

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyona Dayalı Performans İyileştirmesi

Melda EYÜBOĞLU¹ , Burak YENİPİNAR² Cemil OCAK^{3*}

¹ Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Türkiye

² Department of Electronic Technology, Vocational School, Ostim Technical University, Ankara, Turkey

³ *Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article

Received: 19/05/2025

Revision: 24/06/2025

Accepted: 03/07/2025

Keywords

Salient-Pole Synchronous Generator

Geometric Optimization

Multi-Objective Genetic

Algorithm

Total Harmonic Distortion

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 19/05/2025

Düzeltime: 24/06/2025

Kabul: 03/07/2025

Anahtar Kelimeler

Çıkık Kutuplu Senkron Generator

Geometrik Optimizasyon

Çok Amaçlı Genetik

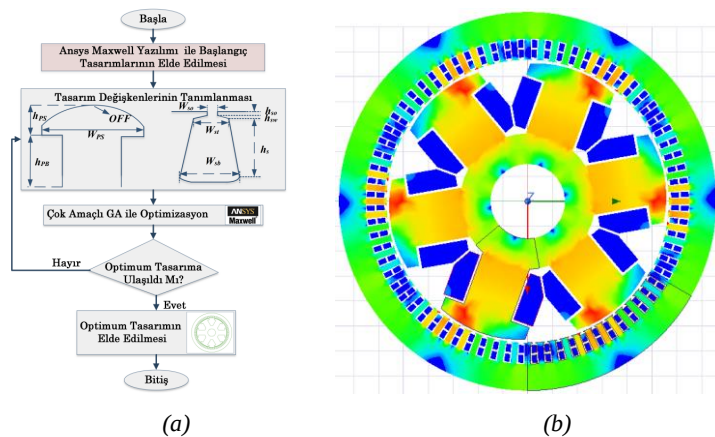
Algoritma

Sonlu Elemanlar Analizi

Toplam Harmonik Bozul

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, 600 kVA gücündeki çıkık kutuplu senkron generatörün tasarımı ve performans optimizasyon çalışmaları sunulmaktadır. Bu kapsamda Total Harmonik Bozunum (THD), verim ve manyetik akı yoğunluklarını iyileştirmek amacıyla belirlenen amaç fonksiyonu kullanılarak rotor ve stator geometrisi Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) yöntemiyle optimize edilmiştir. / In this study, the design and performance optimization of a 600 kVA salient-pole synchronous generator are presented. For this purpose, the rotor and stator geometries were optimized using a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) method, with an objective function defined to enhance Total Harmonic Distortion (THD), efficiency, and magnetic flux density.



Şekil A: (a) ÇAGA yöntemine dayalı optimizasyon akış şeması, (b) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı / **Figure A:** (a) Optimization flowchart based on MOGA method, (b) Distribution of magnetic flux density

Önemli noktalar (Highlights)

- Çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım optimizasyon çalışması yapıldı. / A design optimization study was performed for the salient-pole synchronous generator.
- Optimizasyon sürecinde ÇAGA kullanıldı. In the optimization process, a MOGA was applied.
- 2B Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile optimum tasarımın doğrulaması yapıldı. / The optimal design was validated using 2D Finite Element Analysis (FEA).

Amaç (Aim): Senkron generatörün belirlenen amaç fonksiyonu doğrultusunda ÇAGA yöntemi ile tasarım parametrelerinin optimizasyonunu sağlamaktır. / To optimize the design parameters of the synchronous generator using the MOGA method in line with the defined objective function.

Özgünlük (Originality): Geometrik parametrelerin çok amaçlı optimizasyon yöntemiyle, farklı performans ölçütlerinin eş zamanlı olarak iyileştirilmesi sağlanmıştır. / Geometric parameters were optimized using a multi-objective optimization method to simultaneously improve different performance criteria.

Bulgular (Results): Başlangıç tasarımı optimize edilerek THD, verim gibi performans parametrelerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. / The initial design model was optimized, resulting in significant improvements in performance parameters such as THD and efficiency.

Sonuç (Conclusion): Yapılan çalışma sonucunda %95.7 verime, %3.89 THD'ye ve nüve üzerindeki manyetik akı yoğunluğu 1.8 T'nin altında olan bir çıkık kutuplu senkron generatör tasarımı elde edilmiştir. / As a result of the study, a salient-pole synchronous generator design was achieved, exhibiting an efficiency of 95.7%, a Total Harmonic Distortion (THD) of 3.89%, and a magnetic flux density in the core below 1.8 T.



Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Çok Amaçlı Geometrik Optimizasyona Dayalı Performans İyileştirmesi

Melda EYÜBOĞLU¹ , Burak YENİPINAR² Cemil OCAK^{3*}

¹ Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Türkiye

² Ostim Technical University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey

³ Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/05/2025
Düzeltilme: 24/06/2025
Kabul: 03/07/2025

Anahtar Kelimeler

Çıkık Kutuplu Senkron
Generator
Geometrik Optimizasyon
Çok Amaçlı Genetik
Algoritma
Sonlu Elemanlar Analizi
Toplam Harmonik
Bozulma

Öz

Bu çalışmada, çıkık kutuplu senkron generatörlerin elektromanyetik performanslarının artırılmasına yönelik olarak geometrik parametrelerin optimizasyonuna dayalı bir tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Generatörün eşdeğer devresi ve elektromanyetik modeli geliştirilmiş, başlangıç tasarımı analitik olarak oluşturulmuş ve ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Kritik öneme sahip rotor ve stator geometrisine ait parametreler optimizasyon değişkeni olarak tanımlanmış ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma (ÇAGA) yöntemiyle optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde verimlilik, tam yük çıkış gerilimi toplam harmonik bozulma (THD), stator ve rotor akı yoğunlukları ile oluk doluluk oranı gibi çok sayıda performans kriteri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimizasyonun generatör performansında anlamlı iyileşmelere yol açtığını göstermektedir. Tam yük çıkış gerilimi THD değerinde %64'e varan azalma sağlarken, toplam kayıplar yaklaşık %16 oranında azaltılarak karşılık gelen generatör verimi değerinde %0,78 düzeyinde iyileşme sağlanmıştır. Nihai tasarım, 2B Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile doğrulanarak akı yoğunluğu, akım yoğunluğu ve termal limitler açısından uygunluğu ortaya konmuştur.

