



Meltem Tetik

Akım Metal A.Ş. R&D Center, arge40@akımmetal.com.tr, İstanbul-Turkey

| | |
|----------------------|---|
| DOI | http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.1.2A0166 |
| ORCID ID | 0000-0002-2614-9618 |
| CORRESPONDING AUTHOR | Meltem Tetik |

HARMONİK EKLEME YÖNTEMİ İLE FIRÇASIZ DC MOTORUN (BLDC) HIZ DENETİMİ

ÖZ

Günümüzde, ev aletlerinde, bilgisayar sistemlerinde, tıp elektroniğinde, uzay teknolojilerinde, askeri alanlarda, robotik sistemlerde v.b. çoğunlukla fırçasız doğru akım motorları (BLDC) tercih edilmektedir. BLDC motorlar; yüksek maksimum momente ve verime, uzun ömre ve hassas bir şekilde hız kontrol edilebilirliğine sahip olduklarından uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. BLDC motorların çalışması; fırçalı DC motorların çalışma karakteristiğine benzemektedir. BLDC motorların rotorunda bulunan sabit mıknatıslar uyartımı sağladığından fırça ve kollektör düzeneklerine gerek yoktur. Bu olumlu özelliklerinin yanında, motoru kontrol etmek için harici bir güç elektroniği devresine ve komütasyonu sağlamak için ise gerekli konum bilgisini elde etmek harici bir pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulmaktadır. BLDC motorun hız denetimi yapılırken akımda oluşan dalgalanmadan dolayı üretilen torktaki dalgalanmanın fazla olduğu bilinmektedir. Bu çalışma ile moment dalgalanmasını azaltmak için harmonik ekleme yöntemi ile BLDC motorun hız denetimi yapılması amaçlanmıştır. BLDC motorun matematiksel modeli MATLAB/Simulink'de oluşturularak, kontrolün simülasyonu yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Doğru Akım Motoru, Harmonik Ekleme, Hız Denetimi, MATLAB/Simulink

BRUSHLESS DC MOTOR (BLDC) SPEED CONTROL WITH HARMONIC INJECTION METHOD

ABSTRACT

Nowadays, brushless direct current motors (BLDC) are often preferred (used) in home appliances, computer systems, medical electronics, space technology, military applications, robotics systems, etc. BLDC motors are frequently used in applications since they have features such as high momentum, efficiency, long lifetime, and precise speed control. BLDC motors working principle is similar with brushed DC motors working characteristic. Since the permanent magnets in the rotor of the BLDC motors provide excitation, there is no need for brush and collector assemblies. Besides to these positive features, an additional power electronic circuit is necessary to control motor; and in order to get the position information to maintain commutation an additional position sensor is required. It is known that the fluctuation in the torque is excessive due to the current ripple when the speed control of the BLDC motor is performed. In this study, it is aimed to perform speed control of BLDC motor with harmonic injection method in order to reduce torque ripple. The mathematical model of the BLDC engine has been created in MATLAB/Simulink in order to make the simulation of control.

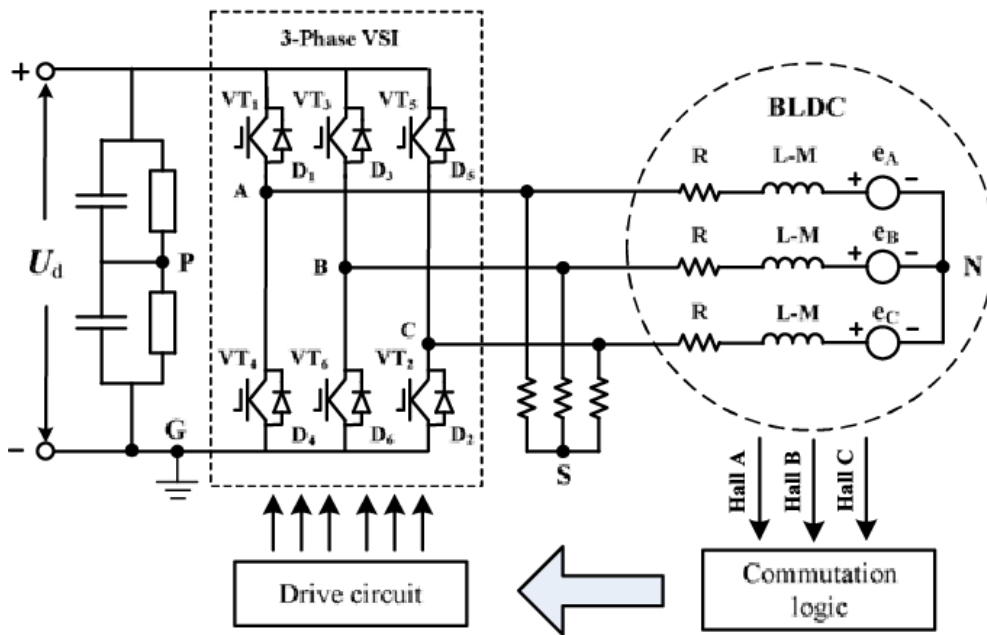
Keywords: Brushless DC Motor (BLDC), Harmonic Injection, Speed Control, S-Curve, MATLAB/Simulink

