



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kalıcı mıknatıslı vernier makinaların parametrik analizi

Parametric analysis of permanent magnet vernier machines

Yazar (Author): Tayfun GÜNDOĞDU¹

ORCID¹: 0000-0002-7150-1860

To cite to this article: Gündoğdu T., “Kalıcı mıknatıslı vernier makinaların parametrik analizi”, *Journal of Polytechnic*, 27(3): 1169-1188, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Gündoğdu T., “Kalıcı mıknatıslı vernier makinaların parametrik analizi”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 1169-1188, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1183354

Kalıcı Mıknatıslı Vernier Makinaların Parametrik Analizi

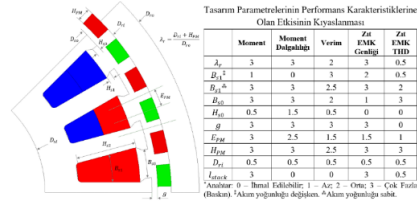
Analysis of Permanent Magnet Vernier Machines

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yüzeysel montajlı mıknatıslı ve dış rotorlu bir Vernier makinesi / Vernier machine with surface-mounted magnets and an outer rotor
- ❖ Çeşitli geometrik parametrelerin etkisinin analizi / Analysis of the impact of various geometric parameters.
- ❖ Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı parametrik analiz / Finite element method (FEM) based parametric analysis.
- ❖ Kalıcı mıknatıslı Vernier makineleri için faydalı bir tasarım kılavuzu / A useful design guide for permanent magnet vernier machines.
- ❖ Baskın tasarım parametrelerinin belirlenmesi / Determination of dominant design parameters.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kalıcı mıknatıslı vernier makinaların geometrik tasarım parametrelerinin performansa etkisi incelenerek, en önemli tasarım parametreleri belirlenmiş ve genel bir tasarım kılavuzu geliştirilmiştir. / By examining the effect of geometric design parameters of permanent magnet vernier machines on performance, the most important design parameters were determined and a general design guide was developed.



Şekil. Makina Yapısı ve tasarım parametrelerinin etkisi / Figure. Machine Structure and the influence of design parameters

Amaç (Aim)

Amaç, düşük hız yüksek moment uygulamalarında kullanılan Kalıcı Mıknatıslı Vernier Makinalar için genel bir tasarım kılavuzu geliştirmek ve baskın tasarım parametrelerini bulmaktır. / The goal is to develop a general design guide for Permanent Magnet Vernier Machines used in low speed high torque applications and determine the dominant design parameters.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tüm analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. / Finite element method was employed in all analyzes.

Özgünlük (Originality)

Kalıcı mıknatıslı vernier makina'nın tüm geometrik tasarım parametreleri detaylı bir şekilde ilk kez bu çalışmada incelenmiştir. / All geometric design parameters of the permanent magnet vernier machine were examined in detail for the first time in this study.

Bulgular (Findings)

Stator oluk genişliği ve açıklığı ile mıknatıs kalınlığı, moment ve verim açısından, en kritik tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. / The stator slot width and gap, along with magnet thickness, have been identified as the most critical design parameters in terms of torque and efficiency.

Sonuç (Conclusion)

Moment, güç, gerilim dalga şekli ve verim açısından en iyi tasarımın nasıl olacağı parametrik olarak belirlenmiştir. / The optimal design for torque, power, voltage waveform, and efficiency has been determined parametrically.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kalıcı Mıknatıslı Vernier Makinaların Parametrik Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Tayfun GÜNDOĞDU^{1,2*}

¹ Enerji Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji ABD, İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ Ayazağa Kampüsü, Sarıyer, Türkiye

² GAMAK Makina Sanayi A.Ş., Dudullu OSB, Baraj Yolu Cad. No:2 34776 Ümraniye/İstanbul, Türkiye

(Geliş/Received : 02.10.2022 ; Kabul/Accepted : 14.04.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 04.06.2023)

ÖZ

Bu çalışmada; dış rotorlu ve yüzeye monte mıknatıslara sahip bir Vernier makinanın tüm geometrik parametrelerinin performans karakteristiklerine olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, düşük hız yüksek moment uygulamalarında kullanılan Kalıcı Mıknatıslı Vernier makinalar (KMVM) için mıknatıs, diş ve diş açıklığı kalınlık ve genişlikleri, hava aralığı genişliği, rotor dış çaplarının iç çapına oranı (bölünme oranı), shaft çapı gibi temel tasarım parametrelerinin moment, moment dalgalılığı, verim ve zıt EMK'ya olan etkisi inceleyerek genel bir tasarım kılavuzu geliştirmektir. KMVM'lerin tasarım ve çalışma prensibi kısaca anlatılmış ve düşük moment dalgalılığına karşın yüksek moment veren oluk/kutup kombinasyonunun nasıl seçilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. Akabinde, tasarım parametreleri tanımlanmış ve makinanın küçük güçlü rüzgâr türbini uygulamalarında kullanılacağı düşünülerek, her geometrik parametrenin moment ve verimin yanı sıra, terminal gerilimi hakkında detaylı bilgi veren zıt EMK dalga biçimi de parametrik olarak analiz edilmiştir. Moment, verim ve endüklenen gerilimi en çok etkileyen geometrik tasarım parametreleri belirlenmiş ve parametrik olarak en iyi tasarım elde edilmiştir. Analizler zaman adımı, doğrusal olmayan, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı bir program ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı Mıknatıslı Vernier, geometrik tasarım parametreleri, parametrik analiz, moment, verim.

Parametric Analysis of Permanent Magnet Vernier Machines

ABSTRACT

In this study, the effect of key geometrical parameters on the performance of a Vernier machine with outer rotor and surface mounted magnets has been studied in detail. The aim of this study is to develop a general design guideline by examining the influence of basic design parameters such as magnet, tooth and tooth tip dimensions, air gap width, ratio of rotor outer diameter to inner diameter (split ratio), shaft diameter, etc. on the torque, torque ripple, efficiency and induced voltage for permanent magnet Vernier machines (PMVMs) used in low speed and high torque applications, such as wind turbine. The design and working principle of the PMVMs is briefly explained and it is emphasized how to choose the slot/pole combination that provides high torque despite low torque ripple. Afterwards, the design parameters are introduced and the waveform of back-EMF, which gives detailed information about the terminal voltage of each geometric parameter as well as the torque and efficiency, is parametrically analyzed. The most dominant geometric design parameters affecting the torque, efficiency and back-EMF were determined and the best design was obtained parametrically. Analyses were performed with a time-stepped, non-linear, two-dimensional finite element method (FEM) based program.

Keywords: Permanent magnet Vernier, geometric design parameters, parametric analysis, torque, efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Vernier makinası ilk olarak 1963 yılında, düşük hızlı uygulamalar için kullanılan değişken bir relüktans makinası olarak tanıtılmıştır [1]. Kalıcı mıknatıslı (KM) versiyonu ise 1995 yılında, çok yüksek moment yoğunluğuna sahip senkron makina olarak bildirilmiştir [2]. Kalıcı Mıknatıslı Vernier Makina'nın (KMVM), akı modülasyon ilkesine dayalı çalışma prensibi ve yüksek performanslı manyetik dişliler ile olan ilişkisi, kapsamlı bir şekilde sunulmuştur [3, 4]. [5] ve [6]'da ise çift rotor ve çift stator konfigürasyonları kullanılarak, bu

makinaların moment yoğunluğunun daha da arttırılabileceği gösterilmiştir.

Son yıllarda, yüksek moment yoğunluğu ve düşük moment dalgalılığı gerektiren; elektrikli tahrik ve rüzgâr enerjisi üretimi gibi doğrudan tahrik uygulamalarında kullanılmak için oldukça uygun olmalarından dolayı, KMVM'lara artan ilgi büyümüştür. Elektrikli tahrik ve rüzgâr türbini gibi düşük hızlı ve yüksek güçlü uygulamalarda, hız ve momenti ayarlayarak iletmek için mekanik dişli kutuları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, mekanik dişli kutularında titreşim, akustik gürültü ve güvenilirlik problemleri mevcuttur. Birçok uygulamada, özellikle açık deniz rüzgâr türbinleri gibi bakım maliyetinin yüksek olduğu uygulamalarda, doğrudan sürürlü bir sistem tercih edilir. Bu nedenle; giderek daha fazla araştırmacı, dişli sistem performansını

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : tgundogdu@itu.edu.tr

iyileştirmeye ve düşük hız ve yüksek moment yoğunluğuna sahip KMVM'ları geliştirmeye önem vermektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi KMVM'lar ve akı modülasyonlu manyetik dişliler çalışma prensibi olarak oldukça benzerdir. Bu makineler arasındaki ilişki [7]'de verilmiştir. Çoklu hava boşlukları ve karmaşık mekanik yapılara sahip olan manyetik dişli KM makinelerin aksine, KMVM tıpkı herhangi bir geleneksel elektrikli makine gibi yalnızca bir stator ve bir rotor içerir [8]. Aslında, KMVM'lar yapı olarak yüzey kalıcı mıknatıslı makineler (YKMM) çok benzerdir. KMVM ile YKMM arasındaki temel fark; KMVM'da rotor kutup sayısının stator kutup sayısından oldukça yüksek olmasıdır. Oysa, klasik bir YKMM'de rotor kutup sayısı, stator kutup sayısına eşittir. İşte, KMVM'nın rotorunda stator kutbuna göre katlarca fazla mıknatıs bulundurması, bu makinenin moment yoğunluğunun YKMM'ya göre oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır [9–12]. Diğer bir deyişle, bu makinelerin rotorlarındaki fazla mıknatısların yaratmış olduğu “manyetik dişli etkisi” sayesinde, oldukça yüksek moment yoğunluğuna sahiptirler [5, 13]. Giderek önem kazanana kullanım alanları ve sağlamış olduğu avantajlardan dolayı, bu makinelerin detaylı analizi ve geliştirilmesi çok önem arz etmektedir. Bu sebeple, birçok araştırmacı aşağıda özetlendiği gibi, bu makinelerin geliştirilmesi için önemli çalışmalarda bulunmuşlardır.

[4] ve [14]'te KMVM'larının çıkış momentini genel bir tasarım metodolojisi ile maksimize etme konusunda derin araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca [15], KMVM'lar için moment dalgalanma karakteristiğini minimize eden genel bir anlık moment denklemi önermişlerdir. KMVM'lar manyetik alan modülasyon ilkesine göre çalışsalar da [16] bir çok farklı topolojiye sahip olabilirler [17].

Konvansiyonel makinelerin bazı tasarım yöntem ve prensipleri KMVM'larda da kullanılabilir. Örneğin, genellikle hataya dayanıklı gereksinimler için kullanılan modüler yapı, çalışma güvenilirliğini artırmak için KMVM'lara da uygulanabilir [18–21]. Ayrıca, KMVM'larda, akı modülasyon kutupları olarak bölünmüş stator diş yapısı kullanmak oldukça yaygın bir uygulamadır. [5], [22] ve [23]; temel performans varyasyonları açısından klasik diş yapısı ile tasarlanmış KMVM'lar ile bölünmüş diş yapısına sahip olan KMVM'ları nicel olarak karşılaştırmışlardır. Açık deniz rüzgar türbini gibi hata toleranslarının çok düşük olması gereken uygulamalar için hata tolerans kapasitesi oldukça yüksek tasarım önerileri [18] ve [24]'te sunulmuştur. Bunlara ek olarak, fazlar arası ortak endüktans değerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu (fazlar arası izolasyonu yüksek), diğer bir deyişle hata toleransı oldukça yüksek olan yeni bir çeşit kesişmeyen sargı tipini KMVM'lar için geliştirilmiştir [25]. Modüler tasarım, daha iyi faz izolasyonu sağlayabildiği için zorlu koşullarda çalışan makineler için oldukça uygundur. [19]'da birçok sökülebilir stator modülünden oluşan yeni bir tür modüler KMVM

topolojisi önerilmiştir. Benzer bir yapı [26]'da beş fazlı dış rotorlu KMVM'ya uygulanmıştır.

Bu çalışmaların dışında, aşağıda sıralanan çeşitli tasarım ve analiz çalışmaları KMVM'larının elektriksel ve manyetik davranışlarını daha iyi anlayabilmek ve bu makineleri daha da geliştirmek adına sunulmuştur.

- Farklı mıknatıs malzemelerinin ve rotor eddy kayıplarının etkisi [18, 27, 28];
- Mıknatıs konumunun, şeklinin ve rotor konfigürasyonunun etkisi [29, 30];
- Kutup ve sargı kutbu oranı, akı modülasyon kutup sayısı ve stator oluk/kutup kombinasyonlarının etkisi [31, 32, 33];
- İspitli mıknatıs düzeni ve akı bariyer etkisi [34], toroidal sargı topolojisinin etkisi [6, 35];
- Farklı KMVM topolojileri için tasarım yönergeleri [22, 36, 37].

Yukarıda verilen detaylı literatür taramasından da anlaşılacağı gibi, temel tasarım parametrelerinden geometrik tasarım parametrelerinin KMVM'ların performans karakteristiklerine olan etkileri detaylı bir şekilde daha önce incelenmemiştir. Doğrusal ile yazarın bilgisi dahilinde, bu çalışma alanında ilk olma özelliğini taşımaktadır. Literatürdeki bu boşluğun kapatılması dışında, bu çalışmanın diğer amacı ise KMVM'lar için genel bir tasarım kılavuzu geliştirmektir. Bu çalışmada, ana geometrik tasarım parametrelerinin moment, moment dalgalılığı, verim, Zıt EMK, endüktans, vb. gibi temel performans karakteristiklerine olan bireysel (öz) etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu tasarım parametrelerinden hangilerinin performans karakteristikleri üzerinde daha baskın bir etki sahip olduğu açığa çıkarılmıştır. Öncelikle önceden belirlenen boyutlar doğrultusunda, farklı stator kutbu/oluk sayısı/rotor kutbu kombinasyonlarından en yüksek momenti veren aday seçilmiş ve akabinde bu aday için parametrik analizler zaman adımı, doğrusal olmayan, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı bir program ile gerçekleştirilmiştir. Her parametrenin etkisi bir dizi parametrik analiz sonucu belirlenmiş ve bu sonuçlar doğrultusunda en yüksek momenti en düşük moment dalgalılığıyla veren ideal tasarım elde edilmiştir. KMVM'nın tasarım konfigürasyonu ve parametrelerinin yanı sıra, oluk/kutup kombinasyonunun nasıl seçildiği Bölüm 2'de verilmiştir. Bölüm 3, tüm parametrik analizler detaylı bir şekilde sunulmuş, Bölüm 4'te ise, Bölüm 3'de elde edilen veriler doğrultusunda tasarlanan en ideal KMVM'nın, kararlı durumdaki performans karakteristikleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. Son olarak, çalışmanın sonuçları ve öneriler Bölüm 5'te sunulmuştur.

