

## Fırçasız Doğru Akım Motorlarında (FSDAM) Optimal Hall Sensör Yerinin İncelenmesi ve Motora Etkisi

Kemal HASANUSTA, Necibe Fusun Oyman SERTELLER

<sup>1,2</sup>Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Bölümü, İstanbul.  
e-posta:khusta@hotmail.com, fserteller@marmara.edu.tr

Geliş Tarihi:30.12.2014; Kabul Tarihi:08.09.2015

### Özet

Bu çalışmada, bipolar sürücülü hall sensörlü fırçasız doğru akım motoru BLDCM'nin sensörlerinin, optimal çalışma aralığı deneysel olarak araştırılmıştır. Klasik doğru akım makinalarındaki teori ve deneylerle ispatlanmış, motoru en verimli haliyle çalıştıran rotor ve stotormagnetik eksenleri arasındaki 90°'ye karşılık gelen açı, BLDCM'de teorik olarak 60° ile 120° olarak belirlendiğinden bu değerler için motor parametrelerine yansıyan avantajlar ve dezavantajlar deneysel verilerle araştırılmıştır. BLDCM'de rotor pozisyonunun tam ve doğru bir şekilde belirlenmesi, başka bir deyişle; hallsensörlerin motorun çalışma parametrelerine etkisinin en verimli olacak şekilde yerleştirilmesi oldukça zor bir iştir. Teorik çalışmaların yanında titizlikle yapılması gereken deneysel çalışmalarda gereklidir. Bu çalışmada BLDCM'nin verimli çalışması için gerekli olan moment ve akım değerlerinin yanında, akım harmonik değerleri (THD) de ölçülmüş ve karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Bu araştırma çalışmasının sonuçları teorik bilgilerle de desteklenmiştir.

### Anahtar kelimeler

BLDCM; Hall Sensör;  
Moment; Harmonik;  
Bipolar; Rotor

## Investigation Optimal Hall Sensors Position and Their Effects On Brushless Direct Current Motor (BLDCM)

### Abstract

In this study hall sensor's location for optimal operating range of bipolar brushless direct current motor (BLDCM) has been investigated experimentally. Since the 90° angle between magnetic axis of rotor and stator that motor operates in the most efficient way for classical direct current machines corresponds to 60° and 120° in BLDCM. The reflected advantages and disadvantages on motor parameters with the different rotor and stator magnetic axis's angle is searched. It is a quite difficult task to determine the exact and accurate rotor position to locate the hall sensor in a way that will have the most efficient impact on the operation parameters of a motor. In addition to the oretical work needs to be done carefully in experimental studies are required. To measure efficiency location of the hall sensors, moment, current and current harmonics are also considered, and a comparative analysis is performed. Results of this study are supported by the oretical information as well.

### Keywords

BLDCM; Hall sensor;  
Moment;  
Harmonic; Bipolar;  
Rotor

### 1. Giriş

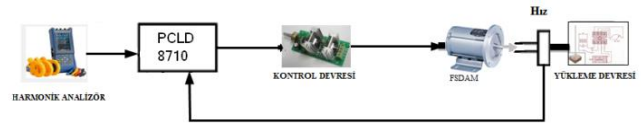
Günümüzde küçük güçlerde çok yaygın olarak kullanılan BLDCM gelişen teknoloji sayesinde, orta ve büyük güçlerde de verimli bir şekilde

kullanılmaktadır. Kullanım alanı çok geniştir; küçük yazıcılardan tıbbi cihazlara, elektrikli taşıt sistemlerinden küçük güçlü enerji sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Son on yıl içinde BLDCM ile ilgili literatürde birçok teorik

