

Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Alan Zayıflatma Algoritmasının Geliştirilmesi ve Uygulanması

Development and Implementation of Field Weakening Algorithm for Brushless DC Motors

Özgür Üstün^{1,3}, R. Nejat Tuncay^{2,3}, Ö. Cihan Kıvanç^{2,3}, Bekir Fincan¹, Gürkan Tosun³

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
oustun@itu.edu.tr, fincan@itu.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Okan Üniversitesi
nejat.tuncay@okan.edu.tr, cihan.kivanc@okan.edu.tr

³Mekatro Mekatronik Sistemler Araştırma Geliştirme Tic. ve San. Ltd. Şti.
oustun@mekatro.com, ntuncay@mekatro.com, ockivanc@mekatro.com, gtosun@mekatro.com

Özet

Yüzey mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında alan zayıflatma çalışmasının kısıtlamaları bulunmaktadır. Bunun ana nedeni enine ve boyuna endüktansların aynı olması ve mıknatısların düşük manyetik geçirgenlikleri yüzünden faz endüktans değerlerinin düşük olması ve motorun karakteristik akımının yüksek olmasıdır. Bu çalışmada, karakteristik akımın düşük olduğu yüksek sargı endüktansının sağlandığı bir kesirli konsantrik sargılı motorda faz kaydırmalı akım yöntemi ile yapılmış olan alan zayıflatma çalışması yer almaktadır. Faz kaydırmalı akım yöntemi özel bir algoritma yazılarak deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Abstract

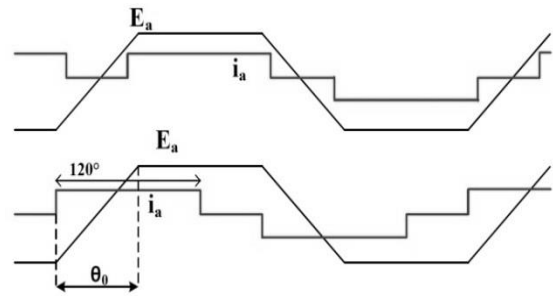
There are some limitations on the field weakening operation of surface magnet mounted brushless dc motors. The main reason of this problem that surface magnet mounted BLDC motors have equal direct and quadrature axis inductance values. And due to the lower permeability of permanent magnet materials, they have lower winding inductances which cause higher characteristic currents. In this study, a phase advanced current method for field weakening operation is implemented for a specially designed subfractional slot concentrated winding BLDC motor with higher winding inductance. An algorithm is designed for the phase advanced current method and the results are verified experimentally.

1. Giriş

Yüksek enerjili kalıcı mıknatısların kullanıldığı fırçasız doğru akım motoru (FDAM) hızla yaygınlaşmaktadır. Gerek endüstriyel gerekse akademik çalışmalarda FDAM popülerliğini korumaktadır. Buna paralel olarak özellikle elektrikli araç araştırmalarında FDAM tercih edildiği görülmektedir [1]. İçten yanmalı motorlu araçlarda yüksek hızlara dişli kutusu ile ulaşılabilir. Elektrikli araçlarda

ise doğrudan tahrikli sistemler dışında dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik makinelerinde, alan zayıflatma işlemi yüksek devirlere elektromanyetik yöntemlerle ulaşılmasını ve böylelikle dişli kutusundan kaynaklanan mekanik kayıpların ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır [2], [3]. Fırçasız doğru akım motorlarında indüklenen gerilim motorun manyetik tasarımıyla dolaylı trapezoidal dalga şeklindedir. Aynı şekilde akım dalga şekli de sinüzoidal değildir. Akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidal olduğu fırçasız senkron motorlara vektör kontrol yöntemi uygulanır [4]. Fırçasız doğru akım motorlarına ise bu yöntem yapısı gereği uygulanamamaktadır [4]. Vektör kontrolünün uygulanamıyor olması, alan zayıflatma yönteminin kontrolöre işlenmesinde bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

Alan zayıflatma işlemi, vektör kontrolü uygulanan sabit mıknatıslı senkron motorlarda, akımın alanı etkileyen bileşenini, i_d , azaltarak yapılır. Fırçasız doğru akım motorlarında ise motor nominal hızda iken istenilen hız değerine göre anahtarların komütasyon sırasını belirleyen hall sensör sinyallerinin, algılandıktan sonra yazılım tarafından bekletilip belirli bir gecikme ile okunması sağlanarak yapılmaktadır. Alan zayıflatma yöntemi ile motorun momentinde bir düşüş, hızında ise 3-5 kat oranında artış olmaktadır [5].



