

Design of a Novel Three-Phase Transverse Flux Disc Generator and Optimization of Cogging Torque

 Burak CAN^{1*}  Emin YILDIRIZ² 
¹ Duzce University Faculty of Eng., Department of Electrical Electronics Engineering, 81620, Konuralp/DUZCE

² Duzce University Faculty of Eng., Department of Electrical Electronics Engineering, 81620, Konuralp/DUZCE

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 08/08/2019
 Revision 10/10/2019
 Accepted: 21/10/2019

Highlights

- Wind generator
- Transverse flux machine.
- High torque density

Keywords

Transverse Flux
 Disc Generator
 Finite Element Method
 Cogging Torque

In direct driven wind turbines, multi-pole generators with high torque density are preferred. The new generation transverse flux machine (TFM) topologies have attracted the attention of designers with these features in recent years. In this study, a new disc type TFM has been proposed for use in low power direct drive wind turbines.

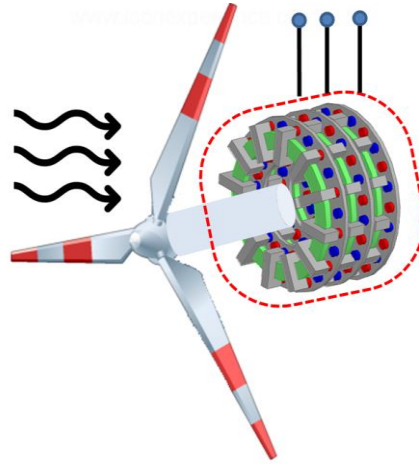


Figure A. Use of 3-phase disc type TFM in a direct drive wind turbine

Purpose: In this study, electromagnetic analysis and performance of a new 3-phase TFM have been investigated. Firstly, the effect of inner diameter on the open-circuit voltage has been investigated. In the second stage; the cogging torque, which is the biggest disadvantage of TFMs, has examined.

Theory and Methods: In the first step, the structure and operation of the proposed new disc type TFM is explained. Standard U-core and circular magnet sizes are used for low-cost TFM design. The effect of the inner rotor diameter, which is one of the preliminary design parameters, on the voltage quality induced in the phase windings was investigated by the finite element method (FEM). Considering the production cost, the magnet skew method has been preferred to reduce cogging torque and the optimum skew angle has determined with FEM. Since the proposed new TFM machine has 3D magnetic fluxes and the leakage magnetic fluxes are also taken into account, FEM analyses require a very high mesh sensitivity. In order to increase the precision, analyses were performed on the symmetrical 1/6 part of the machine.

Results: The open-circuit phase winding voltage is similar to the sinusoidal form as the rotor inner diameter increases in the proposed new disc type generator. However, increasing the inner rotor diameter also increases the cogging torque. The diameter is chosen as 55 mm, considering both design parameters and constraints. The effect of the magnet skew on the cogging torque has examined parametrically at 0.5 degree intervals and the lowest cogging torque has observed as 0.38 Nm when the magnet pair was skewed 0.5 degree.

Conclusions: It is seen that the generator phase winding voltage of the proposed machine is in sinusoidal form and has a very low cogging torque compared to its similars in the literature. The novel disc-type TFM is suitable for use in direct-drive wind turbines.



Yeni bir 3 Fazlı Disk Tipi Enine Akılı Generatörün Tasarımı ve Vuruntu Momentinin Optimizasyonu

Burak CAN^{1,*}, Emin YILDIRIZ²

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Konuralp/DÜZCE

Öz

Düşük güçlü doğrudan tahrikli rüzgar türbinlerinde genelde sürekli mıknatıslı senkron makineler tercih edilmektedir. Bu sürekli mıknatıslı makinelerde; geleneksel makine topolojilerinin dışında (eksenel ve radyal akılı), özel makine modelleri de literatürde önerilmiştir. Bunlardan biri de enine akılı makinedir. Yapısal özelliğinden dolayı enine akılı makinelerde, elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye doğrudan birbiri ile ilişkili değildir. Bu topolojide, kutup sayısı ve manyetik yüklemeye kolaylıkla artırılabilir. Bu nedenle robot kolları, elektrikli araçlar ve rüzgâr türbinleri gibi yüksek moment- düşük hız uygulamalarında öne çıkmaktadırlar. Bu çalışmada, yeni bir üç fazlı enine akılı disk generatör modeli tanımlanmıştır. Modelin çalışma prensibi ve elektriksel devre modeli açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, önerilen generatör modelinin rotor iç çapına göre zıt-emk değişimi elde edilmiştir. Bir diğer tasarım parametresi olarak vuruntu momenti de incelenmiştir. Enine akılı makinelerin genel sakıncalarından olan yüksek vuruntu momenti, mıknatıs kaybı yöntemi kullanılarak 6 Nm'den 0,38 Nm'ye düşürülmüştür.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/08/2019
Düzeltilme: 10/10/2019
Kabul: 21/10/2019

Anahtar Kelimeler

Enine Akılı
Disk Generatör
Sonlu Elemanlar Yöntemi
Vuruntu Momenti

Keywords

Transverse Flux
Disc Generator
Finite Element Method
Cogging Torque

Design of a Novel Three-Phase Transverse Flux Disc Generator and Optimization of Cogging Torque

