

DsPic33fj32mc204 Mikroişlemci Tabanlı Hall Sensörlü Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü Tasarımı ve Proteus Simülasyon Uygulaması

Tolga ÖZER¹, Sinan KIVRAK², Yüksel OĞUZ¹, Muhammed Mustafa KELEK¹, Abdussamet KARACA²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara.

*Sorumlu yazar e-posta: tolgaozer@aku.edu.tr,

sinan.kivrak@hotmail.com

yukseloguz@aku.edu.tr,

mmustafakelek@aku.edu.tr,

abdussametkaraca@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7607-6894>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5195-0311>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5233-151X>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9915-4776>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9607-5573>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 08.08.2021

Öz

Bu çalışmada Hall sensörlü fırçasız doğru akım motorlarda kullanılacak, dsPic33fj32mc204 tabanlı bir motor sürücü sistemi tasarlanmış ve simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sürücü devresinde, IR2112 tip sürücü entegreleri kullanılarak üç fazlı sürücü devresinde bulunan MOSFET'lerin anahtarlamaları gerçekleştirilmiştir. Proteus programı kullanılarak, tasarlanan fırçasız doğru akım motor sürücü devresinin simülasyonu başarılı bir şekilde yapılmıştır. Motor kontrol sürücü sistemi, piyasada rahat bir şekilde bulunabilecek tipte devre elemanları ile oluşturulmuştur. Bu sayede sürücü devresi kolaylıkla ve ekonomik olarak uygulanabilme özelliklerine sahiptir. Gerçekleştirilen simülasyon uygulaması sayesinde farklı sürücü sistemlerinin geliştirilmesine imkân sağlayacak olan DsPic mikrodenetleyici tabanlı bir sürücü sistemi oluşturulmuştur. Üç fazlı fırçasız doğru akım motorunun kontrol sinyalleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Sürücü sisteminden elde edilen çıkış sinyalleri ayrıntılı bir şekilde yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler

FDAM Sürücü; DsPic Mikrodenetleyici; Kontrol; Proteus.

DsPic33fj32mc204 Microprocessor Based Hall Sensor Brushless Direct Current Motor Driver Design and Proteus Simulation Application

Abstract

In this study, a dsPic33fj32mc204 based motor drive system, which can be used in brushless DC motors with Hall sensors, was designed and implemented in a simulation environment. In the driver circuit realized, switching of the MOSFETs in the three-phase driver circuit was performed using IR2112 type driver circuits. Simulation of the designed brushless direct current motor driver circuit has been successfully performed using the Proteus program. The motor control driver system is created with circuit elements of a type that can be conveniently found on the market. In this way, the driver circuit has the features to be applied easily and economically. A DsPic microcontroller based driver system has been created which will allow the development of different drive systems thanks to the simulation application. The control signals of the three-phase brushless direct current motor have been successfully obtained. Output signals from the drive system are interpreted in detail.

Keywords

BLDC Driver; DsPic Microcontroller; Control; Proteus.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Endüstriyel yapılar veya sistemler mekanik tabanlı alt sistemlerden meydana gelmektedirler. Mekanik bir sistemde hareket özelliği ancak bir motorun o

sistemi hareket ettirmesi ile mümkündür. Bu sistemlerde genellikle elektrikli tip motorlar tercih edilmektedir. Mekanik sistemlerde farklı tipteki elektrikli motorların kullanıldığını görmek

mümkündür. Motorun kullanıldığı ortam başta olmak üzere motorun gücü, hassasiyeti ve hızına göre kullanılan motor tipi değişebilmektedir (Güneri, 2015). Teknolojinin gelişmesi ile birlikte birçok motor türü mevcut olup pek çok farklı alanda farklı türde motorlar kullanılmaktadırlar. Son yıllarda kullanımı gittikçe yaygınlaşan elektrik motorlarından biri de fırçasız doğru akım motorlarıdır (FDAM). Pek çok farklı alanda kullanılması ile birlikte özellikle robotik ve havacılık sektörlerinde yaşanan gelişmelerden sonra bu motor türüne olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Ancak maliyetlerinin yüksek ve kontrol devrelerinin karmaşık olması gibi dezavantajlarından dolayı uygulamalarda kullanım oranları istenilen seviyelerde olmadığı söylenebilir (Karakulak et. al. 2012, Yedamale, 2003).

FDAM'lar kendi içerisinde sensörlü ve sensörsüz olarak iki gruba ayrılmaktadır. Uygulamalarda her iki motor türünü de görmek mümkündür. Ancak kontrol kolaylığı ve konum doğruluğu açısından sensörlü FDAM'lar farklı uygulamalarda daha fazla tercih edildiği görülmektedir (Tatar, 2017). FDAM'ların istenilen kullanım oranına ulaşamamasındaki nedenlerin başında motorun hareket edebilmesi için ihtiyaç duyduğu kontrol sistemlerinin elektronik devre ve yazılım bileşenlerinin karmaşıklığıdır (Tetik, 2019). Çünkü motorun sorunsuz dönebilmesi ancak tasarlanan kontrol devresi ile birlikte mikroişlemciye uygulanan yazılımın doğru bir şekilde çalışması ile mümkündür. Bu iki bileşenin de düzgün bir biçimde çalışması ancak sistemin ya gerçek zamanlı olarak test edilmesi ya da simülasyon ortamında test edilmesi ile mümkündür (Hasanusta, 2016). Ancak piyasada bulunan pek çok simülasyon programında sistemin elektronik birimi test edilebilmesine karşın mikroişlemcinin bulunduğu kontrol biriminin simülasyonu gerçekleştirilememektedir. Böyle olunca da mevcut sistemlere uygulanacak yazılım ancak gerçek zamanlı olarak deneme yanılma yöntemi ile test edilebilmektedir. Bu durumda hem yapılan işi zorlaştırmakta hem de zaman kaybını arttırmaktadır (Sudip, 2017). Ancak Proteus simülasyon programı ile hem güç katı hem de kontrol birimi birlikte simüle edilebilmektedir. Böylelikle tasarlanan ve gerçek zamanlı uygulanacak