Performance Enhancement of a Salient-Pole Synchronous Generator Through Multi-Objective Geometric Optimization

Article Info

Research article
Received: 19/05/2025
Revision: 24/06/2025
Accepted: 03/07/2025

Keywords

Salient-Pole Synchronous
Generator
Geometric Optimization
Multi-Objective Genetic
Algorithm
Total Harmonic Distortion
Finite Element Analysis

Abstract

This study presents a geometry-based design approach aimed at improving the electromagnetic performance of salient pole synchronous generators. The equivalent circuit and electromagnetic model of the generator were developed, and the initial design was analytically constructed and modeled using ANSYS Maxwell software. Geometrical parameters of critical importance in the rotor and stator structures were defined as optimization variables and optimized using a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). The optimization process considered multiple performance criteria, including efficiency, total harmonic distortion (THD) of the full-load output voltage, magnetic flux densities in the stator and rotor, and slot fill factor. The results demonstrate that the optimization approach leads to notable improvements in generator performance. Specifically, the THD of the output voltage was reduced by up to 64%, total losses were decreased by approximately 16%, and the corresponding generator efficiency was improved by about 0,78%. The final design was validated through two-dimensional 2D Finite Element Analysis (FEA), confirming its compliance with electromagnetic and thermal limits in terms of flux density, current density, and thermal constraints.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi, iş üretme yeteneğini belirleyen ve toplumların yaşam tarzlarını şekillendiren temel bir enerji türüdür. Elektrik enerjisi doğrudan depolanamasa da uzun mesafelere etkin biçimde iletilmesi ve talebe göre kontrol edilebilmesi

onu diğer enerji türlerinden ayıran ayırt edici bir özelliktir. Elektrik enerjisi, günümüzde 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 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 kısmını ithalat yoluyla karşılayan ve bu yönüyle enerjide 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]. Elektrik enerjisine olan talep, dünya nüfustaki hızlı artışa paralel olarak yükselmekte; kişi başına düşen elektrik tüketimi ise 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 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 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 tasarım optimizasyonu büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, düşük verimliliğe sahip, 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 manyetik yoğunluğunun artırılarak 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, düşük harmonikli sinüzoidal dalga şekline dönüştürülmesi için generatör tasarımında çeşitli optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [11].

Bu kapsamda, [12] numaralı çalışmada çıkık kutuplu senkron hidrogeneratörlerin dinamik ve geçici rejim analizleri doğrultusunda, ardışık karma değişkenli doğrusal olmayan programlama yöntemi kullanılarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada; kısa devre oranı (SCR), kutup yay merkez uzaklıkları, rotor kutup gövde yüksekliği ve genişliği, kutup ayak boyutları ve iç çap gibi parametreler değişken olarak ele alınmış ve motor performansı bu değişkenler ışığında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarım sonuçlarına göre, en uygun güç faktörü $0,49 < \text{SCR} < 0,50$ aralığında elde edilmiş; ayrıca $0,49 < \text{SCR} < 0,53$ aralığında çıkış gücünün 500–600 kW arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Toplam makine ağırlığının azaltılması ile birlikte stator ve rotor üzerindeki bakır kayıplarında anlamlı bir azalma tespit edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, makinenin toplam ağırlığı 1223 kg'dan 934 kg'a düşürülerek yaklaşık %24'lük bir iyileşme sağlanmıştır. [13] numaralı çalışmada, çıkık kutuplu senkron generatörler için SEA yazılımı kullanılarak rotor geometrisine yönelik bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, stator sargı adımı ve damper çubuk dağılımı gibi değişkenler ele alınmakla birlikte, odak noktası hava aralığı olarak belirlenmiş ve harmonik içeriği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Hava aralığının artmasıyla birlikte manyetik devredeki relüktans geçişinin yükseldiği ve bu artışı telafi edebilmek için daha yüksek uyartım akımına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir. Artan uyartım akımının, makine reaktansları ve toplam kayıplar üzerinde olumsuz etkiler yarattığı; bunun da verimliliği düşürdüğü belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde, THD değerinin minimize edilmesi ve gerilimin etkin değerinin 13,8 kV sınırları içinde tutulması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar,

kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymayan ve analiz süresini kısaltarak verimliliği artıran bir sonlu eleman optimizasyon döngüsünün geliştirildiğini göstermektedir. Ayrıca, hava aralığı değerinin, rotor sargı tasarımında fiziksel bir sınır oluşturarak THD değerinin optimum düzeye indirgenmesinde etkili olduğu belirlenmiştir. [14] numaralı çalışmada, genetik algoritma yöntemiyle senkron makine tasarımı gerçekleştirilmiş ve optimal tasarım parametreleri belirlenmiştir. Beş farklı parametrenin değişken olarak tanımlandığı

çalışmada, statorda kullanılan bakır ve demir hacmi azaltılmış; böylece başlangıç tasarımına kıyasla kayıplarda önemli bir azalma sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, çıkış gücü sabit tutulmak kaydıyla makine verimi maksimize edilmiş ve güç/ağırlık oranında iyileşme sağlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, rotor ve stator geometrik optimizasyonuna dayalı çalışmalarda farklı optimizasyon algoritmalarının ve amaç fonksiyonlarının kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 1. Çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına yönelik çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of studies on multi-objective optimization approaches)

Kaynak	Makina Tipi	Optimizasyon Yöntemi	Amaç Fonksiyonları	Optimize Edilen Parametreler	Doğrulama
[15]	Sabit mıknatıslı senkron motor	Derin öğrenme (MLP)	Ortalama moment, moment salınımı, THD, verim	Mıknatıslar arası açı ve akı bariyeri genişliği	SEA
[16]	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
[17]	Çıkık kutuplu senkron generatör	Yarasa algoritması (BAT)	Verim, stator akı yoğunlukları	Stator oluk genişliği ve yüksekliği	SEA
[18]	Paralel manyetik devreli hibrit uyarımlı senkron generatör	Genetik Algoritma (GA)	Yüksüz THD ve indüklenen maksimum gerilim	Kutup genişliği ve yay açısı	SEA ve Test
[19]	Çıkık kutuplu hibrit uyarımlı senkron generatör	Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA)	İndüklenen gerilim, vuruş moment, 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 tasarımında çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarına olan ilgi artmış ve özellikle hibrit uyarımlı yapılar, metamodel destekli analizler ve gelişmiş evrimsel algoritmalar öne çıkmıştır. Tablo 1 incelendiğinde, literatürde yer alan [15] numaralı çalışmada, elektrikli araçlar için geliştirilen PMSM tasarımı, derin öğrenme destekli bir metamodel aracılığıyla optimize edilmiştir. [16] numaralı çalışmada ise relüktans tipi

manyetik dişli sistemi için Bayes optimizasyonu ile desteklenmiş yapay sinir ağı modeli kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmada da FEM analiz süresi önemli ölçüde kısaltılırken moment salınımı, verim ve moment yoğunluğu gibi hedeflere odaklanılmıştır. [17] numaralı çalışmada ise Yarasa algoritması kullanılarak verim ve stator akı yoğunlukları iyileştirilmiştir. Diğer taraftan, [17] ve [19]

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 hibrit ve veri destekli çalışmalara kıyasla geleneksel yapılarda yüksek performans elde etmeyi hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır.