ve deneysel çalışmalara rastlamak mümkündür[1-5]. Bu çalışmaların çoğu BLDCM'nin sürücü devresi (kontrol devresi), gerikalan kısımlar ise sensör malzemeleri ve rotor sabit mıknatıslarının daha verimli bir şekilde nasıl kullanılacağı konusunda paylaşılmıştır. BLDCM magnetik alanın olduğu rotor kısmı ile stator sargılarında oluşturulan döner magnetik alanın etkileşimi sonucu çalışan bir motordur. Bu yüzden rotor magnetik ekseninin stator magnetik eksenine göre konum açısı ve bu açının doğru algılanması motorun verimli ve uzun ömürlü çalışması açısından çok önemlidir(bkz. Şekil 2-3). Bu çalışmada deneyi yapılan BLDCM'nin, Şekil 1'de tam bağlantı şeması verilmiştir. Motor içinde hallsensör yerlerinin, motorun çalışmasını verimli ve doğru etkileyecek şekilde belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hallsensörler; klasik doğru akım makinalarında mekanik olarak yapılan komütasyonu, yani akımı doğrultma işini, elektronik olarak yapan aletlerdir. Klasik doğru akım makinalarında fırça konumunun yerini alan elektronik cihazlardır. Dolayısıyla klasik doğru akım (DA) motorlarında teorik ve deneysel olarak belirlenmiş ve maksimum verimi veya maksimum momenti sağlayan rotor ve stator magnetik eksenleri arasındaki  $90^{\circ}$  faz farkı, 3 fazlı bulunan BLDCM 'de tam olarak  $60^{\circ}$  ila  $120^{\circ}$  arasında saptanmıştır [2,3]. Üç fazlı motorda ilk açı ( $60^{\circ}$ ) değeri faz değeri olarak alındığından , ikinci açığa ( $120^{\circ}$ ) fazı kaydırılmış açı denmiştir. Bu çalışmada da grafiklerde de bu tanım kullanılmıştır. Komütasyonun doğru olarak oluşması yani rotor ve stator magnetik eksenleri arasındaki açının tam olarak belirlenmesi ve hallsensörlerinden tam ve doğru olarak bu değerlerin alınması, harmoniklerin azaltılması dolayısıyla moment salınımlarının minimuma indirilmesi ve hızın istenilen değerlerde elde edilebilmesi ve sabitlenmesi için çok önemlidir[2,3]. Bu çalışmada elektronik olarak gerçekleştirilen komütasyon işleminin mekanik olarak daha hassas bir şekilde yapılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Komütasyon; klasik doğru akım makinalarında gecikmeli veya hızlı komütasyon olarak adlandırılır. Makinaların özelliğine ve kullanıldığı yere göre avantajlar sağlar. Fırçasız doğru akım makinalarında da komütasyon

açılarını değiştirerek motorun daha verimli çalışması sağlanabilir. BLDC motorlarında komütasyon elektronik olarak gerçekleştirilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi çoklu stator sargısına bağlı olan kontrolör, hangi sargının enerjilenmesi gerektiğini tanımlamak için rotor pozisyonunu algılar. Genellikle algılama işinde harici pozisyon sensörleri(hall etkili sensörler), dönüştürücü, kodlayıcı ya da çözücü kullanılır.

BLDC motorlarının kontrolü için kullanılan en basit metodlardan biri bu çalışmada olduğu gibi "Trapezoidal" komütasyondur. Bu komütasyon yönteminde, Şekil 2'de görüldüğü gibi aynı anda sadece bir çift motor terminalinden yani iki sargı grubundan geçen akım kontrol edilir. Üçüncü terminal ve üçüncü sargı ise o an için enerjisizdir. Motora monte edilmiş olan üç hallsensörü,  $60^{\circ}$  'lık her bir sektör içinde rotor pozisyonunu ölçerek dijital sinyal sağlar. Bu dijital sinyal motor kontrolünde kullanılır. Herhangi bir an için enerjili sargılardaki akımlar eşit genliktedir. Enerjisiz sargıda ise sıfırdır.



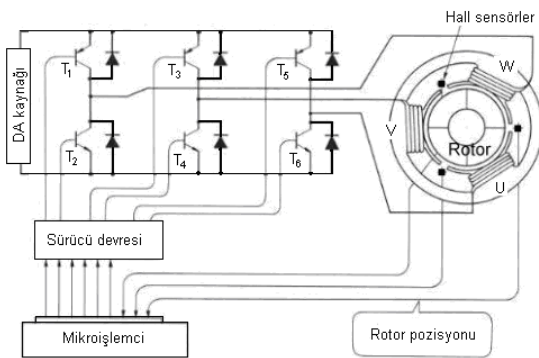
**Şekil 1.** Ölçü ve yükleme devresi ile birlikte deneyin elektriksel ve mekanik bağlantı şeması.