2. KMVM KONFIGÜRASYONU VE TASARIM PARAMETRELERİ (PMVM CONFIGURATION AND DESIGN PARAMETERS)

KMVM'nin çalışma prensibi, temel olarak manyetik dişli etkisine dayanmaktadır. Manyetik dişlilerde olduğu gibi, yüksek hızlı mıknatıs kutupları, ferromanyetik kutup parçaları veya stator oluk sayısı tarafından modülasyon yoluyla bağlanır. Buna hava aralığı akı modülasyon etkisi denilmektedir. KMVM'larda, yüksek hızlı alan harmonikleri stator akımları tarafından üretilirken, düşük hızlı kutuplar rotor mıknatısları tarafından oluşturulur. Manyetik dişli etkisinin oluşabilmesi için, stator oluk sayısı (S), stator manyetik kutup çifti (p_s) ve rotor mıknatıs kutup çiftleri (p_r) arasında Eşitlik (1)'de verilen ilişkinin sağlanması gerekir [38–40]. Burada, stator olukları hava aralığı geçirgenliğini değiştirir ve hava aralığı manyetik alanı böylece stator dişleri ve olukları ile modüle edilir. Dolayısı ile bu üç parametre, modülasyon seti olarak anılır.

$$S = p_r \mp p_s \quad (1)$$

Elektromanyetik moment üretimi için, p_s , hava aralığı alanı temel harmonik bileşenine eşit olmalıdır. Bu nedenle, KMVM tasarımı normalde Eşitlik (2)'de verilen ilkeyi karşılamalıdır. Diğer bir deyişle, [4]'te açıklandığı gibi, $S = p_r + p_s$ olan tasarımlar her zaman $S = p_r - p_s$ olanlardan daha fazla moment kapasitesine sahiptir. Genellikle yüksek kutup oranlarına (p_r/p_s) sahip olan KMVM'lar, düşük harmonik içerikli sinüzoidal zıt EMK'ya sahiptir [9].

$$p_s = S - p_r \quad (2)$$

Tasarım için bir dış rotor konfigürasyonu seçilmiştir. Bu tasarım seçimi, hava boşluğu çapının artmasına ve kaçak akıların azalmasına olanak sağlar. Ayrıca, iç rotor konfigürasyonuna göre daha büyük bir kutup yayı olan daha ince mıknatısların kullanılmasına da olanak sağlar. Tasarım sürecindeki ilk adım, ihtiyaca göre en iyi modülasyon setinin seçilmesidir. KMVM'lar için modülasyon seti seçimi, modülasyon işlevini gerçekleştiren stator dişlerinin sayısının faz sayısının katı olması gerektiğinden, manyetik dişlilere kıyasla oldukça kısıtlıdır. 1 ile 4 arasında değişen stator kutup çifti sayısı ile modülasyon setleri, her durumda birkaç farklı oluk numarası için incelenmiştir. Araştırılan aday modülasyon kümeleri, her bir durum için faz başına kutup başına oluk sayısı q ile birlikte Çizelge 1'de listelenmiştir. Burada, farklı modülasyon setlerinin analizlerinin en ideal geometrik tasarım parametreleri kullanılarak Çizelge 2'de verilen spesifikasyonlar doğrultusunda ve aynı koşullarda yapıldığını hatırlatmakta fayda vardır. Çizelge 1'den aşağıda sıralanan bulgular elde edilmiştir.

- I. Genel olarak, daha düşük oluk numaralarına sahip kombinasyonlar, sabit stator kutup çifti sayısı için daha fazla moment sağlar;
- II. $q \geq 4$ veya $p_s = 1$ kombinasyonları genel olarak daha düşük moment üretir;
- III. $q \leq 2$ kombinasyonları genel olarak yüksek moment üretir;

IV. En yüksek momenti üreten üç kombinasyon $S/p_s/p_r$ olarak; 24/4/20, 27/3/24, ve 24/2/22 olarak bulunmuştur.

Burada, yüksek kutup oranından dolayı 24/2/22 kombinasyonu parametrik analizleri gerçekleştirmek üzere seçilmiştir. Yüksek sargı faktörü ve düşük MMK harmonikleri, yüksek moment ve düşük rotor kayıpları (özellikle de mıknatıs) elde etmek adına, bu kombinasyon için; klasik tam oluklu dağıtılmış çift tabakalı 5 adımlı (Hatve: 1-6) sargı seçilmiştir. Sargı faktörü ve MMK harmonikleri Ekler'de Şekil E.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Farklı Modülasyon Setleri için Ortalama Moment Değerleri (Average Moment Values for Different Modulation Sets)

q	S	p_s	p_r	T_{avg}
1	24	4	20	34.01
1.5	27	3	24	34.56
1.5	36	4	32	32.71
2	24	2	22	35.4
2	36	3	33	28.03
2.5	30	2	28	28.98
3	36	2	34	21.69
4	24	1	23	24.73
5	30	1	29	21.08
6	36	1	35	19.18

Temel tasarım parametreleri ve bu parametrelerin ideal, minimum ve maksimum değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu Çizelgede verilen temel tasarım parametreleri, Eşitlik (3)'te verilen çıkış gücüne göre temel boyutlandırma eşitliğini sağlayacak şekilde, ampirik olarak elde edilmiştir.

$$P_{out} = \frac{1}{60} \pi^2 D_{ro}^2 B_{avg} A l_{stack} \quad (3)$$

Burada, D_{ro} rotor dış çapı, B_{avg} manyetik yük olarak bilinen; rotor sabit mıknatısları tarafından üretilen ortalama hava aralığı akı yoğunluğu, A elektrik yükü olarak bilinen; akım yoğunluğu, oluk doluluk faktörü ve oluk boyutlarına bağlı bir katsayı, ve l_{stack} ise makina istif uzunluğudur. Çizelge 2'de verilen, önemli kriterlerden olan maksimum akım yoğunluğu, KMVM'nin doğal hava soğutma koşullarında çalıştırılabilmesi için sınırlandırılmıştır. Dolayısıyla, akım değeri, sargı siper sayısı ve oluk doluluk oranları bu doğrultuda seçilmiştir. Tasarlanan KMVM'nin rüzgâr türbini uygulamalarında kullanılması düşünüldüğünden, anma hızı 150 rpm olarak seçilmiştir. Kalıcı mıknatıs malzemesi olarak NdFeB-35 (N35-UH) ve nüve malzemesi olarak M270-35A kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Ekler kısmında (bkz. Şekil E.2 ve Çizelge E.1) detaylı bir şekilde verilmiştir.

3. PARAMETRİK ANALİZLER (PARAMETRIC ANALYSES)

Şekil 2'de gösterilen geometrik tasarım parametreleri Çizelge 2'de verilen minimum ve maksimum değerler

için parametrik olarak analiz edilmiştir. Bu parametreler içerisinde sadece rotor dış çapı ve stator akımı, rotor hızı, sipir sayısı gibi diğer tüm işletim parametreleri sabit bırakılmıştır. Ayrıca, her parametrenin öz etkisini görebilmek adına, her seferinde sadece bir parametre analiz edilmiştir. Analizlere başlanmadan önce, başlangıç pozisyonunu yani akım açısını belirlemek adına, başlangıç pozisyonu parametrik olarak analiz edilmiş ve maksimum momenti sağlayan başlangıç pozisyonları Şekil 1’deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 2. Tasarım Spesifikasyonları (Design Specifications)

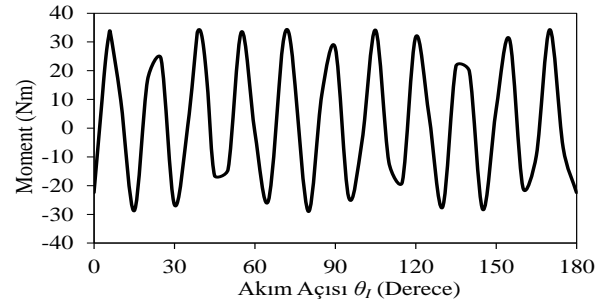
Sembol	Açıklama	İdeal Değer	Min. Değer	Mak. Değer
P_n	Nominal güç	550 W		
n_r	Nominal hız	150 rpm		
I_n	Uyartım akımı	24 A (tepe)		
S	Stator oluk sayısı	24		
p_s	Senkron kutup çifti sayısı	2		
p_r	Mıknatis çifti sayısı	22		
N_t	Oluk başına sipir sayısı	20		
γ_c	Bobin adımı	5		
k_f	Oluk doluluk faktörü	0.5		
J_n	Nominal akım yoğunluğu	5.91 A/mm ²		
D_{ro}	Rotor dış çapı	140 mm		
λ_r	Rotor bölünme oranı	0.846	0.77	0.86
g	Hava aralığı uzunluğu	0.7 mm	0.3 mm	2.5 mm
D_{so}	Stator dış çap	117.04 mm	90.12 mm	100.6 mm
D_{si}	Şaft çapı	60 mm	5 mm	75 mm
B_{s0}	Stator oluk açıklığının genişliği	7.4 mm	0.1 mm	9 mm
B_{s1}	Stator oluk açıklığının genişliği	9 mm	5 mm	12 mm
H_{s0}	Stator oluk açıklığının yüksekliği	0.6 mm	0.1 mm	3 mm
H_{s1}	Kama yüksekliği	0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm
H_{s2}	Stator oluk derinliği	16 mm	4 mm	22 mm
E_{PM}	Mıknatis kuşatma oranı	0.95	0.5	0.94
H_{PM}	Mıknatis yüksekliği	3 mm	0.5 mm	6 mm
l_{stack}	İstif uzunluğu	50 mm	5 mm	100 mm

Rotor 180°’lik pozisyonu için, momentin 22 kez (yani rotor kutup çifti sayısı kadar) yön değiştirdiği, oluşturulan modelin ve analiz kurulununun doğru

olduğunun en belirgin kanıtıdır. İlerleyen kısımlarda hesaplanan verim değeri, stator bakır kayıpları, toplam nüve kayıpları, mıknatis kayıpları ve rüzgar, sürtünme, mekanik ve ek kayıplar göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Moment değeri ise, zamana göre ortalaması alınmış elektromanyetik momenti ifade etmektedir.

3.1. Rotor Bölünme Oranı λ_r (Rotor Split Ratio)

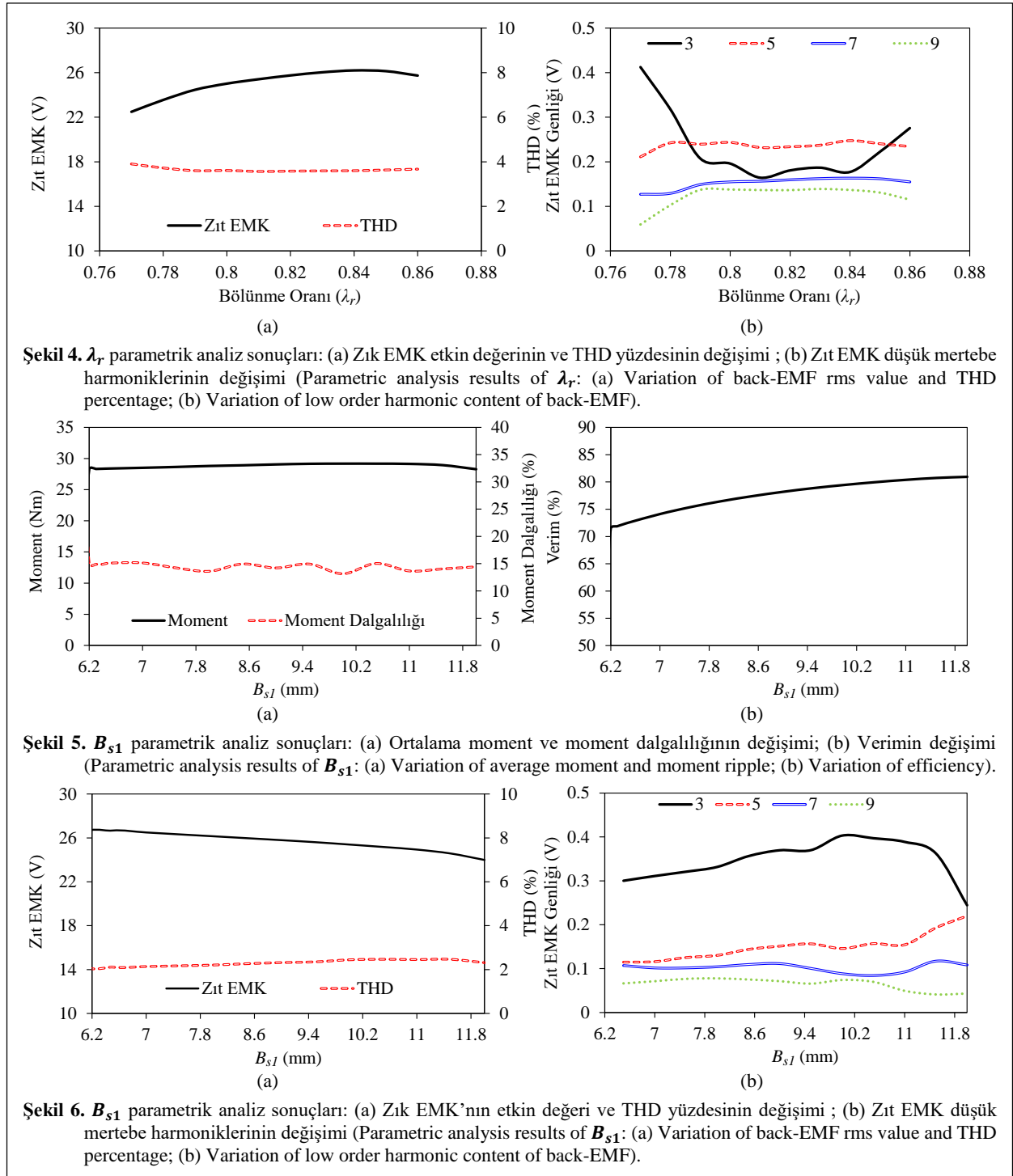
Rotor bölünme oranı (λ_r), makinanın çapsal boyutlarında en çok değişikliği sağlayan parametrelerin başında gelmektedir. Bu parametrenin moment, moment dalgalılığı ve verime olan etkisi Şekil 3’de verilmiştir. Rotor bölünme oranının, moment ve moment kalitesi üzerinde baskın, verim üzerinde ise daha hafif bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. λ_r parametresinin verim üzerinde hafif bir etkiye sebep olmasından altında yatan ana sebep ise, bu parametrenin rotor boyunduruğunun genişliğini ve dolasıyı ile ana akı yolunun genişliğini değiştirmesinden dolayı; manyetik doyumun değişmesidir. Makina doyum noktalarında daha düşük moment üretmekte ve sabit giriş gücüne karşın çıkış gücü düşük kaldığından verimde düşüş yaşanmaktadır. Ayrıca, Çizelge 2’de verilen güç ve kutup sayısına göre, incelenen makina IEC 60034-30-1 verim sınıflarına göre minimum “standart verim” ve maksimum da ise “süper premium verim” sınıflarına dahil olmaktadır [41]. Rotor bölünme oranının zıt EMK ve zıt EMK düşük mertebeden harmonikleri üzerindeki etkisi Şekil 4’de verilmiştir. Bu parametrenin, zıt EMK’nin temel ve 3’üncü harmonik üzerinde oldukça baskın bir etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Ortalama momentin akım açısına göre değişimi (Variation of time-averaged torque with respect to current angle).