Senkron generatörlerde kullanılan aktif malzemeler hem performans hem de maliyet açısından belirleyici bir faktördür. Bu kapsamda çalışmada malzeme seçimi, manyetik özellikler, mekanik sağlamlık ve termal iletkenlik gibi kriterleri sağlayacak malzeme kombinasyonları belirlenmiştir. Tanımlanan başlangıç tasarımı ANSYS Maxwell yazılımında modellenmiş ve sonrasında elektromanyetik analizlere tabi tutulmuştur. Tasarım sürecinde kritik rol oynayan geometrik değişkenler ile rotor ve stator yapısını belirleyen parametreler, amaç fonksiyonuna uygun biçimde tanımlanarak optimize edilmiştir. Bu optimizasyon süreci sonucunda, analitik tasarıma dayalı olarak verimlilik artırılmış; THD düşürülmüş, stator akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğu gibi elektromanyetik değişkenler hedeflenen sınırların altına çekilerek bütüncül bir yaklaşımla optimize edilmiştir. Bu çalışma ile literatüre sunulan ana katkılar üç temel başlık altında sunulmaktadır. **(i)** Geometrik parametrelerin çok amaçlı optimizasyonu ile verimlilik, akı yoğunlukları ve THD gibi farklı performans ölçütlerinin eş zamanlı iyileştirilmesi sağlanmıştır. **(ii)** Rotor ve stator geometrisine ait kritik değişkenlerin birlikte optimize edildiği parametrik bir arama uzayı tanımlanmış ve bu yapı, Pareto optimal çözümler temelinde analiz edilmiştir. **(iii)** Elde edilen optimizasyon çıktıları SEA ile doğrulanarak tasarım süreci elektromanyetik ve termal açıdan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım gereksinimleri, boyutlandırılması ve teknik özellikleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde stator ve

rotor geometrik optimizasyonu detaylandırılmış; dördüncü bölümde ise araştırma sonuçları ve değerlendirmeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

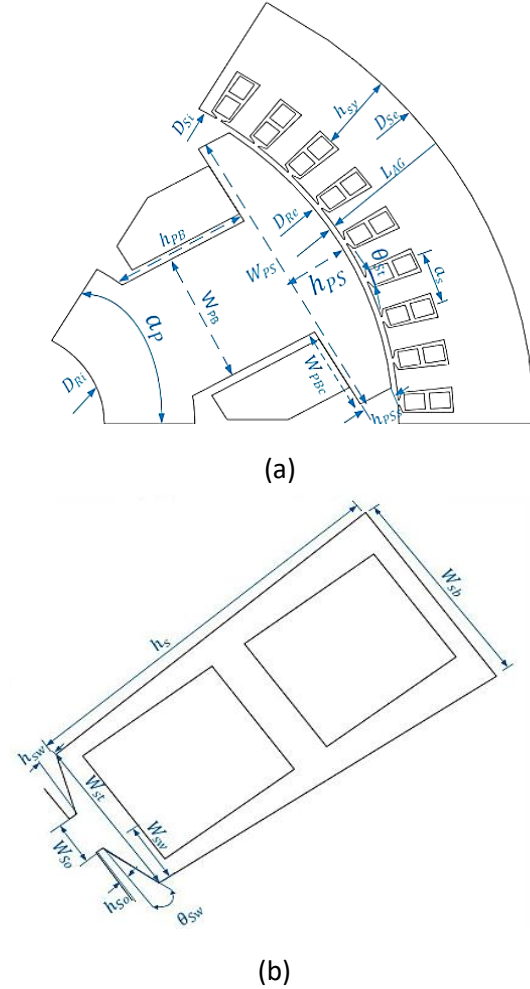
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Tasarım Gereksinimleri (Design Requirements of Salient Pole Synchronous Generator)

Senkron generatör tasarımında ilk adım, faz sayısı, anma gücü ve hızı, 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 belirlenir. Statorun genel boyutlandırmasının ardından, oluk geometrisi belirlenerek stator tasarımı sonuçlandırılır. Stator tasarımı tamamlandıktan sonra, rotor ile stator arasındaki hava aralığı mesafesi mekanik toleranslar gözetilerek belirlenir. Hava aralığı, rotor ve stator arasında manyetik akının optimum dağılımını sağlayacak biçimde belirlenir ve bu bölgede oluşacak manyetik akı yoğunluğu hesaplanır. Bu aşamaya kadar yapılan tasarım hesaplamaları, generatörün yüksüz çalışma koşulları altında olduğu varsayımıyla gerçekleştirilir. Tam yük koşullarına ilişkin analizlere geçilmeden önce, elde edilen çıkış gücünün kabul edilebilir düzeyde olup olmadığı doğrulanmalıdır. Tasarlanan rotor ve stator parametreleri ile hedeflenen çıkış gücüne ulaşamıyorsa, eksenel uzunluk gibi yapısal parametreler yeniden düzenlenerek uygun akım yoğunluğu değerine ulaşılır ve generatör çıkış gerilimi hesaplanır [20]. Çıkış geriliminin istenen seviyeye ulaşmasının ardından, sistemdeki kayıplar ve buna bağlı olarak generatörün verimliliği hesaplanır. Damper sargıları, uzay harmoniklerini azaltarak dönüş sırasında oluşabilecek geçici değişimlere karşı sönümleyici moment üreterek geçiş performansını artırmaktadır [21]. Verimlilik hesabının tamamlanmasının ardından, tasarlanan senkron generatörün belirlenen tasarım kriterlerini sağlayıp sağlamadığı SEA ile doğrulanabilir.

2.2. Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Boyutlandırılması (Sizing of Salient Pole Synchronous Generator)

Bu bölümde, belirlenen tasarım gereksinimleri doğrultusunda kullanılan temel boyutlandırma denklemleri verilmiştir. Şekil 1'de, boyutlandırma denklemlerinde kullanılan geometrik parametrelerin tanımları görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Senkron generatörün geometrik bileşenleri
a) Stator ve rotor geometrisi b) Stator oluk detayı
(Geometric components of a synchronous generator a) Stator and rotor geometry b) Stator slot detail)

Elektrik makinalarının tasarımına kutup sayısının seçimi ile başlanmaktadır.

$$2p = 120 \cdot \frac{f}{n} \quad (1)$$

Eş. 1'de p kutup sayısını, f frekansı ve n d/dk cinsinden dönüş hızını ifade etmektedir. Rotor hacmi başına düşen kVA miktarını tanımlayan çıkış güç katsayısı C , manyetik ve elektriksel yüklem cinsinden ifade edilebilir. Ayrıca bu değer, kutup sayısı ve soğutma etkinliği ile doğrudan ilişkilidir.