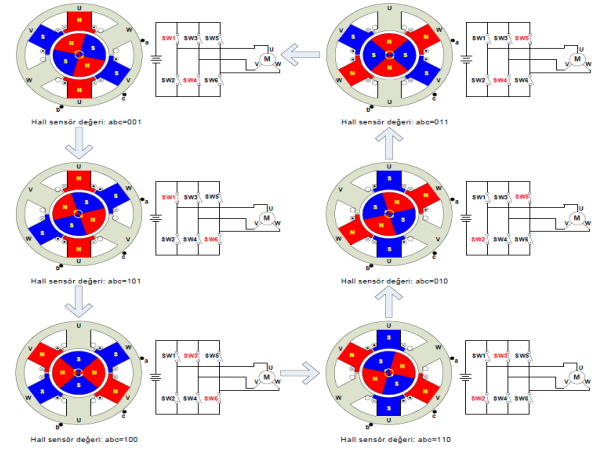
olan sistemlerin elektronik devre ve mikroişlemci birimlerinin uygulanan yazılım neticesinde birlikte çalışıp veya çalışmadığı kolaylıkla test edilebilmektedir. Bu sayede sistemin gerçek zamanlı devresinin ideal bir şekilde tasarımı mümkün olmakta ve sisteme uygulanan yazılım üzerinde gerekli düzenlemeler yapılarak elektronik bir sistem tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Bu özellik gerek akademik gerekse endüstriyel olarak gerçek zamanlı elektronik sistemlere yönelik yapılan çalışmalarda oldukça önem arz etmektedir (Su et. al. 2010, Zhou et. al. 2009). Proteus programı kullanılarak literatürde FDAM kontrolü tabanlı farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde kontrol ve sürücü devrelerinin Proteus programında tasarlanarak simülasyonlarının gerçekleştirildiği görülmektedir. Genellikle çalışmalarda PIC16F ve PIC18F serisi mikroişlemciler tercih edilmiş olup bu tip mikroişlemci serileri kullanılarak kontrol sistemleri oluşturulmuştur (Mukherjee et. al. 2014, Nasrul et. al. 2011, Mukherjee et. al. 2018, Aslam et. al. 2016). Çalışmalarda kullanılan bu tür mikroişlemci türleri ucuz olmasından kaynaklı olarak tercih edilmektedir. Elektronik sistemlerde mümkün olduğunca maliyetin düşük olması istenilen bir özelliktir. Ancak bazı yüksek güçlü ve profesyonel uygulamalarda maliyetin ötesinde sistemin sağlamlığı ve sürekliliği daha çok önem kazanmaktadır. Bu tarz üç fazlı motor kontrol uygulamalarında daha hızlı ve donanımlı DsPic serisi mikroişlemciler sıklıkla tercih edilmektedir (Zambada, 2010). DsPic mikroişlemci tabanlı çalışmalar incelendiğinde genellikle motor kontrol sisteminin simülasyonu yapılmadan doğrudan uygulamasının gerçekleştirildiği çalışmalar olduğu görülmektedir (Maher et. al. 2009, Sheeba et. al. 2011). Bu şekilde yapılan çalışmalarda simülasyon olmadığı için çok daha fazla hata ile karşılaşmakta ve zaman kaybını oldukça arttırmaktadır. Bazı çalışmalarda ise simülasyon için Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur (Aspalli et. al. 2015, Sharma et. al. 2016). Bu çalışmalarda ise güç devresinin yaklaşık olarak nasıl bir çıkış sinyali vereceği anlaşılabilse de mikroişlemci tabanlı bir simülasyon ortamı olmadığı için yazılım açısından meydana gelen hatalar ve yanlışlar saptanamamaktadır. Bu durum da mikroişlemci

programlama kısmında işlerin yavaş ilerlemesine ve sorunların yaşanmasına neden olabilmektedir. Yaşanabilecek bu problemleri elimine edebilmesi açısından motor kontrol sisteminin mikroişlemci ile birlikte simülasyonun yapılabildiği bir ortam olan Proteus programı oldukça önemli bir eksikliği gidermektedir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında Proteus programı kullanılarak DsPic serisi mikroişlemci tabanlı bir FDAM motor kontrol sisteminin simülasyon uygulamasına rastlanmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada DsPic33fj32mc204 tip mikroişlemcisi tercih edilmiştir. Hall etki sensörlü bir FDAM'un kontrolünü sağlayabilecek bir sürücü sistemi tasarlanmış ve oluşturulan FDAM sürücü yazılımı mikroişlemci devresine uygulanmıştır. Motorun üç faz PWM kontrol sinyallerinin üretilmesi işlemi ve sistemin kontrolü DsPic33fj32mc204 mikroişlemcisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu mikroişlemci tarafından üretilen PWM kontrol sinyalleri öncelikle IR2112 MOSFET sürücülerine ve bu sürücülerin çıkışlarından ise MOSFET'lerden oluşan üç fazlı H köprü sürücü devresine uygulanmıştır. Oluşturulan kontrol senaryosuna göre FDAM'ın çalıştırılması gerçekleştirilmiş ve sürücü giriş ve çıkışından elde edilen kontrol ve faz sinyalleri yorumlanarak motor sürücü sistemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

