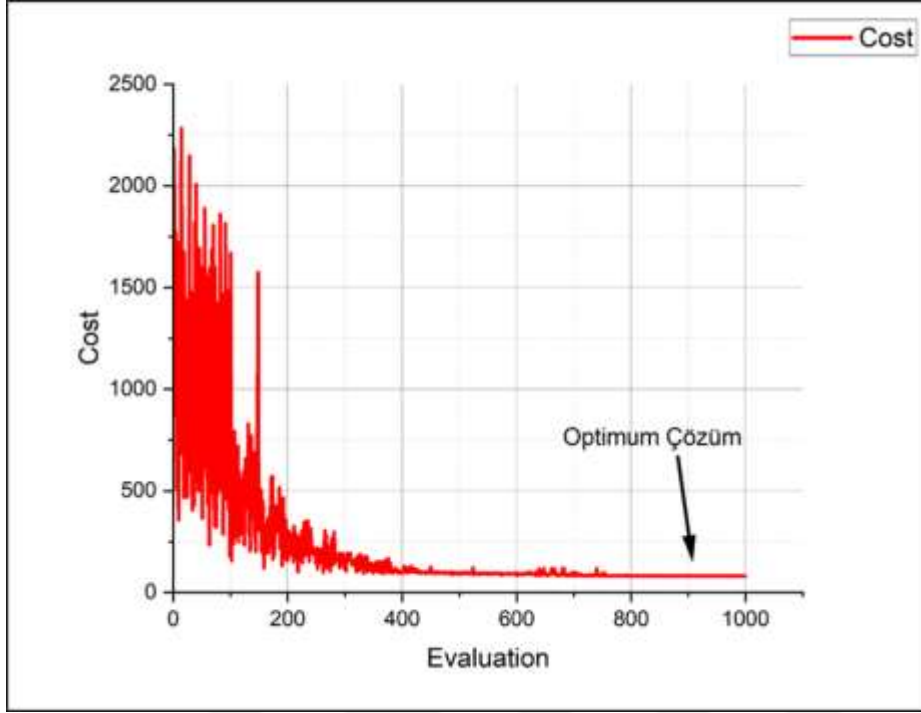
Çizelge 6.1'de görüldüğü üzere optimizasyon sonrası oluk ağız açıklığı tüm q değerlerinde belirgin şekilde artış görülmektedir. Bu artış, sargıların yerleşimi için daha geniş bir alan

sağlayarak tel çapının büyümesine imkan sağlamaktadır. Daha geniş oluk ağızları, sargıların daha kalın tellerle ve daha rahat yerleştirilmesini destekleyerek elektriksel direncin azalmasına ve dolayısıyla kayıpların düşmesine katkı sağlamaktadır. Oluk üst ve alt genişliği değerleri optimizasyon sonrasında artış görülmektedir. Oluk alt genişliği artışı, manyetik akı yoğunluğunun daha iyi yönlendirilmesi ve sargıların mekanik dayanıklılık artması açısından fayda sağlamaktadır. Oluk yüksekliğindeki artış daha fazla sargı telinin sığdırılabilmesini ve sargı alanının genişlemesini sağlamaktadır. Böylece generatörün manyetik kapasitesi ve tork üretimi artmaktadır. Artan oluk alanı, sargı telinin daha verimli yerleşmesine ve daha düşük sargı direnci ile daha yüksek verimliliğe olanak tanımaktadır. Daha kalın tel kullanımı, iletkenlik artışı ve dolayısıyla akım taşıma kapasitesinde iyileşme sağlamaktadır, bu da generatörün verimliliğini olumlu etkilemektedir. Oluk derinliğinde ve sargı adımındaki değerlerde değişikliğin olmaması temel geometrik sınırların korunduğunu göstermektedir.

6.2. $q=3$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması

Bu kısımda, $q = 3$ için başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün sonuç değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 6.2'de, $q = 3$ için ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonun sonuca ne kadar yaklaştığı verilmektedir.



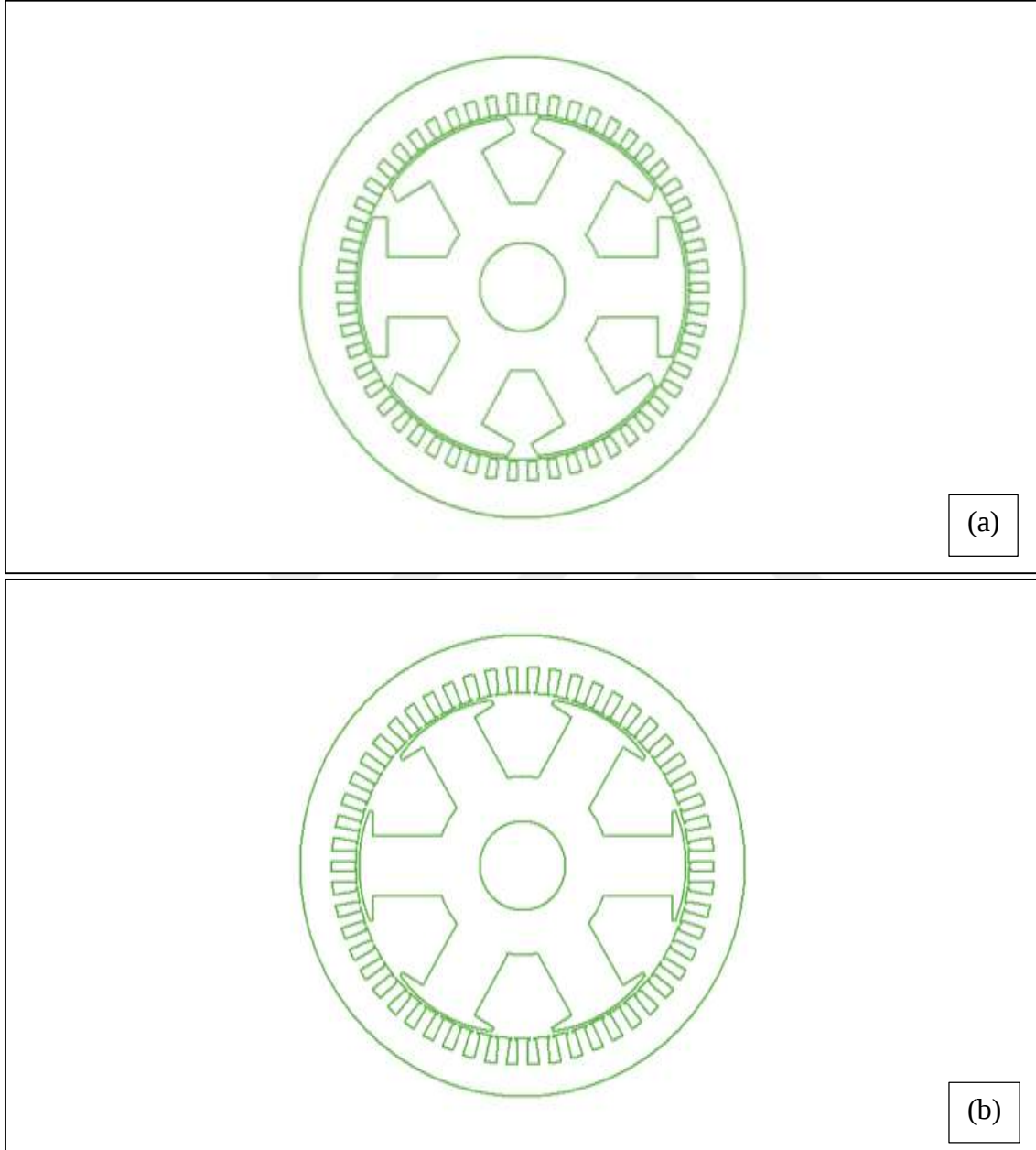
Şekil 6.2. İterasyon sonuçları (q=3)

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen yeni tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı biçimde Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması (q=3)

<i>Tasarım Değişkenleri</i>				<i>Performans Parametreleri</i>		
<i>Semboller</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç Tasarımı</i>	<i>Optimum Tasarım</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç Tasarımı</i>	<i>Optimum Tasarım</i>
W_{S0} (mm)	Oluk Ağız Açıklığı	4	5,91	Verim	%95,20	%95,77
h_s (mm)	Stator Diş Yüksekliği	36	38,87	THD _v (%)	10,38	4,48
OFF (mm)	Kutup Yay Ofseti	0	48,45	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,38	1,81
h_{PB} (mm)	Kutup Gövde Yüksekliği	100	114,86	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,68	1,43
h_{PS} (mm)	Kutup Ayak Yüksekliği	50	25,81	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,50	1,53
W_{PS} (mm)	Kutup Ayak Genişliği	230	179,94	Oluk Doluluk Oranı (%)	50,88	58,76
TW (mm)	Stator Diş Genişliği	13,5	17,84	Toplam Kayıp (kW)	27,2	23,83

Şekil 6.3'te başlangıç tasarımındaki senkron generatörün rotor ve stator geometrisi ile optimize edilen senkron generatörün rotor ve stator geometrisi sunulmaktadır.



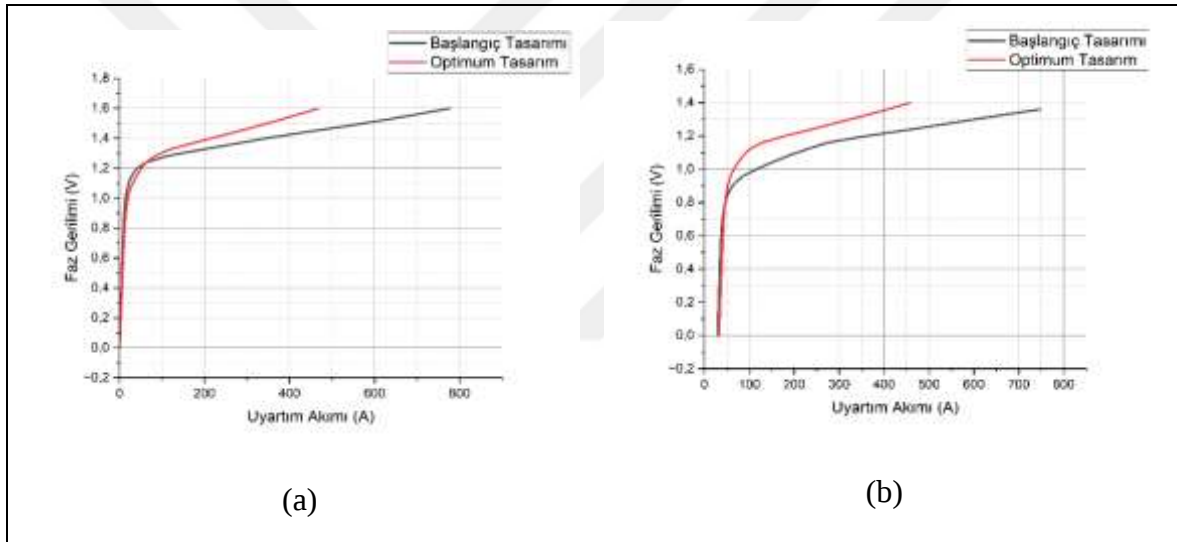
Şekil 6.3. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri ($q=3$)

Çizelge 6.2'de gösterildiği üzere, rotor ve stator geometrisine ait parametreler, amaç fonksiyonu çerçevesinde önemli ölçüde optimize edilerek değiştirilmiştir. Generatöre ait performans parametrelerinin amaç fonksiyonuna uygun bir şekilde iyileştirildiği ayrıca görülmektedir. Başlangıçta oluk ağız açıklığı 4 mm olarak belirlenmişken, optimum tasarımda bu değer 5,91 mm olarak belirlenmiştir. Bu artış, tasarımın geometrik

özelliklerinin optimize edildiğini ve daha verimli bir yapının elde edildiğini göstermektedir. Stator dış yüksekliği ise başlangıçta 36 mm iken, optimum tasarımda 38,87 mm'ye yükselmiştir. Bu değişiklik, stator geometrisinin optimize edildiğini ve boyutlarının iyileştirildiğini işaret etmektedir. Başlangıçta 0 mm olan kutup yay ofseti, optimum tasarımda 48,45 mm olarak belirlenmiş olup, tasarımda statorun pozisyonuyla ilgili bir değişiklik yapıldığını ve yerleşimin optimize edildiğini göstermektedir. Kutup gövde yüksekliği başlangıçta 100 mm iken, optimum tasarımda 114,86 mm'ye çıkarılmıştır. Bu artış, rotor geometrisinin optimize edildiğini ve rotor kutup boyutlarının iyileştirildiğini ifade etmektedir. Kutup ayak yüksekliği ise başlangıçta 50 mm, optimum tasarımda ise 25,81 mm olarak belirlenmiştir. Bu, statorun boyunduruk kısmının tasarımında yapılan bir iyileştirmeyi işaret etmektedir. Başlangıçta 230 mm olan kutup ayak genişliği, optimum tasarımda 179,94 mm'ye düşürülmüştür. Bu değişiklik, statorun sargı yerleşiminin optimize edilerek daha verimli hale getirildiğini göstermektedir. Son olarak, başlangıçta 13,5 mm olan stator dış genişliği, optimum tasarımda 17,84 mm'ye yükseltilmiştir.

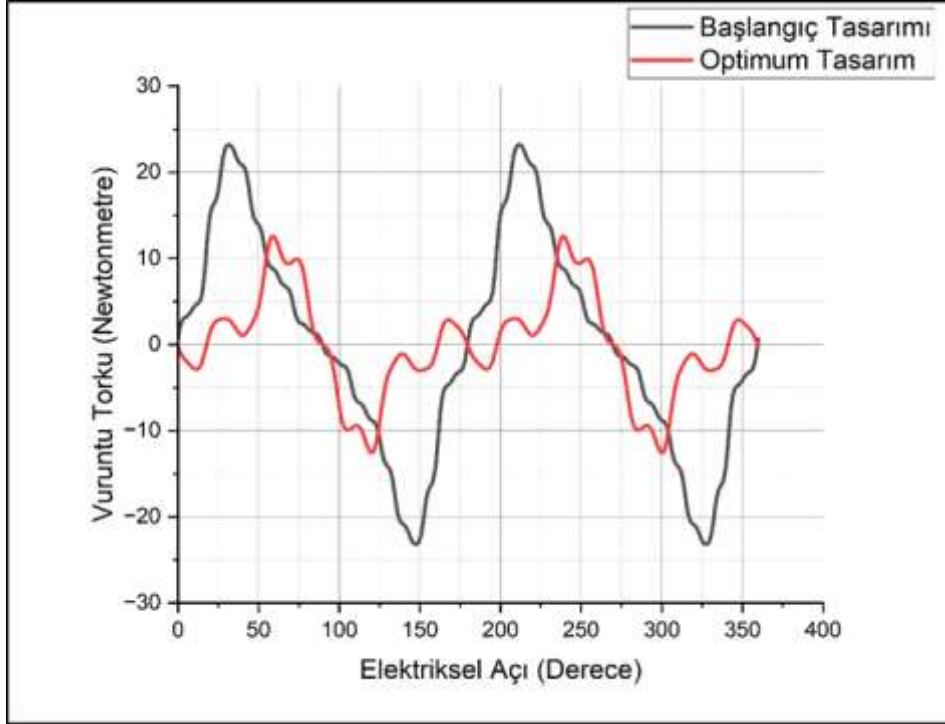
Başlangıçta %95,20 olan verim, optimum tasarımda %95,77'e yükselmiştir. Bu artış, optimize edilen tasarımın daha verimli çalıştığını göstermektedir. Başlangıçta 10,38 olan THD değeri, optimum tasarımda 4,49'a düşürülmüştür. Bu, tasarımın daha düşük THD değeri ile çalıştığını ve daha sinüzoidal güç çıktısı sağladığını göstermektedir. Başlangıçta 1,38 T olan stator dışı akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,81 T'ye yükselmiştir. Bu, stator dışı akı yoğunluğunun optimize edilerek artırıldığını ve doyum karakteristiği altında daha etkin bir geometri sağlandığını göstermektedir. Başlangıçta 1,68 T olan rotor kutup akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,43 T'ye düşmüştür. Rotor kutup akı yoğunluğunun azalması, manyetik alanın optimize edildiğini göstermektedir. Başlangıçta 1,50 T olan stator boyunduruk akı yoğunluğu, optimum tasarımda izin verilen limitler içersinde 1,53 T'ye yükselmiştir. Başlangıçta 50,88 olan oluk doluluk oranı, optimum tasarımda 58,76'ya yükselmiştir. Bu artış, daha iyi bir sargı yerleşimi ve verimli bir akı yoğunluğu sağlandığını göstermektedir. Başlangıçta 27,2 kW olan toplam kayıplar, optimum tasarımda 23,83 kW'ye düşürülmüştür. Bu, kayıpların azaltıldığını ve generatörün daha verimli çalıştığını göstermektedir. Özetle, optimum tasarımda verimlilik artırılmış, THD oranı azaltılmış ve toplam kayıplar düşürülerek tasarım daha verimli, daha az elektriksel gürültüye sahip ve daha yüksek enerji verimliliği sağlanmıştır.

Şekil 6.4(a)'da, başlangıç tasarımındaki yüksüz durumdaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil 6.4(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki tam yükteki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yüksüz durumdaki faz geriliminde hızlı bir artış meydana gelirken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 14,26 A değere ulaştığında artış daha düz bir eğilim gösterirken optimizasyon sonrası bu değer 19,81 A olarak elde edilmiştir. Yük altında faz gerilimi yüklenme ile azalırken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 40,23 A değerine ulaştığında faz gerilimi artmaya devam ettiği optimizasyon sonrasında ise bu değer 44,91 A olarak elde edilmiştir.



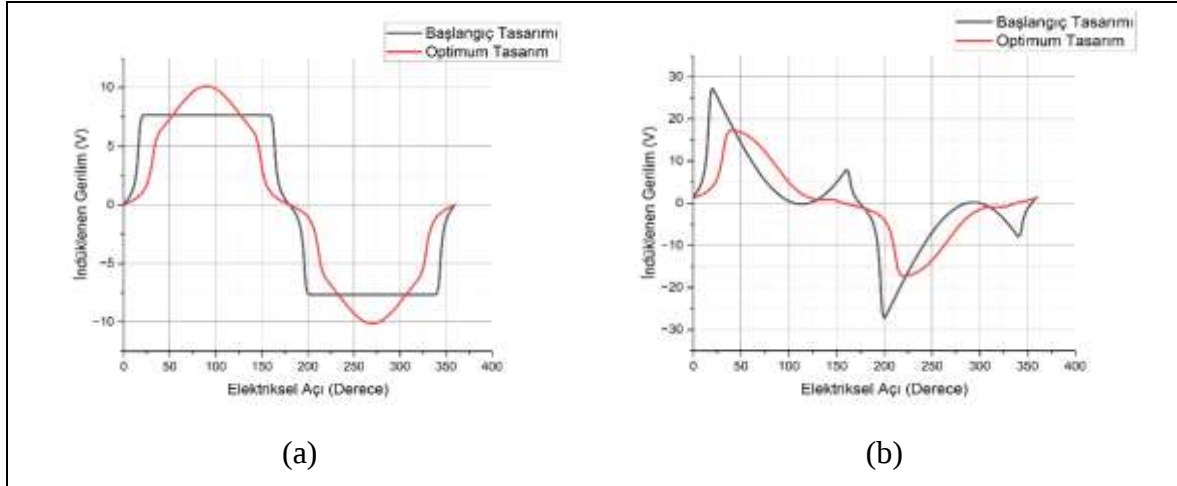
Şekil 6.4. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Şekil 6.5'te başlangıç tasarımıdaki senkron generatörün vuru torku ile optimize edilen senkron generatörün vuru torku karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımıda senkron generatörün vuru torkunun maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 23,18 Nm ile -23,18 Nm arasında iken optimizasyon sonrası vuru torkunun maksimum değeri tepeden tepeye 12,58 Nm ile -12,58 Nm arasında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda, vuru torkunda başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %45,73 oranında bir azalma elde edilmiştir. Bu azalma, sistemin moment salınımlarında önemli bir iyileşme sağlandığını ve tork karakteristiğinin daha dengeli bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir.



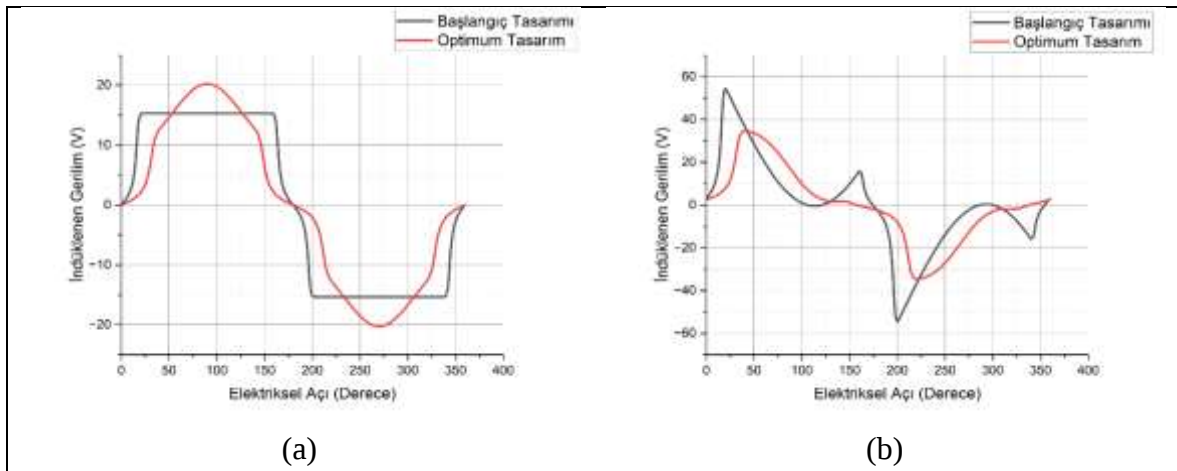
Şekil 6.5. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vurutu torkunun karşılaştırılması ($q=3$)

Şekil 6.6(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 6.6(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 7,66 V ile -7,66 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 10,13 V ile -10,13 V arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, elde edilen gerilim dalga formunun sinüs eğrisine daha yakın bir form sergilediği gözlemlenmiş olup, bu durum elektromanyetik tasarımın gerilim kalite parametreleri açısından iyileştiğini göstermektedir. Başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 27,24 V ile -27,24 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 17,3 V ile -17,3 V arasında olduğu gözlemlenmiştir.



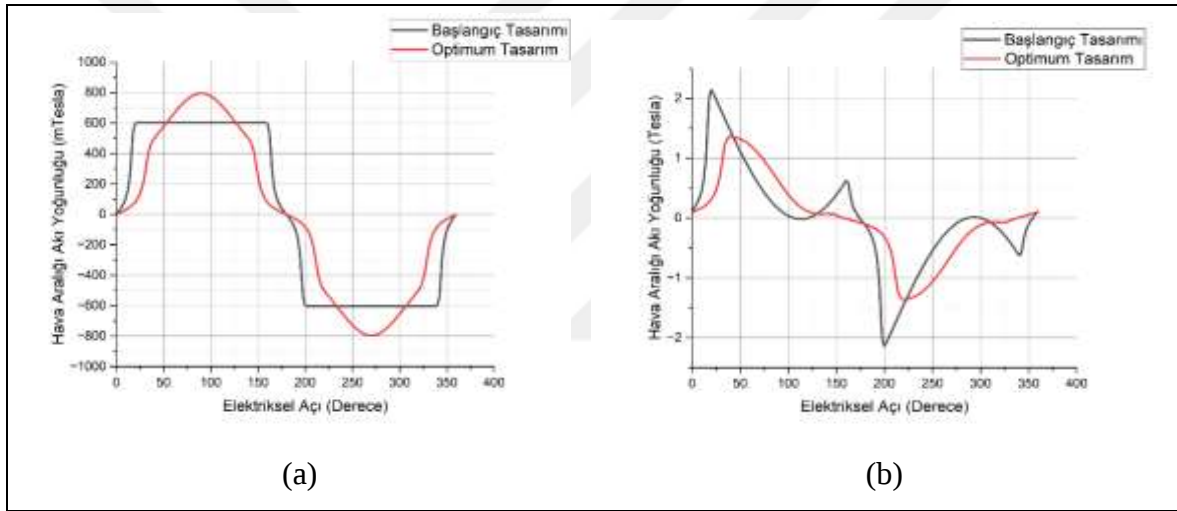
Şekil 6.6. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a)yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Şekil 6.7(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 15,33 V ile -15,33 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 20,28 V ile -20,28 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.7(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 54,5 V ile -54,5 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 34,7 V ile -34,7 V arasında elde edilmiştir.