Bu çalışmada, BLDC motoru kontrol devresi bipolar olarak çalıştırılmış ve deneyler bu sürücü devresinin sonuçlarına göre elde edilmiştir. BLDCM'leri bipolar veya unipolar çalıştırmak mümkündür. Ancak bu çalışmada bipolar çalıştırılmasının sebebi daha önce yapılan ünipolar çalışmalara göre bipolar sürücülü BLDC motorunun yüklü kalkış ve çalışma sonuçlarının unipolar sürücü devresine sahip BLDC motorlarından daha verimli olmasıdır[4].

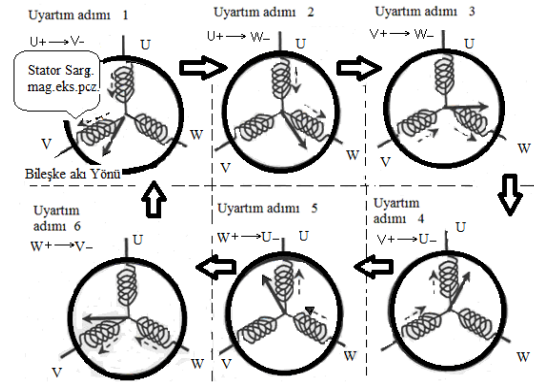
## 2. BLDCM'de Magnetik Eksenlerin Birbirini Etkilemesi ve Komütasyon

Şekil 2'deki evirici devresinde,  $T_1$ ,  $T_4$  ve  $T_5$  transistörlerinin iletimde olduğunu kabul edersek, U-V ve W-V yönünde motor sargılarından

akım geçecektir. Geçen bu akım, stator sargılarında bir manyetik alan meydana getirir. Stator sargılarında meydana gelen bu bileşke manyetik alanın, rotor manyetik alanına  $60^{\circ}$  veya  $120^{\circ}$  (klasik doğru akım motorlarında  $90^{\circ}$ ’lik açı) açıyla etki etmesi sonucunda, rotor saat yönüne doğru bir moment oluşturur. Bu momentin etkisiyle rotor saat yönünde  $30^{\circ}$  döner. Rotorun hareketi ile yeni konum bilgisi, pozisyon sensörleri tarafından algılanarak sürücü devresine iletilir.  $T_5$ transistörü kesime giderken,  $T_6$  transistörü ilettime geçer. Böylece stator bileşke manyetik alanı saat yönünde  $60^{\circ}$ ’lik bir açıyla dönmüş olur. Rotor manyetik alanı, stator bileşke manyetik alanını izleme eğiliminde olduğu için, rotor da saat yönünde  $60^{\circ}$  döner. Rotorun yeni konum bilgisi tekrar pozisyon sensörleri ile sürücü devresine aktarılır. Bu kez  $T_4$ transistörü kesime götürülürken,  $T_5$ transistörü ilettime geçmiş olur. Transistörlerin bu şekilde ilettime ve kesime götürülmesi ile motorun sürekli devri sağlanmış olur. Şekil 3’de stator sargılarının enerjilenmesi ve rotor magnetik alanının bu enerjilenmeyi takip etmesi gösterilmektedir. Sargılar üzerinde gösterilen oklar stator magnetik alanını göstermektedir. Kalın çizgi ile gösterilen ve başlangıç noktası yıldız bağlı sargının kesişim noktası olan ok ise bileşke magnetik alanındır. Hallsensörleride değişen rotor konumunu takip etmektedir. Rotor kalın çizgi ile gösterilen oklu bileşke magnetik alanı takip edecektir.