3.2. Akım Yoğunluğu Değişkenken Stator Oluk Genişliği B_{s1} (Stator Slot Width While Current Density is Changed)

Stator oluk genişlik parametresi (B_{s1}), akım yoğunluğu değişken (akım sabit) ve akım yoğunluğu sabit (akım değişken) olmak üzere iki farklı şekilde incelenebilir. Çünkü, oluk genişliğinin değişimi; fiziksel anlamda oluk içerisindeki tellerin çaplarının değişmesi demektir (oluk doluluk oranının sabit kalması şartı ile). Akım yoğunluğu değişkenken yapılan analizlerde, oluk alanının değişmesi ile değişen tel çaplarının teorik olarak maksimum akım yoğunluğunda bile kısa devre olmadan akım iletmeye devam edeceği varsayılır. Bu şekilde elde edilen moment, moment dalgalılığı ve verim eğrileri Şekil 5’de

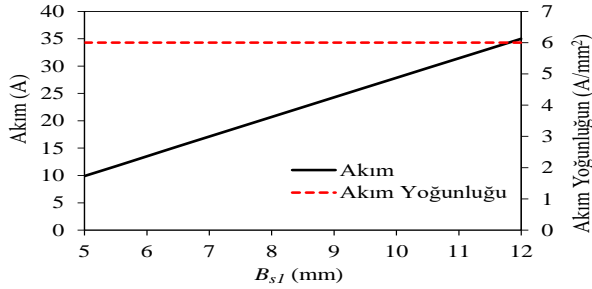


genişledikçe akım yoğunluğunu sabit tutmak için akım nasıl değiştiği Şekil 9'de verilmiştir. Görüldüğü gibi oluk büyüdükçe; akım lineer olarak, başlangıç akımının üç katına kadar artmıştır. Bu işletme koşulu altında elde edilen moment ve verim değişimleri Şekil 8'de verilmiştir. Akım yoğunluğunun değişken olduğu duruma kıyasla, moment, moment dalgalılığı ve verimde oldukça büyük değişiklikler meydana gelmiştir. Oluk genişliğiyle beraber akımın artması, ortalama momentini arttırırken, moment dalgalılığını azaltmıştır. Benzer durum zıt EMK için de geçerlidir. Akımın artması zıt EMK'yı arttırmış ve dalga şeklinin de giderek

bozulmasına sebep olmuştur (bkz. Şekil 9). Şekil 10'da görüldüğü gibi başta 3'üncü harmonik olmak üzere diğer düşük mertebeli harmonikleri de fark edilir derecede artmıştır. Bu parametre, sabit akım yoğunluğu koşulunda seçilirken, büyük değerlerde seçilmesi, yüksek moment, düşük moment dalgalılığı yüksek zıt EMK genliği elde etmek açısından avantaj sağlar. Ancak, buradaki sınırlayıcı unsur, inverterin akım değeri olacaktır. Yani, akım yoğunluğu sabitken, inverterin verebildiği maksimum akım değerlerine göre B_{s1} değeri belirlemek, performans karakteristikleri açısından avantajlı olacaktır.

3.4. Stator Oluk Açıklığı Genişliği B_{s0} (Stator Slot Opening Width)

Stator oluk açıklığı genişliği (B_{s0}) değiştirilerek ortalama moment, moment dalgalılığı ve verimin nasıl değiştiği Şekil 11'de gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi, oluk açıklık genişliği arttıkça; verim ve ortalama moment değerleri artarken, moment dalgalılığı önemli bir şekilde azalmaktadır. Bu parametrenin zıt EMK dalga şekline ve harmonik bileşenlerine olan etkisi, sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekil 12(a)'da görüldüğü gibi,

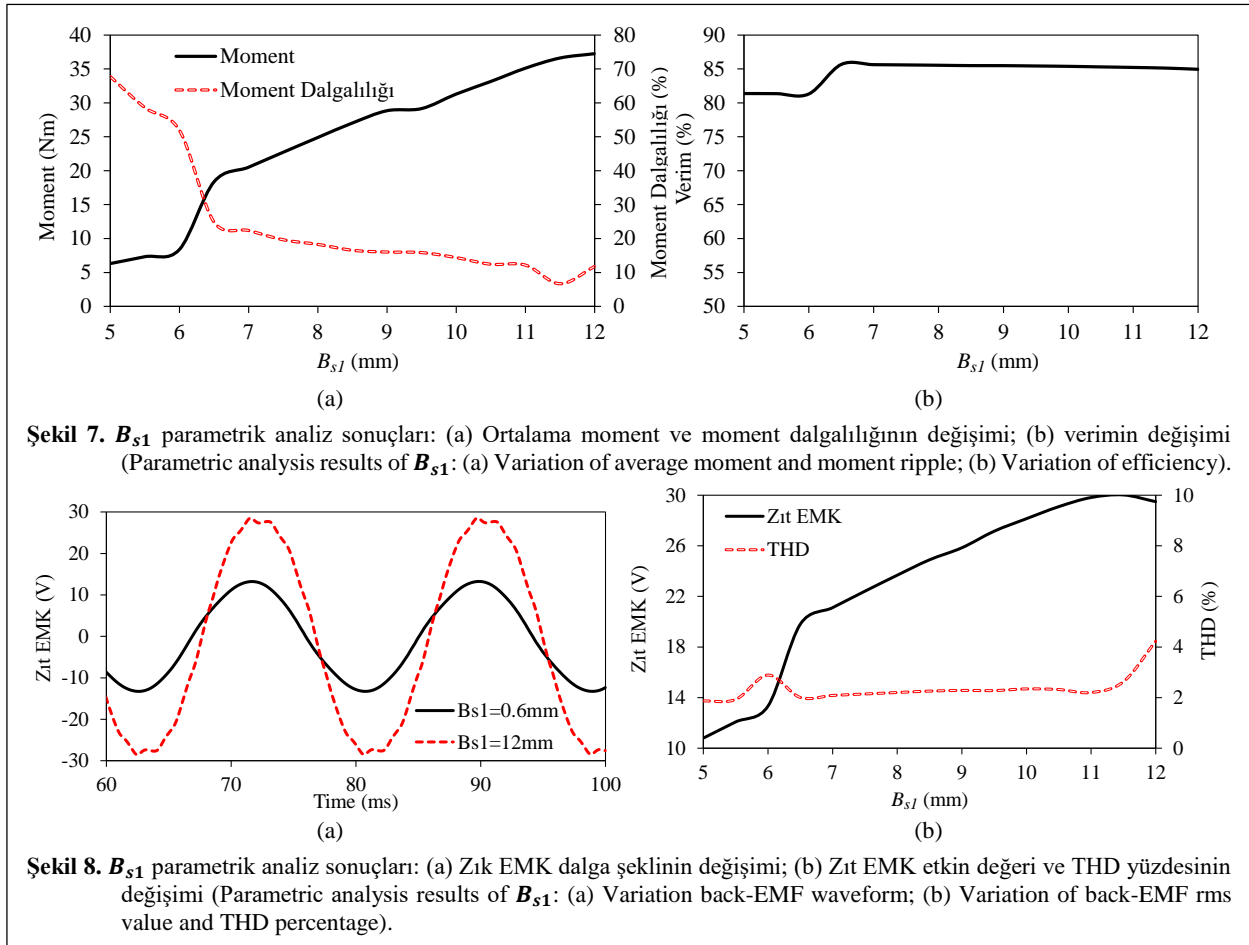


Şekil 9. Sabit akım yoğunluğu elde edebilmek için akımın etkin değerinin B_{s1} parametresine göre değişimi (Variation of current amplitude according to B_{s1} in order to obtain constant current density).

B_{s0} 'ın sadece efektif değer ve dalga şekli üzerinde değil, faz periyodunun üzerinde de etkisi vardır. Zıt EMK'nın etkin değerinin ve THD yüzdesinin değişimi Şekil 12(b)'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, özellikle de

B_{s0} 'ın 0 ila 4.5 mm değerlerinde temel bileşen değeri düşük ve THD yüzdesi yüksektir. Bunun sebebi, Şekil 13'de gösterildiği gibi 3'üncü harmonik değerinin belirtilen aralıkta çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Elektrik makinalarında bir sinyalin 3'üncü harmonik bileşeni, o makinanın manyetik doygunluğu hakkında bilgi verir [42–44]. Şekil 15'de gösterilen akı dağılımlarında "A" halkası ve "B" noktasına bakılınca, stator diş uçlarının birbirine yakın olması, faydalı akının kısa devre olmasına ve diş uçlarının doymasına sebep olmaktadır. Bu yüzden de B noktalarına bağlı dişlerden gibi B_{s0} 'ın değerine bağlı olarak daha az akı geçmekte ve dolayısı ile ortalama moment azalmaktadır. Diş uçlarının akı yoğunluk dağılımından da bu durum görülebilir. Netice olarak; oluk açıklık genişliği parametresinin performans karakteristiklerini bu denli etkilemesinin altında yatan neden Şekil 15'den de anlaşılacağı gibi B_{s0} 'ın 5mm'den daha küçük değerler için, stator diş uçlarının doymaya gitmesidir. Benzer şekilde, moment dalgalılığının artması ve zıt EMK'nın fazında kayma meydana gelmesinin de sebebi manyetik doymadan kaynaklı endüktans değerindeki değişimdir (bkz. Şekil 15). Elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde B_{s0} parametresinin makina performansında oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısı ile tasarım aşamasında bu

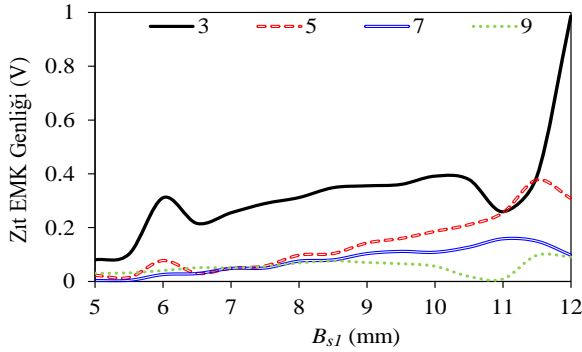


parametrenin doğru belirlenmesi oldukça önemli bir husustur.

3.5. Stator Oluk Açıklığı Yüksekliği H_{s0} (Stator Slot Opening Height)

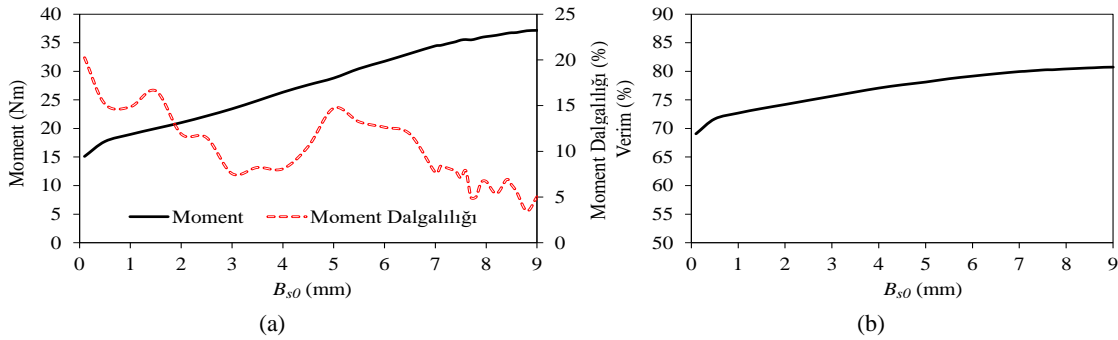
Stator oluk açıklığı yüksekliği olan H_{s0} parametresinin moment, verim ve zıt EMK karakteristiklerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 19 ve

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi bu parametrenin performans karakteristiklerine olan etkisi ihmal edilebilir derecede düşüktür. Bu parametre ve aynı zamanda H_{s1} parametresi sargıları olukta kama vasıtasıyla tutmak için

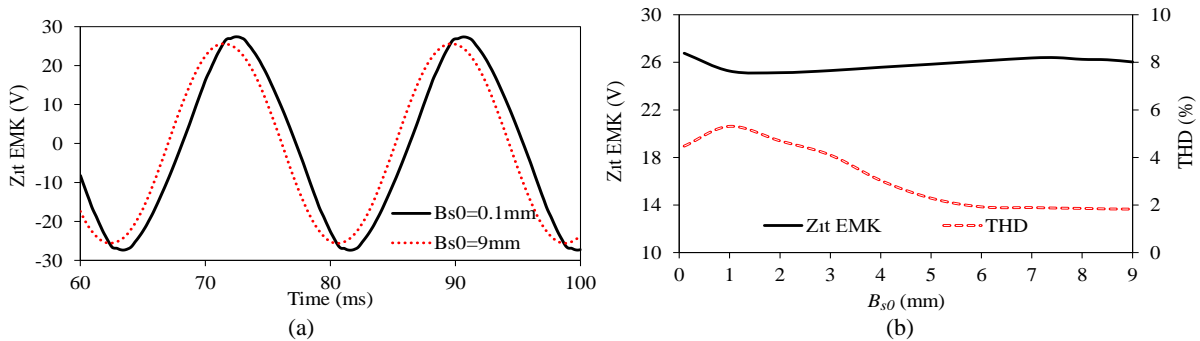


gereklidir.

Şekil 10. Zıt EMK düşük mertebeli harmoniklerinin B_{s1} 'e göre değişimi (Variation of low order harmonic content of back-EMF with respect to B_{s1}).



Şekil 11. B_{s0} parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgahlığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of B_{s0} : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).



Şekil 12. B_{s0} parametrik analiz sonuçları: (a) Zıt EMK dalga şeklinin değişimi; (b) Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin değişimi (Parametric analysis results of B_{s0} : (a) Variation back-EMF waveform; (b) Variation of back-EMF rms value and THD percentage).

