

YABANCI UYARTIMLI EKSENEL AKILI SENKRON ALTERNATÖRÜN ELEKTROMANYETİK TASARIMI VE ANALİZİ

Engin HÜNER^{1*} 

¹Kırklareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kırklareli

Öz

Yapılan bu çalışmada yabancı uyartımlı aksenal akılı (YUEA) senkron alternatörün elektromanyetik analizi ve tasarımı ANSYS Maxwell 3d programı ile gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda aksenal akılı sürekli mıknatıslı alternatör tasarımları rüzgar türbinleri için önemli bir adaydır. Bununla birlikte farklı hızlarda hava aralığı manyetik akısının değişmesi gerekmektedir. Mıknatıslar tarafından oluşan sabit manyetik alanı zayıflatma hakkında farklı yöntemler verilmiştir. Bu çalışmada aksenal akılı topoloji kullanılarak yabancı uyartımlı kutup ayakları Maxwell 3d ile modellenmiştir. Tasarlanan kutup ayakları ile geniş aralıkta hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu ayarlamak mümkün olmuştur. Tasarımın ANSYS Maxwell 3d analizleri sonucunda 1500 amper sarım ve kutup genişliği 25mm için ortalama manyetik akı yoğunluğu 0.739 Tesla olarak elde edilmiştir. Tasarım parametreleri için kutup kenar yüksekliği ise 3mm olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelime: Eksenal Akılı Alternatör, Yabancı Uyartım, Elektromanyetik Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ELECTROMAGNETIC DESIGN AND ANALYSIS OF AN EXTERNAL-EXCITED AXIAL FLUX SYNCHRONOUS ALTERNATOR

Abstract

In this study, the electromagnetic analysis and design of the external-excited axial flux (EEAF) synchronous alternator was obtained with ANSYS Maxwell 3d program. In recent years axial flux permanent magnet alternator designs are an important candidate for wind turbines. However, the air gap magnetic flux density are changed at different speeds. Different methods are given for weakening the fixed magnetic flux density provided by magnets. In this study, external-excited pole legs are modeled with Maxwell 3d using axial flux topology. It has been possible to adjust the wide range of air gap magnetic flux density with the designed pole legs.

As a result of ANSYS Maxwell 3d analysis of design, the average magnetic flux density for 1500 amper-turn and pole width 25 mm was obtained as 0.739 Tesla. For design parameters, pole edge height is obtained as 3 mm.

Keywords: Axial Flux Alternator, External-excited, Radial Flux Alternator, Electromagnetic Analysis, Finite Element Method

