



Makale / Research Paper

Eksenel akılı motorlarda oluk açıklıklarındaki hatanın moment üzerine etkisi

Emrah ÇETİN^{*1}, Ferhat DALDABAN²

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039
Kayseri/TÜRKİYE

¹emrahcetin@erciyes.edu.tr, ²daldaban@erciyes.edu.tr

Received/Geliş: 03.05.2017

Revised/Düzeltilme: 11.09.2017

Accepted/Kabul: 18.09.2017

Özet: Eksenel akılı motorlar, geleneksel motorlara göre birçok avantaja sahiptir. Avantajları olmasına rağmen, eksenel akılı motorlar yaygın olarak kullanılmamaktadır. Eksenel akılı motorların radyal akılı motorlara göre daha az kullanılmasının en önemli nedeni üretim zorluklarıdır. Bu makalede, daha önce literatürde az sayıda çalışmaya konu olan seri üretim süreci ve seri üretimi yapılan eksenel akılı oluklu motorun stator geometri bozukluğu ile bunun neden olduğu moment ve vuru moment etkisi incelenmiştir. Matlab programı yardımıyla gerçekleştirilen çözümler gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eksenel akılı motorlar, seri üretim makinesi algoritması, eksenel akılı stator, oluk açıklıkları, vuru moment.

Effects of errors in slot openings of axial flux permanent magnet motors on torque and solution proposal

Abstract: Axial flux motors have many advantages in comparison with conventional motors. Although it has advantages, axial flux motors are not using commonly. The most important reason not to use axial flux motors as much as radial flux motors, is fabrication difficulties. In this paper, the mass production process that has been discussed in a few papers and the mass produced slotted axial flux permanent magnet motor's stator geometry errors with the investigation of electromagnetic torque and cogging torque effects. They are mentioned by showing the solutions executed with Matlab software.

Keywords: Axial flux motors, mass production device algorithm, axial flux stator, slot openings, cogging torque

1. Giriş

Elektrik makinelerinde tasarım sürecini başlatmak için, öncelikle onun fiziksel olarak yapılabilirliği, daha sonra da fizibilitesi dikkate alınmalıdır. Aksi halde teorik olarak mükemmel bir elektrik makinesi tasarlamak yeterli değildir. Bu nedenle, seri üretim çok iyi planlanmalı ve bu süreç daha tasarımın ilk aşamalarından itibaren dikkate alınmalıdır. Söz konusu seri üretim oluklu eksenel akılı makinelerin seri üretimi ise üretim zorluklarının mutlaka hesaba katılması gerekmektedir. Eksenel akılı makinelerin birçok avantajı olmasına rağmen, bazı dezavantajlarından dolayı da bu tür elektrik makineleri yaygın bir şekilde üretilememektedir.

Bu makaleye atıf yapmak için

Cetin, E., Daldaban F., "Eksenel akılı motorlarda oluk açıklıklarındaki hatanın moment üzerine etkisi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2017, 4(3); 374-381.

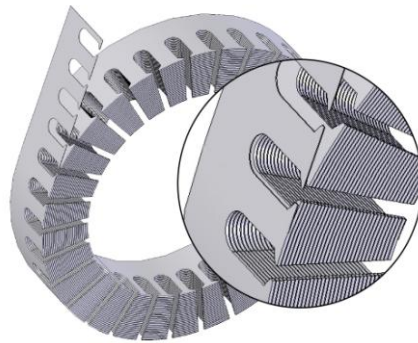
How to cite this article

Cetin, E., Daldaban F., "Effects of errors in slot openings of axial flux permanent magnet motors on torque and solution proposal" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2017, 4(3); 374-381.

Eksenel akılı makineleri geleneksel makinelerle karşılaştırıldığında avantajları; daha geniş yarıçap/uzunluk oranı, düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığı, daha yüksek güç yoğunluğu, daha küçük hacim ve ağırlık, yüksek frekans ve düşük hızlara uygunluk şeklinde sıralanabilir. Gelişime açık yanları ise; stator üretiminin zorluğu, stator ve rotor arasındaki güçlü eksenel manyetik çekim kuvveti, makinenin montajı ve hava aralığını sabit tutmadaki zorluklar ve üretim sürecinin daha uzun sürmesi olarak özetlenebilir.