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot A \cdot B_g \quad (2)$$

Eş. 2'de B_g hava aralığı akı yoğunluğunu, K_w sargı faktörünü ve A ise birim çevresel uzunluk başına düşen spesifik elektrik yüklemesini (A/m) temsil etmektedir. Belirlenen manyetik ve elektrik yüklem değerleri doğrultusunda generatörün elektromanyetik gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{elm} = 3 \cdot \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} (W_1 \cdot K_w) \cdot \phi_1 \cdot I_1 \quad (3)$$

Burada ω_1 açısal hız, ϕ_1 ise kutup başına akı değerini ifade eder. Spesifik teğetsel kuvvet olarak tanımlanan f_t Eş. 4'te verilmiştir.

$$f_t = \frac{P_{elm}}{2\pi n_1 \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right) \cdot D \cdot l_i} = \frac{1}{\pi^2} \cdot C \quad (4)$$

Eşitlikte n_1 devir sayısını, l_i ideal paket uzunluğunu, D rotor dış çapını ifade eder. Generatörlerde rotor çapının belirlenmesinde etkili olan önemli parametrelerden biri de rotor çevresel hızıdır. Maksimum çevresel hız Eş. 5'te tanımlandığı şekilde hesaplanabilir.

$$U_{max} = \pi \cdot D_{max} \cdot n_n \cdot \frac{n_{max}}{n_n} \quad (5)$$

U_{max} değeri, geçici rotor çapı D_{max} ile birlikte n_{max}/n_n oranıyla sınırlandırılır ve bu oran hidrogenatörler için turbogeneratörlere kıyasla daha yüksek alınır. Rotor ataleti, hız ve güçle orantılı atalet sabiti ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$H = \frac{J \left(\frac{\omega}{p_1}\right)^2}{2S_n} \quad (6)$$

Burada J rotor ataleti, ω açısal hız, S_n ise nominal görünür gücü ifade etmektedir. Üç fazlı simetrik yapı gözetilerek stator oluk sayısı N_s Eş. 7'de verilen ifade ile hesaplanır.

$$N_s = 2p_1 \cdot q \cdot m \quad (7)$$

Bu eşitlikte p_1 kutup çifti sayısı, m faz sayısı, q faz başına kutup başına oluk sayısıdır.

$$g = 4.0 \cdot 10^{-7} \frac{A \cdot \tau}{(x_d - 0.1) B_g} \quad (8)$$

Hava aralığı g ; Eş. 8'de verildiği gibi hesaplanır. τ kutup adımını, x_d d-eksen senkron reaktansını ve A elektrik yüklem (A/m) değerini ifade eder.

$$A_{slot} = \frac{6 \cdot W_a \cdot I_n}{N_s \cdot K_{fll} \cdot j} ; A_{slot} = b_s \cdot h_s \quad (9)$$

Oluk alanı A_{slot} , Eş. 9’da verildiği gibi akım yoğunluğu j , oluk doluluk oranı K_{fill} , nominal akım I_n , paralel kol başına düşen sarım sayısı W_a ile hesaplanabilir.

$$D_{Si} = D + 2g \quad (10)$$

Stator iç çapı D_{Si} Eş. 10’da verildiği üzere rotor dış çapı ve hava aralığı dikkate alınarak hesaplanır.

$$D_{St} = D_{Si} + 2 \cdot (h_{s0} + h_{sw}) \quad (11)$$

D_{St} oluk üst kenarının çapı, Eş. 11’deki gibi h_{s0} oluk ağızı yüksekliği ve h_{sw} oluk kenar yüksekliği ile ifade edilir.

$$W_{St} = D_{s0} \cdot \tan \frac{\theta_{St}}{2} \quad (12)$$

W_{St} oluk üst kenar genişliğini ise θ_{St} bir oluğun üst kısmının kapladığı açısı yardımıyla bulunur.

$$D_{s0} = D_{St} + 2h_s + 2h_{sy} \quad (13)$$

D_{s0} stator dış çapı ise, h_s oluk yüksekliği ve h_{sy} stator boyunduruk yüksekliği dahil edilerek bulunur.

$$l_i \approx \frac{S_n}{C \cdot D^2 \cdot n_n} \quad (14)$$

Son olarak ideal paket uzunluğu olan l_i Eş. 14’te yardımıyla hesaplanır [2,22].

2.3. Tasarlanan Çıkık Kutuplu Senkron Generatör ve Özellikleri (Designed Salient Pole Synchronous Generator and Specifications)

Tasarım gereksinimlerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. *Tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün temel özellikleri* (Key features of the designed salient pole synchronous generator)

Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Temel Özellikleri		Stator ve Rotor Parametreleri	
Nominal Görünür Güç (kVA)	600	Stator Oluk Sayısı	72
Nominal Güç Faktörü	0,9 (ind)	Stator Dış Çapı (mm)	760
Çıkış Gücü (kW)	540	Stator İç Çapı (mm)	568
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)	11,52
Nominal Hız (rpm)	1000	W_{sb} (mm)	14,66
Çalışma Sıcaklığı (°C)	115	Minimum Hava Aralığı (mm)	4
Rüzgâr Kaybı (W)	1000	Rotor İç Çapı (mm)	150
Sürtünme Kaybı (W)	2600	Paket 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	0,3519	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)	866,02
Uyartım Akımı (A)	40,05	Uyartım Gerilimi (V)	93,45
Toplam Net Ağırlık (kg)	1242,15	Rotor Kutup Gövde Yüksekliği (mm)	100

Geometrik parametreleri belirlenen çıkık kutuplu senkron generatörün performans analizleri, ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir; elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda başlangıç tasarımına ait elde edilen performans parametreleri Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Başlangıç tasarımına ait performans parametreleri (Performance parameters of the initial design)