*Sorumlu Yazar: engin.huner@klu.edu.tr

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi üzerine yapılan çalışmalardan bir kısmı alternatörler üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle sürekli mıknatıslı alternatörler üzerine yapılan çalışmalar radyal akılı ve eksenel akılı olarak ikiye ayrılmaktadır. Sürekli mıknatıslı alternatörlerin en önemli özellikleri uyartım için enerji harcanmadığı için verimlerinin yüksek oluşudur [1-3]. Bununla birlikte vuruğu momenti, alan zayıflatmanın zorluğu ve mıknatısların maliyetleri gibi bazı dezavantajları mevcuttur [4-6]. Vuruğu momenti mıknatıslar ile stator nüvesi arasında hava aralığı relüktansının değişimine bağlı olarak oluşan momentteki dalgalanmalardır. Vuruğu momentini gidermek için stator ve rotor tarafında yapılan çalışmalar mevcuttur. Stator tarafında yapılan çalışmalar maliyet açısından yüksek olduğu için genellikle rotor tarafında yapılan çalışmalar tercih edilmektedir [7-9]. Rotor tarafında vuruğu momentini azaltmak için mıknatıs kaydırma, mıknatıs kaykırı teknikleri, rotorların birbirine göre ötelenmesi, mıknatıs gruplaması ve mıknatıs yerleştirme açısı yöntemleri uygulanmaktadır [10-12]. Eksenel akılı makinelerde vuruğu momentinin yanı sıra en büyük problem devir sayısının artışı için gerilim ve frekans değişiminin dışında manyetik alanı zayıflatma gereksinimidir. Sürekli mıknatıslar kullanıldığında hava aralığındaki manyetik akı değeri değişmez dolayısıyla hava aralığı manyetik akısına bağlı olarak istenilen gerilim değeri geniş bir aralıkta ayarlanamaz. Yapılan çalışmalar incelendiğinde eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerde hava aralığı manyetik akısını değiştirmek için farklı yöntemler sunulmuştur. Bu yöntemlerin bir kısmı sürekli mıknatısları ters manyetik alanlara maruz bıraktığı için mıknatısların manyetik özelliklerini yitirme durumuna karşı pek önerilmemektedir. Bununla birlikte bazı alan zayıflatma teknikleri bileşke manyetik alanların yönünü değiştirmeye dayanmaktadır [13]. Bunun için rotor yüzeyinde mıknatısların kapladığı alan azaltılarak manyetik alanda kolay yön değiştirebilen yumuşak demir bölgeler oluşturulmaktadır [14]. Bu bölgeler ikinci bir sargı ile manyetikleştirilerek toplam manyetik alanın yönü ve değeri değiştirilmektedir. Fakat bu yöntemde toplam mıknatıs hacmi azaldığı için ve ikinci bir enerji harcanması dezavantajlarındandır. Alan zayıflatma için harcanan enerji makinenin verimini de düşürmektedir. Yapılan bu çalışmada son yıllarda tasarlanan eksenel akılı alternatörlerde sürekli mıknatıslarla hava aralığı manyetik akısı oluşturmak yerine alan sargıları tasarlanarak hava aralığı manyetik akısı oluşturulmuştur. Böylelikle çok geniş aralıkta hava aralığı manyetik akısını kontrol etmek mümkündür. Alan sargısını tasarlamak için 3d katı model oluşturulduktan sonra ANSYS Maxwell

3d manyetik analiz programı ile manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler sonucunda ise en uygun kutup ayaklarının genişliği, kutup kenar yüksekliği optimize edilmiş ve farklı amper-sarım değerleri için manyetik nüvenin doyum bölgelerinin manyetik analizleri elde edilmiştir.

2. METARYEL VE METOD

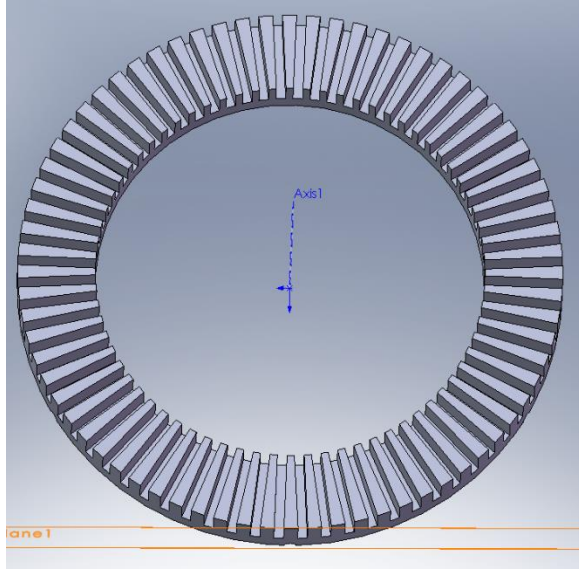
2.1. YUEA Senkron Alternatörün Tasarım Parametreleri

YUEA Senkron alternatörün rotor ve statoru için 3d katı modeli oluşturulmuştur. YUEA senkron alternatörün stator yapısı açık oluklu olarak tasarlanmıştır. Tasarımda faz başına bir oluk düşmektedir. Tasarlanan stator 72 oluklu bir yapıya sahiptir. YUEA senkron alternatörün mekaniksel değerleri Tablo 1’de verilmiştir. YUEA senkron alternatörün rotoru 24 kutuplu bir yapıya sahiptir. Kutup genişliği ve kutup kenar yüksekliği sırasıyla a ve c olarak Tablo 1’de verilmiştir.