Abstract

Permanent magnet synchronous machines are more preferred in low-power direct-driven wind turbines. In addition to conventional machine topologies with axial and radial flux, special machine models have also been proposed in the literature such as transverse flux machine (TFM). In TFM's, due to their structural properties, electrical loading and magnetic loading are not directly related. The number of poles and magnetic loads can be easily increased. For this reason, TFM's stand out in high torque-low speed applications such as robot arms, electric vehicles, and wind turbines. In this study, a new three-phase transverse flux disc generator model is introduced. The operation principle and the electrical circuit model are explained. The back-emf waveform is obtained according to the rotor inner diameter of the proposed generator model using the Finite Element Method. The cogging torque is also studied as another design parameter. The high cogging torque, which is one of the general drawbacks of TFM's, has been reduced from 6 Nm to 0.38 Nm by using magnet skew method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel elektrik makinelerinde indüklenen güç ve moment, elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye bağlıdır. Diğer bir ifadeyle, Herhangi bir elektrik makinesinin moment yoğunluğunu arttırmak için, ya manyetik akı yoğunluğu ya da endüvi sargı akımı arttırılmalıdır. Manyetik akı yoğunluğunu etkileyen stator diş genişlikleri ile elektriksel yüklemeye etkileyen endüvi oluk genişliği aynı makine yüzeyini kullanırlar. Bu nedenle makine çapı sabitse, diş genişliği arttıkça oluk genişliği azalmaktadır. Aynı şekilde elektriksel yüklemeye arttırmak için oluk genişliği arttırılırsa, bu kez diş genişliği azalacağından manyetik akı yoğunluğu azalır. Sonuç olarak; geleneksel makinelerde, makine çapı sabitken bir parametreyi sabit tutup diğer parametreyi arttırmak çok zordur. Moment yoğunluğunu arttırmak için, malzeme özellikleri iyileştirilebilir, ancak bu durum da makine üretim maliyeti artar. Enine akılı makineler (EAM), bu noktada çok önemli bir topoloji olarak ortaya çıkmaktadır. EAM'lerde; elektriksel yüklemeye ve manyetik yüklemeye makinenin aynı yüzeyini kullanmaz, bu nedenle elektriksel ve manyetik yüklemeler doğrudan birbirine

bağlı değildir ve tasarımda serbestçe seçilebilirler. Bu da EAM'lerin farklı tasarımlara izin vermesi anlamına gelir. Örneğin; elektriksel yüklemeye sabitken, kutup sayısı kolayca arttırılarak moment yoğunluğu arttırılabilir. Bu özelliği ile EAM; elektrikli araçlar ve rüzgâr türbinleri gibi, düşük hız- yüksek moment uygulamalarında önemli bir tercih olarak günümüzde tasarımcıların dikkatini çekmektedir. Literatürde karşılaşılan ilk enine akılı makine de rüzgâr türbinlerinde kullanım için önerilmiştir [1].

EAM'ler, radyal ve aksenal akılı makineler gibi sabit mıknatıslar ile uyartılır. Literatürde hibrit uyartımlı EAM de önerilmiştir [2]. Düşük akım yoğunluklu bir çalışmada; radyal, aksenal ve enine akılı makine küçük elektriksel yüklerde sabit hız için karşılaştırılmıştır [3]. Buna göre; EAM'in güç faktörü, diğer makine topolojilerine göre düşüktür ve iyileştirilmelidir. Ancak, verim ve moment yoğunluğu açısından dikkat çekici bir performans gösterir. EAM'lerde güç faktörü 0.35-0.55 arasındadır [4]. Ancak farklı tasarımlar ve optimizasyon uygulamaları ile daha yüksek güç faktörleri elde edilebilir [5]. Bunun için moment yoğunluğundan ödün vermek gerekebilir [6]. EAM'lerin güç katsayısı, son yıllarda geleneksel makineler ile rekabet edilebilir seviyeye yükselmiştir [7], [8]. Disk tipi EAM'ler ise, hem yüksek güç faktörleri ile hem de basit yapıları ile tasarımcıların ilgisini çekmiştir [9-13]. Bu nedenle disk tipi enine akılı makineler, yeni topolojilerin geliştirilmesine imkân vermesi ile gelişime açık bir topoloji türüdür.

