

Atf İçin: Özer, T., Güneş, İ. ve Eryılmaz, M. M. (2023). Fırçasız Doğru Akım Motorunun PI Tabanlı Hız Kontrol Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*,13(2), 983-994.

ToCite: Özer, T., Güneş, İ. & Eryılmaz, M. M. (2023). Design and Application of PI Based Speed Control System of Brushless Direct Current Motor. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 983-994.

Fırçasız Doğru Akım Motorunun PI Tabanlı Hız Kontrol Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması

İbrahim GÜNEŞ¹, Muharrem Mert ERYILMAZ², Tolga ÖZER^{3*}

Öne Çıkanlar:

- PID kontrol
- Fırçasız Doğru Akım Motor
- Motor Hız Kontrolü

Anahtar Kelimeler:

- Doğru Akım Motor
- Fırçasız Doğru Akım Motor
- DC-DC Düşürücü Devreler
- Motor Hız Kontrolü
- Hall Sensörler
- PID kontrol

ÖZET:

Doğru akım (DA) motorları yüksek verim, yüksek tork, sessiz çalışma ve kullanım kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle geçmişten günümüze birçok farklı alanda kullanılmıştır. Geçmişte kolay sürülebilmesi nedeniyle çoğunlukla Fırçalı DA Motorları (FLDAM) kullanılmış olsa da güç elektroniği uygulamalarındaki gelişmeler ile bakım gerektirmeyen Fırçasız DA Motorları (FSDAM) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. FSDAM kullanımı arttıkça bu motorların sürme devreleri ve hız kontrol algoritmaları hakkında yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, PSIM programı kullanılarak PID kontrollü FSDAM sürücü devresi simülasyon modeli oluşturulmuş ve FSDAM hız kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğruluğunu teyit edebilmek için FSDAM test düzeneği hazırlanmıştır. FSDAM sürücü devresi güç katında dahili sürücülü 3 fazlı yarım köprü devresi içeren Mitsubishi PM50RL1A120 IPM modülü kullanılmıştır. FSDAM hız kontrolü Texas TMS320F28335 DSP işlemci ile gerçekleştirilmiştir. FSDAM test düzeneğinin başarımlı osiloskop görüntüleri ile teyit edilmiştir.

Design and Application of PI Based Speed Control System of Brushless Direct Current Motor

Highlights:

- PID control
- Brushless DC Motor
- Motor Speed Control

Keywords:

- DC Motor
- Brushless DC Motor
- DC-DC Buck Converter
- Motor Speed Control
- Hall Sensors
- PID control

ABSTRACT:

Direct current (DC) motors have been used in many different fields from past to present due to their features such as high efficiency, high torque, quiet operation and ease of use. Although Brushed DC Motors (FLDAM) were mostly used in the past due to their easy driveability, maintenance-free Brushless DC Motors (FSDAM) have been widely used with the developments in power electronics applications. As the use of FSDAM increases, new studies are carried out on the drive circuits and speed control algorithms of these motors. In this study, PID controlled FSDAM driver circuit simulation model was created using PSIM program and FSDAM speed control was successfully performed. In order to confirm the accuracy of the simulation results, the FSDAM test setup was prepared. Mitsubishi PM50RL1A120 IPM module with 3 phase half bridge circuit with internal driver is used in FSDAM driver circuit power stage. FSDAM speed control is realized with Texas TMS320F28335 DSP processor. The performance of the FSDAM test setup was confirmed by oscilloscope images.

¹İbrahim GÜNEŞ ([Orcid ID:0000-0002-6336-5432](https://orcid.org/0000-0002-6336-5432)), ENEL Enerji A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Kütahya, Türkiye

²Muharrem Mert ERYILMAZ ([Orcid ID:0000-0001-5495-8941](https://orcid.org/0000-0001-5495-8941)), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

^{3*}Tolga ÖZER ([Orcid ID:0000-0001-7607-6894](https://orcid.org/0000-0001-7607-6894)), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tolga ÖZER, e-mail: tolgaozer@aku.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda otomotiv, havacılık ve robotik uygulamalarında yüksek performanslı motorların geliştirilmesi çok önemlidir (Zhang vd. 2004). Kontrol sistemlerinde kullanılan motorlar genellikle doğru akım motorlarıdır. Genel olarak, doğru akım motorları, birçok uygulamada kullanılmasına rağmen, komütatörlerin rutin bakımı, fırçaların sık değiştirilmesi ve yüksek başlangıç maliyeti gibi dezavantajlara sahiptirler (Pearson ve Paresh.1984). Klasik FLDAM'larda komütasyon işlemi için kullanılan fırçalar zamanla yıpranarak motorun düzensiz çalışması, ark oluşumu ve verim kaybına neden olmaktadır (Xu ve ark. 2008). Bu nedenle yüksek kalkınma momenti, yüksek verim, geniş hız ve tork aralığına sahip FSDAM kullanılmaktadır (Grigorie et al. 2019). FSDAM motorlar SMSM'ye (sabit mıknatıslı senkron motorlar) benzerler ve rotoru kalıcı mıknatıstan yapılmıştır (Atan, 2007). Geleneksel doğru akım ve asenkron motorlara alternatif olarak fırçasız doğru akım motorları icat edilmiştir (Shamseldin ve Elsamahy. 2014). Fırçasız doğru akım motorlarında kollektör ve fırça bulunmadığından komütasyon elektronik olarak yapılmaktadır (Yaz ve Cetin. 2021). Bu ihtiyacı gidermek için sürücü devreleri ve kontrol algoritmalarının tasarlanması konusunda pek çok çalışma yapılmaktadır. Geçmişte elektronik sürücü devresi gereksinimi nedeniyle çok tercih edilmeyen FSDAM, güç elektroniği, mikroişlemciler ve kontrol alanlarındaki gelişmelerle daha fazla kullanılmaktadır. Adından da anlaşılacağı gibi bu motorda fırça bulunmadığından kıvılcım gibi fırçaların neden olduğu kusurlar bulunmamaktadır. FSDAM motorlar komütatör içermediği için endüvi boyunun kısılmasına, rotorun hafif olmasına ve atalet torkunun azalmasını sağlar. Bu özellikler endüstriyel uygulamalarda önemlidir (Kenjo ve Nagomori. 1985). Sabit mıknatıslı FSDAM'lar sensörlü ve sensörsüz olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Sensörlü FSDAM'larda rotor pozisyonun tespit edilebilmesi için çoğunlukla Hall etkili sensörler ya da dönüştürücüler kullanılır. Sensörsüz FSDAM'larda rotor pozisyon tespiti için enerjilenmemiş stator sargısı üzerinde endüklenen gerilim değeri izlenmektedir.