Oluklu eksenel akılı makinelerin stator yapısı, stator çeliğinin tek parça olmasından dolayı oldukça problemleri bir geometri şekline sahiptir [1-3]. Şekil 1’ de eksenel akılı motorun katmanlı stator yapısı gösterilmektedir [4]. Bu zorlu geometrinin bir sonucu olarak, seri üretiminde de bazı hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hatalar nedeniyle de elektrik makinelerinde istenilmeyen, performansını düşüren ve gürültüye sebep olan vuru momentleri oluşabilmektedir [5]. Bahsedilen vuru momentleri, stator dişleri ile mıknatısların etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar bunu engellemek için oluksuz stator yapıları geliştirmişlerdir [6]. Ayrıca Park, J.C. ve arkadaşları oluksuz eksenel akılı makinelerin sabit moment isteyen uygulamalarda daha uygun olduğunu göstermişlerdir [7]. Örneğin bir rüzgar türbini uygulaması için geliştirilen eksenel akılı makine, oluksuz ve parçalı stator yapısında tasarlanılarak rüzgar türbinin daha düşük rüzgar hızlarında dönebilmesi sağlanmıştır [8]. Bir diğer rüzgar türbini uygulamasında da dişsiz stator yapısı kullanılarak eddy kayıpları azaltılmıştır [9]. Hem stator geometrisini basitleştirmek hem de vuru momentinden kurtulmak için geliştirilen yapıların yanı sıra oluk açıklığı sorununu çözmek için de literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Ancak vuru momentini azaltma çalışmalarının çoğu, üzerinde çalışılması ve montajı daha kolay olduğu için rotor yapısı üzerinde olmuştur [10]. Khatab, M. F. ve arkadaşları stator oluk geometrisi üzerinde optimizasyon çalışması yaparak moment dalgalanması üzerinde önemli bir düşüş sağlamışlardır [11]. Bunlara ek olarak yine eksenel akılı makinelerde farklı rotor-stator eşleştirmeleri de araştırılmıştır. Buna göre çift rotorlu veya çift statorlu yapıların daha yüksek moment yoğunluğuna sahip olduğu ancak tek rotor tek statorlu yapıların ise daha geniş bir kullanım alanına sahip olduğu gösterilmiştir [12]. Bu makalede de tek stator tek rotor yapısındaki eksenel akılı motor üzerinde çalışılmıştır. Stator yapısı üzerinde yapılan değişiklikler hem zor hem de zaman alıcı bir süreç olduğu için araştırmacılar tarafından genellikle tercih edilmemiştir. Aynı zamanda eksenel akılı makinelerde stator üretiminin zaman alıcı olması araştırmacıları da geleneksel makinelere yönlendirmiştir.

Bu makalede eksenel akılı makinenin seri üretimde stator yapısındaki zorluklardan, bu zorluklar neticesinde oluşan bozuk geometri hatasından ve bu hatanın neden olduğu tork dalgalanmalarından bahsedilmiştir. Ayrıca bu hatanın giderilmesi için bir çözüm önerisi sunulmuştur. Ayrıca vuru momentleri etkisi yapan ve seri üretimde çelik sacın baskı kalıbı ile delinmesinden meydana gelen bozuk geometri stator oluk açıklıkları hatası da incelenmiş ve moment ile vuru momentleri üzerindeki etkileri sunulmuştur. Bu çalışmada temel ilgilenilen yapı, eksenel akılı makinenin statorunda bulunan dişler ve bu dişler arası mesafe olan oluk açıklıkları üzerinde durulmuştur.



Şekil 1. Eksenel akılı motorların rulo sac şeklindeki stator katmanlı yapısı [4]

2. Stator Yapısı

Üzerinde çalışılan ve prototipi yapılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız DC motor 24 oluk ve diş sayısına sahiptir. Bu motora ait stator yapısının Maxwell programı kullanılarak yapılan tasarımı Şekil 2a ve Şekil 2b’ de gösterilmiştir. Burada çizimi yapılan motorun ideal durumda oluk açıklıklarının, dişlerin ve oluk aralıklarının tamamen pürüzsüz olduğu görülmektedir. Şekil 2b’ de görüldüğü gibi eksenel yapı gereği dişlerin geometrisi radyal olarak değişirken, oluk açıklıklarının geometrisi sabittir. Bu geometrik düzenin temel nedeni de yine vuru momentini etkisinin azaltılmasıdır. [6,10]

Tablo 1. Çalışılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motora ait stator parametreleri [1]

