

Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Farklı Mıknatıs Dizilimleri

Different Magnet Configurations in BLDC Motors

Aptullah İŞLER¹ Nezih G. ÖZÇELİK² Lale T. ERGENE¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak 34469 İstanbul TÜRKİYE
islera@itu.edu.tr , ergenel@itu.edu.tr

²ARÇELİK AŞ Çerkezköy İşletmesi 59500 Tekirdağ TÜRKİYE
nezihgokhan.ozcelik@arcelik.com

Özet

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorları üzerinde farklı mıknatıs dizilimleri uygulanmıştır. Vuruntu momenti, zıt-EMK ve moment karakteristikleri fırçasız doğru akım motorunun performansını etkileyen temel motor karakteristikleridir. Referans alınan motor Flux2D sonlu elemanlar yöntemi programı ile analiz edilmiştir. Analizi gerçekleştirilen motordan elde edilen veriler ile motorun test sonuçlarının tutarlılığı doğrulanmıştır. Mıknatıs hacmi sabit tutularak, farklı mıknatıs dizilimleri referans alınan motor üzerinde uygulanarak, motorun temel karakteristiklerine bakılmıştır. Vuruntu momenti, motorun ortalama momentini olumsuz şekilde etkileyen ve düşük hızlı, hassas konum bilgisi gerektiren uygulamalarda kritik öneme sahip motor parametresidir. Bu sebeple farklı tasarıma sahip motorlar için vuruntu momenti kıyaslaması yapılmıştır. Zıt-EMK ve moment karakteristikleri de farklı mıknatıs dizilimine sahip motorlar için ayrı ayrı elde edilip kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hangi mıknatıs diziliminin hangi uygulamalar için uygun olduğu belirtilmiştir.

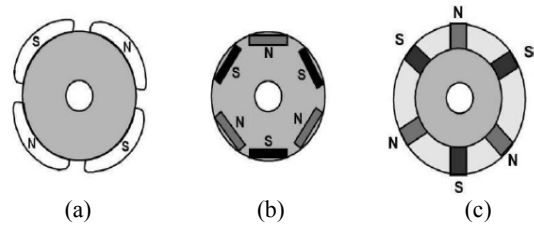
Abstract

In this research, different magnet positions has been applied to the BLDC motor design. Cogging torque, back-EMF and torque characteristics are the basic characteristics that effect the BLDC motor performance. Reference motor has been analyzed with using Flux2D finite element method computer programme. Datas coming from motor that analyzed compared with test results and design motor has been confirmed. With using same magnet volume, different magnet positions has been applied to the reference design and basic characteristics of motor have been observed. Cogging torque is the torque that adversely affecting the motor torque also cogging torque is the motor parameter that have critical importance at low speed, certain location information needed applications. Because of that cogging torques of different motor have been compared. Also Back-EMF and motor characteristics of different designs have been compared. According to results, it is decided that which magnet positioning is appropriate for each application.

1. Giriş

Fırçasız doğru akım motorları, klasik doğru akım motorlarında bulunan uyarma sisteminin yerinin kalıcı mıknatısların almasıyla ortaya çıkmıştır. Klasik doğru akım motorlarında bulunan fırça ve kolektör yapısının gerçekleştirdiği işlem, fırçasız doğru akım motorlarında elektronik komütasyon kullanılarak gerçekleştirilir. Fırça ve kolektör yapısının bulunmaması, bu motorların fırçalı motorlara kıyasla, daha yüksek hızlarda çalışmalarını, daha yüksek verim seviyelerine ulaşmalarını ve daha uzun ömürlü olmalarını sağlamıştır. Ayrıca fırçasız doğru akım motorlarının kontrol edilebilirliğinin kolay olması, asenkron motorlara kıyasla daha yüksek verim seviyelerine ulaşmaları ve yüksek moment/hacim oranına sahip olmaları bu motorların asenkron motorlar yerine tercih edilmesine neden olmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorları, rotorun statora göre iç kısımda veya dış kısımda bulunması durumuna göre iç rotorlu ve dış rotorlu olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar. Ayrıca fırçasız doğru akım motorları kalıcı mıknatısların rotordaki konumuna göre sınıflandırılabilir. Yüzey, dahili ve spoke tip olmak üzere üç ayrı sınıfta incelenebilir.