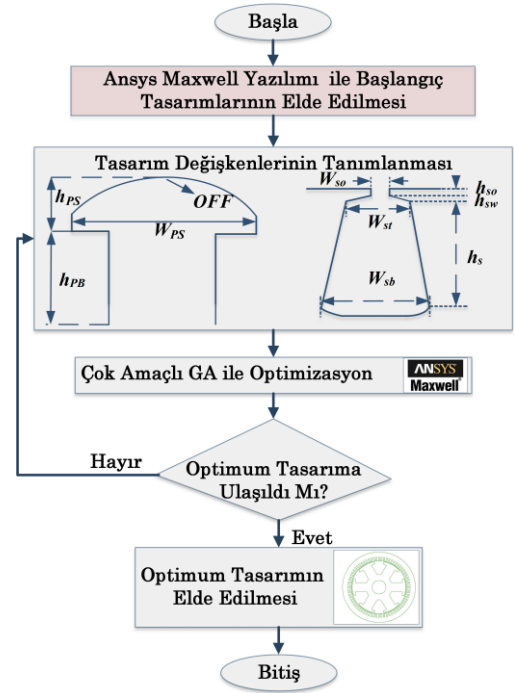
Parametreler	Başlangıç Tasarımı
Verim (%)	94,92
THD (%)	10,85
Stator Dış Akı Yoğunluğu (T)	1,25
Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51
Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,35
Oluk Doluluk Oranı (%)	56,56
Toplam Kayıp (kW)	28,92

3. STATOR VE ROTOR GEOMETRİK OPTİMİZASYONU (GEOMETRIC OPTIMISATION OF STATOR AND ROTOR)

Optimizasyon, belirli bir amaç doğrultusunda tanımlanan hedef fonksiyonun maksimum veya minimum değerlerini, çeşitli kısıtlar altında en uygun şekilde elde etmeyi amaçlayan bir çözüm sürecidir. 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 oluşur [23].

Başlangıç tasarımı tamamlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimum geometrik yapısını elde etmek amacıyla, ANSYS Maxwell yazılımı ve ÇAGA kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 2.** ÇAGA yöntemine dayalı optimizasyon akış şeması (Optimization flow chart based on the MOGA method)

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde temel hedef, birbirleriyle çelişebilen birden fazla performans kriterini aynı anda iyileştirebilecek çözümler elde etmektir. Karar vericinin sürece doğrudan müdahil olmadığı durumlarda, çok amaçlı bir optimizasyon problemi için tek bir nihai çözüm seçimi çoğunlukla zordur.

Bu amaçla, en uygun çözüm kümesi olan Pareto optimal çözümler tercih edilir. Genetik algoritmalarda tüm Pareto optimal çözümlerin elde edilebilmesi için, her nesilde popülasyon çeşitliliğinin korunması büyük önem taşımaktadır [23].

Tablo 4. Optimizasyon sürecinde kullanılan geometrik tasarım değişkenleri ve sınır değerleri (Geometric design variables and boundary values used in the optimization process)

Semboller	Parametreler	Başlangıç Değeri	Minimum Değeri	Maksimum Değeri
W_{SO}	Oluk Ağız Genişliği	5,97 mm	2mm	6 mm
h_S	Oluk Kanadı 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

Optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenleri ile bunlara ait alt ve üst sınır değerlerinden oluşan arama uzayı Tablo 4'te sunulmuştur. Bu değişkenlerin fiziksel karşılıkları Şekil 1'de görsel olarak sunulmuştur. Rotor ve statorun geometrik parametreleri, generatörün verimi, üretilen gerilim dalga formu ve THD üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Tablo 5'te, ÇAGA optimizasyon sürecinde kullanılan parametreler verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada optimizasyon süreci rastgele oluşturulan 100 başlangıç örneğiyle başlamakta ve her bir iterasyonda 50 aday çözüm üzerinden analiz gerçekleştirilmektedir. Değişken sayısına bağlı olarak optimizasyon 20 iterasyon ile sınırlandırılmış ve çözümlerin %70'inin Pareto Optimum çözüm olmasına izin verilmiştir. Aynı zamanda yakınsama için de %0,0001 hassas bir kararlılık kriteri kullanılarak verimli bir optimizasyon süreci yürütülmesi amaçlanmıştır.

Tablo 5. ÇAGA parametre ayarları (MOGA parameter settings)

Parametre	Değer
Başlangıç Örnek Sayısı	100
Her Bir İterasyondaki Örnek Sayısı	50
İzin Verilen Maksimum Pareto Yüzdesi (%)	70
Yakınsama Kararlılığı Yüzdesi (%)	0,0001
Maksimum İterasyon Sayısı	20

Tasarlanan çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyon sürecinde; verimlilik, tam yük çıkış gerilimi THD'si, stator dişi akı yoğunluğu, rotor kutup akı yoğunluğu ve stator boyunduruk akı yoğunluğunu içeren çok amaçlı bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Belirlenen amaç fonksiyonuna ilişkin sınır değerler ve her parametreye atanan ağırlık katsayıları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Belirlenen amaç fonksiyonuna ait sınır değerleri ve ağırlık katsayıları tablosu (Table of boundary values and weight coefficients for the specified objective function)

Parametreler	Sınır Değerleri	Ağırlıkları
Verim (%)	≥ 96	[50]
THD	≤ 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]

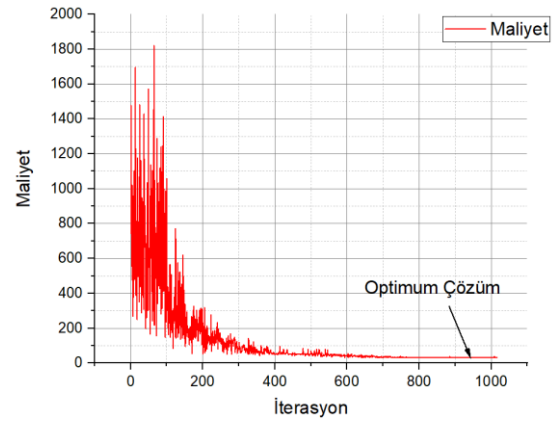
Çıkık kutuplu senkron generatörlerin verimliliği; manyetik akı dağılımı, güç kapasitesi, termal davranış, manyetik doyum, moment karakteristikleri ve sargı yapısı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Rotorun çıkıntılı geometrisinin uygun şekilde optimize edilmesi, hava aralığındaki manyetik akının istenilen dalga formunda elde edilmesi için oldukça önemlidir. Stator sargılarının düzgün ve dengeli biçimde yerleştirilmesi, sargı kayıplarını azaltarak verimliliğin artırılmasına doğrudan katkı sağlar. 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 ve verimlilikle birlikte sistem performansının bozulmasına yol açar. Stator dış akı yoğunluğu, stator dışından geçen manyetik akının birim alana düşen değeridir ve akı yoğunluğunun yüksek olması durumunda generatör daha fazla güç üretebilir. Ancak yüksek akı yoğunluğu, artan iç ısı oluşumuna ve manyetik kayıpların yükselmesine sebep olabilir; bu da sistemin verimliliğini olumsuz etkiler. Benzer şekilde, rotor kutup akı yoğunluğu da verimlilik, güç üretimi, manyetik kayıplar ve ısıl yönetim üzerinde doğrudan etkilidir. Vuruntu momenti, generatör rotorunun dönüşü sırasında oluşan ani ve geçici moment dalgalanmalarıdır; bu değerlerin yüksek olması, mekanik zorlanmalar, aşınma ve titreşim gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Rotor geometrisi, manyetik akı dağılımı, damper sargılarının yerleşimi ve sargı yapısının optimize edilmesi, vuruntu momentinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, sistemdeki titreşim kontrolü ve mekanik dengeleme önlemleri, moment dalgalanmalarının azaltılmasına ilave katkı sunar. Ayrıca, stator boyunduruk akı yoğunluğu değerinin uygun aralıkta tutulması, nüve kayıplarının azaltılmasına ve generatörün verimli çalışmasına olanak tanır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA (RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım süreci ve ANSYS Maxwell yazılımında ÇAGA kullanılarak yürütülen optimizasyon çalışmalarının çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Geometrik tasarım değişkenlerinin optimize edilmesiyle, performans ölçütlerinde anlamlı gelişmeler elde edilmiştir. Rotor ve stator geometrisinin optimize edilmesi sonucunda,