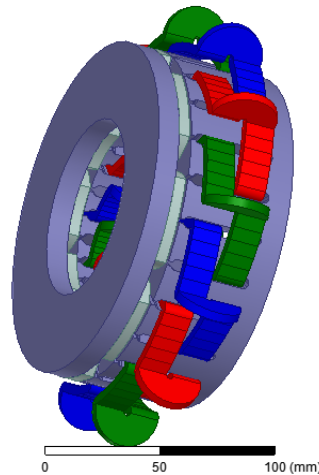
Parametre	Değer
İç Yarıçap (R_i)	40 mm
Dış Yarıçap (R_o)	75 mm
Dönüş hızı	2200 d/d
Anma Akımı	175 A
Oluk Sayısı (S_n)	24
Oluk Uzunluğu (S_l)	35 mm
Oluk Açıklığı (S_o)	2 mm
Kutup sayısı	8
Hava aralığı	1 mm

Elektrik makineleri tasarımında her bir geometrik yapının motor performansı üzerine etkileri vardır. Bu nedenle her bir parametre belirlenirken etkileşimde bulunacağı diğer parametreler dikkate alınmaktadır. Tablo 1’ de çalışılan motorun statoruna ait parametreler verilmiştir. Şekil 2a’daki çalışılan motora ait elektromanyetik tork denklemi aşağıdaki gibidir.

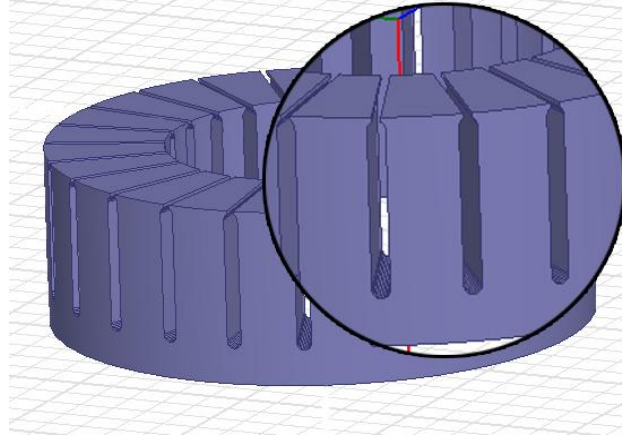
$$T_{em} = 2\pi r_i J_{in} B_g r dr \quad (1)$$

$$T_{em} = \pi J_{in} B_g (r_o)^3 \alpha (1 - \alpha^2) \quad (2)$$

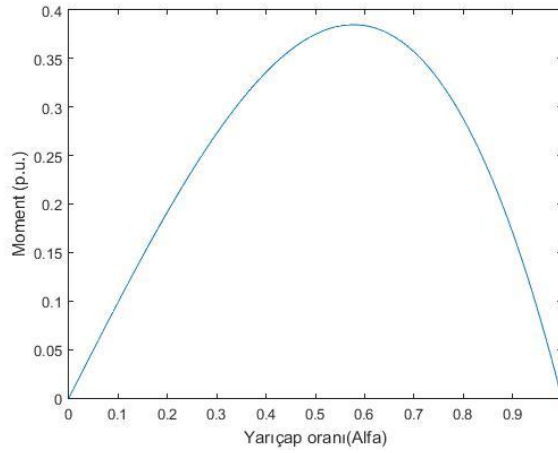
Denklem (1) ve (2)’den de görüldüğü üzere yarıçap büyüklüklerinin doğrudan moment üzerinde etkisi vardır. Dış yarıçapı birim olarak 1 kabul ederek, ve iç yarıçapın da ondan küçük olduğu dikkate alınarak yapılan çözümde, yarıçap oranı α ’nın elektromanyetik moment birimsel değeri karşısındaki değerler grafiği aşağıdaki gibi oluşmaktadır. Oluşabilecek maksimum moment değerine karşılık gelen yarıçap oranı birim başına $\alpha=0.58$ ’dir.