Şekil 1: Yüzey mıknatıslı motor (a), dahili mıknatıslı motor (b) ve spoke tip mıknatıslı motor (c) [1]

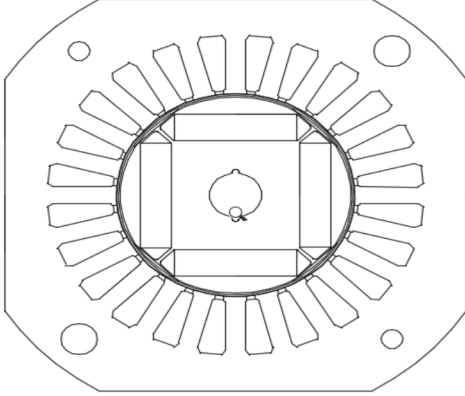
Yüzey mıknatıslı motorlar yüksek hızlı uygulamalarda mıknatısın savrulma tehlikesi sebebiyle bu uygulamalarda tercih edilmezler. Spoke tip, ferrit mıknatıs tipinin kullanıldığı motorlarda ön plana çıkmaktadır. Mıknatısların yüzey alanı, rotorun yüzey alanından daha fazla olmasından dolayı hava aralığı manyetik akı yoğunluğu artmıştır.

Bu çalışmada, referans alınan motor Flux2D sonlu elemanlar yöntemi programı ile analiz edilmiştir. Dahili, yüzey ve spoke

tip mıknatıs dizilimleri referans motor üzerinde uygulanarak, motor karakteristiklerine etkisi gözlemlenmiştir.

2. Referans Motorun Analizi

Referans alınan motor sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak çözüm yapan Flux2D paket programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların, motorun test sonuçları ile tutarlılığı doğrulanmıştır.



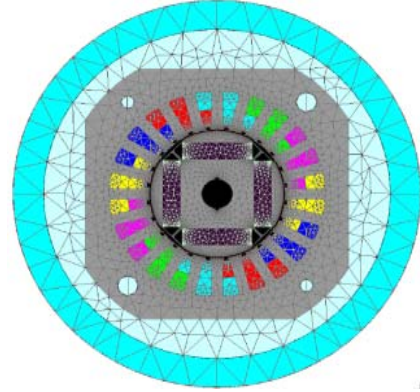
Şekil 2: Referans motor

Sonlu elemanlar yöntemi 1960'larda ortaya çıkmış olup, 1970'lerden bu yana mühendislik problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır [2]. Sonlu elemanlar yöntemi, elektrik makinalarının tasarım sürecinde, manyetik alan analizi ve makine karakteristiklerinin doğru şekilde hesaplanmasına yardımcı olduğundan motor tasarımında kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde karmaşık geometriler, küçük ve basit sonlu eleman kümelerine bölünürler. Bu elemanlar ayrı ayrı çözülerek sonuçlar birleştirilir ve çözüme ulaşılır. Bu sayede makinenin lineer olmayan manyetik karakteristikleri, analitik yöntemlere göre çok daha kısa ve kolay bir şekilde çözülür. Tasarlanan motor üzerinde herhangi bir değişikliğin üretim öncesi yapılabilmesi ve motor performansına etkisinin gözlemlenebilmesi sayesinde üretim öncesi iyileştirme giderleri sınırlandırılmaktadır.

Çizelge 1: Referans motor parametreleri

Nominal Güç	175 W
Nominal Moment	1.25 Nm
Nominal Akım	2A
Nominal Hız	650 min ⁻¹
Kutup Sayısı	4
Mıknatıs Tipi	Ferit
Laminasyon Malzemesi	M70050D

Analizi yapılacak motor geometrisi için iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak seçilen elemanlara göre nokta eleman sayısı 34473, çizgi eleman sayısı 3108 ve yüzey eleman sayısı 17212'dir. Motor laminasyonu üzerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil-3'de görülebilir.