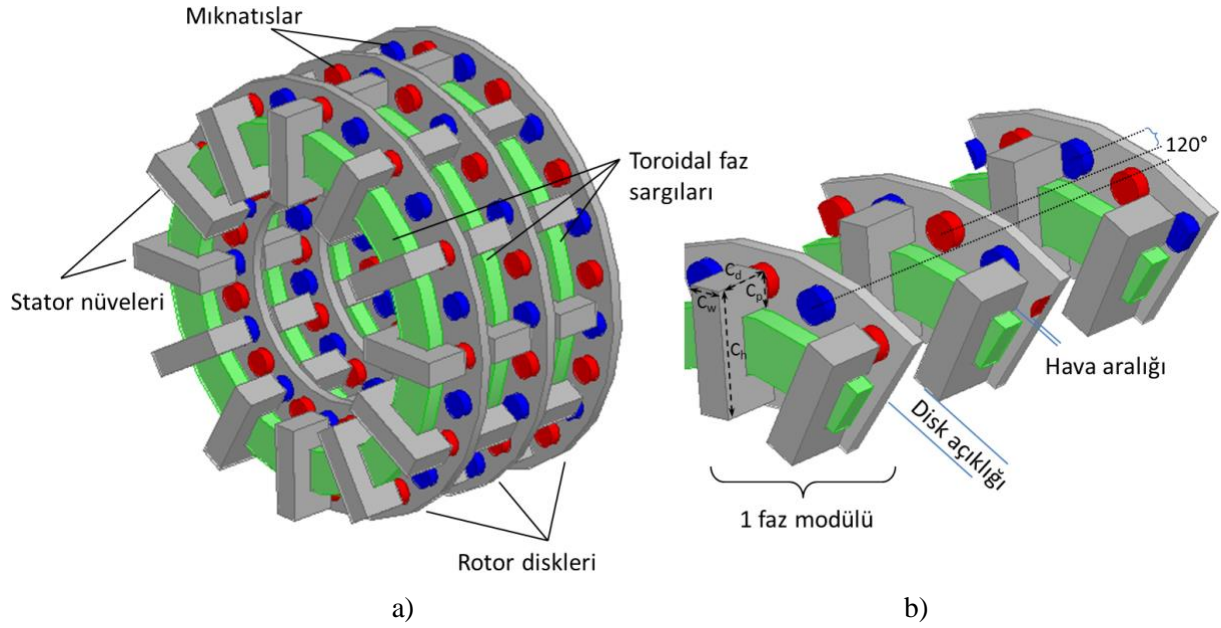
EAM'lerde vuru momentleri oldukça yüksektir, bu nedenle tasarımda vuru momentinin optimizasyonu önemli bir yer tutar. Mıknatıs ve stator dişleri arasındaki etkileşimden dolayı oluşan vuru momentleri, makine milinde moment dalgalanmalarına neden olur. Vuru momentleri, mil hızının bir fonksiyonudur [14]. Özellikle düşük hız uygulamalarında vuru momentinin etkisi incelenmelidir. Enine akılı disk tipi makinelerde vuru momentini azaltmak için; 120° elektriksel açı ile ardı ardına yerleştirilmiş, 3 tane tek fazlı disk yapıdan oluşan 3 fazlı modeller geliştirilmiştir [10, 13, 15]. Bunun yanında vuru momentini azaltmak için; stator nüvelerinde kaykırı [16] yapılacağı gibi, mıknatıslarda da kaykırı yapılabilir. Diğer makine topolojilerinde vuru momentini azaltma yöntemi olarak önerilen, asimetric mıknatıs ve kutup kullanımı da denenebilir. Ancak bu durumda üretim zorlaşır ve maliyet artar. Sürekli mıknatıslı makinelerde vuru momentini azaltmanın bir başka yöntemi de, stator dişlerinde yardımcı oluklar açmaktır [17]. Bu çalışmada, disk tipi bir 3 fazlı enine akılı makinede vuru momentini azaltmak için mıknatıs kaykırı yöntemi dikkate alınmıştır. Manyetik akı yolları 3 boyutlu olduğundan, tüm analizler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Mesh hassasiyetini arttırmak için, modelin simetrik 1/6'lık parçasında analizler yapılmıştır.

Bu çalışmanın 2. bölümünde, önerilen makinenin çalışma prensibi ve genel yapısı açıklanmıştır. Durağan durumda, disk tipi EAM'nin manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve açık devre faz gerilimleri 3. bölümde incelenmiştir. Rotor iç çapının zıt-emk'ya etkisi ortaya konulmuştur. Sürekli mıknatıslı makine tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli konulardan olan vuru momentleri ise, 4.bölümde detaylı olarak analiz edilmiştir. Vuru momentinin optimizasyonu için, mıknatıs kaykırı yöntemi kullanılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Önerilen disk tipi EAM'nin rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi düşük hız - yüksek moment uygulamalarında uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

2. ENİNE AKILI DİSK MAKİNESİNİN YAPISI VE ÇALIŞMASI (STRUCTURE AND PRINCIPLE OF THE DISC TYPE TFM)

Önerilen 3 fazlı disk tip EAM, 120° elektriksel açı farklı olarak bir mil üzerine dizilmiş, 3 tane 1 fazlı modülden oluşur. Şekil 1'de, tüm makinenin 3D modeli ve kesit görünümü verilmiştir. 1 faza ait disk modüller arasında manyetik bir bağlantı yoktur. Bu nedenle, Şekil 1b'de gösterilen disk açıklığının elektriksel ve manyetik bir etkisi olmaz. 1 faza ait stator ve rotor arasındaki hava aralığı ise, her bir modülde 1 mm olarak alınmıştır. Her bir faz modülünde stator, 12 tane lamineli C nüveden (M36_26G) ve bu nüvelerin iç boşluğuna sarılmış bir adet toroidal faz sargısından oluşur. Üç faza ait toroidal faz sargıları, kendi aralarında yıldız bağlanmıştır. Her bir rotor da ise, çelik rotor diski üzerine yüzey yerleştirmeli olarak 24 kutup çifti için NdFeB30 sürekli mıknatıslar kullanılmıştır. Makinenin anma hızı 500 d/dk olduğundan yüzey yerleştirilmeli mıknatıslar açısından savrulma riski yoktur. Mıknatıslar ile beraber rotor diski, ferromanyetik olmayan bir rotor gövdesine gömülür. Statoru oluşturan C nüveler ve toroidal sargı da yine mekanik koruma amaçlı ferromanyetik olmayan bir malzeme ile kaplanır. (Şekil 1'de sadelik için dolgu malzeme gösterilmemiştir). C nüveler, ark şeklinde seçilmemiştir. Çünkü [18]'e göre, ark şeklindeki

nüvelerde güç faktörü daha düşüktür. Makine ön tasarımında kullanılan temel boyutlar Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. 3 fazlı disk tipi EAM'nin a) 3 boyutlu görünümü ve b) kesit görüntüsü