Şekil 2a. Çalışılan eksenel akılı makine topolojisi



Şekil 2b. Çalışılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorun statorunun 3B tasarımı



Şekil 3. Momente karşılık yarıçap oranı

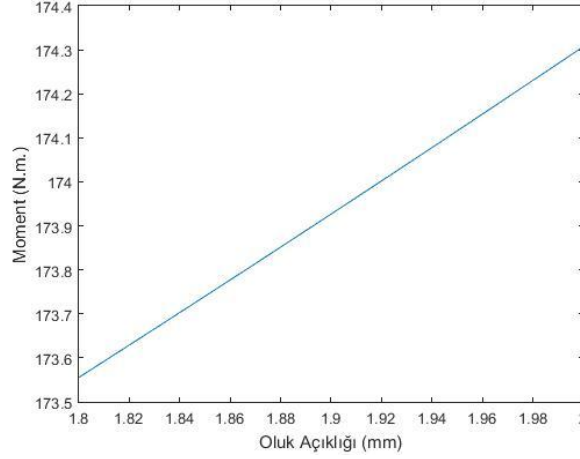
3. Vuruntu Momenti

Vuruntu momenti, motor performansını doğrudan ve istenilmeyen bir şekilde etkilediği için sürekli mıknatıslı motor tasarımında en çok dikkat edilen hususlardandır. Bunun bir sonucu olarak vuruntu momenti azaltma yöntemleri sürekli mıknatıslı motor tasarımında önemli bir yer tutmaktadır.

Vuruntu momenti, rotor mıknatısları ile oluklar ve stator kutuplarının etkileşimi sonucu oluşmaktadır ve hareket yönüne zıt yönde bir zorluk meydana getirmektedir. Özellikle ilk hareket sırasında daha çok önem arz etmektedir. Geometrik yapıdaki en ufak değişiklikler manyetik akı yollarını etkilediği için vuruntu momenti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Eksenel akılı motorlarda vuruntu momenti denklem (3)'teki gibi fourier serisi kullanılarak tanımlanmaktadır [13].

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN_c \theta_m + \varphi_k) \quad (3)$$

Literatürde bu moment dalgasını azaltmak için bir çok çalışma yapılmıştır. Bir çoğu rotor geometrisi üzerinde olan bu çalışmalar; mıknatıs şekli, mıknatıs açıları, kutup sayısı, stator oluk sayısı, rotor kutup kayması ve benzeri şekillerdedir. Ancak bu çalışmalar daha çok prototip düzeyinde gerçekleştirilmektedir. Seri üretim hatasına yönelik çalışma çok sınırlı sayıdadır [14,15].



Şekil 4. Momente karşılık oluk açıklığı uzunluğu (Torque versus slot opening width).

Oluk açıklıkları ile moment arasındaki ilişki şekil 4' te gösterilmektedir. (2) numaralı denklemin analitik olarak çözümlenmesiyle elde edilen bu grafikte üretim hatasının %10' luk bir uzunluk diliminde sınırlı olduğu varsayılması nedeniyle oluk açıklığı uzunluğu 1.8-2 mm aralığında alınmıştır. Şekil 4'te de görüldüğü üzere oluk açıklığındaki değişim yaklaşık 0.7 N.m. büyüklüğünde bir moment değişimine denk gelmektedir.

4. Seri Üretim Hatası

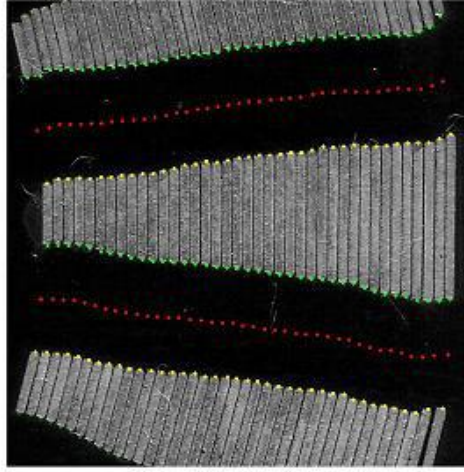
Eksenel akılı motorlarda seri üretim oldukça zor işlemlerden oluşmaktadır. Bu zorlukların başında da stator yapısı gelmektedir. Eksenel akılı motor stator yapısı tek parça rulo çelik sacdan meydana geldiği için üzerinde işlem yapılması güçleşmektedir. Oysa radyal akılı motorlarda stator birçok parça çelik sac katmanlarından oluşmaktadır. Eksenel akılı motorlardaki statorun bu zorlu yapısı üreticileri seri üretim için baskı kalıp yöntemiyle rulo sacı tek hat üzerinde kesen otomatik bir makine ile yapmaya itmiştir. Ancak bu üretim sisteminde de otomatik makinelerle yapıldığı için milimetrik hassasiyette bazı hataların olması kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 5'te seri üretilen eksenel akılı bir makineye ait stator oluk açıklıkları görülmektedir. Oluk açıklıklarında bulunan hatalar açıkça görülmektedir. Şekil 6'da ise T.Brown ve arkadaşlarının görüntü işleme yöntemiyle elde ettikleri stator dişlerinin resmi görülmektedir [5]. Bu resimde de görüldüğü gibi, üretim sırasında önceden açılan olukların daha sonra rulo şeklinde sarılması nedeniyle dişlerde kayıklıklar meydana gelmektedir. Bu nedenle de tam düzgün bir oluk açıklığı elde edilememektedir.