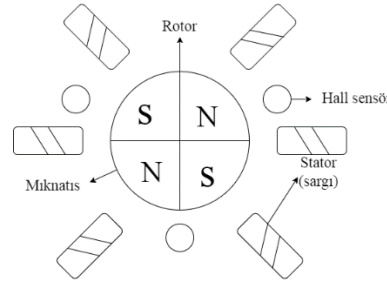
Endüstriyel uygulamalarda her iki FSDAM tipide kullanılmaktadır, ancak kontrol kolaylığı ve konum doğruluğu açısından sensörlü FSDAM'lar daha fazla tercih edilmektedir (Tatar. 2017). Stator akımlarını kontrol etmek için darbe genişlik ayarlı eviriciler sıklıkla kullanılır. Günümüzde, bu eviricilerin akımlarını kontrol etmek için kullanılan birçok teknik ve algoritma bulunmaktadır (Gumaste ve Slemon. 1981, Bose. 1990). Sabit mıknatıslı FSDAM kullanım alanlarında genellikle hassas hız kontrolü içeren uygulamalar olması nedeniyle hız kontrolüne yönelik birçok kontrol yöntemi tasarlanmıştır. Literatürde FSDAM hız kontrolü için bugüne kadar yapay sinir ağları, uyarlamalı kontrol, dalgacık tekniği, genetik algoritma gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Birçok gelişmiş kontrol yöntemi olmasına rağmen, karmaşık olmayan yapısı, uygulama kolaylığı ve yüksek kararlılığı nedeniyle PI kontrol yöntemi endüstride en çok tercih edilen yöntemdir (Anwar ve Pan. 2013). FSDAM sürücüleri için etkili bir modelleme isimli çalışmalarında, FSDAM ve sürücü sistemi için MATLAB ortamında yeni bir simülasyon modeli önerilmiştir. Önerilen model sayesinde, tasarım aşamasında maliyetin azaldığı ve MATLAB ortamında hazırlandığı için kullanımının oldukça kolay olduğu belirtilmiştir (Luk ve Lee. 1994). FSDAM motorun hızı bazı değişkenleri değiştirerek düzenlenebilmektedir. Bu durumda parametreler PI denetleyici çalışması altında gerçek zamanlı ayarlanır (Singirala ve Krishna 2019). Sürücü tasarımında günümüz teknolojisinde güç denetimi elektronik devrelerle yapıldığından, elemanların küçük boyutta olması, ömürlerinin uzun olması ve otomasyonda bilgisayar denetimine imkân vermesi gibi birçok avantajdan dolayı elektronik komütasyon tercih edilmiştir.

Bu çalışmada sabit mıknatıslı FSDAM yapısı incelenmiş, uygun sürücü devresi seçimi yapılmıştır. FSDAM matematik modeli oluşturulmuş ve bu model kullanılarak kapalı çevrim kontrol modeli oluşturulmuştur. Dikey iniş ve kalkış yapan insansız hava aracının iniş yaparken gerçek iniş noktasından sapması nedeniyle İniş sistemine entegre edilmiş iki motoru kontrol eden orantı, integral ve türev (PID) tipi denetleyici katsayılarını bulmak için Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) yöntemleri kullanılmıştır (Çaşka ve Uysal). Kontrol modelinde kullanılan PI kontrolör katsayıları K_p , K_i ve K_d değerleri Matlab-Simulink programında yer alan PIDTuner aracı kullanılarak hesaplanmıştır. PSIM programı kullanılarak FSDAM, sürücü devresi ve kontrol rutinlerinin yer aldığı simülasyon modeli oluşturulmuştur. Simülasyon modelinde kapalı çevrim PI kontrolörle hız kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Simülasyon modelinin başarısını teyit etmek için FSDAM sürücü test düzeneği hazırlanmıştır. Hazırlanan test düzeneğinde 24 Vda, 80 Watt anma değerine sahip FSDAM test edilerek sonuçlar gözlenmiştir.

MATERYAL VE METOT

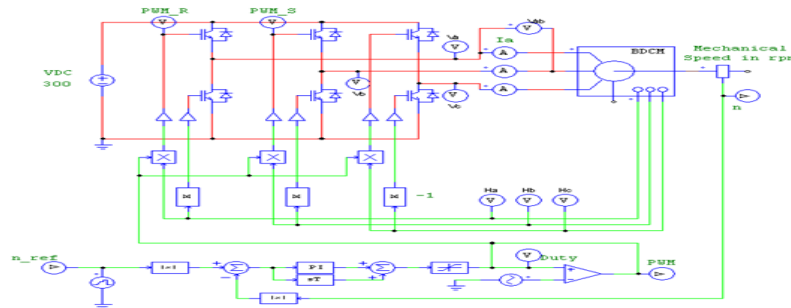
FSDAM Simülasyon Modelinin Oluşturulması

FSDAM'lar, rotor üzerinde yer alan sabit mıknatısların manyetik alanı ile stator sargılarında oluşan manyetik alanın etkileşimi sonucu oluşan moment ile elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Şekil 1'de FSDAM içyapısı verilmiştir.