Tablo 1. Ön tasarım nüve, mıknatıs ve sargı boyutları

C Nüve boyutları		Mıknatıs boyutları		Faz sargı boyutları	
C_d (mm)	22	Çap (mm)	12	Tur sayısı	60
C_h (mm)	41	Yükseklik (mm)	5	Dış çap (mm)	99
C_w (mm)	12				

Rotor diskinin konumuna bağlı olarak, faz sargısını halkalayan manyetik akılar Şekil 2’de görülmektedir. Böylece rotor konumuna bağlı olarak, sinüs dalga şeklinde değişen bir akı bağı elde edilir. Makinenin basit manyetik eşdeğer devresi incelenirse; bir faz sargısında indüklenen gerilim kolayca elde edilebilir. Buna göre indüklenen gerilimin genel ifadesi ve etkin değeri sırasıyla eşitlik 1 ve 2’deki gibi yazılır. Burada φ_1 , bir faza ait bir kutup altındaki manyetik akının 1. harmoniğidir ve eşitlik 3’den hesaplanır. Buna göre bir faz sargısında indüklenen gerilim ifadesi, eşitlik 4’deki gibi olur. Burada τ ; ortalama kutup adımı, C_p ; stator kutup ayağının radyal uzunluğu, B_{g1} ; hava aralığı akı yoğunluğunun birinci harmoniği, K_a ; alan katsayısı [8] ve n ; d/dk cinsinden dönüş hızıdır.

$$e(t) = N_p \frac{d\varphi}{dt} = w_e N_p \varphi_{max} \cos(wt) \quad 1$$

$$E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} w_e N_p \varphi_1 \quad 2$$

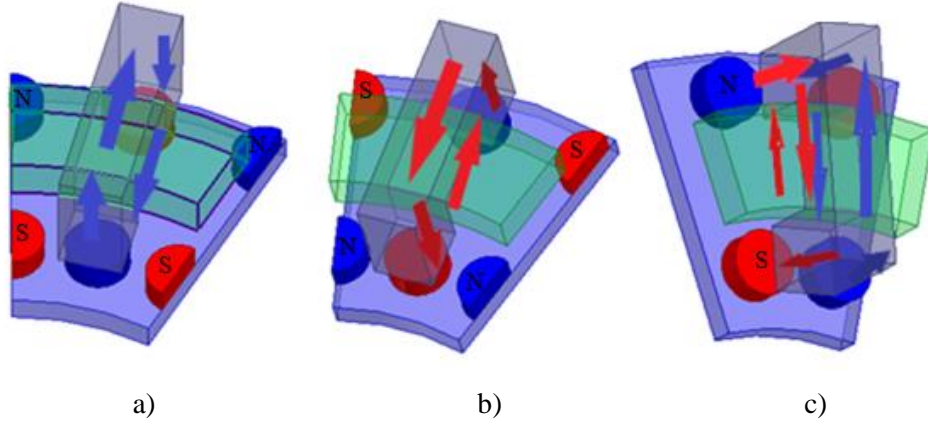
$$\varphi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_p B_{g1} K_a \quad 3$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{60} p^2 N \tau C_p B_{g1} K_a n \quad 4$$

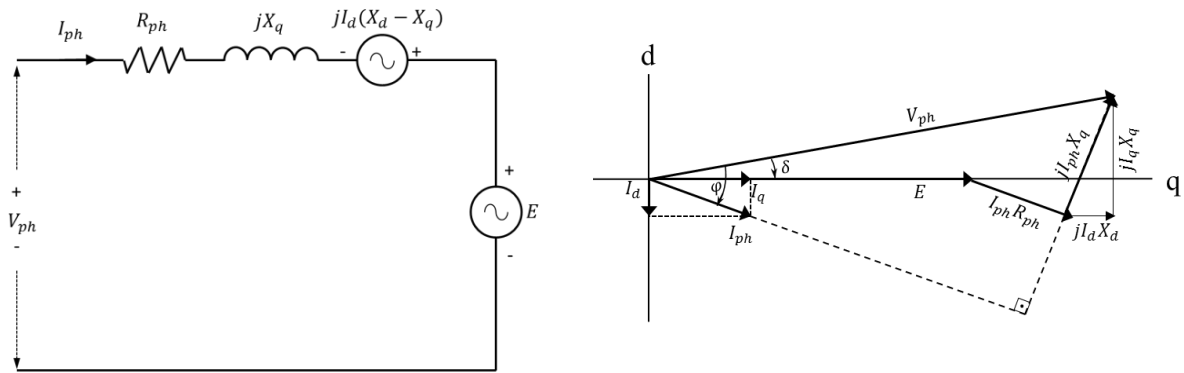
EAM’nin elektriksel eşdeğer devresi ve fazör diyagramı Şekil 3’te görülmektedir. Buna göre, genel güç eşitliği eşitlik 5’teki gibi bulunur [19]. Burada $E I_q$ ifadesi, elektromekanik gücü temsil eder. Buna göre moment eşitlik 6’daki gibi yazılır.

