

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA MOMENT
İYİLEŞTİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Efe TURHAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA MOMENT
İYİLEŞTİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Efe TURHAN
(504101012)**

**Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Lale Tükenmez Ergene

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101012 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Efe TURHAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA MOMENT ENİYİLEMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Lale Tükenmez ERGENE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

Fırçasız doğru akım makinaları, mıknatıs ve sürücü devrelerinin maliyetlerinin azalmasıyla endüstride birçok uygulamada tercih edilen bir motor türü haline gelmiştir. Burada yapılan çalışma dış rotorlu fırçasız doğru akım makinaları ile temel bilgileri sunmakla birlikte dış rotorlu bir fırçasız doğru akım motorunun sonlu elemanlar yöntemi ile performans analizi ve mevcut motorun stator yapısında değişiklik yapılarak ortalama momentini iyileştirme çalışmaları sunulmaktadır.

Tez çalışmam ve yüksek lisans öğretim dönemim boyunca bana çok destek olan ve yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Lale Tükenmez ERGENE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Manevi olarak sürekli yanımda olan ve beni destekleyen aileme buradan en içten dileklerle teşekkür ederim. Her zaman yanımda olup bana güç veren, bu tezin yazılması sırasında fikir, görüş ve yardımlarını esirgemeyen Ece AKYALÇIN'a da sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunuyorum. Yüksek lisans ve çalışma hayatında birlikte okuduğumuz Aydın DİKKULAK ve Ferit GÜLER'e destekleri ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Efe TURHAN
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MAKİNELERİ.....	9
2.1 Giriş ve Temel Tanımlar	9
2.2 Konstrüksiyon	10
2.2.1.1 İç rotorlu FDAM.....	11
2.2.1.2 Dış rotorlu FDAM	11
2.3 Sürekli Hal Çalışma Prensibi	13
2.4 Senkron Endüktans.....	15
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	17
3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminde Manyetik Analiz	17
4. MOTOR MODELLEME VE MOMENT İYİLEŞTİRME.....	21
4.1 Motor Parametreleri	21
4.2 Sonlu Elemanlar Modeli.....	23
4.3 Performans Analizleri	24
4.4 İyileştirme Çalışmaları	27
4.4.1.1 Boyunduruk bağlantı açısı iyileştirme	29
4.4.1.2 Hava aralığı.....	32
4.4.1.3 Boyunduruk açısı ve hava aralığının birlikte incelenmesi.....	39
4.4.1.4 Vuruntu momenti analizi	40
4.4.1.5 Senkron endüktans analizi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	45
6. KAYNAKLAR	47
7. ÖZGEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

FDAM : Fırçasız Doğru Akım Motoru
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1: Referans motorun özellikleri.	22
Çizelge 4.2: Referans motorun saha performans sonuçları.	24
Çizelge 4.3: Farklı açılarda zamana bağlı moment değişimi.	30
Çizelge 4.4: Farklı hava aralığı değerlerinde ortalama moment.	34
Çizelge 4.5: Farklı hava aralığı değerlerinde ortalama hız.	35
Çizelge 4.6: Farklı hava aralığı değerlerinde görünür güç.	37

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : x_A 'nın fonksiyonu olarak üretilebilecek moment[5]	3
Şekil 1.2 : 3 Fazlı İç Rotorlu Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Akı Çizgileri (a) İlk Model, (b)Optimize Edilmiş Model [7]	4
Şekil 1.3 : (a) Referans yapı, (b) oluklu yapı, (c) yuvarlatılmış yapı, (d) en uygun yapı [24]	6
Şekil 1.4 : FDAM hava aralığı profili [25]	7
Şekil 2.1 : Dış rotorlu sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinesi yapısı	10
Şekil 2.2 : (a) İç rotorlu (b) dış rotorlu motor örneği [31]	11
Şekil 2.3 : (a) gömülü (b) yüzey montaj mıknatıslı dış rotor tasarımları	12
Şekil 2.4 : FDAM sürekli hal eş değer devresi	13
Şekil 2.5 : Fazör diyagramı [32]	15
Şekil 4.1 : Referans FDAM kesiti	21
Şekil 4.2 : Stator dişi ölçüleri	22
Şekil 4.3 : Motor faz sargılarının oluklara dağılımı	22
Şekil 4.4 : FDAM elektrik devre şeması	23
Şekil 4.5 : Dış rotorlu FDAM sonlu elemanlar modeli	24
Şekil 4.6 : Referans motorun akı yoğunluğu	25
Şekil 4.7 : Referans motorun eş akı eğrileri	25
Şekil 4.8 : Motorun kalmış momenti ve sürekli hal momenti	26
Şekil 4.9 : Motorun hızlanma eğrisi	26
Şekil 4.10 : Motorun çıkış gücü	26
Şekil 4.11 : Motor görünür güç eğrisi	27
Şekil 4.12 : Faz akımları	27
Şekil 4.13 : Optimizasyon için seçilen stator diş parametreleri	29
Şekil 4.14 : Boyunduk bağlantı açısının değişimi	29
Şekil 4.15 : Farklı açılarda zaman bağlı moment değişimi	30
Şekil 4.16 : Farklı açılarda zaman bağlı hız eğrileri	31
Şekil 4.17 : Bağlantı açısı ile ortalama manyetik moment değişimi	32
Şekil 4.18 : Bağlantı açısı ile ortalama hız değişimi	32
Şekil 4.19 : Hava aralığının 1mm'den 5mm'e 0.5mm aralıkla değişimi	33
Şekil 4.20 : Manyetik momenti hava aralığının değişimi ile karşılaştırılması	34
Şekil 4.21 : Motor hızının hava aralığının değişimi ile karşılaştırılması	35
Şekil 4.22 : Hava aralığı ile ortalama manyetik moment değişimi	36
Şekil 4.23 : Hava aralığı ile ortalama hız değişimi	36
Şekil 4.24 : Görünür gücün hava aralığı ile değişimi	37
Şekil 4.25 : Ortalama görünür gücün hava aralığı ile değişimi	37
Şekil 4.26 : Aynı hızda çalışan farklı iki motorun moment eğrileri	38
Şekil 4.27 : Tasarım parametrelerinin kombinasyonların ile ortalama moment değişimi	39
Şekil 4.28 : İyileştirilen motorlar ve referans motorun moment karşılaştırması	40

Şekil 4.29 : Farklı motorlarda vurunu momenti eğrilerinin karşılaştırılması	41
Şekil 4.30 : Vurunu momentlerin harmonik analizi	41
Şekil 4.31 : Farklı motor tasarımlarında akı yoğunluğunun normal bileşeni	42
Şekil 4.32 : Akı yoğunluğu normal bileşenleri harmonik dağılımı	42

DIŞ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA MOMENT ENİYİLEMESİ

ÖZET

Fırçasız doğru akım motorları (FDAM) günümüzde birçok uygulamada yüksek performans değerleri sayesinde ön plana çıkmaktadır. Zaman içinde çeşitli uygulamalara yönelik çok sayıda FDAM tasarımı ortaya çıkmıştır. Yüksek moment ve eylemsizlik gerektiren uygulamalarda, dış rotorlu FDAM'ler yüksek moment yoğunluğu sunması nedeniyle diğer FDAM tasarımlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Dış rotorlu motorların en önemli özelliklerinden biri yüksek moment yoğunluğu olduğu için ortalama momenti arttıracak yöntemlerin araştırılması popüler bir konudur. Dış rotorlu FDAM'lerde ayrıca önemli bir diğer konuda moment dalgalanmalarına neden olan moment bileşenlerinin incelenmesi konusudur. Özellikle vuruş moment, motorun düşük hızlarda sürekli hal çalışmasını etkileyen önemli bir moment bileşenidir.

Bu tezde, çamaşır makinası motoru olarak kullanılan bir dış rotorlu FDAM üzerinde moment iyileştirme çalışması yapılmıştır. Referans motor üretiminde olduğu ve yapılan iyileştirme çalışmalarının uygulanabilir olması için, motorun boyutlarını ve üretim sürecini değiştirmeyecek yapısal iyileştirme çalışmaları yapılması düşünülmüştür. Bu nedenle motorun stator dışı üzerinde yapısal değişiklikler yapılarak moment artışı sağlanmaya çalışılmıştır.

Literatürde çeşitli motorlar için yapılan yapısal iyileştirme çalışmalarında deneysel ve istatistiksel yöntemler kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemler sayesinde iyileştirme süreçlerinde harcanan zaman azaltılarak, tasarımcılara kolaylık sağladığı belirtilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda, stator dışının tasarım parametrelerinin motorun momenti ve vuruş moment üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalar deneysel ve istatistiksel yöntemlere dayandığı için her motor tasarımı için aynı etkiler görülmeyebilir. Bu tezde literatürde yapılan çalışmalar incelenerek, dış rotorlu FDAM'lerin stator dışı parametrelerinden momenti en çok etkileyebileceği düşünülen stator dışı yüzey yarıçapı ve boyunduruk bağlantı açısı parametreleri ile iyileştirme çalışması yapılmıştır. İki parametre içinde çalışma sınırları tanımlanıp bu sınırlar içinde deneysel bir yöntem ile iyileştirme çalışmalarında bulunulmuştur.

Yapılan çalışmalarda, sadece hava aralığının şeklinin değiştirilmesi ile % 5.06'lık ortalama moment artışı sağlanırken, hava aralığı profilinin ve boyunduruk bağlantı açısını birlikte iyileştirilmesi durumunda referans motora göre %6.37'lik bir ortalama moment artışı sağlandığı gözlenmiştir. Bu çalışmada sadece stator dışı yapısı değiştirilerek sağlanan ortalama moment artışı dikkate değerdir. Sağlanan moment artışının yanı sıra vuruş momentinde ve relüktans momentinde de artış olduğu gözlenmiştir.

IMPROVING THE TORQUE BEHAVIOUR OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS WITH EXTERIOR ROTOR

SUMMARY

Brushless electrical motors were described in 1962 at the first time by T.G. Wilson and P.H. Trickey. At that time, magnets and switches did not have strong features, therefore these new technology electrical motors have been started to use in 1980. The developments of material technology and electronic drive circuits made brushless DC motors strong alternative against to other type of motors. Brushless DC motors do not have brush commutator, thus they are lighter and more efficient compared to conventional DC motors. Moreover, brushless DC motors can work at high speeds because of their magnetic structure.

Nowadays, brushless DC motors can be used in different areas such as robotic applications, space stations, etc. Different designs of brushless DC motors can meet the needs of different applications; therefore the usage of the Brushless DC motors is quite common in different areas. The exterior rotor Brushless DC motors have more advantages than the conventional motors at the low speeds, since they have an ability to work at higher torque and inertia ranges. Furthermore, they can be used in various applications without a gear system.

There are lots of publications in literature about the optimization of the exterior rotor DC motors. It can be seen in literature that various torque optimization methods use different drive techniques. In this thesis, only the structural changes of the motor are considered to enhance torque instead of changing the drive techniques of motor. Reference motor was simulated and tested before making any structural changes to improve the output torque.

The improvement studies not only decrease production costs but also increase the quality and performance of Brushless DC motors. The torque improvement of the Brushless DC motor's depends on the design parameters, the performance characteristics and the constraints of the system. In this thesis, a salient pole exterior rotor Brushless DC motor that was manufactured as a washing machine motor was chosen as the reference motor. According to the experimental results, a finite element model is improved in the design and simulation program which is used in order to simulate system. In this study, basic characteristic features like the phase number of motor, number of turn are kept as constants and the design of stator tooth is changed to find optimum output torque.

The DC motors used in washing machines have two working modes: washing mode and spinning mode (at high speeds). When the motor operates in the washing mode, the cogging torque becomes important because of low speed. In order to increase average torque of the DC motor at low speeds, the cogging torque should be considered carefully. In this study, the performance of the DC motor will be analyzed for different air gap and stator teeth configurations. Moreover, the relationship between

synchronous inductance and torque will be examined. The aim is increasing the torque of the motor for low speed operation mode to enhance average torque of the motor. Thus, the relation between synchronous inductances (L_d , L_q) and structural changes are considered for the torque improvement.

In chapter one, summary of the thesis and the literature review are included. Optimization techniques on structural design of brushless DC machines are given with advantages and disadvantages. Results are claimed that stator tooth design greatly affects cogging torque and output torque of motor. In these paper, some stator tooth parameters make more effects to increase the output torque than other parameters. Effective parameters are also changing related to the motor design, so selecting the parameters requires elimination process. Algorithms are generally used to decide the parameters. In this thesis, parameter are selected according to the literature results which uses genetic algorithm and taguchi design method. Both algorithms are powerful tools as an experimental and statistical optimization method. With the results in literature, design parameters are decided and according to parameters, new stator tooth designs are generated for simulations. All combinations of varying parameters are simulated in chapter four.

In chapter two, basics of the brushless DC machines are presented. Constructions of different kind of brushless DC machines are introduced, equivalent circuit equations and torque relations of the machine are examined. Salient poles machines have important inductance parameters which are called d-q inductances. Mathematical calculation of these inductances is also shown in this chapter.

In chapter three, Steady state and transient magnetic analysis of the motor are achieved by a commercial software (FLUX2D) based on the finite element method. Basics of the finite element method are also given with the related mathematical equations. Finite element method is the one of the best numerical solution for transient magnetic problems. Software program helps to obtain problem equations and solves the equations according to finite element method. In this thesis, finite element method solution is presented related to the problems which includes the electrical equations. Moreover the software has geometrical design tools for drawing physical environments. Geometrical designs take less time with macros and symmetrical shapes.

While simulations are running, changing design parameters according to results gives opportunity to use well-known optimization algorithms. Especially, genetic algorithm is a popular algorithm to search solutions with imitating evolutionary processes. Genetic algorithm produces a possible solution stack and uses the evolutionary processes to the solution stack. Each solution generation is analyzed and best solutions of the generation is kept for optimization process. Genetic algorithm has also weak points to find better solutions. Randomness of solution stack increases the simulation run time to approach better solutions. In this thesis, instead of genetic algorithm, experimental search algorithm is used for searching better average output moment for varying two stator parameters.

Modelling of the reference motor and making structural changes are presented in chapter four. The geometry of the stator tooth is modified under the motor constraints and various average torque values are obtained due to the different geometries. The experimental and simulation results are compared for the reference motor to validate the modelling.

The output torque is a main parameter for designing of a DC motor. Exterior rotor brushless DC motor is preferred especially where the high torque is necessary. In literature, it can be found various methods, which can enhance the torque of the exterior brushless DC motor.

The air gap and tooth width angle (TWA) parameters are obtained from the optimization studies of the exterior rotor brushless DC motor. Reference motor is simulated by changing the air gap and the tooth width angle parameters at the start-up and the steady state operations. These simulations will help the reader to understand the effects of the structural changes at the dynamic and the steady state operations. In both start-up and steady state simulations, the load torque is considered as constant. The rises of torque mainly occur because of increase of viscos friction which should be overcome with the rising of speed. As a result, the motor performance is increased and the output torque is improved in the same speed range of the reference motor with some structural changes.

First of all, when the tooth width angle is analyzed, the optimum TWA angle is found as 8° . The new motor design has the most efficient performance when the radial air gap length is 1 mm, when the radial air gap length is decreased and the TWA is smaller than 8° , the performance of the motor increases and this change is shown by a surface graph. After the all simulations, the new motor which has 1mm air gap and 0° tooth width angle has 6.37% more average torque output than that of the reference motor.

The effects of the cogging torque are also examined for reference motor and the new designs. The average cogging torque value of the best design is calculated as 5.6 times bigger than that of the reference motor. Cogging torque increases but it does not affect ripples in rotor speed. Reference motor cogging torque values are too low according to average output torque. New design causes more cogging torque ripples but it is still reasonable values for the motor which has high inertia to repress cogging torque effect to increase the ripples in rotor speed. Moreover when the air gap flux density variation is expanded to its harmonics, high degree harmonics are appeared for the new design and these harmonics cause fluctuations in the torque.

In the last analysis, inductances of d-q axes are calculated. The values of the L_d and L_q inductances are close to each other due to the design of the stator tooth in the reference motor. Thus, the proper flux of air gap and low cogging torque are obtained. Improved motor has more differences between d and q axis inductances according to those of the reference motor. Increasing difference between the axes inductances cause irregular flux density in the air gap and increase in the cogging torque. These negative effects in the improved motor are also depend on the system inertia. High system inertia can reduce the effects of the torque ripples. Consequently, in this study the average torque increase is observed according to the reference motor only by changing the stator tooth structure.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Fırçasız elektrik motorları, kavram olarak ilk 1962 yılında T.G. Wilson ve P.H. Trickey isimli iki mühendis tarafından ele alınmıştır. O zamanın mıknatıs ve anahtarlama elemanlarında yeterli teknolojik ilerleme sağlanamamış olduğu için icat edilen bu yeni elektrik motorunun kullanılmaya başlaması için 1980'lere kadar zaman geçmesi gerekmiştir. Nadir toprak elementi mıknatıslar ve elektronik sürücü devrelerindeki gelişmeler fırçasız doğru akım motorlarını (FDAM) diğer elektrik motorlarına güçlü bir alternatif haline getirmiştir. Fırçasız doğru akım motorlarında fırça kollektör gibi yapılar olmadığı için fırçalı doğru akım motorlarına göre daha hafif, küçük ve yüksek verimlidir. Ayrıca FDAM fırça kollektör olmadığı için çok yüksek hızlarda çalışabilmektedir.

Günümüzde fırçasız doğru akım motorları, robotik uygulamalardan uzay istasyonlarına kadar çok çeşitli alanlarda farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle yüksek seviyede verim, performans, hız, güvenilirlik sunması sayesinde birçok uygulamanın ihtiyaçlarına cevap veren farklı tasarımlar ortaya çıkmıştır. Dış rotorlu FDAM, yüksek moment yoğunluğu ve eylemsizliği sayesinde düşük hızlarda diğer motorlara göre avantajlıdır. Birçok uygulamada redüktör gibi bir aktarma düzeneği olmadan kullanılabilir.

Dış rotorlu motorlarda moment iyileştirmesi üzerine literatürde birçok yayın bulunmaktadır. Farklı sürüş teknikleri kullanılarak ve motorda yapısal değişiklikler yaparak moment iyileştirme çalışmaları üzerinden çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde motor sürüş tekniklerinden daha ziyade motorda yapısal değişiklikler yapılarak moment artışı sağlayacak çalışmalar üzerinde durulacaktır. Referans motor, simülasyon programına aktarılarak, motorun statoru üzerinde yapısal değişiklikler yapılarak moment iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle, bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon çalışmaları FDAM'lerin tasarımlarının iyileştirmesinde kritik rol oynamaktadır.

