
Araştırma Makalesi / Research Article

Senkron Generatörlerde Farklı Stator Oluk Yapılarının Uç Gerilimine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Selami BALCI*

*Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Karaman
(ORCID: 0000-0002-3922-4824)*

Öz

Senkron generatörlerin uluslararası standartlara uygun değerlerde AA gerilim üretebilmeleri için stator ve rotorun mekanik yapısının tasarım aşamasında belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Benzer şekilde, stator üzerindeki olukların yapısı, yerleşimi ve sargı adımı gibi tasarım parametreleri ile rotor kesitinin generatörde üretilen gerilimin temel ve harmonik bileşenlerini etkilediği bilinmektedir. Tasarım sürecini kısaltmak ve maliyetleri düşürmek için elektromanyetik yazılımlardan yararlanmak çok önemlidir. Bu çalışmada, hava araçlarının yer beslemesinde kullanılan 400 Hz frekanslı 5 kVA anma güç değerinde bir senkron generatorün stator olukları iki farklı yapıda tasarlanmış ve Ansys-Maxwell/RMxpert elektromanyetik modelleme yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Böylece, 400 Hz generator için stator oluk yapısında mekanik düzenleme ile çıkış filtre gereksinimlerini azaltan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Senkron Generator, Stator Oluk Yapısı, THD, SEA.

Analysis of the Effect of Different Stator Slot structures on the Terminal Voltage of the Synchronous Generators with Finite Element Method

Abstract

It is of great importance to determine the mechanical structure of the stator and rotor at the design stage so that synchronous generators can produce AA voltage in accordance with international standards. Similarly, it is known that the design parameters such as the structure of the slots on the stator, placement and slot pitch of the winding on the stator and the rotor section affect the fundamental and harmonic components of the voltage generated in the generator. It is very important to use electromagnetic software to shorten the design process and reduce costs. In this study, the stator slots of a synchronous generator with a rated power of 5 kVA at 400 Hz frequency used in the ground feeding of aircraft are designed in two different structures and simulated with Ansys-Maxwell / RMxpert electromagnetic modeling software. Thus, a study was performed which reduce the output filter requirements by mechanical arrangement in stator slot structure for 400 Hz generator.

Keywords: Synchronous Generator, Stator Slot Structure, THD, FEA.

1. Giriş

Generatörlerin kutup yapıları silindirik ve çıkıntılı olmak üzere iki farklı yapıdadır. Çıkıntılı kutuplu senkron generatörler genellikle hidroelektrik ve rüzgâr santrali gibi çok kutuplu ve düşük devir gerektiren yerlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, küçük güçlü ve yüksek frekanslı generatörlerin kutup yapılarında da karşılaşılabilmektedir [1]. Generatörlerin saf sinüzoidale yakın formda gerilim üretebilmeleri için stator ve rotor arasındaki hava aralığı mesafesi en önemli parametrelerden birisidir ve hava aralığı akısının sinüzoidal formda olması için kutup yapıları ve stator sargılarında düzenlemeler yapılmaktadır [2]. Alçak gerilimli generatörlerde bu mesafe 1-3 mm gibi çok küçük değerlerde olmasına rağmen yüksek gerilim üreten büyük elektrik santrallerindeki generatörlerde

*Sorumlu yazar: sbalci@kmu.edu.tr

Geliş Tarihi: 27.01.2019, Kabul Tarihi: 24.07.2019

ise yalıtım mesafesi nedeniyle hava aralığı çok fazla küçültülememekte ve 0,5-4 cm gibi daha büyük değerlerde olabilmektedir [3].

Çıkıntılı kutuplu generatörlerde genellikle kutup ayakları kavisli yapılıdır. Bu nedenle kutup ayakları ile stator oluklarının aralarındaki mesafe her yerde aynı değildir. Böylece, hava aralığındaki akı sinüzoidal formda oluşmaktadır [3]. Silindirik kutuplu generatörlerde ise rotor yüzeyi ile stator yüzeyi arasındaki hava aralığı her yerde eşit mesafede olduğundan bu tip generatörlerin stator sargılarında kısaltılmış adım yani kesirli sarımlar yapılarak sinüzoidal gerilimler elde edilebilmektedir [4, 5]. Stator kısmında yapılan bu düzenlemeler generatörün motor konumunda çalışması sırasında daha düzgün moment üretilmesini de sağlamaktadır. Bununla birlikte rotor kısımlarına sincap kafes sistemi ve kutup ayaklarına ise damper sargıları yani kısa devre çubukları yerleştirme gibi önlemler de literatürde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur [6]. Asenkron motorlarda ise rotor oluklarının belirli bir açıda eksenden kayık (eğik) olarak yapılması moment vuruntularını azaltmaktadır [7-9]. Benzer olarak, senkron generatörlerde stator oluklarının eksenden kayık olarak yapılması da elde edilen gerilimin toplam harmonik bozulması (THD) değerine etki etmektedir [10].

Uluslararası harmonik standartları (IEEE-519) gereği 1 kV' un altındaki generatörlerin ürettiği oldukları gerilimlerin bireysel harmonik bozulma olarak %5 değerini, THD olarak gerilim dalga formundaki bozulma sınırları için ise %8 değerini aşmamalıdır [11]. Bu değerler 51. harmonik bileşenlere kadar tek sayılı olanlar hesaplamaya dahi edilerek belirlenmektedir. Generatörlerin gerilimlerinde standartların limitlerine göre kabul edilebilir sınırlar dâhilinde bazı durumlarda pasif filtre devreleri tasarlanabilmektedir. Genelde karşılaşılan durum, kutup ayaklarında bir takım mekanik şekillendirmeler olmakla beraber nadiren de olsa özel uygulamalarda stator oluklarının eksenden belirli bir açıda kayık olarak yapılmasıdır. Asimetrik stator sargı dağılımı gibi dağıtılmış sargıların tasarımları da üretilen gerilim dalga formuna etki etmektedir [12-14].