How to Cite:

Tetik, M., (2019). Harmonik Ekleme Yöntemi İle Fırçasız DC Motorun (BLDC) Hız Denetimi, **Technological Applied Sciences (NWSATAS)**, 14(1):27-36, DOI:10.12739/NWSA.2019.14.1.2A0166.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fırçasız doğru akım motoru (BLDC) senkron makineler kategorisine giren özel bir elektrik motorudur. Senkron motorlarda olduğu gibi BLDC motorun rotorunda da sabit mıknatıslar bulunmaktadır. DC motorlarda mekanik olarak yapılan komütasyon (DC makinede, endüvideki bir bobinde, akımın yön değiştirmesi işlemi), Fırçasız doğru akım motorda elektronik olarak gerçekleştirilmektedir. Fırçasız doğru akım motorların çalışması, fırçalı DC motorların çalışma karakteristiğine benzemektedir. BLDC motorların rotorunda bulunan sabit mıknatıslar uyarıtımı sağladığı için fırça ve kolektör düzeneklerine gerek yoktur. Fırçasız doğru akım motorların stator ve rotoru bir AC makineye benzemekle birlikte, yarı iletken malzemelerden oluşan inverter ve rotor pozisyon sensörlerinin bir araya gelmesiyle oluşan bir yapıdır. Fırçasız doğru akım motorları, yüksek maksimum momente, verime, uzun ömre ve hassas hız kontrol edilebilirliğe sahip olduklarından tercih edilirler. Fırçasız doğru akım motorların bu üstünlüklerine rağmen moment ve hız kontrolünde konum algılayıcı kullanılan ek bir sürücü sisteme ihtiyaç duyarlar [1].



Şekil 1. Fırçasız doğru akım motorun genel kontrol yapısı[2]
(Figure 1. General control structure of brushless direct current motor)

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorun stator ve rotor referans düzlemine göre matematiksel modeli elde edilmiştir. Motor kontrolü için üçüncü harmonik ekleme tekniği kullanılarak, MATLAB/Simulink programında kontrol algoritması oluşturulmuştur.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada, üçüncü harmonik ekleme tekniği kullanılarak fırçasız senkron motorun hız kontrolü sağlanmıştır. Bu teknik üzerine birçok çalışma yapılmış, makaleler yayınlanmıştır. Üçüncü harmonik ekleme yöntemi üstün performans karakteristiğinden dolayı son yıllarda kullanım alanı giderek artmaktadır. Hız kontrolü için denklemler çıkarılarak MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır. Bu bildiri için oluşturulan kontrol algoritması sadece fırçasız senkron motorlar için değil, sanayide kullanılan farklı tipte elektrik motorların sürücü sistemleri ve kontrollerinde kullanılabilecektir.

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN MATEMATİKSEL MODELİ (BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR MATHEMATICAL MODEL)

Fırçasız doğru akım motor sürücülerinin matematiksel analizleri ile ilgili değişik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda fırçasız doğru akım motor modeli; durum-uzayı denklemleri, fourier serileri ve d-q eksen modelleri şeklinde elde edilmiştir. Fırçasız DC motorların zıt emk ve akım dalga şekillerinin sinüzoidal olmayan yapısından dolayı, sürekli mıknatıslı senkron motorda yapılan d-q matematiksel modelinin kullanılması yerine daha kolay olan faz-değişken yaklaşımı kullanılır [3 ve 4]. Fırçasız DC motor sürücülerin matematiksel analizinin yapılması için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir.

- Motor doyumda değildir.
- Motor sargıları sabit bir dirence, öz endüktansa ve karşılıklı endüktansa sahiptir ve tüm fazlarda bu değerler eşittir.
- Fazların hepsi aynı zıt emk şekline sahiptir.
- İntertedeki güç yarı iletkenleri idealdir.
- Demir kayıpları ihmal edilebilir bir düzeydedir.