Şekil 1. FSDAM içyapısı

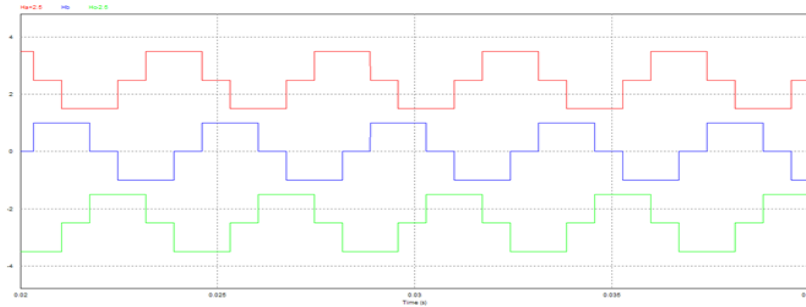
FSDAM, sabit stator ve hareketli rotor olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Sensörlü FSDAM'larda rotor üzerinde rotor pozisyonunu belirlemek için çoğunlukla Hall sensörler kullanılmaktadır. FSDAM'ların sürekli moment üretebilmesi için Hall sensörlerden gelen rotor pozisyon bilgisi kullanılarak belirli bir sıralama ile motorun iki fazından belirli yönde akım geçirilmelidir. Rotor konumuna bağlı olarak belirli stator sargılarını enerjilendirmek için 3 fazlı H-köprü sürücü devreleri kullanılır. Şekil 2'de PSIM programında oluşturulan PI tabanlı hız kontrollü FSDAM sürücü devresi modeli görülmektedir.



Şekil 2. PSIM FSDAM sürücü devresi simülasyon modeli

PSIM simülasyon programında yer alan sensörlü FSDAM modelinde 3 adet faz girişi, 3 adet Hall sensörü bilgisi, motor hız ve tork çıkışları bulunmaktadır. Hall sensörü sinyalleri rotor

pozisyonuna göre +1, 0 ve -1 değerleri arasında çıkış üretmektedir. Şekil 3'te Hall sensörü sinyalleri verilmiştir.

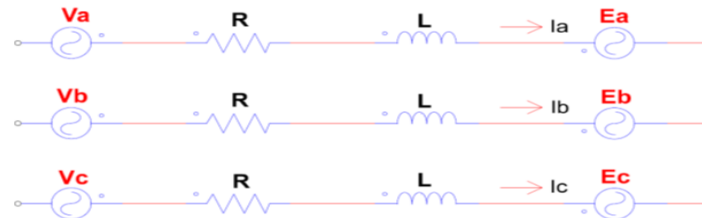


Şekil 3. Hall sensörü çıkış değerleri

Her bir Hall sensör çıkışından alınan sinyal, motorun ilgili fazının stator girişine bağlı olan faz gerilimini üretmek için kullanılır. Hall sensör çıkışı +1 olması durumunda ilgili fazda DC_Pos ucuna bağlı olan üst anahtar devreye alınırken, sensör çıkışı -1 olması durumunda ilgili fazın GND ucuna bağlı olan alt anahtar devreye alınmaktadır. Sensör çıkışı 0 değerinde iken her iki anahtar da devre dışı tutulmaktadır. PSIM simülasyon modelinde stator gerilimlerini belirleyen anahtarlama sinyalleri, rotor pozisyonu ile değişen Hall sensör değerleri ile kontrol edilerek sabit mıknatıslı rotor manyetik alanı ile stator sargılarında oluşan manyetik alan senkron edilmiştir. Rotor manyetik alanı stator sargılarına uygulanan 3 fazlı trapezoidal gerilimler sonucu oluşan döner alana senkron olarak sabit hızda dönme hareketi gerçekleştirmektedir.

FSDAM Hız Kontrolü

Şekil 4'te 3 fazlı yıldız bağlı bir FSDAM elektrik eş değer devresi görülmektedir. Stator sargısının endüktansı, direnci ve bunların üzerinden geçen akım gösterilmiştir.



Şekil 4. FSDAM elektrik eş değer devresi

Elektrik eş değer devresinde V_a stator gerilimi (V), I_a stator akımı (A), R stator direnci (Ω), L stator endüktansı (H) ve E_a ters EMK gerilimi (V) temsil etmektedir. FSDA motorun temel eşitlikleri aşağıdaki denklemlerde yer almaktadır.

$$V_a = I_a * R + L \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (1)$$

$$T_{em} = J * \frac{dw}{dt} + B * w + T_l \quad (2)$$

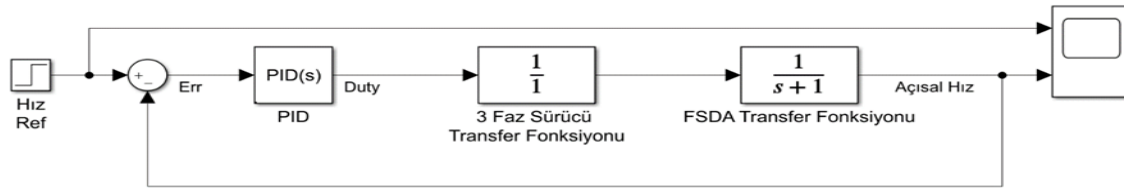
$$E_a = K_e * w \quad (3)$$

$$T_{em} = K_t * I_a \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde T_{em} motorun elektromanyetik momentini (N.m), J rotor atalet momentini (kg.m^2), B motor sürtünme katsayısını (kg.m.s/rad), w açısal hızı (rad/s), K_e ters emk sabitini, K_t stator sabitini göstermektedir. Bu denklemler kullanılarak FSDAM transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$G(s) = \frac{w(s)}{Vt(s)} = \frac{Kt}{J*L*s^2 + (J*R + L*B)*s + (B*R + Ke*Kt)} \quad (5)$$

Denklem 5'te $Vt(s)$ motor giriş gerilimini, $w(s)$ ise motor açısal hızını ifade etmektedir. Denklemden de görüleceği üzere FSDAM faz gerilim değerini değiştirerek dönme hızı kontrol edilebilmektedir. Motora uygulanan faz gerilim seviyesini değiştirebilmek için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Gerilim seviyesini kontrol etmek için en yaygın olarak kullanılan yöntem Şekil 2'de H-köprü sürücü devresinde yer alan üst anahtarların (IGBT1, IGBT2 ve IGBT3) darbe genişlik modülasyonu metodu kullanılarak farklı doluluk oranlarında yüksek frekansta anahtarlanması yöntemidir. Üst anahtarlara uygulanan darbe genişlik modülasyonu sinyallerinin doluluk oranları değiştirilerek V_a , V_b ve V_c gerilimlerinin ortalama değerleri değiştirilerek motor hızı kontrol edilmektedir. Motor hız referansı ile motor çıkışından alınan hız bilgisi arasındaki fark hata sinyali olarak PI kontrolör girişine verilmiştir. PI kontrolör çıkışından alınan kontrol sinyali yüksek frekanslı üçgen dalga (Tri) ile karşılaştırılarak üst anahtarlar için kullanılan darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali üretilmektedir. PI FSDAM hız kontrolörü kapalı çevrim kontrol blok diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. FSDAM simülasyon modelinde, Çizelge 1'de yer alan parametreler kullanılarak FSDAM transfer fonksiyonu hesaplanmıştır. Kapalı çevrim blok diyagramında yer alan PI kontrolöre ait optimum katsayılar Matlab-Simulink programında yer alan PIDTuner fonksiyonu ile hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar K_p değeri 0.08 ve K_i değeri 0.002 olarak PSIM programında kullanılmıştır.