Şekil 3: Ağ yapısı

2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Sonuçları

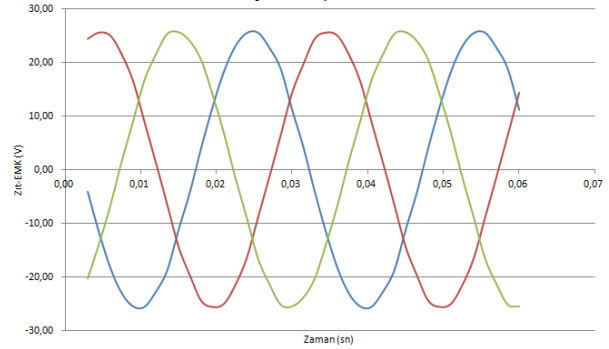
Flux2D ile gerçekleştirilen analizler doğrultusunda motorun boşa çalışması, vuruğu momenti ve yükte çalışmasına ait sonuçlar elde edilmiştir.

2.1.1 Boşa Çalışma Analizi

Faraday yasasına göre, zaman ile değişen manyetik alan, iletkende gerilim indükler. İndüklenen gerilim, iletkendeki sarım sayısı ve değişen manyetik akının zamana göre türeviyle doğru orantılıdır.

$$e = -N(d\phi/dt) \quad (1)$$

Stator sargılarında indüklenen gerilim, motor 1000 min⁻¹ hızında döndürülerek hesaplanmıştır.



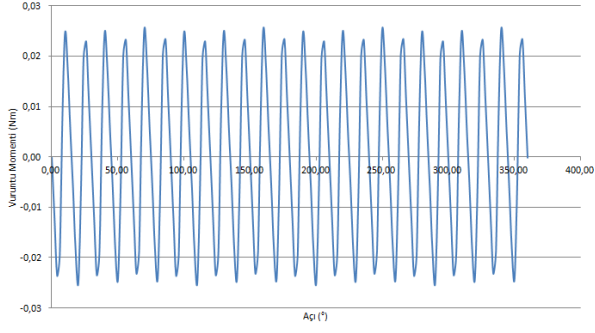
Şekil 4: Zıt-EMK karakteristiği

Şekil-4'de görüldüğü üzere, tepeden tepeye zıt-EMK gerilimi 51 V olarak hesaplanmıştır. Referans motorun zıt-EMK testi sonucunda elde edilen değer 54 V'dur.

2.1.2 Vuruğu Momenti Analizi

Vuruğu momenti, hava aralığı manyetik relüktansının motor pozisyonuna göre değişmesinden dolayı ortaya çıkar. Rotorda oluşturulan manyetik akının stator dişlerinden akma eğiliminden dolayı hava aralığı manyetik relüktası değişmektedir.

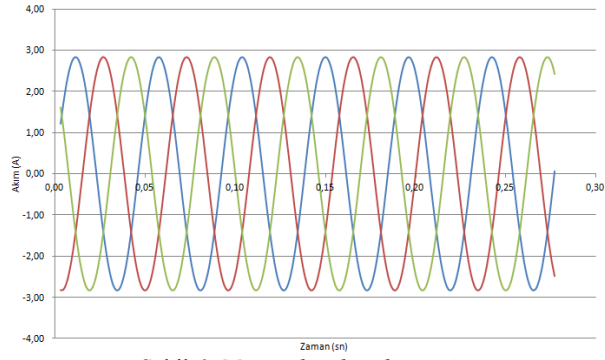
Vuruğu momenti büyüklüğü 0.02525 Nm olarak hesaplanmıştır. Motor 24 oluklu olduğundan dolayı, vuruğu momenti karakteristiğinde 24 tepe olduğu görülmektedir. Referans motorun tepeden tepeye vuruğu momenti büyüklüğü 0.048 Nm'dir.