İyileştirme çalışmaları üretim maliyetlerini düşürürken FDAM'lerin kalitesini ve performansını arttırmaktadır. Tasarım iyileştirmesi, performans kriterlerini iyileştiren tasarım parametrelerinin, sistemin sınırları da dikkate alınarak bulunmasıdır. [1]. Bu tezde, referans motor olarak bir çamaşır makinası üretici firmasının çıkık kutuplu dış rotorlu FDAM'si üzerinde çalışılmıştır. Bu motor ile alakalı saha test verileri dikkate alınarak ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak "Flux2D" tasarım ve simülasyon programında motor tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, motorun faz sayısı, boyutları, sargı sayısı gibi karakteristik özelliklerini etkileyecek parametreleri sabit tutularak, sadece stator dişleri üzerinde yapısal değişiklikler yapılarak ortalama çıkış momentinin iyileştirmesi üzerine çalışılmıştır.

Çamaşır makinalarında kullanılan motorların düşük hız yüksek moment ihtiyacı olan yıkama modu ve yüksek devir hızlarında çalışan sıkma modu olmak üzere iki modu bulunmaktadır. Yıkama modunda düşük hızlarda çalışma gerçekleştirildiği için vuruş momenti etkileri daha ön plana çıkmaktadır. Motorun bu çalışma koşullarında ortalama momentinin artırılması için vuruş momentinin de incelenmesi gerekmektedir. Stator dişlerinde tanımlanan yapısal parametrelerin değişimleri ile motorun performans verileri incelenecektir. Ayrıca senkron endüktansın moment ile ilişkisi incelenecektir. İyileştirme çalışmalarının amacı, düşük devir yıkama koşullarındaki ortalama momentin artırılmasının sağlanmasıdır. Bunun için boyuna ve enine senkron endüktanslar L_d ve L_q 'nin, moment ve yapısal değişikliklerle alakalı ilişkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada stator dişlerinin karakteristik boyutlarını motor sınırları içerisinde değiştirilerek, farklı ortalama moment sonuçlarına ulaşılmıştır. İstatiksel iyileştirme yöntemlerinin ışığı altında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ve farklı tasarımlar bu çalışmanın ilerleyen kısımlarında ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

FDAM'ler yüksek moment kapasiteleri, yüksek güç faktörü değerleri, düşük kayıpları ve yüksek hız kapasiteleri nedeniyle, yüksek performans motorları olarak bilinirler. FDAM'ler özellikle son yıllarda beyaz eşya, otomotiv sektörü, tıbbi uygulamalar ve robotik uygulamalarda popüler hale gelmiştir. Bu sektörlerde bu motorların kullanılmasının diğer bir büyük sebebi de düşük üretim maliyetleridir. Eğer uygulamalarda yüksek eylemsizlik, düşük vuruş momenti, yüksek moment ve düşük

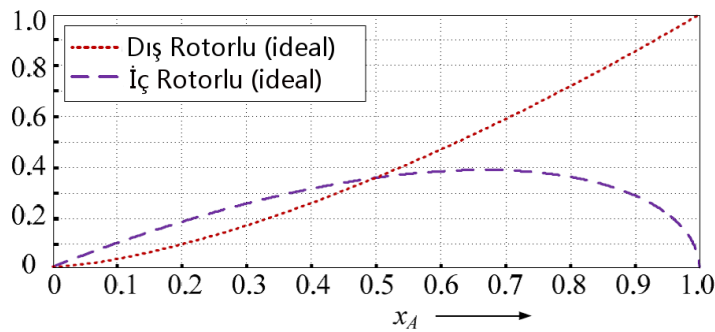
hızlarda bir operasyon gerekli ise, dış rotorlu FDAM'ler iç rotorlu FDAM'lere göre daha avantajlıdır. Dış rotorlu FDAM'ler yüksek moment ve montaj avantajları sayesinde robotik ve tekerlek içi motor uygulamalarında kullanılmaya daha uygundur. Dış rotorlu FDAM'lerde rotor statorun dışını kaplamaktadır ve sabit kısmı makinenin içinde bulunmaktadır. Bu tasarımı sayesinde ürünlerin içine daha bütünleşik bir şekilde montaja olanak sağlamaktadır [2].

Günümüzde FDAM'lerin tasarımı ve analizi üzerine yoğun şekilde çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda hem iç rotorlu motorlar [3-4] ile ilgili hem de dış rotorlu sürekli mıknatıslı motorlar ile ilgili iyileştirme problemleri üzerinde çeşitli yöntemler kullanılarak çözümler üretilmiştir. Dış rotorlu motorlarda iyileştirme çalışmalarında sistem sınırları genellikle motorun büyüklüğü ve doyma etkisi olmaktadır. Moment ölçekleme yöntemi ile iç ve dış rotorlu motorların karşılaştırmalı bir şekilde moment iyileştirmesinin anlatıldığı [5] de iç rotorlu ve dış rotorlu ideal bir motorun momenti sırasıyla (1.1) ve (1.2) denklemlerinde verilmektedir;

$$\frac{T}{C_F \pi R^3} = x_A \sqrt{1 - x_A} \quad (1.1)$$

$$\frac{T}{C_F \pi R^3} = \sqrt{x_A^3} \quad (1.2)$$

Denklemlerde C_F moment katsayısı, R motor yarıçapı, x_A ise stator kesit alanın, motor kesit alanına oranıdır.

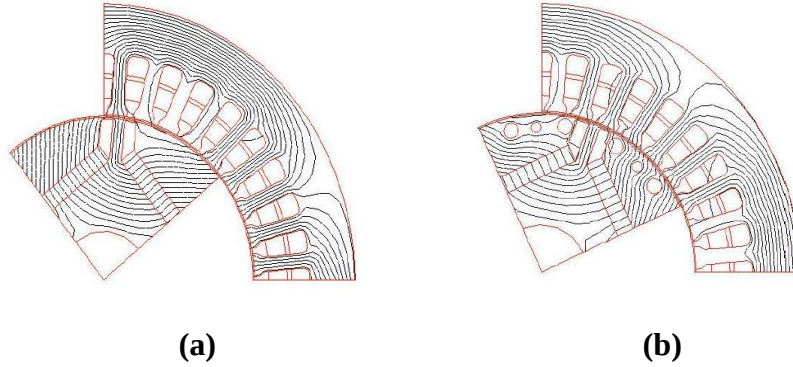


Şekil 1.1: x_A 'nın fonksiyonu olarak üretilebilecek moment[5]

Çıkış momentinin, x_A artışı ile değişimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir. İç rotorlu sürekli mıknatıslı makinelerin aksine dış rotorlu sürekli mıknatıslı makinalarda stator alanının artırılmasının momenti arttıracığı bu grafikten anlaşılmaktadır. Ancak hava aralığında

akının doymaya gitmesi durumunun göz önüne alınması gerektiği yayında belirtilmiştir [6].

Bir iç rotorlu sürekli mıknatıslı motordaki akı dağılımı için uygun rotor tasarımı ile moment iyileştirmesinin yapıldığı [7] de, yapılan değişiklikler ile ortalama moment artışı ve daha düşük moment dalgalanması sağlanmıştır. Yapılan yapısal değişiklikler ile akı yolu değişimi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: 3 Fazlı iç rotorlu sürekli mıknatıslı senkron motor akı çizgileri
a)İlk model, b)Optimize edilmiş model [7]

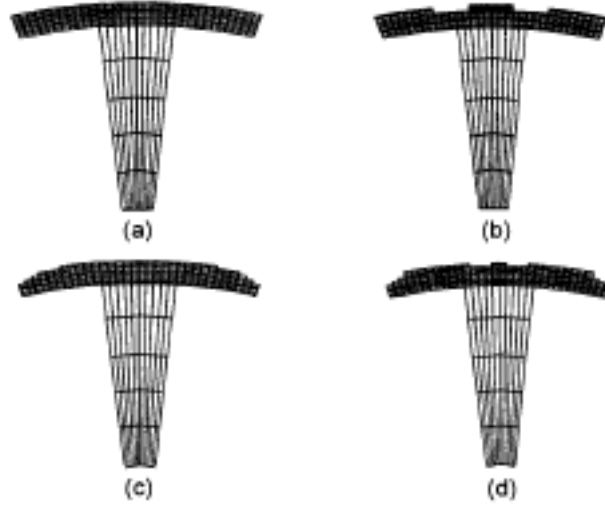
Seviye belirleme methodu kullanılarak yapısal iyileştirme ile moment dalgalanmasının azaltılması ve ortalama momentin artışı hedeflenen [8] de statora en uygun şekil verilerek moment dalgalanmalarında önemli azalma ve ortalama momentte artış sağlanmıştır. Stator akımına bağlı olarak, daha az stator malzemesi kullanarak, çalışma sırasında daha düzgün moment geçişleri elde edilmiştir.

FDAM’ lerde vuru etkisi, ideal olmayan elektromotor kuvveti ve ilettime geçtiğinde eşit akım paylaşmayan fazların neden olduğu moment dalgalanmaları şeklinde olmaktadır. Yüksek hızlarda, momentteki dalgalanmalar sistemin eylemsizliği tarafından zayıflatılsa da dinamik çalışma koşullarında moment dalgalanmaları, motora bağlı yüke aktarılabilir, böylece istenmeyen hız dalgalanmalarına ve düşük hızlarda hareket kontrolünde hatalara neden olur. Farklı motor sürücü teknikleri ile moment dalgalanmasını zayıflatmak ve ortalama moment değerinde artış sağlamak mümkündür [9]. Moment ve akıdaki dalgalanmaları önlemek için yüksek performanslı kontrol tekniği olan doğrudan moment kontrolü üzerine çalışmalarla ilgili yayınlar da incelenmiştir [10-12]. Doğrudan moment kontrolü, hızlı, dinamik moment tepkisi sağlamanın yanında makine parametrelerinin de değişmesine karşın akım düzenleyici kullanmadan bile oldukça uyumlu çalışma gösterebilmektedir. Bu

yöntemin temeli, akı ve momentin anlık değerlerinin sadece stator değişkenlerinden hesaplanmasına dayanmaktadır [13]. Düşük frekanslı çalışmalarda stator akı düşümünün azalması ve düzgün dairesel bir akı çemberi elde edilmesi ve ayrıca akım harmoniklerinde azalmanın sağlanması uygulamalarda çıkan sonuçlardır [10-12]. Genelleştirilmiş harmonik denge yaklaşımı ile zıt elektromotor kuvvetindeki harmoniklere göre uygun akım dalga şekillerinin sayısal iyileştirme yöntemleri ile bulunması, sık kullanılan bir yöntemdir [14-17]. Bu yöntemde seçilen maksimum harmonik derecesine göre hesaplama gerçekleştiren sürücünün, hem analizi yapıp hem motoru sürmesi hesaplama yoğunluğu bakımından uygulamayı zorlaştırmaktadır. Akım referansları sabit olmayıp çok hızlı değiştiği için özellikle yüksek hızlara çıkılan uygulamalarda çok hızlı kontrolörler kullanmak gerekmektedir. Ayrıca moment doğrudan kontrol edilmediği için de hızlı moment cevapları elde edilememektedir. [18] ve [19] çoklu referans çerçevesi yöntemi ile sürücünün durum değişkeni modeli çıkarılmıştır. Bu yöntemle tasarlanan kontrolörde uygulaması zahmetli ve zorlayıcı bir algoritma kullanılmaktadır. Bununla birlikte d eksenindeki alan zayıflatmak için, d eksenindeki yüksek dereceli harmonikler gibi elde edilmesi güç değerlere ihtiyaç duyulmaktadır.

FDAM'de üretilen momente, en çok bozucu etkiyi yapan bileşen vurutu momentidir. Vurutu momenti, sabit mıknatıslar ile oluklu demir stator yapısı arasındaki karşılıklı etkileşimden meydana gelmektedir. Bu moment sabit hız kontrolünü veya pozisyon kontrolündeki güvenilirliği güçleştirmektedir. Bu momentin olumsuz etkilerini azaltmak için elektronik sürücü devrelerinin kullanılması veya yapısal tasarım iyileştirmesi yapmak uygun çözümlerdir [2]. Literatürde vurutu momentini azaltmak için yapısal tasarım çözümü olarak stator dişlerinin başlarında değişiklik yapılması, mıknatısların ve sargıların kaydırılarak dizilmesi yöntemleri önerilmiştir [20-22]. Ancak bu yöntemler ile alınan sonuçlarda motor yapılarının karmaşıklaşması, üretim maliyetlerinin artması ve kaçak endüktansın artması problem olarak gözükmemektedir.

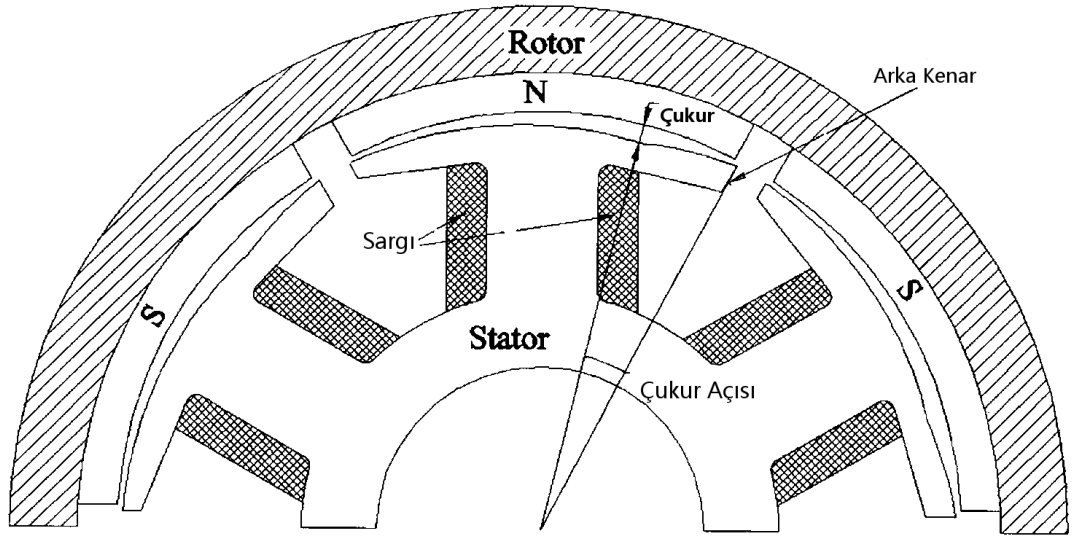
Dış rotorlu FDAM'lerde vurutu momentini azaltacak stator dişi yapılarının incelendiği yayında, manyetik alan analizi için relüktans ağı methodu ve genetik algoritma ile iyileştirme yapılmıştır. Ortaya çıkarılan üç diş şeklinin de vurutu momentini % 95 seviyesinde azalttığı ortaya çıkarılmıştır [23].



Şekil 1-3: (a) Referans yapı, (b) oluklu yapı, (c) yuvarlatılmış yapı, (d) en uygun yapı [24]

Stator dişi yapısının dokuz farklı parametreye ayrıldığı, sayısal benzetim yapılarak ve deneysel tasarım kullanılarak elektromotor kuvvetinin artırılması ve vuruğu momentinin düşürülmesi ilgi yayında sunulmuştur [24]. Tasarım parametrelerinin fazla olması ve simülasyon sürelerinin uzun olması tüm parametreleri optimizasyon sürecine almayı çok zorlaştırmaktadır. Deneysel tasarım yöntemi kullanılarak parametrelerin hangilerinin performans ölçütleri üzerinde daha çok etkili oldukları belirlemek kolaylık sağlamaktadır. L_{12} Taguchi tablosu kullanılarak ve varyans analizi yapılarak, dokuz parametrenin performans kriterlerine etkisi sadece on iki simülasyon ile deneysel ve istatistiksel olarak ortaya çıkarılmıştır. En çok etkisi bulunan parametreler mıknatıs yüksekliği, boyunduruk kalınlığı ve oluk yüksekliği olarak belirlenmiştir. Yapılan iyileştirme çalışmasının güçlü, hızlı ve pratik bir yöntem olduğu ve %5 güç artışı ve %12 daha az mıknatıs kullanılmasını sağladığı belirtilmiştir.

Dış rotorlu tek fazlı FDAM kalkış momentinin arttırılması ve vuruğu momentinin düşürülmesi için yeni bir hava aralığı profili önerilen çalışmada %70'e yakın kalkış momentinde artış ve yüksek oranda vuruğu momentinde azalma gözlenmiştir [25]. Şekil 1.4'de gösterilen çukur açısı değiştirilerek parametrik analiz yapılan çalışmada değişik asimetrik stator dişi profilleri incelenmiştir. Çukur açısının kritik bir değere kadar artırılmasının, kalkış momentinde ciddi bir artışa ve vuruğu momentinin harmonik değerlerinde azalmalara neden olduğu gösterilmiştir.



Şekil 1.4: FDAM hava aralığı profili [25]

Literatür çalışmaları incelendiğinde stator dişlerinde yapılacak iyileştirmeler ile ortalama momentte artış sağlanabildiği görülmektedir. Parametrik bir analiz yöntemi ile literatürde bulunan stator dişi şekilleri dikkate alınarak, farklı kombinasyonları motor stator dişi üzerinde uygulanacak ve detaylı analizler ile sunulacaktır.

2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MAKİNELERİ

2.1 Giriş ve Temel Tanımlar

Bu kısımda FDAM ile ilgili, bu yüksek lisans tezinde geçen terimler ve motorun dayandığı temel fiziksel prensiplerden bahsedilecektir [26].

Tüm fırçasız motorlarda sabit duran, tek veya çok kutuplu, elektromanyetik alan üreten bobinler sarılı stator ve sürekli mıknatısları üzerinden barındıran hareketli parça rotor bulunmaktadır. Stator ve rotor arasında hava aralığı bölgesi bulunmaktadır. Fırçasız motorlarda rotor içeride ya da statorun dışında bulunabilir. Motor sargıları stator çekirdeğinde olukların içinde bulunur. İki oluk arasında kalan çelik stator bölgesine stator dişi denir. Stator dişine sarılı sargılarının sarım sayısı makinenin önemli parametrelerinden biridir. Fırçasız doğru akım motorları tek faz ya da üç faz beslemeli tasarlanabilir. Motor parametrelerinden biri olan kutup sayısı ise mıknatısların sayısıdır. Bir motorda en az iki kutup olması gerekmektedir ve çift sayı olduğu sürece istenilen kadar kutup tasarlanabilir.