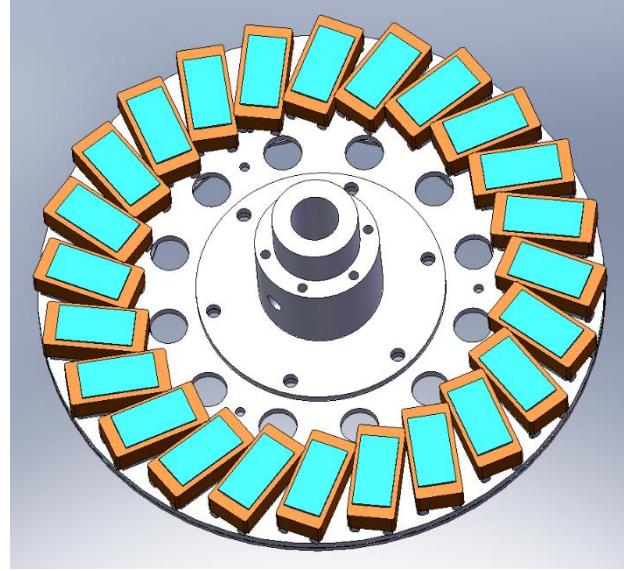
Tablo 1. YUEA Senkron Alternatörün Mekaniksel Parametreleri

Stator Ölçüleri		Rotor Ölçüleri	
Dış çap (mm)	560	Dış çap (mm)	560
İç çap (mm)	400	İç çap (mm)	460
Nüve uzunluk (mm)	50	Kutup sayısı	24
Oluk sayısı	72	Kutup yüksekliği (mm)	30
Oluk derinliği (mm)	35	Kutup genişliği (mm)	a
Oluk genişliği	10	Kutup kenar yüksekliği (mm)	c
İç çap / Dış çap	0.714		

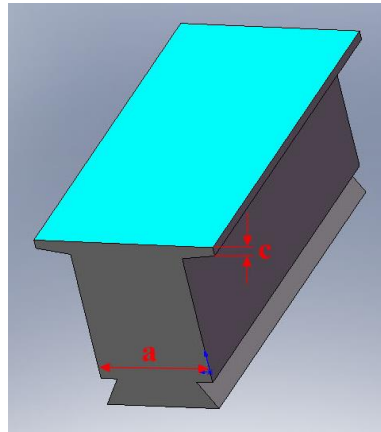
Tablo 1’e göre YUEA senkron alternatörün stator rotor ve bir kutup ayağı Şekil 1’de verilmiştir.



(a)



(b)