Bu çalışmada, 5 kVA güç değerinde 16 kutuplu 400 Hz frekanslı bir senkron generatorün iki farklı tasarımda stator oluk yapısına göre Ansys-RMxprt yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi (SEA) ile modellenmiştir. Elektromanyetik modelleme ile elde edilen verilere göre farklı oluk tasarımları için üretilen gerilimlerin dalga formları, harmonik spektrum grafikleri, THD değerleri, nüve kayıpları ve moment eğrileri karşılaştırmalı olarak rapor edilmiştir. Böylece, 400 Hz generatör için stator oluk yapısında mekanik düzenleme ile harmonik filtre gereksinimlerini azaltan bir etki SEA ile rapor edilmiştir.

2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Modelleme

Elektrik makinelerinin modellenmesinde son yıllarda birçok disiplinde popüler hale gelen sonlu elemanlar metodu sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda problem bölgesi belirli sınırlar koşulunda belirli büyüklük ve geometrilerde alt problem parçacıklarına bölünerek analiz edilmektedir. Bu yöntem özellikle doğrusal olmayan davranıştaki modellemelerde daha gerçekçi ve daha doğru çözümler sağlamaktadır. Sonlu elemanlar metodu ile elektromanyetik, elektrostatik, elektriksel ve ısısal konularda hesaplamalar yapılabilmektedir [15].

Sonlu elemanlar analizi (SEA) ise belirli bir problemin çözümü için sonlu elemanlar yönteminin bir yazılım ile uygulamasıdır. Örneğin iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) bir modellemede problem çözülmesi isteniyorsa SEA matematiksel çözüm için bir varyasyonel çözücü olarak kullanılabilir. Problem bölgesi düzlemsel bir eleman olarak sonlu elemanlara ayrılabilir ve diferansiyel denklem olarak çözülebilir. Bu bağlamda, SEA yazılımı elektromanyetik analiz için elektromanyetik prensiplerin temelini oluşturan Maxwell denklemlerini kullanmaktadır. Aşağıda dört temel Maxwell denkleminin diferansiyel biçimleri Eş.1-4 ile verilmiştir. Bu denklemler Gauss, Faraday ve Ampere yasalarına dayandırılmaktadır [15, 16].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Burada, B Tesla olarak akı yoğunluğunu, E Volt/cm olarak elektrik alanını, J A/mm² olarak akım yoğunluğunu, ρ siemens olarak iletkenliği, μ_0 $4\pi 10^{-7}$ H/m olarak boşluğun geçirgenliğini ve ϵ_0 ise $8,8510^{-12}$ F/m olarak boşluğun dielektrik katsayısını ifade etmektedir [16].

Elektromanyetik ve temel kavramları göreceli olarak basit olsa da gerçekçi problemler doğrusal olmayan davranışlarda çok karmaşık ve çözülmesi zor olabilir. Esasen, karmaşık geometriler, doğrusal olmayan sistemler, birçok statik olmayan alan kaynakları gibi bir araya gelen bu tür problemler için analitik çözümlerin neredeyse imkânsız olması ve özellikle sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemlerin elektrik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan araçlar haline gelmesinin nedenleridir. Yerel formdaki Maxwell denklemleri, bu formun altında herhangi bir noktada geçerli olduğu için güçlü bir denklem grubundan oluşur. Ayrıca, cebirsel açıdan kısa notasyonlara sahip olmak, bunları farklı fiziksel durumlara göre uyarlamak kolaydır. Ancak, bunları gerçekçi bir duruma uygulamak gerektiğinde, hacim, yüzey ve çizgi (fiziksel modelin kendisine doğrudan bağlı) kavramları dikkate alınmalıdır. Bu gibi durumlarda, sınırlı koşullar dâhilinde (yerel form) belirli bir duruma adapte edilebilir. Örneğin, bir elektrik makinesine uyarlanan Maxwell denklemleri, farklı bir modeli analiz etmek için uygun olmayabilir. Öte yandan, bunları integral formda kullanarak normalde ihtiyaç duyulan miktarlar hesaplanabilir. Uygulamada, hemen hemen her durumda, ilgili problemi çözebilmek için Maxwell denklemlerinin integral biçimleri tercih edilmektedir. Buna rağmen daha güncel olan diferansiyel biçimleri de SEA yazılımlarının çözümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [15-17].

Ansys-Maxwell yazılımı ile elektrik makinelerinin tasarımını ve benzetimini yapabilmek için elektromanyetik modellemede izlenen adımlar Şekil 1'de verildiği gibi sistematik olarak takip edilmektedir [15, 17].



Şekil 1. Elektromanyetik modellemede izlenen adımlar [17].

Bu adımlarda, çözüm türü belirlendikten sonra elektromanyetik modelleme için 2D/3D olarak model geometrisi çizilmekte, sınırlar ve uyarım şartları tanımlanmaktadır. Analiz ayarları aşamasında ise çözüm kurulumu için benzetim şartları belirlenmektedir. Analiz sonucunda elde edilen verilere göre sayısal değerler, 2D/3D grafikler ve elektromanyetik alan çizimleri gibi raporlar alınmaktadır.