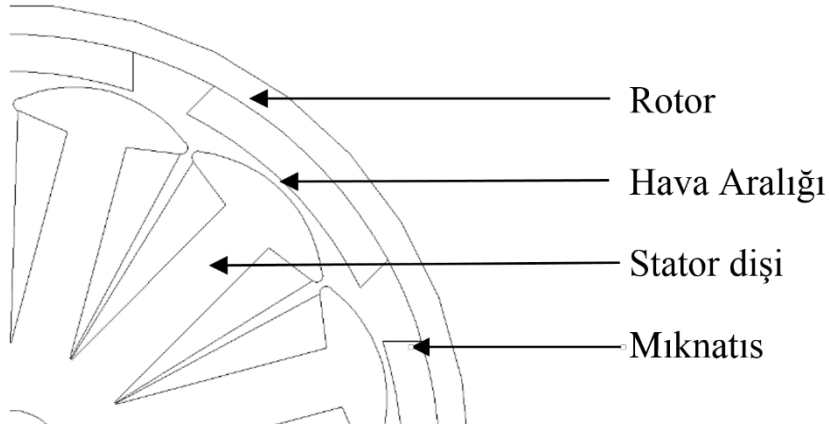
Elektrik makinalarından mekanik ve elektriksel açı olmak üzere çok kullanılan iki ölçü birimi bulunmaktadır. Mekanik açı motorun fiziksel olarak 360 dereceye olarak ölçen birimdir. Elektriksel açı ise iki motorun iki kutup aralığı kadar bölgesini 360 derece olarak ölçekleyen birimdir. Bu nedenle iki kutuplu bir makina da mekanik açı ve elektriksel açı eşit iken dört kutuplu bir makinada elektriksel açı mekanik açının iki katı olmaktadır. Mekanik açı ω_{mek} , elektriksel açı ω_{elk} ve motorun kutup çifti sayısı ρ , arasındaki bağıntı denklem (2.1)'de gösterilmiştir [26].

$$\omega_{elk} = \rho \omega_{mek} \quad (2.1)$$

2.2 Konstrüksiyon

Fırçasız motorlar dört kısımdan oluşur;

- Tek veya çok kutuplu, elektromanyetik alan üreten bobinler sarılı stator
- Sürekli mıknatlardan oluşan hareketli parça rotor
- Gerekli hassasiyette rotor pozisyonunu algılayan sensör
- Rotor konum bilgisine göre stator sargılarına gerilim uygulayan sürücü devresi



Şekil 2.1: Dış rotorlu sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinesi yapısı

Stator, çelik plakalardan oluşan çekirdek ve sırayla ilettime geçirilen iki veya daha fazla faz sargısı bulunan, elektromanyetik döner alan oluşturan klasik doğru akım makinelerin statorlarına benzer bir yapıdadır.

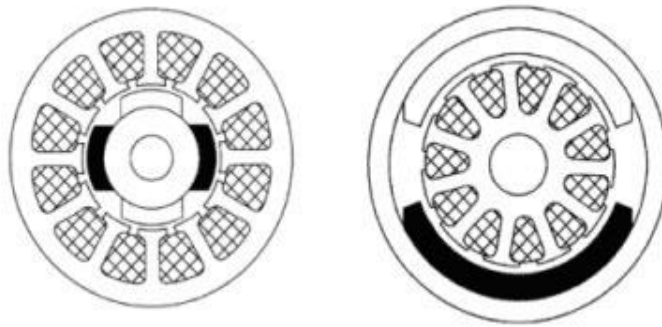
Rotor, kalıcı mıknatısların üzerinden olduğu laminasyonlu veya kütsel yapıda motorun momentinin oluştuğu hareketli kısımdır. Günümüze kadar birçok sürekli mıknatıs çeşidi FDAM’lerde kullanılmıştır. Elektrik makinelerinde genellikle üç tip mıknatıs çeşidi, AlNiCo (alüminyum-nikel-kobalt alaşımı), ferrite ve nadir toprak elementleri (samaryum kobalt, SmCo ve neodyum demir bor, NdFeB) kullanılmaktadır [27-30]. AlNiCo ve ferrite mıknatıslar nispeten düşük maliyetlerinden dolayı çeşitli uygulamalarda kullanılmakta [28] olsa da SmCo ve NdFeB gibi yüksek performans ve manyetik karakteristikleri çok iyi olan mıknatısların geliştirilmesiyle performans ve verim odaklı uygulamalarda tercih edilmemektedirler. 1970’lerin başında geliştirilen SmCo güç bakımından NdFeB mıknatıstan daha zayıf olmasına rağmen daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir [29]. Ancak SmCo üretilmesi, hammaddesinin az bulunması nedeniyle pahalıdır. 1982 yılında geliştirilen ve SmCo’dan daha ucuza mal edilen NdFeB mıknatısların üretilmesiyle birlikte yüksek manyetik performans gerektiren uygulamalarda bu mıknatıs çeşidi

kullanılmaya başlanmıştır [31]. Fırçasız doğru akım motorlarında mıknatıslar rotora farklı şekillerde monte edilebilmektedir. Yüzey mıknatıslı, gömülü mıknatıslı, halback diziliimli mıknatıslı uygulamada tercih edilen yapılardır.

Mekanik komütasyon olmadığı için FDAM’lerde rotor pozisyonlarının algılayıcılarla ile belirlenmesi gerekmektedir. Rotor alanına göre stator sargılarının oluşturduğu elektromanyetik alanın ileri kaydırılması ile hareket oluşturulmaktadır. Rotor pozisyonu algılamak için kullanılabilecek yöntemler: Foto elektronik, elektromanyetik ve manyetiktir. Elektronik sürücü devresi algılayıcılardan aldığı pozisyon bilgisi ile anahtarlama elemanlarını kontrol eder. Bu anahtarlama elemanları genellikle MOSFET veya IGBT’dir. Anahtar elemanı seçimi, uygulamadaki motor gerilimi, maksimum motor akımı, darbe genişlik modülasyonu frekansı ve motorun çalışma karakteristiği ile belirlenir. MOSFET’lerin iletim direnci çok düşük iken IGBT yüzlerce volt gerilimde çalışabilmektedir.

2.2.1.1 İç rotorlu FDAM

Motorun dış gövdesini statorun oluşturduğu ve hareketli dönen kısım rotorun da statorun içerisinde olduğu motorlara iç rotorlu motorlar denir. Şekil 2.3 (a)’da iç rotorlu motor örneği gösterilmektedir. Statorun dış gövdeyi oluşturması motorun kullanıldığı yere montajını kolaylaştırdığı gibi hareketli rotoru da dış etkilere karşı korur. İç rotorlu motorlar genel olarak düşük eylemsizlikleri ve hızlı tepki vermeleri nedeniyle artan hareketli uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.2: (a) İç rotorlu (b) Dış rotorlu motor örneği [31]

2.2.1.2 Dış rotorlu FDAM

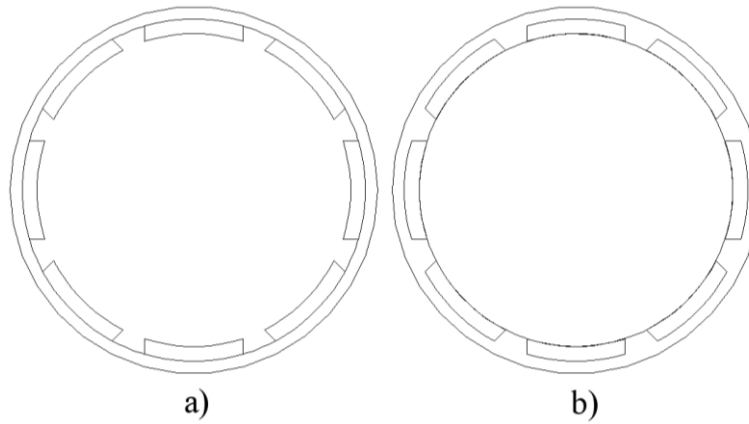
İç rotorlu dışında diğer silindirik motor tasarımı da dış rotorlu olarak adlandırılan statorun motorun iç kısmında bulunduğu ve etrafını rotorun sardığı bir motor çeşididir (Şekil 2-3 (b)). Dış rotorlu motor tasarımı, mıknatıslar için daha sağlam bir yapı

oluşturmakla birlikte iç rotorluya göre eylemsizliği daha fazladır. Dış rotorlu motorlar sağlam bir yapı gerektiren yüksek hızlı uygulamalarda merkezkaç kuvvetine karşı mıknatıslarının yerini korunmasını sağlar. Fazladan eylemsizlik gerektiren ve motorun eylemsizliğinin sistemin geri kalanının yanında önemsiz olduğu uygulamalarda da kullanılır [31].

Dış rotorlu makinelerin genel olarak sağladıkları avantajlar:

- Yüksek eylemsizlik ve daha az vuruş momenti etkisi
- Geniş hava aralığı çapı sayesinde çıkış momenti artırılması
- Yüksek eylemsizliği sayesinde moment değişimi çok olan uygulamalarda çalışabilme
- Çok kutuplu yapı ve eylemsizlik sayesinde düşük hızlı uygulamalarda yüksek performans
- Daha sessiz çalışma

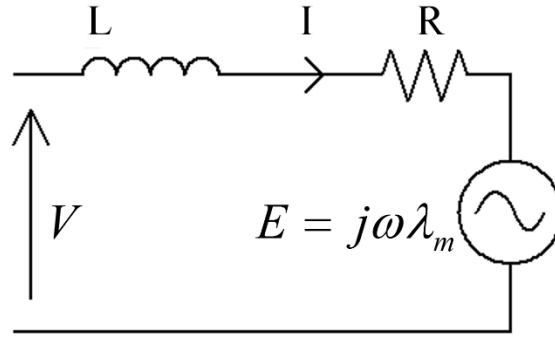
Genellikle dış rotorlu motorlarda rotorun dönüşü sırasında oluşan kuvvetler mıknatısları rotora sabitleme yönünde kuvvet uyguladığı için az maliyetli ve kolay montaj imkanı veren yüzey mıknatıslı yapı genellikle tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de, dış rotorlu bir fırçasız doğru akım motorunun yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı rotor kesitleri gösterilmiştir. Gömülü mıknatıslı yapı kullanabilmek için laminasyonlu bir rotor boyunduruğu kullanılması gerekmektedir. Ancak bu durum motorun mekanik olarak yapısını zayıflatmakta ve üretim maliyetlerini artırmaktadır. Kütlesel rotor boyunduruğu ve yüzey mıknatısların kullanılması, laminasyonlu rotor boyunduruğu ve gömülü mıknatıslara karşı montaj kolaylığı, fiziksel dayanıklılık ve düşük maliyet avantajı sağlamaktadır.



Şekil 2.3: (a) Gömülü (b) Yüzey montaj mıknatıslı dış rotor tasarımları

2.3 Sürekli Hal Çalışma Prensibi

FDAM'ler de klasik fırçalı DC motorlardaki gibi tek yönlü moment ile dönüş hareketi sağlar. Stator sargılarından geçen akımın yönü ile oluşan manyetik kutuplar, rotordaki kutuplara çekme ve itme şeklinde kuvvetler uygular. Maksimum momente, stator alanı ile rotor alanı arasındaki açı 90° iken ulaşılmaktadır. Birbirini çeken kutuplardaki aradaki açı azaldıkça moment da azalmaktadır. Bu nedenle stator alanı, rotor pozisyonuna göre kaydırılarak yer değiştirilmelidir. Bu şekilde döner bir manyetik alan oluşturulur. Motorun sürekli dönüşünü sağlamak için genellikle statora tek kutup çiftinden daha fazla kutup konur.



Şekil 2-4: FDAM sürekli hal eşdeğer devresi

FDAM'nin sürekli çalışma koşullarındaki eşdeğer devre Şekil 2-4'de gösterilmiştir. Sürekli hal koşulu için uygulanan gerilim ve indüklenen gerilimin sinüzoidal olduğunu varsayabiliriz. Her faza uygulanan gerilimin ifadesi V , stator sargısı direnci, R , açısal frekans, ω , sargı endüktansı, L ve mıknatıslar tarafından stator sargısında indüklenen elektromotor kuvveti (emk), E cinsinden (2.2)'de tanımlanmıştır. Ayrıca elektromotor kuvvetinin açısal frekansa ve akıyla ilişkisi (2.3)'de verilmiştir.

$$V = (R + j\omega L)I \quad (2.2)$$

$$E = j\omega\lambda_m \quad (2.3)$$

Belirli bir hızda maksimum mekanik güç için, I akımı ile E gerilimi arasında faz farkı olmamalıdır. Bu nedenle pozisyon geri beslemesi kullanılarak sargılara uygulanan geriliminin açısı φ_V ve indüklenen gerilimin açısı, φ_E , aynı olacak şekilde kontrol edilebilir (2.4). E , rotorun pozisyonuna göre indüklendiği gerilim olduğu için V gerilimi bir evirici yapısı ile motoru besler.

$$\varphi_V = \varphi_E \quad (2.4)$$

Ayrıca E gerilimi ve I akımı arasındaki faz farkı çok azaldığı için statorun reaktansı, direncinden çok daha küçük olur ve ihmal edilebilir.

$$R \gg \omega L \quad (2.5)$$

Bu sayede sargılara uygulanan gerilimin ifadesi (2.6)'de gösterildiği gibidir.

$$V = E + RI \quad (2.6)$$

E ve I aynı fazda olduklarında elektromanyetik gücün ifadesi, P_{em} , (2.7)'de gösterilmiştir.

$$P_{em} = m|E||I| = m\omega|\lambda_m||I| \quad (2.7)$$

Denklemden motorun faz sayısı m ile gösterilmiştir. Elektromanyetik moment ise elektromanyetik gücün rotor hızına, ω_r , oranına eşittir (2.8).

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{m\omega|\lambda_m||I|}{\omega_r} \quad (2.8)$$

Rotor açısal hızı, açısal frekansın ve motor kutup sayısının, p , arasındaki bağıntı denklem 2.9'da gösterilmiştir.

$$\omega_r = \frac{2\omega}{p} \quad (2.9)$$

(2.9) ile (2.10) birleştirildiğinde elektromanyetik moment;

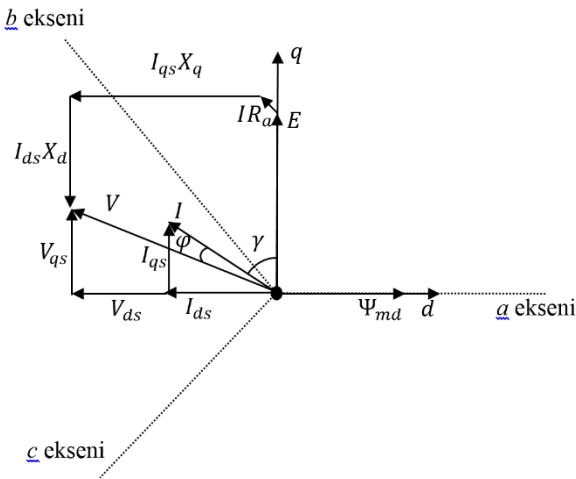
$$T_{em} = \frac{mp}{2} \lambda_m I \quad (2.10)$$

Moment, motor tarafından üretilen döndürme kuvvetidir. Bir uygulama için fırçasız doğru akım motoru seçilirken bakılması gereken en önemli niceliklerden biri momenttir. FDAM'lerde iki çeşit moment oluşmaktadır: vurutu momenti ve faydalı moment. Vurutu momenti, rotordaki mıknatısların ve statorun arasındaki manyetik

çekimden meydana gelen motorda istenilmeyen bir momenttir. Vuruntu momentinin değeri rotorun pozisyonu ile değişmektedir. Özellikle düşük hızlarda kendini daha belirgin göstermektedir. Yüksek hızlarda ise motorun eylemsizliği bu moment bileşenini zayıflatır. Faydalı moment ise motorun hareket etmesini sağlayan kuvveti oluşturan momenttir [31].

2.4 Senkron Endüktans

Faydalı akının statordan üretilmesi durumunu rotor konuma göre analiz yapmak için üç fazlı sabit koordinat sistemi (abc) kullanmak yerine rotor ile aynı hızda dönen d - q eksenleri koordinat sistemi kullanarak hesaplamak daha kolaydır. Şekil 2.5’de fazör diyagramı ile gösterilen p kutup çifti, Ψ_{md} manyetik akı, I_{ds} d eksen akımı, I_{qs} q eksen akımı, I faz akımı, V faz gerilimi, E elektromotor kuvveti, X_d d eksen reaktansı, X_q q eksen reaktansıdır. Bu fazör denkleminde ortaya temel moment denklemi çıkarılmıştır [32].



Şekil 2.5: Fazör diyagramı [32]

$$T_{em} = \frac{3}{2}p[\Psi_{md}I_{qs} + (L_d - L_q)I_{qs}I_{ds}], L_q > L_d \quad (2.11)$$

Ortalama moment ve L_d L_q endüktanslarının arasındaki bağlantı denklemde net şekilde görülmektedir. Kalıcı hal çalışma ve dinamik performans büyük ölçüde d ve q eksenindeki endüktanslara bağlıdır. Bu yüzden bu endüktansların hesaplanması, moment, verimlilik ve güç faktörü gibi performans parametrelerinin bulunması için gereklidir.

$$L_q = L_{ls} + L_{mq} \quad (2.12)$$

$$L_d = L_{ls} + L_{md} \quad (2.13)$$

L_d ve L_q , L_m mıknatıslanma endüktansına ve kaçak endüktans L_{ls} 'e eşittir (2.12-2.13). Kaçak endüktans, yaklaşık olarak öz endüktansın %5 -10'u kadardır. Mıknatıslanma endüktansları (2.14-2.15) denklemlerdeki gibi hesaplanır [26].

$$L_{mq} = \frac{3}{2} (L_a - L_b) \quad (2.14)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2} (L_a + L_b) \quad (2.15)$$

L_a ve L_b ise ;

$$L_a = \frac{1}{2} N_s \pi \mu_0 r l \alpha_1 \quad (2.16)$$

$$L_b = \frac{1}{2} N_s \pi \mu_0 r l \alpha_2 \quad (2.17)$$

Denklem (2.18) ve (2.19)'de, N_s eşdeğer sinüzoidal dağılmış sargıların sarım sayısıdır. r ortalama hava aralığı yarıçapı, l hava aralığının eksenel uzunluğu, ve μ_0 geçirgenlik sabitidir. Hava aralığı ölçümleri L_a ve L_b nin hesaplanması için gereklidir. Minimum ve maximum hava aralığı uzunluğu (g_{min}, g_{mak}) sırayla d ve q ekseninde bulunur bu yüzden α_1, α_2 aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Şekil 2.6'da g_{min}, g_{mak} grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$g_{min} = (\alpha_1 + \alpha_2)^{-1} \quad (2.18)$$

$$g_{mak} = (\alpha_1 - \alpha_2)^{-1} \quad (2.19)$$

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Doğru bir elektrik makinesi üretebilmek için tasarım aşamasında manyetik alan analizinin düzgün yapılması ve makine karakteristiklerinin doğru hesaplanması çok önemlidir. FDAM'lerin motor parametrelerinin hesaplanmasında düzensiz ve karmaşık geometri ve doğrusal olmayan manyetik malzemeler kullanılması manyetik alan analizini ve motor parametrelerinin hesabını zorlaştırmaktadır. Bu parametrelerin ve karışık diferansiyel denklemlerin çözümünü kolaylaştırmak için çeşitli sayısal yöntemler uygulanır. Bu matematiksel yöntemler; Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi ve Sınır Elemanları Yöntemi olarak sıralanabilir. Karışık geometrik yapılarda ve doğrusal olmayan manyetik karakteristik problemlerini çözmek için “Sonlu Elemanlar Yöntemi” genellikle tercih edilmektedir.