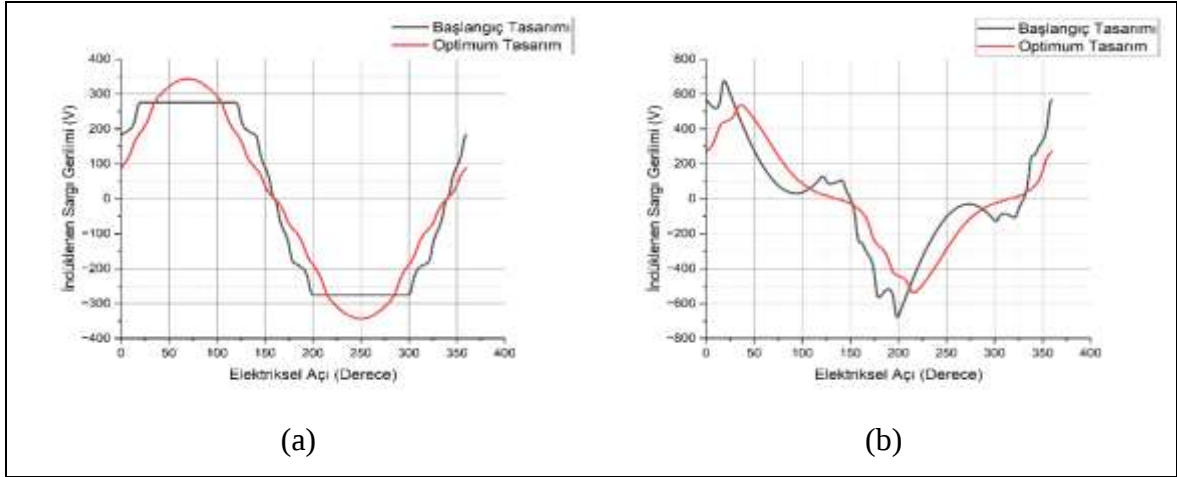
Şekil 6.7. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Şekil 6.8(a)'da, başlangıç tasarımıdaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımıda maksimum değeri tepeden tepeye 0,6 T ile -0,6 T olarak alınan bu değer optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 0,8 T ile -0,8 T olarak elde edilmiştir. Şekil 6.8(b)'de ise başlangıç tasarımıdaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi grafikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımıda senkron generatörün maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 2,2 T ile -2,2 T arasında iken optimizasyon sonrası maksimum değer tepeden tepeye 1,4 T ile -1,4 T elde edilmiştir.



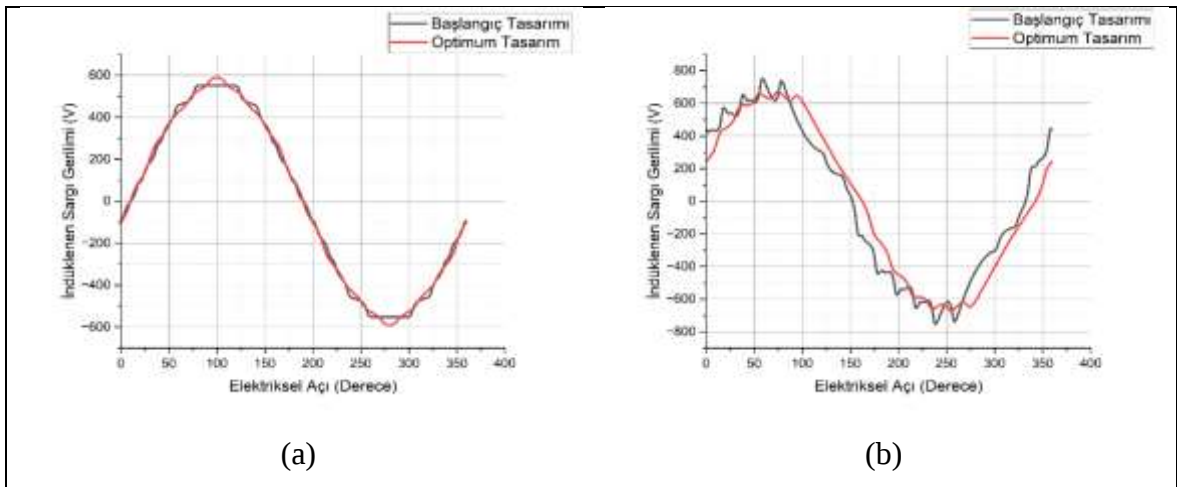
Şekil 6.8. Yüksüz durumda başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Şekil 6.9(a)'da, başlangıç tasarımıdaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda her bir fazda oluşan sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her bir fazda oluşan gerilim dalgalanmasını gösteren faz gerilimi; başlangıç tasarımıda tepeden tepeye maksimum değeri 276 V ile -276 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 344 V ile -344 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.9(b)'de ise, başlangıç tasarımıdaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında her bir fazda indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımıda faz geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 675 V ile -675 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 536 V ile -536 V arasında elde edilmiştir.



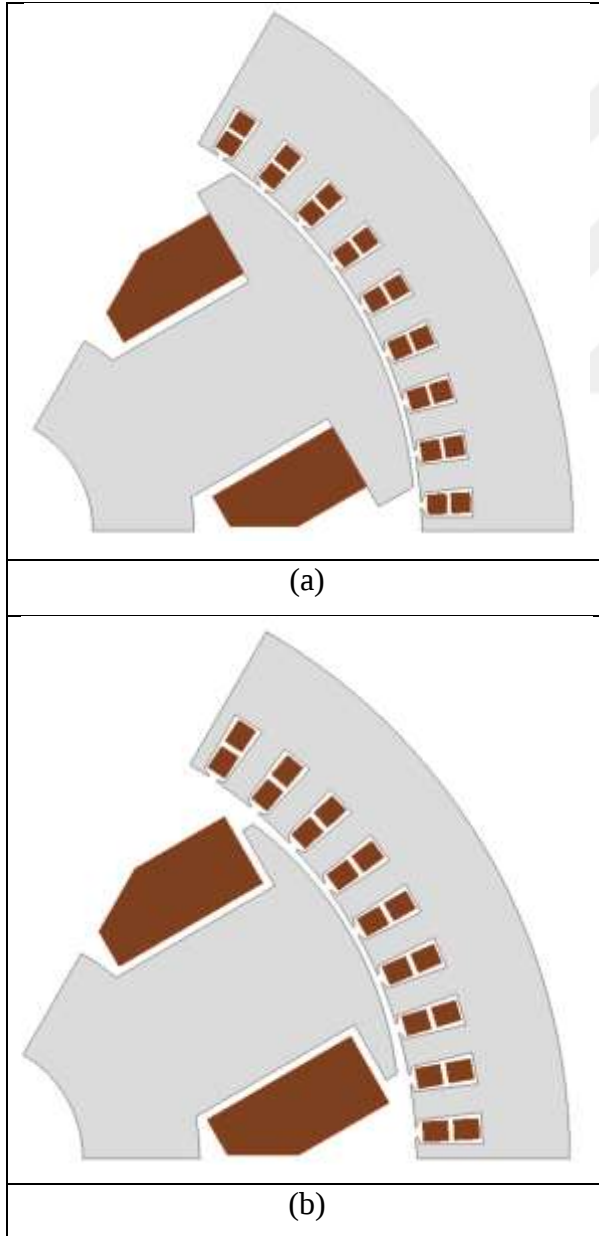
Şekil 6.9. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Şekil 6.10(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda fazlar arasındaki sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fazlar arasındaki gerilimi ifade eden hat gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 555,4 V ile -555,4 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 600V ile -600V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.10(b)'de başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında fazlar arasında indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte başlangıç tasarımında hat geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 750 V ile -750 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 672 V ile -672 V arasında elde edilmiştir.



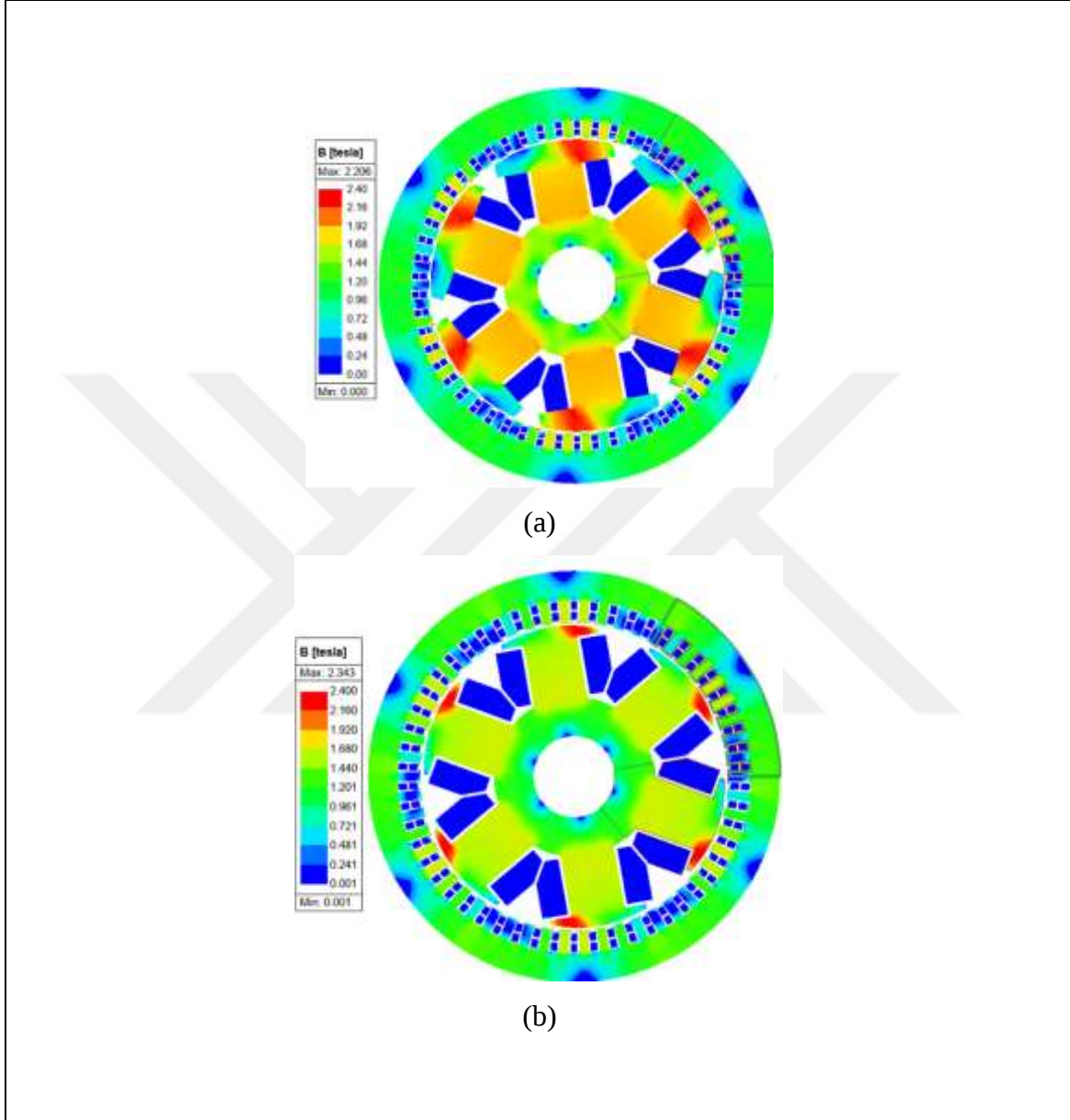
Şekil 6.10. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=3$)

Çizelge 6.2’de yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analitik analizler sonucunda, generatör performansında başta THD değeri olmak üzere anlamlı ve çok yönlü bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin manyetik doyum bölgesinde çalışıp çalışmadığının belirlenmesi amacıyla Ansys Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11’de, başlangıç ve optimum tasarım için SEA’da oluşturulan senkron generatöre ait stator ve rotor goemtrisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.11. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=3$)

Şekil 6.12’de, başlangıç ve optimum tasarım için SEA’da oluşturulan manyetik akı yoğunluğu dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



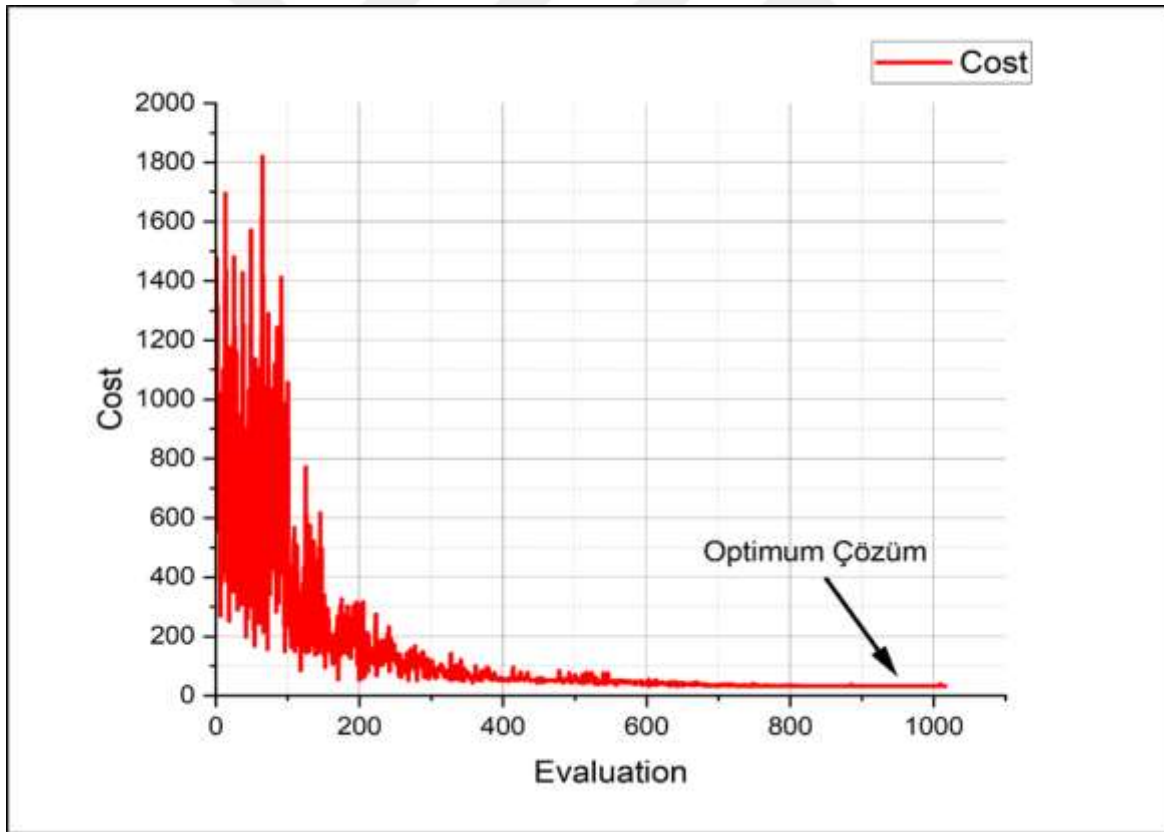
Şekil 6.12. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=3$)

Başlangıç tasarımına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, rotor kutupları ve stator dişlerinde yer yer 2,2 T seviyelerine ulaşan yüksek akı yoğunluğu olduğu görülmektedir. Bu durum, bazı bölgelerde manyetik doyum oluştuğunu ve bu nedenle nüve kayıplarının arttığını göstermektedir. Optimizasyon sonrasında ise maksimum manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 2,34 T seviyesine yükselmektedir. Rotor ve stator bölgelerinde akı yoğunluğunun daha dengeli dağıldığı, doyum etkisinin azaltıldığı ve düşük akı yoğunluklu

bölgelerin daraltıldığı sonuçları elde edilmiştir. Bu gelişmeler, elektromanyetik devredeki kayıpların azaldığını, tork üretiminin daha kararlı hale geldiğini ve genel verimliliğin arttığını göstermektedir. Ayrıca daha simetrik ve düzenli bir akı dağılımı elde edilerek, titreşim ve gürültünün azaltılmasına katkı sağlayarak generatörün daha güvenilir çalışması sağlanmaktadır.

6.3. $q=4$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması

Bu kısımda, $q = 4$ için başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün sonuç değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil 6.13'te, ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonun sonuca ne kadar yaklaştığına dair veriler sunulmaktadır.



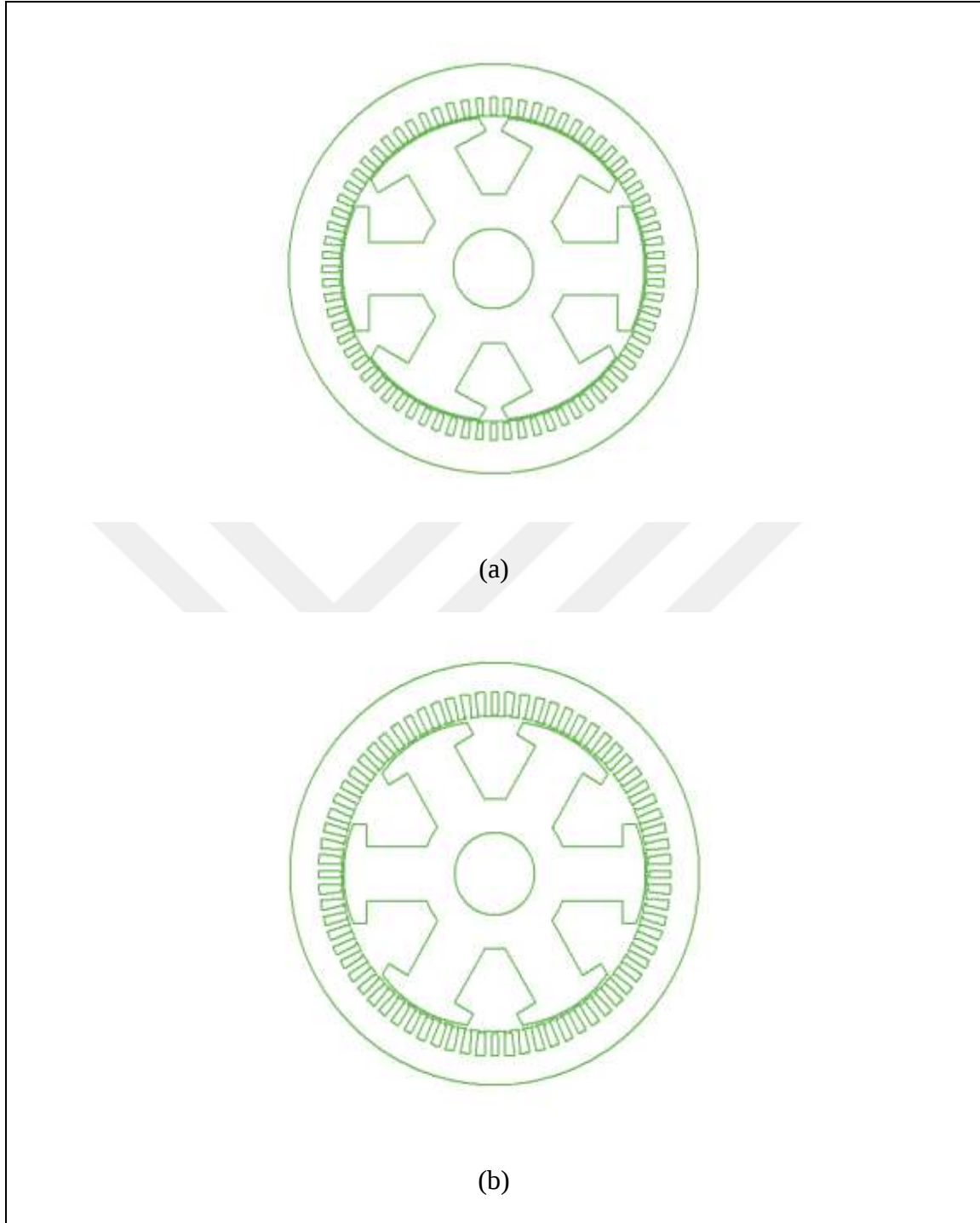
Şekil 6.13. İterasyon sonuçları ($q=4$)

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen yeni tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı biçimde Çizelge 6.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 6.3. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması (q=4)

<i>Tasarım Değişkenleri</i>				<i>Performans Parametreleri</i>		
<i>Semboller</i>	<i>Parametreler</i> <i>r</i>	<i>Başlangıç</i> <i>ç</i> <i>Tasarımı</i>	<i>Optimum</i> <i>Tasarım</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç</i> <i>ç</i> <i>Tasarımı</i>	<i>Optimum</i> <i>Tasarım</i>
$W_{S0}(\text{mm})$	Oluk Ağız Açıklığı	4	5,92	Verim	%94,92	%95,70
$h_S(\text{mm})$	Stator Diş Yüksekliği	36	39,55	THD _v (%)	10,85	3,89
OFF (mm)	Kutup Yay Ofseti	0	49,65	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,25	1,80
$h_{PB}(\text{mm})$	Kutup Gövde Yüksekliği	100	110,84	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51	1,33
$h_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Yüksekliği	50	42,46	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,36	1,39
$W_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Genişliği	230	179,69	Oluk Doluluk Oranı (%)	56,56	58,67
TW (mm)	Stator Diş Genişliği	13,5	12,16	Toplam Kayıp (kW)	28,92	24,24

Şekil 6.14'te başlangıç tasarımındaki senkron generatörün rotor ve stator geometrisi ile optimize edilen senkron generatörün rotor ve stator geometrisi sunulmaktadır.



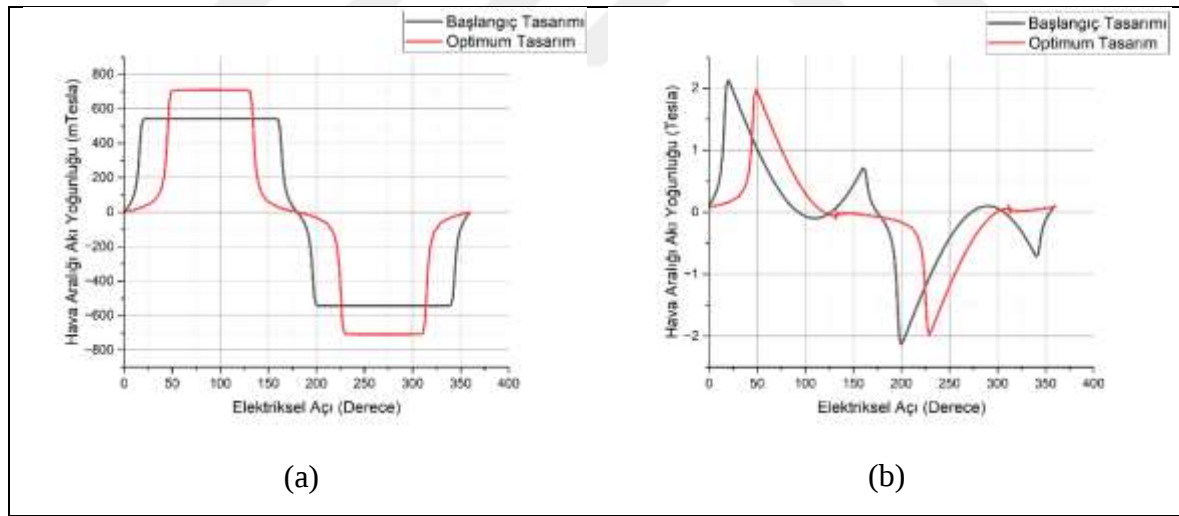
Şekil 6.14. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri ($q=4$)

Çizelge 6.3'te gösterildiği üzere, rotor ve stator geometrisine ait parametreler, amaç fonksiyonu çerçevesinde önemli ölçüde optimize edilerek değiştirilmiştir. Generatöre ait performans parametrelerinin amaç fonksiyonuna uygun bir şekilde iyileştirildiği ayrıca görülmektedir. Başlangıçta oluk ağız açıklığı 4 mm olarak belirlenmişken, optimum tasarımda bu değer 5,92 mm olarak belirlenmiştir. Bu artış, tasarımın geometrik

özelliklerinin optimize edildiğini ve daha verimli bir yapının elde edildiğini göstermektedir. Stator dış yüksekliği ise başlangıçta 36 mm iken, optimum tasarımda 39,55 mm'ye yükselmiştir. Bu değişiklik, stator geometrisinin optimize edildiğini ve boyutlarının iyileştirildiğini işaret etmektedir. Başlangıçta 0 mm olan kutup yay ofseti, optimum tasarımda 49,65 mm olarak belirlenmiş olup, tasarımda statorun pozisyonuyla ilgili bir değişiklik yapıldığını ve yerleşimin optimize edildiğini göstermektedir. Kutup gövde yüksekliği başlangıçta 100 mm iken, optimum tasarımda 110,84 mm'ye çıkarılmıştır. Bu artış, rotor geometrisinin optimize edildiğini ve rotor kutup boyutlarının iyileştirildiğini ifade etmektedir. Kutup ayak yüksekliği ise başlangıçta 50 mm, optimum tasarımda ise 42,46 mm olarak belirlenmiştir. Bu, statorun boyunduruk kısmının tasarımında yapılan bir iyileştirmeyi işaret etmektedir. Başlangıçta 230 mm olan kutup ayak genişliği, optimum tasarımda 179,69 mm'ye düşürülmüştür. Bu değişiklik, statorun sargı yerleşiminin optimize edilerek daha verimli hale getirildiğini göstermektedir. Son olarak, başlangıçta 13,5 mm olan stator dış genişliği, optimum tasarımda 12,16 mm'ye yükseltilmiştir.