3.1. Stator Referans Düzleminde Fırçasız Doğru Akım Motorunun Modellenmesi (Modeling of Brushless Direct Current Motor in Stator Reference Frame)

Bahsedilen kabuller göz önüne alınarak fırçasız doğru akım motorun gerilim denklemleri,

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L = L_s - L_m \quad (2)$$

Matriksel formda ifade edilebilir. Burada V_A, V_B ve V_C faz gerilimlerini, i_A, i_B ve i_C faz akımlarını, e_A, e_B ve e_C zıt-emk'ları, R faz direncini, L_s öz endüktansı ve L_m ise karşılıklı endüktansı göstermektedir. Fırçasız DC motorun rotor konumuna bağlı olarak zıt emk dalga şekilleri trapezoidal yapıdadır. Matematiksel olarak zıt emk değeri

$$\begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} f_A(\theta) \\ f_B(\theta) \\ f_C(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E = k_e w_r \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w_r \quad (5)$$

ile gösterilebilir. Burada k_e zıt emk sabiti, w_r rotorun mekanik hızı $f_A(\theta), f_B(\theta)$ ve $f_C(\theta)$ sırasıyla A, B ve C fazlarına ait zıt emk dalga şeklini tanımlayan şekil fonksiyonlarıdır.

Elektromanyetik dönme momentinin matematiksel değeri

$$T_e = \frac{(e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C)}{w_r} \quad (6)$$

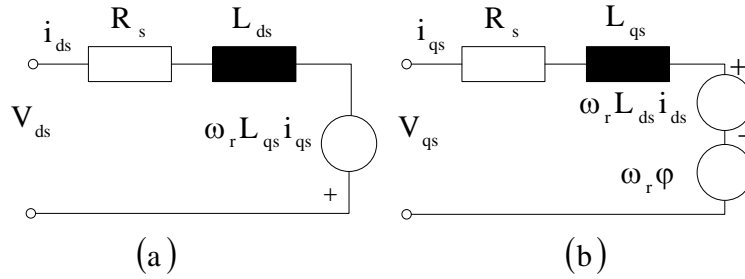
ile gösterilir. Motorun hareket denkleminin matematiksel değeri

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{(T_e - T_L - B w_r)}{J} \quad (7)$$

ile gösterilir. Burada J atalet momenti, B sürtünme katsayısı ve T_L yük momentini ifade etmektedir.

3.2. Rotor Referans Düzleminde Fırçasız Doğru Akım Motorunun Modellenmesi (Modeling of Brushless Direct Current Motor in Rotor Reference Frame)

Motorun sabit düzlemdeki stator değişkenleri rotor düzlemine aktarılır. Fırçasız doğru akım motorunun vektör denetimini sağlamak için d ve q eksen denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2 . Rotor Referans Düzleminde FSDAM Modeli

(a) d-Ekseni Eşdeğer Devresi b) q-Ekseni Eşdeğer Devresi)

(Figure 2. Modeling of brushless direct current motor in rotor reference frame)

Fırçasız senkron doğru akım motorunun stator değişkenlerinin rotor referans düzlemine aktarılmış hali şeklindeki gibidir.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_r L_{qs} i_{qs} + L_{ds} \frac{d(i_{qs} + \varphi)}{dt} \quad (8)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_r L_{ds} i_{ds} + L_{qs} \frac{d(i_{qs})}{dt} + \omega_r \varphi \quad (9)$$

$\frac{d}{dt} = 0$ olduğundan eşitlikler yeniden yazılırsa,

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_r L_{qs} i_{qs} + L_{ds} \frac{d(i_{qs})}{dt} \quad (10)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_r L_{ds} i_{ds} + L_{qs} \frac{d(i_{qs})}{dt} + \omega_r \varphi \quad (11)$$

Denklemler düzenlenerek durum uzay formatında yazılırsa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{qs}} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_{qs} \\ L_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - \frac{\omega_r}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi \end{bmatrix} \right\} \quad (12)$$

BLDC motorun elektromanyetik momenti

$$T_e = 0.75p[\varphi i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs})i_{qs}i_{ds}] \quad (13)$$

BLDC motorun rotor manyetik akısı sabit mıknatıs tarafından karşılandığından ve rotor direnci çok yüksek olduğundan dolayı akımın mıknatıslanma bileşeni $i_{ds} = 0$ olur ve d-q eksen endüktansları birbirine eşit alınır. Böylelikle yeni elektromanyetik moment bileşeni aşağıdaki denklemdeki gibi elde edilir.