3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminde Manyetik Analiz

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan yazılımlar iki veya üç boyutlu, düşük frekanslı veya yüksek frekanslı elektromanyetik analizler yaparken Maxwell denklemlerini çözerek sonuca ulaşmaktadırlar. Elektromanyetik alan modeli yapılırken, elektriksel ve manyetik alanın süreklilik koşulları ve motor alanının fiziksel karakteristikleri manyetik alan modellemesi için dikkate alınmalıdır [32]. Alçak frekans uygulamalarında deplasman vektörü olmaksızın Ampere Yasası denklem (3.1)'deki gibidir.

$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (3.1)$$

Manyetik akı yoğunluğu B ile manyetik alan şiddeti H arasındaki ilişki denklem (3.2)'deki gibi gösterilebilir.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.2)$$

Burada μ manyetik geçirgenliktir. Manyetik vektör potansiyeli A manyetik akı yoğunluğunu tanımlamak için aşağıdaki gibi kullanılır;

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.3)$$

Manyetik vektör potansiyeli çözüldükten sonra A ;

$$\mathbf{B} = \mu_x \frac{\partial A_x}{\partial y} - \mu_y \frac{\partial A_y}{\partial x} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Manyetik vektör potansiyeli A ve akım yoğunluğu j aynı doğrultuda elde edilir. Bu yüzden eğer, j_z meydana gelirse, A vektör potansiyeli A_z haline gelir ve $j_x = 0$, $j_y = 0$ şeklinde elde edilir. j_z nin doğrultusu yüzünden B_z meydana gelmez.

$$B_x = \frac{\partial A_x}{\partial y}, B_y = \frac{\partial A_y}{\partial x} \quad (3.5)$$

Denklem (3.1), denklem (3.6) şeklinde yazılırsa, denklem (3.2)'ye göre denklem (3.7) türetilir.

$$j_z = \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.6)$$

$$-j_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu^2} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu^2} \frac{\partial A}{\partial y} \right) \quad (3.7)$$

Denklem (3.7) sabit bir μ değeri için sadeleştirildiğinde ortaya Poisson denklemi çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yazılımı ile elektrik alan dağılımı, şiddeti ve yoğunluğu için denklem gruplarını manyetik ve elektrostatik problemlerin çözümlerine ulaşır.

Dış rotorlu FDAM için iki boyutlu denklem (3.7) aşağıdaki gibi yazılabilir [33];

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{N}{s} I_u - \frac{N}{s} I_v - \frac{N}{s} I_w - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (3.8)$$

u, v ve w fazlar, N bobin sarım sayısı, s sargı kesit alanı, I faz akımı, μ manyetik geçirgenlik ve M mıknatısın manyetizmadır. Ayrıca, faz akıları motor sürücüsünün elektriksel denklemlerine (3.9), (3.10) dayanmaktadır.

$$\frac{d\phi_u}{dt} + \frac{d\phi_w}{dt} + L_o \frac{dI_u}{dt} - L_o \frac{dI_w}{dt} + R_u I_u - R_w I_w = V_u - V_w \quad (3.9)$$

$$\frac{d\phi_u}{dt} + \frac{d\phi_v}{dt} + L_o \frac{dI_u}{dt} - L_o \frac{dI_v}{dt} + R_u I_u - R_v I_v = V_u - V_v \quad (3.10)$$

Bu denklemlerde, V eviricinin çıkış gerilimi ve L_o statorun kaçak endüktansıdır. Aynı zamanda, sadece iki faz sürücünden beslenmektedir. Bu yüzden öbür faz denklemlerinde görüldüğü gibi ihmal edilmiştir. Toplam faz akımları yıldız bağlama yüzünden denklem (3.11)'deki gibi sıfıra eşittir[33].

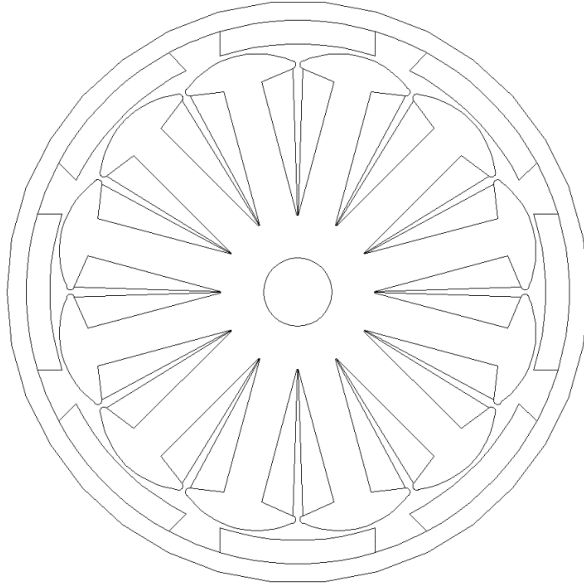
$$I_u + I_v + I_w = 0 \quad (3.11)$$

4. MOTOR MODELLEME VE MOMENT İYİLEŞTİRME

Bu kısımda öncelikle referans motorun sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve modellemenin geçerliliği gösterilmiştir. Motorun ortalama moment ve vuruğu momenti açısından iyileştirme çalışmaları motorun limitlerini de göz önüne alarak detaylı olarak incelenecektir. Yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulacak ve ortaya çıkan motor tasarımlarının avantajları ve dezavantajları değerlendirilecektir.

4.1 Motor Parametreleri

Bu tezde moment iyileştirme çalışmalarının yapıldığı motor bir çamaşır makinasının motorudur. Dış rotorlu bir FDAM olan makine üç fazlı, on iki oluklu, çıkık kutuplu bir stator ve 8 kutuplu kütsel bir rotora sahiptir. Statorda kullanılan manyetik malzeme M350 ve rotorda bulunan mıknatıslar sert ferrit mıknatıs olup akı yoğunluğu 400 mT'dır. Şekilde 4.1'de motorun kesiti ve Çizelge 4.1'de parametreleri gösterilmiştir.

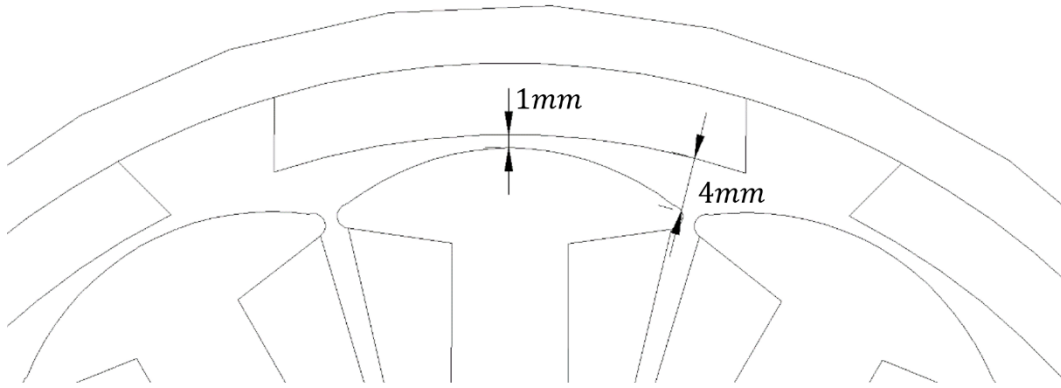


Şekil 4.1: Referans FDAM kesiti

Çizelge 4.1: Referans motorun özellikleri.

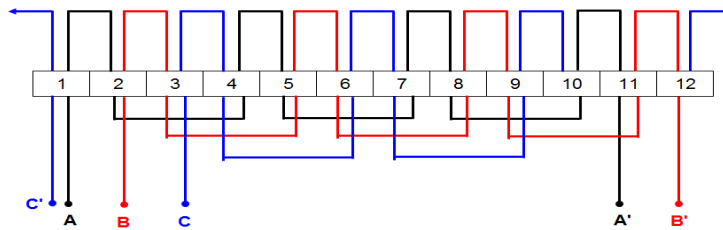
Nominal Güç	120 W
Nominal Moment (yıkama)	1.8 Nm
Nominal Hız (yıkama)	360 1/min
Giriş gerilimi	92 V
Rotor Kutup sayısı	8
Stator Oluk sayısı	12
Mıknatıs Malzemesi	Ferrite
Laminasyon Malzemesi	M350

Stator dişinin, hava aralığı en kısa mesafesinin 1mm ve en uzun mesafesinin 4 mm olacak şekilde yay formu tasarımı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Stator dişinin boyunduruk bağlantı açısı 8°’dir. Mıknatıs yayı 36°’dir.



Şekil 4.2: Stator dişi ölçüleri

Motorda sarım tipi olarak konsantrik sargı kullanılmıştır. Dağıtılmış sargı tipine göre avantajı daha düşük bakır kayıpları ve daha yüksek güç yoğunluğu sağlamasıdır. Ayrıca konsantrik sargı, üretim maliyetlerini düşürmektedir. Şekilde 4.2’de motorun sargı şeması verilmiştir. Her olukta 90 sarım faz sargısı bulunmaktadır.

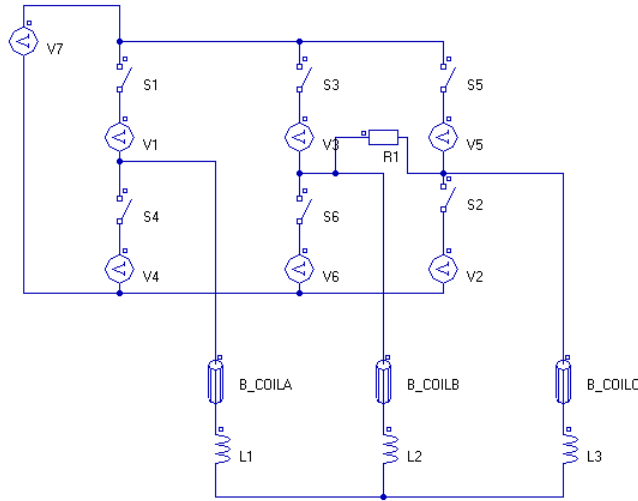


Şekil 4.3: Motor faz sargılarının oluklara dağılımı

Rotor kütleli olduğu için yüzey mıknatıslı yapı kullanılmıştır. Rotorun mukavemetini arttıran bu özellik ayrıca maliyeti de düşürmektedir. Ancak rotor kütleli yapıldığı için, rotorda girdap akımları da oluşur. Burada oluşan demir kayıpları da motorun veriminin azalmasına neden olmaktadır.

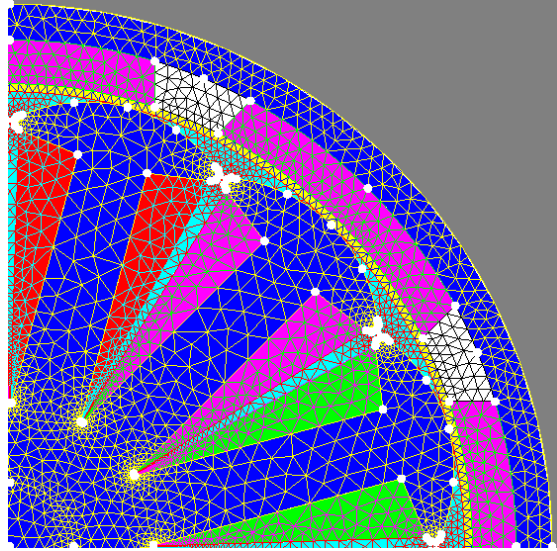
4.2 Sonlu Elemanlar Modeli

İki boyutlu olarak bilgisayar destekli tasarımı (CAD) yapılan motor öncelikle Flux2D yazılımına aktarılmış ve motor parametreleri bölümünde verilen manyetik malzemeler tanımlanarak motora eklenmiştir. Şekil 4.3'deki elektriksel devre şeması çizilerek sargılar oluklara yerleştirilmiş ve anahtarlama elemanlarının rotorun pozisyonuna göre doğru sırayla açılması sağlanmıştır.



Şekil 4-4: FDAM elektrik devre şeması

Sonlu elemanlar yöntemi gereken ağ yapısı Şekil 4.4'deki gösterilmiştir. Akı yoğunluğu, hava aralığında hızlı bir şekilde değiştiği için bu bölgede hesaplamaların daha doğru sonuçlar vermesi için ağ yoğunluğu hava aralığı boyunca ve civarında arttırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli değişik çalışma koşullarında makinenin performansını analiz etmek için zamana bağlı olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, modelleme tutarlılığını ölçmek için saha testlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.5: Dış rotorlu FDAM sonlu elemanlar modeli

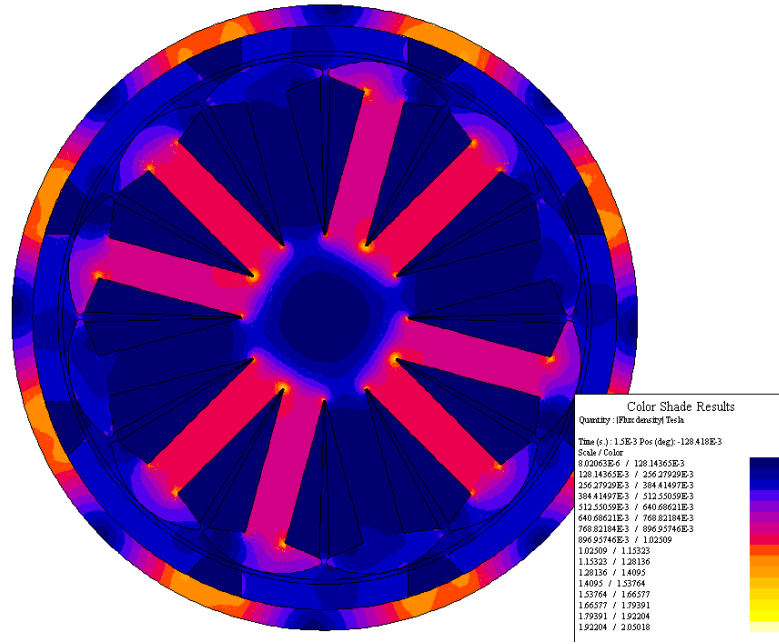
4.3 Performans Analizleri

Çamaşır makinasının temelde yıkama ve sıkma olarak iki çalışma durumu bulunmaktadır. Yıkama modunda yüksek moment ihtiyacının olması ve düşük hız nedeniyle vuru momentleri etkileri daha belirginleştiği için bu koşullarda motor analizi yapılmıştır. Yıkama modunda, motorun kalkışı ile sürekli hal 365 min^{-1} devir hızında çalışma analizleri sunulmuştur. Motorun gerçek saha testlerindeki performans değerleri Çizelge 4-2’de gösterilmiştir.

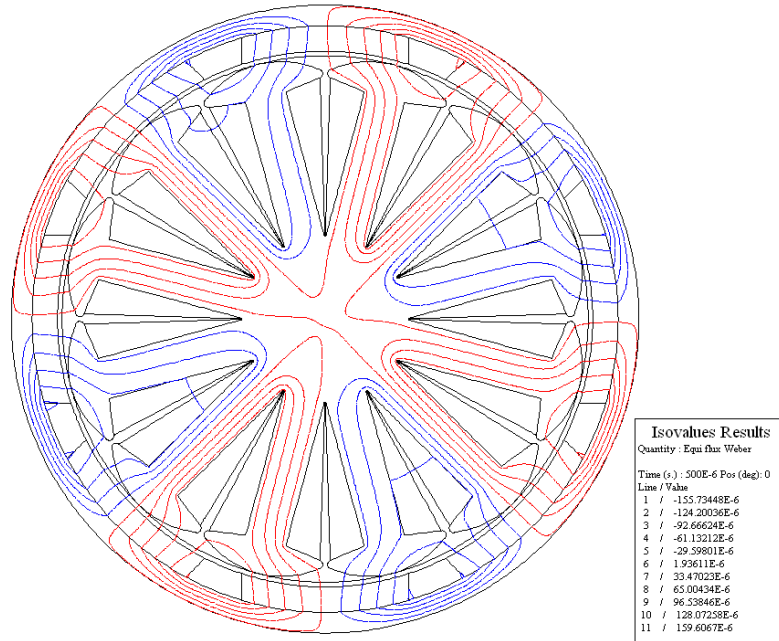
Çizelge 4.2 : Referans motorun saha performans sonuçları.

Motor Giriş Gücü	118 Watt
Motor Çıkış Gücü	69 Watt
Yük Momenti	1.7 Nm
Nominal Hız	365 min^{-1}
Giriş gerilimi	92 V
Giriş Akımı	2.55 A
Motor verimi	%58

Motorun kalkış anındaki akı yoğunluğu dağılımı ve akı eş değer eğrileri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sunulmuştur. Akı yoğunlukları incelendiğinde özellikle rotorda manyetik malzemenin doymaya yaklaştığı gözlenmiştir. Rotorun kütsel olması akı yoğunluğunun rotor boyunduruğunda artmasına neden olmaktadır. Ayrıca demir kayıplarının artmasına neden olup motorun veriminde düşmeye neden olmaktadır.