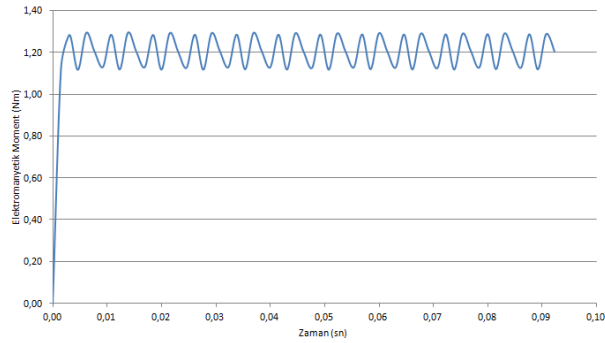
Şekil 5: Vuruntu momenti karakteristiği

2.1.3 Yükte Çalışma Analizi

Referans alınan motor, akım kaynağı ile beslenerek moment karakteristiği elde edilmiştir. Motorun nominal akım değeri 2 A olduğundan dolayı, akım kaynağı değerleri de bu değere göre düzenlenmiştir. Şekil 6'da motor sargılarına ait akım karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 6: Motor akım karakteristiği



Şekil 7: Elektromanyetik moment karakteristiği

Motorun elektromanyetik moment karakteristiği elde edilmiştir. Ortalama elektromanyetik moment değeri 1.207 Nm olarak hesaplanmıştır. Referans motorun yükte çalışmasından elde edilen değer ise 1.25 Nm'dir.

2.1.4 SEY Sonuçları ile Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 2'de sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile motorun test sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin güvenilirliği Çizelge 2'de yapılan karşılaştırma ile ispatlanmıştır. SEY sonuçları ile test sonuçlarının tutarlılığı görüldükten sonra, bir sonraki aşama

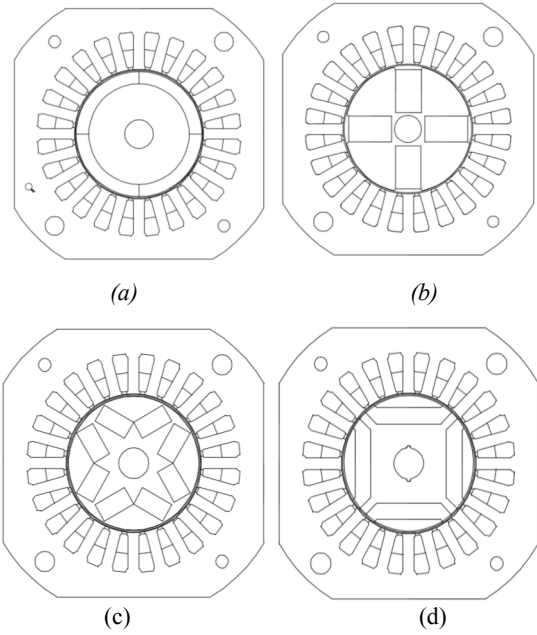
olan farklı mıknatıs şekillerinin referans motor üzerinde uygulanmasına geçilmiştir.

Çizelge 2: SEY ile test sonuçlarının karşılaştırılması

	Zıt-EMK (V)	Ortalama Moment (Nm)	Vuruntu Momenti (Nm)
Test Sonuçları	54	1.25	0.048
SEY Sonuçları	51	1.208	0.0505
Bağıl Fark (%)	5.55	3.36	5.21

3. Metodoloji

Tasarım sürecinde farklı mıknatıs dizilimleri referans motor üzerinde uygulanmıştır. Fırçasız doğru akım motorlarının mıknatıs konumuna göre sınıflandırıldığından çalışmanın başlangıcında bahsedilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre, her gruba ait en az bir mıknatıs seçilmesine özen gösterilmiştir ve mıknatıs hacmi sabit tutularak referans motor üzerinde uygulanmıştır. Referans motor üzerine uygulanan farklı mıknatıs dizilimleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

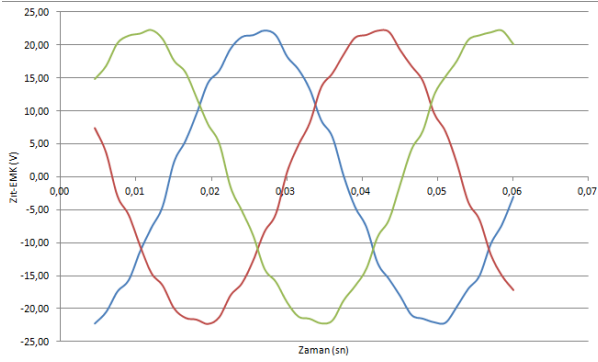


Şekil 8: (a) Halka tip motor, (b) spoke tip motor (c) V tip motor (d) U tip motor