Şekil 5. FSDAM kapalı çevrim kontrol blok diyagramı

Şekilde verilen PI kontrolör değerleri 6 numaralı formülde belirtilmiştir. Formüldeki k değerini yerine koyarak kazancı bulabilmekteyiz.

$$G(s) = k * (1 + sT) / (sT) \quad (6)$$

Çizelge 1: PSIM modeli FSDAM parametreleri

| Parametre | Değer |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Stator Direnci (R) | 11.9 Ω |
| Stator Endüktansı (L) | 0.00207 H |
| Atalet Momenti (J) | $7 * 10^{-6}$ kg.m ² |
| Ters emk sabiti (Ke) | 0.1142 V.s/rad |
| Motor sürtünme katsayısı (B) | $7 * 10^{-5}$ kg.m.s/rad |
| Stator sabiti (Kt) | 0.1142 kg.m/A |

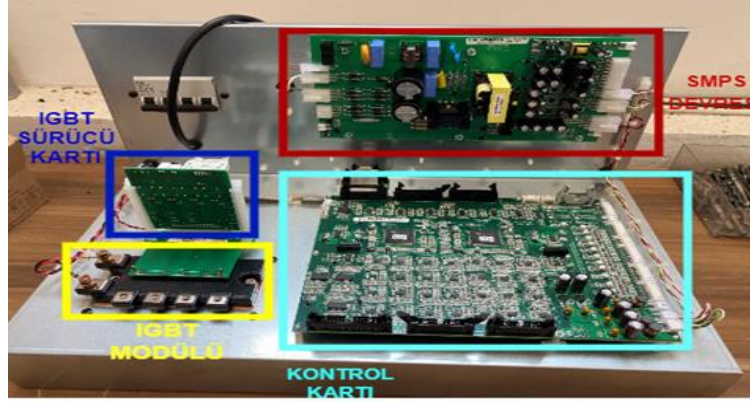
FSDAM Test Düzeneginin Oluşturulması

PID tabanlı FSDAM hız kontrol algoritmasının simülasyon çalışmalarının tamamlanmasının ardından anma değerleri Çizelge 2'de verilen FSDAM için sürücü test düzenegi oluşturulmuştur.

FSDAM sürücü test düzeneginde, yarı iletkenler ve sürme devrelerinin yer aldığı evirici bloğu, işlemci ve ilgili devrelerin yer aldığı kontrol kartı, kontrol kartı ve sürücü kartında kullanılacak DA gerilimlerin üretildiği SMPS kartı ve eviriciyi beslemek için gereken DA gerilimi üretecek redresör kartı Şekil 6'da yer almaktadır.

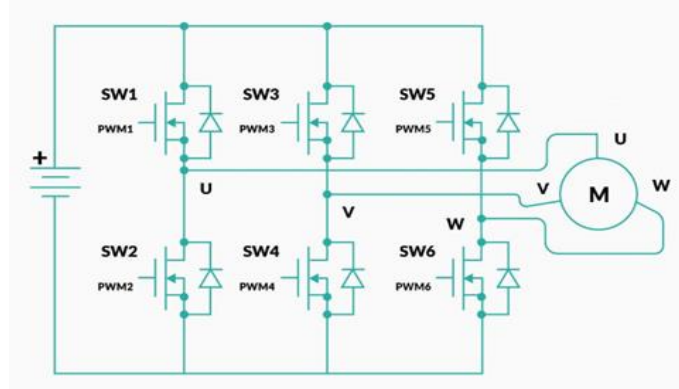
Çizelge 2: FSDAM anma değerleri

| Parametre | Değer |
|---------------|--------------|
| Giriş gerilim | 24 Vda |
| Giriş gücü | 80 Watt |
| Maksimum Hız | 3000 dev/dak |



Şekil 6. FSDAM sürücü test düzeneği

FSDAM sürücü kontrol kartında, Hall sensör değerlerini okumak, yarı iletkenler için darbe genişlik modülasyonu sinyallerini üretmek ve PID kontrol algoritmalarını uygulamak için Texas TMS320F28335 DSP işlemcisi kullanılmıştır. DSP programı Code Composer Studio programı kullanılarak C programlama dilinde yazılmıştır. DSP işlemci, her 50 mikrosaniyede bir (20 kHz) Hall sensör değerlerini okuyup yarı iletkenler için uygun anahtarlama kombinasyonunu uygulayacak şekilde programlanmıştır. Evirici devresinde yer alan 6 IGBT birbirinden bağımsız şekilde tetikleneceği için DSP işlemcide yer alan 6 adet ECap modülü asenkron darbe genişlik modülasyonu sinyali üretecek şekilde programlanmıştır.