Başlangıçta %94,91 olan verim, optimum tasarımda %95,70'e yükselmiştir. Bu artış, optimize edilen tasarımın daha verimli çalıştığını göstermektedir. Başlangıçta 10,85 olan THD değeri, optimum tasarımda 3,89'a düşürülmüştür. Bu, tasarımın daha düşük THD değeri ile çalıştığını ve daha sinüsoidal güç çıktısı sağladığını göstermektedir. Başlangıçta 1,25 T olan stator dışı akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,80 T'ye yükselmiştir. Bu, stator dışı akı yoğunluğunun optimize edilerek artırıldığını ve doyum karakteristiği altında daha etkin bir geometri sağlandığını göstermektedir. Başlangıçta 1,51 T olan rotor kutup akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,33 T'ye düşmüştür. Rotor kutup akı yoğunluğunun azalması, manyetik alanın optimize edildiğini göstermektedir. Başlangıçta 1,36 T olan stator boyunduruk akı yoğunluğu, optimum tasarımda izin verilen limitler içersinde 1,39 T'ye yükselmiştir. Başlangıçta 56,56 olan oluk doluluk oranı, optimum tasarımda 58,67'ye yükselmiştir. Bu artış, daha iyi bir sargı yerleşimi ve verimli bir akı yoğunluğu sağlandığını göstermektedir. Başlangıçta 28,92 kW olan toplam kayıplar, optimum tasarımda 24,24 kW'ye düşürülmüştür. Bu, kayıpların azaltıldığını ve generatörün daha verimli çalıştığını göstermektedir. Özetle, optimum tasarımda verimlilik artırılmış, THD oranı azaltılmış ve toplam kayıplar düşürülerek tasarım daha verimli, daha az elektriksel gürültüye sahip ve daha yüksek enerji verimliliği sağlanmıştır.

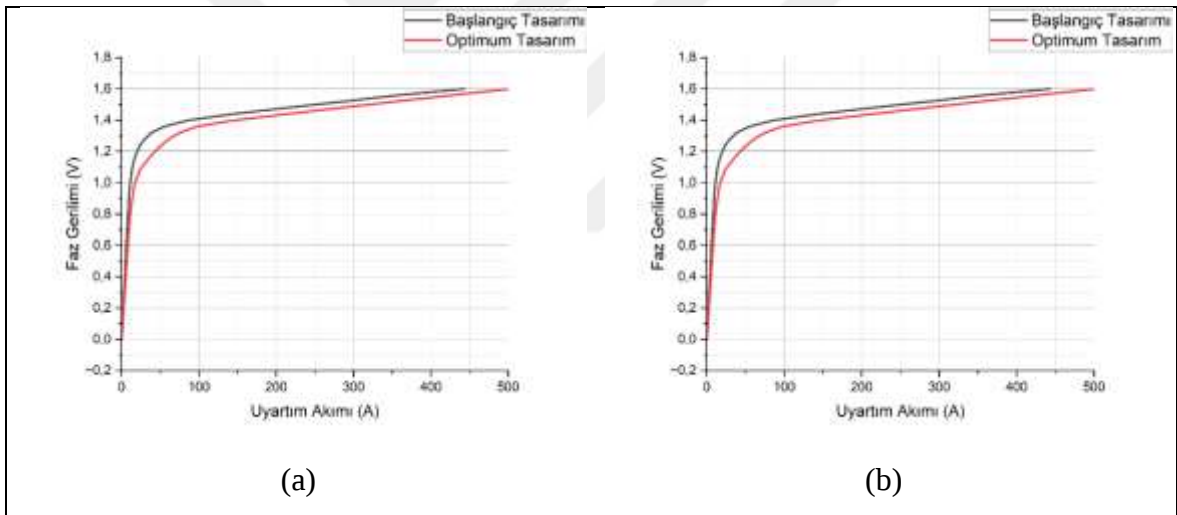
Şekil 15(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda iken hava aralığı akı yoğunluğundaki değişim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Senkron generatörün hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğunun elektriksel açıya bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. Rotor hareketi ile hava aralığında oluşturulan manyetik alanın yoğunluğunun zaman içindeki değişimi bu grafikte gözlemlenmektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu değeri generatörün spesifik manyetik yüklemesi için önemli bir parametre olup doğrudan generatörün boyutlandırması ve nüve doyum karakteristiğine etki eder. Başlangıç tasarımı maksimum değeri tepeden tepeye 0,54 T ile -0,54 T olarak alınan bu değer optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 0,72 T ile -0,72 T olarak elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak Şekil 6.15(a)'da sunulmuştur. Şekil 6.15 (b)'de ise tam yükte iken hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi grafikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımı senkron generatörün maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 2,2 T ile -2,2 T arasında iken optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye 1,3 T ile -1,3 T olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.15. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

Faz gerilimi ve uyarım akımı arasındaki ilişki, senkron generatörün verimli, güvenli ve kararlı bir şekilde çalışması için kritik öneme sahiptir. Uyarım akımının doğru ayarlanması, generatörün çıkış gerilimini kontrol eder ve bu da sistemin yüksek performansla çalışmasını sağlar. Şekil 6.16(a)'da, başlangıç tasarımındaki faz gerilimi uyarım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyarım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak

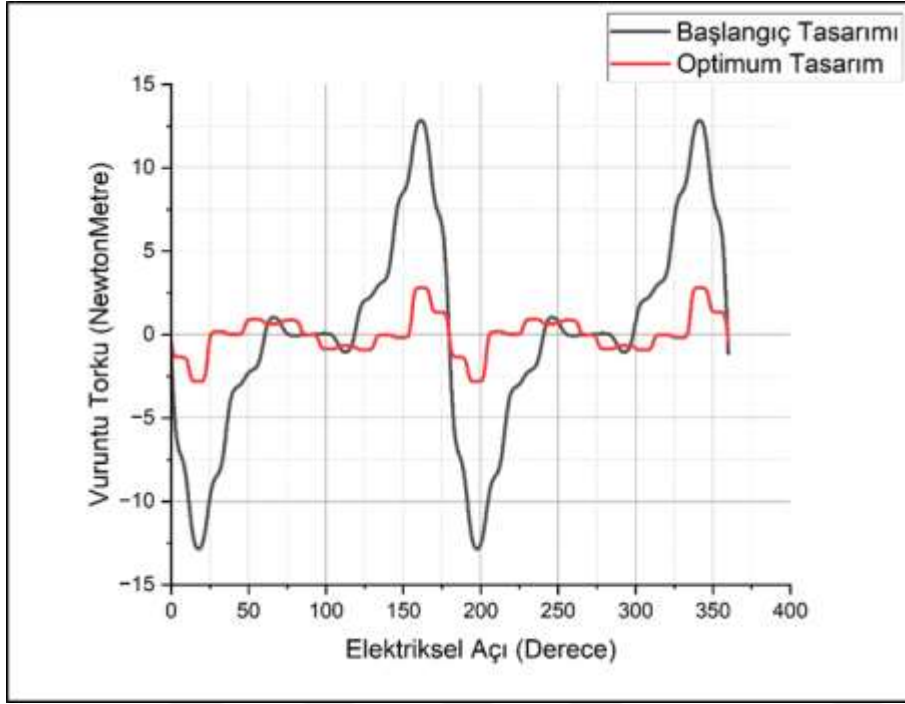
sunulmaktadır. Şekil 6.16(a), yüksüz durumdaki faz gerilimini temsil etmektedir. Yüksek uyartım akımları ile gerilimde belirli bir artış gözlemlenmiştir. Başlangıçta, gerilimde hızlı bir artış meydana gelirken, uyartım akımı belirli bir değere ulaştığında artış daha düz bir eğilim göstermektedir. Şekil 6.16(b)'de ise, yük altındaki faz gerilimini göstermektedir. Yük arttıkça faz gerilimi düşüş gösterir. Yük altındaki gerilim değeri, yüklenme ile azalırken, uyartım akımı arttıkça faz gerilimi artmaya devam etmektedir. Yüksüz durumdaki faz geriliminde hızlı bir artış meydana gelirken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 10,97 A değerine ulaştığında artış daha düz bir eğilim gösterirken optimizasyon sonrası bu değer 17,46 A olarak elde edilmiştir. Yük altında ve güç faktörü sıfır olduğu durumda faz gerilimi yüklenme ile azalırken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 40,05 A değerine ulaştığında faz gerilimi artmaya devam ettiği optimizasyon sonrasında ise bu değer 44,94 A olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.16. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

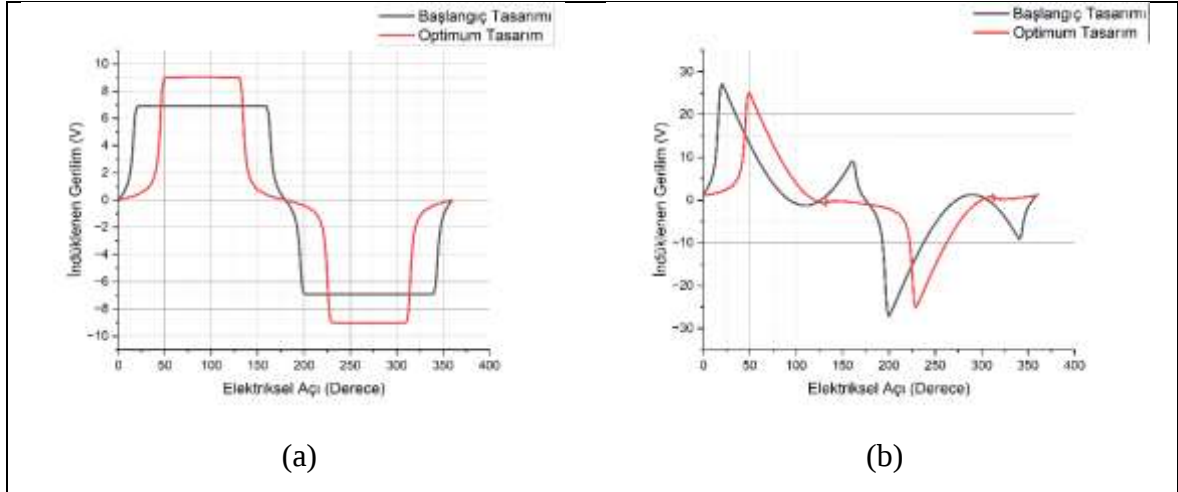
Generatör rotorunun dönme hareketindeki ani ve kısa süreli tork dalgalanmaları olarak tanımlanan vuru torkunun yüksek olması, tork dalgalanmalarına, mekanik gerilmelere, aşınmalara ve titreşimlere yol açmaktadır. Rotor geometrisi ve stator oluk açıklığı arasındaki geometrik ilişkinin doğru bir şekilde optimize edilmesi, vuru torkunun azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, titreşim kontrolü ve mekanik denge, tork dalgalanmalarının minimize edilmesine katkı sağlayacaktır. Şekil 6.17'de başlangıç tasarımıdaki senkron generatörün vuru torku ile optimize edilen senkron generatörün vuru torku karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımıda senkron generatörün

vuruntu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 12,85 Nm ile -12,85 Nm arasında iken optimizasyon sonrası vuruntu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye 2,81 Nm ile -2,81 Nm arasına indirilmiştir.



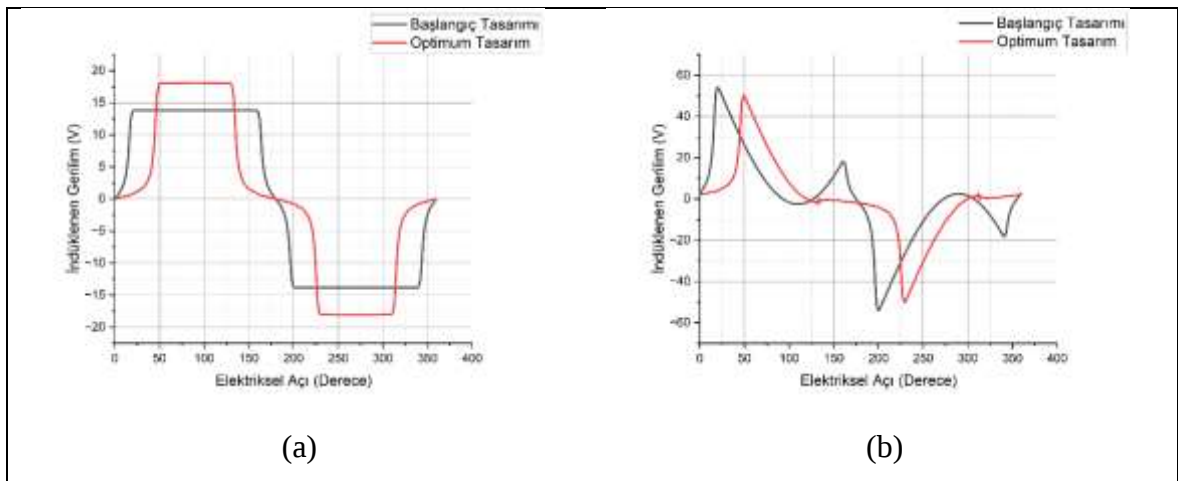
Şekil 6.17. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruntu torkunun karşılaştırılması (q=4)

Senkron generatörlerde indüklenen bobin gerilimi, generatörün enerji üretme verimliliği, şebeke ile uyumlu çalışma, yük değişimlerine karşı dayanıklılık ve uzun süreli güvenilir çalışma sağlama açısından önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 6.18(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil 6.18(b)'de başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yüksüz durum için başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 6,91 V ile -6,91 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 9 V ile -9 V arasında elde edilmektedir. Tam yük için başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 27,2 V ile -27,2 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 25 V ile -25 V arasında olduğu gözlemlenmiştir.



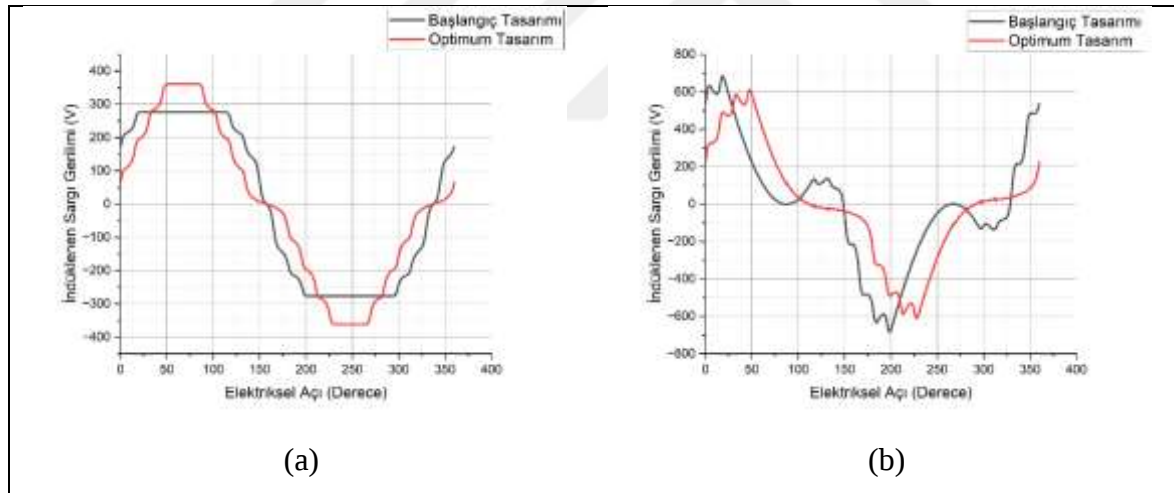
Şekil 6.18. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

Şekil 6.19(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 13,9 V ile -13,9 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 18,1 V ile -18,1 V arasında olmuştur. Şekil 6.19(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, tam yükte indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 54,3 V ile -54,3 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 50,3 V ile -50,3 V arasında olmuştur.



Şekil 6.19. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

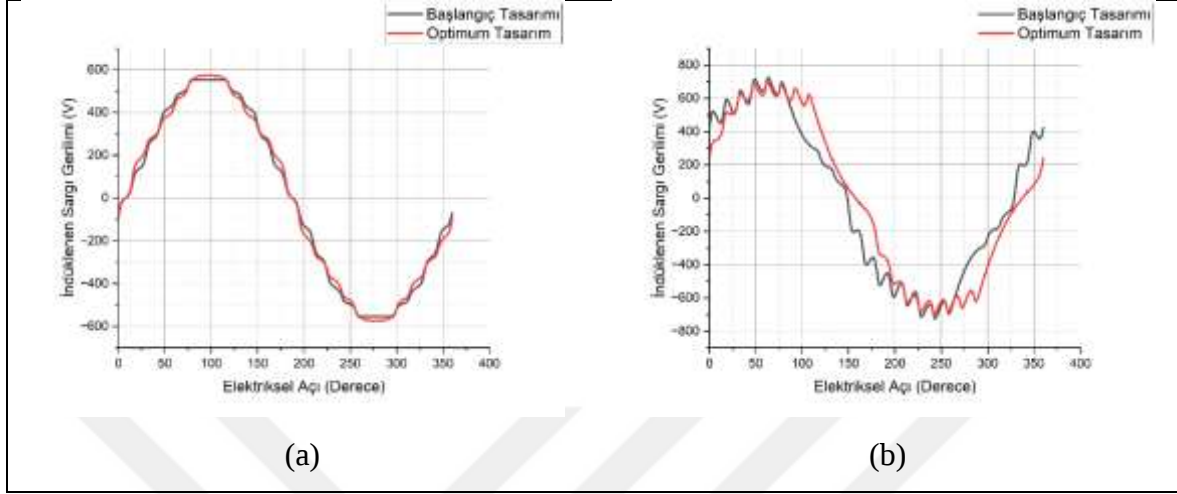
İndüklenen sargı gerilimi, generatör rotorunun oluşturduğu rotor manyetik alanının stator sargılarını kesmesiyle meydana gelen gerilimdir. Yüksüz durumda, generatörün stator sargılarındaki gerilim, rotorun manyetik alanı tarafından indüklenir ve bu gerilim, rotor hızı, kutup sayısı, manyetik akı yoğunluğu ve generatörün geometrik yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Şekil 6.20(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda her bir fazda oluşan sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her bir fazda oluşan gerilim dalgalanmasını gösteren faz gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 277 V ile -277 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 361 V ile -361 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.20(b)'de ise başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında fazlar arasındaki sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında faz geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 685 V ile -685 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 612 V ile -612 V arasında elde edilmiştir.



Şekil 6.20. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a)yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

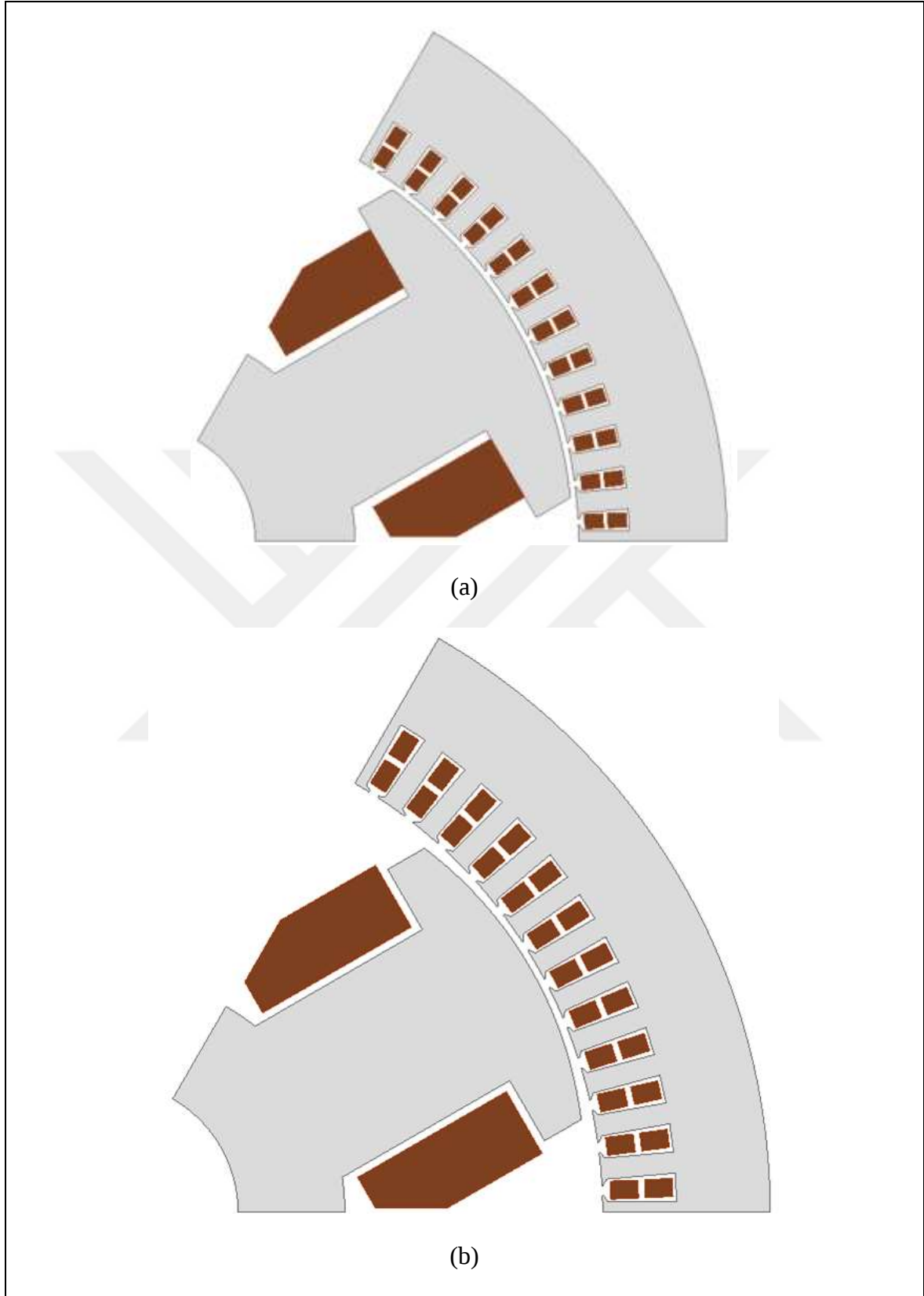
Şekil 6.21(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda fazlar arasındaki sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fazlar arasındaki gerilimi ifade eden hat gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 553 V ile -553 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 573 V ile -573 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.21(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında her bir fazda oluşan sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam

yükte başlangıç tasarımında hat geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 713 V ile -713 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 683 V ile -683 V arasında elde edilmiştir.