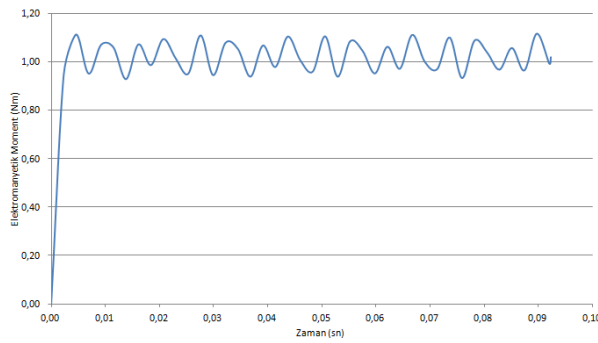
3.1. Yüzey Mıknatıslı Halka Tip Motor

Yüzey mıknatıslı halka tip fırçasız doğru akım motorların en önemli avantajı konstrüksiyonunun basit ve ucuz olmasıdır. Fakat halka tip motorların çalışma manyetik akı yoğunluğu kalıcı mıknatısların manyetik akı yoğunluğu ile neredeyse aynıdır. Bu sebeple, halka tip motorların hava aralığı manyetik akı yoğunluğu mıknatısın kalıcı manyetik akı yoğunluğundan fazla olamaz [2]. Vuruntu momenti tepe değeri 0.032 Nm olarak hesaplanmıştır.

Motorun zıt-EMK karakteristiğinden fazlar arasında 120° faz farkı olduğu görülmektedir. Ayrıca tepeden tepeye zıt-EMK büyüklüğü 44 V olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9: Halka tip motorun zıt-EMK karakteristiği



Şekil 10: Halka tip motorun elektromanyetik moment karakteristiği

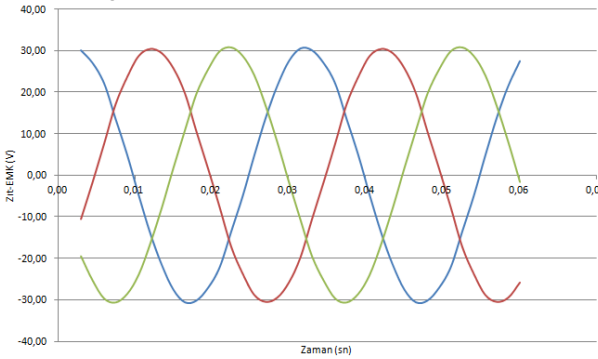
Ortalama moment değeri 1.02 Nm olarak hesaplanmıştır. Bu değer referans alınan motora göre daha düşük bir değerdedir.

3.2. Spoke Tip Motor

Spoke tip mıknatıs dizilimine sahip motorlar, hava aralığı akı yoğunluğunun, mıknatısların akı yoğunluğundan fazla olması sebebiyle özellikle ferrit mıknatıs tipinin kullanıldığı motorlardan daha iyi verim alabilmek için sıklıkla tercih edilmektedir.

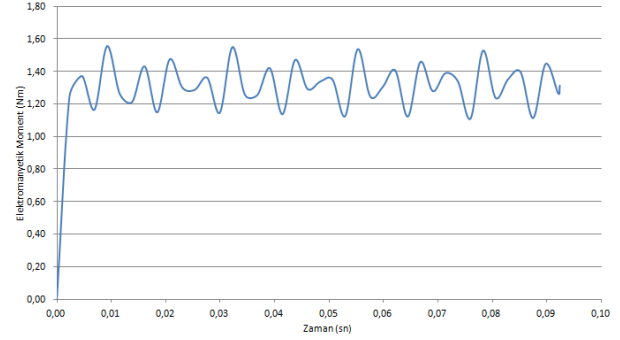
Bu motorun performansına ait temel karakteristikler Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir.