Şekil 7. 3 fazlı H-Köprü evirici devresi

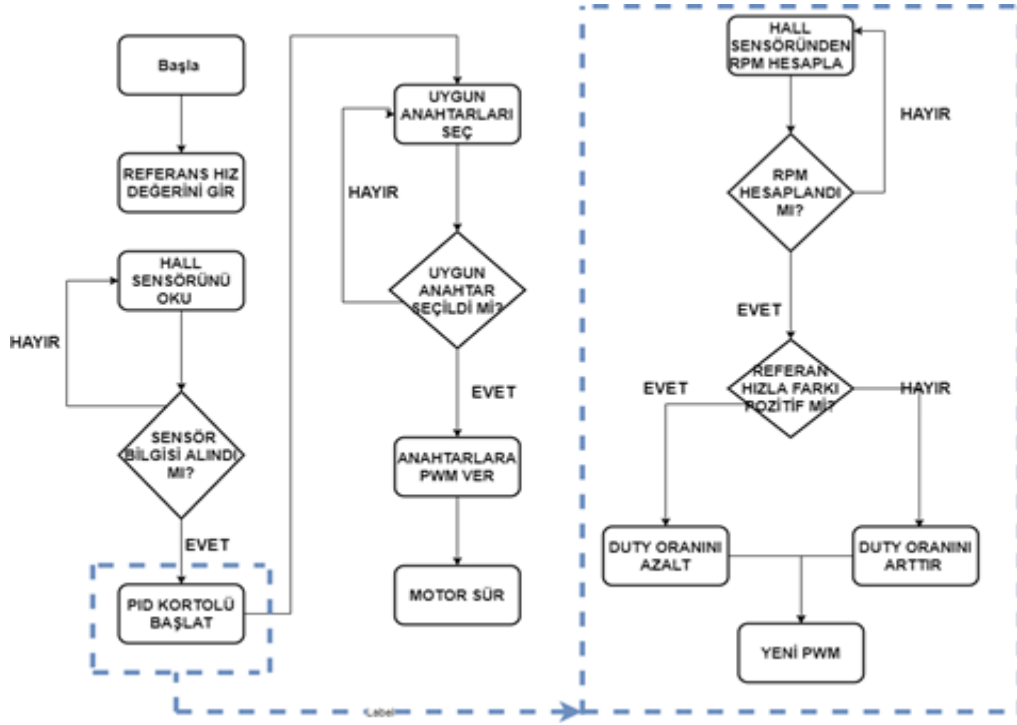
Şekil 7'de görülen H-köprü evirici devresinde motorun sarsıntısız bir şekilde dönebilmesi için motordan alınan 3 adet Hall sensör bilgisi ile rotor pozisyonu tespit edilerek stator sargılarının enerjilendirme sıralaması belirlenmiştir. Evirici devresi IGBT'leri Çizelge 3'te verilen sıralamaya uygun şekilde tetiklenerek FSDAM sürme işlemi gerçekleştirilmiştir.

FSDAM sürme yönünü ters çevirmek için Hall sensör bilgilerine göre enerjilendirilecek stator sargısına ters gerilim uygulanmıştır. Evirici devresi IGBT'leri Çizelge 2'de verilen sıralamanın tersi ile tetiklenerek FSDAM sürme yönü değiştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

FSDAM sürücü devresinin PI çalışmasında gelen veriler ve verilen kararlar doğrultusunda çalışması blok sema olarak Şekil 8'de verilmiştir.

Çizelge 3: Hall sensör pozisyonuna göre anahtarlama durumları

| Hall Sensör (abc) | IGBT1 | IGBT2 | IGBT3 | IGBT4 | IGBT5 | IGBT6 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 001 | OFF | ON | PWM | OFF | OFF | OFF |
| 010 | PWM | OFF | OFF | OFF | OFF | ON |
| 011 | OFF | OFF | PWM | OFF | OFF | ON |
| 100 | OFF | OFF | OFF | ON | PWM | OFF |
| 101 | OFF | ON | OFF | OFF | PWM | OFF |
| 110 | PWM | OFF | OFF | ON | OFF | OFF |

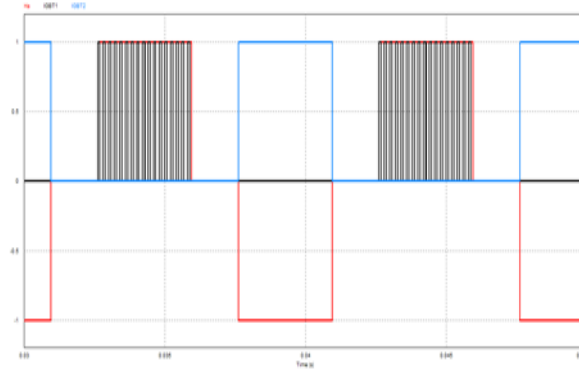
**Şekil 8.** FSDAM sürücü devresi PID çalışma akış şeması

BULGULAR VE TARTIŞMA

Simülasyon Modeli Sonuçları

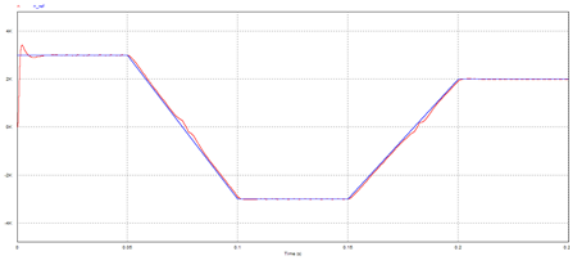
PSIM programında hassas hız kontrolü imkânı sağlayan simülasyon modeli oluşturulmuş ve model test edilmiştir. H-köprü devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlar Hall sensörlerden gelen veri ile senkron olarak çalışmaktadır. Evirici devresinde üst kol yarı iletkenleri (IGBT1, IGBT3, IGBT5) yüksek frekansta anahtarlama yaparken, alt kol yarı iletkenleri (IGBT2, IGBT4, IGBT6) temel frekansta anahtarlama yaparak çalışması Şekil9’da gösterilmiştir.

Stator sargılarına uygulanan gerilim seviyeleri, hız hatasına bağlı olarak PID denetleyicinin darbe genişlik modülasyonu doluluk oranlarını değiştirmesi ile kontrol edilerek FSDAM hız kontrolünün farklı referans hızlarındaki ve dönüş yönünün değiştirilme davranışı gözlemlenmiş ve kontrolün başarılı bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Tasarlanan FSDAM sürücü simülasyon modelinde motor dönüş yönünü değiştirmek için Hall sensörlerden gelen veriler terslenerek H-Köprü yarı iletkenlerine uygulanmıştır.