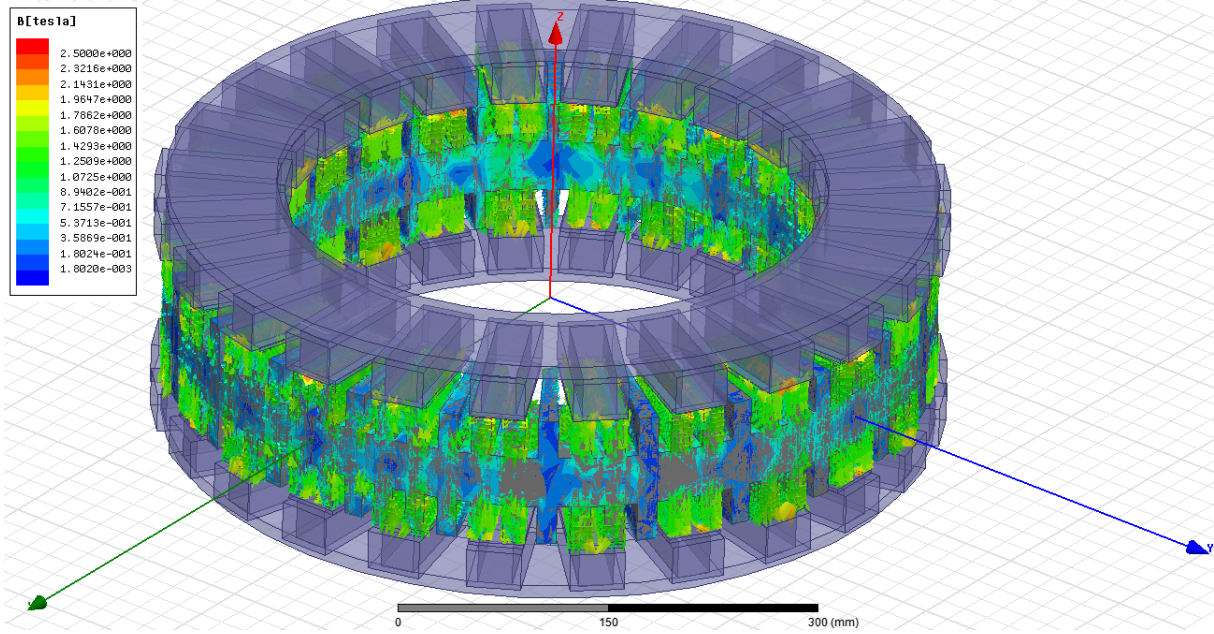


(c)

Şekil 1. YUEA Senkron Alternatör a) Stator b) Rotor c) Kutup ayağı

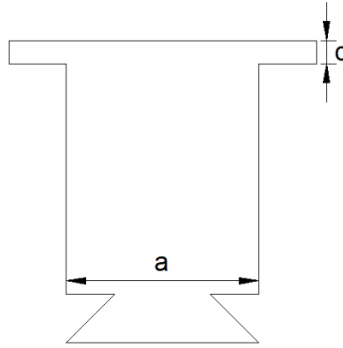
2.2. YUEA Senkron Alternatörün 3d Maxwell ile Manyetik Analizi

YUEA senkron alternatörün manyetik analizleri ANSYS Maxwell 3d programı ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle oluşturulan katı model maxwell programında Tablo 1’de verilen ölçülere göre programın çizim araçları kullanılarak oluşturulmuştur. Maxwell 3d’de oluşturulan model Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de verilen YUEA senkron alternatörün kutup ayaklarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. YUEA Senkron Alternatörün Maxwell 3d modeli

Kutup ayaklarının optimizasyonu için Şekil 3’de gösterilen 3 parametre belirlenmiştir. Bu parametreler kutup genişliği “a”, kutup kenar yüksekliği “c” ve kutup ayağına sarılan sargı miktarını belirleyen amper-sarım miktarıdır.



Şekil 3. YUEA Senkron Alternatörün Kutup Ayak Ölçüleri

3. BULGULAR

YUEA senkron alternatörün elektromanyetik modeli ANSYS Maxwell programı ile 3d boyutlu oluşturularak manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Alternatör yabancı uyarımlı olduğu için

kutup ayaklarının optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Kutup ayaklarının a, c ve amper sarım miktarları değiştirilerek manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir.

YUEA senkron alternatörün 3d manyetik analizleri için öncelikle amper sarım ve kutup kenar yüksekliği “c” sabit olup kutup genişliği “a” değiştirilerek elde edilen değerler Tablo 2’de verilmiştir. Manyetik analiz sonuçları incelendiğinde kutup genişliği “a” parametresinin değişimine bağlı olarak hava aralığı ortalama manyetik akı değeri “ B_{ort} ” yükselmektedir. Bununla birlikte kutup genişliği parametresinin artmasıyla iletken kesit alanı azalacağı için “a” parametresinin her değeri için aynı amper-sarım değerine ulaşmak mümkün olmayacaktır. Bu yüzden hava aralığı ortalama manyetik akı değeri “ B_{ort} ” 0.7 Tesla ve yukarı değerler için a parametresinin 25mm ve 30mm değerleri için manyetik analizlere devam edilmiştir.