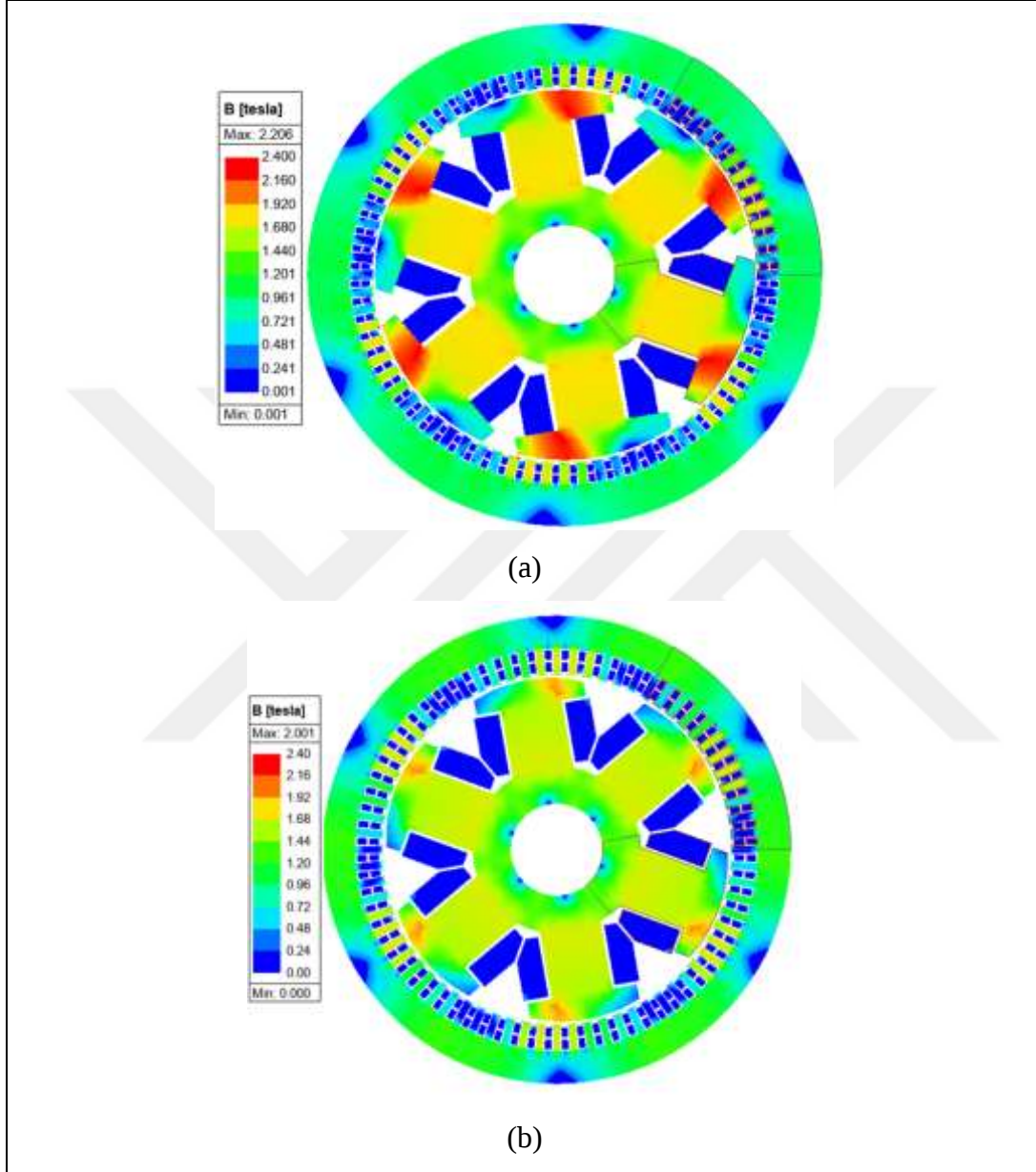
Şekil 6.21. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=4$)

Çizelge 6.3'te yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analitik analizler sonucunda, generatör performansında başta THD değeri olmak üzere anlamlı ve çok yönlü bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin manyetik doyum bölgesinde çalışıp çalışmadığının belirlenmesi amacıyla Ansys Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.22'de, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan senkron generatöre ait stator ve rotor goemtrisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.22. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=4$)

Şekil 6.23'te, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan manyetik akı yoğunluğu dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 6.23. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=4$)

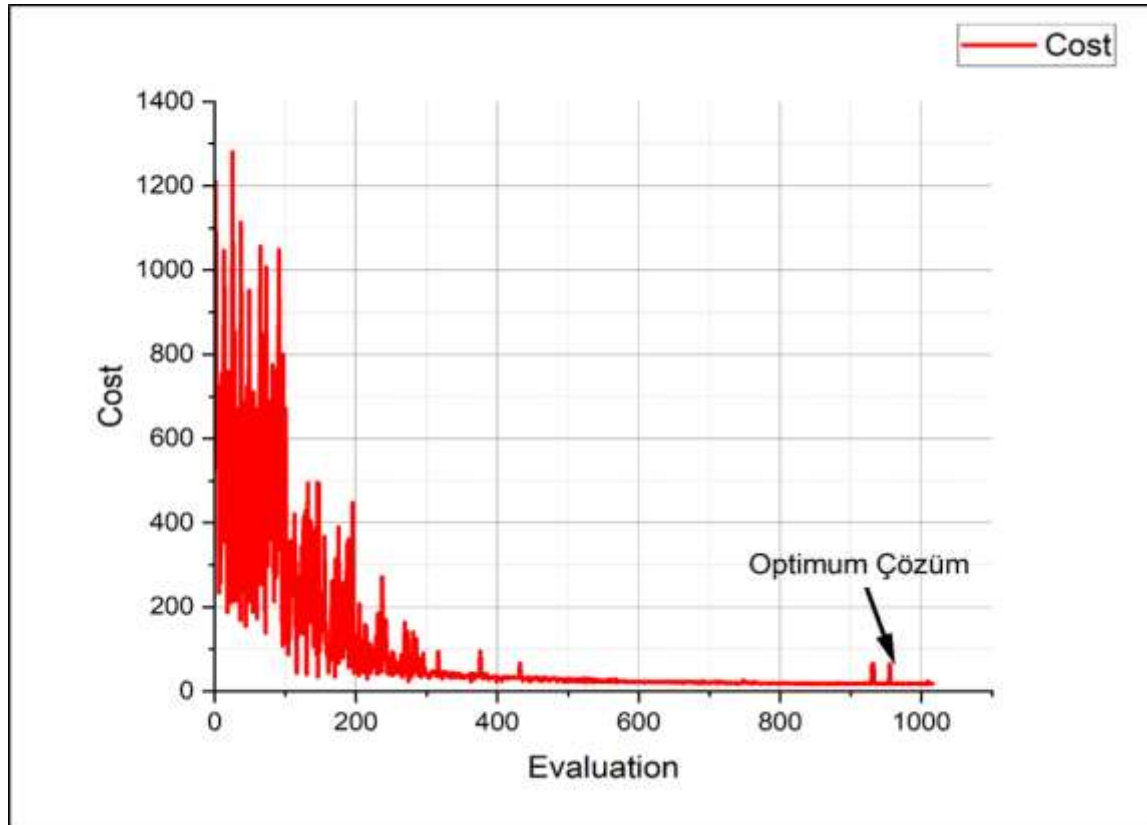
Başlangıç tasarımına ait stator dişleri ve rotor kutuplarında manyetik akı yoğunluğu maksimum değeri 2,2 T elde edilmiştir. Akı dağılımı bazı bölgelerde doyum sınırında olup optimizasyon sonrası uygun limitler içerisine düşürülmektedir. Bu durum manyetik doyum riskine ve nüve kayıplarının artmasına sebep olur. Ayrıca akı yolunun simetrik olmaması

titreşim ve tork dalgalanmalarını artırarak mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yaratır.

Optimizasyon sonrası ise manyetik akı yoğunluğu maksimum değeri 2 T elde edilmiştir. Optimizasyon sayesinde akı dağılımı daha düzgün ve simetrik hale gelmiş, lokal doyum riskleri azaltılmıştır. Bu durum nüve kayıplarının azaldığını ve elektromanyetik performansın iyileştiğini göstermektedir. Elde edilen analiz bulguları ile nüvenin manyetik doyum sınırına ulaşmadan çalıştığını ve amaç fonksiyonu ile tanımlanan ağırlıkların doğruluğunu göstermektedir.

6.4. $q=5$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması

Bu kısımda, $q = 5$ için başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün sonuç değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 6.24'de, $q=5$ için ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonun sonuca ne kadar yaklaştığına dair veriler sunulmaktadır.



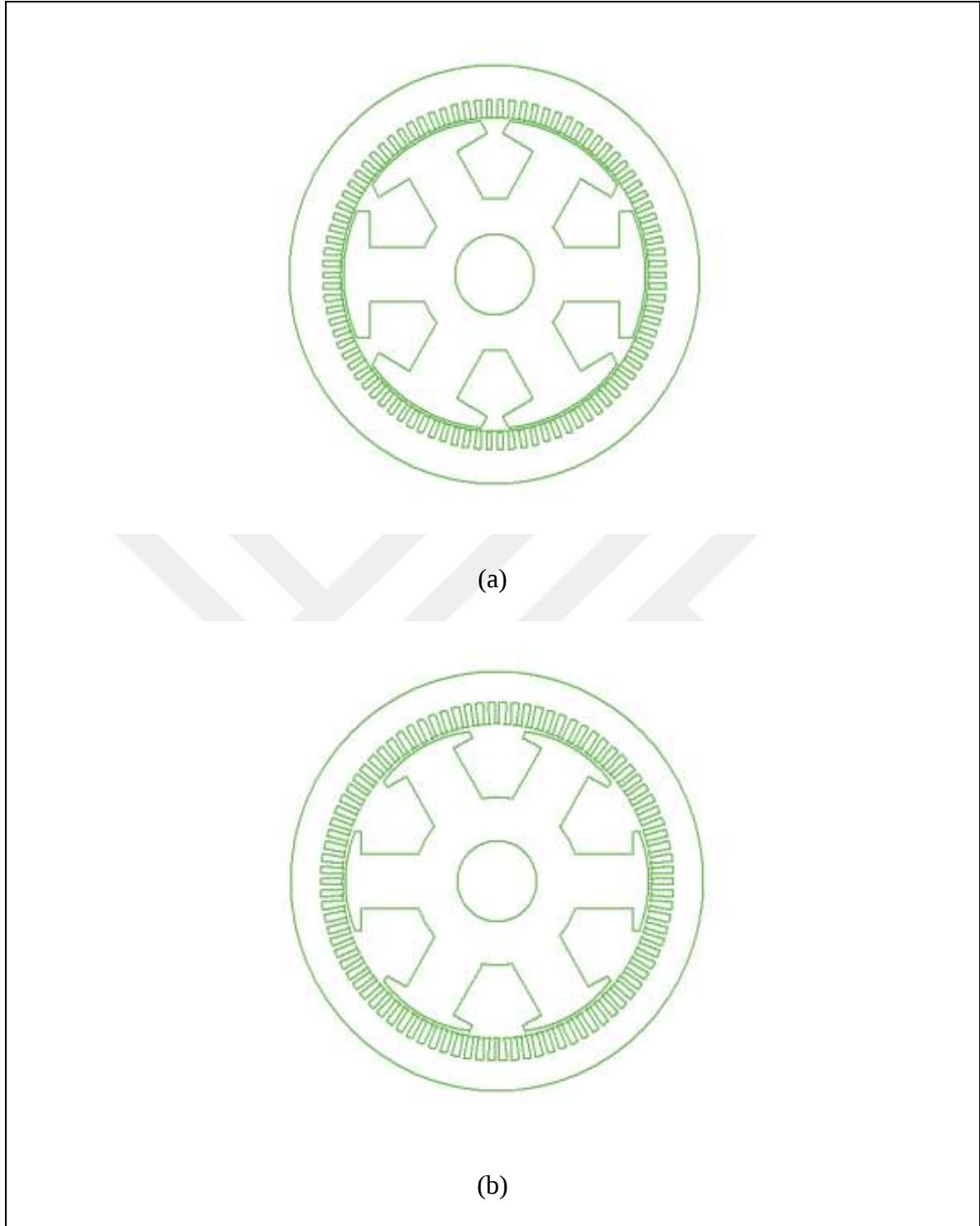
Şekil 6.24. İterasyon sonuçları ($q=5$)

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen yeni tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı biçimde Çizelge 6.4'te sunulmuştur.

Çizelge 6.3. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması($q=5$)

<i>Tasarım Değişkenleri</i>				<i>Performans Parametreleri</i>		
<i>Semboller</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç Tasarımı</i>	<i>Optimum Tasarım</i>	<i>Parametreler</i>	<i>Başlangıç Tasarımı</i>	<i>Optimum Tasarım</i>
$W_{S0}(\text{mm})$	Oluk Ağız Açıklığı	4	5,93	Verim	%95,01	%95,63
$h_s(\text{mm})$	Stator Diş Yüksekliği	36	37,07	THD _v (%)	8,69	3,54
OFF (mm)	Kutup Yay Ofseti	0	49,97	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,25	1,89
$h_{PB}(\text{mm})$	Kutup Gövde Yüksekliği	100	104,13	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51	1,31
$h_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Yüksekliği	50	30,75	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,36	1,33
$W_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Genişliği	230	179,66	Oluk Doluluk Oranı (%)	56,57	59,87
TW (mm)	Stator Diş Genişliği	13,5	9,11	Toplam Kayıp (kW)	28,34	24,66

Şekil 6.25'te başlangıç tasarımındaki senkron generatörün rotor ve stator geometrisi ile optimize edilen senkron generatörün rotor ve stator geometrisi sunulmaktadır.



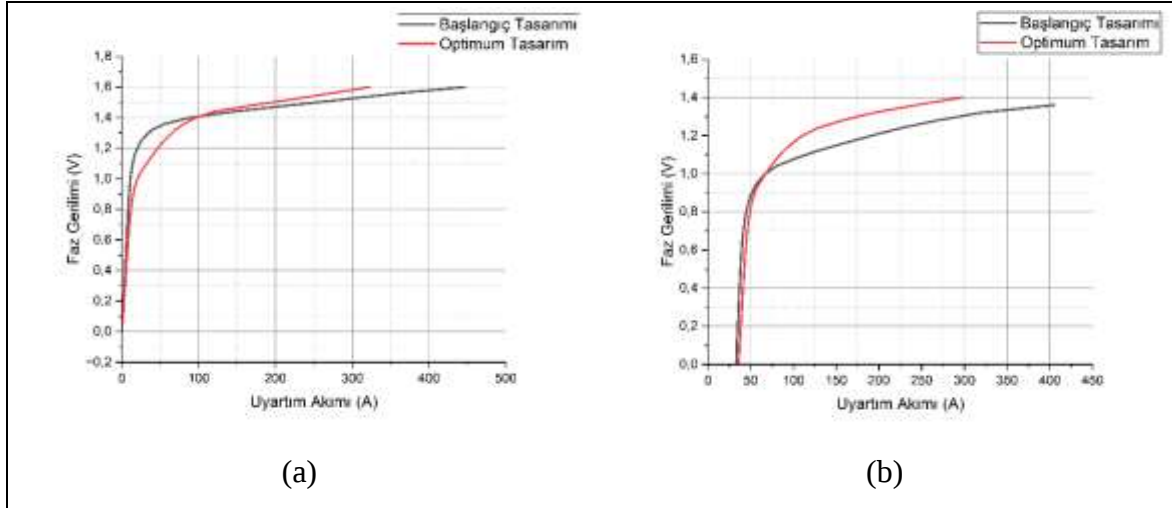
Şekil 6.25. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri ($q=5$)

Çizelge 6.4'te gösterildiği üzere, rotor ve stator geometrisine ait parametreler, amaç fonksiyonu çerçevesinde önemli ölçüde optimize edilerek değiştirilmektedir. Generatöre ait performans parametrelerinin amaç fonksiyonuna uygun bir şekilde iyileştirildiği ayrıca görülmektedir. Başlangıçta oluk ağız açıklığı 4 mm olarak belirlenmişken, optimum

tasarımda bu değer 5,93 mm olarak belirlenmiştir. Stator diş yüksekliği başlangıçta 36 mm iken, optimum tasarımda 37,07 mm'ye yükselmiştir. Başlangıçta 0 mm olan kutup yay ofseti, optimum tasarımda 49,97 mm olarak belirlenmiştir. Kutup gövde yüksekliği başlangıçta 100 mm iken, optimum tasarımda 104,12 mm'ye çıkarılmıştır. Kutup ayak yüksekliği başlangıçta 50 mm, optimum tasarımda ise 30,75 mm olarak belirlenmiştir. Başlangıçta 230 mm olan kutup ayak genişliği, optimum tasarımda 179,66 mm'ye düşürülmüştür. Son olarak, başlangıçta 13,5 mm olan stator diş genişliği, optimum tasarımda 9,11 mm'ye yükseltilmiştir. Elde edilen sonuçlardan başarılı bir optimizasyon gerçekleştirildiği görülmektedir.

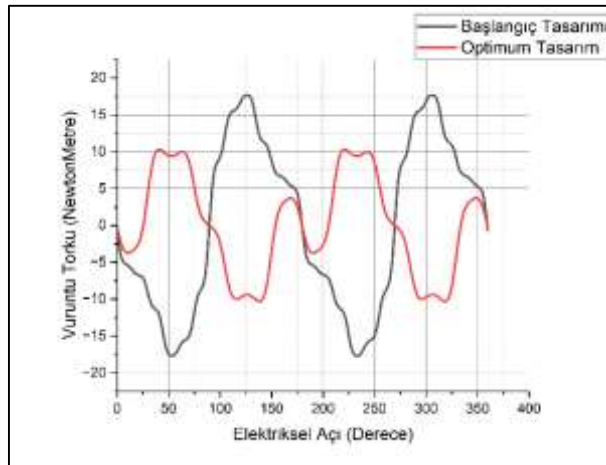
Başlangıçta %95,01 olan verim, optimum tasarımda %95,63'e yükselmiştir. Başlangıçta 8,69 olan THD değeri, optimum tasarımda 3,54'e düşürülmüştür. Başlangıçta 1,25 T olan stator dişi akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,89 T'ye yükselmiştir. Başlangıçta 1,51 T olan rotor kutup akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,31 T'ye düşmüştür. Başlangıçta 1,36 T olan stator boyunduruk akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,33 T'ye çıkmıştır. Başlangıçta 56,57 olan oluk doluluk oranı, optimum tasarımda 59,87'ye yükselmiştir. Başlangıçta 28,34 kW olan toplam kayıplar, optimum tasarımda 24,66 kW'ye düşürülmüştür. Özetle, optimum tasarımda verimlilik artırılmış, THD oranı azaltılmış ve toplam kayıplar düşürülerek, daha az elektriksel gürültüye sahip, daha yüksek enerji verimliliği sunan optimum bir tasarım elde edilmiştir.

Şekil 6.26(a)'da, başlangıç tasarımındaki yüksüz durumdaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil 6.26(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki tam yükteki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yüksüz durumdaki faz geriliminde hızlı bir artış meydana gelirken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 20,24 A değere ulaştığında artış daha düz bir eğilim gösterirken optimizasyon sonrası bu değer 20,05 A olduğu gözlemlenmiştir. Yük altında faz gerilimi yüklenme ile azalırken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 67,08 A değerine ulaştığında faz gerilimi artmaya devam ettiği optimizasyon sonrasında ise bu değer 67,42 A olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.26. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyartım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

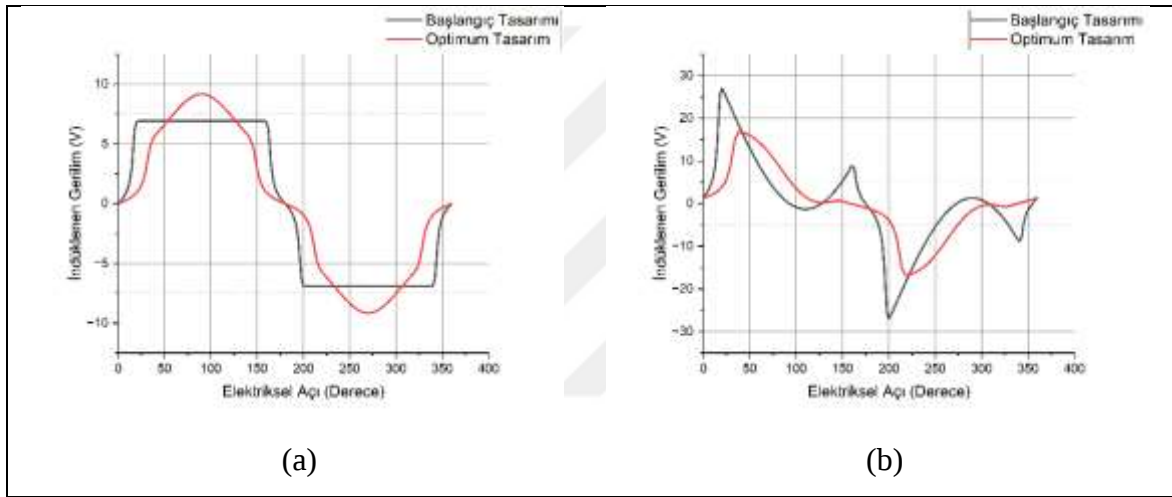
Şekil 6.27'de başlangıç tasarımındaki senkron generatörün vuruşu torku ile optimize edilen senkron generatörün vuruşu torku karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında senkron generatörün vuruşu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 17,7 Nm ile -17,7 Nm arasında iken optimizasyon sonrası vuruşu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye 10,31 Nm ile -10,31 Nm azaltılmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda, vuruşu torkunda başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %41,74 oranında bir azalma elde edilmiştir.



Şekil 6.27. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruşu torkunun karşılaştırılması ($q=5$)

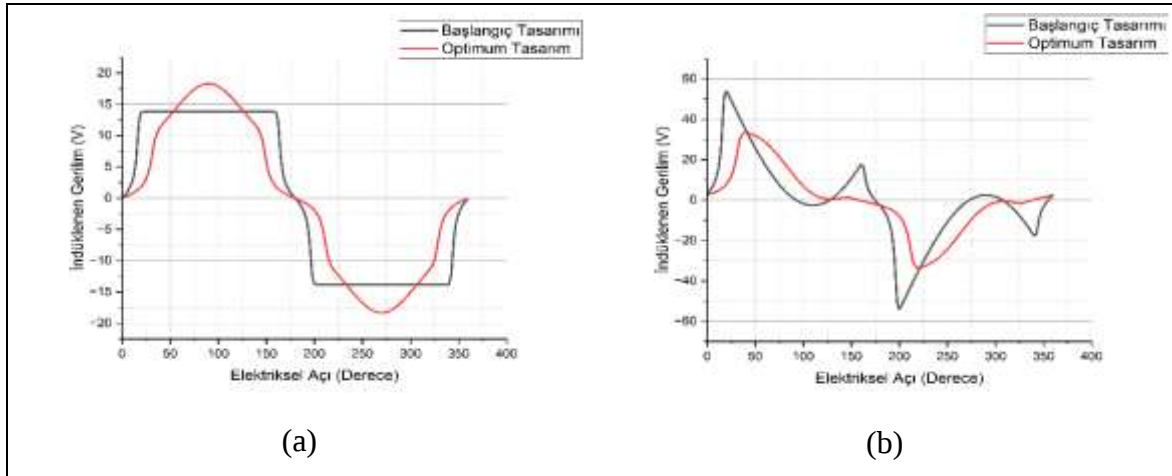
Şekil 6.28(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri

karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 6,93V ile -6,93V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 9,16V ile -9,16V arasında artırılmıştır. Şekil 6.28(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 26,97 V ile -26,97 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 16,7 V ile -16,7 V arasına azaltılmıştır.



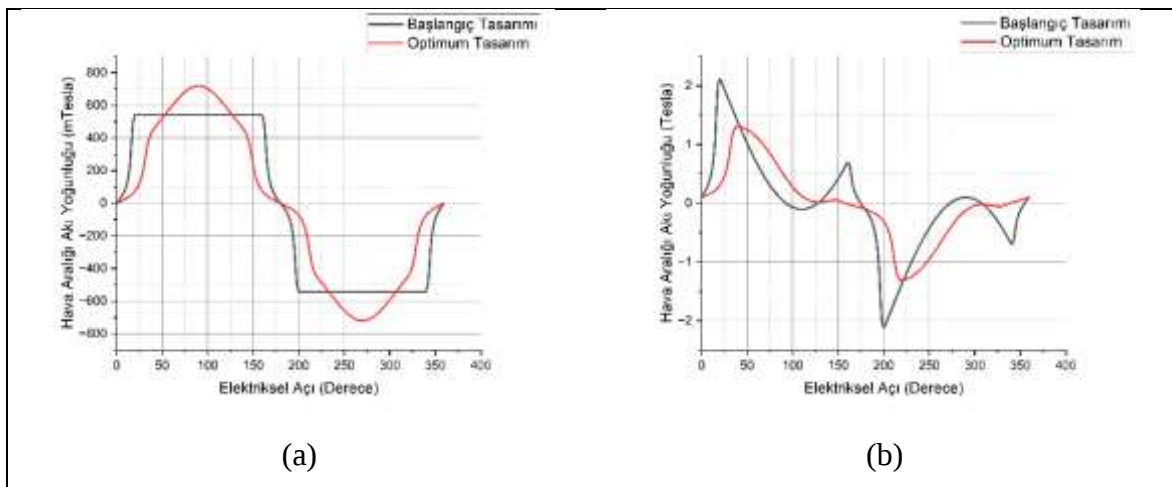
Şekil 6.28. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

Şekil 6.29(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 13,84 V ile -13,84 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 18,63 V ile -18,63 V arasında olmuştur. Şekil 6.29(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 53,95 V ile -53,95 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 33,42 V ile -33,42 V arasında olmuştur.