Spoke tip motorun vurutu momenti 0.07 ile -0.07 Nm arasında değişmektedir.



Şekil 11: Spoke tip motorun zıt-EMK karakteristiği

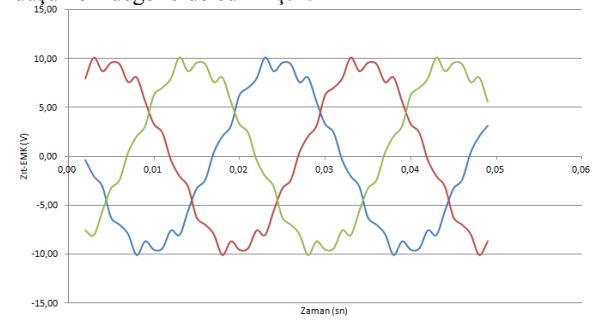
Şekil 11'den görüldüğü gibi, tepeden tepeye zıt EMK değeri 62V olarak hesaplanmıştır. Spoke tip motorun ortalama moment büyüklüğü 1.31 Nm'dir.



Şekil 12: Spoke tip motorun elektromanyetik moment karakteristiği

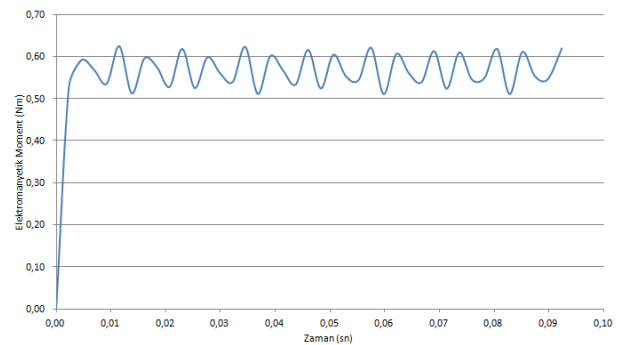
3.3. V Tip Motor

Referans motorun moment dalgalanmalarını ve vurutu momentini azaltmak için V tip mıknatıs dizilimi uygulanmıştır. Referans motorun vurutu momentinden daha düşük bir değer elde edilmiştir.



Şekil 13: V tip motorun zıt-EMK karakteristiği

V-tip motorun tepeden tepeye zıt-EMK gerilim büyüklüğü yaklaşık olarak 21V'dır.



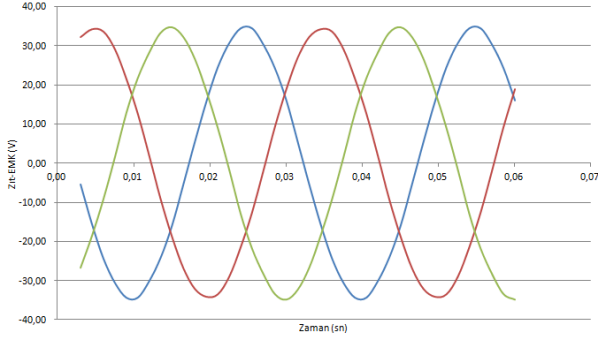
Şekil 14: V tip motorun elektromanyetik moment karakteristiği

V tip motorun ortalama moment değeri 0.58 Nm olarak hesaplanmıştır.

3.4. U Tip Motor

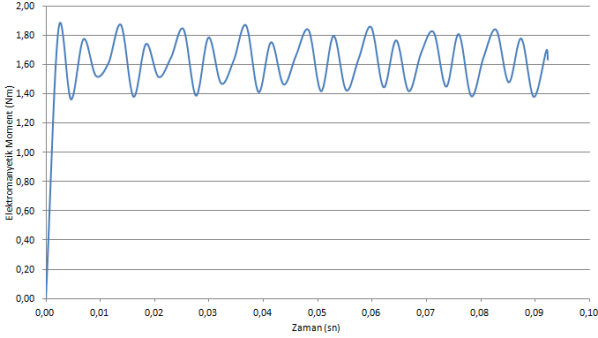
Son olarak, U tip mıknatıs şekli referans motor üzerinde uygulanarak, motorun ana karakteristiklerine ait şekiller elde edilmiştir.