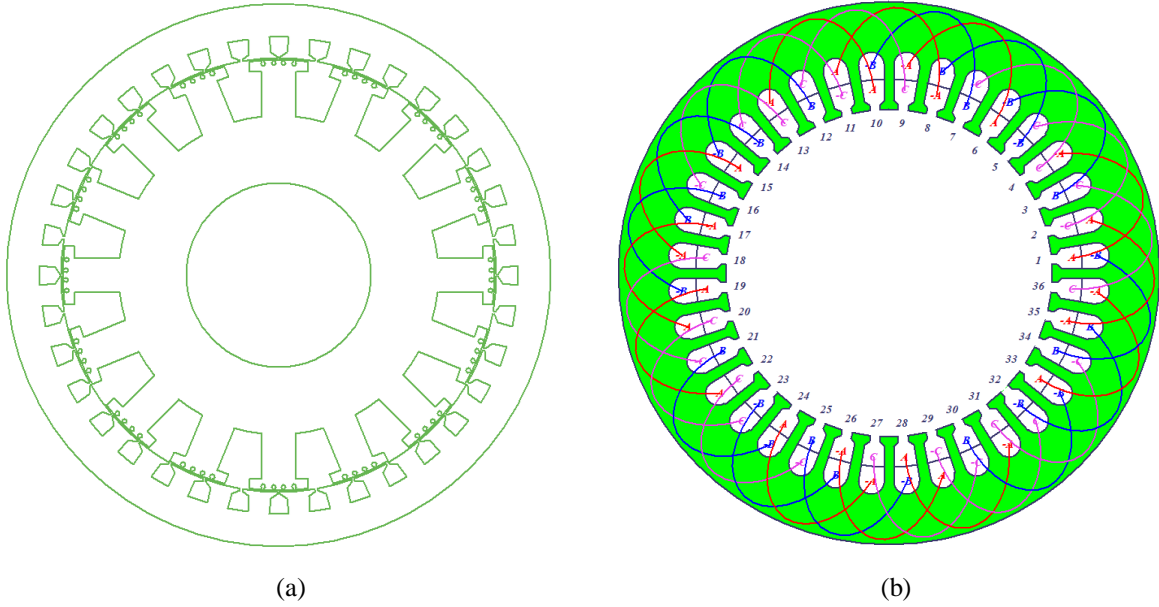
3. Benzetim Çalışmaları

Generatörün uygulamadaki gerçek boyutları ile analiz edilebilmesi için elektriksel ve manyetik davranışların etkileşimli olarak daha gerçekçi modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir. Bu bağlamda Ansys-Electronics Desktop 2019.R2 yazılımı benzetim çalışmalarında kullanılmıştır ve bu yazılımda modellenen senkron generatörün teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [18]. Bu çalışmada iki farklı stator oluk yapısına göre üretilen gerilimin dalga formları, harmonik bileşenleri, kayıpları ve moment eğrileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Tablo 1. Sekron generatörün teknik özellikleri

Parametreler	Değeri
Faz sayısı	3
Çalışma frekansı	400 Hz
Senkron devir sayısı	3000 rpm
Güç değeri	5 kVA
Kutup sayısı	16
Gerilim değeri	200 V (tepe değer)
Stator oluk sayısı	36
Oluk Eğimi	Eğimsiz/1 oluk eğimli
Sargı Adımı	3 (1-4)
Bobin sarım sayısı	20
Bağlantı tipi	Yıldız
Stator dış çapı	250 mm
Stator iç çapı	200 mm
Stator uzunluğu	250 mm
Rotor dış çapı	198 mm
Rotor iç çapı	85 mm
Hava aralığı mesafesi	2 mm
Stator paketleme faktörü	0,98
Nüve malzemesi	M19_24G (M330-50A)

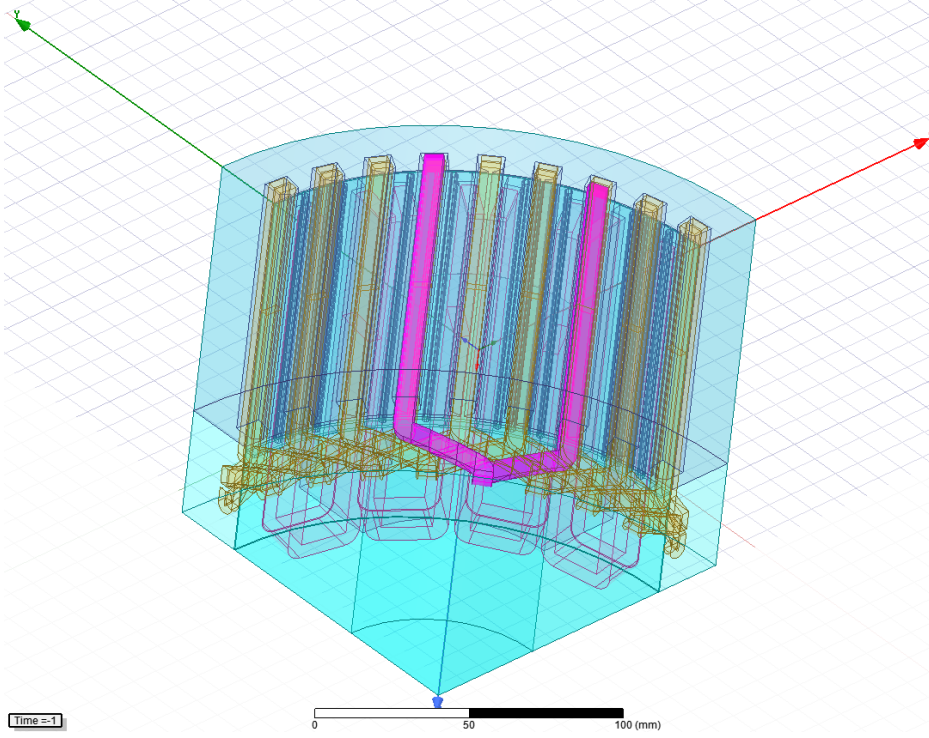
Elektromanyetik modellemesi ve benzetimi gerçekleştirilen generatörün yapısı Şekil 2’de verilmiştir. Burada stator ve rotor parçaları ile stator sargılarının yerleşimi görülebilmektedir. Stator oluk yapısında olukların yerleşiminde normal oluk yapısı ve eksenden bir oluk genişliği kadar kayık yapıda tasarlanarak istenilen analizler kolaylıkla yapılabilir. Asenkron motorların rotor yapılarında uygulamada en çok bir oluk genişliği kadar eğim yeterli olmaktadır [7-9]. Bu bağlamda, stator oluk yapısının modellenmesinde eksenden bir oluk açısı kadar kayık olarak tasarımı söz konusudur.