özellikle THD ve verimlilik değerlerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Şekil 3'te, ÇAGA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasına ait iterasyon sayıları ve her bir iterasyonda elde edilen çözümlerin yakınsama eğilimi sunulmuştur.

Başlangıç tasarımına ait geometrik parametreler ile optimizasyon sonucunda elde edilen optimum tasarım değişkenleri ve ilgili performans çıktıları karşılaştırmalı biçimde Tablo 7'de sunulmuştur.



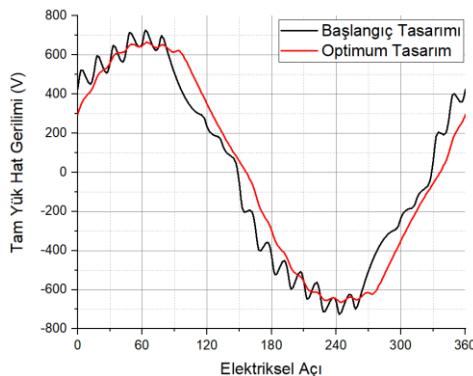
Şekil 3. ÇAGA İterasyon Sonuçları (MOGA Iteration Results)

Tablo 7. Başlangıç ve optimum tasarımın geometrik ve performans parametreleri karşılaştırması
(Comparison of geometric and performance parameters of initial and optimal designs)

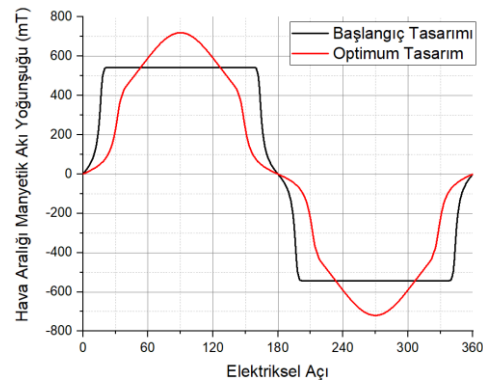
Tasarım Değişkenleri			Performans Parametreleri		
Parametreler	Başlangıç Tasarımı	Optimum Tasarım	Parametreler	Başlangıç Tasarımı	Optimum Tasarım
W_{S0} (mm)	4	5,92	Verim (%)	94,92	95,70
h_s (mm)	36	39,55	THD (%)	10,80	3,89
OFF (mm)	0	49,65	Stator Dişi Akı Yoğunluğu (T)	1,25	1,80
h_{PB} (mm)	100	110,84	Rotor Kutup Akı Yoğunluğu (T)	1,51	1,33
h_{PS} (mm)	50	42,46	Stator Boyunduruk Akı Yoğunluğu (T)	1,36	1,39
W_{PS} (mm)	230	179,69	Oluk Doluluk Oranı (%)	56,56	58,67
TW (mm)	13,5	12,16	Toplam Kayıp (kW)	28,92	24,24

Tablo 7 incelendiğinde, rotor ve stator geometrilerine ait değişkenlerin, tanımlanan amaç fonksiyonu doğrultusunda optimize edilerek anlamlı düzeyde iyileştirildiği görülmektedir. Ayrıca, generatör performansına ilişkin parametrelerin optimizasyon hedefleriyle uyumlu şekilde iyileştirildiği açıkça gözlemlenmektedir.

Şekil 4'te başlangıç ve optimum tasarım için tam yük altında çıkış gerilim dalga formları ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğundaki değişim karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(a)

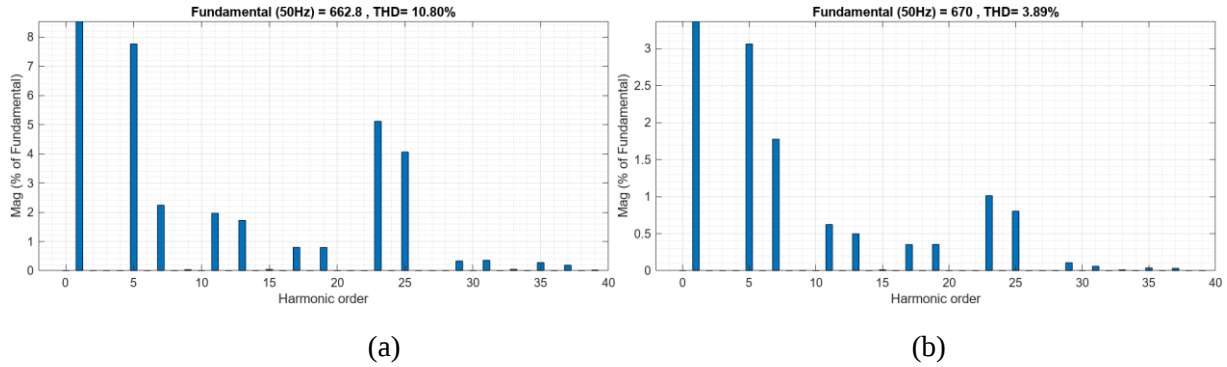


(b)

Şekil 4. Başlangıç ve optimum tasarımların karşılaştırılması, (a) Tam yük hat gerilimi, (b) Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu (Comparison of initial and optimal designs, (a) Full load line voltage, (b) Air gap magnetic flux density)