$$T_e = 0.75p\varphi i_{qs} \quad (14)$$

Rotor referans düzleminde elde edilen denklemler durum uzay formatında yazılırsa,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{qs}} & -\omega_r \frac{L_{ds}}{L_{qs}} & \frac{-\varphi}{L_{qs}} & 0 \\ \omega_r \frac{L_{qs}}{L_{ds}} & -\frac{R_s}{L_{ds}} & 0 & 0 \\ \frac{3P^2\varphi}{8J} & 0 & \frac{-B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{qs}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{ds}} & 0 \\ 0 & 0 & -P/2J \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ T_L \end{bmatrix} \quad (15)$$

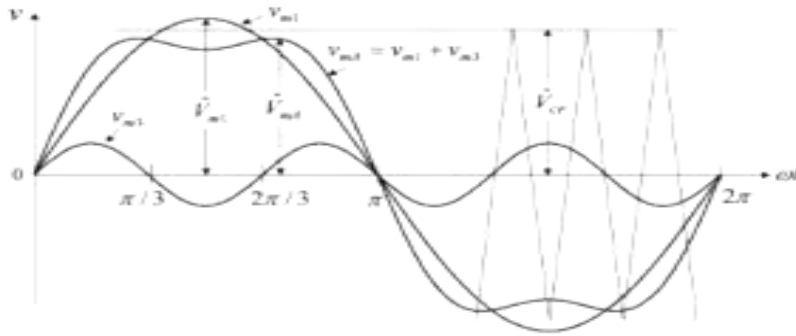
4. ÜÇÜNCÜ HARMONİK EKLEME TEKNİĞİ (THIRD HARMONIC INJECTION TECHNIQUE)

Daimi mıknatıslı senkron motorları ve asenkron motorları kontrol etmek için bilinen en iyi yöntemlerden biri üçüncü harmonik ekleme tekniğidir. Motor kontrolünde uygulanan gerilimin harmonikleri incelendiğinde temel ve üçüncü harmoniğin genliğinin diğer harmoniklere göre büyük olduğu gözlemlenmiştir. Motor yıldız bağlı olduğundan üçüncü harmoniğin etkisinin olumlu yönde olduğu gözlemlenmiştir. Üçüncü harmonik eklendiğinde DC bara gerilimi kullanımını arttırmaktadır. Motor kontrolünde üçüncü harmonik ekleme,

sinüsoidal ve üçgen olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Motor kontrolünde inverterdeki anahtarlar PWM ile kontrol edilerek motor kontrolü sağlanmaktadır. PWM yönteminde aşırı modülasyon olduğunda DC bara gerilimi talep edildiği kadar etkin kullanılmamaktadır. Bu durumu önlemek için referans gerilimlere üçüncü harmonik eklenir ve bu durumun DC bara kullanımını %15.47 arttırdığı bilinmektedir.

4.1. Sinüsoidal Üçüncü Harmonik Ekleme (Sinusoidal Third Harmonic Injection)

Alan yönlendirmeli kontrolde(FOC), motor dengeli ve yıldız bağlı olduğu ele alınarak, faz voltajlarının sinüsoidal olduğu bilinmektedir. En iyi DC bara kullanımını bulmak için temel sinyallere eklenecek üçüncü harmoniğin genliği hesaplanmalıdır. Bu genliği hesaplamak için temel sinüs dalgasına genliği bilinmeyen üçüncü harmonik eklenmektedir.



Şekil 3. Sinüsoidal üçüncü harmonik ekleme [5]
(Figure 3. Sinusoidal third harmonic injection [5])

$$F(\theta) = \sin \theta + x \sin 3\theta \quad (16)$$

Harmonik eklenmiş sinyalin motor konumuna bağlı türevi alınarak, motor konumunun üçüncü harmonik genliği cinsinden eşitliği bulunur.

$$\frac{dF(\theta)}{dt} = 0 \quad (17)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{9x-1}{12x}} \right) \quad (18)$$

$$F(\theta) = P(x) = (3x+1) \sqrt{\frac{3x-1}{12x}} - 4x \left(\frac{3x+1}{12x} \right)^{3/2} \quad (19)$$

Fonksiyonun ekstremum noktalarını bulmak için $\frac{dP(x)}{dx} = 0$ x'e bağlı birinci türev alınır. Bu işlem sonucunda -1/3 ve 1/6 olmak üzere iki farklı sonuç elde edilmektedir. x=1/6 kullanıldığında ikinci türevin minimum olduğu gözlenmektedir. Analiz sonucunda, eklenecek olan üçüncü harmoniğin temel harmonik genliğinin 1/6'sı kadar olduğunda en iyi DC bara kullanımı söz konusu olduğu gözlenmiştir. x=1/6 ve $\theta = 60$ kullanıldığında harmonik eklenen dalga formunun tepe noktasının 0.866'da olduğu yani modülasyon faktörünün 1.1547 olduğu görülmektedir. Üçüncü harmonik eklenerek %15.47 daha fazla harmonik kullanımı sağlanmaktadır.