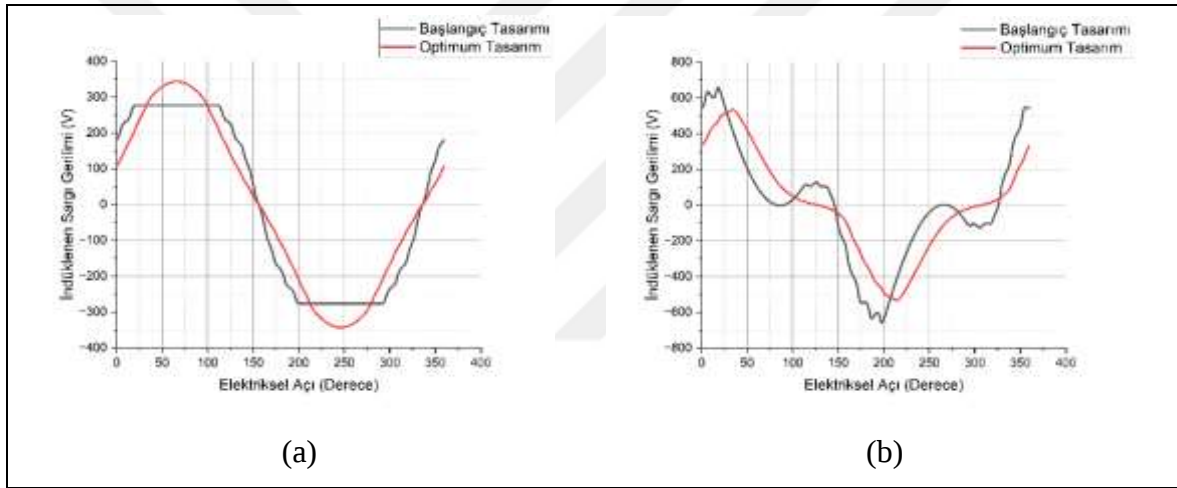
Şekil 6.29. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

Şekil 6.30(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yüksüz durumda başlangıç tasarımında maksimum değeri tepeden tepeye 0,54 T ile -0,54 T olarak alınan bu değer optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 0,73 T ile -0,73 T olarak elde edilmiştir. Şekil 6.30(b)'de başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi grafikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımda senkron generatörün maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 2,12 T ile -2,12 T arasında iken optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye 1,33 T ile -1,33 T olarak elde edilmiştir.



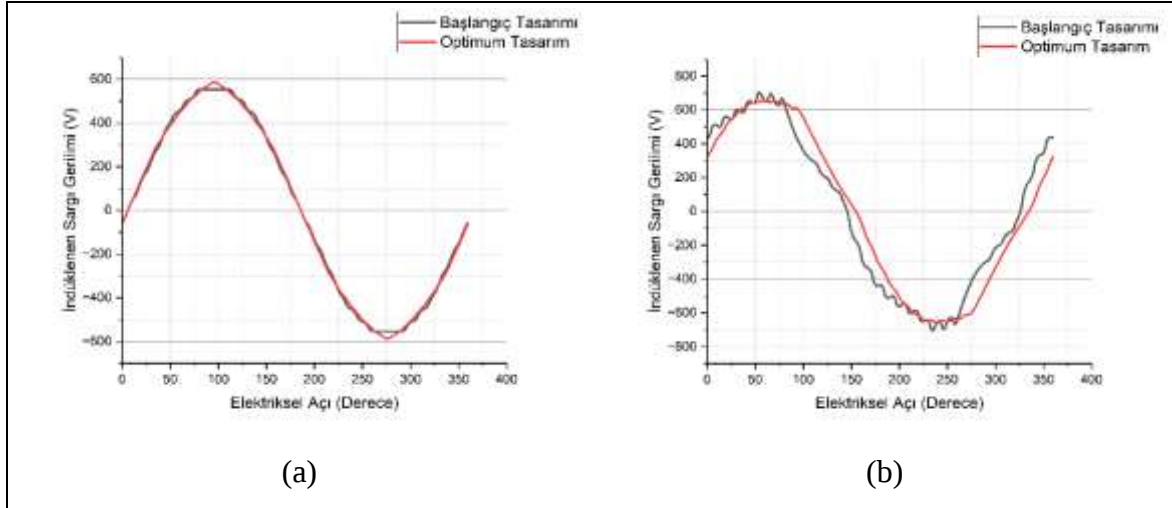
Şekil 6.30. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

Şekil 6.31(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda her bir fazda oluşan sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her bir fazda oluşan gerilim dalgalanmasını gösteren faz gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 276,85 V ile -276,85 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 343,6 V ile -343,6 V olarak elde edilmiştir. Şekil 6.31(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında her bir fazda indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte başlangıç tasarımında faz geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 659,92 V ile -659,92 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 537,41 V ile -537,41 V arasında elde edilmiştir.



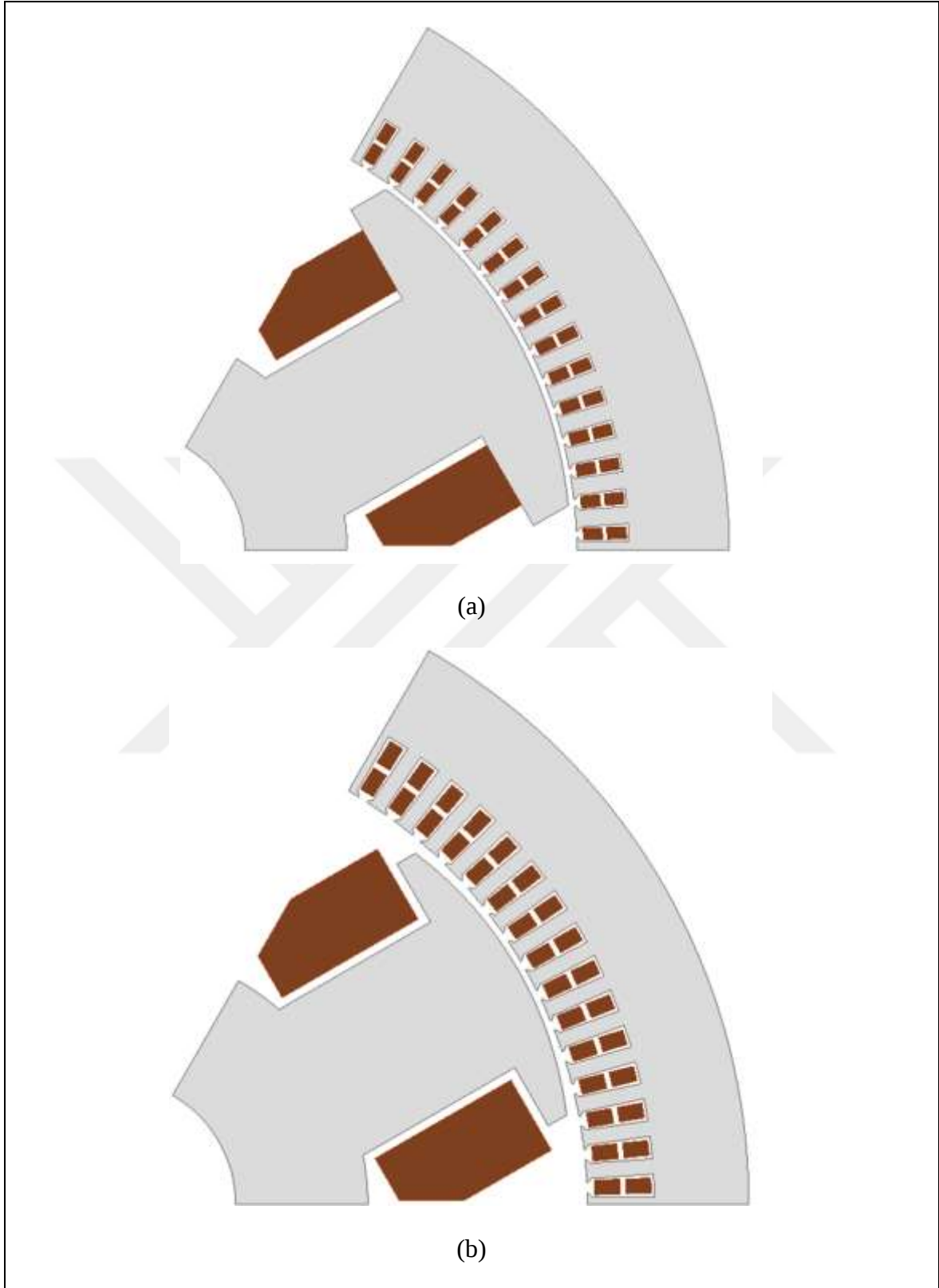
Şekil 6.31. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

Şekil 6.32(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda fazlar arasındaki sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fazlar arasındaki gerilimi ifade eden hat gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 553,70 V ile -553,70 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 593,47 V ile -593,47 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.32(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında fazlar arasında indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında hat geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 705,46 V ile -705,46 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 662,15 V ile -662,15 V arasında olduğu gözlemlenmiştir.



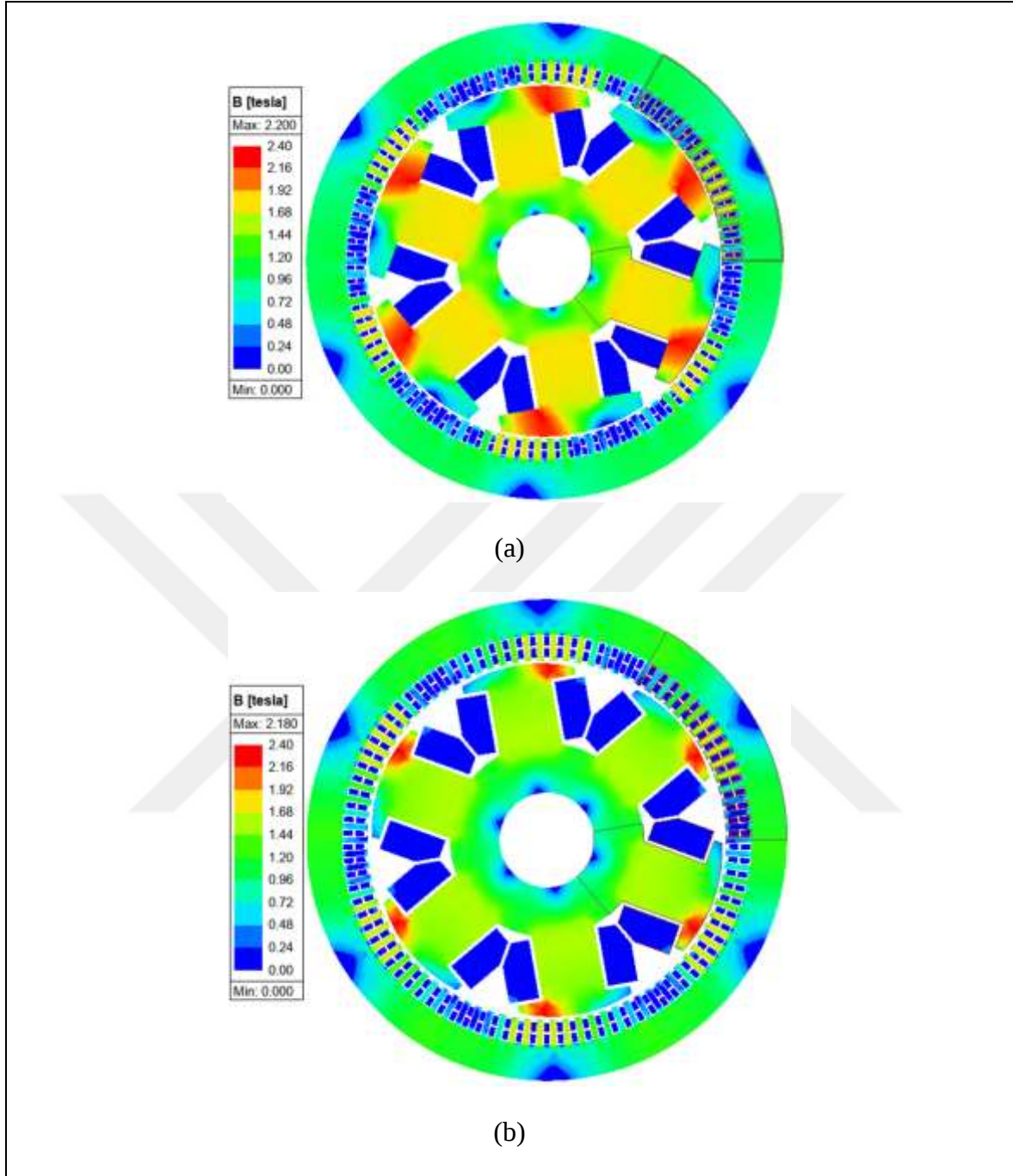
Şekil 6.32. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=5$)

Çizelge 6.4'te yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analitik analizler sonucunda, generatör performansında başta THD değeri olmak üzere anlamlı ve çok yönlü bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin manyetik doyum bölgesinde çalışıp çalışmadığının belirlenmesi amacıyla Ansys Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.33'te, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan senkron generatöre ait stator ve rotor goemtrisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.33. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=5$)

Şekil 6.34'te, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan manyetik akı yoğunluğu dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



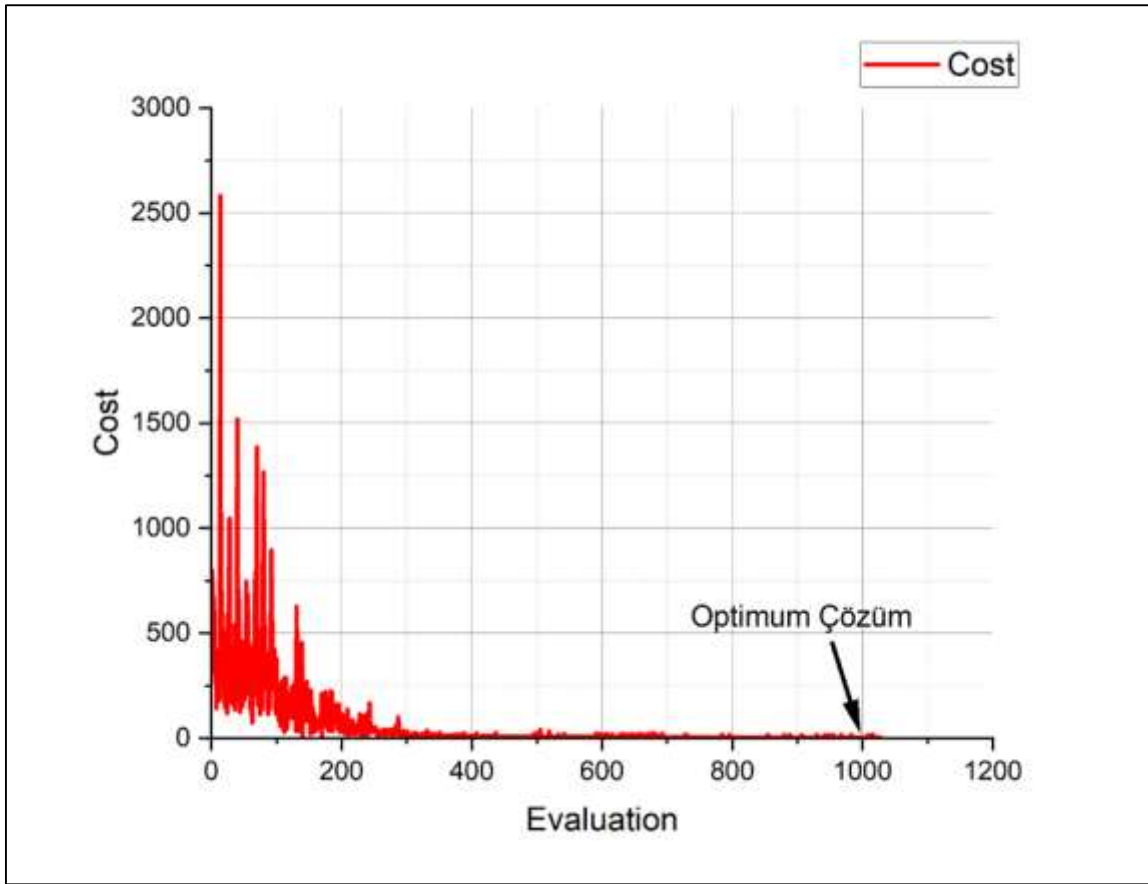
Şekil 6.34. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=5$)

Başlangıç tasarımında; maksimum akı yoğunluğu 2,2 T civarında iken optimizasyon sonrası bu değer 2,1 T'ye hafif azalmıştır. Başlangıç tasarımında doyuma oldukça yakın iken optimizasyon sonrası bu doyum hâlâ devam ediyor olsa da güvenli kabul edilebilir bir doyumdur. Stator ve rotor nüvesindeki manyetik doyum azalmış, nüve kayıplarında düşüş sağlanmıştır. Akı yolunun daha düzgün ve simetrik hale gelmesiyle titreşim ve tork dalgalanmaları azalmış, mekanik performans iyileştirilmiştir.

6.5. $q=6$ Değeri İçin Başlangıç Tasarımı ve Optimize Edilen Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Karşılaştırılması

Bu kısımda $q=6$ için başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün sonuç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 6.35'te, $q=6$ için ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonun sonuca ne kadar yaklaştığına dair veriler sunulmaktadır.



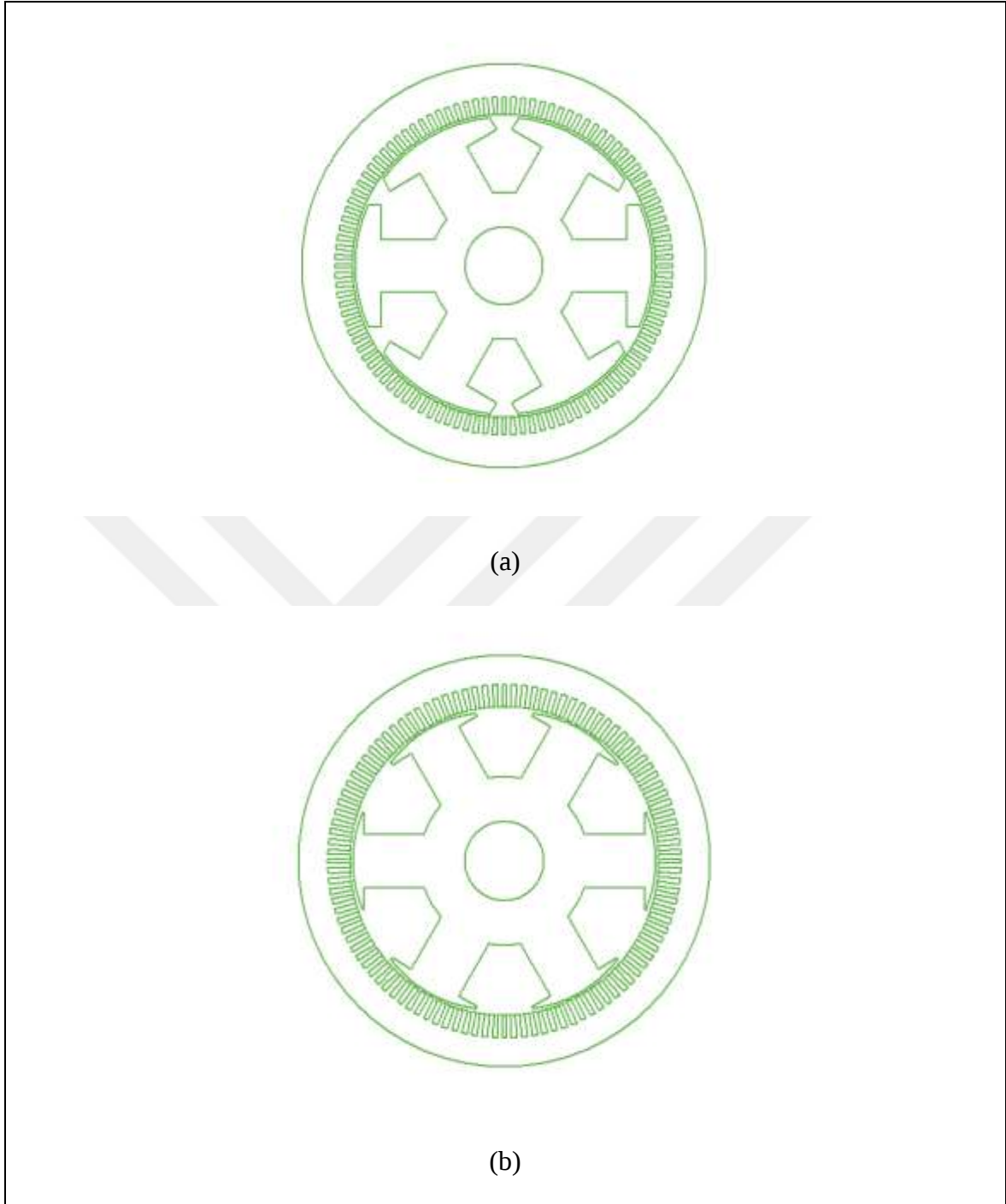
Şekil 6.35. İterasyon sonuçları ($q=6$)

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen yeni tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı şekilde Çizelge 6.5'te sunulmaktadır.

Çizelge 6.5. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması (q=6)

<i>Tasarım Değişkenleri</i>				<i>Performans Parametreleri</i>		
<i>Semboller</i>	<i>Parametreler</i> <i>r</i>	<i>Başlangıç</i> <i>ç</i> <i>Tasarımı</i>	<i>Optimum</i> <i>Tasarım</i>	<i>Parametreler</i> <i>r</i>	<i>Başlangıç</i> <i>ç</i> <i>Tasarımı</i>	<i>Optimum</i> <i>Tasarım</i>
$W_{S0}(\text{mm})$	Oluk Ağız Açıklığı	4	5,25	Verim	%95,27	%95,88
$h_S(\text{mm})$	Stator Diş Yüksekliği	36	37,95	THD _v (%)	7,37	3,27
OFF (mm)	Kutup Yay Ofseti	0	47,03	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,39	1,81
$h_{PB}(\text{mm})$	Kutup Gövde Yüksekliği	100	109,12	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,69	1,43
$h_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Yüksekliği	50	22,45	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,51	1,51
$W_{PS}(\text{mm})$	Kutup Ayak Genişliği	230	179,25	Oluk Doluluk Oranı (%)	50,91	59,99
TW (mm)	Stator Diş Genişliği	13,5	8,86	Toplam Kayıp (kW)	26,81	23,19

Şekil 6.36 ‘da başlangıç tasarımındaki senkron generatörün rotor ve stator geometrisi ile optimize edilen senkron generatörün rotor ve stator geometrisi sunulmaktadır.