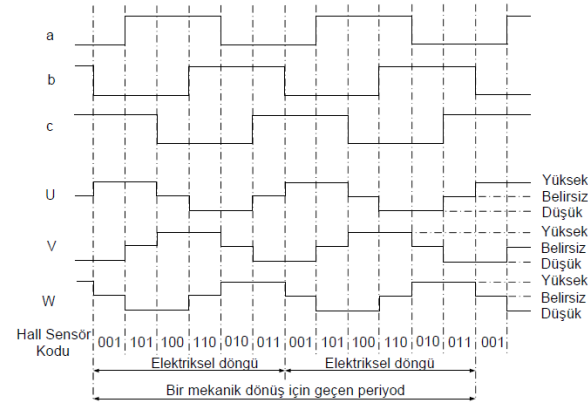
2. Materyal ve Metot

2.1 Sensörlü FDAM'nın İç Yapısı ve Kontrolü

FDAM'lar yapı itibari ile incelendiğinde Alternatif Akım Senkron Motorlara benzediği görülmektedir. Bu tip motorların çalışma karakteristikleri incelendiğinde ise fırçalı DC motorların özelliklerine sahip oldukları anlaşılmaktadır. FDAM'larda komütasyon işlemi klasik DC motorlardaki gibi mekanik olarak değil, elektronik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu tip motorlarda klasik fırçalı DC motor sisteminde bulunan fırça kollektör sisteminin yerini elektronik kontrol sistemi ile rotorunun konumu hakkında bilgi veren sensörler almıştır. FDAM'lar temel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar sabit mıknatıslardan oluşturulmuş olan rotor, rotorun konumunu belirleyen Hall konum sensörleri ve statoru oluşturan sargılardır (Güneri, 2015).



Şekil 1 FDAM'ın bir periyotluk dönme süresince aktif olan anahtarlar (Zhao et. al. 2014)



Şekil 2 Sensörlerin çıkış durumlarına göre elde edilen faz çıkış gerilimleri (Zhao et. al. 2014)

Şekil 1'de üç fazlı BLDC motor sürücü devresinin saatin tersi yönünde dönüş işlemi için komütasyon sırası gösterilmektedir. Yıldız bağlı olan motor sargılarına "a," "b" ve "c" olarak isimlendirilen üç Hall sensörü stator üzerine 120° aralıklarla monte edilmiştir. Her 60° dönüşte Hall sensörlerinden biri durumunu değiştirmektedir. Bu nedenle motorun bir tam tur dönmesi altı adımda gerçekleştirilir. Senkron modda, faz akımı anahtarlaması her 60° 'de bir güncellenir. Her bir adım esnasında motor sargılarından birincisi 1, ikincisi 0 iken üçüncü sargı ise belirsiz modda yani ne 1 ne de 0'dır. Bir sinyal döngüsü tam bir mekanik devire karşılık gelmeyebilir. Mekanik bir dönüşü tamamlamak için sinyal çevrimlerinin sayısı, rotor kutup çiftlerinin sayısı ile belirlenir. Mekanik dönme işleminin tamamlanması için gerekli olan sinyal saykıl miktarı rotor kutup çiftleri tarafından belirlenir. Böylece, sinyal saykılarının sayısı rotor kutup çiftlerinin sayısına eşittir. Şekilde altı kutuptan oluşan bir sistem sürücü devresindeki altı farklı anahtarlamaya

durumunun neticesinde bir tam turu tamamlamış olur. Şekilde aynı zamanda hangi anahtarlama elemanlarının iletme olması gerektiği kırmızı renkler ile belirtilmektedir. Hall sensörlerinin değerleri sadece rotorun konumuna yönelik bilgi verir ve bu sensörlerin değerinin rotorun anahtarlama sırası olduğuna yönelik bir düşünce doğru değildir. Yani motorun saat yönünün tersine dönmesi isteniyorsa 001, 101, 100, 110, 010, 011 saat yönünde dönmesi isteniyor ise de 011, 010, 110, 100, 101, 001 sensör konumları sırası ile dikkate alınmalıdır. Bu konumlarda, sürücü devresinde bulunan MOSFET anahtarlarının hangilerinin iletimde olması gerektiği belirlenir. Kontrol sisteminin, sürücü devresindeki bu MOSFET anahtarları iletme sokacak şekilde kontrol sinyali üretmesi sağlanır.

U, V, W olarak belirtilen faz sargılarının Hall sensörü olarak belirtilen a, b ve c sensörlerine göre enerjilendirildiği Şekil 2’de görülmektedir. Bu durum motorun saat yönünün tersine döndüğü esnada Hall sensörlerinin birbirlerine göre 120° faz farkına sahip olduklarının göstergesidir.

2.2 FDAM Sürücü Devresinin Tasarımı

Motor sürücü devresi temel olarak üç alt devreden oluşmaktadır. Bu devreler sırasıyla besleme, kontrol ve 3 fazlı anahtarlama devrelerinin bulunduğu devrelerdir.