U tip motorun vurutu momenti 0.01 Nm ile -0.01 Nm arasında değişmektedir.



Şekil 15: U-tip motora ait zıt-EMK karakteristiği

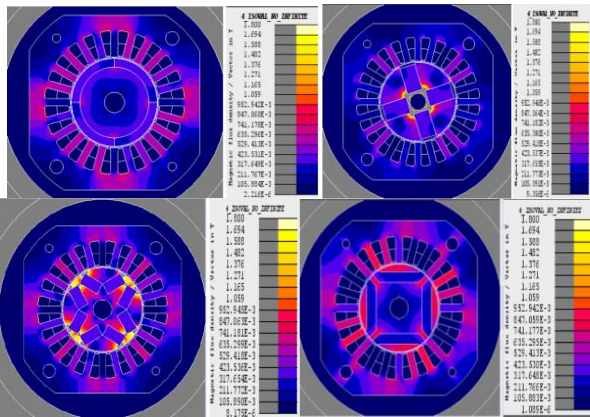
Tepeden tepeye faz-nötr zıt-EMK değerinin büyüklüğü 68V olarak hesaplanmıştır.



Şekil 16: U-tip motora ait elektromanyetik moment karakteristiği

Bu motora ait elektromanyetik moment karakteristiği Şekil 16'de gösterilmiştir. Ortalama moment büyüklüğü 1.60 Nm olarak hesaplanmıştır.

3.5. Farklı Mıknatıs Dizimlerine Sahip Motorların Manyetik Akı Yoğunlukları



Şekil 17: Farklı mıknatıs dizimleri uygulanan motorlara ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 17'den de görüldüğü üzere, halka tip ve u tip motorların laminasyonları doyuma ulaşmamıştır. Bu motorların aksine, spoke tip motorda kullanılan mıknatıslar motor miline çok yakın yerleştirildiğinden bu bölge doyuma ulaşmıştır. Ayrıca v-tip motorda mıknatıs ile hava aralığı arasında kalan rotor laminasyon bölgesinin doyuma ulaştığı görülmektedir.

4. Sonuçlar

Çizelge 3'de tüm mıknatıs dizilimlerine ait sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlara göre, zıt-EMK ve moment değerlerinin paralellik gösterdiği ve U-tip motorun 1.60 Nm ortalama moment değeriyle en yüksek momente sahip olan motor tipi olduğu görülmektedir. Bu sebeple, yüksek performans gerektiren uygulamalarda U-tip mıknatıs dizilimine sahip motorlar tercih edilebilir. Spoke tip motorun ortalama moment değeri 1.31 Nm olmasına rağmen vurutu momenti büyüklüğü diğer motorlar arasında en yüksek değere sahiptir. Bu yüzden hassas konum bilgisi gerektiren uygulamalarda tercih edilmezler. Halka tip mıknatıs dizilimine sahip motorlar ise, maliyetlerinin ve yapılarının kolay ve ucuz olması, ayrıca ortalama performans değerleriyle yüksek hızlı uygulamalar harici uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar.

Çizelge 3: Farklı mıknatıs dizilimlerine sahip olan motorların temel karakteristiklerin karşılaştırılması.

	Vurutu Momenti (Nm)	Zıt-EMK (V)	Ortalama Moment (Nm)
Referans	0.025	51	1.207
Halka Tip	0.032	44	1.02
Spoke Tip	0.07	62	1.31
V Tip	0.01	21	0.58
U Tip	0.01	68	1.60

5. Kaynaklar

- [1] Hanselman, D. (2003). Brushless Permanent Magnet Motor Design, The Writers' Collective, Rhode Island.
- [2] P. Zhang, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, "Morphing parametric modeling and design optimization of spoke and V-type permanent magnet machines by combined design of experiments and differential evolution algorithms," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 5056-5063.
- [3] Microchip Technology Inc., (2003), Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, AN885, Application Note, January 2003