Şekil 2. Bipolar sürücü devresi ile BLDCM ana bağlantı şeması[4]



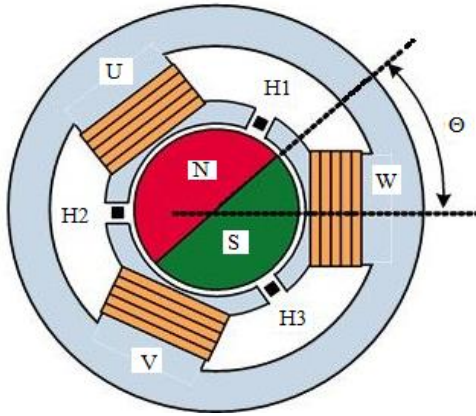
Şekil 3. Stator sargılarının oluşan dönen magnetik alanının gösterilmesi[2]

BLDCM’leri için kullanılan en basit metodlardan biri trapezoidal komütasyondur. Motora monte edilmiş üç hallsensörü  $60^{\circ}$ ’lik her bir sektör için, rotor pozisyonunu ölçerek dijital sinyal sağlar. Bu dijital sinyal motor kontrolünde yani moment oluşumunda kullanılır. Motor dönerken motor akımında her bir  $60^{\circ}$ ’lik dönüşte komütasyon gerçekleştirilir. Ancak hallsensörü motora sabit monte edilmiş durumda değildir ve stator magnetik eksenini takip eden rotor konumunu  $60^{\circ}$  ile  $120^{\circ}$  arasında efektif olarak değiştirme durumu mevcuttur[5]. Bu durum klasik DA makinalarında komütasyonu ayarlama (motorun daha verimli kullanılması) moduna karşılık gelmektedir.

### 3. Sensör Pozisyonu Belirlenmesi Deneysel Çalışma Verileri

Şekil 4’de hallsensörleri, rotor ve stator magnetik eksenlerinin etkileşiminin rotor pozisyonuna bağlı etkisi yani  $\theta$  açısına bağlı matematiksel ifadeleri verilmiştir. Ek1’de özellikleri verilen BLDC motorun matematiksel ifadeleri klasik doğru akım motorunun matematiksel ifadeleri ile benzerdir. Bu motorlar sürücü devreleri (kontrol devresi) ile çalıştığından harmonik momentler ve harmonik değerlerde işlemlere dahil edilmelidir. Denklem(1) BLDCM’de oluşan emk, klasik DA motorunda aynı ifadelerle temsil edildiğini göstermektedir. Ancak

moment ifadesinde herbirenerjilenmede 2 sargı devrede olduğundan emk değeri 2 ile çarpılmıştır.



**Şekil 4.**BLDC motorunun hallsensörlerinin ve rotor ile stator magnetik eksenlerinin pozisyonları[3]

Zıt elektromotor kuvvet için(emk):

$$E = 2.N.r.l.B.\omega, \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

ve moment için :

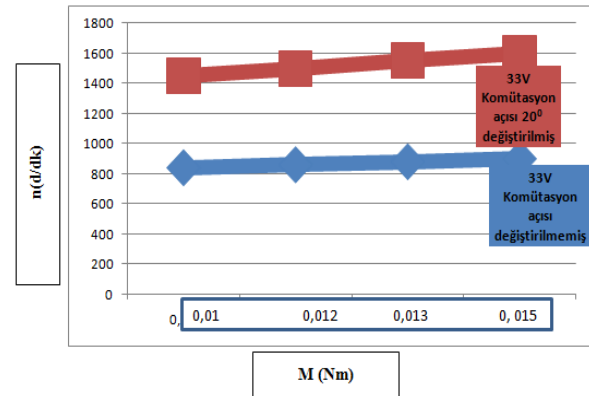
$$M = \left( \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \right) - \left( \frac{1}{2} B^2 \frac{dR}{d\theta} \right) + \left( \frac{4N}{\pi} Bri\pi l \right) \quad (2)$$