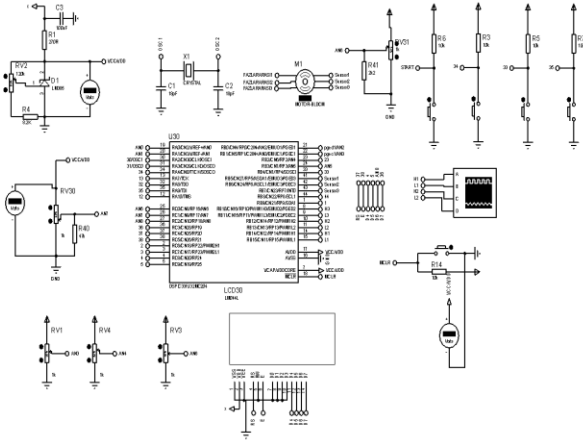
2.2.1 Besleme Devresi

Besleme devresi genellikle FDAM’ın kullanıldıkları sistemlere göre şekillenen birimlerdir. Tasarlanan sürücü devresinin giriş gerilimi tasarlanan sisteme göre farklılıklar göstermektedir. Ayrıca sürücü kartının giriş gerilimi ihtiyaç duyulan farklı gerilim seviyelerine düşürülerek kontrol ve sürücü devresinde bulunan elektronik devre elemanlarının beslemesinde de kullanılabilir. Mesela bataryadan beslenerek çalışan bir sistemde bataryadan elde edilecek çıkış gerilimine göre sürücünün besleme gerilimi girişi ve motorun çalışma gerilimi belirlenir. Kontrol kartında bulunan mikroişlemci, LCD, MOSFET sürücüler, MOSFET’lerin Gate pinleri ve farklı elektronik devre elemanları giriş geriliminin düşürülmesi ile elde edilecek farklı gerilim seviyeleri ile beslenir. Ancak simülasyonlarda yapılan devre

tasarımlarda ise böyle bir zorunluluk bulunmamaktadır çünkü besleme gerilimi simülasyonda istenilen seviyeye rahatlıkla ayarlanabilmektedir. Gerçekleştirilen sistemde giriş gerilimi 24V olarak belirlenmiş olup mikroişlemcinin beslemesi için 3.3V, LCD ekranın ve IR2112 sürücü entegrelerinin beslemesi için 5V, MOSFET Gate pinlerinin tetiklenmeleri için ise 15V değerindeki farklı gerilim seviyeleri devre elemanlarına uygulanmıştır.

2.2.2 Kontrol Devresi

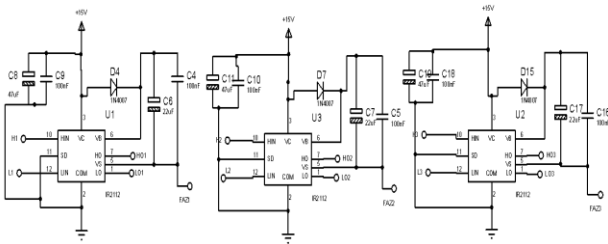
DsPic33fj32mc204 tip mikroişlemcisi kullanılarak kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu işlemcinin en önemli özelliği mikroişlemcide Motor Kontrol biriminin bulunmasıdır. Bu birim sayesinde üç fazlı motorlara yönelik kontrol işlemleri gerçekleştirilerek istenilen PWM sinyalleri rahatlıkla üretilebilmektedir. Mikroişlemcide PWM1H, PWM1L, PWM2H, PWM2L, PWM3H, PWM3L olmak üzere üç fazlı kontrol uygulamaları için kullanılacak PWM çıkışları mevcuttur. Sürücünün High Side ve Low Side kısımlarının kontrolü bu çıkışlardan elde edilen sinyaller ile gerçekleştirilebilmektedir. PWM1H sinyali High Side için PWM1L ise Low Side için elde edilen sinyali ifade eder. Kontrol mantığında oluşturulan sisteme göre MOSFET çiftleri tetiklenir. High Side kısmında bulunan MOSFET’lere PWM sinyali uygulanırken Low Side tarafında bulunan MOSFET’ler sadece “0” veya “1” sinyalleri uygulanarak yani kesimde veya iletimde olacak şekilde anahtarlanır. Böylelikle Low Side tarafında sürekli anahtarlama kayıpların da önüne geçilmiş olunur. DsPic33fj32mc204 mikroişlemcisinin tercih edilmesindeki en önemli neden ise Proteus programında çalışabilecek simülasyon özelliğine sahip olmasıdır. Proteus programında birçok mikroişlemcinin bulunmasına karşın simülasyon özelliği bulunan mikroişlemci sayısı sınırlıdır. Bu nedenle seçilen mikroişlemci türünün simülasyon özelliğinin bulunması tasarım için önemli avantaj sağlamaktadır. Kontrol devresinin genel görünümü Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3 FDAM Sürücü Sisteminin Kontrol Devresi

2.2.3 3 fazlı Anahtarlama Devresi

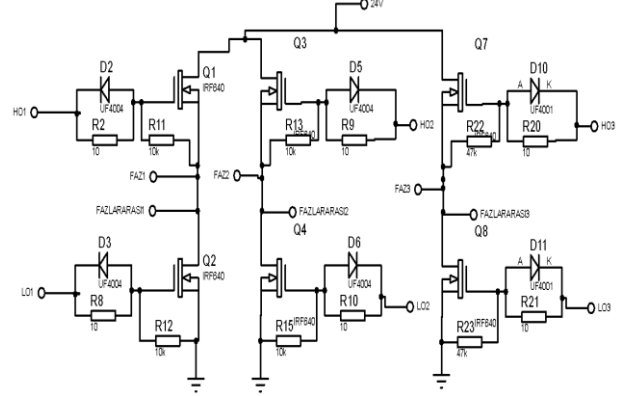
FDAM sürücü devresinde motorun dönmesini sağlayacak olan sinyallerin oluşturduğu devredir. Sürücü devresi tasarlanırken MOSFET anahtarlama elemanları tercih edilmiştir. Bu kısımda iki temel devre bulunmaktadır. Bu devrelerden biri aşağıda görülen IR2112 MOSFET sürücü devresidir. IR2112 entegresi Boostapt mantığına dayalı olarak MOSFET'leri anahtarlamaktadır. Sistemin üç fazlı olmasından dolayı sürücü devresi her bir faz kolunda ikişer tane olmak üzere toplam 6 adet IRF640 MOSFET elemanı ve 3 adet MOSFET sürücü entegresinden oluşmaktadır. Kullanılan MOSFET sürücü entegreleri aynı faz kolunda bulunan iki adet MOSFET çiftini kontrol edebilmektedir. Bu nedenle üç adet kullanılması yeterli olmuştur. MOSFET'lerin Gate pinlerinin anahtarlama için Vcc gerilimi olarak 15 V uygulandığı sürücü entegreleri Şekil 4'de görülmektedir. Sürücü devrelerinin çıkışlarından alınan High Output (HO1) ile Low Output (LO1) çıkışları sırasıyla herbir faz kolunda bulunan High ve Low Side'daki MOSFET'lerin Gate pinlerine verilmektedir.