Tablo 2. YUEA Senkron Alternatörün Manyetik Analiz Sonuçları

Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	B_{ort} (Tesla)
1500	3	15	0.579
1500	3	20	0.681
1500	3	25	0.739
1500	3	30	0.766
1500	3	35	0.784

YUEA senkron alternatörün kutup genişliği “a” parametresinin 25mm ve 30mm değerleri için değişik amper-sarımlarda elde edilen manyetik analiz sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. YUEA Senkron Alternatörün Amper-Sarım B_{ort} İlişkisi

Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	B_{ort} (Tesla)
1200	3	25	0.638
1300	3	25	0.672
1400	3	25	0.708
1500	3	25	0.739
1600	3	25	0.771
1700	3	25	0.798
1800	3	25	0.820

1200	3	30	0.653
1300	3	30	0.695
1400	3	30	0.739
1500	3	30	0.766
1600	3	30	0.793
1700	3	30	0.818
1800	3	30	0.842

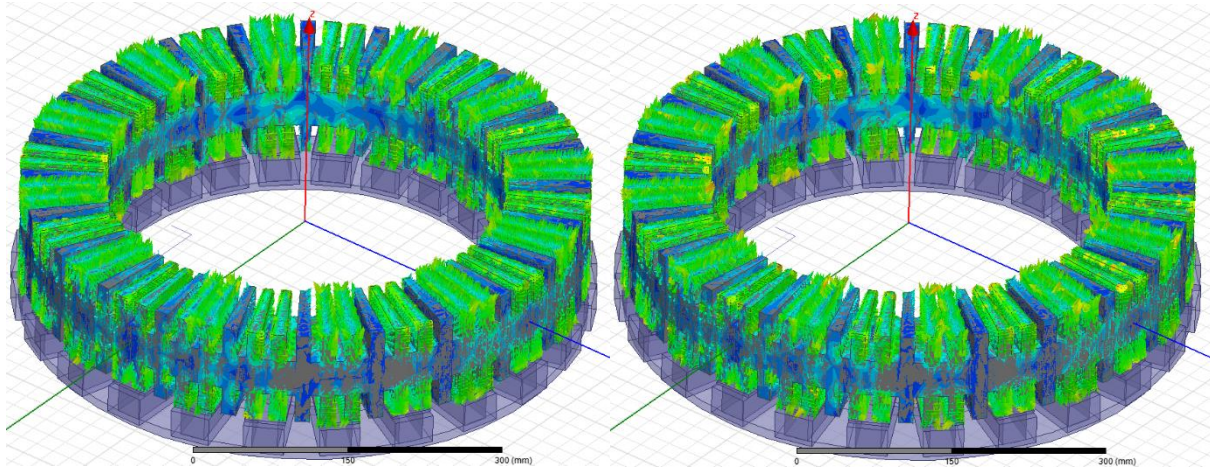
Tablo 3’de elde edilen sonuçlara bakıldığında hava aralığı ortalama manyetik akı değeri B_{ort} için 0.7 Tesla ve yukarı değerlerin en düşük 1400 amper-sarım uyarım değerinde elde edildiği görülmektedir. 1500 amper-sarım uyarım değeri için B_{ort} yaklaşık olarak 0.04 Tesla bir fark vardır. Bununla birlikte ayak genişliği 25mm ve 30mm için uyarım sarımının kesiti hesaplandığında 225mm^2 , 150mm^2 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla 25mm kutup ayağı genişliği için %50 daha fazla sarım gerçekleştirilebilir. Bundan dolayı kutup ayağı genişliği 25mm tasarım parametresi olarak belirlenmiştir.