**Şekil 2.** a) Generatörün genel yapısı, b) stator sargılarının oluklara yerleşimi

3.1. Stator oluk yapısının normal olarak tasarımı

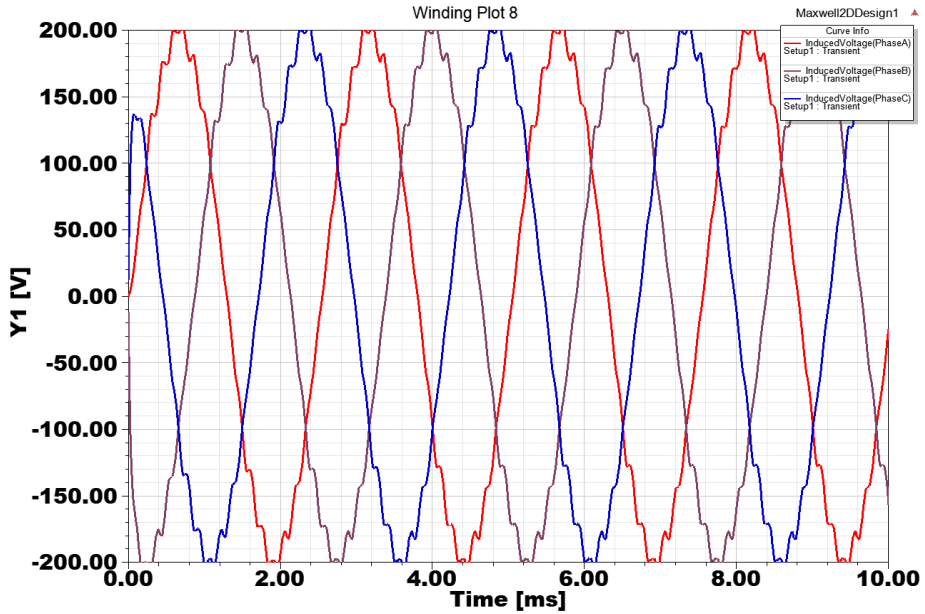
Generatörün normal oluk yapısında benzetimi için 3D SEA model görüntüsü Şekil 3’te verilmiştir. Burada görülebileceği gibi kutup ekseni ile stator oluklarının eksenleri birbirlerine paralel olarak

tasarlanmış ve modelin 1/4 oran için 3D görüntüsü verilmiştir. Bunun sebebi sonlu elemanlar analizi ile simetrik modellemelerde benzetim süresinin kısaltılabilmesidir.



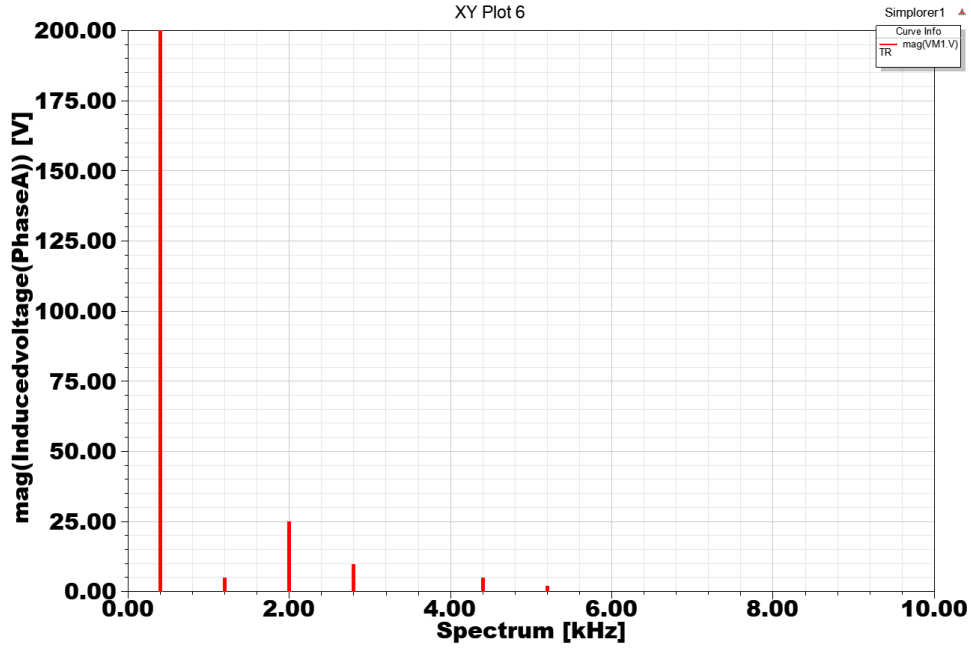
Şekil 3. Normal yapıdaki stator olukları

Normal oluk yapısında üretilen üç fazlı çıkış gerilim dalga formları ve harmonik bileşenler 400 Hz temel dalgaya göre Şekil 4'te verilmiştir. Üretilen faz gerilimlerindeki harmonik bileşenler nedeniyle bozuk bir sinüs eğrisi gözlenmiştir.



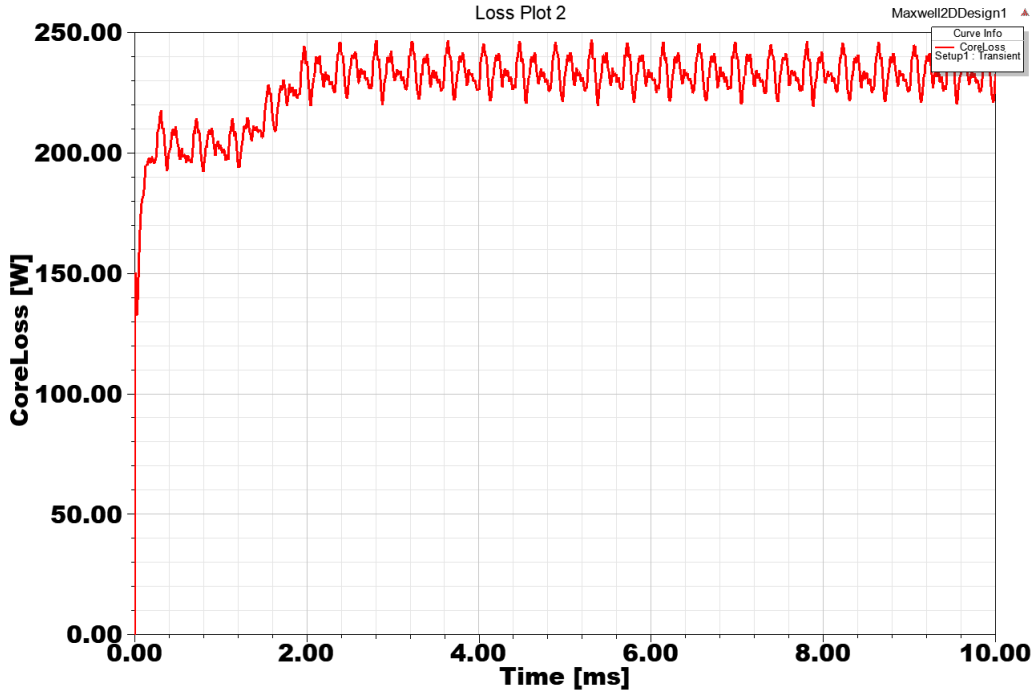
Şekil 4. Normal yapıdaki stator olukları için generatör faz gerilimlerinin dalga formları