Şekil 4. FDAM Sürücü Sisteminin IR2112 MOSFET Sürücü Devreleri

Üç fazlı sinyalin elde edildiği anahtarlama devresi aşağıdaki Şekil 5'de verilmiştir. Sürücülerden gelen

kontrol sinyallerine göre MOSFET'ler uygun kombinasyonlarda anahtarlanaarak faz gerilimleri elde edilir. Bu elde edilen faz gerilimleri de FDAM'a uygulanarak dönmesi sağlanır. Üretilen sinyalin genliği MOSFET'lerin Drain ucuna bağlanan gerilime göre değişkenlik gösterir. Anahtarlama kullanılan MOSFET'ler ise gerilimin ve geçecek yük akımının büyüklüğüne göre seçilir.



Şekil 5 FDAM Sürücü Sisteminin Üç Fazlı H Köprü Devresi

3. Sürücü Devresinin Kontrolü

3.1 PWM Kontrol Sinyallerinin Oluşturulması

Kullanılan Dspic33fj serisi mikrokontrolörlerde motorların kontrolü için kullanılan önemli registerlardan biri de OVDCON registeridir. Bu register aracılığı ile PWM çıkış sinyalleri kontrol edilerek sürücü devresinde bulunan MOSFET'lerin hangilerinin iletime sokulacağı belirlenir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sensörlerin durumlarına göre hangi MOSFET'lerin iletimde olması gerektiği belirlenmelidir. Çizelge 1'de hangi MOSFET'lerin sensör durumlarına göre iletimde olması gerektiği gösterilmiştir. Buradaki anahtar isimleri (SW1,...,SW6) ve iletim durumları Şekil 13'de verilen şemaya göre oluşturulmuştur. Şekilde 001 durumu için SW1 ve SW4 anahtarlarının iletimde olduğu kırmızı renk ile gösterilmektedir. OVDCON registerına bu MOSFET'leri iletime sokabilecek sayı değeri girilmelidir. Kullanılan mikroişlemcide OVDCON registerı 16 bitlik bir yapıya sahiptir. Bu registerın hangi bitinin hangi PWM sinyallerinin çıkışını kontrol etmiş olduğu ayrıntılı olarak Çizelge 2'de gösterilmektedir. Hall sensörlerinin 001 durumu için SW1 ve SW4 anahtarlarının iletimde olması gerektiği bilinmektedir. Çizelge 2'ye bakılırsa 001 durumunda SW1, registerdaki POVD1H biti ile

SW4’de registerda bulunan POUT2L biti ile kontrol edildiği görülmektedir. POVD ve POUT bitlerine yazılan “0” ve “1” değerleri aynı zamanda çıkış sinyallerinin PWM ya da doğrudan iletim ve kesim anlamına gelen “0”, “1” durumunda ayarlanabileceğini temsil eden değerlerdir. Bu özelliğinden de faydalanarak High Side konumunda bulunan SW1 anahtarı POVD1H bitine “1” değerinin yazılması ile PWM çıkışı elde edilebilecek şekilde ayarlanmıştır. Low Side’da bulunan SW4 anahtarı da POUT2L bitine 1 yazılması neticesinde sürekli iletim durumunda yani “1” konumunda olacak şekilde bit değeri belirlenmiştir. Hangi anahtarın hangi bit değeri ile kontrol edileceği tasarım ve yazılıma göre değişiklik gösterebilmektedir. Çizelge 2’deki 001 durumunda SW1 ve SW4 anahtarları iletimde olacağı için “1” diğer bit değerleri ise “0” olarak ifade edildiğinde hexadecimal olarak ortaya çıkan sayı değeri 0X0204 olmaktadır. Bu değer OVDCON registerına yazıldığı durumda SW1 ve SW4 anahtarlarının iletime sokulacağı anlamını taşımaktadır. Diğer anahtarlama elemanlarının tetikleme durumlarını ifade eden sayı değerleri bu mantığa göre oluşturulmuştur. Motorun ters yöne dönmesi için gerekli olan hexadecimal değerler sırası ile Çizelge 2’de verilmiştir. Bu değerler aynı zamanda motorun hangi bobinlerinin enerjilendirildiğinin göstergesidir. Elde edilen bu hexadecimal değerler StateTableFwd[] dizisinin içerisine yazılarak mikroişlemcinin PWM çıkışlarının sırası ile bu dizide bulunan sayı değerlerine göre MOSFET anahtarları iletime veya kesime sokması sağlanır. Motorun sağdan sola dönme işlemi için StateTableFwd[] dizisi aşağıdaki gibi oluşturulmalıdır.