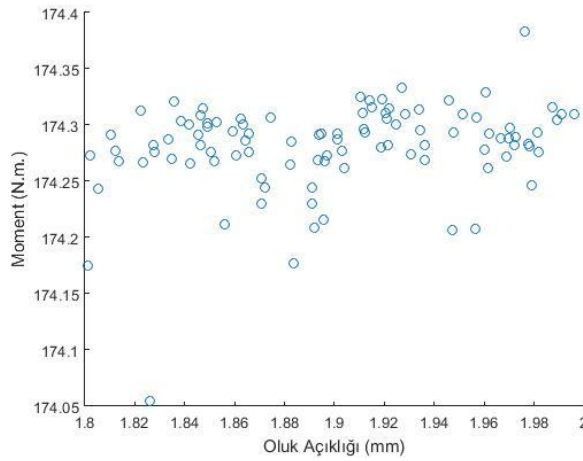
Şekil 5. Seri üretilmiş eksenel akılı bir makinenin stator oluk açıklıkları [16]

Oluk açıklığının düzgünlüğünün de moment ve vuru momentini üzerindeki etkisi şekil 7 ve şekil 8' de gösterilmektedir. Bu nedenle stator dişlerindeki bu bozukluğun ihmal edilmemesi gerekmektedir.

Oluk açıklıklarındaki bu dengesiz uzunluk değişimi Matlab ile modellenmiş ve oluşturulan aksel akıllı motor modeline entegre edilmiştir. Seri üretimde oluşan hataların herhangi bir standardı olmadığı için bu hataların modellenmesi için bazı kriterler belirlenmiştir ve buna göre bir senaryo ortaya konulmuştur. Bu senaryoya göre hataların oluk açıklığı boyutunun %10'unu geçmemesi ve bu sınır dahilinde rasgele seçilen oluk açıklığı uzunluklarından oluşması hedeflenmiştir. Bu şekilde yapılan model ile çözüm yapılmıştır. Oluşan modelde şekil 8a' daki gibi oluk açıklığı uzunluğu elde edilmiştir. Sonuçta hatalı oluk açıklıkları mevcutken ortalama moment şekil 7'deki gibi dalgalanmaktadır.

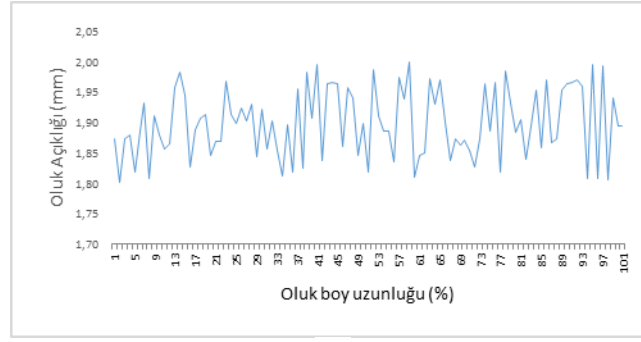


Şekil 6. T.Brown ve arkadaşlarının görüntü işleme yöntemiyle elde ettikleri stator dişleri ve oluk açıklıkları [5]



Şekil 7. Ortalama momente karşılık hatalı oluk açıklığı uzunluğu

Şekil 5 ve 6' da görüldüğü gibi oluk açıklığı uzunlukları değişkendir. Yapılan çalışmada Şekil 8a' da herhangi bir oluk açıklığının modellenmesi görülmektedir. 1.8 ve 2 mm aralığında raslantısal olarak değişen uzunluklar seri üretim hatasını modellemektedir. Bu model Şekil 8b' deki vuruğu momenti hesabında belirtilen her bir vuruğu momenti noktası için ortalama oluk açıklığı uzunluğu hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere vuruğu momenti, oluk açıklığındaki hatalardan ve uzunluk değişiminden etkilenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 8. (a) Oluk açıklığı değişimi (b) Vuruntu momentine karşılık ortalama oluk açıklığı uzunluğu