Şekil 6.36. Rotor ve stator geometrisi (a) başlangıç tasarımındaki geometri, (b) optimizasyon sonrası elde edilen geometri ($q=6$)

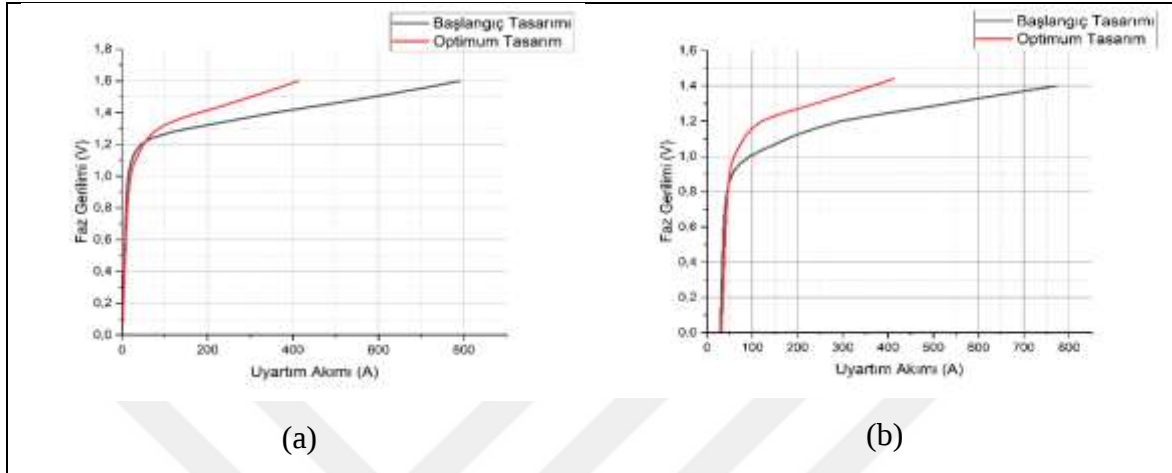
Çizelge 6.5'te gösterildiği üzere, rotor ve stator geometrisine ait parametreler, amaç fonksiyonu çerçevesinde önemli ölçüde optimize edilerek değiştirilmektedir. Generatöre ait performans parametrelerinin amaç fonksiyonuna uygun bir şekilde iyileştirildiği ayrıca görülmektedir. Başlangıçta oluk ağız açıklığı 4 mm olarak belirlenmişken, optimum tasarımda bu değer 5,25 mm olarak belirlenmiştir. Stator dış yüksekliği başlangıçta 36 mm

iken, optimum tasarımda 37,95 mm'ye yükselmiştir. Başlangıçta 0 mm olan kutup yay ofseti, optimum tasarımda 47,03 mm olarak belirlenmiştir. Kutup gövde yüksekliği başlangıçta 100 mm iken, optimum tasarımda 109,12 mm'ye çıkarılmıştır. Kutup ayak yüksekliği ise başlangıçta 50 mm, optimum tasarımda ise 22,45 mm olarak belirlenmiştir. Başlangıçta 230 mm olan kutup ayak genişliği, optimum tasarımda 179,25 mm'ye düşürülmüştür. Son olarak, başlangıçta 13,5 mm olan stator diş genişliği, optimum tasarımda 8,86 mm'ye yükseltilmiştir. Elde edilen sonuçlardan başarılı bir optimizasyon gerçekleştirildiği görülmektedir.

Başlangıçta %95,27 olan verim, optimum tasarımda %95,88'e yükselmiştir. Bu artış, optimize edilen tasarımın daha verimli çalıştığını göstermektedir. Başlangıçta 7,37 olan THD değeri, optimum tasarımda 3,27'ye düşürülmüştür. Bu, tasarımın daha düşük THD değeri ile çalıştığını ve daha temiz bir güç çıktısı sağladığını göstermektedir. Başlangıçta 1,39 T olan stator dişi akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,81 T'ye yükselmiştir. Bu, stator dişi akı yoğunluğunun optimize edilerek arttığını ve izin verilen limitler içinde optimal tasarım bulunduğunu göstermektedir. Başlangıçta 1,69 T olan rotor kutup akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,43 T'ye düşmüştür. Rotor kutup akı yoğunluğunun azalması, optimize edilen geometri neticesinde kutup kesit alanının arttığını göstermektedir. Başlangıçta 1,51 T olan stator boyunduruk akı yoğunluğu, optimum tasarımda 1,51 T olarak sabit kalmıştır. Başlangıçta 50,91 olan oluk doluluk oranı, optimum tasarımda 59,99'a yükselmiştir. Bu artış, daha iyi bir sargı yerleşimi ve verimli bir akı yoğunluğu sağlandığını göstermektedir. Başlangıçta 26,81 kW olan toplam kayıplar, optimum tasarımda 23,19 kW'ye düşürülmüştür. Bu, kayıpların azaltıldığını ve generatörün daha verimli çalıştığını göstermektedir. Özetle, optimum tasarımda verimlilik artırılmış, THD oranı azaltılmış ve toplam kayıplar düşürülerek tasarım daha verimli, daha az elektriksel gürültüye sahip ve daha yüksek enerji verimliliği sağlanmaktadır.

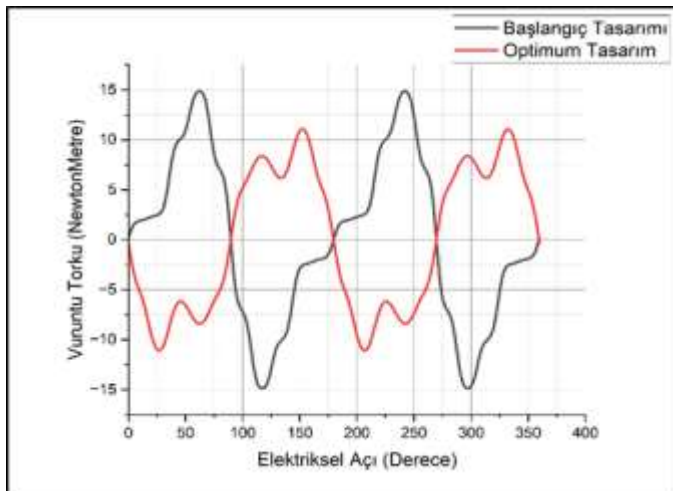
Şekil 6.37(a)'da, başlangıç tasarımındaki yüksüz durumdaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Şekil 6.37(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki tam yükteki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi ile optimizasyon sonrasındaki faz gerilimi uyartım akımı ilişkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Yüksüz durumdaki faz geriliminde hızlı bir artış meydana gelirken, başlangıç tasarımındaki uyartım akımı 14,72 A değere ulaştığında artış daha düz bir eğilim gösterirken optimizasyon sonrası bu değer 20,03 A olarak elde

edilmektedir. Yük altında faz gerilimi yüklenme ile azalırken, başlangıç tasarımındaki uyarım akımı 39,18 A değerine ulaştığında faz gerilimi artmaya devam ettiği optimizasyon sonrasında ise bu değer 43,14 A olarak elde edilmektedir.



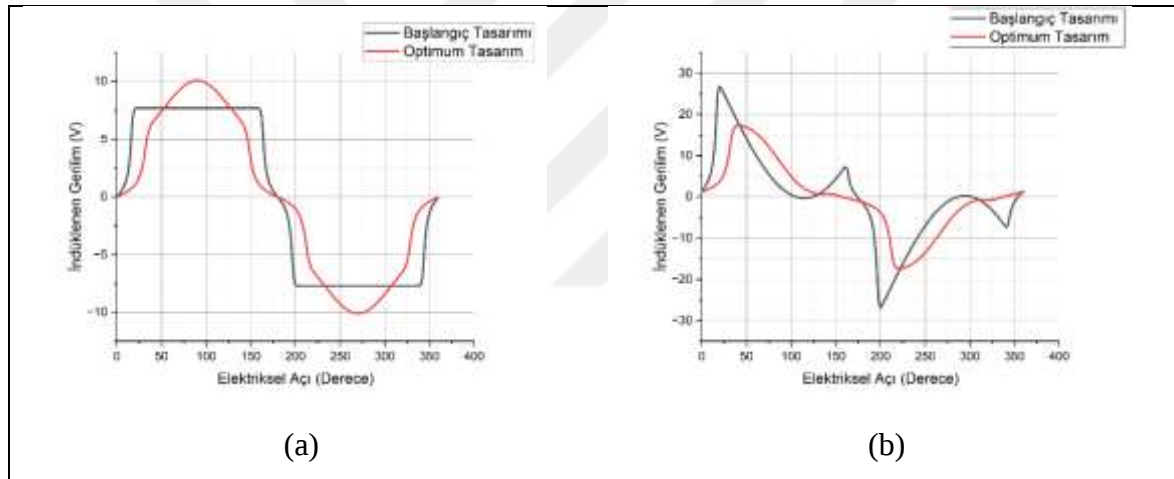
Şekil 6.37. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki faz gerilim-uyarım akımının karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Şekil 6.38'de başlangıç tasarımındaki senkron generatörün vuruşu torku ile optimize edilen senkron generatörün vuruşu torku karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımda senkron generatörün vuruşu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 14,89 Nm ile - 14,89 Nm arasında iken optimizasyon sonrası vuruşu torkunun maksimum değeri tepeden tepeye 11,08 Nm ile - 11,08 Nm arasına azalmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda, vuruşu torkunda başlangıç değerine kıyasla yaklaşık %25,59 oranında bir azalma elde edilmiştir.



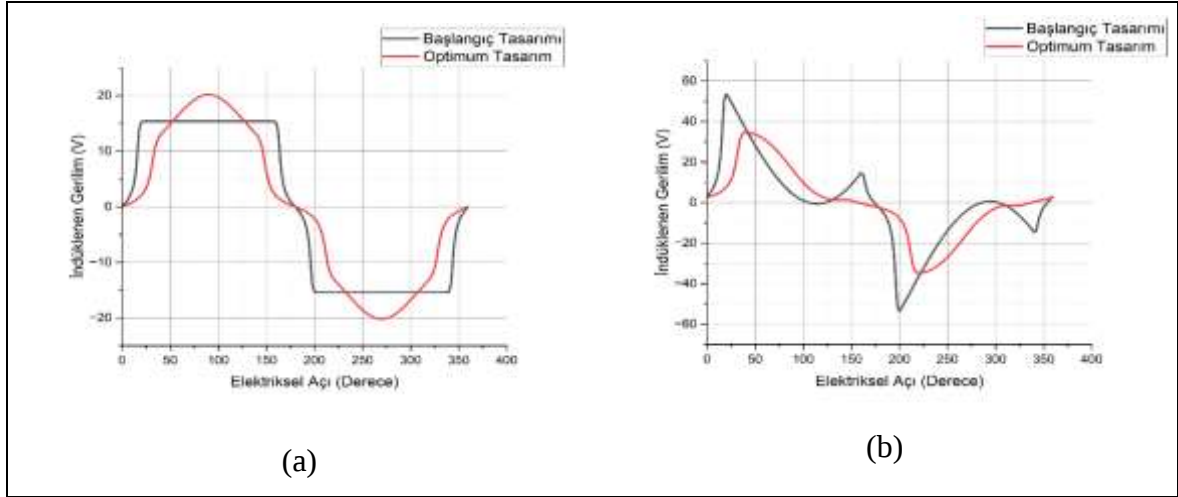
Şekil 6.38. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki vuruşu torkunun karşılaştırılması ($q=6$)

Şekil 6.39(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 7,7 V ile -7,7 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 10,1 V ile -10,1 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.39(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte başlangıç tasarımında, tek iletken üzerinde ölçülen gerilim değerlerinin tepeden tepeye maksimum değeri 27 V ile -27 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değerlerin tepeden tepeye maksimum değeri 17,5 V ile -17,5 V arasında elde edilmiştir.



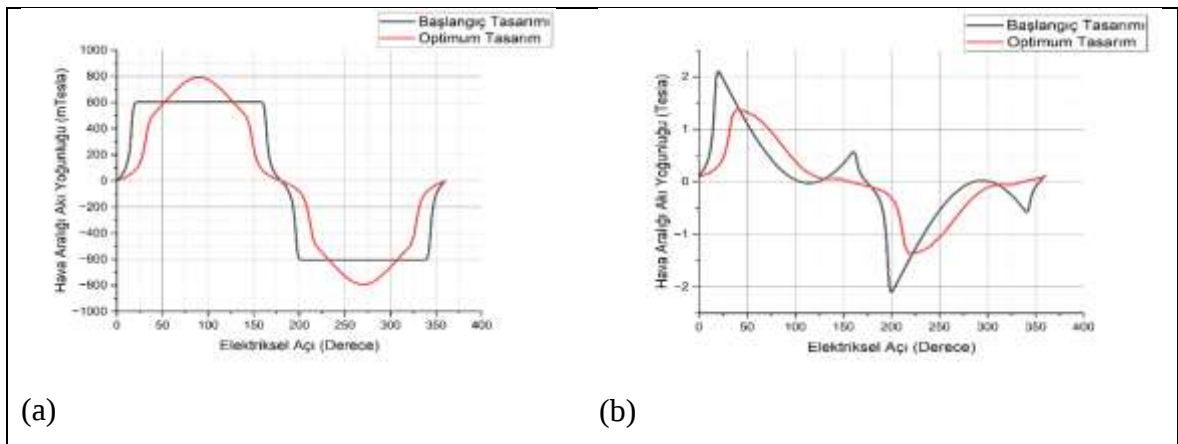
Şekil 6.39. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki tek iletken üzerinde indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Şekil 6.40(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yüksüz durumda indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 15,47 V ile -15,47 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 20 V ile -20 V arasında olmuştur. Şekil 6.40(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte indüklenen bobin gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte indüklenen bobin gerilim değeri başlangıç tasarımı için tepeden tepeye maksimum değeri 53,67 V ile -53,67 V arasında iken, optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değeri 35 V ile -35 V arasında olmuştur.



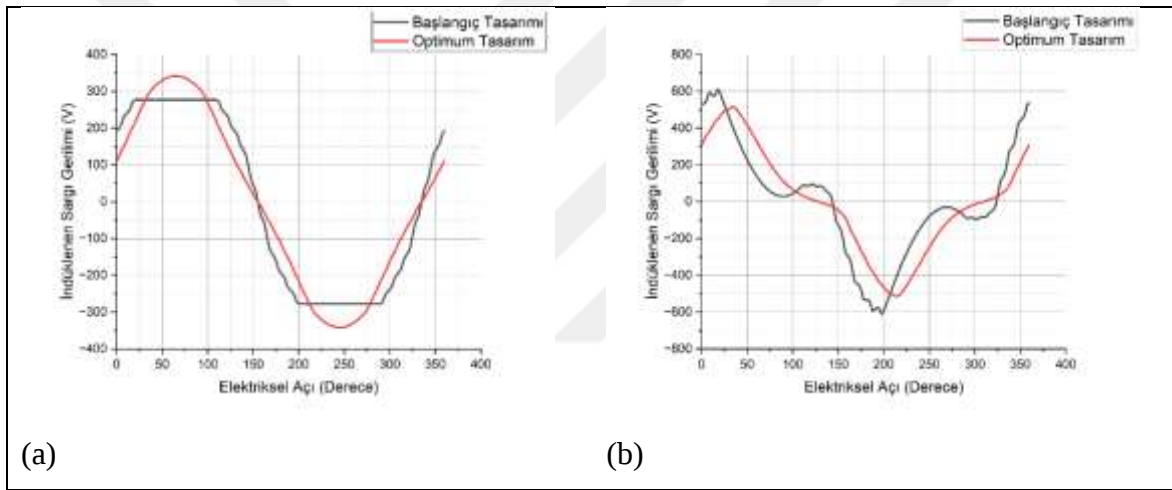
Şekil 6.40. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki indüklenen bobin gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Şekil 6.41(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında maksimum değeri tepeden tepeye 0,61 T ile -0,61 T olarak alınan bu değer optimizasyon sonrası maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 0,79 T ile -0,79 T olarak elde edilmiştir. Şekil 6.41(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yükte iken hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi grafikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Başlangıç tasarımında senkron generatörün maksimum değeri tepeden tepeye yaklaşık 2,10 T ile -2,10 T arasında iken optimizasyon sonrası maksimum değer tepeden tepeye 1,37 T ile -1,37 T olarak elde edilmiştir.



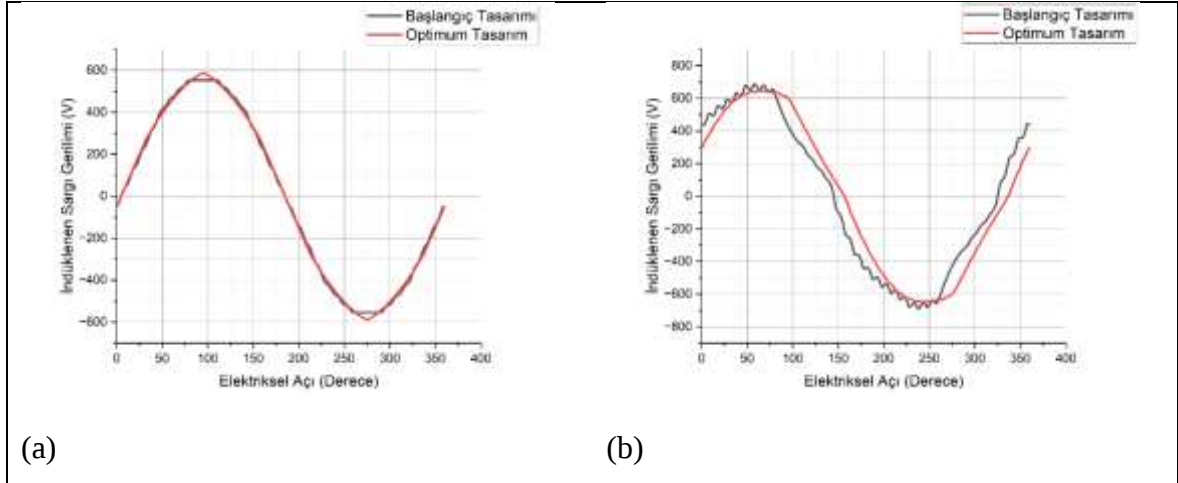
Şekil 6.41. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki hava aralığı akı yoğunluğunun karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Şekil 6.42(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda her bir fazda oluşan sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her bir fazda oluşan gerilim dalgalanmasını gösteren faz gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 277 V ile -277 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 341 V ile -341 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.42(b)'de, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında her bir fazda indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tam yükte başlangıç tasarımında faz geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 611 V ile -611 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 516 V ile -516 V arasında elde edilmiştir.



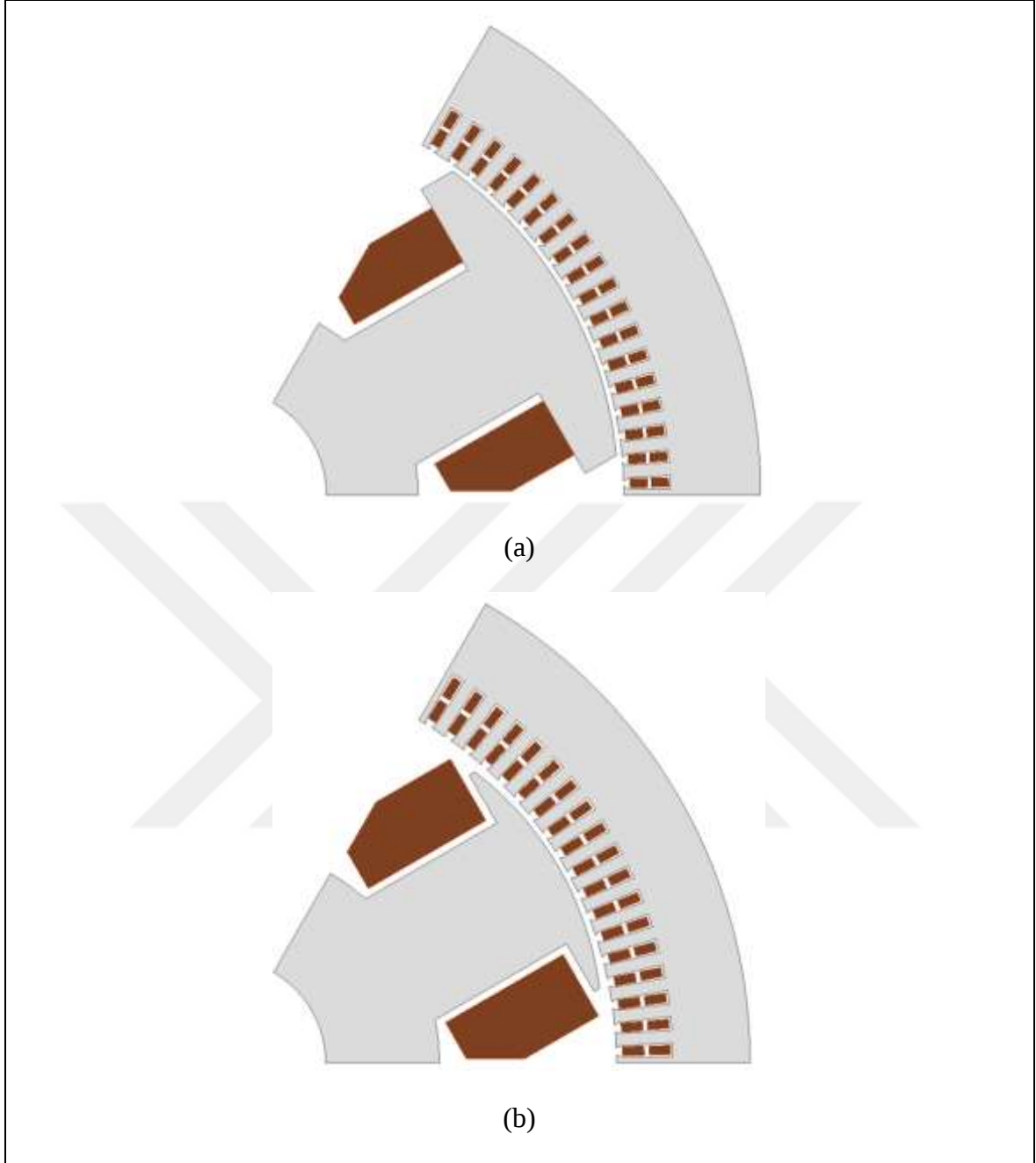
Şekil 6.42. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki her bir fazda oluşan sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Şekil 6.43(a)'da, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün yüksüz durumda fazlar arasındaki sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Fazlar arasındaki gerilimi ifade eden hat gerilimi; başlangıç tasarımında tepeden tepeye maksimum değeri 555,42 V ile -555,42 V arasında iken optimizasyon sonrası tepeden tepeye maksimum değer 594,46 V ile -594,46 V arasında elde edilmiştir. Şekil 6.43(b)'de ise, başlangıç tasarımındaki senkron generatör ile optimize edilen senkron generatörün tam yük altında fazlar arasında indüklenen sargı gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Benzer şekilde, başlangıç tasarımında hat geriliminin tepeden tepeye maksimum değeri 692,41 V ile -692,41 V arasında iken, optimizasyon sonrası bu değer 650 V ile -650 V olarak elde edilmiştir.