Şekil 4'te görüldüğü üzere, tam yük koşullarındaki hat gerilimi ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, optimizasyon sonucunda sinüs formuna daha yakın hale gelmiştir. Bu durum, THD'deki anlamlı düşüşü doğrulamaktadır. Başlangıç ve optimize tasarıma ait

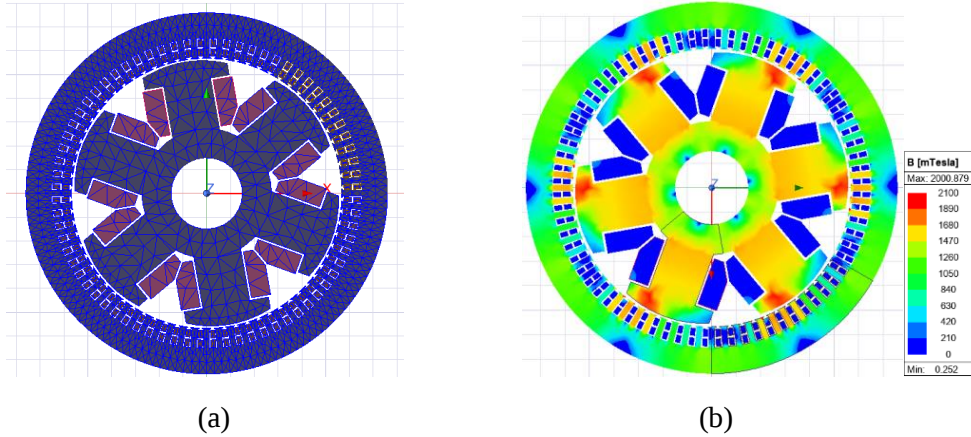
gerilim değerleri MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak THD değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5. Başlangıç ve optimum tasarıma ait harmonik dağılımı karşılaştırması, (a) Başlangıç tasarımı, (b) Optimum tasarım (Comparison of harmonic distribution between initial and optimal designs, (a) Initial design, (b) Optimal design)

Şekil 4'te görüldüğü üzere, tam yük koşullarındaki hat gerilimi ile hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, optimizasyon sonucunda sinüs formuna daha yakın hale gelmiştir. Bu durum, THD'deki anlamlı düşüşü doğrulamaktadır. Başlangıç ve optimize tasarıma ait gerilim değerleri MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak THD değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4 ve 5'te yer alan sonuçların incelenmesiyle birlikte, çıkık kutuplu senkron generatörün tasarım sürecinde yapılan optimizasyonun başarıyla

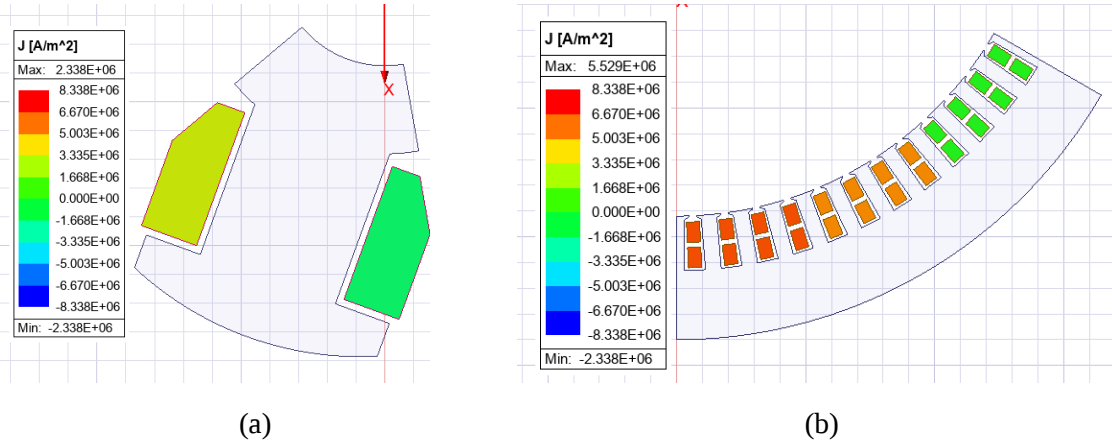
uygulandığı ve optimal tasarım parametrelerinin elde edildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, generatör performansında başta THD olmak üzere performans açısından anlamlı ve çok boyutlu iyileşmeler elde edilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının doğrulanması ve özellikle nüvenin doyum karakteristiğini değerlendirmek amacıyla ANSYS Maxwell 2D ortamında SEA gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan analiz sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Optimum tasarım, (a) Mesh dağılımı, (b) Manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Optimum design, (a) Mesh distribution, (b) Magnetic flux density distribution)

Şekil 6'da, optimum tasarım için SEA'da oluşturulan ağ yapısı (mesh) ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı sunulmuştur. Elde edilen analiz bulguları, nüvenin manyetik doyum sınırına ulaşmadan çalıştığını ve amaç fonksiyonunda tanımlanan ağırlık katsayılarının uygunluğu ortaya

koymaktadır. Senkron generatörlerde akım yoğunluğu, sargı kayıplarını doğrudan etkileyen ve dolayısıyla verim üzerinde belirleyici olan kritik bir parametredir. Bu kapsamda, stator ve uyarım sargılarındaki akım yoğunlukları analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Optimum tasarımda akım yoğunluğu dağılımı, (a) Uyarım sargısı, (b) Stator sargısı (Current density distribution in the optimum design, (a) Excitation winding, (b) Stator winding)

Şekil 7 incelendiğinde, stator sargılarındaki maksimum akım yoğunluğu yaklaşık 5,53 A/mm², uyarım sargılarındaki akım yoğunluğu ise 2,38 A/mm² olarak elde edilmiştir. Akım yoğunluğu değerleri, fan soğutmalı generatörde aşırı termal yüke neden olmayacak seviyelerde olup tasarımda hedeflenen termal sınırlar içerisinde yer almaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, çıkık kutuplu senkron generatörlerin elektromanyetik performanslarını iyileştirmeye yönelik olarak geometrik optimizasyona dayalı bir yaklaşım dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. Generatörün tasarımı ve optimizasyonuna yönelik gerçekleştirilen analizler sonucunda, optimizasyon sürecinin başarıyla uygulandığı ve tasarım parametrelerinde önemli ölçüde iyileşme sağlandığı ortaya konmuştur. ÇAGA yöntemiyle yürütülen optimizasyon sürecinde, verimlilik, akı yoğunlukları, THD ve oluk doluluk oranını etkileyen rotor ve stator parametreleri belirlenmiş ve bu değişkenler temel alınarak çok amaçlı bir hedef fonksiyonu oluşturulmuştur. Başlangıçta analitik yöntemlerle elde edilen ilk tasarım modeli optimize edilerek performans iyileştirmesi sağlanmıştır. Optimizasyon sonucunda, tam yük altında generatör gerilimi THD değeri %10,80'den %3,89'a düşürülerek başlangıç değerine göre %64 oranında iyileşme sağlanmıştır. Toplam kayıplar 28,92 kW seviyesinden 24,24 kW seviyesine düşürülerek yaklaşık %16'lık bir düşüş sağlanmış ve karşılık gelen generatör verimi %94,92'den %95,70'e yükselterek yaklaşık %0,78 iyileştirme sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, çıkık kutuplu senkron generatörlerin tasarımında kullanılan çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin, sistem performansını artırma ve kayıpları minimize etmede etkili bir araç olduğu görülmüştür. Bu yaklaşım,