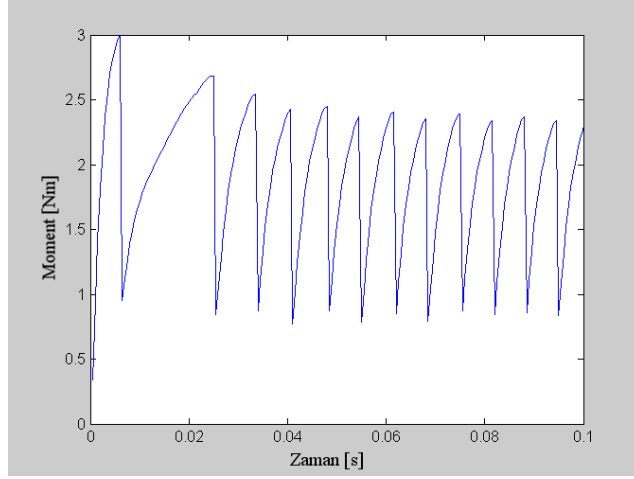


Şekil 4.6 : Referans motorun akı yoğunluğu

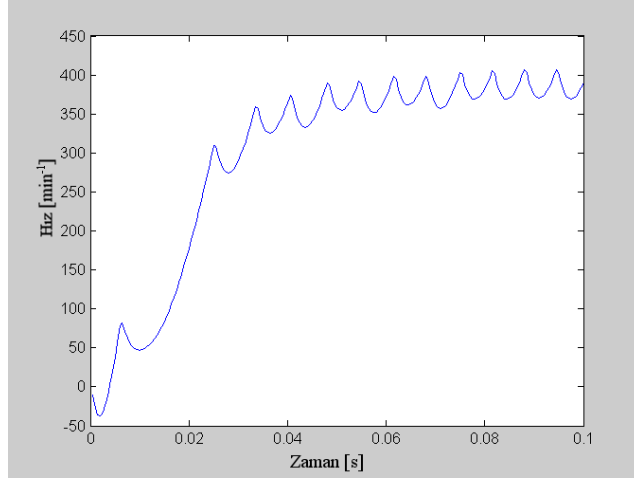


Şekil 4.7 : Referans motorun eş akı eğrileri

Manyetik moment, hava aralığına aktarılan ve rotorun dönmesini sağlayan moment değeridir. Motorun manyetik momenti ortalama 1.81 Nm olarak hesaplanmıştır ve motorun kalkış momenti eğrisi Şekil 4.8’de sunulmuştur. Motorun yıkama çalışma koşulunda nominal yük momenti, saha testlerindeki gibi 1.7 Nm olarak simülasyona eklenmiştir. Motorun hızlanma eğrisi Şekil 4.9’da sunulmuştur. Sürekli hal çalışmasında motor $365 \pm 20 \text{ min}^{-1}$ hızla dönmektedir.

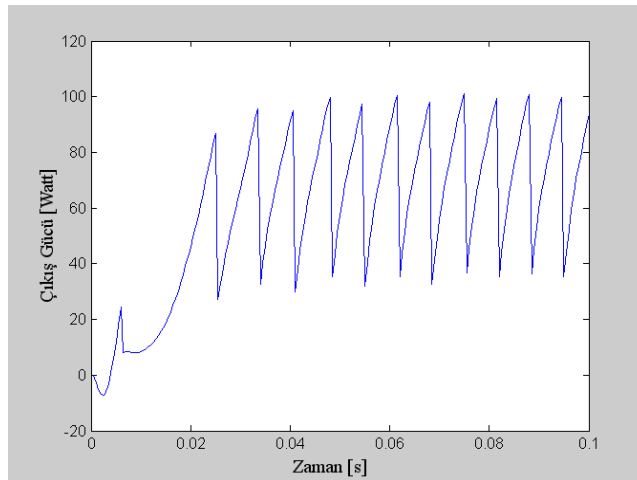


Şekil 4.8: Motorun kalkış momenti ve sürekli hal momenti



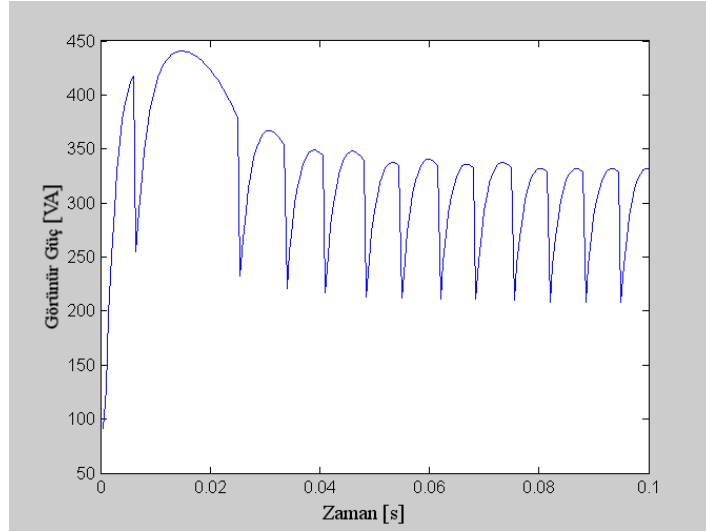
Şekil 4.9 : Motorun hızlanma eğrisi

Modellenen motorun çıkış gücü de saha testlerinden alınan sonuçlarla benzer olduğu Şekil 4-10'da görülmektedir. Çıkış gücü ortalaması 72 watt olarak hesaplanmıştır.

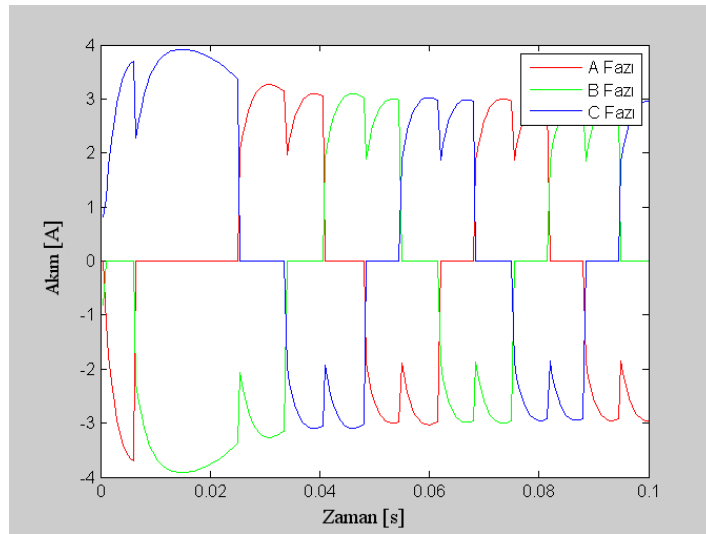


Şekil 4.10 : Motorun çıkış gücü

Motorun görünür güç eğrisinde ortalama 281.5 VA enerji tükettiği Şekil 4.11’de görülmektedir. Motorun çektiği akımın ortalamasının 2.6 A olduğu Şekil 4.12’de faz akımları grafiğinden hesaplanmıştır.



Şekil 4-11 : Motor görünür güç eğrisi



Şekil 4.12 : Faz akımları

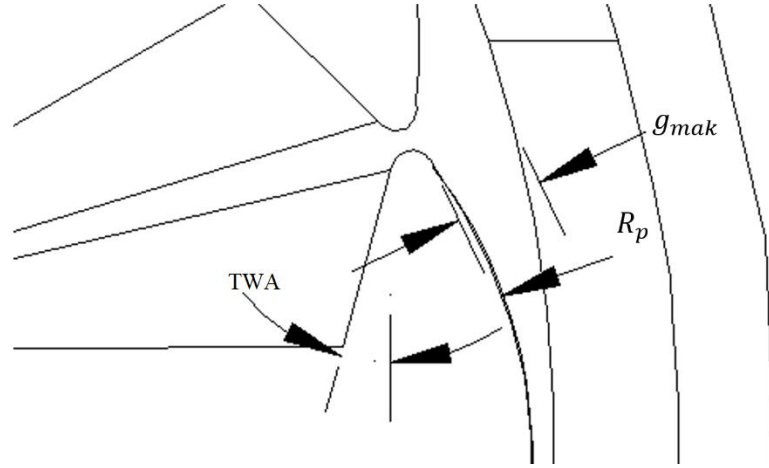
Bu bölümde görüldüğü üzere sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen referans motor, gerçekte üretimde olan motor ile aynı performansı sergilemektedir. Bu bölümde yapılan analizler sayesinde saha testlerindeki benzer sonuçlara ulaşıldığı söylenebilir.

4.4 İyileştirme Çalışmaları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak performans analizi yapmak ciddi sistem kaynağı ve zaman almaktadır. İyileştirme çalışmaları için ise çok sayıda analiz yapılması ve

sonuçlarının değerlendirip tekrar analizler yapılması ve en iyi tasarıma ulaşmak gerekmektedir. Çoğu zaman bu kadar çok sayıda analizin yapılması yetersiz sistem kaynağı ve çok uzun zaman alacağı için mantıklı bir yöntem olmamaktadır. Analiz sayısını azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri olan Taguchi tasarımı, gelişmiş istatistiksel yöntemler kadar güvenilir sonuçlar verebilmesi ve aynı zamanda maliyet odaklı olması açısından tercih edilen bir yöntemdir. Taguchi tasarımı, bilgisayar destekli iyileştirme çalışmalarında, fiziksel tasarımlardaki yapılacak deneylerin planlanmasından verimli olmaktadır. Bu sayede tasarım parametrelerinin azaltılması ve analiz sayısının düşürülmesi sağlanmaktadır.

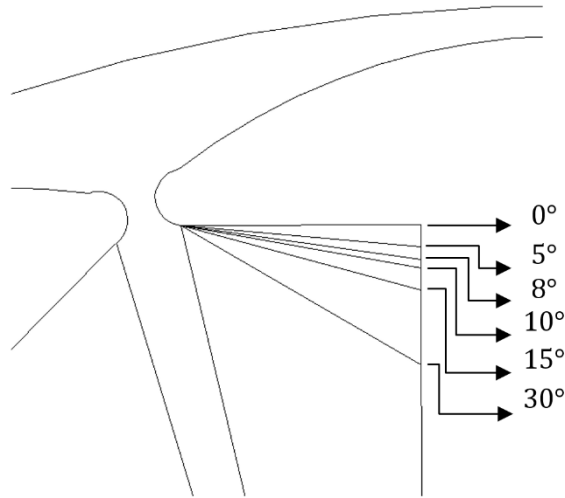
Literatürde, stator dişleri üzerine yapılan iyileştirme çalışmalarında iki yöntem öne çıkmaktadır. İlki genetik algoritma gibi iyileştirme yöntemleri ile statorda seçilen bir alan içerisinde stator dişlerinin performans kriterlerini maksimum seviyeye çıkardığı şeklin bilgisayar tarafından ortaya çıkarılması çalışmasıdır [23]. Diğer yöntem ise stator dişinin tüm ölçülerini birer tasarım parametresine dönüştürerek bunlar üzerinden hassasiyet analizi yapılarak performans kriterlerini en çok etkileyen parametrelerin iyileştirme çalışması için seçilmesi ve deneysel iyileştirme çalışması yapmaktır [24]. Taguchi tasarımı ile stator dişlerinin tasarım parametrenin analizleri literatürde çeşitli motor tipleri için uygulanmış, çıkış momenti ve vuruş momenti üzerinden en çok etki eden parametreler ortaya çıkarılmıştır. Taguchi tasarımı deneysel ve istatistiksel bir yöntem olduğu için her motor tasarımı için farklı tasarım parametrenin farklı etkileri olmaktadır. Bu tez de stator diş parametrelerinden diş yüzeyi yarıçapı (R_p) ve diş bağlantı açısı (TWA) parametre olarak seçilmiştir. Diş yüzeyi yarıçapı değeri R_p , g_{max} cinsinden ifade edilerek hava aralığı kesiti iyileştirme çalışması yapılacaktır. g_{max} değeri, elde edilen motor tasarımlarından motorun senkron endüktansının ve hava aralığı profili tanımlamada kolaylık sağlayacaktır. Şekil 4.13’de stator dişinde seçilen tasarım parametrelerinin geometrik ifadeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Optimizasyon için seçilen stator diş parametreleri

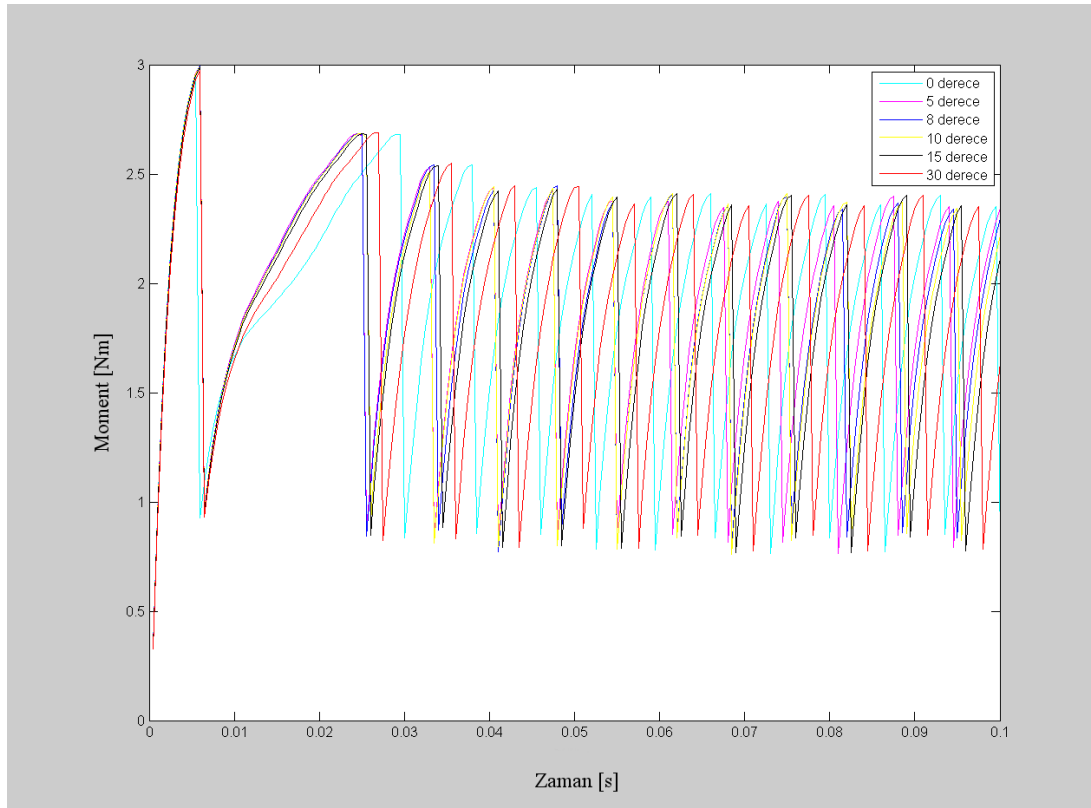
4.4.1.1 Boyunduruk bağlantı açısı iyileştirme

Referans tasarımda stator dişinin yarıçapı 8° 'dir. Bu bölümde Şekil 4.14'de geometrik olarak da gösterilen boyunduruk açısını sistemin sınırları olan 0° - 30° arasında değiştirerek motorun kalkış anında itibaren sürekli halde çalışması sırasında manyetik moment ve motor hızı değişimi incelenecektir.



Şekil 4.14: Boyunduk bağlantı açısının değişimi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'daki, zamana bağlı hız ve moment eğrilerinden görüldüğü gibi motorun kalkışından itibaren özellikle 0° ve 30° tasarımlarında performans düşüşü olduğu görülmektedir. Ortalama moment ve ortalama hız eğrileri hesaplandığında aradaki fark daha net ortaya çıkmaktadır.

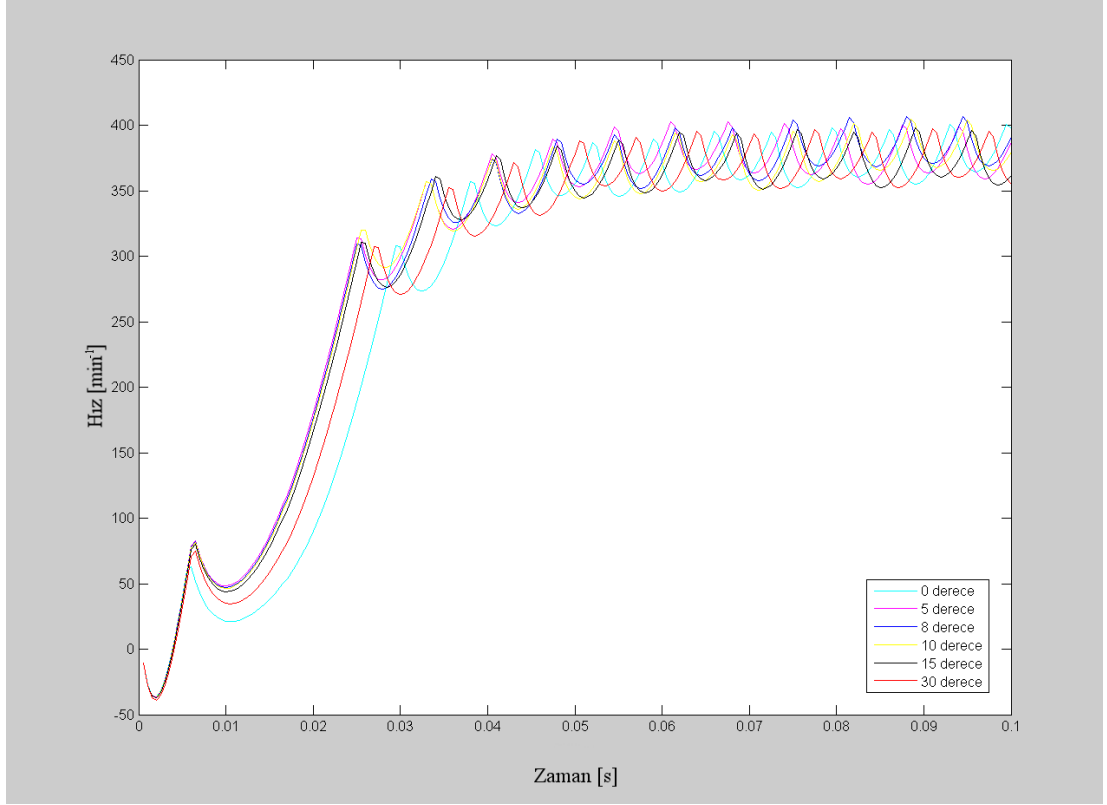


Şekil 4.15: Farklı açılarda zamana bağlı moment değişimi

0° ve 30° tasarımlarında diğer tasarımlardan performans olarak ayrıldığı görülmektedir. Genliklerde büyük fark oluşmasa da faz kayması nedeniyle oluşan bir performans azalması olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu performans farkı Çizelge 4.3 de hesaplanan ortalama momentleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Farklı açılarda zamana bağlı moment değişimi.