3.6. Hava Aralığı Uzunluğu g (Air-Gap Length)

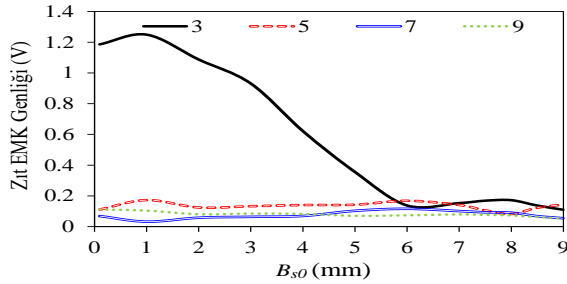
Hava aralığı uzunluğu birçok elektrik makinasında olduğu gibi KMVM'larda da çok önemli bir tasarım parametresidir. Bu parametrenin çok düşük seçilmesi başta yüksek moment dalgahlığı gibi mekanik sorunlara yol açabileceği gibi çok büyük seçilmesi düşük performans karakteristiklerine yol açabilir. Bu parametrenin moment ve verime olan etkisi Şekil 20'de gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi hava aralığı genişliği parametresinin performans karakteristiklerine etkisi oldukça büyüktür. Hava aralığı genişledikçe ortalama moment, moment dalgahlığı ve verim parametreleri azalmaktadır. Özellikle de hava aralığının 1mm'den düşük olduğu genişliklerde moment dalgahlığı değeri oldukça yüksektir. Benzer şekilde hava aralığı genişliği arttıkça zıt EMK etkin değeri de azalmaktadır ancak zıt EMK THD yüzdeliğinde önemli bir değişiklik olmamaktadır (bkz. Şekil 16. Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin H_{s0} 'a göre değişimi (Variation of back-EMF rms value and THD percentage with respect to H_{s0}).

Şekil 17). Hava aralığı değişiminin öz ve ortak endüktansa olan etkisi Şekil 18'de verilmiştir. Görüldüğü gibi; hava aralığının artması öz endüktans değerini artırırken, ortak endüktans değeri üzerinde kayda değer bir etki yaratmamıştır. Bu parametrenin ideal değerinin, istenilen moment dalgahlığı limiti, mekanik limitler ve

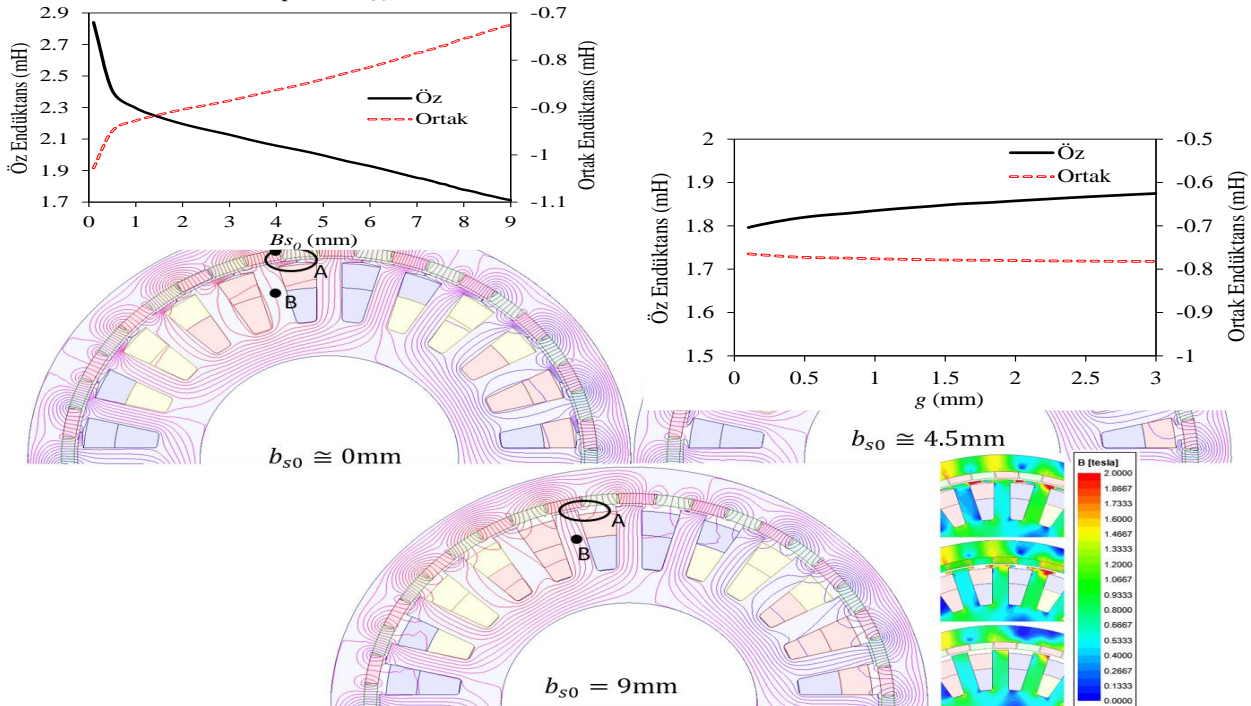
uygulama alanı (hız-moment karakteristiği) göz önünde bulundurularak seçilmesi gerekmektedir.

3.7. Mıknatıs Kuşatma Oranı E_{PM} (Magnet Embrace)

Mıknatıs kuşatma oranı KMVM'larda, moment karakteristiğinin yanı sıra toplam maliyeti belirleyen ana parametrelerden biridir. Kuşatma oranı ile mıknatıs hacmi doğru orantılı olduğundan, bu parametrenin değişimi toplam hacmi de etkileyecektir. Mıknatıs kuşatma oranının moment ve verim karakteristiklerine olan etkisi Şekil 21'de verilmiştir. Şekil 21(a)'da görüldüğü gibi, kuşatma oranının artması ortalama momenti arttırmaktadır. Ancak, belirli bir değerden sonra (~ 0.87) momentin sabitlendiği görülmektedir. Moment dalgalılığının ise 0.75 değerinde minimum olduğu gözükmemektedir. Akım ve bakır kayıplarında herhangi bir değişiklik olmadığı için, momentin dolayısı ile çıkış gücünün artması Şekil 21(b)'de görüldüğü gibi verimi arttırmıştır. Öte yandan, mıknatıs kuşatma oranının, zıt EMK etkin değeri ve THD yüzdesine kayda değer bir etki yapmadığı Şekil 22'de gösterilmiştir.



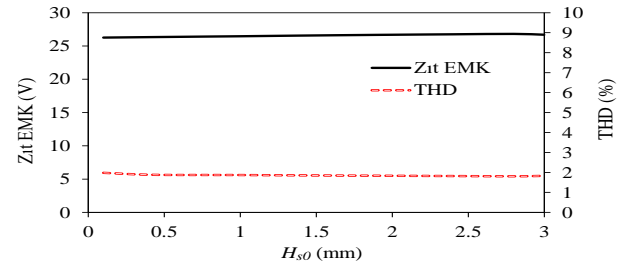
Şekil 13. Zıt EMK düşük mertebe harmoniklerinin B_{s0} 'a göre değişimi (Variation of low order harmonic content of back-EMF with respect to B_{s0}).



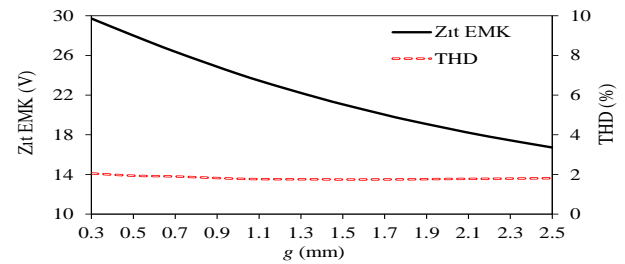
Şekil 14. Akı ve akı yoğunluğu dağılımlarının B_{s0} 'a göre değişimi (Variation of flux line distribution with respect to B_{s0}).

Şekil 15. Öz ve ortak endüktans değerlerinin B_{s0} 'a göre değişimi (Variation of self- and mutual-inductance with respect to B_{s0}).

Şekil 16. Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin H_{s0} 'a göre değişimi (Variation of back-EMF rms value and THD percentage with respect to H_{s0}).



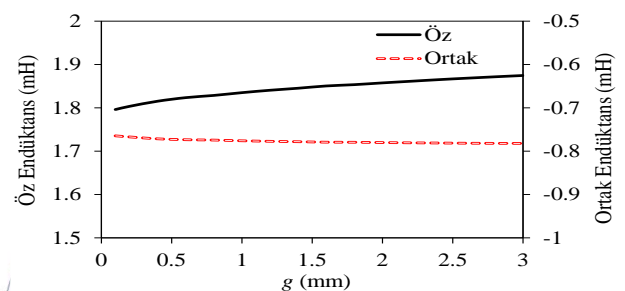
Şekil 17. Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin g 'ye göre değişimi (Variation of back-EMF rms value and THD percentage with respect to g).

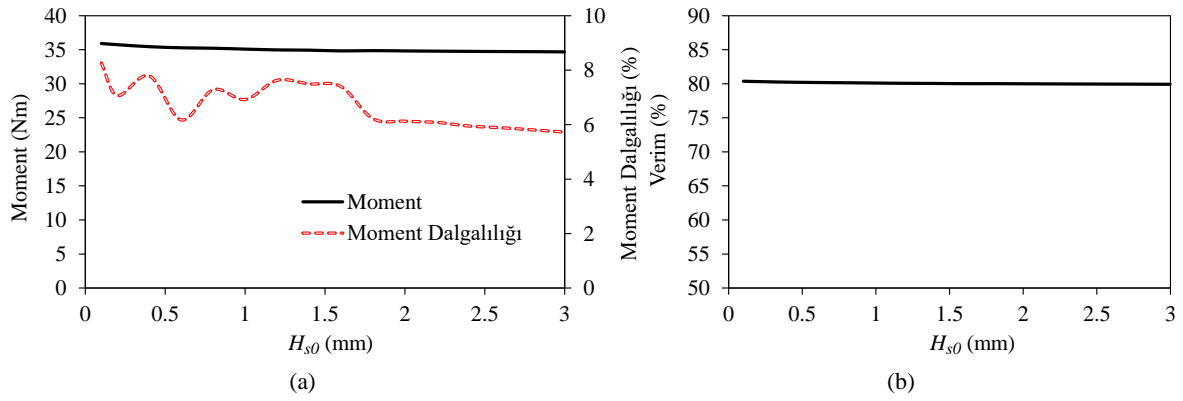


Şekil 18. Öz ve ortak endüktans değerlerinin g 'ye göre değişimi (Variation of self- and mutual-inductance with respect to g).

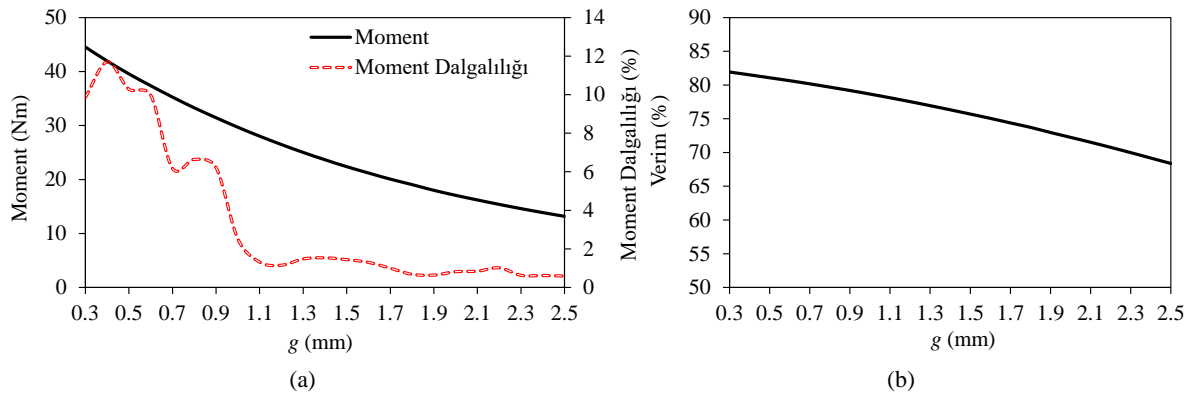
Şekil 18. Öz ve ortak endüktans değerlerinin g 'ye göre değişimi (Variation of self- and mutual-inductance with respect to g).

Şekil 18. Öz ve ortak endüktans değerlerinin g 'ye göre değişimi (Variation of self- and mutual-inductance with respect to g).

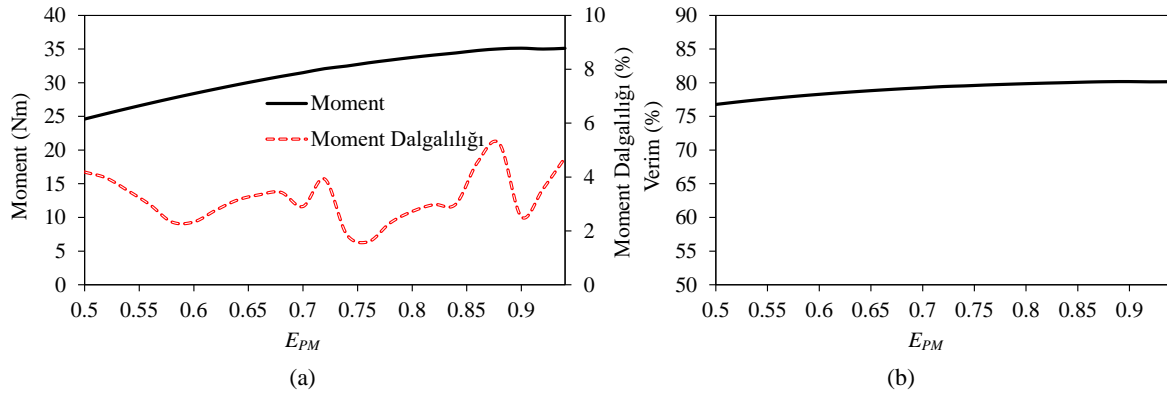




Şekil 19. H_{s0} parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgallığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of H_{s0} : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).



Şekil 20. g parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgallığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of g : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).



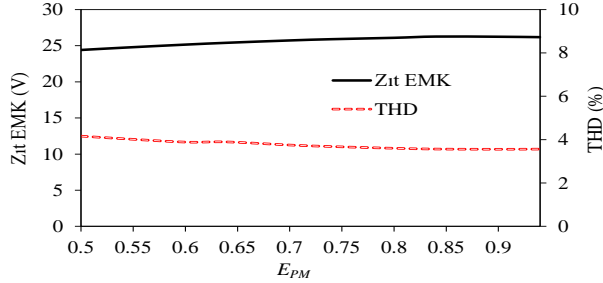
Şekil 21. E_{PM} parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgallığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of E_{PM} : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).