özellikle hidroelektrik santraller gibi düşük devirli uygulamalarda kullanılan generatörlerin tasarım kalitesini artırmaya yönelik önemli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma farklı geometrik parametrelerin eş zamanlı olarak optimize edilmesine olanak sağlayarak çoklu performans kriterlerinin dengelenmesine yönelik örnek bir uygulama sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda optimizasyon sürecine ısı analiz ve mekanik gerilme parametreleri de entegre edilerek çok disiplinli bir optimizasyon yaklaşımı hedeflenmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Melda EYÜBOĞLU: Araştırmayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the research, analyzed the results and performed the writing process.

Burak YENİPINAR: Simülasyon çalışmaları ve teorik aşamalarda katkı sağlamıştır.

He contributed to simulation studies and theoretical parts.

Cemil OCAK: Konu ve makale değerlendirmesinde katkıda bulunmuştur.

He has contributed subject and article evaluation.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çıtak, E., & Kılınç Pala, P. B. “Yenilenebilir Enerjinin Enerji Güvenliğine Etkisi.” Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (25), 79-102., 2016.
- [2] T. d. P. M. Bazzo, V. d. O. Moura, and R. Carlson, "A step-by-step procedure to perform preliminary designs of salient-pole synchronous generators," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4989, 2021.
- [3] O. G. Usta ve S. Akkaya Oy, “Rüzgâr Temelli Piezoelektrik Jeneratör Tasarımı”, DÜBİTED, c. 12, sy. 2, ss. 1166–1177, 2024.
- [4] Paish O., “Small HydroPower: Technology and Current Status”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Science Ltd., 6: 537-556, 2002.
- [5] Lugaresi, A., Mass, A., “Designing Francis Turbines, Trends in the Last Decade”, *Water Power and Dam Cont.*, 23-28, 1987.
- [6] A. Ruprecht, "Unsteady flow simulation in hydraulic machinery," *Task Quarterly Scientific Bulletin Academic Computer Centre*, vol. 61, pp. 187-208, 2002, Gdansk, Poland.
- [7] H. -J. Kim, J. -S. Jeong, M. -H. Yoon, J. -W. Moon and J. -P. Hong, "Simple Size Determination of Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 10, pp. 7972-7983, Oct. 2017.
- [8] K. Weeber and S. R. H. Hoole, "Geometric parametrization and constrained optimization techniques in the design of salient pole synchronous machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 4, pp. 1948-1960, July 1992.
- [9] Y. Duan and D. M. Ionel, "A Review of Recent Developments in Electrical Machine Design Optimization Methods With a Permanent-Magnet Synchronous Motor Benchmark Study," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1268-1275, May-June 2013.
- [10] S. Pal and S. Haldar, "Optimization of drilling parameters for composite laminate using genetic algorithm," *Data-Driven Optimization of Manufacturing Processes*, pp. 194-216, 2020.
- [11] “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, vol., no., pp. 1-29, 11 June 2014.
- [12] İ. Topaloğlu ve O. Gürdal, “Çıkık Kutuplu Senkron Hidrogeneratörlerin Dinamik ve Geçici Zaman Analiz Koşullarında Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama Metodu Kullanılarak Optimizasyonu”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. DerCilt*, c. 25, No 2, 355-361, 2013.
- [13] A. Spargo, S. Ilie and J. Chan, “Salient-pole rotor optimisations for synchronous generators using FEA software,” in *2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, pp. 158-162, 2017.
- [14] N. Pamuk, “Genetik Algoritma Optimizasyonu Kullanılarak Senkron Makine Tasarımı ve Uygunluk Parametrelerinin Belirlenmesi”, *J. Innovative Eng. Nat. Sci.*, c. 4, s. 2, ss. 276-288, 2024.
- [15] Y.-m. You, “Multi-objective optimal design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on deep learning,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 482, 2020, doi: 10.3390/app10020482.
- [16] A. Shoaie, F. Farshbaf-Roomi, and Q. Wang, “Enhanced multi-objective design optimisation of salient pole reluctance magnetic gear using Bayesian-optimised artificial neural networks,” *IET Electric Power Applications*, vol. 19, no. 3, p. e70017, 2025, doi: 10.1049/elp2.70017.
- [17] A. D. Karaoglan, D. Perin, and K. Yilmaz, “Multiobjective design optimization of stator for synchronous generator using bat algorithm and analysis of magnetic flux density distribution,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 49, no. 9–10, pp. 919–929, 2021, doi: 10.1080/15325008.2022.2049651.
- [18] T. Sun et al., “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*, vol. 74, no. 1, pp. 127–149, 2025, doi:10.24425/ae.2025.153016

- [19] K. Chen, S. Ma, C. Li, Y. Wu, and J. Ma, "Optimization and design of built-in U-shaped permanent magnet and salient-pole electromagnetic hybrid excitation generator for vehicles," *Symmetry*, vol. 17, no. 6, p. 897, 2025, doi: 10.3390/sym17060897.
- [20] Hendershot, JR; Miller, TJE *Fırçasız Kalıcı Mıknatıslı Makinelerin Tasarımı*, 1. baskı; Motor Tasarım Kitapları: Venice, CA, ABD, 2010
- [21] Jones, CV *Elektrik Makinelerinin Birleşik Teorisi*, 1. basım; Butterworths: Londra, İngiltere, 1967.
- [22] Boldea, I. "Synchronous generators" Taylor & Francis Group LLC, New York, A.B.D., ISBN 0- 8493-5725-X, 1.1-8.23, 2006.
- [23] T. Murata and H. Ishibuchi, "MOGA: multi-objective genetic algorithms," *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Perth, WA, Australia, pp. 289-294, 1995.