Bu durumda gerilim dalga formlarından görülebileceği gibi 400 Hz temel frekansı için harmonik bileşenlerin etkileri Şekil 5'te verilen harmonik spektrumda görülebilmektedir. Buradan THD değeri hesaplandığında yaklaşık %15 gibi standartları aşan bir değer ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5. Normal oluk yapısında üretilen gerilimin harmonik bileşenleri

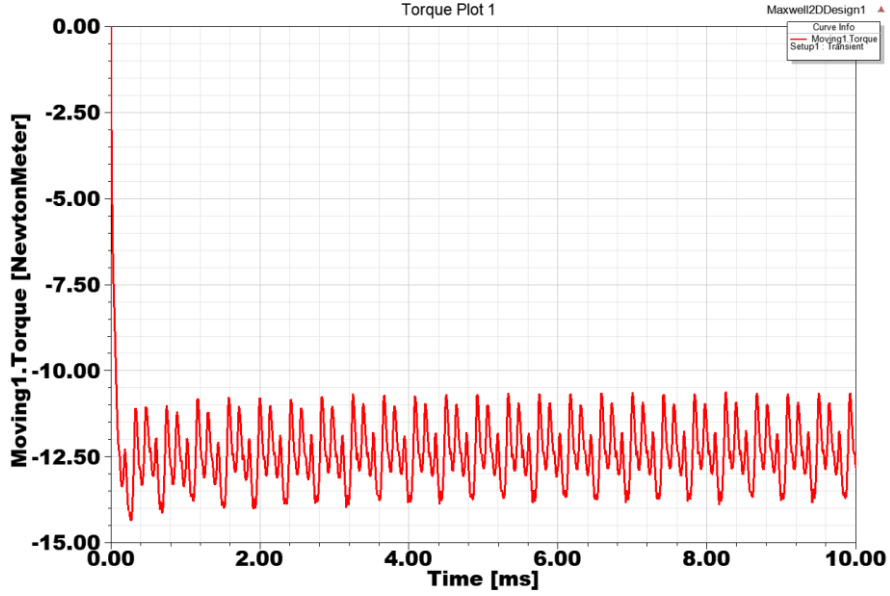
Bu durumda, özellikle 5, 7, 11 ve 13. sıralı harmonik bileşenlerin genlikleri belirgindir ve nüve kayıplarına etkisi Şekil 6'da nüve kaybı grafiğinde verilmiştir. SEA yazılımı ile hesaplatılan histerezis, girdap akım ve anormal girdap akım kaybı olarak stator ve rotor nüve paketinde oluşan kayıplardır.



Şekil 6. Normal oluk yapısında nüve kayıpları

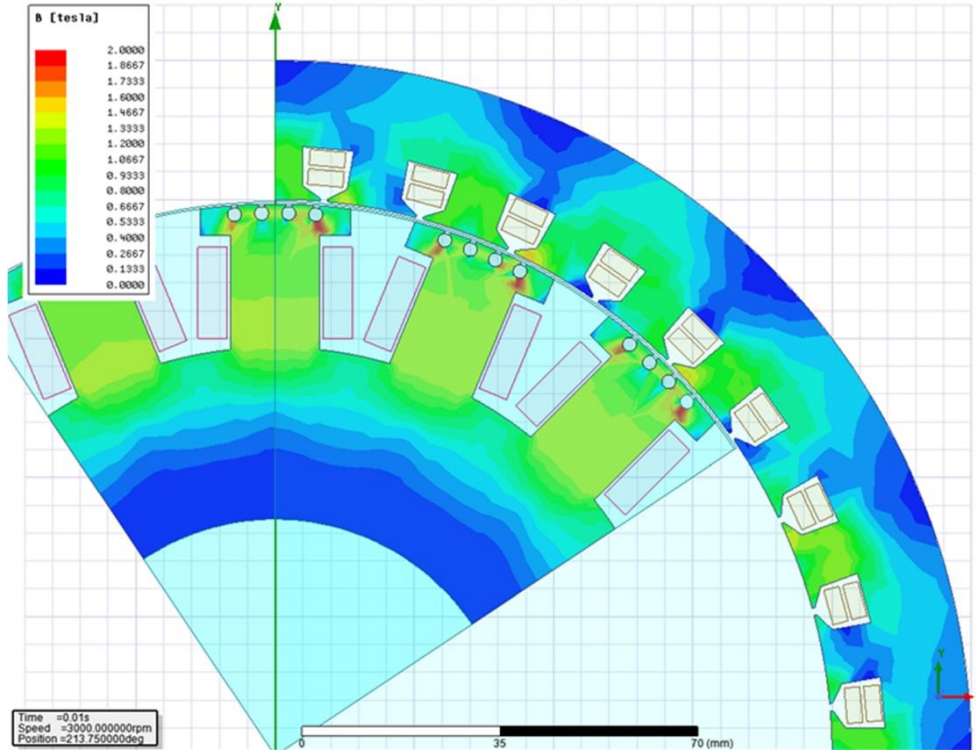
Harmonik etkiler generatöre uygulanan mekanik enerji kaynağının moment eğrisini de belirgin bir biçimde bozmaktadır (Şekil 7). Generatörün rotoru yaklaşık olarak 3000 rpm hızda 12,5 Nm

büyükliğünde bir mekanik enerji ile döndürülmektedir. Ancak moment eğrisindeki dalgalanmanın genliği tepeden tepeye yaklaşık 3,5 Nm olarak dikkate alınması gereken önemli bir değerdir.