$$P_{input} = EI_q + I_d I_q (X_d - X_q) + R_{ph} I_{ph}^2 \quad 5$$

$$T = \frac{EI_q}{n2\pi/60} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} p^2 N \tau l_p B_{g1} K_a I_q \quad 6$$



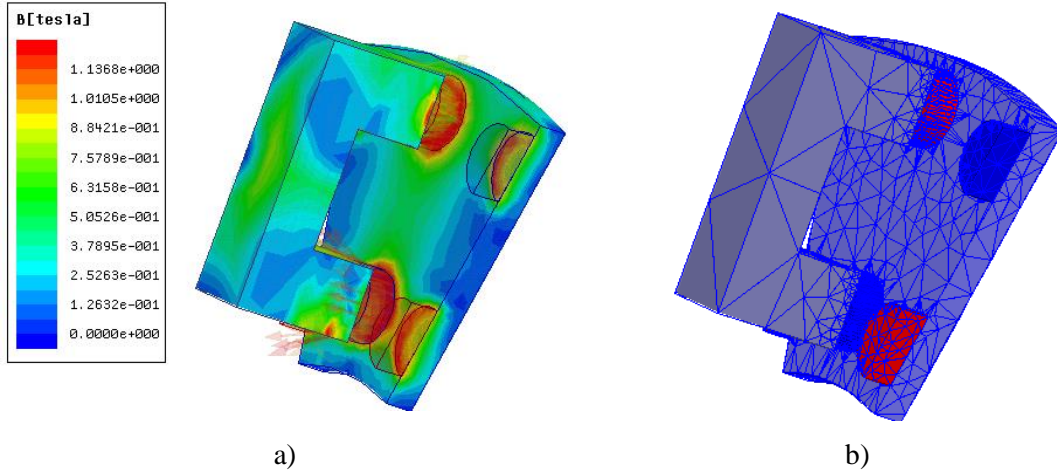
Şekil 2. Rotor konumuna göre mıknatıs akuların değişimi



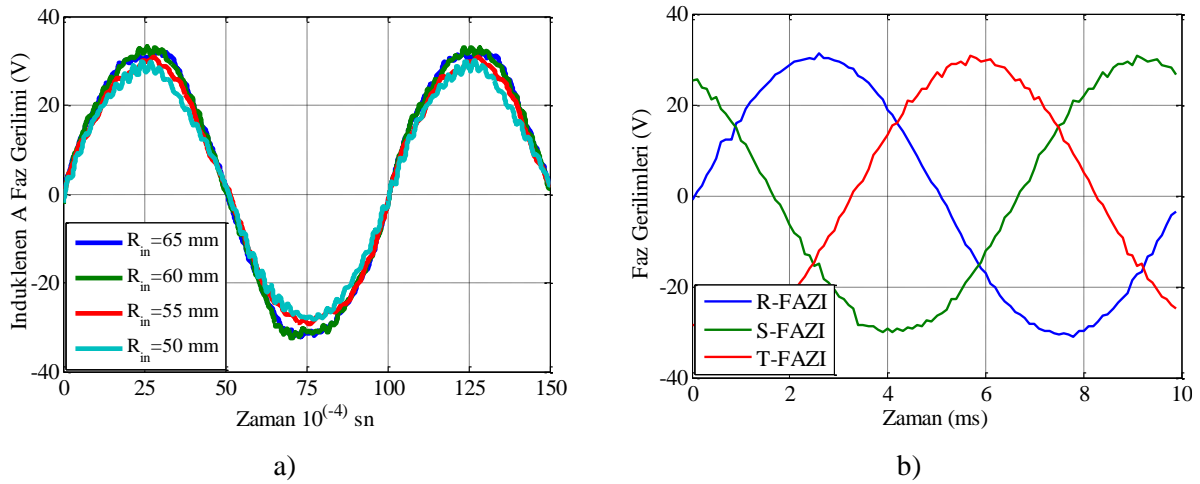
Şekil 3. EAM'nin eşdeğer devre modeli ve fazör diyagramı

3. ÖNERİLEN DİSK TİPİ EAM'NİN AÇIK DEVRE ELEKTROMANYETİK ANALİZİ (OPEN CIRCUIT ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF THE PROPOSED DISC TYPE TFM)

C nüveler rotordaki mıknatıslar ile aynı hizaya geldiğinde, hava aralığından kapanan mıknatıs akıları enine bir yol izeler. Ancak, nüveler kutuplardan uzaklaştıkça komşu iki mıknatıs arasında aksel kaçak akılar dolaşır. Bu nedenle önerilen disk tipi EAM'nin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılırken 3D model dikkate alınmalıdır. Şekil 4'te, oluşturulan 1/6 simetrik modeldeki mesh dağılımları ve akı yoğunluğu görülmektedir. Rotor iç çapı arttıkça, yanındaki mıknatıstan kısa devre olan mıknatıs akı miktarı azalmaktadır. Şekil 5'te farklı iç yarıçaplar için faz başına indüklenen zıt-emk gerilim değerleri verilmiştir. Rotor çapı ile indüklenen gerilim artmaktadır, ancak 60 mm'den sonra ciddi bir değişim görülmemiştir. Her faza ait rotor diski 120° elektriksel açı kaydırılarak sıralandığından, dengeli 3 faz gerilimler indüklenmektedir (Şekil 5b).