3.8. Mıknatıs Yüksekliği (Kalınlığı) H_{PM} (Magnet Height/Thickness)

Mıknatıs yüksekliği (kalınlığı), KMVM'ların performans karakteristiklerini oldukça önemli ölçüde etkileyen, baskın bir parametredir. Mıknatıs kuşatma parametresinde olduğu gibi bu parametre de hacim, ağırlık ve maliyet açısından önem teşkil etmektedir. Bu

parametrenin analizi yapılırken rotor bölünme oranının sabit bırakıldığına dikkat etmek gerekir. Yani burada, mıknatıs yüksekliğinin değişimi rotor boyunduruğuna yansıtılmıştır (bkz. Şekil 27). Şekil 27'de görüldüğü gibi, maksimum ortalama momenti veren bir H_{PM} parametresi varken, moment dalgallığı değeri H_{PM} parametresi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bunun altında yatan neden, daha önce de bahsedildiği gibi manyetik doyma değerindeki artıştır (bkz. Şekil 27). Benzer şekilde,

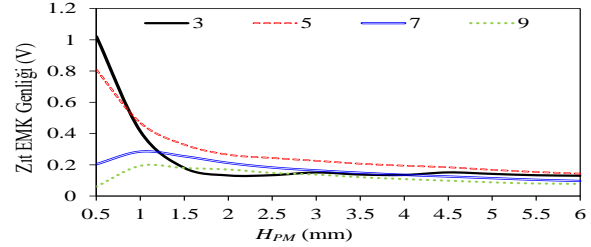
maksimum verimin elde edildiği bir H_{PM} değeri vardır. Burada diğer tasarım ve işletim parametreleri sabitken, verim değerinin; ortalama momente ve akabinde çıkış gücüne göre değiştiği görülmektedir. Miknatis kalınlığının zıt EMK dalga şekline ve harmonik bileşenlerine olan etkisi Şekil 24 ve Şekil 25'de gösterilmiştir.



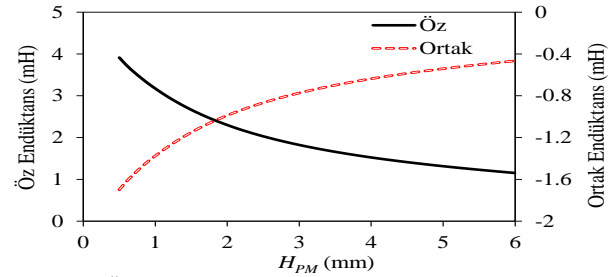
Şekil 22. Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin E_{PM} 'ye göre değişimi (Variation of back-EMF rms value and THD percentage with respect to E_{PM}).

Burada, miknatis kalınlığı arttıkça zıt EMK temel bileşen (etkin) değerinin azaldığı aynı zamanda THD değerinin 1mm değerine kadar azalır, daha büyük değerler için sabit kaldığı görülmektedir. Zıt EMK'nın harmonik bileşenleri incelendiğinde, 3 ve 3'ün katı harmoniklere olan etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Zaten zıt EMK dalga şeklinin $H_{PM} = 0.5\text{mm}$ değeri için trapezoidal olduğu açık bir şekilde görülmektedir. H_{PM} değerinin öz ve ortak endüktansa olan etkisi Şekil 26'da gösterilmiştir. H_{PM} parametresi arttıkça her iki endüktans değerinin de üstel fonksiyon olarak azaldığı görülmektedir. Bahsi geçen performans

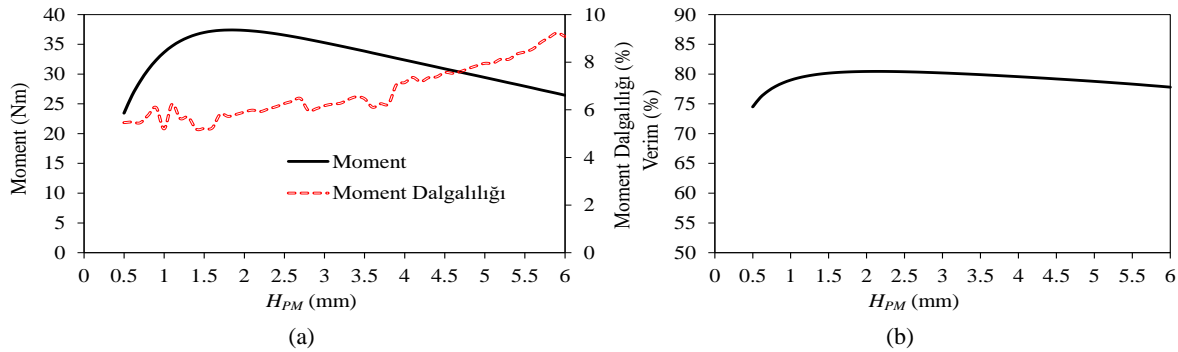
karakteristiklerinin grafiklerde gösterildiği gibi değişiminin altında yatan ana sebep, Şekil 27'de görüldüğü gibi manyetik doymadır. Burada, H_{PM} parametresi arttıkça, yüksek manyetik akı yoğunluğunun stator boyunduruğundan rotor boyunduruğuna doğru değiştiği görülebilir.



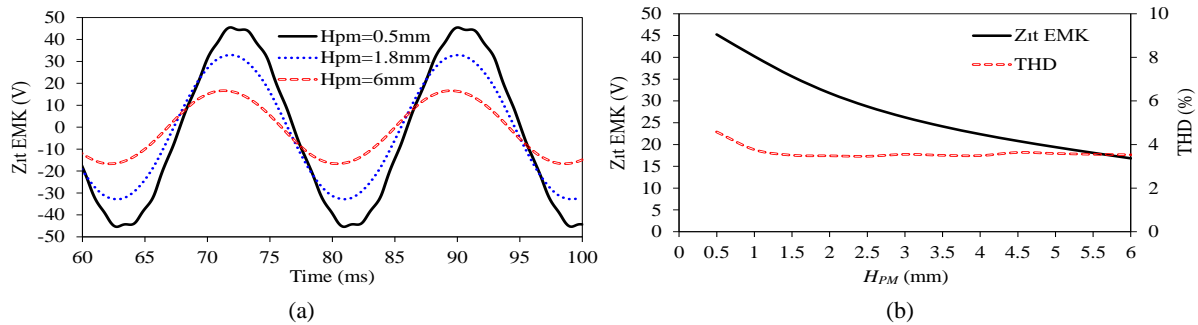
Şekil 25. Zıt EMK düşük mertebe harmoniklerinin H_{PM} 'a göre değişimi (Variation of low order harmonic content of back-EMF with respect to H_{PM}).



Şekil 26. Öz ve ortak endüktans değerlerinin H_{PM} 'e göre değişimi (Variation of self- and mutual-inductance with respect to H_{PM}).



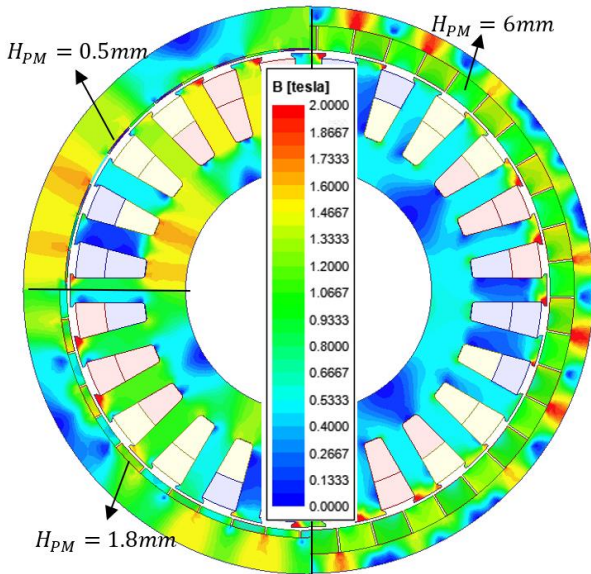
Şekil 23. H_{PM} parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgalılığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of H_{PM} : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).



Şekil 24. H_{PM} parametrik analiz sonuçları: (a) Zıt EMK dalga şeklinin değişimi; (b) Zıt EMK etkin değeri ve THD yüzdesinin değişimi (Parametric analysis results of H_{PM} : (a) Variation back-EMF waveform; (b) Variation of back-EMF rms value and THD percentage).

3.9. Şaft Çapı D_{si} (Shaft Diameter)

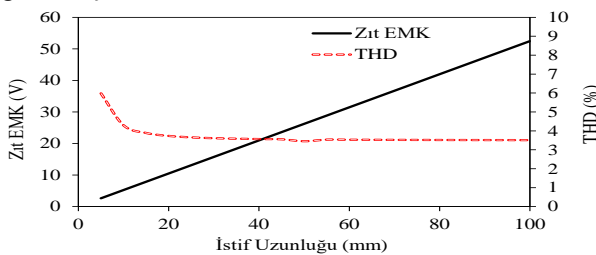
Şaft çapı parametresi diğer bir deyişle stator iç çapı; kabul edilebilir değerler aralığında seçildiğinde, genel olarak performans karakteristikleri üzerinde en az etkisi olan parametredir. Şekil 30 ve Şekil 31’de verilen analiz sonuçları incelendiğinde, şaft çapının 65mm’nin üzerine çıktığı değerlerde manyetik doyma (stator boyunduruğu bölgesinde) meydana geldiğinden ortalama moment, verim ve zıt EMK etkin değerinde düşüşler meydana gelmektedir. Şekil 31(b)’de görüldüğü gibi 60mm’nin üzerindeki değerlerde, zıt EMK’nin 3’üncü harmonik bileşeni ani bir şekilde artmaktadır. Ayrıca, 60mm’in üzerindeki değerlerde moment dalgalılığı artmaktadır.



Şekil 27. Akı yoğunluğu dağılımlarının H_{PM} 'e göre değişimi (Variation of flux line distribution with respect to H_{PM}).

3.10. İstif Uzunluğu (Stack Length)

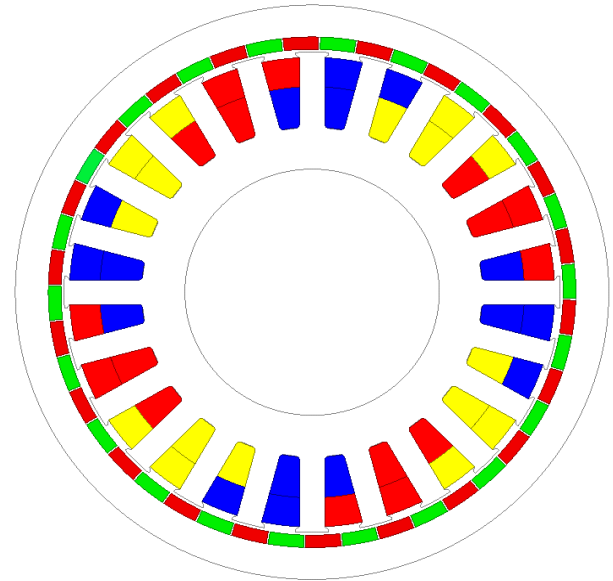
İstif uzunluğunun KMVM'nin performans karakteristiklerine olan etkisi parametrik olarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 32 ve Şekil 28’de verilmiştir. İstif uzunluğu genel olarak manyetik devre özelliklerini değiştiren bir parametre olmadığından, ortalama moment ve zıt EMK genliği, istif uzunluğuyla doğru orantılı olarak, lineer bir artış göstermiştir. Ayrıca, istif uzunluğunun 10mm'nin altında kalan uzunluklarında zıt EMK THD yüzdesinde artış görülmüştür.



Şekil 28. Zıt EMK etkin değerinin ve THD yüzdesinin istif uzunluğuna göre değişimi (Variation of back-EMF rms value and THD percentage with respect to stack length).

4. PARAMETRİK OLARAK EN İYİ TASARIMIN ELEKTROMANYETİK PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ (ELECTROMAGNETIC PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE PARAMETRICALLY BEST DESIGN)

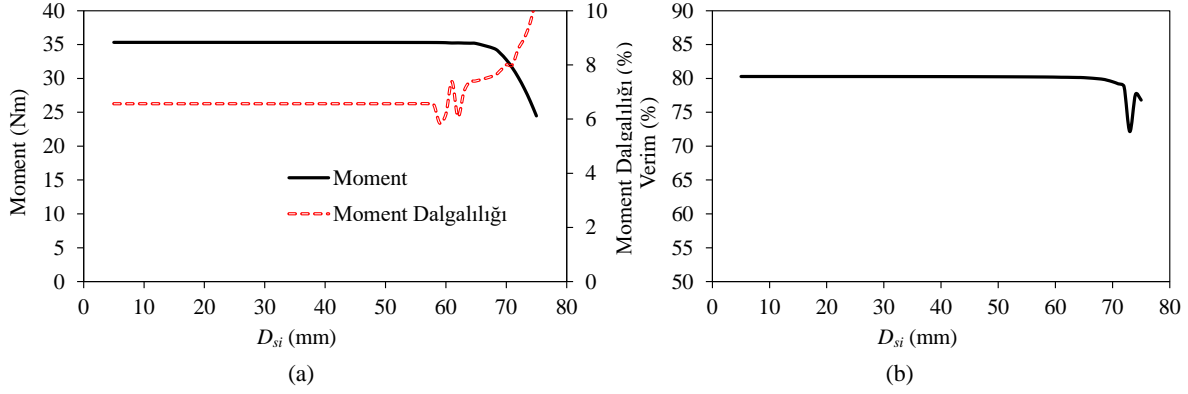
Bu kısımda, parametrik olarak; maksimum moment ve minimum moment dalgalılığı kriterlerini sağlayan en iyi tasarımın performans karakteristikleri incelenmiştir. En iyi tasarımın parametreleri Çizelge 2’de “İdeal Değer” olarak verilmiştir. Parametrik olarak en iyi tasarımın 2 boyutlu görünümü Şekil 29’de gösterilmiştir. Parametrik olarak en iyi olan tasarımın yüksüz ve yüklü durumdaki performans karakteristikleri aşağıdaki gibi ayrı ayrı incelenmiştir.