Şekil 1: Alan zayıflatma yöntemi öncesi ve sonrası akım, gerilim dalga şekilleri.

Şekil 1’de motorun alan zayıflatma öncesi ve sonrası durumlardaki gerilim, akım grafikleri gösterilmektedir. Burada E_a zıt emk’yı, i_a faz akımını temsil etmektedir. 1 numaralı eşitlikte U faz gerilimini, R_s sargı direncini, L_s eşdeğer faz sargı endüktans değerini, i faz akımını, e ise indüklenen gerilimi göstermektedir.

$$U = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

Eşitlikte iki adet indüklenen gerilim bulunmaktadır. Bir tanesi motorun hızından üretilen e , diğeri ise sargılardaki akımın zamanla değişmesinden kaynaklanan ve transformatör etkisi ile

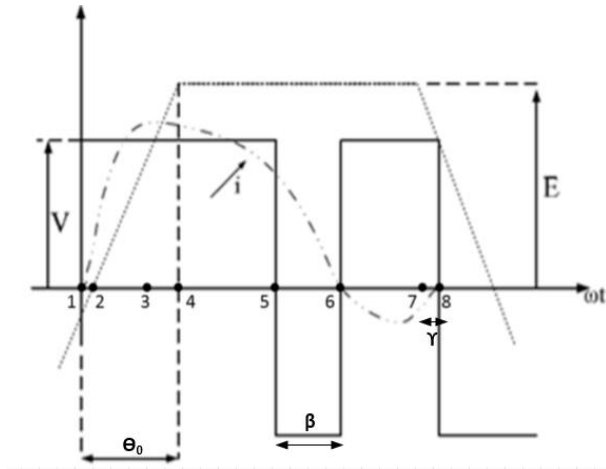
indüklenen $L_s \frac{di}{dt}$ ‘dir. Alan zayıflatma operasyonunda e

motor hızı ile orantılı olarak artar ve $L_s \frac{di}{dt}$ değerinin üzerine

çıkarak. Bu durumu engellemek için akım indüklenen gerilimden öne alınırsa transformatör etkisi ile indüklenen gerilim e ’nin artışını engeller.

2. Kontrol Sistemi Tasarımı

Algoritmanın ve kontrolün doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için öncelikle değişkenlerin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Elektrik makinesi normal çalışma koşulları dışında çalışacağından yanlış parametre değişiminde ısınma, demanyetizasyon gibi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bu parametrelerin seçimi ve atamalarının sorunsuz kullanılabilmesi için matematiksel modellerin ve fonksiyonların yazılıma doğru aktarılması gerekmektedir. Matematiksel modelleme Chan, C. C., Ziang, J. Z., Xia, W. ve Chau K. T. tarafından yayımlanan çalışmada ortaya konmuştur [5]. Şekil 2’de yer alan dalga şeklinde sekiz kritik nokta belirtilmiştir. 1 numaralı eşitlikte yer alan e ile U arasındaki değişim bu noktalar referans alınarak incelenmektedir. Şekil 2’de hall sensörlerden gelen sinyallerin sanal bir şekilde kaydırılmasıyla akım dalga şeklinin zıt emk’den geride olduğu görülebilmektedir. Bu durumda ise klasik FDAM denklemleri değişmektedir.



Şekil 2: Yarı periyot indüklenen gerilim-faz akımı dalga şekli.