Şekil 7. Normal oluk yapısında moment eğrisi

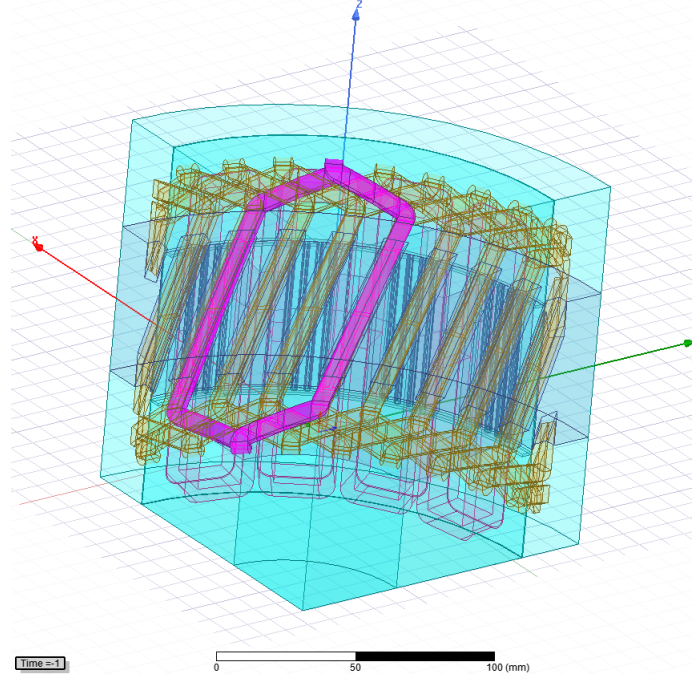
Stator ve rotordaki akı dağılımı Şekil 8’de verildiği gibi M19_24G nüve materyali için 2 T akıya göre görüntülenmiştir. Burada harmonik bileşenlerin akı dağılımına etkisi doyma noktasına yaklaşım olarak hem kayıpları artırması hem de oluk dişlerine yakın olan kısımlarda sıcaklık artışları daha fazla oluşması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 8. Normal stator oluk yapısında maksimum 2 T için akı dağılımı

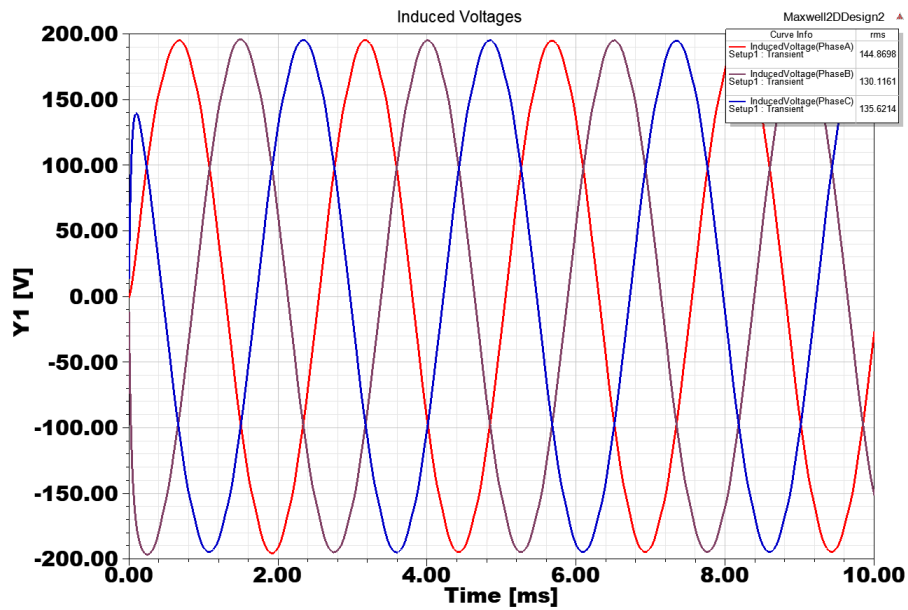
3.2. Stator oluk yapısının eksenden kayık olarak tasarımı

Generatörün yaklaşık bir oluk genişliği kadar 10 elektriksel derece ile eksenden kayık olarak oluk yapısında benzetimi için 3D FEA model görüntüsü Şekil 9’da verilmiştir. Burada görülebileceği gibi stator oluklarının eksenleri kutup eksenine göre yaklaşık bir oluk genişliği kadar kayık olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımda kaymanın açısı ise en çok izin verilen $360^\circ/36=10$ elektriksel derece olacak şekilde modellenmiştir.



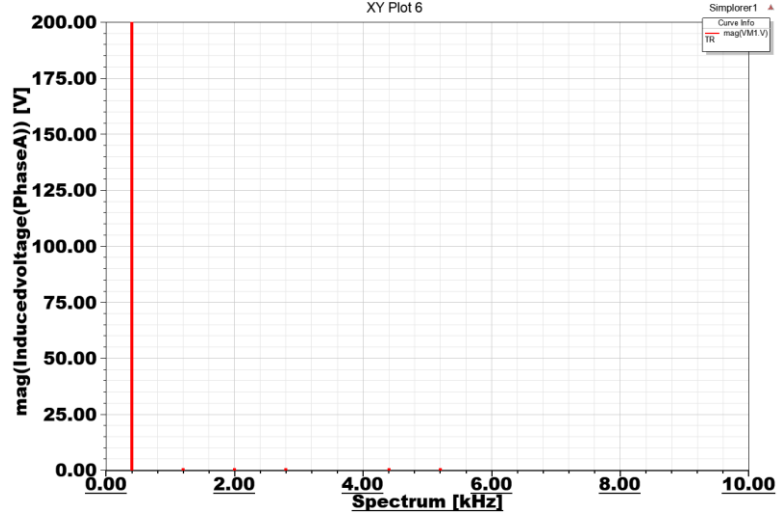
Şekil 9. Eksenden kayık olarak tasarlanan stator oluklarının görünümü

Statorun eksenden kayık oluk yapısında üretilen üç fazlı çıkış gerilim dalga formları ve harmonik bileşenler 400 Hz temel dalgaya göre Şekil 10’da verilmiştir. Üretilen gerilimlerde harmonik bileşenlerin etkileri normal oluk yapısındaki duruma göre azalmış ve dolayısıyla daha düzgün formda bir sinüs eğrisi gözlenmiştir.