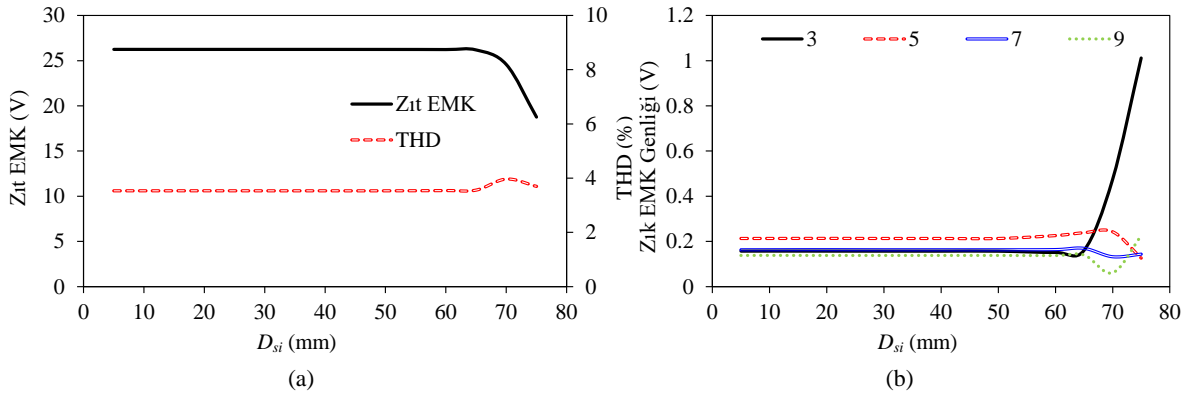
Şekil 29. Parametrik olarak iyileştirilmiş KMVM'nin iki boyutlu görünümü (Two-dimensional view of parametrically optimized PMVM).

4.1. Yüksüz Çalışma (No Load Operating)

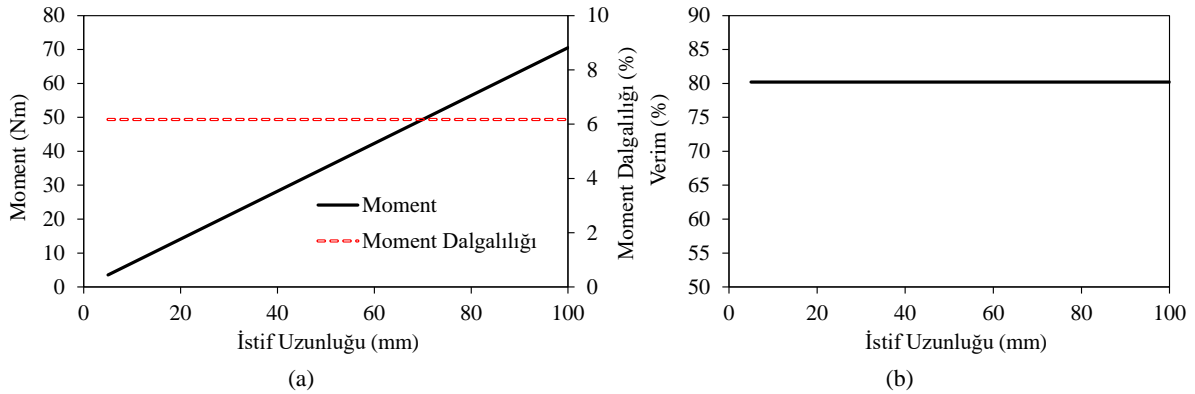
Yüksüz çalışma (faz akımı 0A iken) analizleri ile KMVM'lerin vuru moment ve generatör modunda zıt EMK değeri hesaplanabilir. Yüksüz çalışma durumunda elde edilen akı çizgileri ve akı yoğunluğu dağılımları Şekil 33’de verilmiştir. Akı çizgileri dağılımından rotor kutbunun 44, stator kutbunun ise 4 olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, mıknatısların ortalama akı yoğunluğunun yaklaşık 0.95T olduğu gözükmemektedir. Hava aralığı akı yoğunluğu dalga şekli ve harmonik dağılımı Şekil 34’de yüksüz durum için verilmiştir. Harmonik spektrumdan stator (sargı) ve rotor kutup sayılarının mertebesindeki temel harmonik bileşenleri ayrıca oluklanma ve manyetik doymanın (özellikle stator diş başlarında) ortak etkisinden dolayı oluşan harmonik bileşenleri de görülmektedir. Yüksüz çalışmada hava aralığı THD yüzdesi 36.82 olarak belirlemiştir. Zıt EMK dalga şekli ve harmonik bileşenleri Şekil 35’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi boşta çalışmada zıt EMK oldukça kaliteli bir sinüzoidal dalga şekline sahiptir.



Şekil 30. D_{rt} parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgallığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of D_{rt} : (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).



Şekil 31. D_{rt} parametrik analiz sonuçları: (a) Zıt EMK etkin değeri ve THD yüzdesinin değişimi; (b) Zıt EMK düşük mertebe harmoniklerinin değişimi (Parametric analysis results of D_{rt} : (a) Variation of back-EMF rms value and THD percentage; (b) Variation of low order harmonic content of back-EMF).

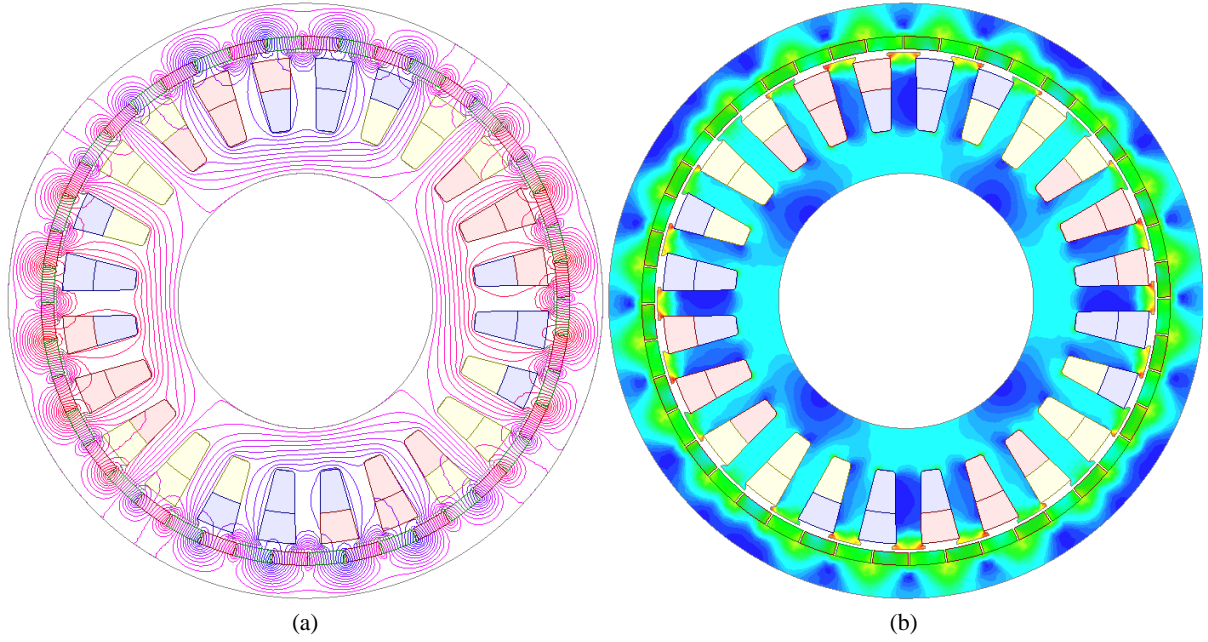


Şekil 32. İstif uzunluğu parametrik analiz sonuçları: (a) Ortalama moment ve moment dalgallığının değişimi; (b) Verimin değişimi (Parametric analysis results of stack length: (a) Variation of average moment and moment ripple; (b) Variation of efficiency).

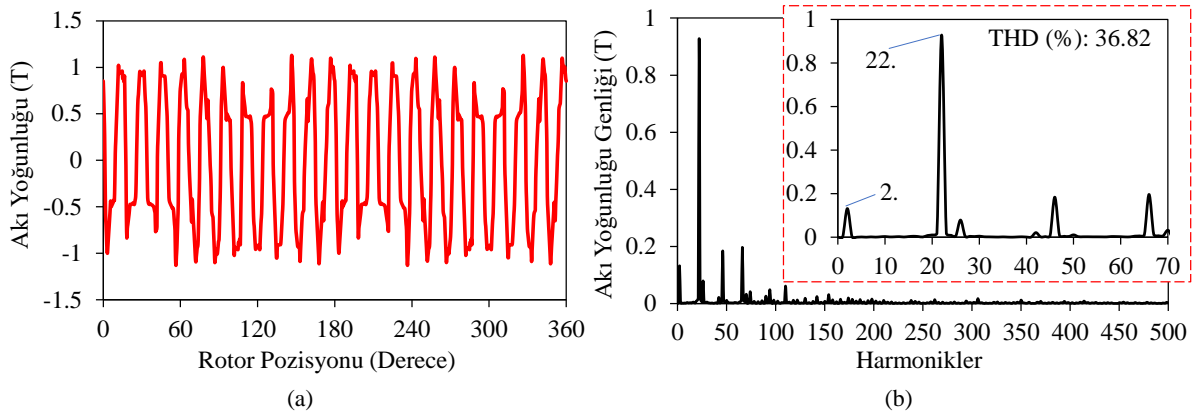
Vuruntu momenti dalga şekli ve harmonik spektrumu Şekil 36'da gösterilmiştir. Maksimum vuruntu momenti değeri yaklaşık 1 Nm ve genliği de 0.45 Nm'dir. Zıt EMK'nin etkin değeri rotor hızının bir fonksiyonu olarak Şekil 37'de gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi yaklaşık 7500 rpm'e kadar gerilim üretmek mümkündür. Ancak, 800 rpm'den sonra zıt EMK etkin değerinin eğimi değişmiştir. Bu da, bu hız değerinden sonra nüvenin doyuma başladığının bir göstergesidir.

4.2. Yüklü Çalışma (Full Load Operating)

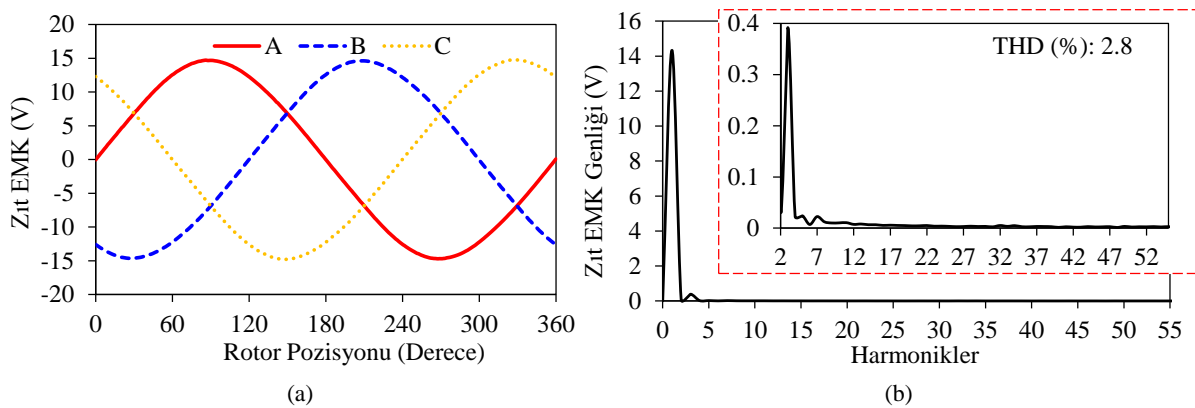
Yüklü çalışma 24 A (tepe) faz akımı, 5° akım açısı ve 150 rpm rotor hızında gerçekleşmiştir. Yüklü çalışma durumunda, tasarımın akı çizgisi ve akı yoğunluğu dağılımları Şekil 39'da verilmiştir. Akı çizgileri dağılımından, 4 adet elektriksel kutup ve elektriksel kutup başına 11 adet rotor kutbu oluştuğu anlaşılmaktadır. Akı yoğunluğu dağılımından ise stator diş başlarında lokal manyetik doyumların oluştuğu ve ortalama akı yoğunluğunun yaklaşık 0.95 T olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 33. Yüksüz çalışma durumunda manyetik alan dağılımları: (a) akı çizgisi; (b) akı yoğunluğu (Magnetic field distributions under no load: (a) flux line; (b) flux density).



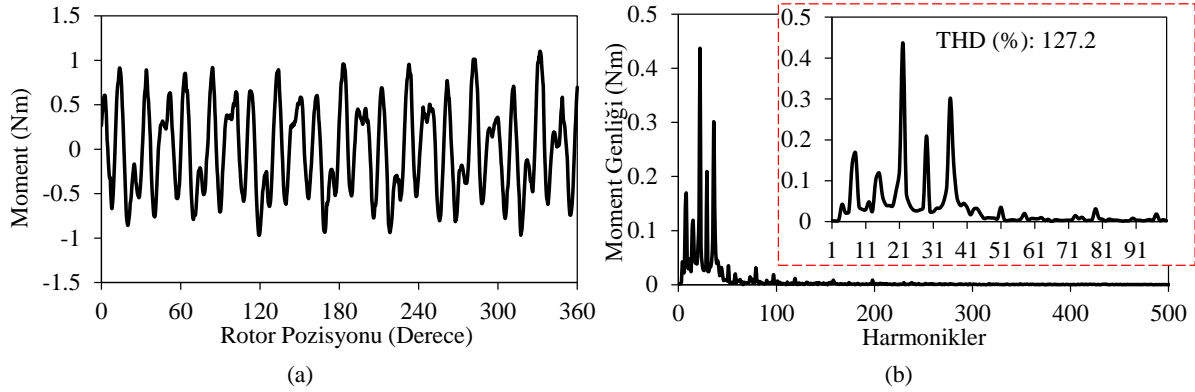
Şekil 34. Yüksüz durumda hava aralığı akı yoğunluğu analizi: (a) Dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Air-gap flux density analysis under no load: (a) waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).



Şekil 35. Yüksüz durumda zıt EMK analizi: (a) Dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Back-EMF analysis under no load: (a) Waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).

Yüklü çalışma durumundaki hava aralığı akı yoğunluğu ve harmonik spektrumu Şekil 38'de verilmiştir. Yüksüz duruma kıyasla, harmonik dağılımları neredeyse aynı iken, genliklerinin farklı olduğu gözlemlenmektedir.