Kong, H., Liu, J. Ve Cui G. önerilen matematiksel formülleri uygun dönüşümler yardımıyla sadeleştirilerek, alan zayıflatmanın değişken parametrelerini sade bir şekilde ortaya koymuştur [6]. 2. denklemden normal çalışma koşulları altında akımın ortalama değerini elde etmemizi sağlayan denklem yer almaktadır. 3 numaralı denklem ise Şekil 2’ye göre düzenlenmiştir. Denklemler Θ_0 , β ve γ değişkenlerine bağlı olarak alan zayıflatmanın gerçekleşeceğini göstermektedir. i_1 , i_2 , i_3 , i_4 ve i_5 akımları yarı periyot incelendiğinde her bir bölge için ortaya çıkan akımlardır. i_1 , 1. ve 3. nokta arasındaki akım değeridir. Bu noktalar arasında giriş gerilimi indüklenen gerilimden büyük olduğu için akım değeri artmaktadır. 3. noktadan sonra motorun hızı nominal hızdan daha büyük olacağı için indüklenen gerilime göre daha büyük olacaktır. Bu yüzden 3. nokta ile 5. nokta arasındaki i_2 akımı düşüşe geçecektir. i_3 , akımı 5. nokta ile 6. nokta arasındadır. Bu bölgede giriş gerilimi ters çevrilmektedir. Bunun nedeni, akımı daha hızlı bir şekilde sıfırlamaktır. i_4 , akımı 6. nokta ile 7. nokta arasında, i_5 akımı 7. nokta ile 8. nokta arasındadır.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{6}}{3} I \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\theta_0}{\omega}} i_1^2 dt + \int_{\frac{\theta_0}{\omega}}^{\frac{2\pi}{3\omega}} i_2^2 dt + \int_{\frac{2\pi}{3\omega}}^{\frac{2\pi}{3\omega} + \frac{\beta}{\omega}} i_3^2 dt + \int_{\frac{2\pi}{3\omega} + \frac{\beta}{\omega}}^{\frac{2\pi}{3\omega} + \frac{\beta}{\omega} + \frac{\gamma}{\omega}} i_4^2 dt + \int_{\frac{2\pi}{3\omega} + \frac{\beta}{\omega} + \frac{\gamma}{\omega}}^{\frac{2\pi}{3\omega} + \frac{\beta}{\omega} + \frac{\gamma}{\omega}} i_5^2 dt \right)} \quad (3)$$

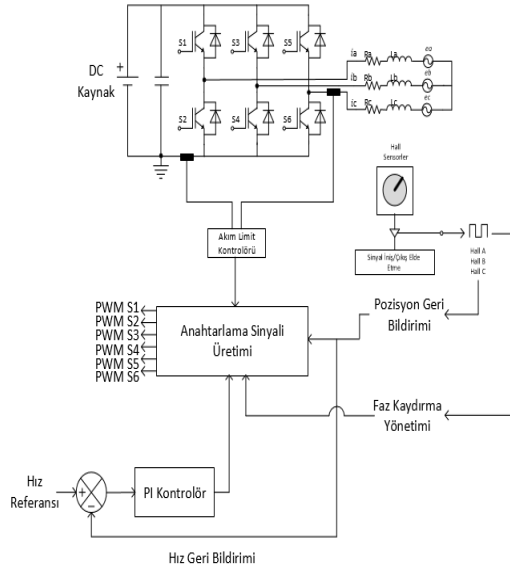
4 numaralı denklemde ise nominal hızın üstünde çalışma durumlarında üretilecek moment miktarının değişimi gösterilmektedir [6]. Yapılan uygulamada ölçülen moment miktarı ile hız değişimi arasındaki ilişki denklem ile paralellik göstermektedir.

$$T = \frac{\omega_{m,nom}}{\omega_m} T_{nom} \quad (4)$$

2.1. Alan Zayıflatma Algoritmasının Geliştirilmesi

Faz kaydırma metodu, FDA motorunu nominal hızının üzerinde çalıştırmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu metodun gerçekleştirilebilmesi için altı anahtarlı klasik evirici yapısı yeterli olmaktadır. Çalışmada kullanılan devre yapısı ve kontrol diyagramı Şekil 3’de gösterilmiştir.