Kutup kenar yüksekliği “c” parametresi değişimine göre hava aralığındaki B_{ort} değeri analiz edilmiştir. Tablo 4’de görüldüğü gibi c parametresinin artışı ile B_{ort} pozitif yönde artmaktadır. Dolayısıyla kutup kenar yüksekliği parametresi “c” 3mm olarak alınmıştır.

Tablo 4. YUEA Senkron Alternatörün Amper-Sarım Bort ilişkisi

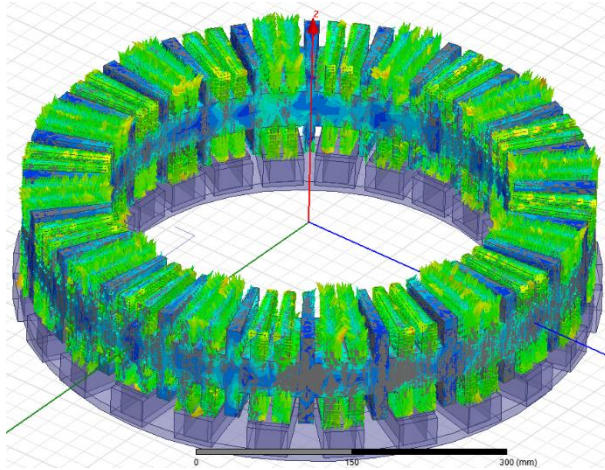
Amper Sarım (A)	c (mm)	a (mm)	B_{ort} (Tesla)
1500	3	25	0.739
1500	2	25	0.720
1500	1	25	0.708

YUEA Senkron alternatörün elde edilen c ve a parametrelerine göre farklı uyarım akımlarındaki analiz sonuçları Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de sırasıyla 1200 amper-sarımdan 1800 amper sarıma kadar olan manyetik analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 4.a-g 1200 amperden 1800 amper uyarım akımına kadar kutup kenarlarında doyumun olmadığı görülmektedir. dolayısıyla geniş bir aralıkta hava aralığı B_{ort} değerini ayarlamak mümkündür.

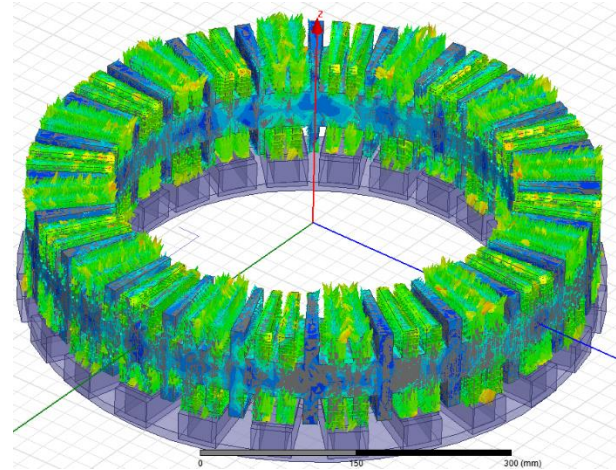


(a)

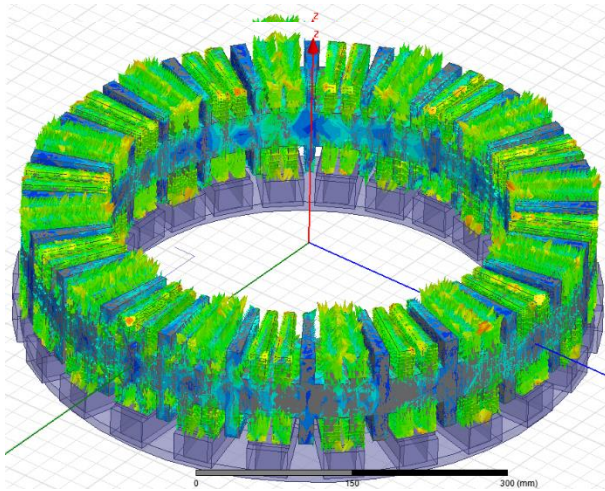
(b)