5. Sonuçlar

Bu çalışmada eksenel akılı motorların seri üretimi sırasında statordaki oluk açıklıklarında oluşan bozuk geometri hatasının vuruntu momentini ve ortalama moment üzerinde etkileri incelenmiş ve bu hatayı gidermeye yönelik bir öneri sunulmuş ve bu öneri doğrultusunda bir prototip makine üretilmiştir. Yapılan çalışmaya göre ortalama çıkış momenti 175 N.m. olan bir eksenel akılı motor için şekil 7’de görüldüğü gibi yaklaşık 0.3 N.m. değerinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Burada vuruntu momentinin tepeden tepeye 4 N.m. olduğu düşünülürse, her ne kadar ufak bir etki gözlemlense de, hassas uygulamalar için dikkate alınması gereken bir değer olduğu görülmektedir.

Kısaltma ve Simgeler

J_{in}	: akım yoğunluğu
r_i	: iç yarıçap
r_o	: dış yarıçap
B_g	: hava aralığındaki akı yoğunluğunu
α	: r_i/r_o ile hesaplanan yarıçap oranı
θ_m	: rotor pozisyonu,
T_k	: genlik
φ_k	: k . harmoniğin faz açısı,
N_c	: kutup başına oluk sayısı

Kaynaklar

- [1] Daldaban F. and Çetin E., Prototyping of axial flux permanent magnet motors, 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ISITES, pp.A13, Valencia, SPAIN, 2015
- [2] Koechli C. and Perriard Y., Analytical model for slotless permanent magnet axial flux motors, IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC), pp. 788-792, May 2013.
- [3] Zou J., Hu J., Liang W., Quantitatively evaluation on the cogging torque of permanent magnet motor caused by stator and rotor defect, in The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS, Vol. 1, pp. 682-685, 2003.
- [4] Kinnunen J., Direct-on-line axial flux permanent magnet synchronous generator static and dynamic performance, Phd. Thesis, Laapenta Lappeenranta University of Technology, 2007.
- [5] Brown, T., Heins G., Hobbs S., Thiele M., Davey J., Cogging torque prediction for mass-produced axial flux PMSM stators, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE International, pp. 206 – 211, 2011.
- [6] Gieras J. F., Kamper M. J., and Wang R.J., Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. Springer, Dordrecht, NL: Kluwer, 2005.
- [7] Park J. C., Choi H.R., Choe G.H., A study on AFFPM (Axial flux permanent magnet) motor without stator core, 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.1-6, 2006.
- [8] Arand S. J.; Ardebili M., Multi-objective design and prototyping of a low cogging torque axial-flux PM generator with segmented stator for small-scale direct-drive wind turbines, IET Electric Power Applications, Volume: 10, Issue: 9 pp. 889 – 899, 2016
- [9] Arkadan A. A., Hijazi T. M., Masri B., Design Evaluation of Conventional and Toothless Stator Wind Power Axial-Flux PM Generator, IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 53, Issue: 6, Article Sequence Number: 8104404, 2017
- [10] Aydin M., Zhu Z. Q., Lipo T. A., Howe D., Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines: design concepts, IEEE Transactions on magnetics, (Vol. 43, no. 9), pp.3614 - 3622, September 2007.
- [11] M. F. Khatab; A. L. Shurajji; Z. Q. Zhu, Parametric design optimization of axial field partitioned stator switched flux PM machine., International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART), pp. 1-6, 2015
- [12] Husain T., Tekgun B., Sozer Y., Hamdan M., Comparison of axial flux machine performance with different rotor and stator configurations, IEEE Int. Elect. Mac. and Dri. Conf., pp. 1 – 8, 2017
- [13] Zhu Z. Q. and Howe D., Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 15, no. 4, pp. 407–412, Dec. 2000.
- [14] Islam M., Mir S., and Sebastian T., Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent magnet brushless dc motor, IEEE Trans. on Ind. App. Vol. 40, Iss. 3, pp. 813 – 820, 2004
- [15] Gasparin L., Cernigoj A., Markic S. and Fiser R., Additional cogging torque components in permanent-magnet motors due to manufacturing imperfections, IEEE Trans. Magnetics, vol. 45, no. 3 pp.1210 -1213, 2009.
- [16] Cetin E., Daldaban F., Reducing Stator slot opening geometry fault in mass production of axial flux PM motors, ENTECH 2016, İstanbul, TÜRKIYE, pp.36-41, 15-16 Aralık 2016.