Şekil 4. Enine akılı disk makinenin tek faz 1/6 simetrisinde a) manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve b) mesh ağı



Şekil 5. a) İç yarıçapa göre bir zıt-emk gerilim dalga şekilleri, b) 55 mm iç yarıçapta 3 faz gerilimleri

Rotor iç çapına göre; indüklenen gerilimlerin harmonik incelemesi için, toplam harmonik bozulmalarına (THD) bakılmıştır. Böylece zıt emk'ların 1. harmonikten ne kadar uzaklaştığı görülebilir. Bunun için eşitlik 7'deki denklem kullanılır. Buna göre rotor iç çapına göre THD değerleri Tablo 2'deki gibidir. IEEE 519-2014' e göre, 1.0 kV'dan düşük gerilimlerde harmonik bozulum THD(%) = 8.0'in altında olmalıdır.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

7

Tablo 2. İç yarıçapa göre 1 faz zıt emk THD'leri

İç Yarıçap (mm)	1. Harmonik (Volt)	%THD
50	28.58	2.96
55	30.22	4.15
60	33.1	3.62
65	33.1	2.81

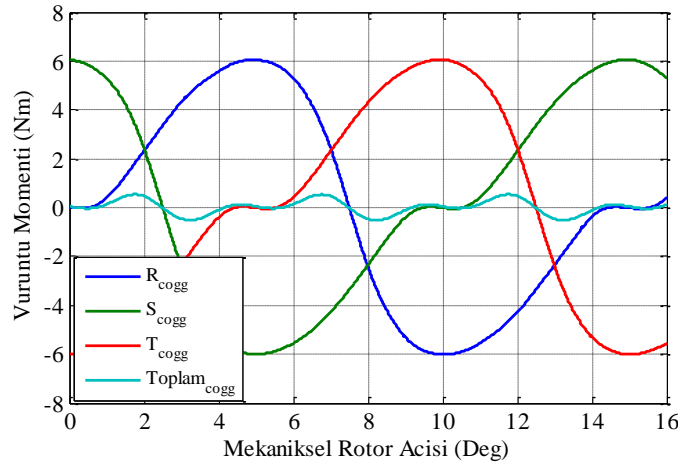
4. ENİNE AKILI MAKİNEDE VURUNTU MOMENTİ (COGGING TORQUE OF THE TFM)

Vuruntu momenti, sürekli mıknatıslı makinelerde rotor üzerindeki sabit mıknatıslar ile stator dişleri arasındaki etkileşimden kaynaklanan bir kuvvettir. Sürekli mıknatıslı bir makinenin vuruntu momenti eşitlik 8'deki gibi hesaplanır. Burada p kutup çifti sayısıdır. Stator ve rotor çekirdeğinin sonsuz geçirgenlikte olduğunu kabul edersek, toplam enerji W eşitlik 9'daki gibi yazılabilir.

$$T_{cog} = -p \frac{dW}{d\theta} \quad 8$$

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_{V_{air}} B_{air}^2 dV + \frac{1}{2\mu_{pm}} \int_{V_{pm}} B_{pm}^2 dV \quad 9$$

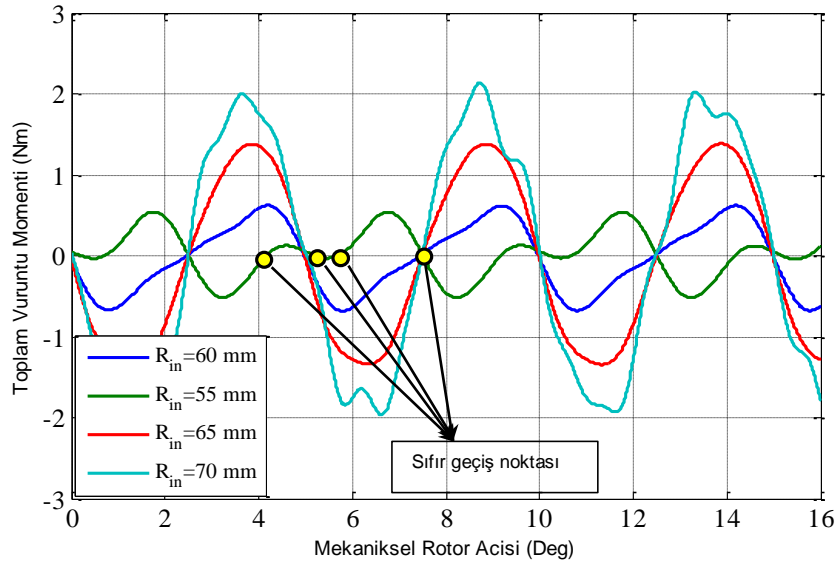
EAM'lerin en büyük dezavantajlarından biri vuruntu momentinin yüksek olmasıdır. EAM'lerde vuruntu momentini azaltmak için 3 fazlı disk modeli uygulanmaktadır [20]. Böylece tek faz başına yüksek olan vuruntu momenti toplamda azaltılır. Şekil 6'da rotor içyarıçapı 55 mm olan disk EAM modelinde, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen faz başına ve toplam vuruntu momentleri görülmektedir. Faz başına 6 Nm tepe değerli vuruntu momentleri gözlenirken, 3 faza geçildiğinde toplam vuruntu momentini 0,5 Nm'lere düşmektedir.