3-faz sistem için faz gerilimleri aşağıdaki gibidir. Denklemdeki V anlık temel genlik, θ ise anlık temel fazı ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin(\theta) \\ V \sin(\theta - 120) \\ V \sin(\theta - 240) \end{bmatrix} \quad (20)$$

V ve θ bilindiği durumlarda üçüncü harmonik hesaplanabilir. Bu büyüklüklerin bilinmediği durumlarda ise d-q eksen gerilimleri kullanılarak hem V hem de θ değeri hesaplanabilir.

$$V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (21)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{1.5 V_A}{V} \quad (22)$$

Temel bileşene eklenecek olan üçüncü harmonik için referans gerilim hesabı aşağıdaki gibidir.

$$V_{ref} = \frac{V}{6} \sin(3\theta) = \frac{V}{6} (3 \sin(\theta) - 4(\sin(\theta))^3) \quad (23)$$

Hesaplanan anlık sinüzoidal harmonik gerilimi değeri kullanılarak elde edilen net faz gerilimleri aşağıdaki denklemlerdeki gibidir.

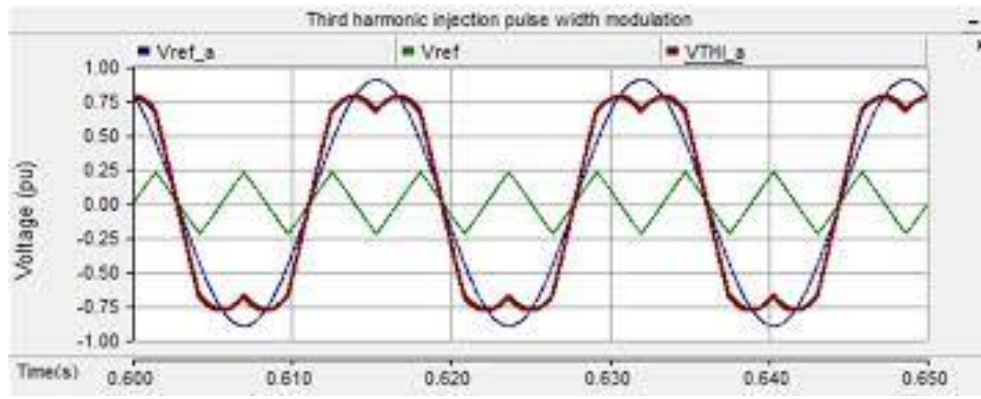
$$V_{A,THI} = (V_A + V_{ref}) * 1.1547 \quad (24)$$

$$V_{B,THI} = (V_B + V_{ref}) * 1.1547 \quad (25)$$

$$V_{C,THI} = (V_C + V_{ref}) * 1.1547 \quad (26)$$

4.2. Üçgen Üçüncü Harmonik Ekleme (Triangle Third Harmonic Injection)

Üçüncü harmonik eklemek için geliştirilen bu yöntemde, 3-faz gerilim değerlerinin maksimum ve minimum değerleri hesaplanarak anlık ortalama alınır ve temel sinyalden bu ortalama değer çıkarılır [6].



Şekil 4. Üçgen üçüncü harmonik ekleme
(Figure 4. Triangle third harmonic injection)

Temel bileşenden çıkarılacak olan üçüncü harmonik için referans gerilim hesabı aşağıdaki gibidir.

$$V_{ref} = \frac{[\min(V_A, V_B, V_C) + \max(V_A, V_B, V_C)]}{2} \quad (27)$$

Hesaplanan anlık harmonik değeri kullanılarak elde edilen net faz gerilimleri aşağıdaki denklemlerdeki gibidir.