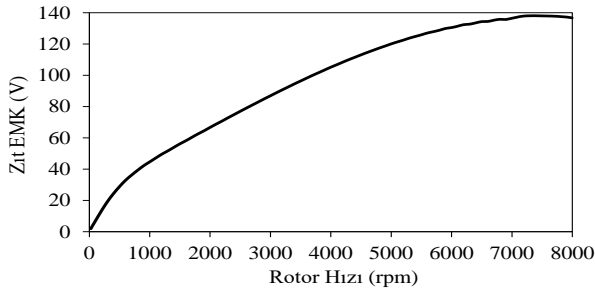
Bu da gösteriyor ki, yüklü durumdaki manyetik doymanın etkisi ihmal edilecek kadar azdır. Zaten bu durum Şekil 38(b)'den de fark edilmektedir. Öz ve ortak endüktansın rotor konumuna göre değişimleri Şekil 40'da gösterilmiştir. Öz ve ortak endüktans arasındaki



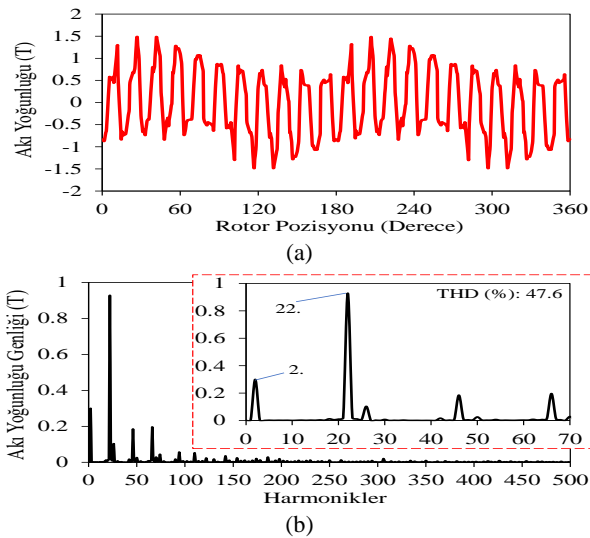
Şekil 36. Vuruntu momenti: (a) dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Cogging torque: (a) Waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).

farkın yüksek olması, arıza toleransının yüksek olması demektir. Burada, klasik sargı tekniği kullanıldığı için, fazlar arası arıza meydana gelme olasılığı oldukça düşüktür. Yüklü durumdaki zıt EMK dalga şekli ve harmonik dağılımı Şekil 41’de gösterilmiştir.

Görüldüğü gibi; yüklü durumdaki zıt EMK THD’si, yüksüz duruma göre daha azdır. Bunun altında yatan ana sebep ise, zıt EMK’nın temel bileşeninin genliğinin artmış (yüksek) olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, düşük mertebedeki harmonik bileşenlerinin genliğinde de bir azalma gözükmiştir.



Şekil 37. Zıt EMK’nın rotor hızı ile değişimi (Variation of Back EMF with respect to rotor speed).



Şekil 38. Yüklü durumda hava aralığı akı yoğunluğu analizi: (a) Dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Air-gap flux density analysis under full load:

(a) Waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).

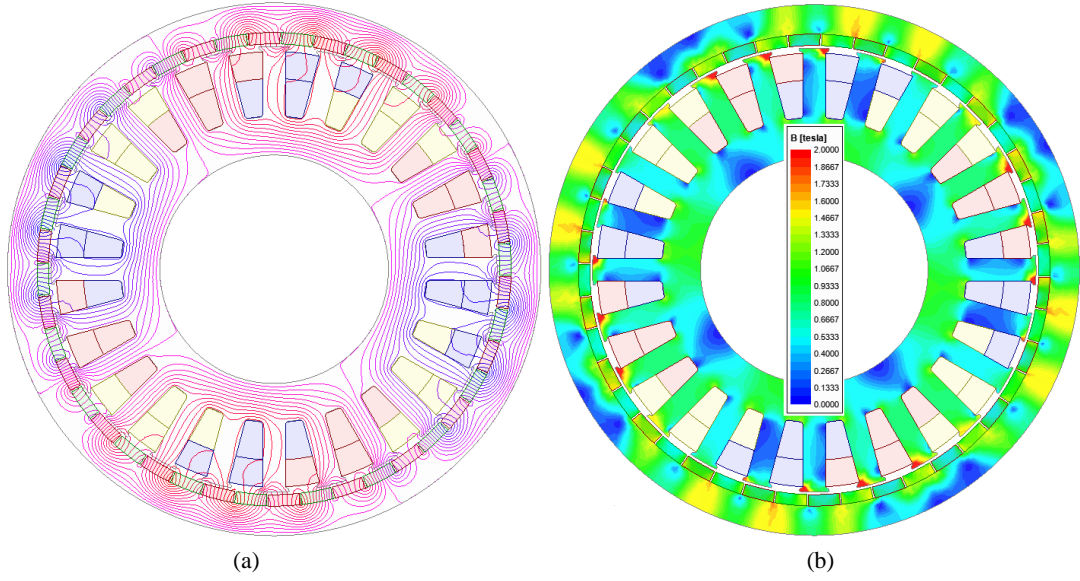
Yüklü çalışma durumunun elde edilen moment dalga şekli ve harmonik spektrumu Şekil 42’de gösterilmiştir. Yüklü durumda ortalama moment değeri yaklaşık 34.5 Nm ve moment dalgalılığı %5.6 olarak elde edilmiştir. Diğer önemli performans karakteristikleri Çizelge 3’de verilmiştir. 140 mm dış çap ve 50 mm istif uzunluğuna sahip olan KMVM’nın hacim başına moment (bkz. Eşitlik (4)) değeri 46 olarak hesap edilmiştir. Literatürdeki benzer geometrik ölçülere sahip diğer KMVM’lara [5, 45–47] göre bu oran oldukça yüksektir. Bu da parametrik analizlerin oldukça faydalı olduğunun göstergesi olarak belirtilebilir.

$$TpV = \frac{4T_{avg}}{\pi D_{out}^2 l_{stack}} \quad (4)$$

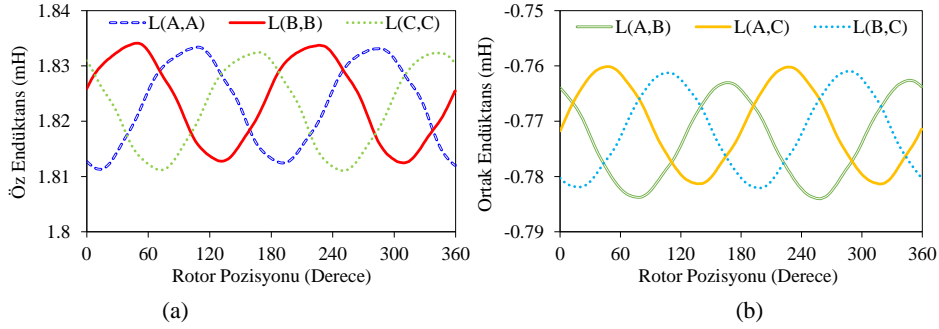
Hesaplanan güç kayıpları ve verim değerleri de Çizelge 3’de verilmiştir. Görüldüğü gibi 150 rpm çalışma hızında, en baskın kayıp tipi bakır kayıplarıdır. 550 W güç sınıfı için, verim değerinin oldukça iyi bir seviyede olduğu söylenebilir. Küresel (genel) optimizasyon yöntemi ile moment ve verim değerlerini daha yüksek seviyelere çıkarmak olanaklıdır. Burada unutulmamalıdır ki, sadece parametrik olarak en iyi tasarımın sonuçları sunulmuştur. Yani, geometrik parametrelerin bireysel etkileri incelenerek, en yüksek moment değerini veren parametrelere göre tasarım gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametrelerin birbiriyle olan ilişkileri yani çapraz korelasyonun etkisi bu çalışmada incelenmemiştir.

Çizelge 3. Temel Elektromanyetik Analiz Sonuçları (Key Electromagnetic Analysis Results)

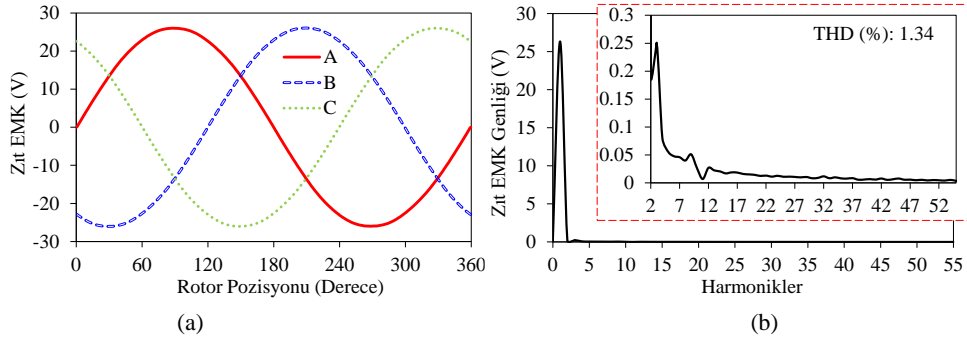
Parametre	Değer
Ortalama Moment (W)	35.4
Güç (Nm)	556
Hacim Başına Moment (kNm/m ³)	46
Moment Dalgalılığı (%)	5.621
Nüve Kaybı (W)	6.63
Mıknatis Kaybı (W)	4.31
Bakır Kaybı (W)	70.61
Verim (%)	80.214



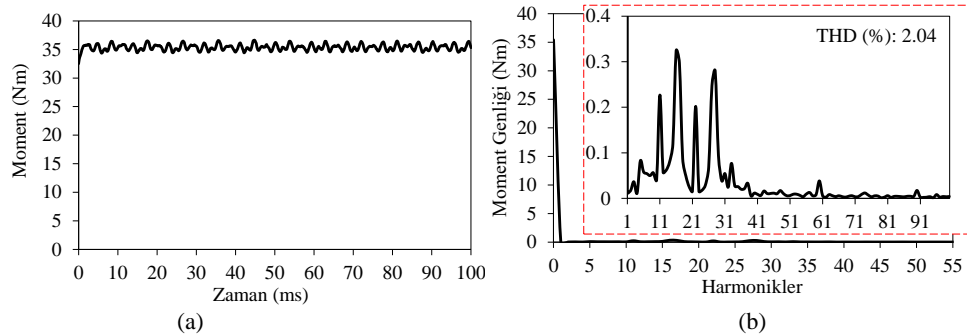
Şekil 39. Yüklü çalışma durumunda manyetik alan dağılımları: (a) akı çizgisi; (b) akı yoğunluğu (Magnetic field distributions under full load: (a) Flux line; (b) Flux density)



Şekil 40. Öz ve ortak endüktans değerlerinin rotor pozisyonuna göre değişimleri (Variations of self- and mutual inductances with respect to rotor position).



Şekil 41. Yüklü durumda zıt EMK analizi: (a) Dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Back-EMF analysis under full load: (a) Waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).



Şekil 42. Yüklü durumda moment analizi: (a) Dalga şekli; (b) Harmonik spektrumu ve THD yüzdesi (Electromagnetic torque analysis under full load: (a) Waveform; (b) Harmonic spectrum and THD percentage).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada; 24 stator oluğu, 4 elektriksel kutbu ve rotorunda 44 mıknatıs bulunan, dış rotorlu bir KMVM'nın geometriksel tasarım parametrelerinin, moment, moment dalgalılığı, zıt EMK ve verim gibi performans karakteristiklerine olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çizelge 4'de verildiği gibi bazı geometrik parametrelerin performans karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, bazılarının ise ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Çizelgede verilen kesirli değerlerin, kendilerine en yakın tam sayı değerlerinin arasında bir değerde olduğunu söylemekte fayda vardır. Ayrıca, Çizelge 4'den hangi parametrenin hangi performans karakteristikleri üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olduğu da anlaşılmaktadır. Farklı parametrelerin, performans karakteristikleri üzerinde farklı etkilerinin olmasının nedeni çoğunlukla manyetik doyma ve olukluluk etkilerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sayısal veriler ışığında, bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Genel anlamdaki en baskın tasarım parametreleri: λ_r , B_{s0} , B_{s1} ve H_{PM} olarak belirlenmiştir. Dolayısı ile bu parametreler çok dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.
- B_{s1} 'in (akım yoğunluğu sabitken) değişimi akım periyodunun kaymasına neden olmakla beraber, hemen hemen tüm performans karakteristiklerini etkiler. Sabit akım yoğunluğu koşulunda, bu parametrenin olabildiğince büyük olması, KMVM'nın daha iyi bir performans sunmasına olanak sağlar. Bu durumda sınırlayıcı unsur, inverter akımı olacaktır.
- B_{s0} 'ın olabildiğince büyük seçilmesi, daha iyi performans karakteristiklerinin elde edilmesini sağlar.
- H_{s0} genel olarak performans karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.
- g 'nin olabildiğince küçük seçilmesi performans açısından iyi ancak, mekanik toleranslar ve moment dalgalılığı dikkate alınmalıdır.
- λ_r ve E_{PM} parametreleri için maksimum momenti sağlayan sadece bir değer mevcuttur.
- H_{PM} 'in maksimum moment ve verim açısından ideal olan bir değeri vardır. Bu parametrenin idealden büyük olması manyetik doymayı arttıracığından, performans karakteristikleri kötü yönde etkilenmektedir. Ayrıca, bu parametrenin büyüklüğü, zıt EMK genliği ile ters orantılıdır.
- D_{si} parametresi, stator boyunduruğundan geçen akıyı sınırlamadığı sürece, performans karakteristiklerine bir etkisi yoktur.
- İstif uzunluğunun ortalama moment ve zıt EMK genliği üzerinde doğrusal etkisi olmasına karşın, moment dalgalılığı ve verim üzerinde herhangi bir

etkisi yoktur. Zıt EMK THD'si üzerinde ise 15mm'den küçük değerler için negatif bir etki göstermektedir.

- Genel olarak manyetik doymadaki artış, moment dalgalılığını arttırmaktadır.

Çizelge 4. Geometrik Parametrelerin Performans Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Karşılaştırılması (Comparison of The Influence of Geometric Parameters on Performance Characteristics)*

	Moment	Moment Dalgalılığı	Verim	Zıt EMK Genliği	Zıt EMK THD
λ_r	3	3	2	3	0.5
B_{s1}^*	1	0	3	2	0.5
B_{s1}^{**}	3	3	2.5	3	2
B_{s0}	3	3	2	1	3
H_{s0}	0.5	1.5	0.5	0	0
g	3	3	3	3	0
E_{PM}	3	2.5	1.5	1.5	1
H_{PM}	3	3	2.5	3	3
D_{ri}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
l_{stack}	3	0	0	3	0.5

Anahtar: 0 – İhmal Edilebilir; 1 – Az; 2 – Orta; 3 – Çok Fazla (Baskın).
*Akım yoğunluğu değişken. **Akım yoğunluğu sabit.