N: 1 faz için sarım sayısı , l : rotor uzunluğu , r : rotor yarıçapı , B: magnetik akı yoğunluğu,  $\omega$ : açısal hız, i: faz akımı, L: 1 faz için sargı endüktansı ,  $\theta$ : rotor pozisyonu (Şekil 4’de gösterilmektedir)R:1 faz için sargı direnci M:moment.Denklem (2)’de ilk iki terim sensör yerinin değiştirilmesi ile oluşan moment ifadelerini (parazitik moment veya harmonikler) , son terim ise ana akının oluşturduğu moment ifadesini temsil etmektedir. Parazitik momentleri oluşturan ilk iki terimin birbirine eşit olduğu zaman sadece son terimin moment ifadesini verdiğini görülmektedir. Açıya ( $\theta$ ) bağlı olan sensör yerinin doğru bulunması parazitik momentleri dolayısıyla makinanın verimli çalışmasını sağlamaktadır. Şekil 5-7’de, motor yüklendikçe devir hızının, faz kaydırılmış ( $\theta$  açısı değiştirilmiş) ve faz kaydırılmamış ( $\theta$  açısı değiştirilmemiş) durumdaki değişimini göstermektedir. Motora uygulanan üç farklı gerilim değeri için faz

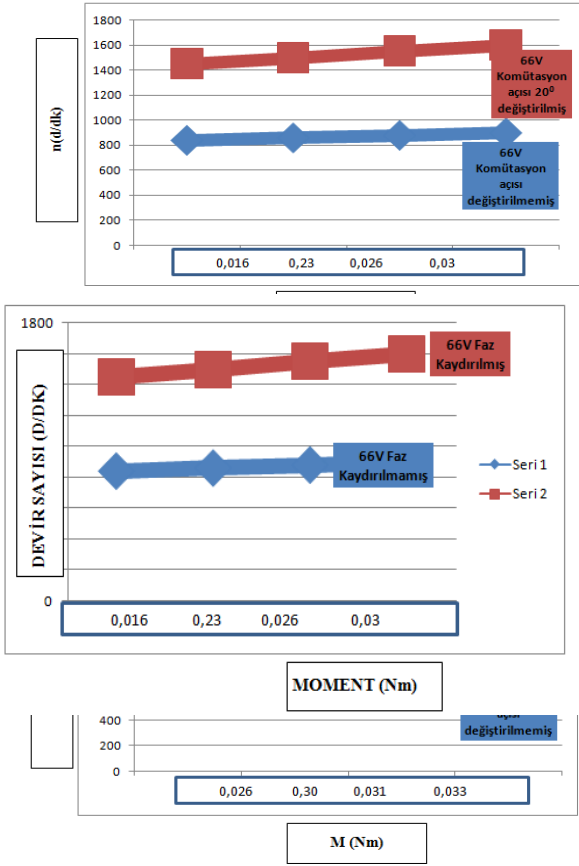
kaydırılmış (hallsensörünün yeri değiştirilmiş) durumda aynı moment değerlerinde devir hızının arttığını görülmektedir. Faz kaydırması yapıldığı zaman, hız değeri kaydırma yapılmamış değere göre artmıştır, yani motor içinde oluşan güç artmıştır. Bu çalışmada faz kaydırmanın moment değerlerine etkisi incelendiğinden bu karakteristiğintamamı incelenmemiştir.

$$A_d = \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \quad (3)$$

P: güç,  $A_d$ : Moment dalgalanma yüzdesi (Harmonik etkisi yüzdesi) [6],denklem (3) de güç düştüğü zaman veya açısal hız ( $\omega$ ) düştüğü zaman moment dalgalanmasının arttığı, dolayısıyla harmonik yüzdesinin arttığı görülmektedir. Moment dalgalanma yüzdesi formülüyle denklem(3), denklem (2) ve yapılan deney sonuçları birbirini desteklemektedir. Faz kaydırılmış(hall sensör kaydırılmış) durumda aynı moment değerleri için devir hızının arttığı görülmektedir. Bu bize gücün arttığını göstermektedir. Güç arttığı zaman moment dalgalanmasındaki değerler azalacaktır. Düşük gerilim değerlerinde bu durum açıkça görülmektedir. Ancak gerilim yükseldikçe harmonik yüzde değeri artmakla birlikte 100 V değerinde hem harmonik yüzde değerlerinin hem de devir hızının faz kaydırılmış durumda diğer değerlere göre daha avantajlı olduğunu görmekteyiz.Bu sonuç; BLDCM’lerde daha verimli motor dizaynının, hall sensörlerin yerlerinin optimal belirlenmesi ile mümkün olacağını göstermektedir.