StateTableFwd[] = {0X0000, 0X0204, 0X2001, 0X2004, 0X0810, 0X0210, 0X0801, 0X0000}

Çizelge-1 Hall Efekt Sensör Çıkışlarına Göre İletimde Olan H Köprü Anahtarlama Elemanları

a	b	c	SW2 1L	SW1 1H	SW4 2L	SW3 2H	SW6 3L	SW5 3H
0	0	1	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	1	0
1	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	1

Çizelge-2 Hall Efekt Sensör Çıkışlarına Göre PXOVDCON Register’ının Aldığı Değerler

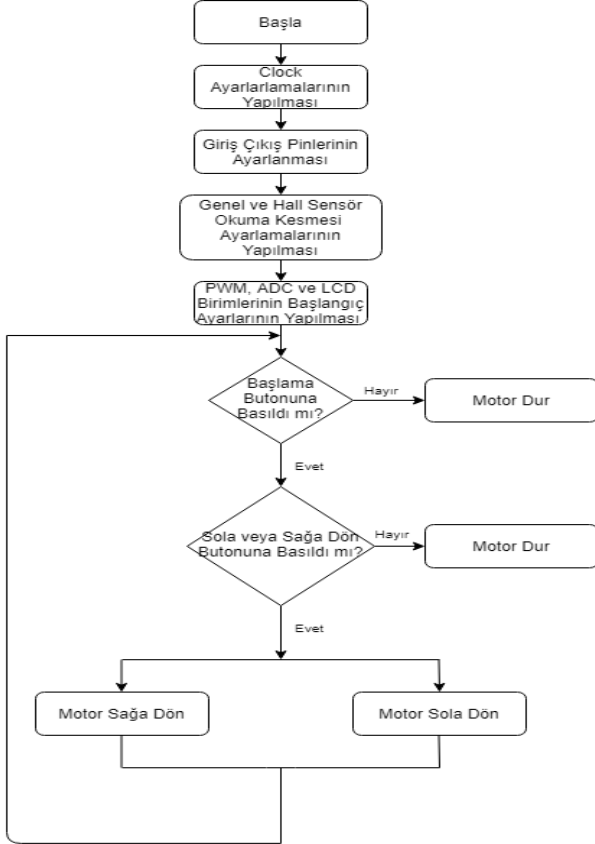
Hall Sensör Durumu	PXOVDCON Registerına Yüklenen Hexadecimal Sayı Değeri
001	0X0204
010	0X2001
011	0X2004
100	0X0810
101	0X0210
110	0X0801

PXOVDCON Register Bit Sıralaması 15-0 Bit																
POVD							POUT									
-	-	3	3	2	2	1	1	-	-	3	3	2	2	1	1	
		H	L	H	L	H	L			H	L	H	L	H	L	
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

3.2 Kontrol Algoritması

Sürücü devresindeki mikroişlemciye uygulanan FDAM sürücü kontrolü algoritma şeması Şekil 6’da görülmektedir. FDAM’ların kontrol sistemleri diğer sistemlerine göre daha karmaşık olduğundan dolayı kontrol işlemleri daha zor olabilmektedir. Sırası ile mikroişlemcinin dahili iç osilatörü kullanılarak 10 MHz’de çalışacak şekilde Clock ayarlamaları ve mikroişlemci portlarında bulunan pinlerin Giriş-Çıkış ayarlamaları yapılmıştır. Sensörlü FDAM kontrol sistemlerinde motorların bobinlerinin düzgün bir şekilde enerjilendirilmesi Hall sensörlerinden okunan sensör bilgilerinin doğru bir şekilde okunması ile mümkün olmaktadır. Bu kısım kontrol sisteminin en kritik noktalarından biridir. Hall sensörlerindeki verilerin doğru bir şekilde okunmadığı durumda motorun rotorunun konumu doğru saptanamadığı için rotor ya dönemeyecek ya da dönmesinde mekanik zorlanma, gürültü ve titreşimler olacaktır. Bu nedenle bu olumsuzlukların olmaması için sensör verileri “Change Notification” olarak isimlendirilen CN kesmeleri kullanılarak mikroişlemci tarafından okunmaktadır. Böylelikle dönen sistemdeki Hall sensörlerinin değişimi anlık olarak algılanmakta ve tetiklenecek MOSFET anahtarları bu mantığa göre OVDCON registerına aktarılmaktadır. Bu nedenle genel ve CN kesme işlemleri için gerekli register ayarlamaları gerçekleştirilir. Sonraki adımda PWM, LCD ekran ve

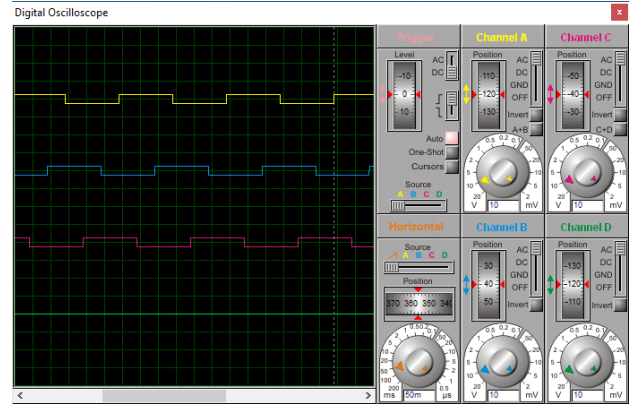
ADC işlemleri için gerekli başlangıç ayarları yapılır. Bu işlemlerden sonra motorun çalışabilmesi için gerekli olan çalışma senaryosu oluşturulur. Motorun çalışması için ilk etapta hem başlama butonuna hem de sağ veya sol döndürme butonlarına aynı anda basılması gerekmektedir ki motor hareket edebilsin. Bu yöntemle motorun ani veya kontrol dışı çalışması engellenmiş olur.