Nominal hız ve altındaki FDAM kontrolü ile geliştirilen algoritmada farklılık gösteren nokta ekstra bir alan zayıflatma operatörüne duyulan ihtiyaçtır. Nominal hızın üzerinde oluşan pozisyon bilgileri faz kaydırma yönetimi içerisinde düzenlenmektedir. Motorun alan zayıflatma operasyonunun yapılabilmesi için Şekil 4’deki algoritma geliştirilmiştir.



Şekil 3: Alan zayıflatma uygulamasının blok diyagramları ile gösterilmesi.

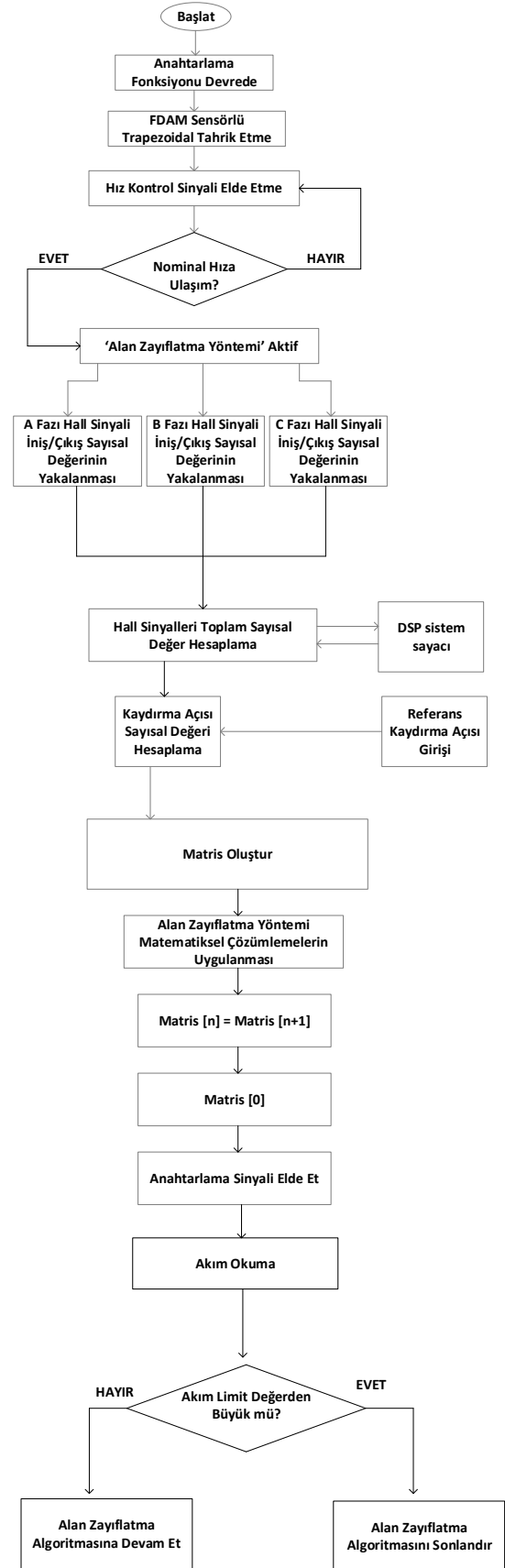
Kontrol yazılımı aşama aşama çalışma periyotlarına ayrılarak, kontrolörden talep edilen çalışma şekline göre devreye alınmıştır. Faz geciktirme açısı α° olarak tanımlanırsa, faz akımlarının $(360 - \alpha)^\circ$ kadar geciktirilmesi gerekmektedir. Bunun için hall sensörleri $(360 - \alpha)^\circ$ kadar kaydırılarak, yeni hall sensör sinyalleri oluşturulur. Nominal hız değeri 360° ile orantılandığında, hall sensörlerini kaydırma miktarı 5 numaralı denklemdeki gibi olur. Burada, kaydırma miktarı φ ile nominal hız ise n ile gösterilmektedir.