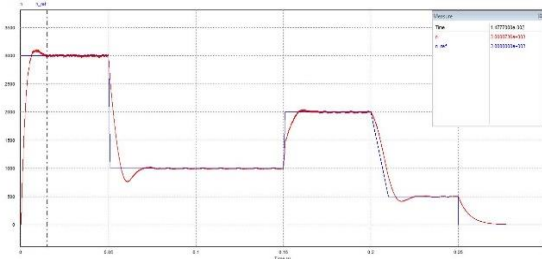


Şekil 9. Evirici devresi A fazı Hall sensör (kırmızı), IGBT1 anahtarlama (siyah) ve IGBT2 anahtarlama (mavi) eğrileri

Simülasyon modelinde motor yönünü değiştirmek için motor hız referansı (n_{ref}) negatif olarak girilmektedir. Motor hız referansı ile motor hızının değişimi ve yön değişim grafikleri Şekil 10'da görülmektedir.



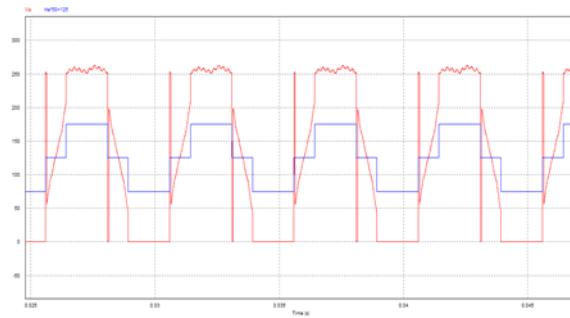
(a)



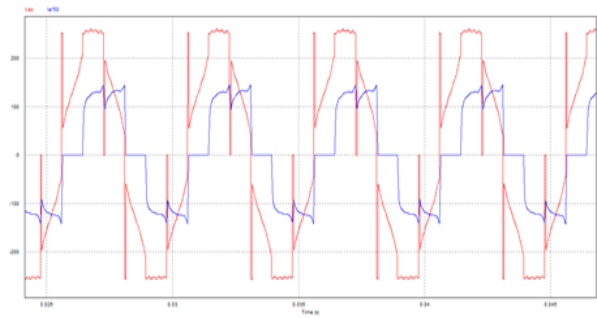
(b)

Şekil 10.(a) FSDAM yön değişimi, motor hızı ve hız referans eğrileri, (b) FSDAM 3000, 2000 ve 1000 RPM hız referansı hız eğrileri

Şekil 11'de FSDAM sürücü devresi A fazı gerilimi ve Hall A sensör bilgisi ve V_{ab} faz-faz gerilimi ve faz akımı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 11.(a) FSDAM çıkış gerilim ve Hall sensör çıkışı eğrileri, (b) FSDAM çıkış faz-faz gerilim ve akım eğrileri

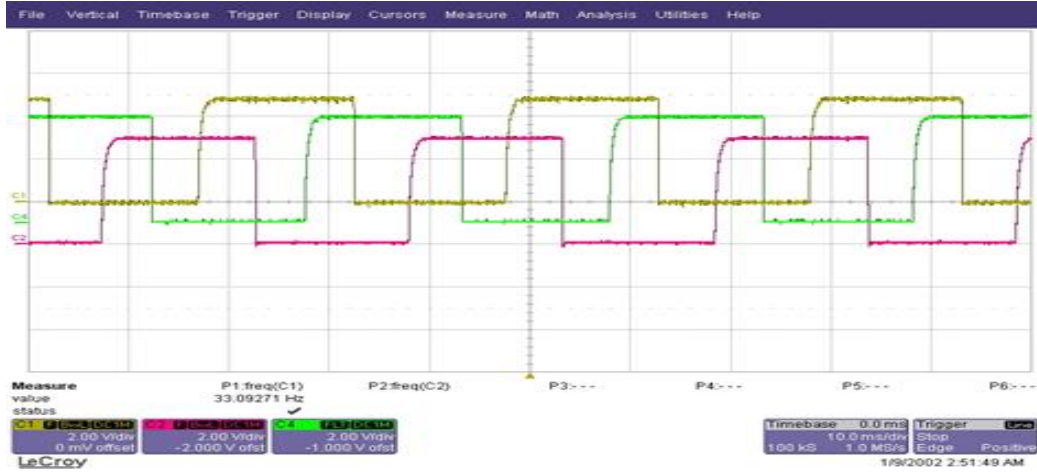
FSDAM Sürücü Test Düzeneği Sonuçları

Şekil 12'de anma değerleri Çizelge 2'de belirtilen motoru test etmek amacıyla oluşturulan test düzeneği yer almaktadır.

Test düzeneğinde ilk olarak motor Hall sensör bilgilerinin işlemci kartına doğru bir şekilde aktarılmasının osiloskop ekranındaki görüntüsü Şekil 13'te verilmiştir.

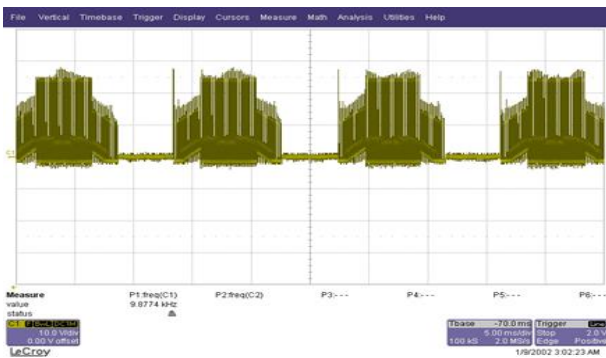


Şekil 12. FSDAM test düzeneği

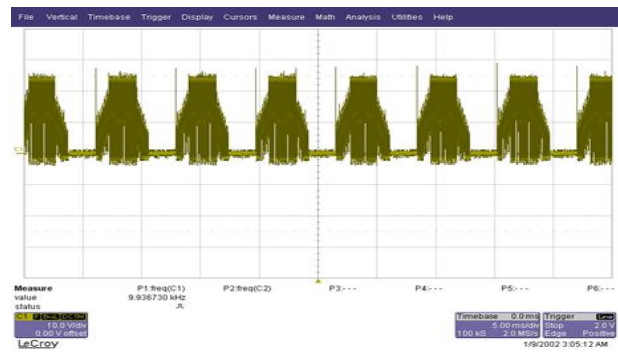


Şekil 13. A fazı (sarı), B fazı (yeşil), C fazı (pembe) Hall sensör bilgileri osiloskop görüntüsü

DSP işlemcide okunan 3 faz sensör değerlerine göre 6 farklı durum tanımlanıp her bir durumda hangi anahtarın açık, hangilerinin kapalı olacağı, hangi anahtarın yüksek frekansta anahtarlama yapacağı Çizelge 3'e göre belirlenerek Ecap modüllerine gerekli yüklemeler yapılmıştır. Sürücü devresi ilk olarak açık çevrim modunda sabit hızda çalıştırılmıştır. Darbe genişlik modülasyonu modunda çalışacak anahtar için doluluk oranı manuel olarak minimum bir değer seçilerek motora yol verilmiştir. Minimum %10 doluluk oranı ile motorun yol aldığı ve doluluk oranı arttıkça hızın arttığı görülmüştür.