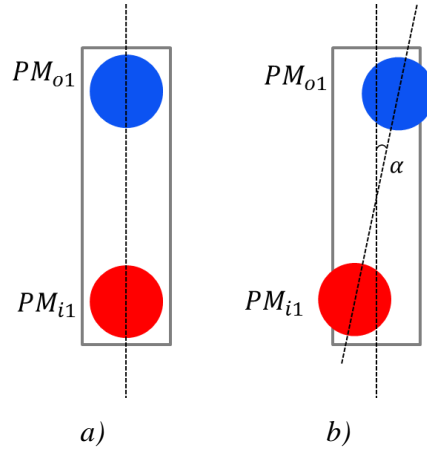
Şekil 6. 55 mm rotor iç çaplı disk tipi EAM'de faz başına ve toplam vuruntu momentinin rotor açısı ile değişimi

Bu çalışmada, rotor iç çapının vuruntu momentine etkisi de incelenmiştir. Rotor iç çapının artması, faz sargılarında indüklenen gerilimin dalga formunu sinüse yaklaştırmaktadır, ancak rotor iç çapını arttırmak vuruntu momentini de arttırmaktadır (Şekil 7). En düşük vuruntu momentini 55 mm rotor yarıçapında görülmüştür. Bu ölçülerde; rotor açısına göre bir periyot boyunca vuruntu momentini, sıfır geçiş noktasından daha çok geçmektedir. Dolayısıyla toplam vuruntu momentini etkisinin azaldığı söylenebilir.

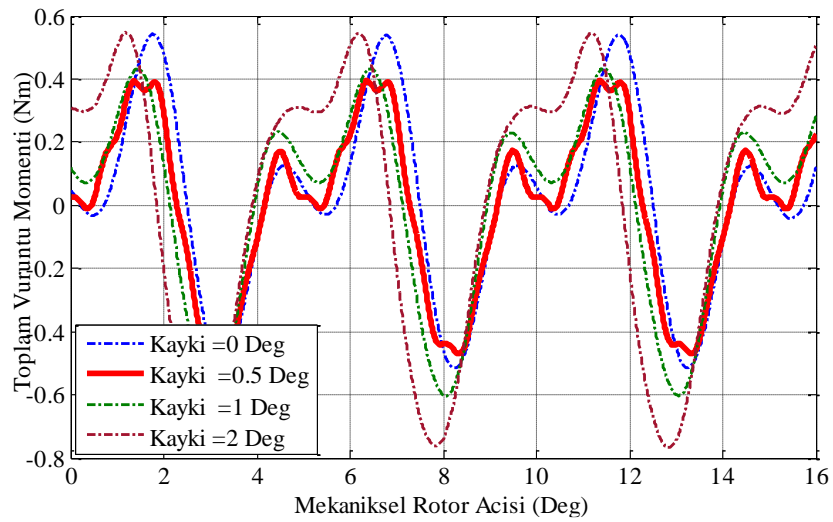
Enine akıllı makinelerde vuruntu momentini azaltmak için, nüvelere küçük oluklar açmak [21], mıknatıs veya kutup uçlarının eğimli olması [22], stator ve rotor disklerinde kaykır yapılması [23, 24], stator ve rotorda simetrik olmayan kutupların kullanılması gibi yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada üretim kolaylığı da dikkate alınarak, Şekil 8'de görüldüğü gibi, mıknatıs kaykırısının etkisi incelenmiştir. Farklı α açıları için; rotor konumuna göre toplam vuruntu momentinin dalga şekilleri, Şekil 9'da görülmektedir. Mıknatıs kaykırısı $0,5^\circ$ olduğunda vuruntu momentini azalırken, α büyüdükçe vuruntu momentini tekrar artış göstermektedir. Buna göre; en düşük vuruntu momentini $\alpha = 0,5^\circ$ 'de görülmüştür.



Şekil 7. Toplam vuru mu momentinin rotor iç çapı ile de ğişimi



Şekil 8. Vuru mu momentini azaltmak için mıknatısların kaydırılması a) kayk ı=0 b) kayk ı= α