$$\varphi = n \frac{360 - \alpha}{360} \quad (5)$$

Kaydırılmış hall sensör sinyalleri, bir matriste hall sensör sinyallerinin işlenmesi ile meydana gelir. Bu matrisin eleman sayısı motorun nominal hızından daha büyük olmalıdır. Hall sensörlerden gelen sensör bilgisi, denklem 5’de elde edilen kaydırma miktarından elde edilen indeks sayısı kullanılarak, matris üzerindeki sinyaller ile değiştirilir. Değiştirilen bu matris denklem 6’da görüldüğü gibi her çevrimde tüm elemanları sola kaydırılır.

$$matrix[x] = matrix[x + 1] \quad (6)$$

Matrisin ilk elemanı kaydırılmış hall sensör bilgisini oluşturur ve fırçasız doğru akım motoru sürücüsündeki yarı iletkenleri açıp kapayan kapı sinyallerini üretmek için kullanılır. Fazlardaki ölçülen akım değerlerinin belirlenen sınır değerler içerisinde olup olmadığı üretilen her anahtarlama sinyali sonrasında ölçülerek motorun sabit-güç bölgesinde kalıp kalmadığı takip edilmektedir.



Şekil 4: Geliştirilen alan zayıflatma algoritması.

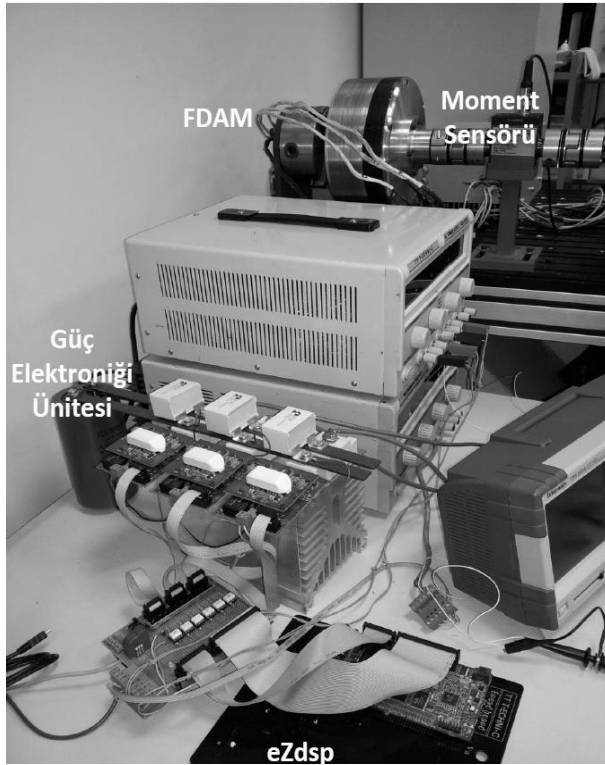
3. Alan Zayıflatma Algoritmasının Gerçeklenmesi

24 oluklu ve 20 kutuplu özel olarak tasarlanmış bir FDAM alan zayıflatma çalışması için özel olarak imal edilmiştir. Motorun parametreleri, analizleri ve imalatına ait detaylar Ustun, O. ve Seray, S. tarafından yapılan çalışma ile ortaya konmuştur [7]. Çizelge 1’de alan zayıflatma çalışmasında ihtiyaç duyulan başlıca parametrelere yer verilmiştir.

Çizelge 1: Motor parametreleri

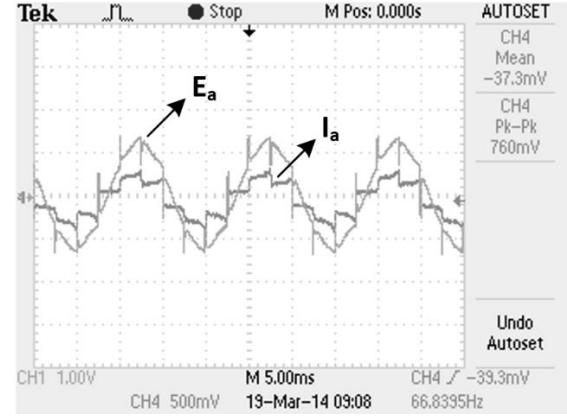
Anma Gücü	$P_n = 1 \text{ kW}$
Anma Gerilimi	$V_n = 24 \text{ V}$
Anma Hızı	$n_n = 500 \text{ min}^{-1}$

Bu çalışmada imal edilen motorun alan zayıflatma operasyonu ve kontrolü gerçekleştirilerek sonuçlar ifade edilmektedir.