Bu çalışmada, en önemli tasarım parametrelerinin temel performans karakteristikleri üzerine olan bireysel etkileri incelenmiş, parametrik olarak en iyi KMVM tasarımının nasıl olacağına ilişkin bilgiler verilmiştir. Bu veriler ışında; ortalama moment ve verimi en üst seviyeye çıkarılabilir ve uygun oluk ve mıknatıs geometrik parametreleri seçilerek moment dalgalılığı ve güç kayıpları aynı anda en aza indirilebilir. Bu işlem, çok amaçlı küresel optimizasyon yöntemi kullanılarak kolayca gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada sunulan geometrik tasarım parametrelerinin dışında, farklı dağıtılmış ve konsantre sargı yapılarının ve farklı nüve ve kalıcı mıknatıs malzemelerinin KMVM'ların performansına olan etkisi gelecekteki bir çalışmada incelenecektir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

YAZAR KATKILARI (AUTHOR'S CONTRIBUTIONS)

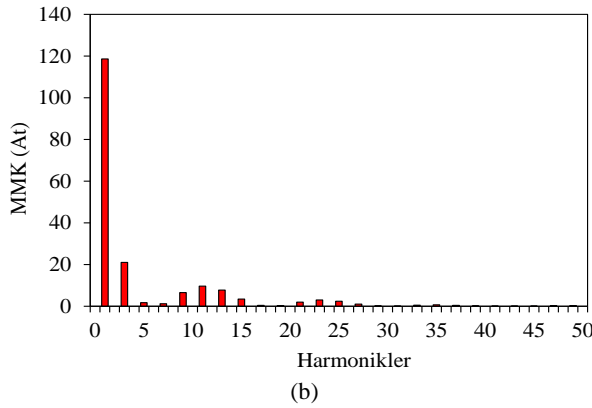
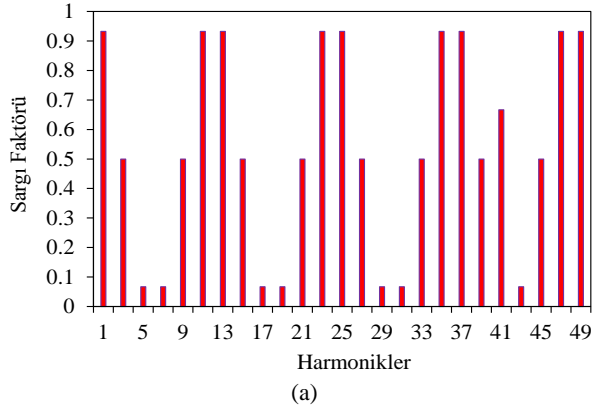
Tayfun GÜNDOĞDU: Tüm nümerik ve analitik hesaplamaları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Performed all numerical and analytical calculations, analyzed the results, and wrote the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

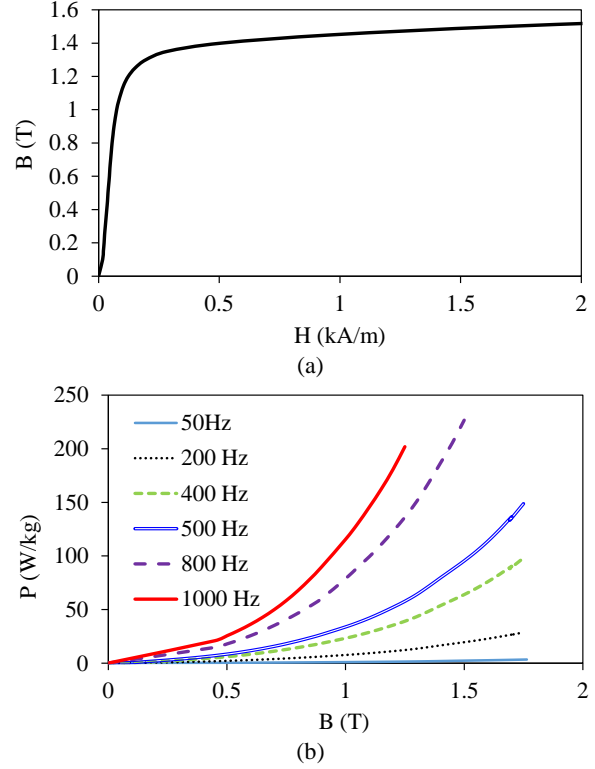
EKLER (APPENDICES)

Parametrik analizlerde kullanılan KMVM için belirlenen 24-oluk, 4-kutup kombinasyonu için seçilmiş olan çift tabakalı 5-adımlı sargıya ait sargı faktörü ve MMF harmonikleri Şekil E.1'de gösterilmiştir. Sabit akım için, yüksek moment ve düşük mıknatıs kayıpları elde etmek için bu bobin adımı azaltılmış klasik sargı yapısı kullanılmıştır. Sargı uzay harmoniklerinin kalıcı mıknatıslı makinelerin performanslarına olan etkisi ile ilgili detaylı çalışmalar literatürde mevcuttur [48, 49].



Şekil E.1. 24-oluk, 4-kutulu, çift tabakalı, 5-bobin adımlı klasik dağıtılmış sargı için: (a) sargı faktörü harmonikleri; (b) MMK harmonikleri (Winding characteristics for inter slot distributed windings having 24-slot, 4-pole, double-layer, 5-coil pitch: (a) winding factor harmonics; (b) MMF harmonics).

Analizlerde kullanılan nüve ve kalıcı mıknatıs malzemelerinin detaylı spesifikasyonları Şekil E.2 ve Çizelge E.1'de verilmiştir.



Şekil E.2. M270-50A nüve malzemesinin manyetik özellikleri: (a) mıknatıslanma (BH) eğrisi, (b) Farklı frekanslar için kayıp (BP) eğrileri (Magnetic properties of M270-50A core material: (a) magnetization (BH) curve, (b) loss (BP) curves for different frequencies).

Çizelge E.1. Nüve ve Mıknatıs Malzemelerinin Özellikleri (Properties of Core and Magnet Materials)

M270-50A (Isovac)			
Bağlı Geçirgenlik μ_r (1.5T)	Levha Kalınlığı (mm)	Elektrik Direnci ($\mu\Omega\text{cm}$)	Kütle Yoğunluğu (g/cm^3)
700	0.5	64.5	7.6
Sinterlenmiş Neodimyum-Demir-Bor Mıknatıslar			
Artık indüksiyon B_r (T)	Koersivite H_{CB} (kA/m)	Maksimum Enerji BH_{\max} (kJ/m^3)	Kütle Yoğunluğu (g/cm^3)
1.2	907	283	7.6

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Lee, C. H., "Vernier motor and its design", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 82 (66): 343-349, (1963).
- Ishizaki, A., Tanaka, T., Takahashi, K., Nishikata, S., "Theory and optimum design of PM vernier motor", *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, 208-212, (1995).
- Atallah, K., Howe, D., "A novel high-performance magnetic gear", *IEEE Transactions on Magnetics*, 37 (4): 2844-2846, (2001).
- Toba, A., ve Lipo, T., "Generic torque-maximizing design methodology of surface permanent-magnet vernier machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36 (6): 1539-1546, (2000).
- Niu, S., Ho, S. L., Fu, W. N., Wang, L. L., "Quantitative comparison of novel vernier permanent magnet

- machines", *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (6): 2032–2035, (2010).
- [6] Li, D., Qu, R., Li, J., Xu, W., "Design of consequent pole, toroidal winding, outer rotor vernier permanent magnet machines", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2342–2349, (2014).
- [7] Qu, R., Li, D., Wang, J., "Relationship between magnetic gears and vernier machines", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1–6, (2011).
- [8] Gerber, S., ve Wang, R. J., "Design and evaluation of a magnetically geared pm machine", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (8): 1–10, (2015).
- [9] Li, D., ve Qu, R., "Sinusoidal back-emf of vernier permanent magnet machines", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1–6, (2012).
- [10] Jian, L., Xu, G., Mi, C. C., Chau, K. T., Chan, C.C., "Analytical method for magnetic field calculation in a low-speed permanent-magnet harmonic machine", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26 (3): 862–870, (2011).
- [11] Fu, W., ve Ho, S., "A quantitative comparative analysis of a novel flux-modulated permanent-magnet motor for low-speed drive", *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (1): 127–134, (2009).
- [12] Yang, J., vd., "Quantitative comparison for fractional-slot concentrated-winding configurations of permanent-magnet vernier machines", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (7): 3826–3829, (2013).
- [13] Zhu, Z., ve Liu, Y., "Analysis of air-gap field modulation and magnetic gearing effect in fractional-slot concentrated-winding permanent-magnet synchronous machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (5): 3688–3698, (2018).
- [14] Xu, L., vd., "Quantitative comparison of integral and fractional slot permanent magnet vernier motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30 (4): 1483–1495, (2015).
- [15] Li, D., vd., "Analysis of torque capability and quality in vernier permanent-magnet machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (1): 125–135, (2016).
- [16] Liu, C., Chau, K. T., Zhong, J., W., Li, Li, F., "Quantitative comparison of double-stator permanent magnet vernier machines with and without hts bulks" *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22 (3): 5202405–5202405, (2012).
- [17] Liu, C., "Emerging electric machines and drives—an overview", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (4): 2270–2280, (2018).
- [18] Liu, G., Fan, X., Zhao, W., Xu, L., Chen, Q., "Analysis of magnet material effects on performances of fault-tolerant pm vernier machines", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (7): 1–5, (2016).
- [19] Li, G. L., ve Zhu, Z. Q., "Analytical modeling of modular and unequal tooth width surface-mounted permanent magnet machines", *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (9): 1–9, (2015).
- [20] Song, Z., Pei, Y., Li, Y., Li, S., Chai, F., "Analysis of vibration in modular fault-tolerant pmsm under one-phase open-circuit fault", *International Conference on Electrical Machines*, 2565–2571, (2018).
- [21] Song, Z., Yu, Y., Chai, F., Tang, Y., "Radial force and vibration calculation for modular permanent magnet synchronous machine with symmetrical and asymmetrical open-circuit faults", *IEEE Transactions on Magnetics*, 54 (11): 1–5, (2018).
- [22] Li, D., Qu, R., Xu, W., Li, J., Lipo, T. A., "Design procedure of dual-stator spoke-array vernier permanent-magnet machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (4): 2972–2983, (2015).
- [23] Öner, Y., Zhu, Z. Q., Chu, W., "Comparative study of vernier and interior pm machines for automotive application", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–6, (2016).
- [24] Du, Z. S., ve Lipo, T. A., 2017. "Torque performance comparison between a ferrite magnet vernier motor and an industrial interior permanent magnet machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (3): 2088–2097, (2017).
- [25] Liu, G., Yang, J., Zhao, W., Ji, J., Chen, Q., Gong, W., "Design and analysis of a new fault-tolerant permanent-magnet vernier machine for electric vehicles", *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (11): 4176–4179, (2012).
- [26] Sui, Y., vd., "A novel five-phase fault-tolerant modular in-wheel permanent-magnet synchronous machine for electric vehicles", *Journal of Applied Physics*, 117, (2015).
- [27] Fan, X., vd., "Influence of magnet materials on performances of fault-tolerant permanent-magnet vernier machines", *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, 135–136, (2015).
- [28] Kwon, H. S., Ro, J. S., Jung, H. K., "Influence of a rotor eddy current on performance of a vernier permanent-magnet machine", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2822–2825, (2018).
- [29] Moldovan, D. V., Jurca, F. N., Marțiș, C. S., Minciunescu, P., Vărățeanu, B., "The influence of permanent magnets' position in the double stator vernier machine's performances", *Electric Vehicles International Conference*, 1–5, (2019).
- [30] Liu, G., Sui, Y., Liu, J., Wang, M., Yang, L., Zheng, P., "Comparison of vernier machines with different rotor pm configurations", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1–4, (2019).
- [31] Wu, L., Qu, R., Li, D., Gao, Y., "Influence of pole ratio and winding pole numbers on performance and optimal design parameters of surface permanent-magnet vernier machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (5): 3707–3715, (2015).
- [32] Li, H., Zhu, Z. Q., Liu, Y., "Optimal number of flux modulation pole in vernier permanent magnet synchronous machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55 (6): 5747–5757, (2019).
- [33] Xu, L., Zhao, W., Wu, M., Ji, J., "Investigation of slot-pole combination of dual-permanent-magnet-excited vernier machines by using air-gap field modulation theory", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5 (4): 1360–1369, (2019).
- [34] Ren, X., Li, D., Qu, R., Yu, Z., Gao, Y., "Investigation of spoke array permanent magnet vernier machine with alternate flux bridges", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (4): 2112–2121, (2018).
- [35] Li, D., Qu, R., Lipo, T., "High power factor vernier permanent magnet machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (6): 3664–3674, (2014).
- [36] Zhang, J., vd., "Quantitative design of a high performance permanent magnet vernier generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, 53 (11): 1–4, (2017).
- [37] Zhao, X., Niu, S., Fu, W., "Torque component quantification and design guideline for dual permanent magnet vernier machine", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55 (6) 1–5, (2019).
- [38] Kim, B., Lipo, T. A., "Operation and design principles of a pm vernier motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (6): 3656–3663, (2014).
- [39] Kim, B., Lipo, T. A., "Design of a surface PM vernier motor for a practical variable speed application", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 776–783, (2015).

- [40] Wang, Q., Niu, S., "Overview of flux-controllable machines: electrically excited machines, hybrid excited machines and memory machines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 (1): 475–491, (2017).
- [41] *IEC Standarts*, IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code).
- [42] Moreira, J. C., Lipo, T. A., "Modeling of saturated ac machines including air gap flux harmonic components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28 (2): 343–349, (1992).
- [43] Gundogdu, T., Zhu, Z. Q., Mipo, J. C., "Influence of stator slot and pole number combination on rotor bar current waveform and performance of induction machines", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1–6, (2017).
- [44] Gundogdu, T., Zhu, Z. Q., Mipo, J. C., Farah, P., "Influence of magnetic saturation on rotor bar current waveform and performance in induction machines", *International Conference on Electrical Machines*, 391–397, (2016).
- [45] Xu, L., vd., "Quantitative comparison of integral and fractional slot permanent magnet vernier motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30 (4): 1483–1495, (2015).
- [46] Xu, L., Liu, G., Zhao, W., Ji, J., Fan, X., "High-performance fault tolerant halfbach permanent magnet vernier machines for safety-critical applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, 52 (7): 1–4, (2016).
- [47] Zhao, W., Sun, X., Ji, J., Liu, G., "Design and analysis of new vernier permanent-magnet machine with improved torque capability", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4): 1–5, (2016).
- [48] Bianchi, N. Fornasiero, E., "Impact of MMF space harmonic on rotor losses in fractional-slot permanent-magnet machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (2): 323-328, (2009)
- [49] Gundogdu, T, Komurgoz, G., "Investigation of winding MMF harmonic reduction methods in IPM machines equipped with FSCWs". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29 (e2688): 1-27, (2019).