(a)

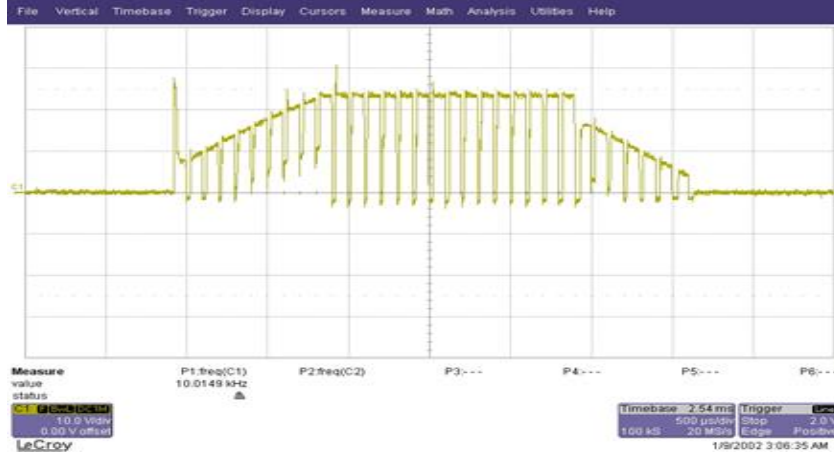


(b)

Şekil 14. (a)%25 doluluk oranında motor A-fazı gerilimi osiloskop görüntüsü, (b)%50 doluluk oranında motor A-fazı gerilimi osiloskop görüntüsü

Motor girişinde üretilen faz geriliminin tepe değeri H-Köprü DC besleme gerilimi ile aynı değerde olan trapezoidal formda olduğu görülmektedir. Darbe genişlik modülasyonu doluluk oranı arttıkça (%50) motor hızının artarak trapezoidal formun frekansının yükseldiği ve %25 doluluk

oranında FSDAM A fazının gerilimi Şekil 14'te görülmektedir. Motor girişinde üretilen faz geriliminin tepe değeri H-Köprü DC besleme gerilimi ile aynı değerde olan trapezoidal formda olduğu görülmektedir. Darbe genişlik modülasyonu doluluk oranı arttıkça (%50) motor hızının artarak trapezoidal formun frekansının yükseldiği Şekil 15'te görülmektedir.

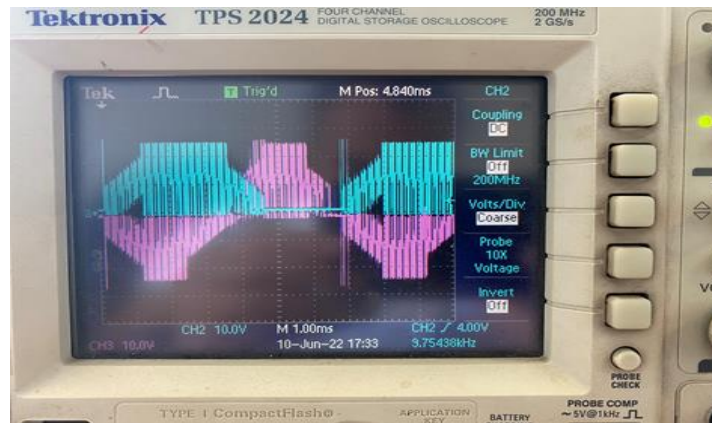


Şekil 15. %75 doluluk oranında motor A-fazı gerilimini oluşturan anahtarlama darbeleri görüntüsü

Sürücü açık çevrim testleri tamamlandıktan sonra kapalı çevrim hız kontrolü çalışmalarına başlanmıştır. Motor hızı harici bir ekipman kullanmadan Hall sensör bilgileri kullanılarak belirlenmeye çalışılacaktır. Kullanılan motorun kutup sayısı değerine bağlı olarak motorun kendi eksenine etrafında her bir tur dönüşü sırasında her bir Hall sensörü çıkışı belirli defa 0 değerinden 1 değerine yükselirler. DSP işlemci yazılımında her bir dakika içerisinde kaç defa bu değişim yaşandığı hesaplanarak motor hızı tespit edilecektir. Motor hızının belirlenmesinin ardından motor hızı referans değeri arasındaki fark ayrık zamanda tasarlanan PI kontrolöre iletilerek darbe genişlik modülasyonu doluluk oranları hesaplanacaktır.

FSDAM Sürücü Test Düzeneği PID Sonuçları

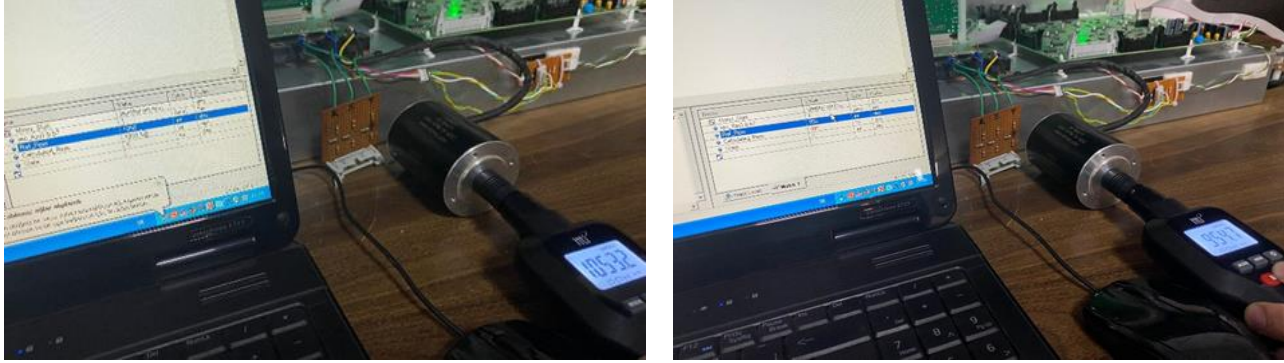
Şekil 16'da %50 doluluk oranında A fazı gerilimi ve AB faz arası gerilimi osiloskop ekranında görülmektedir.