Şekil 5: Motor kontrol ve yükleme çalışmaları için oluşturulmuş test masası.

Motorun kontrolü için Şekil 5’te görülen düzenek oluşturulmuştur. Motorun yüklenebilmesi için ortak kaplin ile bir FDAM yerleştirilmiş ve motorun frenlenerek yüklenmesi sağlanmıştır. Sonuçlar moment sensörü ve gerçek zamanlı bir sayısal işaret işleyici aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Eviricide altı adet yarı iletken anahtarlar elemanı kullanılmış ve kontrolör yazılımı ise eZdsp TMS320F28335 sayısal işaret işleyici kartı ile yapılmıştır. Çalışmada öncelikle motorun normal çalışma yazılımı gerçekleştirilmiş ve normal yükleme koşullarında Şekil 6’da görülen akım, gerilim dalga şekilleri elde edilmiştir.

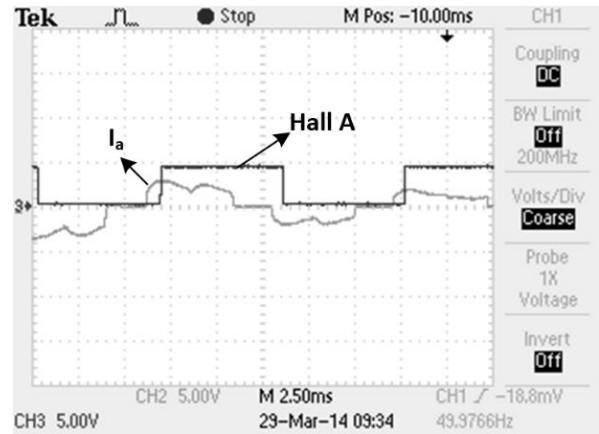


Şekil 6: Normal çalışma koşulları altında elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri (0.1 pu/div).

3.1. Deney Sonuçları

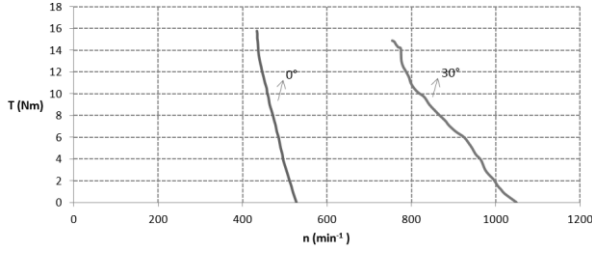
Yazılımda “kaydırma açısı” olarak tanımlanan değişken sistem aktif haldeyken değiştirilebilecek şekilde düzenlenmiştir. Kullanılan kontrolör gerçek zamanlı çalışma yapmaya müsaade ettiği için kaydırma açısı her faz derecesi için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Şekil 7’de 30° kaydırma açısı için elde edilen osiloskop çıktıları gösterilmiştir. Özellikle bu dereceye kadar olan sonuçlarda teoriye uygun başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Akımın pozisyonun olması gereken yerden geride olduğu burada açıkça görülmektedir.

Deney sonuçları incelendiğinde görülmektedir ki, 0° ile 20° arasında yapılan çalışmada akımın ortalama değerinde küçük dalgalanmalar olmakta ancak motor sabit güç bölgesindeki çalışmasına devam etmektedir. 10° kaydırma ile hız 770 min⁻¹’e, 20° kaydırma ile de 950 min⁻¹’e ulaşılmıştır. Ancak 35°’den itibaren motorun fazlarında akan akım değerinde artışlar ortaya çıkmaktadır. 30°’de hız değeri 1040 min⁻¹’e ulaşmıştır. En radikal hız değişiklikleri 40° ile 60° arasında görülmektedir. 60°’de ulaşılabilen hız 1610 min⁻¹ olmaktadır.