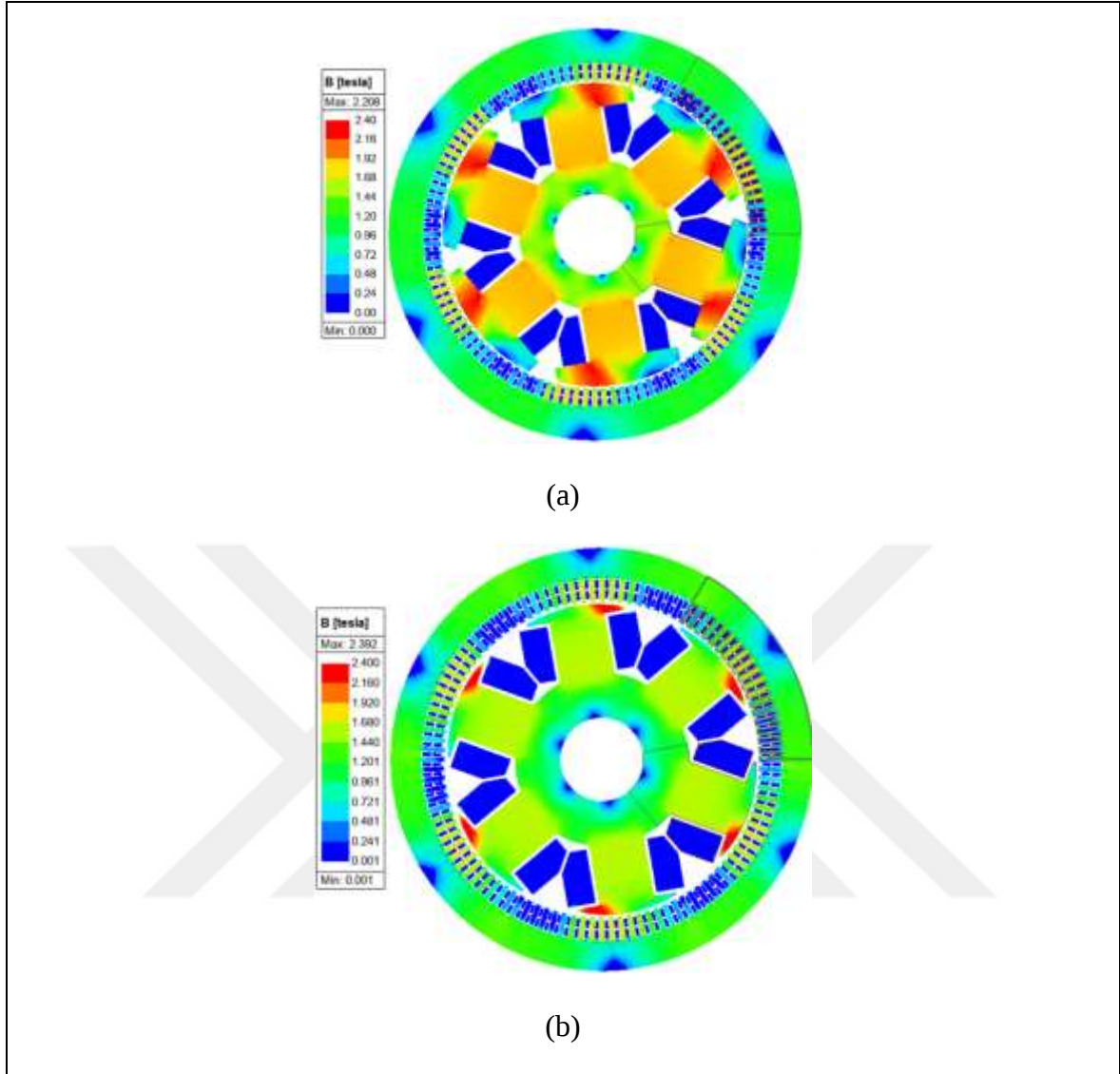
Şekil 6.43. Başlangıç ve optimum tasarımlardaki fazlar arasındaki sargı gerilimlerinin karşılaştırılması (a) yüksüz durumda (b) tam yükte ($q=6$)

Çizelge 6.5'te yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analitik analizler sonucunda, generatör performansında başta THD değeri olmak üzere anlamlı ve çok yönlü bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin manyetik doyum bölgesinde çalışıp çalışmadığının belirlenmesi amacıyla Ansys Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.44'te, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan senkron generatöre ait stator ve rotor goemtrisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.44. Motor geometrisi, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=6$)

Şekil 6.45'te, başlangıç ve optimum tasarım için SEA'da oluşturulan manyetik akı yoğunluğu dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 6.45. Manyetik akı yoğunluğu dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım ($q=6$)

Başlangıç tasarımına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımında görüldüğü üzere kutup bölgelerinde yüksek akı yoğunlukları mevcuttur. Akı dağılımında görülen düzensizlikler tork dalgalanmalarına ve titreşimlere sebep olmaktadır. Optimizasyon sonrasında ise kutup bölgelerindeki maksimum akı yoğunluğu biraz azalmış ve daha dengeli bir dağılım elde edilmiştir. Stator ve rotor nüvesinde akı yoğunluğunun simetrik olması, doyum risklerinin azaldığını göstermektedir. Bu durum nüve kayıpların azaldığını ve elektromanyetik performansın iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca, düşük ve orta şiddetteki akı bölgeleri daha düzgün dağıldığından titreşim ve gürültü seviyelerinde azalma olduğu görülmüştür. Böylece mekanik ve elektriksel açıdan optimize edilmiş daha dengeli bir performans ortaya çıkmaktadır.

6.6. Farklı q Değerlerindeki Çıkık Kutuplu Senkron Generatörlerin Performans Değerlendirmesi

Farklı q değerlerine sahip çıkık kutuplu senkron generatörlerin başlangıç değerlerinin ve optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması, Çizelge 6.6'da sunulmuştur.

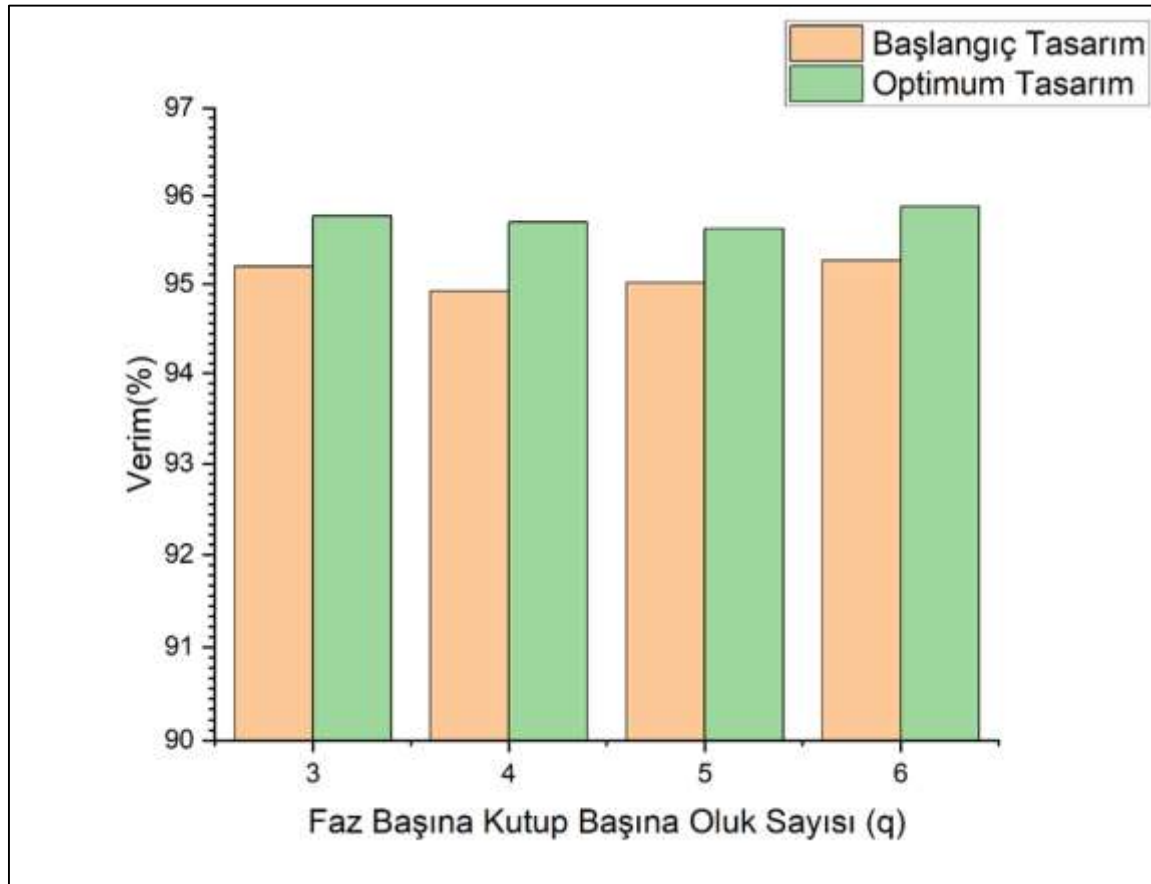
Çizelge 6.6. Farklı q değerlerindeki başlangıç ve optimum sonuç değerleri

Performans Parametreleri			
Parametreler	Faz Başına Oluk Sayısı	Başlangıç Tasarımı	Optimum Tasarım
Verim	$q=3$	%95,20	%95,77
	$q=4$	%94,92	%95,70
	$q=5$	%95,01	%95,63
	$q=6$	%95,27	%95,88
THD _v tam yükte (%)	$q=3$	10,38	4,48
	$q=4$	10,85	3,89
	$q=5$	8,69	3,54
	$q=6$	7,37	3,27
THD _v yüksüz durumda (%)	$q=3$	2,86	2,78
	$q=4$	3,19	2,17
	$q=5$	1,97	2
	$q=6$	1,93	2,07
Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	$q=3$	1,38	1,81
	$q=4$	1,25	1,80
	$q=5$	1,25	1,89
	$q=6$	1,39	1,81
Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	$q=3$	1,68	1,43
	$q=4$	1,51	1,33
	$q=5$	1,51	1,31
	$q=6$	1,70	1,43
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	$q=3$	1,50	1,53
	$q=4$	1,36	1,39
	$q=5$	1,36	1,33
	$q=6$	1,51	1,51
Oluk Doluluk Oranı (%)	$q=3$	50,88	58,76
	$q=4$	56,56	58,67
	$q=5$	56,57	59,87
	$q=6$	50,91	59,99
Toplam Kayıp (kW)	$q=3$	27,20	23,83
	$q=4$	28,92	24,24
	$q=5$	28,34	24,66
	$q=6$	26,81	23,19

Çizelge 6.6'da sunulan verilere göre, optimizasyon süreci sonucunda generatör performans parametrelerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Verimlilik açısından

değerlendirildiğinde, $q=3$ ile $q=6$ aralığında tüm faz başına oluk sayıları için verim %0,45 ile %0,66 oranında artmıştır. En yüksek verim %95,88 ile $q=6$ durumunda optimize edilmiş tasarımda elde edilmiştir. THD açısından optimize edilen tasarımlarda belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Başlangıç tasarımında tam yük altındaki THD değerleri 7,36 ile 10,85 arasında değişirken, optimizasyon sonrasında bu değerler 3,26 ile 4,47 aralığına düşmüştür. Bu iyileşme, çıkış gerilim dalga formunun daha sinüzoidal bir forma yaklaştığını ve harmonik içeriğin azaldığını göstermektedir. Yüksüz çalışma koşullarında ise harmonik bozulmaya neden olan etkiler sınırlı olduğundan, THD değerlerinde optimizasyona bağlı belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu içerisinde tanımlanan THD ifadesi tam yük altındaki değerler için tanımlanmış olup, THD'deki anlamlı iyileşmelerin, generatörün yük altında çalıştığı durumlarda olduğu görülmektedir. Manyetik akı yoğunluğu açısından değerlendirildiğinde, stator dişi akı yoğunluğu optimizasyon sonrası artış göstermiştir. Bu durum, sargı yapısının daha etkili hale geldiğini ve belirlenen sınırlar içerisinde optimal değerlerin elde edilerek daha verimli bir tasarım sağlandığını göstermektedir. Rotor kutup akı yoğunluğunda ise düşüş gözlemlenmiş olup, bu durum hedeflenen çıkış gerilimi ve yük değeri için rotor nüvesinde doyum riskinin azaldığını ve kayıpların düşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Stator boyunduruk akı yoğunluğu ise genel olarak benzer seviyelerde seyretmekle birlikte, $q=5$ 'te hafif bir azalma kaydedilmiştir. Oluk doluluk oranı da tüm q değerleri için artış göstermiştir. Bu artış, iletkenlerin oluk içerisine daha verimli yerleştirildiğini ve bakır kullanımının daha etkin hale geldiğini göstermektedir. Başlangıç tasarımında %50-56 aralığında olan bu oran, optimizasyon sonrasında stator oluk kesit alanının optimize edilmesiyle %58-59 seviyelerine yükselmiştir. Toplam kayıplar incelendiğinde, her q değeri için önemli oranda azalma sağlandığı görülmektedir. En düşük toplam kayıp 23,19 kW ile $q=6$ durumunda elde edilmiştir. Bu sonuçlar, optimizasyonun generatörün genel verimliliği üzerinde pozitif bir etkisi olduğunu ve kayıpların minimize edildiğini ortaya koymaktadır. Yapılan analizler doğrultusunda, artan q değeri ile birlikte optimum tasarıma daha fazla yaklaşıldığı değerlendirilmektedir. q değerindeki artış, generatör performansını pozitif yönde etkilemekte; özellikle verimlilik artışı, harmonik bozulmaların azalması ve manyetik akı yoğunluklarının dengelenmesi gibi parametrelerde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Termal açıdan değerlendirildiğinde ise, yüksek q değeri sayesinde stator olukları boyunca ısı daha geniş bir alana yayılmakta, bu da ısı transferini kolaylaştırarak generatörün soğutma performansını artırmaktadır. Bu durum, ısıl kararlılık ve uzun süreli çalışma koşullarında generatör güvenliği açısından avantaj sağlamaktadır. Bu durum, sistem tasarımı açısından

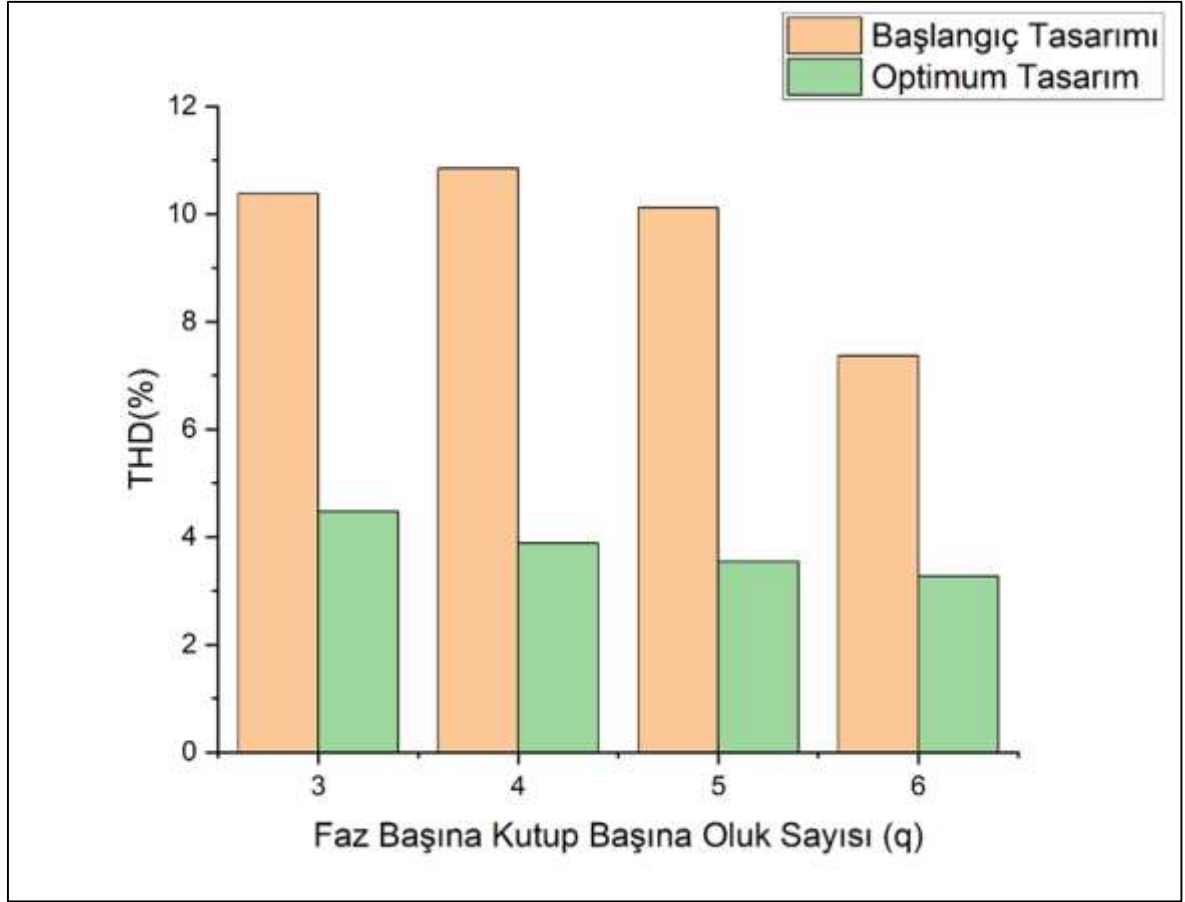
öngörülebilir bir sonuç olmakla birlikte; artan q değerleri, sargı yapısında daha karmaşık ve geniş aralıklı sargı düzenli bir yapı anlamına gelir. Bu durum üretimi zorlaştırır ve makine boyutunu artırır. q değerinin artması, verimlilik, THD, kayıplar ve doluluk oranı açısından olumlu etkiler sağlarken, üretim karmaşıklığını artırır ve bazı durumlarda tork yoğunluğunda sınırlamalara yol açar. Tasarımda q değeri belirlenirken bu performans dengeleri dikkate alınmalıdır. Şekil 6.46’da, dört farklı q değeri için başlangıç ve optimum tasarımlara ait verim değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.46. Her bir q değerinin başlangıç ve optimum tasarımlara ait verim değerlerinin karşılaştırılması

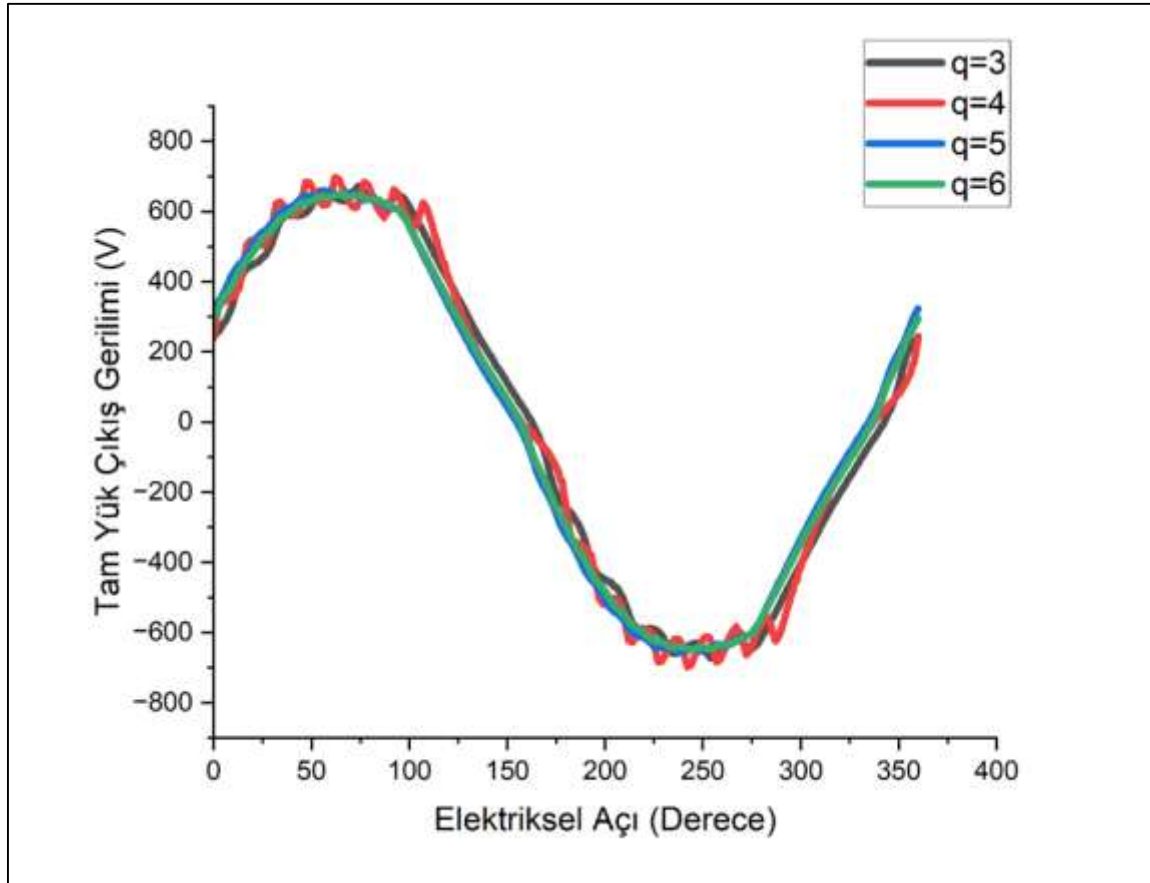
Grafik incelendiğinde, her bir q değeri için optimizasyon sonrasında verimde artış sağlandığı görülmektedir. Ayrıca, en yüksek verim değeri optimizasyon sonrası $q = 6$ değerinde elde edilmiştir.

Şekil 6.47’de, dört farklı q değeri için başlangıç ve optimum tasarımlara ait THD değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.47. Her bir q değerinin başlangıç ve optimum tasarımlara ait THD değerlerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde her bir q değeri için, optimizasyon sonucunda THD oranında önemli iyileşmelerin sağlandığı görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, en düşük THD değeri $q = 6$ için elde edilmiştir. Şekil 6.48’de, dört farklı q değeri için tam yük çıkış gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



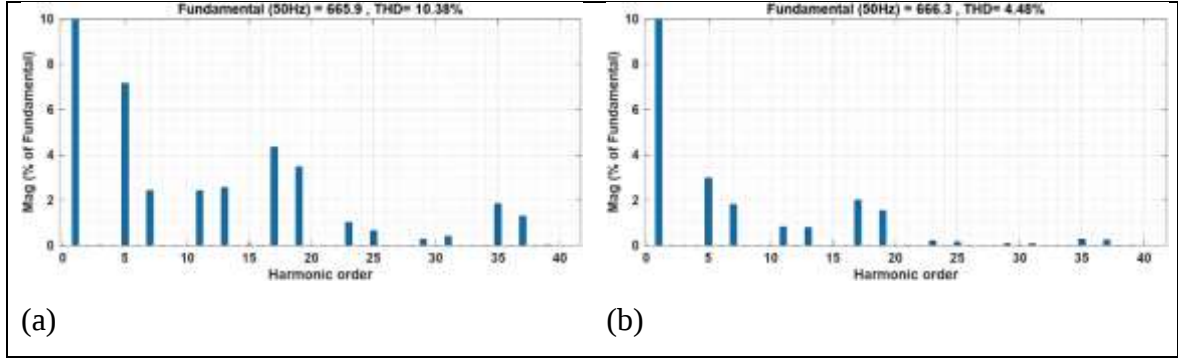
Şekil 6.48. Her bir q değerinin optimum tasarımlara ait tam yük çıkış gerilim değerlerinin karşılaştırılması

Grafik incelendiğinde, atanan değişkenlerin optimize edilmesi neticesinde sinüsoidal forma en yakın gerilim sinyalinin $q=6$ ile elde edilen optimum tasarımda sağlandığı görülmektedir.

6.7. Farklı q Değerlerinde Elde Edilen Tam Yük Altındaki Gerilimlerin THD Karşılaştırması

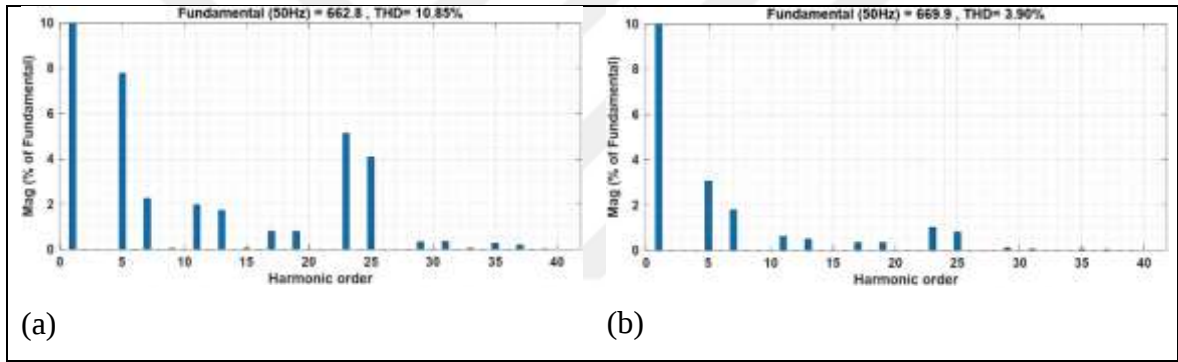
Farklı q değerinde tasarlanan ve optimize edilen senkron generatöre ait Ansys Maxwell de elde edilen indüklenen gerilim değerleri, MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak THD değerleri hesaplanmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.49'da görüldüğü üzere, $q=3$ değerinde başlangıç tasarımında %10,38 olan THD değeri, optimizasyon sonrasında %4,48'e düşmüştür.