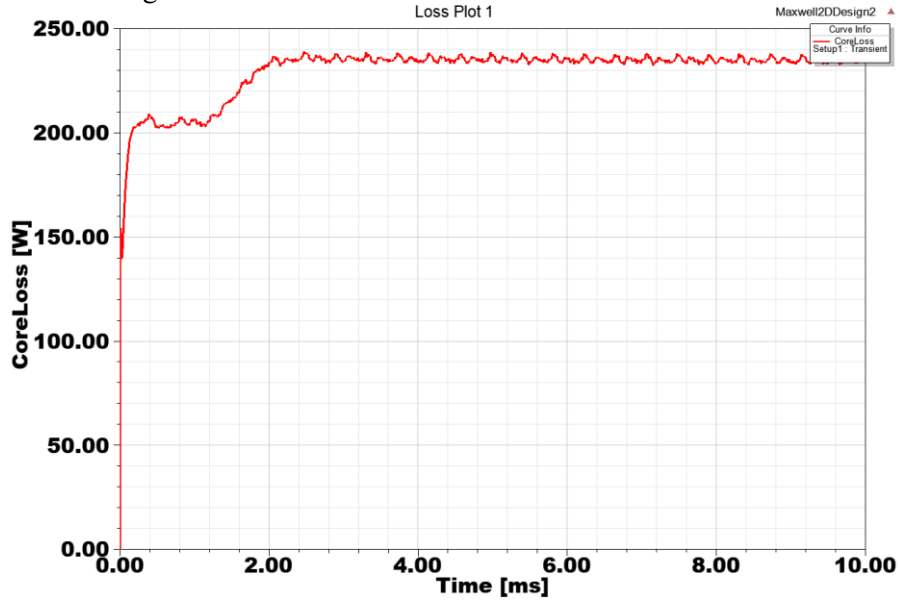
Şekil 10. Eğik stator oluk yapısında generatör faz gerilimleri

Stator oluk yapılarının kayık olduğu durum için harmonik bileşenlerin genlikleri Şekil 11’de görülebileceği gibi önemli miktarda küçülmüş ve standartları sağlamaktadır. Bu durumda gerilim dalga formundaki THD değeri yaklaşık %1 olarak standartları sağlamaktadır.



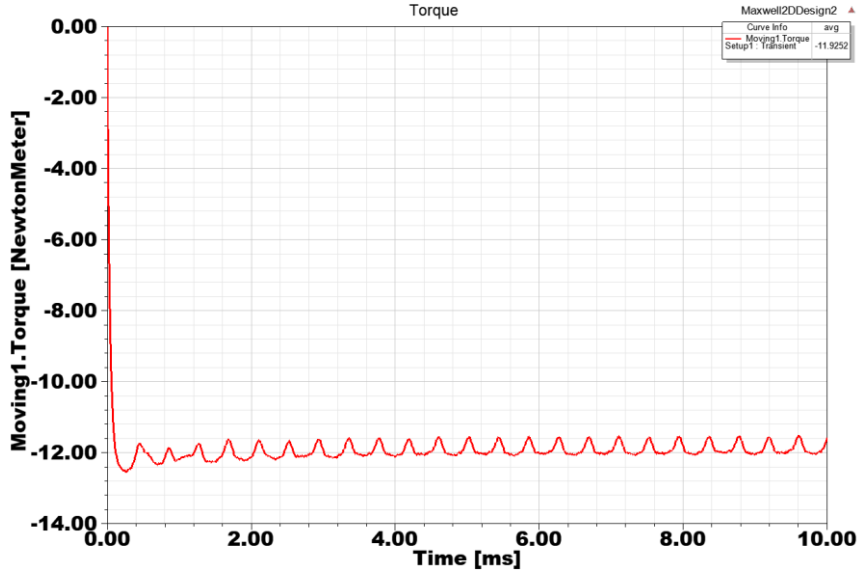
Şekil 11. Eksenden kayık stator oluk yapısında generatör geriliminin harmonik bileşenleri

Bu oluk yapısında azalan harmonik bileşenlerin nüve kayıplarına etkisi Şekil 12’de nüve kaybı grafiğinde verilmiştir. Nüve kayıpları dalga formunda önerilen sistemdeki dalgalanma genliği önemli oranda azalmakta ve kayıp grafiğinde açık olarak görülmektedir. Klasik oluk yapısında kayıp grafiği 245 W değerlerine kadar değerler ulaşmaktadır. Önerilen eksenden kayık stator oluk yapısında ise bu değer 235 W değerine indirgenmiştir. 5 kVA güç değerinde bir generatör için düşünüldüğünde 10 W nüve kaybı önemli bir değer olmaktadır.



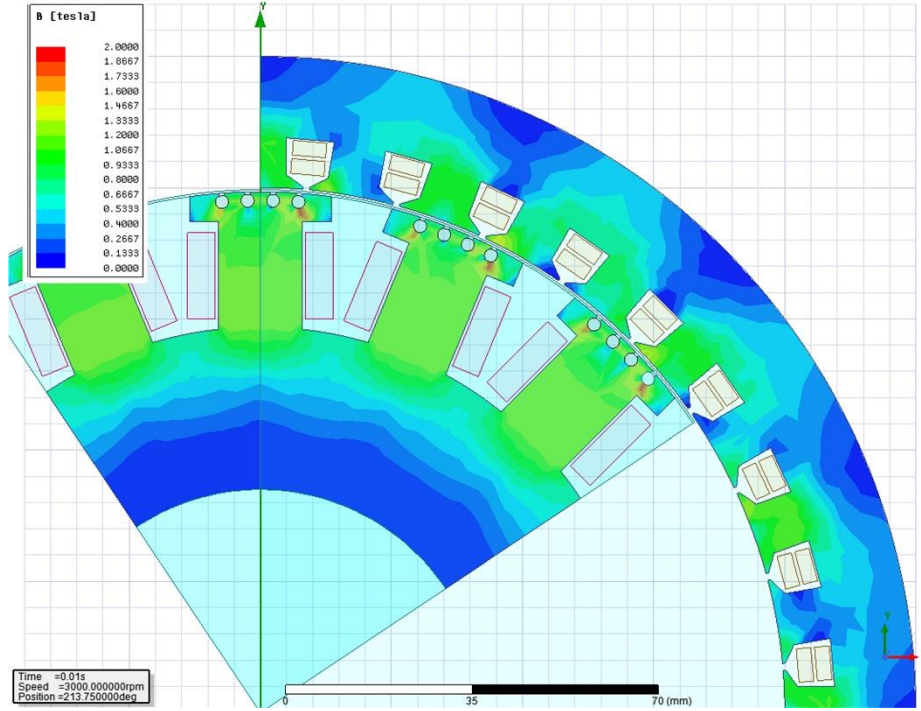
Şekil 12. Eksenden kayık oluk yapısında nüve kayıpları