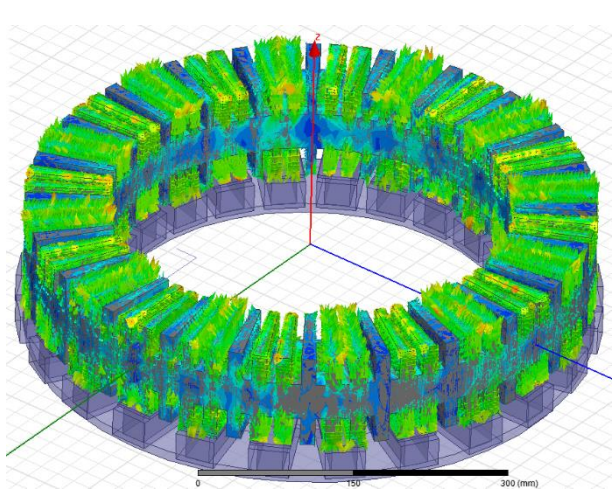
(c)



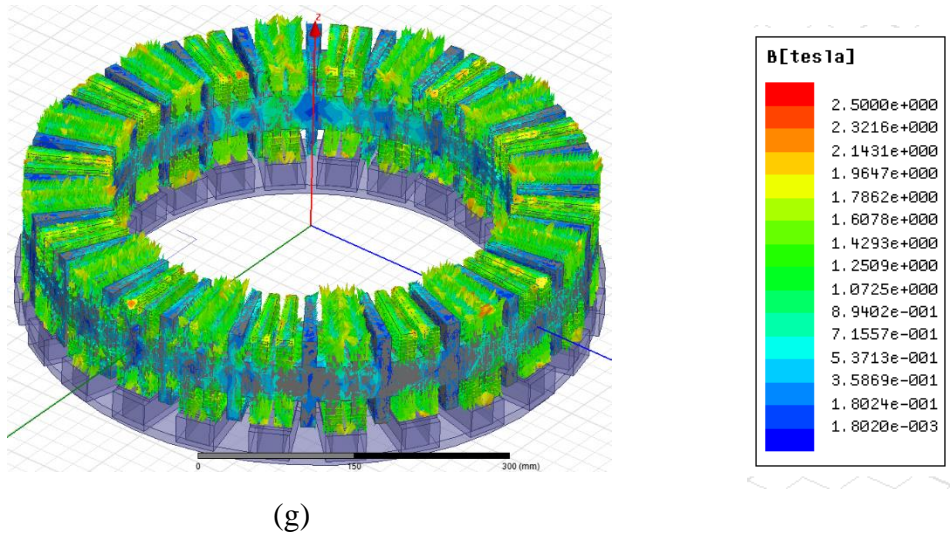
(d)



(e)



(f)



Şekil 4. YUEA Senkron Alternatörün Manyetik Alan Dağılımı a) 1200 Amper b) 1300 Amper c) 1400 Amper d) 1500 Amper e) 1600 Amper f) 1700 Amper g) 1800 Amper