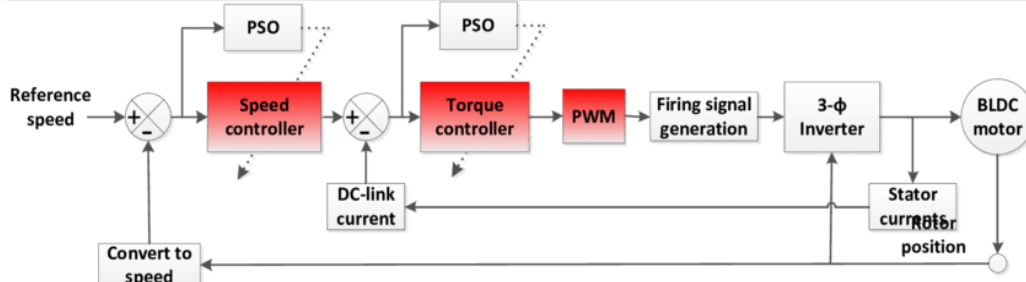
$$V_{A,THI} = (V_A - V_{ref}) * 1.1547 \quad (28)$$

$$V_{B,THI} = (V_B - V_{ref}) * 1.1547 \quad (29)$$

$$V_{C,THI} = (V_C - V_{ref}) * 1.1547 \quad (30)$$

5. SİMÜLASYON (SIMULATION)

Bu bölümde, üçgen üçüncü harmonik ekleme yöntemi kullanılarak fırçasız doğru akım motorun hız kontrolü için MATLAB/Simulink programında yapılan simülasyon anlatılmıştır. Şekil 5'de motor kontrol algoritmasının temel yapısı verilmiştir.



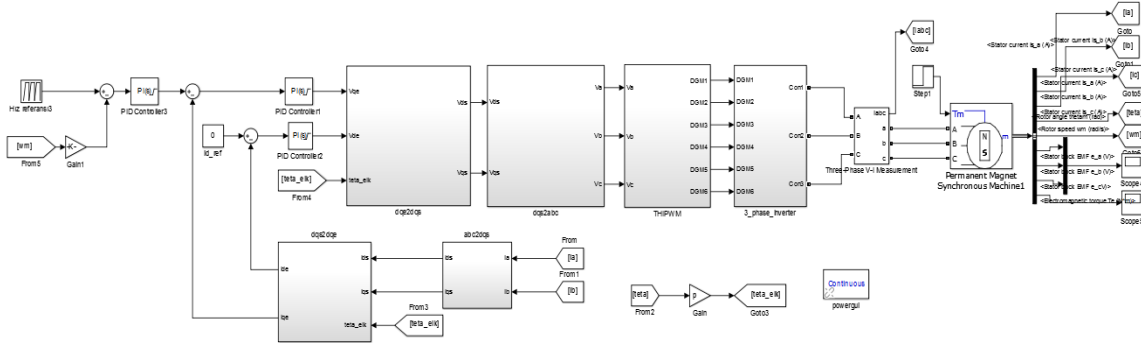
Şekil 5. Fırçasız doğru akım motorunun kontrol algoritması [7]
(Figure 5. Brushless direct current motor control algorithm [7])

Yapılan çalışmada kullanılan motor parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Hız referansı uygulanarak sistem davranışları gözlenmiştir.

Tablo 1. Fırçasız doğru akım motorunun parametreleri
(Table 1. Parameters of brushless direct current motor)

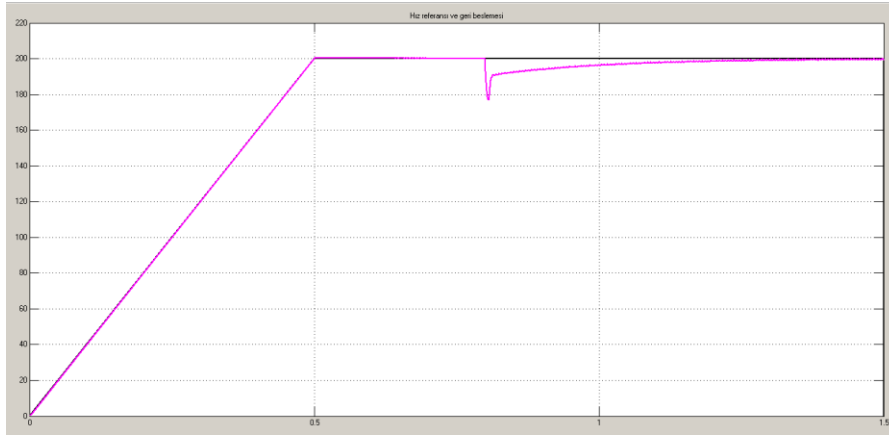
| | | |
|----------------------|-----------------------|----------|
| Anma Hızı | w (rpm) | 200 |
| Anma Torku | T (Nm) | 14.93 |
| Anma Akımı | I (Amax) | 10 |
| Stator Direnci (Hat) | R (Ω) | 0.2726 |
| Endüktans (Hat) | L (H) | 0.00283 |
| Kutup Çifti | P | 10 |
| Atalet Momenti | J ($kg \times m^2$) | 0.019959 |
| DC Bara Gerilimi | Vdc (V) | 48 |
| Tork Sabiti | Kt (Nm/Amax) | 1.712 |