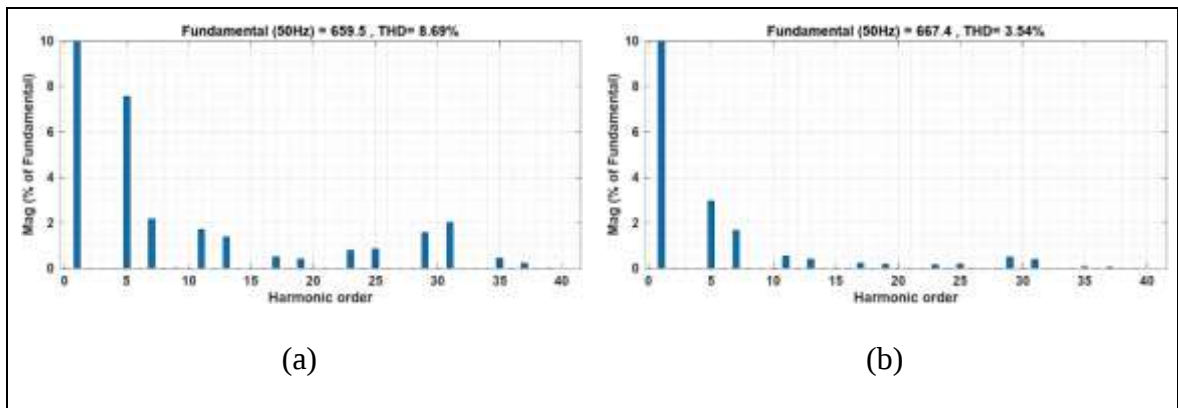
Şekil 6.49. $q=3$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım

Şekil 6.50'de görüldüğü üzere, $q=4$ değerinde başlangıç tasarımında %10,85 olan THD değeri, optimizasyon sonrasında %3,90'a düşmüştür.



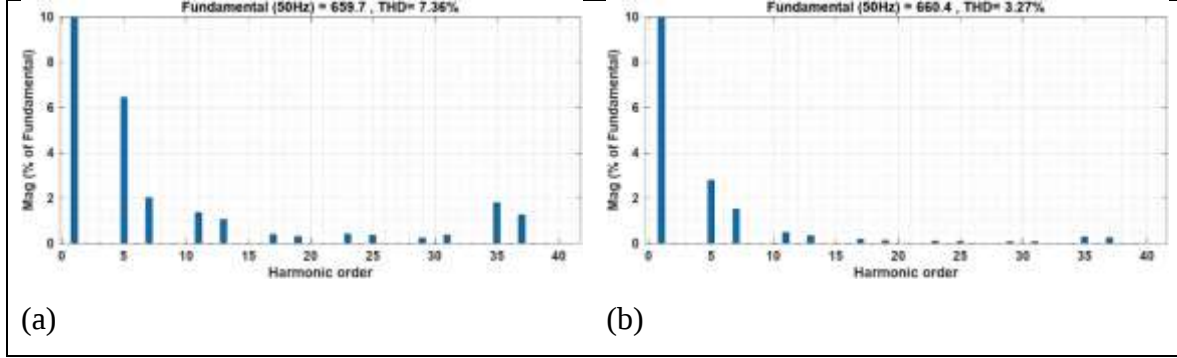
Şekil 6.50. $q=4$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım

Şekil 6.51'de görüldüğü üzere, $q=5$ değerinde başlangıç tasarımında %8,69 olan THD değeri, optimizasyon sonrasında %3,54'e düşmüştür.



Şekil 6.51. $q=5$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım

Şekil 6.52'de görüldüğü üzere, $q=6$ değerinde başlangıç tasarımında %7,36 olan THD değeri, optimizasyon sonrasında %3,27'e düşmüştür.



Şekil 6.52. $q=6$ için THD dağılımı, (a) başlangıç tasarımı, (b) optimum tasarım



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 600 kVA gücünde çıkık kutuplu senkron generatör, verim, tam yük gerilim THD ve vuru torku gibi kritik performans çıktılarının iyileştirilmesi adına dört farklı q değeri için analitik olarak tasarlanmış ve Ansys Maxwell yazılımı ile modellenerek elektromanyetik SEA gerçekleştirilmiştir. q değeri tasarımın kritik parametrelerinden biri olup, farklı q değerlerinde başlangıç tasarımlarının elde edilmesi neticesinde generatörlerin rotor kutbu ve stator oluk geometrisi değişken olarak tanımlanmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonu doğrultusunda, rotor ve stator geometrisi ÇAGA yöntemiyle optimize edilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda, $q = 3$ olarak belirlenen senkron generatör için verimlilik artırılmış, tam yük altında hat gerilimi THD değeri %10,38'den %4,47'e düşürülmüş, toplam kayıplar %12,4 oranında azaltılmış ve vuru torku %45,7 oranında iyileştirilmiştir. $q = 4$ olarak tasarlanan generatör veriminde yine verim artışı elde edilirken, THD değeri %10,85'den %3,89'a düşürülmüş, kayıplar %16 oranında azaltılmış ve vuru torku %8,64 oranında iyileştirilmiştir. $q = 5$ olarak tasarlanan senkron generatörün ise optimizasyon sonrası THD değeri %8,69'den %3,54'ye düşürülmüş, toplam kayıpları %12,98 oranında azaltılmış ve vuru torku düşürülerek %41,8 oranında iyileştirilmiştir. Son olarak $q = 6$ olarak elde edilen tasarımda ise THD değeri %7,36'dan %3,26'ya düşürülmüş, toplam kayıplar %13,47 oranında azaltılmış ve vuru torku %25,6 oranında iyileştirilmiştir. Farklı q değerleri için yapılan optimizasyon çalışmalarında, stator dış akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğunun her ne kadar 1,5 T'nin altında tutulması hedeflenmiş olsa da, amaç fonksiyonunda tanımlanan ağırlıklar neticesinde bu değerler 1,8 T'nin altında elde edilmiştir. 1.5 T'nin üzerinde de akı yoğunluğu değerleri görülmüştür. Ancak, nüve ağırlığının düşük tutulması nedeniyle bu değerler, elektromanyetik performans açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir. Oluk doluluk oranı hedeflenen değerleri sağlayacak biçimde elde edilmiştir. Çalışma ile ayrıca, çıkık kutuplu senkron generatör tasarımında farklı q değerinde optimize edilen generatörlerin performansları karşılaştırılarak, q değerinin rotor ve stator değişkenlerine bağlı olarak optimal seçimi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sürecinde, kutup sayısının artışı ile birlikte tasarım değişkenlerinde belirgin farklılıklar gözlenmiş; özellikle oluk genişliği, kutup yay ofseti, kutup gövde yüksekliği ve stator dış genişliği gibi parametrelerde yapılan optimizasyonlar sayesinde hem manyetik alan yoğunlukları hem de indüklenen gerilimler üzerinde olumlu etkiler sağlanmıştır. Başlangıç değeri 0 mm olan

kutup yay ofseti, çok amaçlı optimizasyon süreci sonucunda 48–50 mm aralığında bir optimum değere ulaşmıştır. Bu aralıkta elde edilen sonuçlar, generatörün elektromanyetik performans parametrelerinde iyileşme sağladığını göstermektedir.

Performans parametreleri açısından ise, tüm q değerlerinde toplam kayıplar azalmış, verimlilik oranları artmış ve THD seviyeleri düşürülmüştür. Bu gelişmeler, optimize edilen tasarımların daha yüksek enerji verimliliğine sahip olduğunu ve güç kalitesinin iyileştirildiğini göstermektedir.

Elektromanyetik analizlerde, yüksüz ve tam yük koşullarında faz gerilimi-uyartım akımı karakteristiklerinde optimizasyon sonrası uyartım akımı gereksinimlerinde iyileşmeler kaydedilmiştir. Ayrıca, vuru torku analizleri, optimize tasarımlarda titreşim ve mekanik gürültü kaynaklarının azaldığını ortaya koymuştur. Tek iletken üzerinde indüklenen gerilim değerlerinde ise, optimizasyon ile birlikte daha stabil ve tutarlı bir davranış sağlanmıştır.

Optimizasyon sürecinin, senkron generatörün genel verimliliği üzerinde olumlu etkiler sağladığı ve sistem kayıplarını minimize ettiği yapılan analizlerle ortaya konulmuştur. q değerinin artışıyla birlikte, tasarımın optimum performansa daha fazla yaklaştığı sonucuna varılmıştır. Yüksek q değeri; çıkış veriminde artış, THD oranlarında azalma ve rotor–stator bölgelerindeki manyetik akı yoğunluklarının daha homojen dağılması gibi performans kriterlerinde belirgin iyileşmelerin sağlandığı yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda ortaya konulmuştur. Ayrıca her q değeri için aynı amaç fonksiyonu tanımlandığından, başlangıç tasarımları arasında tasarımcının tasarım yeteneğine dayanan olası farklılıklar ortadan kaldırılmış olup, her q değeri için optimal geometriler elde edilmiştir. Termal açıdan değerlendirildiğinde ise, artan q değeri stator olukları boyunca ısının daha geniş bir alana yayılmasını sağlamakta, bu da ısı transferini kolaylaştırarak soğutma etkinliğini artırmakta ve sistemin termal kararlılığına katkı sunmaktadır. Fakat artan q değeri, daha karmaşık bir sarım yapısı ve işçiliği yüksek bir sargı düzeni gerektirdiğinden üretim sürecini zorlaştırmakta ve makine hacmini büyötmektedir. Ayrıca bu durum, belirli sınırların ötesine geçildiğinde tork yoğunluğunda düşüşe neden olabilmektedir. Bu nedenle q değeri belirlenirken; verimlilik, harmonik karakteristikler, termal performans ve üretim maliyeti gibi parametreler arasında optimum denge gözetilmelidir. Ancak farklı bir bakış açısıyla analiz sonuçları değerlendirildiğinde, dört farklı q değeri aynı teknik performans değerlerinin sağlanmış olabileceği bir seneryoda, üretim kolaylığı, işçilik ve makine

maliyetlerinin düşüklüğü gibi faktörler göz önünde bulundurularak $q=3$ değerine sahip senkron generatörün tercih edilmesinin uygun bir yaklaşım olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, azalan q değeri ile birlikte bobin başı yüksekliğinin artışı sebep olması da mekanik yerleşim açısından dikkate alınması gereken bir büyüklük olarak değerlendirilmelidir.

Genel olarak, q değerinin artırılmasıyla optimizasyonun etkinliği ve tasarım iyileştirmeleri daha belirgin hale gelmiş, bu da senkron generatörlerin hem manyetik hem de mekanik performansının optimize edilmesinde kutup sayısının kritik bir parametre olduğunu doğrulamıştır. Çok amaçlı genetik algoritmanın, çoklu tasarım kriterlerini eş zamanlı olarak optimize etmede başarılı olduğu ve modern elektrik makineleri tasarımında etkin bir yöntem olarak kullanılabileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın bulguları ışığında, gelecek çalışmalar ve uygulamalar için;

- Diğer makine tipleri (örneğin, yuvarlak rotorlu senkron generatör, asenkron generatör veya farklı güçteki senkron generatörler) için benzer optimizasyon yöntemleri uygulanarak geniş kapsamlı karşılaştırmalar yapılabileceği,
- Generatör tasarım süreçlerinde yalnızca elektromanyetik ve mekanik performans kriterlerinin değil, aynı zamanda termal etkilerin ve dinamik davranışların da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, termal yönetim stratejileri ile titreşim analizlerinin tasarım aşamasına entegre edilmesi, daha gerçekçi, güvenilir ve kapsamlı performans değerlendirmelerine olanak sağlayarak sistem bütünlüğünü artıracaktır,
- Optimizasyon sürecinde yalnızca performans kriterlerinin değil; aynı zamanda üretim kolaylığı, maliyet etkinliği ve yapısal dayanıklılık gibi mühendislik açıdan kritik diğer faktörlerin de optimizasyon kriterlerine dahil edilmesi, elde edilecek tasarımın uygulama sahasındaki başarısını ve sürdürülebilirliğini artıracaktır,
- Çok amaçlı genetik algoritmaların yanı sıra, yapay sinir ağları, derin öğrenme yaklaşımları ve diğer modern yapay zeka tekniklerinin tasarım ve optimizasyon süreçlerine entegre edilmesi; hem hesaplama süresini azaltmakta hem de elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmada önemli katkılar sağlayabilir. Bu bağlamda, hibrit yöntemlerin geliştirilmesi gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı oluşturabileceği,

- Optimizasyon süreçlerine çevresel etkiler, geri dönüşüm olanakları ve sürdürülebilir malzeme kullanımı gibi kriterlerin dâhil edilmesi; yalnızca teknik performansı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ekolojik dengeyi gözeten ve uzun vadede ekonomik açıdan da avantaj sağlayan tasarımların ortaya konmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular, senkron generatör tasarım ve optimizasyonunda mevcut yöntemlerin başarısını ortaya koyarken; gelecekteki çalışmalar için disiplinler arası yaklaşımların ve bütüncül optimizasyon stratejilerinin önemini de vurgulamaktadır. Yukarıda sıralanan öneriler doğrultusunda yapılacak kapsamlı araştırmalar, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalarda daha verimli, sürdürülebilir ve yüksek performanslı generatör tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu çerçevede, çalışmanın ortaya koyduğu metodolojiler ve öneriler, elektrik makineleri alanında daha ileri seviye tasarım anlayışlarının benimsenmesine zemin hazırlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Çıtak, E., Kılınç Pala, P. B. (2016). Yenilenebilir enerjinin enerji güvenliğine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25, 79–102.
2. Bazzo, T. d. P. M., Moura, V. d. O., Carlson, R. (2021). A step-by-step procedure to perform preliminary designs of salient-pole synchronous generators. *Energies*, 14(16), 4989.
3. Usta, O. G., Akkaya Oy, S. (2024). Rüzgâr temelli piezoelektrik jeneratör tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(2), 1166–1177.
4. Paish, O. (2002). Small hydropower: Technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 537–556.
5. Lugaresi, A., Mass, A. (1987). Designing Francis turbines: Trends in the last decade. *Water Power and Dam Construction*, 23–28.
6. Ruprecht, A. (2002). Unsteady flow simulation in hydraulic machinery. *Task Quarterly*, 6(1), 187–208.
7. Kim, H.-J., Jeong, J.-S., Yoon, M.-H., Moon, J.-W., Hong, J.-P. (2017, October). Simple size determination of permanent-magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 7972–7983.
8. Weeber, K., Hoole, S.R.H. (1992, July). Geometric parametrization and constrained optimization techniques in the design of salient pole synchronous machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 28(4), 1948–1960.
9. Duan, Y., Ionel, D. M. (2013, May–June). A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(3), 1268–1275.
10. Pal, S., Halder, S. (2021). Optimization of drilling parameters for composite laminate using genetic algorithm. *Data-Driven Optimization of Manufacturing Processes*, 191–213.
11. IEEE. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE standard 519-2014, Revision of IEEE standard 519-1992, 1–29.
12. Mutluer, M. (2021). Design optimization of PM synchronous motor using Gray Wolf optimization algorithm. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24, 274–278.
13. Mandić, I., Pužar, M., Petrinčić, M. (2001). Optimization of large electrical salient pole synchronous generators. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 20(3), 813–827.

14. Topaloğlu, İ., Gürdal, O. (2010). Çıkık kutuplu senkron hidrogeneratörlerin dinamik ve geçici zaman analiz koşullarında ardışık karma değişken nonlinear programlama metodu kullanılarak optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2), 355–361.
15. Ordóñez Sánchez, E. (2015). *Synchronous Generators*, (2nd Edition). Florida: Boca Raton, 498.
16. Çamcı, H.Ö., Mengi, O., Arslan, S. (2022). Çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılarak enine laminasyonlu senkron relüktans motor optimizasyonu. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 841–852.
17. Pamuk, N. (2024). Genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak senkron makine tasarımı ve uygunluk parametrelerinin belirlenmesi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 4(2), 276–288.
18. Vrtič, P., Vražić, M., Papa, G. (2016). Design of an axial flux permanent magnet synchronous machine using analytical method and evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(1), 150–158.
19. Liu, X., Lin, Q., Fu, W. (2017). Optimal design of permanent magnet arrangement in synchronous motors. *Energies*, 10(11), 1700.
20. Yılmaz, K., Dindar, T. (2023). Radyal akılı sabit mıknatıslı senkron motorlarda vuru momentinin azaltılması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 15(2), 547–557.
21. Balcı, S. (2019). Senkron generatörlerde farklı stator oluk yapılarının uç gerilimine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 947–957.
22. Döşoğlu, M., Güvenç, U., Küçük, G. P., Poyraz, B. (2015). Senkron generatörlerin farklı derece modelindeki analizlerinin incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4(2), 72–80.
23. Özupak, Y. (2022). Design and analysis of a synchronous generator using finite element method based ANSYS-Maxwell. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(2), 66–76.
24. Elez, A., Petrinić, M., Vaseghi, B., Abasian, A. (2018). Salient Pole Synchronous Generator Optimization By Combined Application Of Slot Skew And Damper Winding Pitch Methods. *Progress in Electromagnetics Research*, 73, 81–90.
25. Atalay, A.K., Kocabaş, D.A. (2022). Contributions To Elimination Of Excitation Field Harmonics In Turbogenerators. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 22(4), 31–38.
26. Yu, Y., Zhao, P., Hao, Y., Zeng, D., Hu, Y., Zhang, B., Yang, H. (2023). Multi-objective optimization of permanent magnet synchronous motor based on Taguchi method and PSO algorithm. *Energies*, 16(1), 267.

27. Karaoğlu, H., Perin, S. (2022). Rotor design optimization of a synchronous generator by considering the damper winding effect to minimize THD using grasshopper optimization algorithm. *International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 12(2), 90–98.
28. Doğan, K. Orhan, A. (2021). Design improvement of a 2 MVA synchronous machine by using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106464.
29. Tian D., Wu, X. Meng, H. Su, Y. (2024). A two-stage multi-objective design optimization model for a 6 MW direct-drive permanent magnet synchronous generator. *Energies*, 17(16), 4147.
30. Enríquez Santiago, J.A., Danguillecourt, O.L., Duharte, G.I., Díaz, J.E.C., Añorve, A. V. Hernandez-Escobedo, Q. Enríquez, J.P. Vereá, L. Galvez, G.H. Portela, R.D. Moreno, A.J.P. (2021). Dimensioning optimization of the permanent magnet synchronous generator for direct drive wind turbines. *Energies*, 14(21), 7106.
31. Agrebi, H.Z., Benhadj, N., Chaieb M., Sher, F., Amami, R., Neji R. Mansfield, N. (2021). Integrated optimal design of permanent magnet synchronous generator for smart wind turbine using genetic algorithm. *Energies*, 14(15), 4642.
32. Gonzalez-Delgado D., Jaen-Sola P. Oterkus E. (2020). Design and optimization of multi-MW offshore direct-drive wind turbine electrical generator structures using generative design techniques. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(3), 035501.
33. You, Y.-m. (2020). Multi-objective optimal design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on deep learning, *Applied Sciences*, 10(2), 482.
34. Shoaie, F. Farshbaf-Roomi, Q. Wang, (2025). Enhanced multi-objective design optimisation of salient pole reluctance magnetic gear using Bayesian-optimised artificial neural networks, *IET Electric Power Applications*, 19(3), e70017.
35. Karaoglan, D., Perin, D., Yilmaz, K. (2021). Multiobjective design optimization of stator for synchronous generator using bat algorithm and analysis of magnetic flux density distribution, *Electric Power Components and Systems*, 49(9–10), 919–929.
36. Sun, T. (2025). Multi-objective optimization of a hybrid excitation generator with a parallel magnetic circuit based on the coupling of dual optimization algorithms, *Archives of Electrical Engineering*, 74(1), 127–149.
37. Chen, K., Ma, S., Li, C., Wu, Y., Ma, J. (2025). Optimization and design of built-in U-shaped permanent magnet and salient-pole electromagnetic hybrid excitation generator for vehicles, *Symmetry*, 17(6), 897.
38. Meyers, R. (2008). *Renewable and Alternative Energy Resources: a reference handbook*, Kaliforniya: ABC-CLIO. 323.

39. Gray, A. (2003). *Electricity: A history of the generation and use of electrical power*. New York, NY, USA: Harper & Row. 109.
40. Nasar, S.A., Say, M. (2011). *Electric machines and drives: Principles, control, modeling, and applications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley. 248.
41. İnternet: Electric Istanbul. (2023, October 22). Senkron generatörler (Alternatörler). Retrieved May 30, 2025, from URL: <https://www.electricistanbul.com/2023/10/22/senkron-generatorler/> Son Erişim Tarihi: 01.04.2014.
42. Chapman, S.J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals*, (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education, 356.
43. Jiji, K.S., Jayadas, N.H., Babu, C.A. (2014). FEM-based virtual prototyping and design of third harmonic excitation system for low-voltage salient-pole synchronous generators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(3), 1829–1834.
44. İnternet: Fagerstrom Engineering Inc. (2012, October 13). Salient field pole hydro generator static rotor balancing. URL: <https://fagerstrom.engineering/generator-balancing/> Son Erişim Tarihi: 08.06.2024.
45. İnternet: Boldea, I. (2006). Synchronous Generators URL: <https://en.evotepower.com/alternators/special-customized-generator> Son Erişim Tarihi: 21.07.2024.
46. Mergen, A.F., Zorlu, S. (2005). *Elektrik Makineleri III: Senkron Makineler*. (2. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi, 97.
47. Chapman, S.J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals* (4th ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill, 301.
48. Çalışkan, A. Orhan, A. (2016). Matris konverter beslemeli self kontrollü senkron motorda amortisör sargı etkileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 233–239.
49. Akın, E., Orhan, A. (2007). *Elektrik makinalarının temelleri*, (1. baskı). İstanbul: Çağlayan Kitapevi, 187.
50. Kimbark, E.W. (1956). *Power system stability* (4th ed.). New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 283.
51. Hendershot, J.R., Miller, T.J.E. (2010). *Design of brushless permanent-magnet machines*. (1st ed.). Venice, CA, USA: Motor Design Books. 149.
52. Jones, C.V. (1967). *Unified theory of electrical machines*. (1st ed.). London, UK: Butterworths, 97.

53. IEEE Power Engineering Society. (2005). *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 Std C50.12). IEEE.
54. Znidarich, M.M. (2008, December). *Hydro generator stator cores part 1 – Constructional features and core losses*. In Proceedings of the 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). 14(17), 1–8.
55. Stephan, C. E., Baba, Z. (2001). *Specifying a turbogenerator's electrical parameters by standards and grid codes*. In Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) (57–62), MIT.
56. Fogarty, J. M. (2001). *Connection between generator specifications and fundamental design principles*. In Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) (51–56). Cambridge, MA, USA.
57. Ghai, K. N. (1999). Comparison of international and NEMA standards for salient pole synchronous machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14(1), 8–15.
58. Arshad, WM, Backstrom, T, Sadarangani C. (2001). *Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Cambridge, MA, USA.
59. International Electrotechnical Commission. (1997). *Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance*, (IEC Standard 60034-1), Geneva, Switzerland: IEC.
60. IEEE Power Engineering Society. (2005). *IEEE standard for cylindrical rotor 50 Hz and 60 Hz synchronous generators rated 10 MVA and above*, (IEEE standard C50.13-2005). New York, NY, USA: IEEE.
61. Gott, B.E.B., McCown, W.R., Michalec, J.R. (2001). *Progress in revision of IEEE/ANSI C50 series of standards for steam and combustion turbine generators and harmonization with the IEC 60034 series*. In Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) Cambridge, MA, USA.
62. Nelson, R.J. (2001). *Conflicting requirements for turbogenerators from grid codes and relevant generator standard*. In Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) Cambridge, MA, USA, (63–68).
63. Ansys Electronics Desktop (2024), *Maxwell 2D user Help Datasheets*.
64. Ansys Electronics Desktop (2024), *Maxwell 3D user Help Datasheets*.
65. Session I. (2012). *Modeling the Air-X rotor and stator: Maxwell 3D simulations of a residential wind generator*, Degree Project in Electromagnetics in Power Engineering, Northern Arizona University, 37.
66. Çoramık, M. (2018). *Örnek bir analiz üzerinden ANSYS Maxwell kullanımında karşılaşılan güçlükler üzerine detaylı çözüm önerileri*. Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırma Kongresi, Balıkesir, Türkiye, 78-91.

67. Schlemmer, E., Harb, W., Lichtenecker, R., Kleinhaentz, R. (2000). *Optimization of large salient pole generators using evolution strategies and genetic algorithms*. In Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM-2000), Espoo, Finland 1030–1034.
68. Kim, D.-H., Sykulski, J. K. (2004). Applying continuum design sensitivity analysis combined with standard EM software to shape optimization in magnetostatic problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2), 1156–1159.
69. Deb, K. (2012). *Optimization for engineering design: Algorithms and examples*. (Second Edition). New Delhi: Prentice Hall. 16.
70. Murata, T., Ishibuchi, H. (1995). *MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithms*. In Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC) (289–294). Perth, WA, Australia



Gazili olmak ayrıcalıktır