**Şekil5.** 33V Bipolar Çalışma Faz Açısına Göre Moment-Devir Sayısı Grafiği, Faz Kaydırılmış, Faz Kaydırılmamış durum



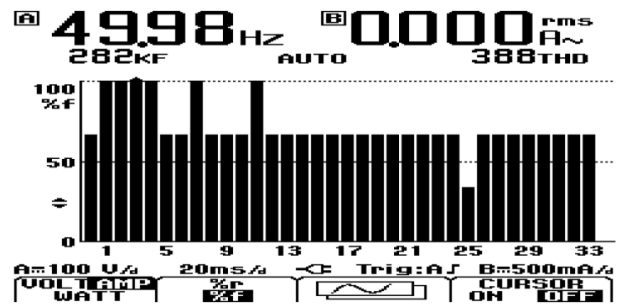
**Şekil 7.** 100V Bipolar Çalışma Faz Açısına Göre Moment- Devir Sayısı Grafiği,Faz Kaydırılmış, Faz Kaydırılmamış durum.

Dikkat edilmelidir ki; belli bir aralıkta ölçülen hız sanki momentle birlikte artıyor gözükse de, momentdeki artış dikkate alınırsa bu değerlerin neredeyse sabit kaldığı, belirlenen bu aralığın dışında da, moment değerleri arttırıldığı zaman, hız değerinin düşmeğe başlayacağı görülecektir, bu değerleri tek tek veri olarak elde etme imkanı olmadığı için regresyon analizi çalışmalarıyla değerlerin nasıl olacağı standartlarca belli bir hata dahiinde belirlenebildiği için bu yorumlar yapılmıştır [5,11].

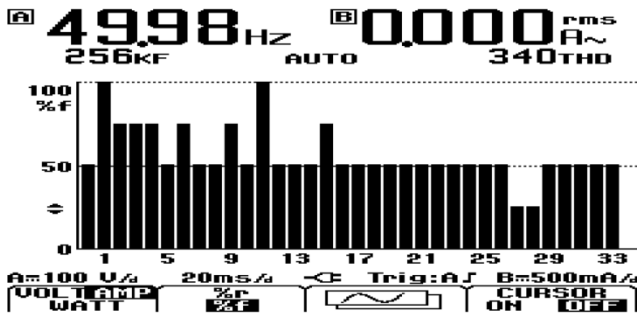
Şekil 8-12’de 33V, 66V ve 100V için yüklü çalışma durumunda faz kaydırılmış ve faz kaydırılmamış değerler için akım harmonik değerlerini (THD) göstermektedir. Bu gerilim değerlerinin dışında matematiğin yardımı ile yani regresyon analizi ile THD değerlerini nasıl seyredeceği belirlenebilir [11]. 100V için bulunan değerler harmonikli değerler içinde en iyi değerdir. Şekil 8’de verilen değerlerde faz kaydırılmamış durumda harmonik değerler daha az çıkmıştır. Ancak bu çalışmada üç gerilim değeri için veri alınabildiğinden, daha fazla değerlerle ve daha farklı yüklerle yapılan çalışmalar daha detaylı ilgilere ışık tutacaktır. Daha verimli motor parametreleri çalışmasının ipuçları verilerek ileri çalışmalar başka araştırmalar için bırakılmıştır.