Şekil 9. Farklı mıknatıs kayk ılarında toplam vuru mu momentinin de ğişimi

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 3 fazlı yeni bir enine akıllı disk generatör önerilmiştir. Rüzgâr türbinleri gibi düşük hız yüksek moment uygulamaları için önerilen generatörün, açık devre elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Faz başına zıt-emk dalga şekillerine ve vuruğu momentine rotor çapının etkisi gözlenmiştir. Ayrıca enine akıllı makinelerin en önemli sakıncalarından olan vuruğu momenti de faz başına ve 3 faz toplamı olarak analiz edilmiştir. Vuruğu momentini azaltmak için mıknatıs kaykık yöntemi kullanılmıştır. Bir faz başına 6 Nm olan vuruğu momenti, optimizasyon sonucunda toplam 0,38 Nm' ye düşürülmüştür. Bu sonuçlara göre, önerilen disk tipi EAM, rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi düşük hız yüksek moment uygulamalarında kullanılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2018.06.03.897 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Weh, H., May, H., Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, vol. 3, pp. 1107-1111, Sept., 1986.
- [2] E. Aydin, J. H. Kim, E. Yildiriz, M. T. Aydemir and B. Sarlioglu, "A hybrid-excited axial transverse flux permanent magnet generator," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-6.
- [3] Chen, A., Nilssen, R., Nysveen, A., Performance Comparisons Among Radial-Flux, Multistage Axial-Flux, and Three-Phase Transverse-Flux PM Machines for Downhole Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 46(2), 779-789, 2010.
- [4] Harris, M.R., Pajooman, G. H., Abu Sharkh, S.M., The Problem of Power Factor In VRPM (Transverse-Flux) Machines, 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), pp. 386-390, Sept., 1997.
- [5] Zheng, P., Zhao, Q., Bai, J., Yu, B., Song, Z., Shang, J., Analysis and Design of A Transverse-Flux Dual Rotor Machine for Power-Split Hybrid Electric Vehicle Applications, Energies, 6, 6548-6568, 2013.
- [6] Yu, Z., Jianyun, C., Power Factor Analysis of Transverse Flux Permanent Machines, 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- [7] Zhao, F., Lipo, T.A. , Fellow, L., Kwon, B.I., A Novel Dual-Stator Axial-Flux Spoke-Type Permanent Magnet Vernier Machine For Direct-Drive Applications, IEEE Transactions on Magnetics, 50(11), 1-4, 2014.
- [8] Hosseini, S., Moghani, J. S., Ershad, N. F., Jensen, B. B., Design, Prototyping, and Analysis of A Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator, in IEEE Transactions on Magnetics, 47(4), 772-780, 2011.
- [9] Mignot, R.B., Dubas, F., Espanet, C., Cuchet, C., Chamagne, D., Original Design of Axial Flux PM Motor and Modeling of The Magnetic Leakage Using A Magnetic Equivalent Circuit, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 138-141, Oct., 2012.
- [10] Yan, J., Li, Q., Lin, H., Feng, Y., Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Flux-Concentrated Transverse Flux Permanent Magnet Disk Generator, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 453-457, Oct., 2014.

- [11] Peng, G., Wei, J., Shi, Y., Shao, Z., Jian, L., A Novel Transverse Flux Permanent Magnet Disk Wind Power Generator with H-Shaped Stator Cores, *Energies*, 11(4), 1-19, 2018.
- [12] Noroozi, M.A., Moghani, J.S., Yazdanpanah, R., Passive-rotor Disk-shaped Transverse-flux Permanent-magnet Generator for Small Wind Turbine Application, *The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)*, 25-28, Feb., 2015.
- [13] Jia, Z., Lin, H., Fang, S., Huang, Y., Cogging Torque Optimization of Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator With Double C-Hoop Stator, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4, 2015.
- [14] Kurt E., Arslan S., Demirtaş M., Cogging Torque Exploration of Radially and Angularly Directed Fluxes in a New PM Generator with the Multiple Stators, In: *Proceedings of the 7th. int. conf. & Exh. ecological vehicles and renewable energies – EVER'12. Monaco; 2012.*
- [15] Kou, B., Yang, X., Luo, J., Zhou, Y., Modeling and Analysis of a Transverse-Flux Flux-Reversal Motor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(3), 1121-1131, 2016.
- [16] Yan, J., Feng, Y., Jin, P., Cogging Torque Optimization of Flux Concentrated Transverse Flux PM Disk Generator by Skewing PM Poles, *21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, (Compumag)*, 1-2, June, 2017.
- [17] Uygun, D., Çetinceviz, Y., Yüzey Yerleştirmeli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Tutma Torkunun Azaltılması İçin Stator Yapılandırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (3), 605-620, 2018.
- [18] Husain, T., Sozer, Y., Husain, I., Muljadi, E., Design of A Modular E-Core Flux Concentrating Axial Flux Machine, *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 5203-5210, Sept., 2015.
- [19] Hosseini, S., Moghani, J. S., Ershad, N. F., Jensen, B. B., Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator, in *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(4), 772-780, 2011.
- [20] Washington, J. G., Atkinson, G. J., Baker, N. J., Reduction of Cogging Torque and EMF Harmonics in Modulated Pole Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2), 759-768, 2016.
- [21] Srisiriwanna, T., Konghirun, M., A study of Cogging Torque Reduction Methods in Brushless DC Motor, *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 1-4, May., 2012.
- [22] Wang, Y., Shen, J., Fang, Z., Fei, W., Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Flux-Switching Machines, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 1(1), 11-14, 2009.
- [23] Aydin, M., Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, *18th International Conference on Electrical Machines*, 1-6, Sept., 2008.
- [24] Ueda, Y., Takahashi, H., Ogawa, A., Akiba T., Yoshida, M., Cogging-Torque Reduction of Transverse-Flux Motor by Skewing Stator Poles, in *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4, 2016.