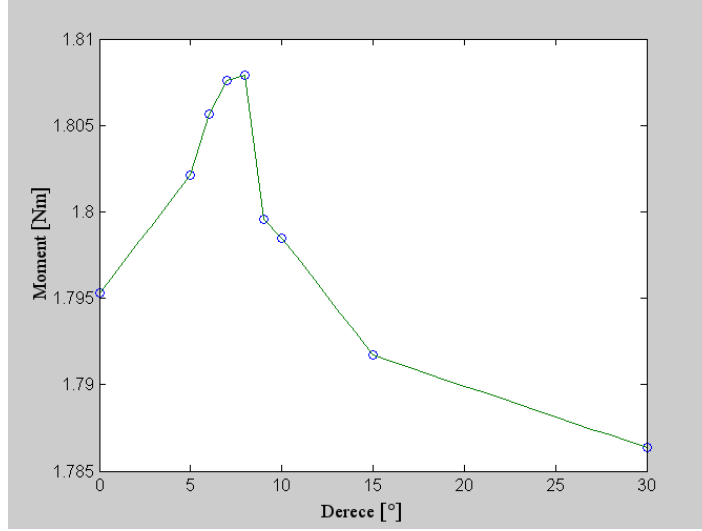
Açı [$^\circ$]	Ortalama Moment [Nm]
0	1.795
5	1.802
8	1.809
10	1.798
15	1.792
30	1.786



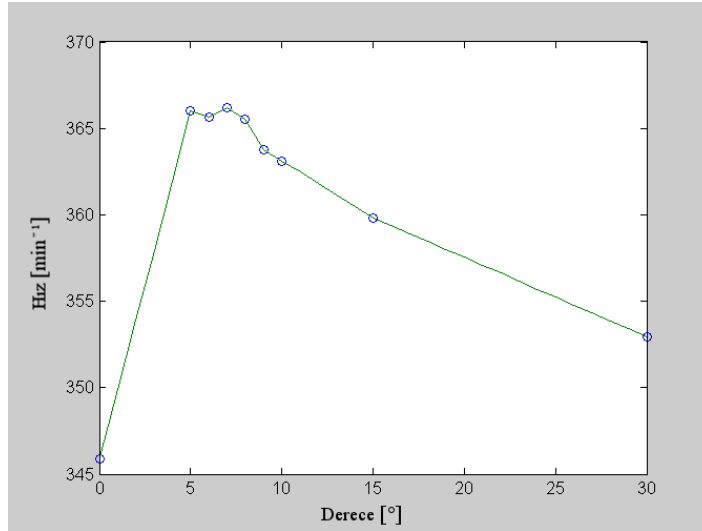
Şekil 4.16: Farklı açılarda zamana bağlı hız eğrileri

Ortalama momentte, referans tasarım olan 8° ve 7° boyunduruk açıları olan motorlar birbirlerine çok yakın performans sergilemektedir. 8° açılıya sahip motor, 0° açılıya sahip motordan ve 30° açılıya sahip motordan daha yüksek momente sahiptir. Burada karşılaştırılan ortalama moment artışı değil, motorun performansının özellikle hızını artması ile orantılı bir moment artışıdır. Değerler incelendiğinde çok ufak farklar olmasının nedeni bu analizler sırasında tüm motor tasarımlarının aynı yük momenti ile kalkış yaptırılmasından kaynaklanmaktadır. Ortalama moment artışının ölçülmesi için motorların aynı hızla çalıştıkları sırada ürettikleri çıkış moment karşılaştırılacaktır. Bu analizde, referans motorun performansından daha fazla performans gösteren motor bulunamadığı için moment artışı analizi yapılmamıştır.

Şekil 4-17 ve Şekil 4-18'de, ortalama hız ve moment eğrileri incelendiğinde, 0° , 15° ve 30° derece boyunduruk açısına sahip motorların 1.7 Nm yük momenti ile referans motor performans değerlerine erişemediği görülmektedir. Bu grafikte de ortalama moment grafiğinde olduğu gibi en ideal açının 8° olduğu açıkça görülmektedir.



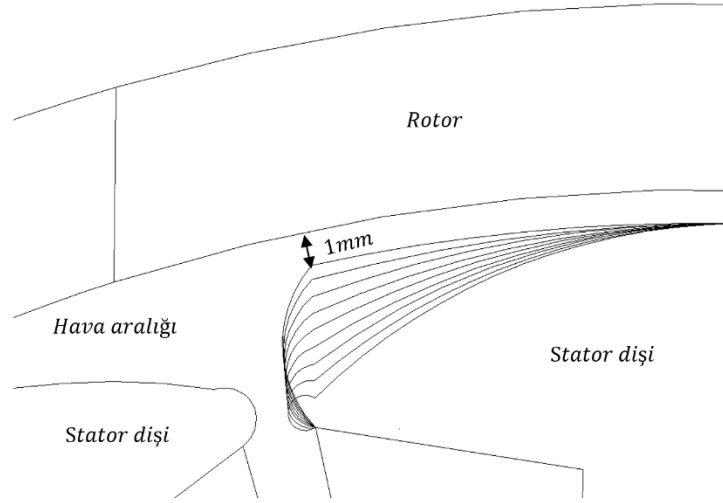
Şekil 4-17: Bağlantı açısı ile ortalama manyetik moment değişimi



Şekil 4-18: Bağlantı açısı ile ortalama hız değişimi

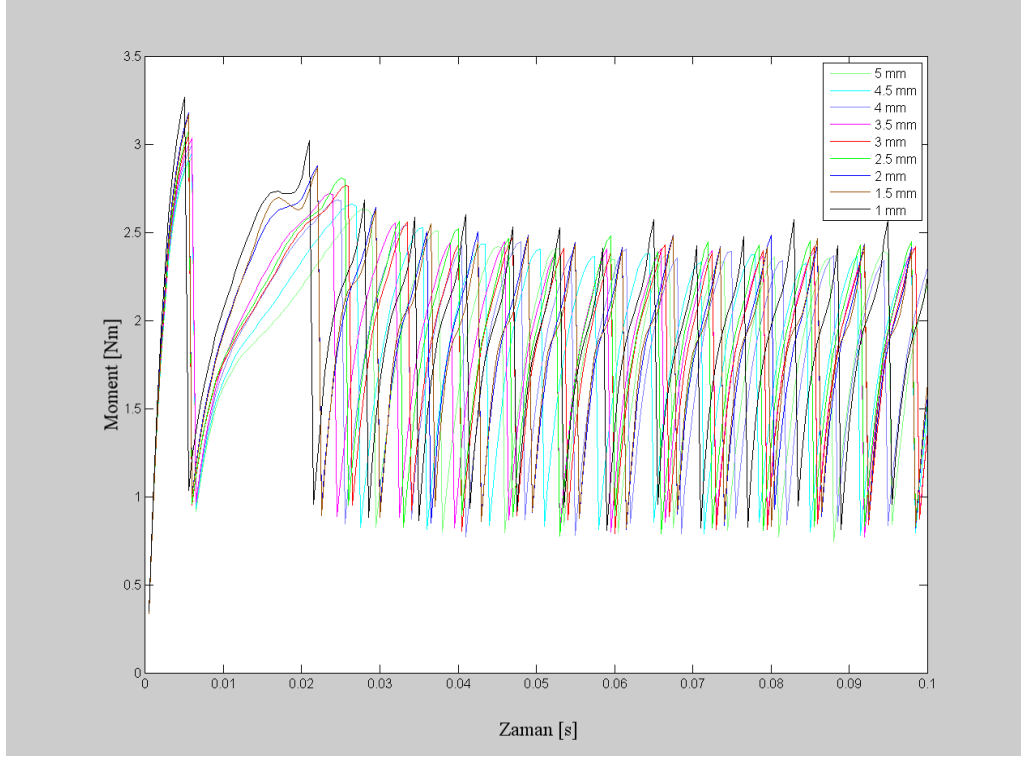
4.4.1.2 Hava aralığı

Referans motorda düzgün bir hava aralığı kesiti tasarlanmamıştır. Stator dişlerinin dış yüzeyine dairesel bir form verilmiştir. Bu bölümde bu dairesel formun yarıçapı değiştirilecektir. Yarıçapı değişmesi hava aralığının maksimum noktasını azaltan veya arttıran bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle hava aralığının maksimum olduğu noktanın 5 mm'den 1mm'ye kadar değişimi 0.5mm'lik adımlarla incelenecektir. Stator dişinde yapılan değişiklik geometrik olarak Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: Hava Aralığının 1mm'den 5mm'e 0.5mm aralıkla değişimi

Stator dişi boyunduruk açısı 8° 'deyken en iyi moment sonuçlarına ulaşıldığı için hava aralığı değişimi yapılırken boyunduruk açısı 8° 'de tutulmuştur. Hava aralığının daralması motorun manyetik momenti üzerindeki etkisi Şekil 4.20'de sunulmuştur. Hava aralığının 1mm olduğu tasarımda, motor en yüksek kalkış momentini sağlamaktadır. Ortalama moment grafiğine de bakıldığında motorun hava aralığının daralmasının ile doğru orantılı olarak ortalama momenti artmaktadır. Bu analizde yük momenti tüm tasarımlarda kalkış ve sürekli hale geçişi inceleyebilmek için sabit tutulmuştur. Moment artışının asıl nedeni motorun performansının artması özellikle motorun hızlanması (Şekil 4.21) ile viskoz sürtünme artması ve manyetik momentin artarak bunu karşılayıp dengelemesindendir. Bu analizden çıkan en uygun motor tasarımı için, referans modelin çalışma hızı olan 365 min^{-1} hızında çıkış momenti değeri incelenecektir.

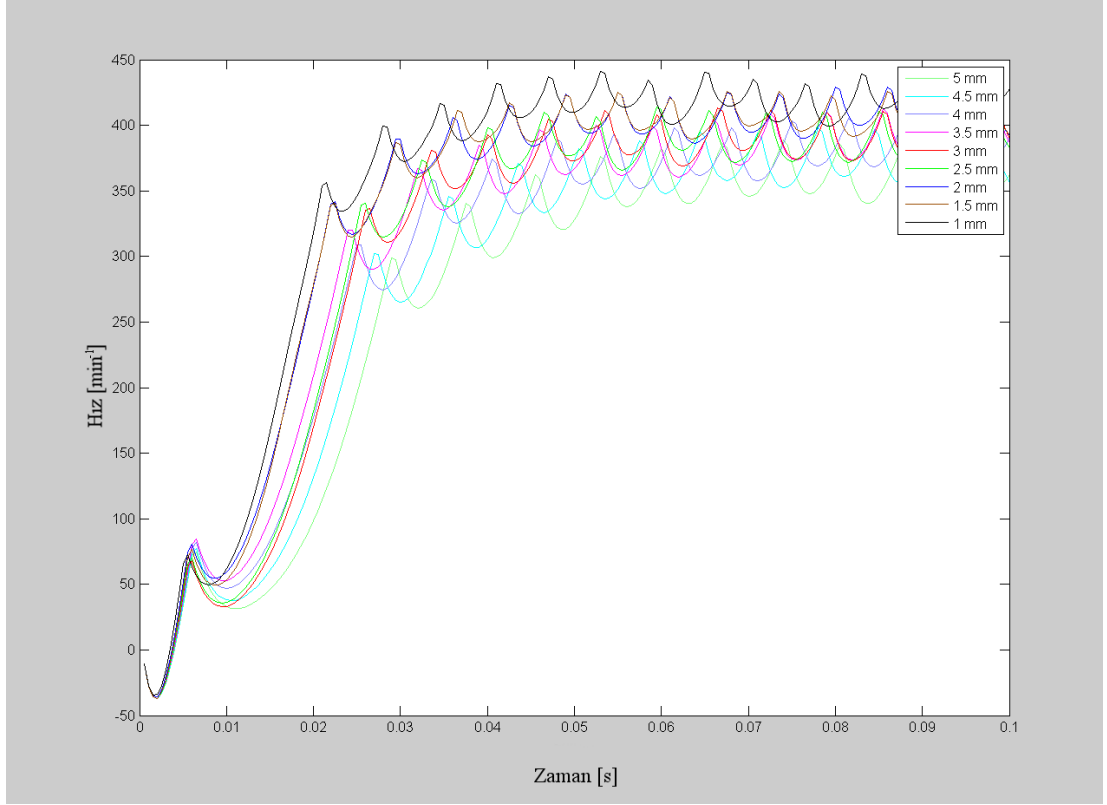


Şekil 4.20: Manyetik momenti hava aralığının değişimi ile karşılaştırılması

Hava aralığının daraldığını noktalarda manyetik akının artması o noktalarda manyetik doymaya neden olduğu 1mm, 1.5 mm ve 2 mm hava aralığına sahip motorlardaki moment eğrilerinde fark edilmektedir. Hava aralığının değişimiyle ortalama moment artışının olduğu Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4: Farklı hava aralığı değerlerinde ortalama moment

Mesafe [mm]	Ortalama Moment [Nm]
1	1.84
1.5	1.823
2	1.822
2.5	1.811
3	1.812
3.5	1.811
4	1.812
4.5	1.796
5	1.795

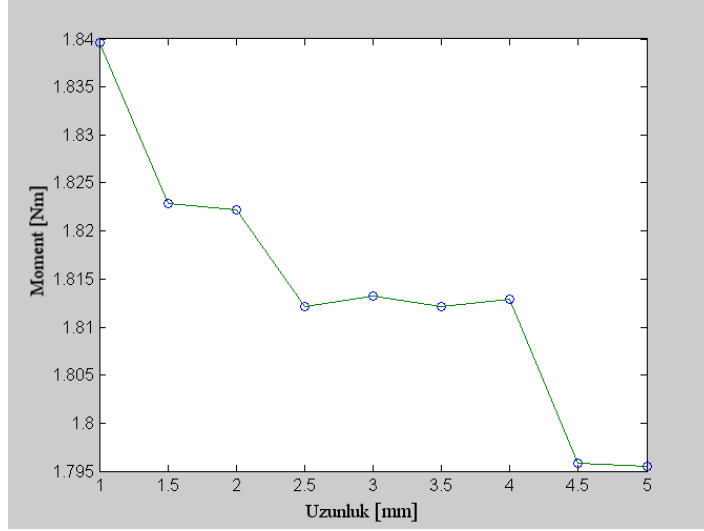


Şekil 4.21: Motor hızının hava aralığının değişimi ile karşılaştırılması

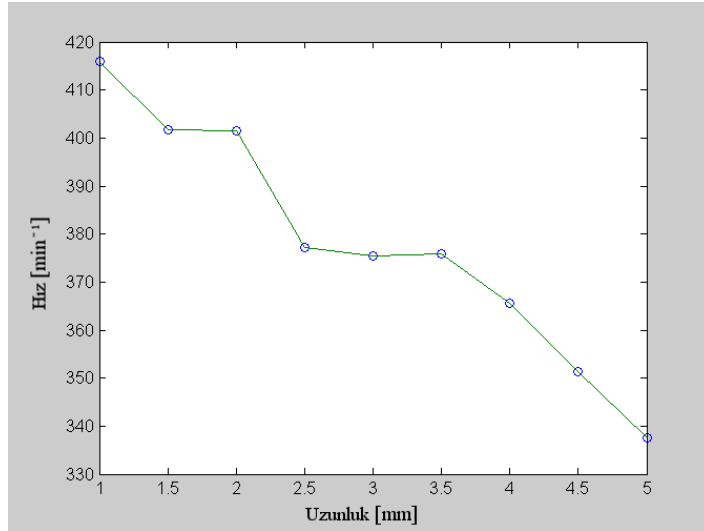
Çizelge 4.5: Farklı hava aralığı değerlerinde ortalama hız.

Mesafe [mm]	Hız [min^{-1}]
1	415.9
1.5	401.7
2	401.5
2.5	377.1
3	375.5
3.5	375.9
4	365.5
4.5	351.3
5	337.6

Moment grafiklerine benzer olarak zamana bağlı hız grafiklerinde hava aralığının azalması ile doğru orantılı artış görülmektedir. Yapılan iyileştirme araştırmasında, referans motorun hız ortalama değeri olan 365 min^{-1} 'dan, 1 mm hava aralığı olan motor tasarımında 416 min^{-1} hıza ulaşılmıştır. Bu grafiklerden de anlaşıldığı üzere 1 mm hava aralığı tasarıma sahip motorun referans motora göre moment artışı sağlayacağı öngörülmektedir.

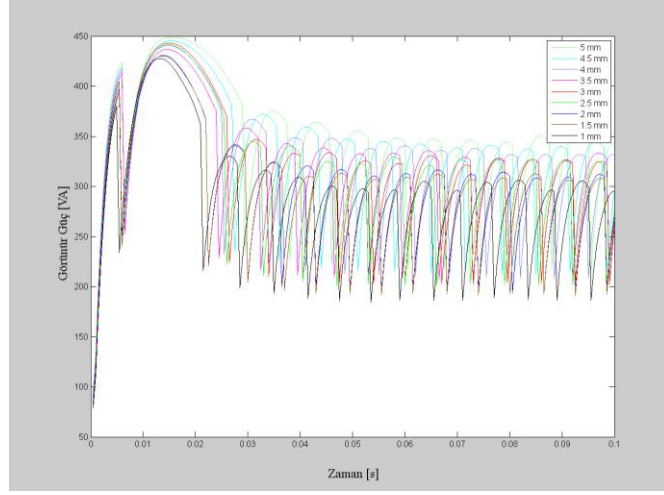


Şekil 4.22: Hava aralığı ile ortalama manyetik moment değişimi



Şekil 4.23: Hava aralığı ile ortalama hız değişimi

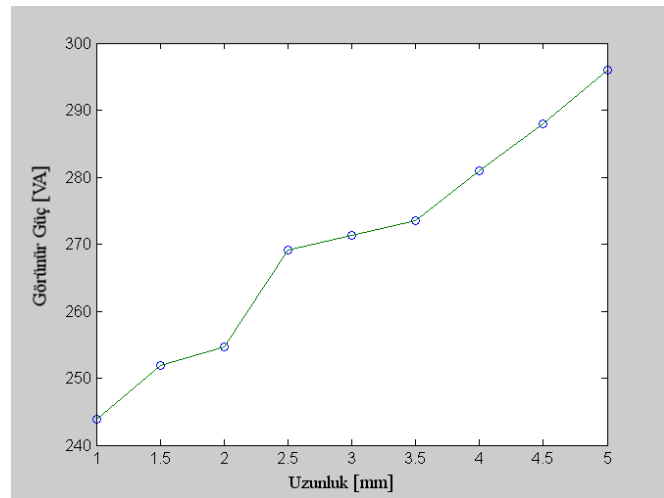
Motorun kalkışı sırasında ve sürekli halde çektiği görünür gücün zamana bağlı grafiği Şekil 4.24 de, ortalama görünür güç grafiği ise Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Makinanın görünür gücünün hava aralığının azalması ile azaldığı görülmektedir. Hava aralığının düzgün bir yapıya kavuşması ile kaçak akıların azalması sağlanmıştır. Ayrıca güç faktöründe artma ve çekilen enerjide azalma meydana gelmiştir. Referans modele göre 1mm hava aralığı olan motorda görünür güç %13 azalmıştır.