öre  
Faz

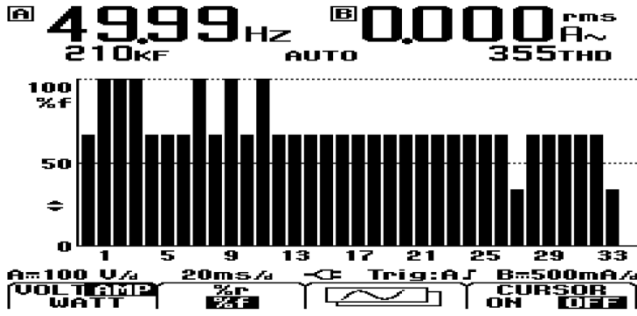
Faz kaydırılmış (hall sensör kaydırılmış) 66V için harmonik değerler artmıştır. Bu durum sürücü devresinde bulunan elektronik elemanlardan (yarı iletkenler) kaynaklanmaktadır[7,8]. Ancak yine gerilim değeri yükseldikçe hem devir hızı artmakta hem de harmonik değerlerin yüzdesi azalmaktadır. Bu değerde devir hızı %1,5 artarken harmonik yüzde değeri %1,005 artmış durumdaki değerleri için devir hızının arttığı görülmektedir. Bu sonuç BLDCM için daha verimli motor dizaynının hall sensörlerin yerlerinin optimal çalışmasının gerekliliğini göstermektedir.



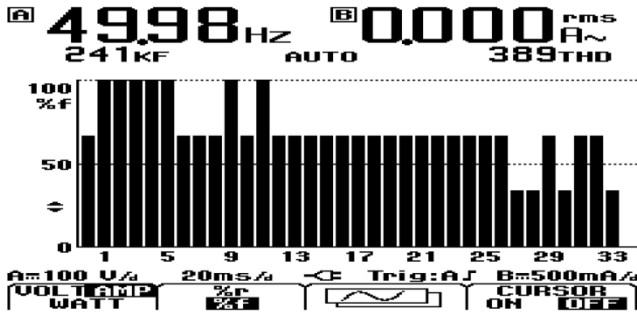
**Şekil 8.** 33V Bipolar Çalışmada Harmonik (THD) Değerleri



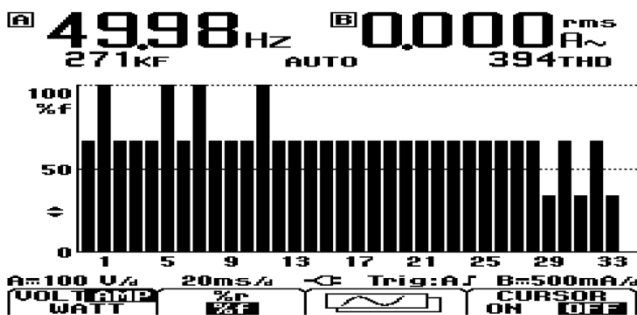
Şekil 9. 33V Bipolar Çalışmada Faz Açısı Değişiminde Harmonik (THD) Değerleri



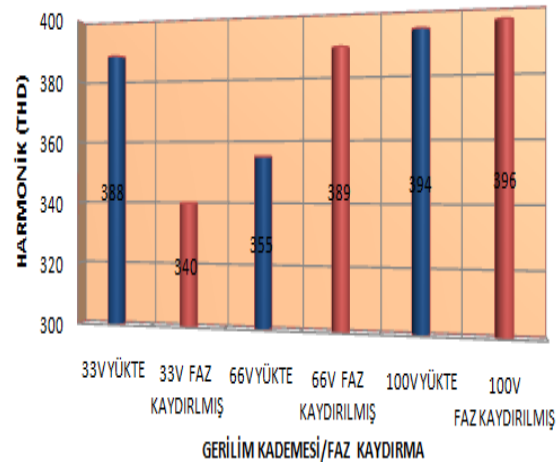
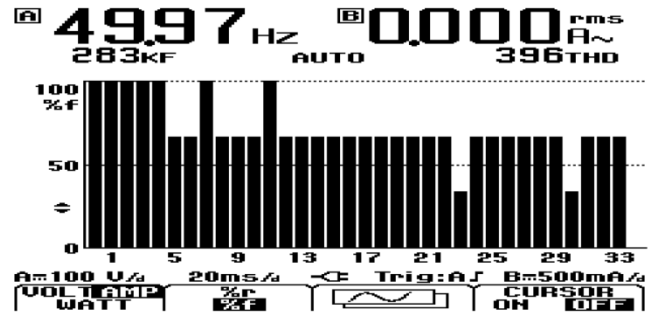
Şekil 10. 66V Bipolar Çalışmada Harmonik (THD) Değerleri