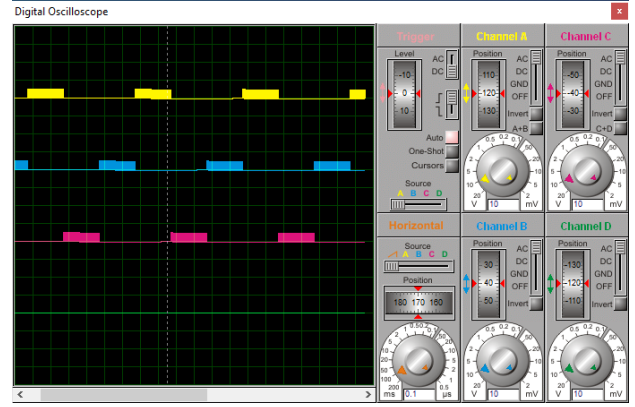
Şekil 6 FDAM'ın Kontrol Algoritması

4. Bulgular

Simülasyon ortamında FDAM motorunun sensör çıkışlarından elde edilen sinyallerin osiloskop çıktısı Şekil 7'de ki gibidir. Sensörlerden elde edilen sensör değerlerine göre FDAM motorun bobinleri enerjilendirilmekte ve motorun dönmesi sağlanmaktadır. Sensörlerden elde edilen çıkış sinyalleri doğrultusunda mikroişlemcinin PWM pinlerinden tetikleme sinyalleri oluşturulmaktadır. Şekil 8'de mikroişlemcinin PWM1H1, PWM1H2 ve PWM1H3 pinlerinden elde edilen sinyaller görülmektedir. Oluşturulan sinyaller 5 V genliğinde olup 120'şer derece faz farkı olacak şekilde elde edilmiştir. Osiloskop sinyal çıktılarında da bu faz farkı açıkça görülmektedir.



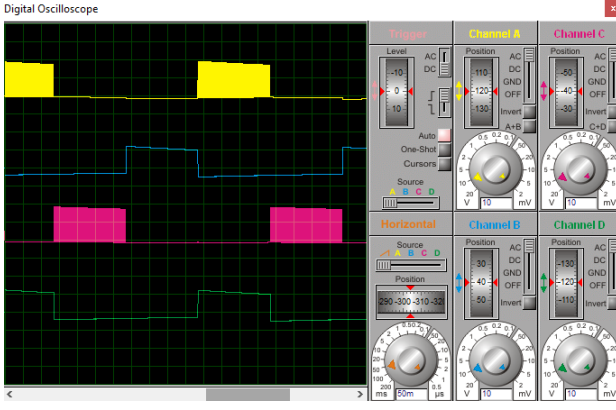
Şekil 7 Hall Sensörlerinin Çıkış Sinyalleri



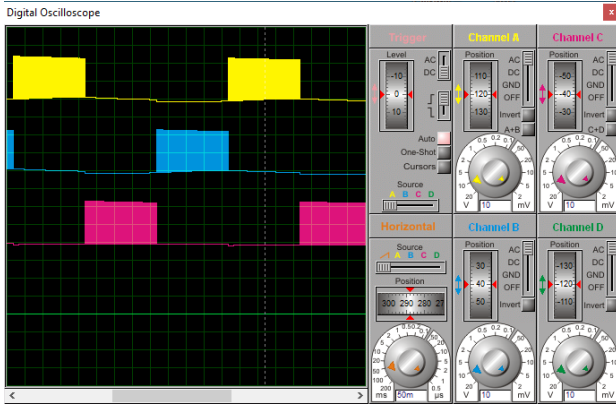
Şekil 8 Mikroişlemcinin PWM Pinlerinden Elde Edilen 3 faz PWM Kontrolü Çıkış Sinyalleri

IR2112 tip MOSFET sürücü entegre devresi osiloskop çıkış sinyalleri aşağıda Şekil 9'da gösterildiği gibidir. Sinyaller sırası ile HO1, LO1, HO2, LO2 sürücü entegresi çıkış pinlerinden elde edilmiştir. Burada sadece iki fazın High ve Low sinyal çıktıkları görülmektedir. Aynı şekilde sürücü çıkışlarından elde edilen sinyallerin arasında 120'lik faz farkı olduğu görülmektedir. MOSFET'ler 15 V gerilim genliğine sahip sinyaller ile tetiklendiği için sürücü devrelerinin besleme gerilimleri de 15 V olarak seçilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen sürücü çıkış sinyallerinin genlik değerleri de yaklaşık olarak 15 V seviyelerinde elde edilmiştir.

Üç fazlı H köprü devresinin faz sinyallerinin alındığı noktadan elde edilen fazlar arası sinyal şekilleri aşağıda gösterildiği gibi Şekil 10'da verilmiştir. Elde edilen osiloskop görüntüsünde 24 V genliğinde 120'şer derece faz farkına sahip olan sinyallerin dalga şekli görülmektedir.



Şekil 9. IR2112 Sürücüsü çıkışlarından elde edilen High ve Low Sinyalleri



Şekil 10. FDAM Sürücü Devresi Çıkışından Elde Edilen 3 Faz Kontrol Sinyalleri

Şekil 10'da ki sinyallerinin FDAM motorun faz uçlarına uygulanması sonucu döndüğü görülmektedir. Ancak Proteus programında bulunan FDAM modellerinin tam sağlıklı çalışmamasından kaynaklı olarak bazı problemler yaşanabilmektedir. Bu nedenle motor sürücü faz sinyallerinin dalga şekillerinin doğru olarak elde edilmesi sürücünün istenilen şekilde çalışabileceğinin göstergesidir. Önemli olan çıkış sinyallerinin dalga şekillerinin istenilen gibi olması ve 120'şer derece faz farkına sahip olmalarıdır. Proteus programında simülasyon yapılırken karşılaşılan diğer bir hata ise FDAM'ın Hall sensör bağlantılarının yapılacağı pinlerin belirlenmesi aşamasında yaşanmıştır. Normalde bütün pinlerin CN (Change Notification) kesmesi ile kullanılabilmesi gereklidir ancak simülasyondaki modelden kaynaklı olarak bütün pinler bu özelliği barındırmamaktadır. Bu nedenle Hall sensörleri sırası ile RB7, RB8 ve RB9 pinlerine bağlanarak sistemin sorunsuz bir şekilde çalışması gerçekleştirilmiştir. Mikroişlemciye bağlanan potansiyometre ile motorun hızı kontrol