Şekil 4.24 Görünür gücün hava aralığı ile değişimi

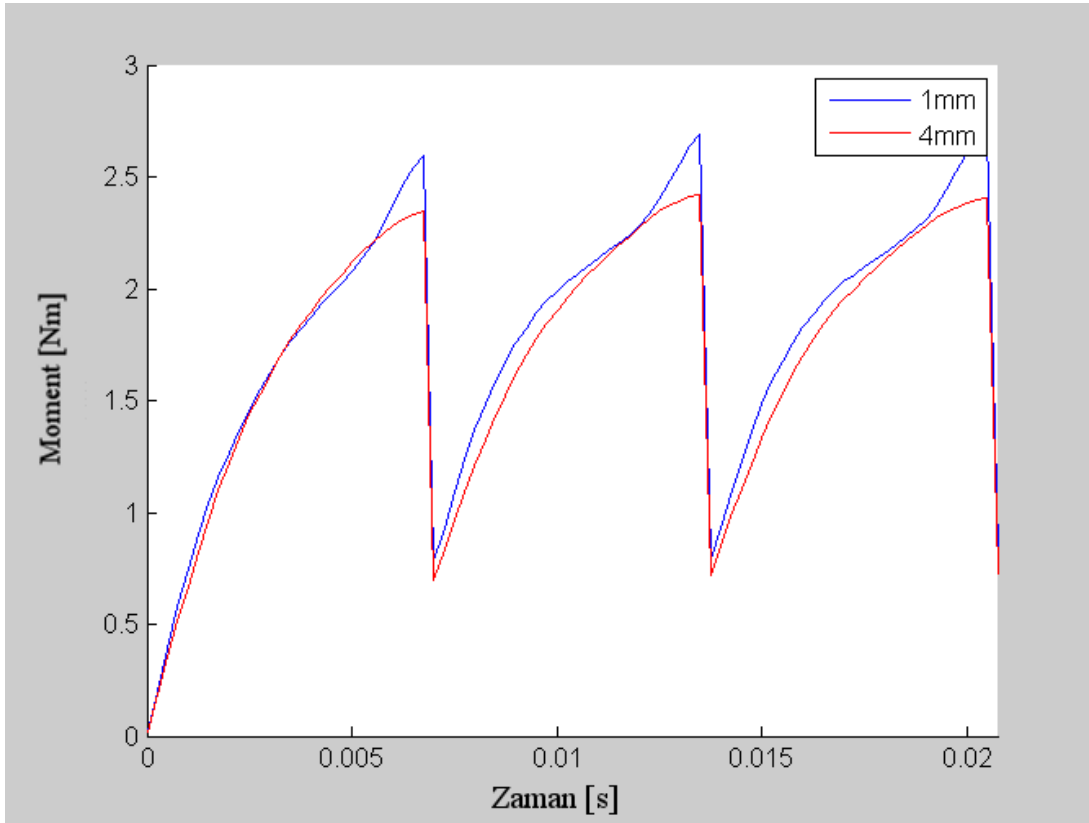
Çizelge 4.6: Farklı hava aralığı değerlerinde görünür güç.

Mesafe [mm]	Görünür Güç [VA]
1	243.8
1.5	251.9
2	254.7
2.5	269.1
3	271.4
3.5	273.5
4	281
4.5	288
5	296



Şekil 4.25: Ortalama görünür gücün hava aralığı ile değişimi

Hava aralığının değiştirildiği bu iyileştirme çalışmasında yük momenti sabit tutularak motorların kalkışı ve sürekli hale geçişlerinin dinamik performansları öncelikle incelenmek hedeflenmiştir. Açık bir şekilde 1mm hava aralığına sahip motorun, referans motora karşı performans kriterleri açısından üstünlüğü olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle 1mm hava aralığına sahip motorun, referans motorun sürekli hal hızı olan 365 min^{-1} hızında maksimum çıkış momentinin araştırılması gerekmedir. Bu analiz için motordan yük momenti kaldırılarak, 365 min^{-1} hızında motorların dönmesi sırasında oluşan manyetik momentler zaman karşı çizdirilmiştir. Şekil 4.25’ de referans motor olan 4 mm hava aralığına sahip motor ile 1 mm hava aralığına sahip motorun zaman karşı manyetik moment eğrileri görülmektedir.

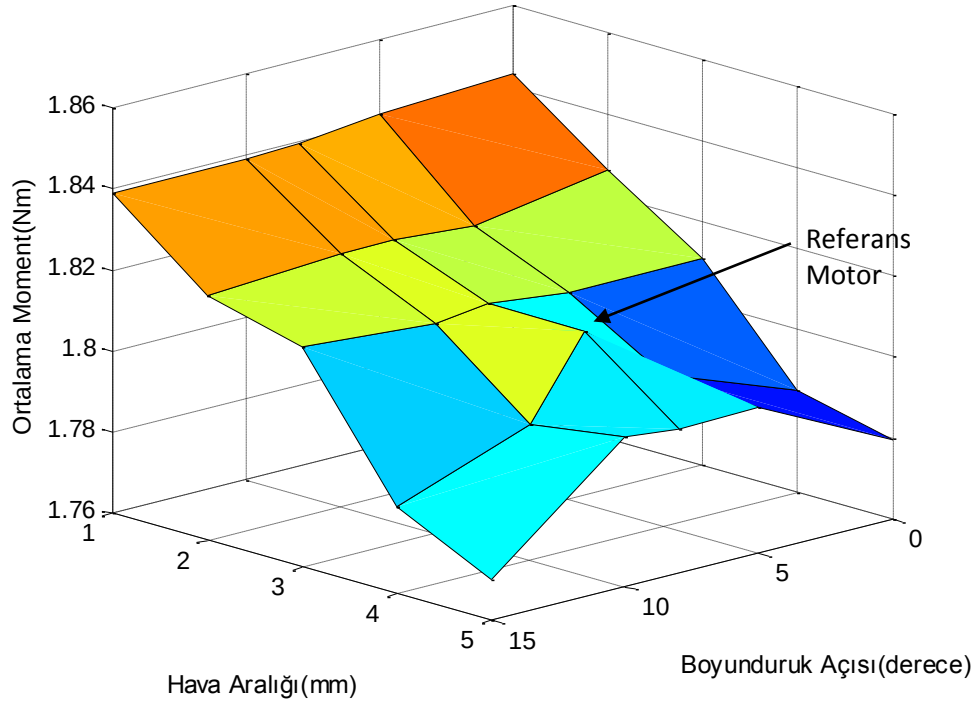


Şekil 4.26 : Aynı hızda çalışan farklı iki motorun moment eğrileri

1mm hava aralığına sahip motorun 1,7890 Nm, referans motorun ise 1,7029 Nm ortalama moment ürettiği hesaplanmıştır. Hava aralığının formunun 1mm düşürülmesi ile % 5.06’lık bir ortalama moment artışı sağlamıştır.

4.4.1.3 Boyunduruk açısı ve hava aralığının birlikte incelenmesi

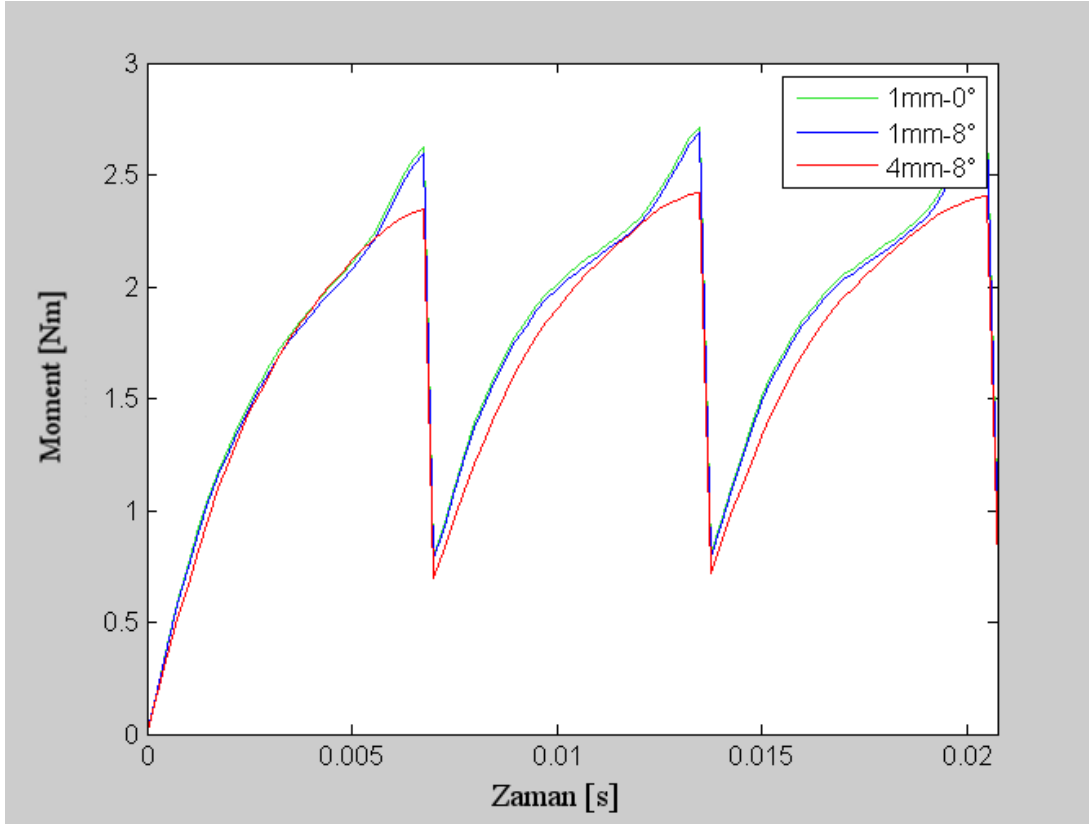
Bu tezde kullanılan yöntem deneysel bir yöntem olduğu için iki parametrenin birlikte değiştirildiği analizin de yapılması ve diğer analizden elde edilen sonuçları teyit etmesi gerekmektedir. Boyunduruk açısı ve hava aralığının birlikte değiştirildiği birbirinden farklı 25 yeni motor tasarımının kalkış ve sürekli hal geçiş analizlerindeki ortalama manyetik moment değerleri Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4-27: Tasarım parametrelerinin kombinasyonlarının ile ortalama moment değişimi

Referans motora ilişkin, boyunduruk açısının 8° ve hava aralığının 4mm olduğu nokta Şekil 4.27’de işaret edilmiştir. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi referans motor, ortalama moment açısından lokal bir maksimum noktadır. Ancak hava aralığının artması ile birlikte momentin artmakta olduğu görülmektedir. Bu analiz ile birlikte en iyi motor tasarımının 0° boyunduruk açısı olan ve hava aralığı 1mm olan motor olduğu görülmektedir. Boyunduruk açısı iyileştirme analizde, boyunduruk açısı 8° ve hava aralığı 1mm olan motora yapıldığı gibi bu analiz sonucu en uygun model olan 0° derece boyunduruk açılı ve 1mm hava aralığı olan motora da referans motorun sürekli hal hızı olan 365 min^{-1} ’da çıkış momenti incelenmesi gerekmektedir. Şekil 4.28’de, sırasıyla hava aralığı ve boyunduruk açısı 1mm- 0° , 1mm- 8° , 4mm- 8° motor tasarımları referans hızda döndürülerek çıkış momentlerinin değişimini zamana bağlı

olarak çizdirilmiştir. Hava aralığı 1mm ve boyunduruk açısı 0° olan motorun ortalama momenti 1.8114 olarak hesaplanmıştır. Böylelikle referans motora göre % 6.37'lik, boyunduruk açısı 8° olan motora göre %1.25'lik ortalama moment artışı sağlanmıştır.

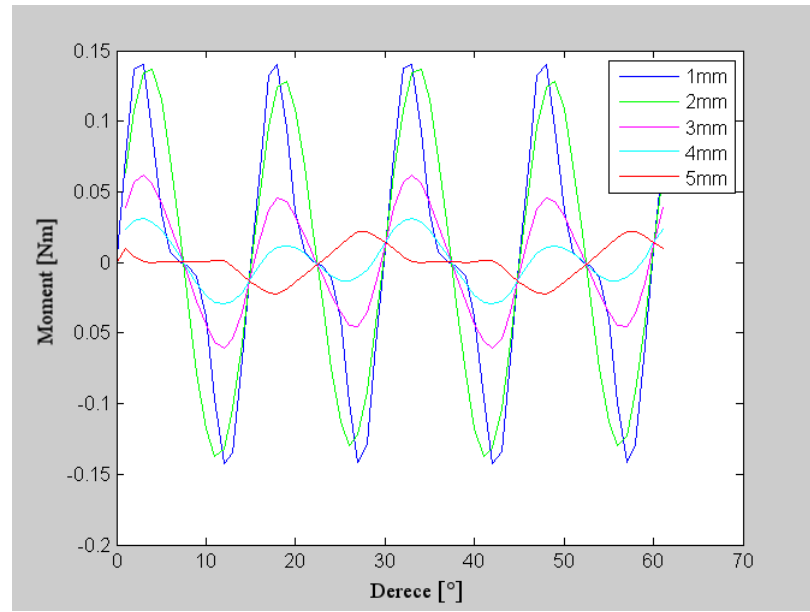


Şekil 4.28 : İyileştirilen motorlar ve referans motorun moment karşılaştırması

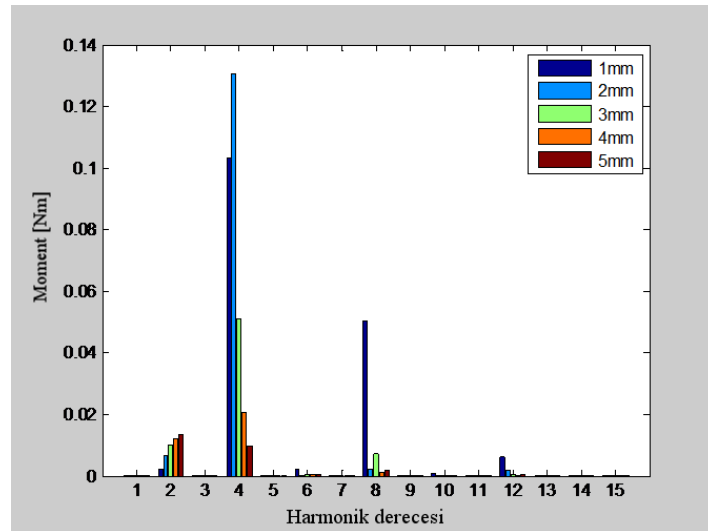
4.4.1.4 Vuruntu momenti analizi

Elektrik makinalarında, moment dalgalanmasının üç kaynağı bulunmaktadır. Bu kaynaklar, mıknatısların manyetik akısı ile statorun oluklarının manyetik iletkenliğinin arasındaki etkileşim olan vuruntu etkisi, manyetik akı yoğunluğunun hava aralığındaki dağılımın bozulması ve $d-q$ eksenlerinin farklı manyetik iletkenlik göstermesidir. $d-q$ eksenlerinin farklı manyetik iletkenlik göstermesi relüktans momenti oluştururken, vuruntu momentinin oluşturan etki vuruntu etkisidir[34]. Vuruntu etkisi, düşük hızlarda daha belirgin olarak görülür ve momentte dalgalanmalara neden olur. Vuruntu momenti analizinde, sonlu eleman modelinden sargıları ve devre elemanları çıkararak $1/6 \text{ min}^{-1}$ hızda motorun rotoru tahrik edilmiş ve rotorda vuruntu momenti incelenmiştir. Bu analizde mıknatısların çekme kuvvetlerinin, mıknatıslara yakın stator yapısı üzerinde etkisi olduğu için, boyunduruk açısı değişmesi hava aralığı sabit kaldığında, neredeyse vuruntu momentine hiç etkisi olmadığı simülasyonlarda

görülmüştür. Hava aralığını iyileştirme analizinde tasarlanan, 1mm, 2mm, 3mm, 4mm ve 5mm hava aralığına sahip olan motorları inceleme bu analiz için yeterli olacaktır. Hava aralığı farklı motor tasarımları için Şekil 4.29'da vuruntu momentleri değerleri bakımından karşılaştırma yapılmıştır. Hava aralığının artmasıyla vuruntu momentinde ciddi bir azalış görülmektedir. Hava aralığının 1mm'den 5 mm'ye artırılması, vuruntu momentini %85 azaltmaktadır. Şekil 4.30'da vuruntu momentlerinin dalga şekilleri harmoniklerine ayrıldığında 2. ve 4. harmoniklerin yüksek olduğu görülmektedir. Bu harmoniklerin oluşmasında hava aralığı profilinin, mıknatıslarının dağılımının ve elektromotor kuvvetinin harmoniklerinin etkisi vardır.