Şekil 11. 66V Bipolar Çalışmada Faz Açısı Değişiminde Harmonik (THD) Değerleri



Şekil 12. 100V Bipolar Çalışmada Harmonik (THD) Değerleri



Şekil 13. 100V Bipolar Çalışmada Faz Açısı Değişiminde Harmonik (THD) Değerleri

Şekil 14. Herbir Gerilim Değerinde Faz Açısı Değişiminde Harmonik (THD) Değerleri

Devir sayısı-Moment ve harmonik değerleri grafiklerinde görüldüğü gibi motora uygulanan gerilim değeri arttıkça sensör pozisyonu kaydırılmış, dolayısıyla fazı kaydırılmış değerlerin faz kaydırılmamış değerlere göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

#### 4.Sonuç

Bu çalışmada BLDCM'de 60° ile 120° arasında değişen hallsensör pozisyonunun yüklü çalışma durumunda bu değişim sonucu BLDCM'nin parametrelerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucu makinanın verimli çalışması için gerekli datalar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada motorun maksimum uygulanan gerilimin değerine yaklaştıkça, (bu çalışma için 100V değerinde) faz kaydırılmış durumda motor

parametrelerinin daha verimli çalıştığı görülmüştür. Bu çalışmanın farklı sürücü devreleri ve motora uygulanan farklı gerilim değerleri ile daha detaylı çalışmalara ışık tutacaktır.

### Teşekkür

Makalemize katkı sağlayan Nefer Elektronik firmasının sahipleri Ferhat ve Nermin Şirin, İTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi öğretim üyesi Yard. Doç. Dr. Derya A. Kocabaş'a teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

Akin B, Bhardwaj M., Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors, Application Report, July, 2013. [10]

Bektaş Y., N.Fusun Oyman Serteller, "Brushless direct current (BLDC) motor drivin gexperimental set", Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research Volume (Issue) 27(2):455-466, 2011 [4]

Bektaş Y., Serteller N.F., " Fırçasız DA motoru Kontrolünde PWM ve Histerizis Bant tekniğinin Karşılaştırılması" SDU International Journal of Technology Sciences, 2(3), 31-45, September 2010. [5]

Eduardo Viramontes, "BLDC Motor Control with Hall Effect Sensors Using the 9S08MP" Freescale Semiconductor, Document Number: AN4058, Application Note Rev. 0, 4/2010, 2010. [3]

Gencer Ç., Coskun I., Fırçasız Doğru akım motorunun sayısal işaret işlemci tabanlı konum kontrolü, PAJES, 12(1):37-41, 2006. [9]

GRAHAM, D.E., SAVAGE, J.W., Brushless DC Motor Technology, Int. J. Of Vehicle Design, 6, 6, 1985. [7]

Leonard N. Elevich, " 3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers", Freescale Semiconductor Application Note, AN1916, Rev. 2.0, 11/2005. [2]

Pragasen P., Ramu K., Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous brushless dc Motors for Servo Drives, IEEE Transactions on industry applications, vol. 21(5), 986-997, September, October, 1991. [1]

SERTELLER OYMAN N.F.. Numerik Analiz Ders Notları, 2015. [11]

Simpkins A., Todorov E., " Position Estimation and Control of Compact BLDC Motors Based on Along Linear Hall Effect, Sensors," 1948-1956, WeC11.3, American, Control Conference, 2010. [6]

YEDAMALE, P., Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip, Technology Inc., Application Notes, AN885, USA, 2003. [8]

### Ek A

Motor Parametreleri:

Eviriciye uygulanan DA gerilim değeri maksimum 100V

İzolasyon sınıfı F

Dönüş yönü saat yönü/ saat yönünün tersi

Stator 3 fazlı yıldız bağlı

Rotor 4 parçalı 4 kutuplu ferit mıknatıs