edilebilirken sağ veya sol yöne dönecek şekilde simülasyondan dönüş yönü değiştirilebilmektedir. Proteus programında simülasyon yapılırken bazı hatalar ile karşılaşılrsa da mikroişlemci ile birlikte elektronik devrelerin simülasyonlarının yapılabildiği için elektronik devre tasarımlarında oldukça kullanışlıdır. Mikroişlemciye gömülen kodların simülasyonunun yapılabileceği başka bir simülasyon ortamı bulunmadığından dolayı mikroişlemci tabanlı elektronik sistemlerin tasarım projelerinde sıklıkla tercih edilmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Hall Sensörlü FDAM'un sürücü devresi ve simülasyon uygulaması Proteus programı kullanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üç fazlı FDAM sürücü devresi temel olarak besleme, kontrol ve güç devrelerinden oluşturulmuştur. Sürücü sisteminin kontrol biriminde DsPic33fj32mc204 mikroişlemcisi kullanılmıştır. Mevcut mikroişlemcinin simülasyon özelliğinin olmasından faydalanarak sürücü sisteminin bütün birimlerinin elektronik devreleri oluşturulmuş simülasyon ortamında çalıştırılmıştır. Böylelikle mikroişlemci tarafından üretilen PWM kontrol sinyalleri, IR2112 MOSFET sürücülerinin çıkış sinyalleri ve fazlar arası sinyaller osiloskopa bağlanarak görüntülenmiştir. Elde edilen sinyallere göre istenilen gerilim seviyesinde bir sürücü çıkışı elde edilmiş olup simülasyonda bağlanan Hall etkili motor-kontrol edilmiştir. Böylelikle DsPic serisi bir mikroişlemci kullanılarak FDAM'un kontrol işleminin Proteus simülasyon ortamında gerçekleştirilmesi ile bu alandaki eksiklik giderilerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

6. Kaynaklar

- Aslam, S., Hannan, S., Sajjad, U., Zafar, W., 2016. Implementation of PID on Pic24f Series Microcontroller for Speed Control of a Dc Motor Using Mplab and Proteus, *Advances in Science and Technology Research Journal*, **10**, 40–50.
- Aspalli, M. S., Munshi, F., M., Medegar, S., L., 2015. Speed control of BLDC motor with four switch three phase inverter using digital signal controller. *International Conference on Power and Advanced Control Engineering*, Bangalore, India

- Güneri, S., 2015. Kompresör Uygulaması İçin Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 105.
- Hasanusta, K., 2016. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Optimal Hall Sensör Konumunun Motor Parametrelerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- Karakulak, O., Yaz, O., Köybaşı, E., Bıçakçı, S., Candan, C., Akdaş, D., 2012. PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı, 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye.
- Maher F., Ishak, D., 2009. Improved BLDC motor performance with digitally filtering back-EMF using dsPIC30F microcontroller. *IEEE Student Conference on Research and Development*, Serdang, Malaysia.
- Mukherjee, A., Ray, S., Das, A., 2014. Development of Microcontroller Based Speed Control Scheme of BLDC Motor Using Proteus VSM Software, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, **2**, 14-21.
- Mukherjee, A., Ray, S., Das, A., 2018. Microcontroller Based Speed Control and Speed Regulation Scheme for Bldc Motor Under Variable Loading Conditions, *Acta Technica Corviniensis Bulletin of Engineering*, **11**, 47-55.
- Nasrul, M., Satar, A., Ishak, D., 2011. Application of Proteus VSM in Modelling Brushless DC Motor Drives, *4th International Conference on Mechatronics*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Sharma, P., K., Sindekar, A. S., 2016. Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC. *International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication*, Jalgaon, India.
- Sheeba, J., C., Paranjothi, S. R., Kumar, J., S., 2011. Practical implementation of four quadrant operation of three phase Brushless DC motor using DsPIC. *International Conference on Recent Advancements In Electrical, Electronics and Control Engineering*, Sivakasi, India.
- Su, B., Wang, L., 2010. Application of Proteus virtual system modelling (VSM) in teaching of microcontroller. *International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies*, Shenzhen, China.
- Sudip, M., 2017. Some Important Simulation Software Tools for a Student of Electronics Engineering. *Global Journal on Advancement in Engineering and Science*, **3**, 25-33.
- Tatar, G., 2017. Hafif Elektrikli Araçlar İçin Akıllı, FSDAM Sürücüsü ve Kontrolör Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 120.
- Tetik, M., 2019. Harmonik Ekleme Yöntemi ile Fırçasız Dc Motorun (Bldc) Hız Denetimi, *Technological Applied Sciences*, **14**, 27-36.
- Yadamale, P., 2003. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., Application Notes, AN885, USA.
- Zambada, J., 2010. Sensorless Field Oriented Control of a PMSM. AN1078 Application Note, Microchip Technology Inc.
- Zhou, H., Xu, Z., Lin, Z., Wang, R., Dong, J., Huang, Y., 2009. Simulation Design of Inverter in Solar Photovoltaic System Based on MCU, *Symposium on Photonics and Optoelectronics*, Wuhan, China.
- Zhao, J., Yu, Y., 2014. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note.