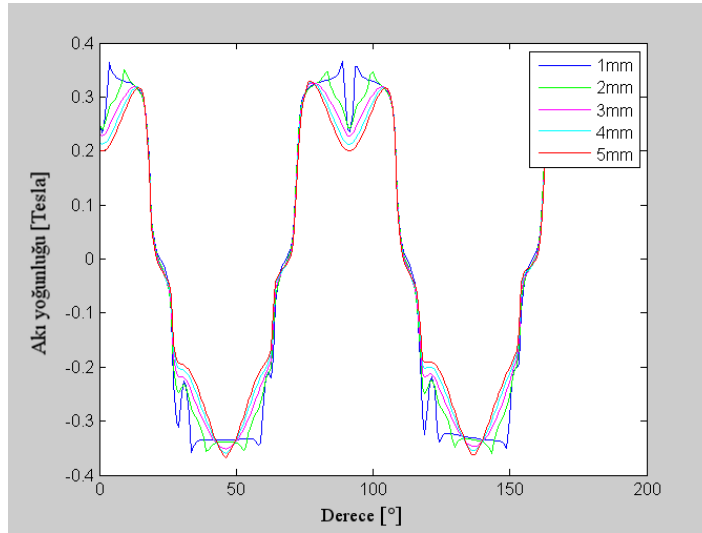


Şekil 4.29: Farklı Motorlarda Vuruntu Momenti Eğrilerinin Karşılaştırılması

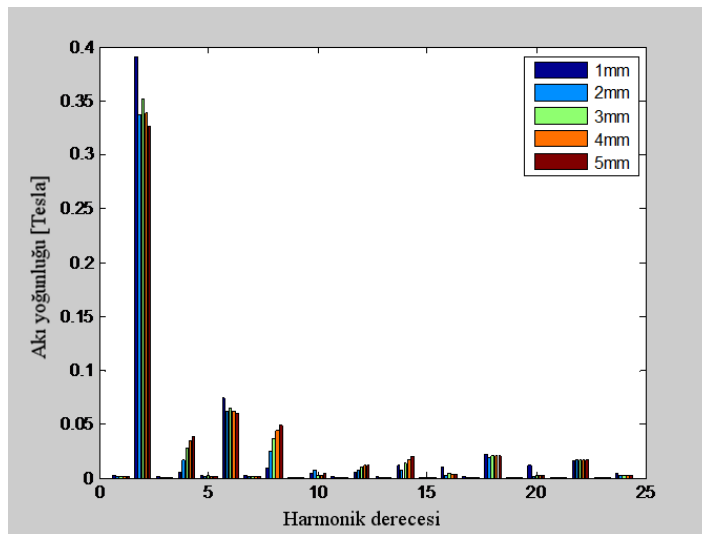


Şekil 4.30: Vuruntu momentlerin harmonik analizi

Akı yoğunluğunun normal bileşenleri ise Şekil 4.31’de karşılaştırılmıştır. Hava aralığının azalması ile etkin akının arttığı gözlenmiştir. Akı yoğunluğunun yüksek dereceli harmonikleri, motorda alan harmoniği elektromanyetik momenti oluşturmaktadır. Bu moment, vuruğu momenti ve relüktans momenti gibi motorda moment dalgalanmalarına neden olmaktadır. Akı yoğunluklarının harmonik analizi Şekil 4.32’de sunulmuştur. Harmonik analizinde görüldüğü gibi 1mm hava aralığına sahip motorun 2. harmonikteki genliğinin diğer motor tasarımından yaklaşık %12.5 daha fazla olduğu görülmektedir. Akı yoğunluğu artması, momenti artıracak gibi bu motorda diğer motorlara göre daha fazla moment dalgalanması görülmeye yol açmaktadır.



Şekil 4.31: Farklı motor tasarımlarında akı yoğunluğunun normal bileşeni



Şekil 4.32: Akı yoğunluğu normal bileşenleri harmonik dağılımı

Boyunduruk açısının, vuruuntu momenti üzerindeki etkisinin yapılan simülasyon ile çok az olduğu görülmüştür. Ancak hava aralığının değişmesi ile vuruuntu momentinde önemli oranda değişmekler olmaktadır. Genel olarak momentte oluşan dalgalanmalar iyileştirme sonucu çıkan motorun ortalama momentinde referans motora göre artışa neden olmaktadır. Momentte oluşması beklenen bu dalgalanma etkilerinin sistemin eylemsizliği ile de bağlantısı bulunmaktadır. Eylemsizlik arttıkça momentte oluşan dalgalanmalar tolerans edilebilir. Nitekim bu analizde kullanılan sistemde moment dalgalanmasının yanı sıra ortalama momentte artış gözlenmiştir.

4.4.1.5 Senkron endüktans analizi

$d-q$ eksenlerinde görülen endüktans değişikliği, relüktans momentine neden olmaktadır. (2.10) denklemindeki genel moment ifadesinde $(L_d - L_q)I_{qs}I_{ds}$ kısmı, relüktans momenti ifade etmektedir. Motor tasarımı yapılırken relüktans momentini azaltmak için L_d ve L_q endüktanslarının yakın olması genellikle istenmektedir. Hesaplamalarda, matematiksel yöntemler veya sonlu elemanlar yöntemi kullanılabilir. L_d ve L_q endüktanslarının matematiksel hesaplanması ile ilgili 2.4 bölümde detaylı bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise sonlu eleman modeli kullanılarak referans motor ve iyileştirme sonucu ortaya çıkan motorun L_d ve L_q endüktansları hesaplanacaktır. Bulunan sonuçlar referans motorun saha testlerinden gerçek L_d ve L_q değerleri ile karşılaştırılacaktır.

L_d ve L_q endüktansları ölçmek için sonlu elemanlar modelinde kullanılacak elektrik devresinde B ve C fazlarına -0.5 A ve A fazına 1 A'lık akım kaynakları ile faz sargıları beslenir. d eksenini ile akım vektörü aynı hizaya gelecek şekilde ve elektriksel 90° ötelenmiş şekilde rotor döndürülerek sabitlenir. A fazında görünen akılar her iki durum için ölçülür. Faz akım i_a , endüktanslar, manyetik akı Ψ_a ve $d-q$ eksenleri arasındaki bağıntı (4.1) ve (4.2) de gösterilmiştir. Faz akımı, 1 A olduğu için A fazında görünen akı değeri, rotorun durumuna göre L_d veya L_q eşit olmaktadır.

$$\Psi_a = i_a * L_d , \quad \delta = 0^\circ \quad (4.1)$$

$$\Psi_a = i_a * L_q , \quad \delta = 90^\circ \quad (4.2)$$

Referans motorun L_d değeri 11,37 mH ve L_q değeri 15.25 mH olarak hesaplanmıştır. İyileştirme sonucunda ortaya çıkan motorda, L_d değeri 3,75 mH ve L_q değeri 8,95 mH olarak hesaplanmıştır. Hava aralığının azalması, manyetik reaktansın azalmasına akı yoğunluğun artmasına ve endüktansların değerinin azalmasını neden olmaktadır. L_d ve L_q endüktanslarının referans motorda, aralarında değer olarak %26'lık bir fark var iken iyileştirilen motor da bu fark %59'dur. Referans motorun stator dış şeklinin L_d ve L_q endüktanslarını birbirine yaklaştırma açısından daha başarılı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum relüktans momentininde azalmasını ve hava aralığındaki akının daha sinüzoidal bir dalga şeklinde olmasını sağlamaktadır. Bu sonuç önceki yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla bağdaşmaktadır. Benzer şekilde de referans motorun endüktans değişiminin büyük olması; vurutu momenti, relüktans momenti bileşenlerinin artmasına ve hava aralığı akısının bozulmasına neden olduğu anlaşılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik motoru tasarımında en temel parametrelerden biri momenttir. Yüksek moment yoğunluğu gerektiren uygulamalarda genellikle dış rotorlu FDAM tercih edilmektedir. Dış rotorlu motorlarda ortalama momenti artırmaya yönelik birçok yöntem literatürde bulunmaktadır. Bu tezde de stator dışında yapılan yapısal değişiklikler ile iyileştirme çalışmasında bulunulmuş ve ortalama çıkış momentinde artış sağlanmıştır.

İyileştirme sırasında kullanılan hava aralığı mesafesi ve boyunduruk bağlantı açısı parametreleri, literatür araştırmasında dış rotorlu motorların üzerine yapılan yapısal iyileştirme çalışmalarından elde edilmiştir. Referans motor üzerinde öncelikle her parametre tek başına değiştirilerek kalkış ve sürekli hal çalışma simülasyonları yapılmıştır. Referans motorda yapılan değişiklikler ile ortaya çıkan tasarımların birlikte kalkış ve sürekli hale geçiş simülasyonları yapılarak hem motorların performanslarının gözlenmesi hem de yapılan değişikliklerin dinamik ve sürekli hal etkilerinin gözlenmesi sağlanmıştır. Kalkış ve sürekli hal simülasyonlarında motor tasarımlarının performans farklarını görebilmek için her motora uygulanan yük momenti sabit tutulmuştur. Analizde görülen moment artışları büyük oranda motorun hızlanması ile yenmesi gereken viskoz sürtünmenin de artmasından kaynaklanmaktadır. Analiz sonucunda performansında artış gözlenen motor daha sonra referans motor ile aynı hızda tahrik edilerek ortalama çıkış momentlerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

İlk olarak boyunduruk bağlantı açısı parametresi iyileştirme çalışmalarında, referans motorun sahip olduğu hava aralığındaki en iyi boyunduruk açısının 8° yani referans motorun sahip olduğu boyunduruk açısı olduğu ortaya çıkmıştır. Hava aralığı iyileştirme analizinde ise hava aralığının en küçük olduğu sınır değer 1mm'de en yüksek performans gözlenmiştir. Hava aralığının azalması ile birlikte boyunduruk açısının 8° 'den küçük değerlerinde performansın arttığı bir yüzey grafiği ile sunulmuştur. İyileştirme sonucunda ortaya çıkan 1mm hava aralığına ve 0° boyunduruk açısına sahip motor, referans motordan %6.37 daha fazla ortalama moment üretebildiği gösterilmiştir.

Vuruntu momentinin etkileri, iyileştirilen ve referans motor üzerinde incelenmiş ve iyileştirilen motorun referans motora göre 5.6 kat daha fazla vuruntu momenti olduğu gösterilmiştir. Ayrıca hava aralığı harmonik analizi yapıldığında yüksek dereceli harmoniklerin yeni tasarımda fazla olduğu ve bunlarında momentte dalgalanmalara neden olacağı öngörülmüştür.

Son analizde motorların d - q eksenlerindeki endüktansları hesaplanmıştır. Referans motorun stator dişi tasarımının L_d ve L_q endüktanslarının değer olarak birbirine yaklaştırdığı görülmüştür. Bu sayede daha düzgün bir hava aralığı akısı ve düşük relüktans momenti oluşacağı gösterilmiştir.

Sonuç olarak yapılan iyileştirme çalışması ile referans motora göre sadece stator dişi yapısı değiştirilerek literatür çalışmalarına yakın bir moment artışı sağlanmıştır. Bu moment artışının yanı sıra momentte dalgalanmalara neden olacak moment bileşenlerinde de artış olduğu açıktır. Bu negatif etkilerin sistemin ve motorun eylemsizliği ile bastırılabilirdiği veya makul seviyelerde kaldığı takdirde iyileştirilen motor tercih edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Gao, X. ve Low, T.** (2001). Structural Robust Design for Torque Optimization of BLDC Spindle Motor Using Response Surface Methodology. IEEE Transactions on Magnetics, Cilt 37, sayı 4.
- [2] **Song, S. Wu, L. ve Cui, S.** (2007). Study on Improving the Performance of Permanent Magnet Wheel Motor for the Electric Vehicle Application. IEEE Transactions on Magnetics, Cilt 43, sayı 1.
- [3] **Parviainen, A., Niemela, M., Pyrhonen, J. ve Mantere, J.** (2005). Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanentmagnet machines including mechanical constraints. IEEE IEMDC, Sf. 1695-1702.
- [4] **Kitamura, M., Kaneda, J. ve Hino, N.** (2003). Motor design approach utilizing regularity of a two-dimensional magnetic field. IEEE Trans. Mag., Cilt 39, sayı 3, Sf 1464-1467.
- [5] **Reichert, T., Nussbaumer, T., Kolar, J. W.** (2010). Torque Scaling Laws for Interior and Exterior RotorPermanent Magnet Machines. 12th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB12), Wuhan, Çin.
- [7] **Zadeh, M.H., Kiyomarsi, A.** (2009). Torque Optimization of the Interior-Permanent Magnet Synchronous Motors using Design Sensitivity Analysis. IEEE, website: <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/367-zadeh.pdf>
- [8] **Kwack, J., Min, S. ve Hong, J.** (2010). Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor to Reduce Torque Ripple Using the Level Set Method. IEEE Trans. Magn., Cilt 46, Sf. 2108-2111.
- [9] **Bharatkar, S.S., Yanamshetti, R., Chatterjee, D. ve Ganguli, A.K.** (2010). Dual-mode switching technique for reduction of commutation torque ripple of brushless DC motor. IET Electrical Power App.
- [10] **Ozturk, S.B. ve Toliyat, H.A.** (2011). Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Cilt 16, Sf. 351-360.
- [11] **Mohamed, Y. A-R I.** (2007). Direct Instantaneous Torque Control in Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motors—a New Approach. IEEE Trans. Energy Conversion, Cilt 22, Sf. 829-838.
- [12] **Ozturk, S.B., Alexander, W.C. ve Toliyat, H.A.** (2010). Dual-mode switching technique for reduction of commutation torque ripple of brushless dc motor. IEEE Trans. Power Electronics, Cilt 25, Sf. 263-271.

- [13] **Takahashi, I. ve Noguchi, T.** (1986). A New QuickResponse and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor. IEEE Trans. on Industry Applications, Cilt.IA-22, sayı 5, Sf. 820-82.
- [14] **Hanselman, D.** (1994). Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors. IEEE Trans. Ind. Electron., Cilt 41, no. 3, Sf.292–300.
- [15] **Le-Huy, H., Perret, R. ve Feuillet, R.** (1986). Minimization of torque ripple in brushless dc motor drives. IEEE Trans. Ind. Appl., Cilt IA-22, sayı 4, Sf.748–755.
- [16] **Grenier, D., Yala, S., Akhrif, O. ve Dessaint, L. A.** (1998). Direct torque control of pm ac motor with non-sinusoidal flux distribution using state-feedback linearization techniques. in Proc. IEEE IECON, Aachen, Germany, Cilt 3, Sf.1515–1520.
- [17] **Low, T. S., Tseng, K. J., Lee, T. H., Lim, K. W. ve Lock, K. S.** (1990). Strategy for the instantaneous torque control of permanent-magnet brushless dc drives. Proc. Inst. Elect. Eng.—Elect. Power Appl., Cilt 137, sayı 6, Sf.355–363.
- [18] **Chapman, P. L., Sudhoff, S. D. ve Whitcomb, C. A.** (1999). Multiple reference frame analysis of non-sinusoidal brushless dc drives. IEEE Trans. Energy Convers., Cilt 14, sayı 3, Sf.440–446.
- [19] **Hao, L. ve Toliyat, H. A.** (2003). BLDC motor full-speed operation using hybrid sliding mode observer. in Proc. IEEE APEC, Miami, FL, Cilt 1, Sf. 286–293.
- [20] **Li, T. ve Slemon, G.** (1988). Reluctance of cogging torque in permanent magnet motors. IEEE Trans. on Magn., vol 24, Sf. 2901-2903.
- [21] **Lshikawa, T. ve Slemon, G. R.** (1993). A method ot reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing. IEEE Trans on Magn., vol 29, no 2, Sf. 2028-2031.
- [22] **Zhu Z. Q. ve Howe, D.** (1992). Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motor. IEEE Trans Magn., Cilt 28, Sf. 1371-1374.
- [23] **Han, K., Ch, H.** (1999). Core Shape Optimization for Cogging Torque Reduction of BLDC Motor. Hyun-Kyo Jung School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seul 15 1-742, Kore.
- [24] **Gillon F. ve Brochet, P.** (1999). Shape Optimization of a Permanent Magnet Motor using the Experimental Design Method. IEEE Transactions On Magnetism, Cilt 35, No, 3.
- [25] **Fazil M. ve Rajagopal, K. R.** (2010). A Novel Air-Gap Profile of Single-Phase Permanent-Magnet Brushless DC Motor for Starting Torque Improvement and Cogging Torque Reduction. IEEE Transactions On Magnetism, Cilt 46, Sayı 11.
- [26] **Krause, P., Wasynczuk, O. ve Sudhoff, S.D.** (2002). Analysis of electric machinery and drive systems. 2nd ed., IEEE Press.

- [27] **Bozorth, R.** (1993). Materials for Permanent Magnets. Ferromagnetism, Sf. 344-422.
- [28] **Jung, I., Chang, H. ve Back, S.** (2003). Magnetic field analysis of polar anisotropic ferrite-bonded magnet for brushless DC motor application. ICEMS 2003, Cilt2, Sf. 774-777.
- [29] **Dorrell, D., Hsieh, M., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. ve Grout, V.L.** (2010). A Review of the Design Issues and Techniques for Radial-Flux Brushless Surface and Internal Rare-Earth Permanent Magnet Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, sayı 99, Sf. 1.
- [30] **Gould, J.E.** (1978). Permanent Magnets. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Cilt 125, sayı 11, Sf.1137-1151.
- [31] **Halselman, D. C.** (1994). Brushless Permanent-Magnet Motor Design. Mc Graw-Hill, ABD.
- [32] **Devi, K.U ve Sanavullah, M.Y.** (2011). Performance analysis of exterior(outer) rotor permanent magnet brushless DC (ERPMBLDC) motor by finite element method. 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT), Hindistan.
- [33] **Park, S.C., Kwon, B. I., Yoon, H.S., Won, S.H. ve Kang, Y.G.** (1999). Analysis of Exterior-rotor BLDC Motor Considering the Eddy Current Effect in the Rotor Steel Shell. IEEE Trans.-Magnetic, sayı 35 (3), Sf.1302-1305.
- [34] **Gieras, J. F.** (2004). Analytical Approach to Cogging Torque Calculation of PM Brushless Motors. IEEE Transactions On Industry Applications, Cilt 40, sayı 5.

7. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Efe Turhan

Doğum Yeri ve Tarihi: ERZİNCAN, 31.01.1987

E-Posta: efe@elecreate.com



Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- ❖ **Mart 2012 – Devam Ediyor :** Elecreate LTD.
 - Kurucu Ortak
- ❖ **Ağustos 2010 – Mart 2012 :** GERSAN Elektrik A.Ş.
 - Ürün Geliştirme Mühendisi

Yayın ve Patent Listesi:

- ❖ “Mobil cihazlar için bütünleşik ödeme unsuruna sahip kablosuz şarj cihazı.”
Faydalı Modeli, 2012.
- ❖ E. Turhan, F. Güler, A. Dikkulak. “Elektrikli Araç Şarj İstasyonları”, 2. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir, Türkiye, 2011.
- ❖ E. Turhan, F. Güler, A. Dikkulak. “Busbar Enerji Hattı Üzerinden Haberleşen Düşük Maliyetli Bir Aydınlatma Otomasyonu Sistemi”, 2. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir, Türkiye, 2011.
- ❖ Ş. Ertike, D. Yıldırım, E. Turhan, T. Taner İnal. “Düşük Güçlü Rüzgar Türbinleri İçin Maksimum Güç Noktası İzleyen Bir Akü Şarj Sistemi”, 2. Rüzgar Enerjisi Sempozyumu Bildiri Kitabı, İ. Tepe, s. 36-41, Samsun, Türkiye, Haziran 2009.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

E. Turhan, L. T. Ergene. C.Ekin “Performance Analysis of Brushless Direct Current Motors with Solid Exterior Rotor”, IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drive, İstanbul, Türkiye, Mayıs 13-17, 2013.