Üçgen üçüncü harmonik ekleme yöntemi kullanılarak fırçasız doğru akım motorun hız kontrolü için MATLAB/Simulink programında simülasyon oluşturulmuştur. Şekil 6’da sistem kontrolü için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli verilmiştir.



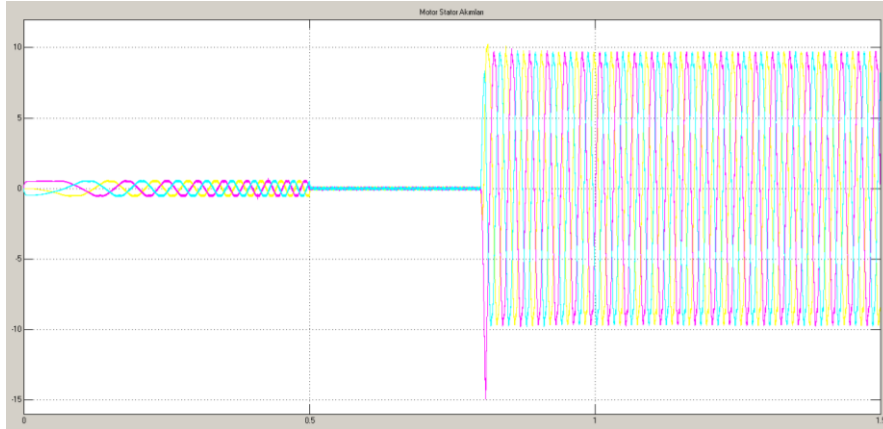
Şekil 6. Fırçasız doğru akım motorunun hız kontrolü
(Figure 6. Speed control of the brushless direct current motor)

Sistemde referans hız profili olarak, trapezoidal hız referansı kullanılmış ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Hızlanma bölgesinde yüklenme olmadan motor anma hızına getirilmiştir. Anma hızında iken motor anma torkunda yüklenerek çekilen akım incelenmiştir. Motordan alınan elektriksel tork değerindeki salınım incelenmiştir. Motora uygulanan hız referansı (siyah renkli sinyal) ve motordan alınan hız geri beslemesi (pembe renkli sinyal) Şekil 7’de verilmiştir. Motorun sabit hıza ulaştığı noktada yüklenmesi sonucunda hızda bir miktar bozulma olduğu gözlenmiştir. Hız değeri 200rpm’den 177rpm’e düşmüştür. Kontrolör yapısı bu bozunmayı engelleyecek şekilde çalışarak hız geri besleme değerini referans değere ulaştırmıştır.



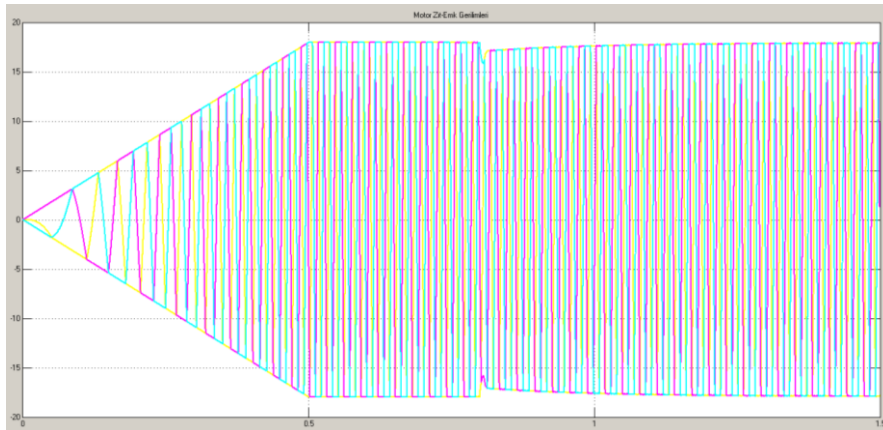
Şekil 7. Hız referansı ve geri besleme (rpm)
(Figure 7. Speed reference and feedback (rpm))

Motora uygulanan hareket profili sonucunda motordan akan akım sinyallerinin grafiği Şekil 8’de gösterilmiştir.