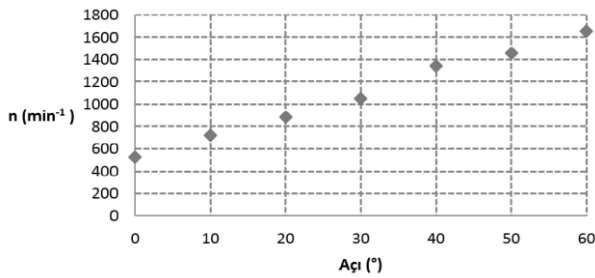
Şekil 7: 30° kaydırma sonucu oluşan akım dalga şekli ve hall sinyalinin yaklaşıtlmış görünümü (1 pu/div).

Şekil 8’de 30°’lik kaydırma ile elde edilen hız-moment eğrisine yer verilmiştir. Grafik ideal bir hız-moment eğrisini doğrulamaktadır. Farklı yükler altında alınan sonuçlarda en optimal sonuçlar bu derecede alınmıştır. Motorun uygun çalışma koşullarında hızı yaklaşık 2 kat arttırılmıştır.



Şekil 8: 30° kaydırma sonucu elde edilen hız-moment eğrisi.

Şekil 9'da ise tüm dereceler için yapılan çalışma sunulmuştur. Her 10° için motorun sabit yük altındaki hızı kayıt altına alınmıştır. Motorun nominal hızı 550 min⁻¹ iken 60°'lik faz kaydırmanın sonunda hız 1610 min⁻¹ 'e ulaşmıştır. 35° ve sonrasında ortaya çıkan akım dalgalanmaları, artışları hızlanmayı engellemektedir. Buna benzer problemlere literatürde rastlanmaktadır [8]. Bu sorunun aşılması ile birlikte daha iyi sonuçlar alınacağı öngörülmektedir.



Şekil 9: Farklı açılar için elde edilen hız değerleri.

4. Sonuçlar

Çalışmanın temel başlangıç noktası elektrikli araçlarda kullanılan FDAM'nun hız aralığını arttırmak ve nominal hızının 3-5 katına çıkmasını sağlamaktır. Çalışmada bir elektrikli araç için alan zayıflatmaya uygun şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş elektrik motoru kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda motorun nominal hızının 3 katına ulaşılmıştır. Çalışmada alan zayıflatma esnasında karşılaşılan sorunlara ve deney sonuçlarına yer verilmiştir. Farklı derecelerde ulaşılan hızlar çıktı verilmiş ve uygun karakteristik eğrilere dönüştürülerek sunulmuştur. Çalışmada da ifade edildiği gibi belirli derecelerden sonra motor akımının artmakta olduğu ve motorda ısınmaların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Sonraki çalışmalarda motorun araca montajı ve alan zayıflatma kontrolü çıktıları üzerinde yoğunlaşılacaktır.

5. Kaynaklar

- [1] Ustun, O., Yilmaz, M., Gokce, C., Karakaya, U. ve Tuncay, R. N., "Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 804-811.
- [2] Bose B.K., *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press Marketing, USA, 1997.
- [3] Emadi, A., *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, Taylor & Francis Group, USA, 2005.
- [4] Soong, W. L. ve Miller T. J. E., "Field-weakening Performance of Brushless Synchronous AC Motor

Drives", *IEE Proc. –Electr. Power Appl.*, Vol. 141, No. 5, pp. 331-340, 1994.

- [5] Chan, C. C., Jiang J. Z., Xia, W. ve Chau, K. T., "Novel Wide Range Speed Control of Permanent Magnet Brushless Motor Drives", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 10, No. 5, pp. 539-546, 1995.
- [6] Guanxiong, L., Jinflin, L. ve Shuafiu., "Investigation on leading Angle Flux Weakening Control of Brushless DC Motor", *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2010, pp.583-586.
- [7] Senol, S. ve Ustun O., "Design, Analysis and Implementation of a Subfractional Slot Concentrated Winding BLDCM with Unequal Tooth Widths", *IECON'11*, 2011, pp. 1807-1812.
- [8] Kong, H., Liu, J. ve Cui, G., "Study on Field-weakening Theory of Brushless DC Motor Based on Phase Advance Method", *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2010, pp.524-527.