Eksenden kayık oluk yapısında harmonik etkilerin azalmasıyla generatörün moment eğrisi de daha düzgün hale gelmiştir (Şekil 13). Böylece moment dalgalanması normal oluk yapısına göre yaklaşık üç kat daha küçük genliktir. Bu generatör yataklarının mekanik dayanımı ve ömrü için çok önemlidir, mekanik arızaların oluşma riski azalmaktadır.



Şekil 13. Eksenden kayık oluk yapısında moment eğrisi

Stator ve rotordaki akı dağılımı Şekil 14’te verildiği gibi kullanılan M19_24G nüve materyali için maksimum 2 T akıya göre görüntülenmiştir. Harmonik etkiler azaldığı için normal oluk yapısındaki duruma göre nüve materyalinin doyma sınırları zorlanmamaktadır.



Şekil 14. Eksenden kayık stator oluk yapısında maksimum 2 T için akı dağılımı

4. Sonuç

Bu çalışmada, 5 kVA, 16 kutuplu, 400 Hz frekanslı bir senkron generatorün stator olukları eksene göre kayma olmadan ve bir oluk genişliği kadar kayma olacak şekilde iki farklı tasarımda stator oluk yapısına göre Ansys-Electronics Desktop 2019.R2 (Maxwell/RMxprt) yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi ile modellenmiş ve benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik modelleme ile elde edilen verilere göre farklı oluk tasarımları için üretilen gerilimlerin dalga formları, harmonik spektrum grafikleri, THD değerleri, nüve kayıpları ve moment eğrileri karşılaştırmalı olarak rapor edilmiştir.

Örneğin, stator oluk yapısı eksenden kayık olarak tasarlandığında gerilimlerin dalga formları saf sinüs eğrisine daha yakın olmakta ve THD değeri %15 seviyesinden %1 değerine düşmektedir. Ayrıca, generatörün mekanik moment dalga formu da daha küçük genlikli dalgalanma ile yatak ve rulman gibi mekanik kısımlarının ömrü de artmaktadır. Kayık olmayan normal stator oluk yapısında moment dalgalanması yaklaşık 3,5 Nm iken eksenden bir oluk açısı kadar kayık yapısı ile modellemeye yaklaşık 1,1 Nm değerine kadar düşerek üç kat azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan, stator oluk yapısındaki tasarım farklılığı ile hem elektromanyetik akı dağılımları hem de nüve kayıplarında da belirgin bir iyileştirme sağlanmıştır. Böylece, 400Hz generator için stator oluk yapısında mekanik düzenleme ile filtre gereksinimlerini azaltan bir etki SEA ile analiz ve rapor edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Dorrell D.G., Popescu M. 2011. Effect of Winding Asymmetries and Winding Connection on Small Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47 (6): 2453-2459.
- [2] Liu M., Pei Y., Han Z., Shi P. 2013. Optimization of Permanent Magnet Motor Airgap Flux Density Based on the Non-uniform Air Gap. *International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, pp:3422-3426, 20-22 Dec., Shenyang, China.
- [3] Peşint M.A. 1975. *Senkron Makinalar. Yüksek Teknik Öğrt. Okulu Matbaası*, 50-55s., Ankara.
- [4] 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.
- [5] Uygun D., Çetinceviz Y. 2018. Yüzey Yerleştirmeli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Tutma Torkunun Azaltılması için Stator Yapılandırması. *GU J Sci, Part C.*, 6 (3): 605-620.
- [6] Hargreaves P.A., Mecrow B.C., Hall R. 2010. Open Circuit Voltage Distortion in Salient Pole Synchronous Generators with Damper Windings. *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*, 19-21 April, Brighton, UK.
- [7] Skalka M., Ondrusek C., Kurfurst J., Cipin R. 2012. Harmonic Reduction in Induction Machine Using Slot Wedges Optimization. *IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp: 1252-1255.
- [8] Kometani H., Sakabe S., Kameari A. 2000. 3-D Analysis of Induction Motor with Skewed Slots Using Regular Coupling Mesh. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36 (4): 1769-1773.
- [9] Nau S.L. 1997. The Influence of the Skewed Rotor Slots on the Magnetic Noise of Three Phase Induction Motors. *IEE, EMD97 Conference Publication*, 444: 396-399.
- [10] Williamson S., Flack T.J., Volschenk A.F. 1995. Representation of skew in time-stepped two-dimensional finite-element models of electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31 (5): 1009-1015.
- [11] IEEE-SA Standards Board. 2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 519™-2014.
- [12] Tseng W.T., Chen W.S. 2016. Design Parameters Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Wind Generator. *19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 13-16 Nov., Chiba, Japan.
- [13] Dorrell D.G., Popescu M. 2010. Effect of Winding Asymmetries and Winding Connection on Small Synchronous Machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp:17-22, 12-16 Sept. Atlanta, GA, USA.
- [14] Martin R., Bumbly J.R., Mueller M.A. 2004. Finite Element Analysis and Experimental Test of An Axial Flux Toroidal Generator. *Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004)*, pp: 402-407, 31 March-2 April, Edinburgh, UK.
- [15] Balcı S. 2010. *Evirici Çıkış Transformatörlerinin Modellenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 53s., Ankara.
- [16] Bastos J.P.A., Sadowski N. 2003. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Universidade Federal de Santa Catarina Florianopolis, Brazil, Copyright by Marcel Dekker.*
- [17] Ansoft Corporation. 2005. *Maxwell 3D Field Simulator V11 Student Version User's Guide*, Ansoft Korea.
- [18] Ansys Electronics Desktop. 2019R2. *Rmxprt Help Datasheets*.