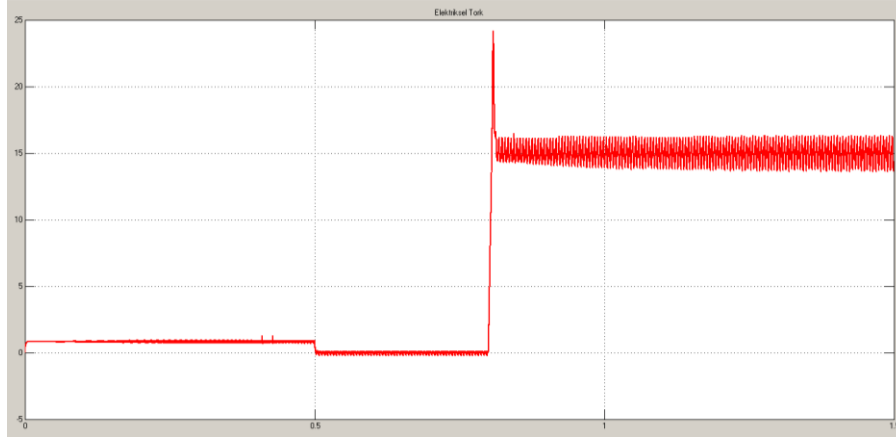
Şekil 8. Motor stator akım grafiği (A)
(Figure 8. Stator current signals of the motor(A))

Motor zıt-emk sinyalleri Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Motor zıt-emk sinyalleri (V)
(Figure 9. Back-emf signals of the motor (V))

Motorun ürettiği elektiriksel tork grafiği Şekil-10'da verilmiştir. Motor anma hızında anma torku ile yüklendiğinde üretilen torktaki dalgalanmanın 16.2Nm ile 13.8Nm arasında salındığı gözlenmiştir.



Şekil 10. Motorun ürettiği elektriksel tork eğrisi (Nm)
(Figure 10. Electrical torque curve generated by the motor (Nm))

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Fırçasız doğru akım motorunun üçüncü harmonik ekleme tekniği ile hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Trapezoidal hız profili uygulanarak motor anma hızında iken anma torku ile yüklenmiştir. Simülasyon çalışması sonucunda hız profilinde referans hıza ulaştığında hızda aşım (overshoot) olmadığı gözlenmiştir. Üçüncü harmonik ekleme yöntemi ile sistemde oluşacak akım dalgalanması düşürülmüştür. Motor akımlarında dalgalanmanın az olmasından sayesinde üretilen torktaki dalgalanma az ve tork verimi daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde bilinen anahtarlama yöntemleri yerine üçüncü harmonik ekleme yöntemi kullanıldığında motor tork kalitesinin arttığı gözlenmiştir. Bu çalışma sonucunda fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde bu metot tercih edilebilir.

NOT (NOTICE)

Bu çalışmanın 05-08 Eylül 2018 tarihleri arasında Priştine-Kosova'daki Uluslararası Bilim Sempozyumu'nda (ISS2018) sözlü sunumu yapıldı ve yeniden düzenlemeleri yapılarak genişletildi.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nasar, S.A., Boldea, I., and Unnewhr, L.E., (1993). Permanent Magnet, Reluctance and Self-Synchronous Motors. CRC Press, USA, 107-215.
- [2] Song, X., Han, B., Zheng, S., and Fang, J., (2018). High Precision Sensorless Drive for High-Speed BLDC Motors Based on the Virtual Third Harmonic Back-EMF, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol:33, pp:1528-1540.
- [3] Gipper, P.D., (1988). Accurate torque-speed performance prediction for brushless DC motors. in Proc. NAECON, pp:1092-1097.
- [4] Aydođdu, Ö., (2006). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici İle Sensörsüz Kontrolü. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
- [5] Kameswara Rao, R., Srinivas, P., and Suresh Kumar, M.V., (2014). Design and Analysis of Various Inverters Using Different Pwm Techniques. The International Journal of Engineering and Science (IJES), pp:41-51.



-
- [6] ThinhQuach, N., Sang Heon, C., Seungmin, L., and Ho-Chan, K., (2016). Analyzing Modulation Techniques for the Modular Multilevel Converter. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol:4, No:4.
- [7] Abbas, K.K. and Obed, A., (2018). Speed and Current Limiting Control Strategies for BLDC Motor Drive System: A Comparative Study. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, Vol:5, Issue:2.