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada YUEA senkron alternatörün ANSYS Maxwell 3d ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Geleneksel tipte sürekli mıknatıslı kutup ayakları yerine bu çalışmada dışarıdan gerilim kaynağı ile uyarılan kutup ayakları önerilmiştir. Böylelikle sürekli mıknatıslar sabit manyetik alanı dışardan uyarımlı kutup ayakları ile çok geniş aralıkta hava aralığı manyetik akı değerinin ayarlanması sağlanmıştır. Bunun için de bu çalışmada kutup ayaklarının genişliği “a” ve kutup kenar yüksekliği “c” parametresi optimize edilmiştir. Sonuç olarak kutup genişliği “a” 25mm seçilerek %50 daha fazla sargı alanı elde edilmiştir. Bununla birlikte c parametresi 3mm seçilerek hava aralığının B_{ort} değeri 0.739 Tesla olarak optimize edilmiştir. Ayrıca optimize edilen a ve c parametreleri için farklı amper-sarım değerlerinde hem kutup hem de statordaki manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Elde edilen manyetik alan sonuçlarından oluk kenarlarında doyumun olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla YUEA senkron alternatörün seçilen a ve c parametreleri ile geniş bir amper-sarım aralığında uyarım sağlanabilmektedir. Bu da bizi sürekli mıknatısların sabit manyetik alanı yerine kolaylıkla kontrol edilebilen bir hava aralığı manyetik akısı sağlamaktadır. Bundan sonraki çalışmalar kutup ayaklarında hem sargı hem de sürekli mıknatıs kullanılarak hibrid yapılı bir uyarım elde edilebilir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 114E431 nolu başlangıç AR-Ge projeleri (3001) kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Minaz, M.R., Çelebi, M., Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators, *Result in Physics*, Vol.7, 183-188, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.10.026>
- [2] Bumby, J.R., Martin, R., Axial-flux permanent magnet air-cooled generator for small scale wind turbines, *IEEE Electric Power Applications*, Vol.152, No.5, 1065-1075, 2005. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050094>
- [3] Wannakarn, P., Tanmaneeprasert, T., Rugthaicharoencheep, N., Nedphograw, S., Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated DC voltage at rated power 1500 W, 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Shandog, China, 2011. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5993994>
- [4] Hwang, C.C., Li, P.L., Chuang, F.C., Liu, C.T., Huang, K.H., Optimization for reduction of torque ripple in an axial flux permanent magnet machine, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.45, No.3, 1760–1763, 2009. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2012811>
- [5] Kasim, M., Fletcher, J., Mechanical field weakening techniques for an axial flux machine, *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*, Indonesia, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICSEEA47812.2019.8938626>
- [6] Kiani, F., Ardebili, M., Optimal design of an axial flux permanent magnet motor with flux control capability for electric vehicles, *International Journal of Mechatronics, Electric and Computer Technology IJMEC*, Vol.10, No.36, 4583–4597, 2020.
- [7] Kumar, P.,; Srivastava, R.K., Cost-Effective stator modification technique for cogging torque reduction in axial flux permanent magnet machines, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific*, 2018.
- [8] Xiao, L., Li, J., Qu, R., Lu, Y., Zhang, R., Li, D., Cogging torque analysis and minimization of axial flux PM machines with combined rectangle-shaped magnet, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.53, No.2, 1018–1027, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2631522>

- [9] Arand, S.J., Ardebili, M., Cogging torque reduction in axial flux permanent magnet wind generators with yokeless and segmented armature by radially segmented and peripherally shifted magnet pieces, *Renewable Energy*, Vol.99, 95–106, 2016. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.054>
- [10] Hsieh, M.F., Dorrell, D.G., Yeh, Y.H., Ekram, S., Cogging torque reduction in axial flux machines for small wind turbines, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 3-5 November, 2009. <https://doi.org/10.1109/IECON.2009.5414896>.
- [11] Huang, M.S., Chen, P.C., Huang, Y.S., Chen, K.C., Reduce the cogging torque of axial flux permanent magnet synchronous motor for light electric vehicle application, *IEEE ICIT*, Taipei, Taiwan 14-17 March, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7474749>.
- [12] Reza, M.M., Ahmad, A., Kumar, P., Srivastava, R.K., Semi-Analytical model for triangular skewed permanent magnet axial flux machine, *IEEE ITEC-India*, 2017. <https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2017.8333843>
- [13] Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A., A New axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control, 37th IAS Annual Meeting, Vol.2, 1250-1257, 2002. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042719>.
- [14] Tapia, J.A., Gonzalez, R., Wallace, R., Valenzuela, A., Axial flux surface mounted PM machine with field weakening capability, *Recent Developments of Electrical Drives*, 321-334, 2006. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4535-6_27