Şekil 16. %50 doluluk oranında motor A fazı (mavi) ve AB faz-faz gerilimi (pembe) görüntüsü

Şekil 17'de PID kontrolcüsünün kullanıldığı test düzeneğinde, motorun hızı test düzeneğinde 1050 RPM (dakikadaki devir sayısı) olarak belirlendi, takometreden ölçülen değer yaklaşık 1050 RPM seviyelerinde okunduğu ve 950 RPM hızına düşürülmek istendiği zaman motor hızı 950 RPM düzeylerine düştüğü gösterilmiştir. Her iki aşamada da yaklaşık 15 milisaniye sonunda referans hıza oturmaktadır.

Test düzeneğinde girilen referans değeri 1050 RPM ve test düzeneğinde ölçülen anlık değer 1039 RPM ve takometreden okunan anlık değer 1053 RPM olarak ölçülmüştür. Ölçümlerdeki farklar ölçüm yapılan takometrenin ve işlemcinin hassasiyeti nedeniyle oluşmuştur.



(a)

(b)

Şekil 17.(a)1050 RPM hız referansı ve ölçülen değerler, (b)950 RPM hız referansı ve ölçülen değerler

SONUÇ

Hız kontrollü FSDAM sürücü devresi simülasyon uygulaması PSIM programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FSDAM hız kontrolü, 3 fazlı H-köprü evirici devresinde yer alan üst anahtarların doluluk oranlarının PID kontrolör ile belirlenmesi sonucu gerçekleştirilmiştir. PID kontrolörün referans hızı yakalaması ortalama 15 milisaniye olarak bulunmuştur. Simülasyon modelinin başarımı simülasyon sonuçları ile teyit edilmiştir. Simülasyon modelinden elde edilen bilgiler kullanılarak FSDAM sürücü test düzeneği hazırlanmıştır. FSDAM sürücü devresi güç katında dahili sürücülü 3 fazlı yarım köprü devresi içeren Mitsubishi PM50RL1A120 IPM modülü, kontrol katında Texas TMS320F28335 DSP işlemci kullanılmıştır. Anma değerleri Çizelge 2’de verilen FSDAM, sürücü test düzeneğinde açık çevrim modunda sürülmüş ve başarımı osiloskop görüntüleri ile teyit edilmiştir. Test düzeneğinde PID kontrol yapılarak kapalı çevrim modunda motoru sürerek, hız değerlerini bilgisayar ara yüzü ve takometreden alınan değerler karşılaştırılmıştır. Girilen referans değeri ve işlemci tarafından ölçülen değer karşılaştırılarak görev oranını değiştirerek yeni bir darbe genişlik modülasyonu sinyali oluşturulmuştur. Motorun belirli bir hızda çalıştırılmaktadır. Ölçü aleti ve bilgisayar ara yüzündeki değer referans değere oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda sistemin belirlenen referans değere göre PI kontrolü ile hızını sabit tuttuğu ve deneysel test devresinin ve kullanılan algoritmanın çalıştığı saptanmıştır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akram H., Abd El Samie B., Ayman Ali M. (2018) Comparison between Fuzzy Logic and PI Control for the Speed of BLDC Motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 9(3), 1116-1123.
- Anwar, M.N., Pan, S. (2013). Synthesis of the PID controller using desired closed-loop response. *IFAC Proceeding Volumes*, 10(1).

- Atan, Ö. (2007). *Fırçasız DC motorun modellenmesi ve PWM ile kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 1-2, 6-14.
- Çaşka, S., Uysal, A. (2021). İHA Yardımcı İniş Sisteminin Meta-Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri ile Kontrolü. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(5), 1223-1230.
- Gumaste, A.V. Slemon, G.R. (1981) Steady-state analysis of a permanent magnet synchronous motor drive with voltage-source inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 5(2), 143-151.
- Grigorie, T.L., Khan, S., Botez, R.M., Mamou, M., Mebarkı, Y. (2019). Design and experimental testing of a control system for a morphing wing model actuated with miniature BLDC motors. *Chinese Journal of Aeronautics*, 5(3).
- Kenjo, T., Nagomori, S. (1985). *Permanent Magnet and Brushless DC Motors*, Clarendon Press, Oxford, 57-70.
- Luk, P. C. K., & Lee, C. K. (1994). Efficient modelling for a brushless DC motor drive. In Proceedings of IECON'94-20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1, 188-191.
- Pearson, W.R., Sen, P.C. (1984) Brushless DC motor propulsion using synchronous motors for transit systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (4),346-351.
- Singirala M., Krishna D., Anil Kumar T. (2019). Improving Performance Parameters of PMBLDC Motor using Fuzzy Sliding Mode Controller, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(4).
- Shamseldin, M. A., EL-Samahy, A. A. (2014) Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller, *International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 1-9.
- Shekhar, S., Saha, P. K., Thakura, P. R. (2020). Optimal PID Tuning of BLDC Drive using LQR Technique. 2, 57–574.
- Soni, Y.K., Bhatt, R. (2013). BF-PSO optimized PID controller design using ISE, IAE, IATE and MSE error criteria. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology*. 2(7), 2333-2336.
- Tatar, G. (2017). *Hafif Elektrikli Araçlar İçin Akıllı, FSDAM Sürücü ve Kontrolör Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 120.
- Xu, F., Li, T., Tang, P. (2008). A Low Cost Drive Strategy for BLDC motor with low torque ripples. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008, 1, 2499–2502.
- Yaz, M. Cetin, E. (2021). Brushless Direct Current Motor Design and Analysis, *COJ Electronics & Communications*, 1-12.
- Zhang, Y., Zhang, L., Dong, Z. (2019). An MEA-Tuning Method for Design of the PID Controller. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.