

BLDC Motorlar İçin Sensörsüz Komütasyon Tabanlı Elektronik Hız Kontrol Cihazı Simülasyonu

Mahmut Esat ÇULFAZ^{1*} , Mücahit SOYASLAN² 

¹ Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Türkiye
mahmutculfaz@subu.edu.tr

² Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Türkiye
msoyaslan@subu.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım (BLDC) motorları için sensörsüz komütasyon yöntemine dayalı bir motor sürücüsünün tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistem, Atmega328P mikrodenetleyicisi kullanılarak geliştirilmiş olup, kontrol algoritması motorun rotor konumunu tespit etmek amacıyla ters elektromotor kuvveti (Back-EMF) sinyallerine dayanmaktadır. IR2101 MOSFET sürücü entegresi ve IRFZ14 N-kanal MOSFET'leri ile oluşturulan güç sürücü katı, üç fazlı yarım köprü topolojisiyle yapılandırılmıştır. Elektronik Hız Kontrol Cihazı (ESC) sisteminin davranışı Proteus yazılımı üzerinde modellenmiş, PWM (darbe genişlik modülasyonu) üretimi, faz komütasyonu ve geri besleme mantığı dahil olmak üzere tüm kontrol algoritması sanal ortamda test edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, sistem doğru faz sıralamasını uygulayarak motoru kararlı şekilde döndürmüş; PWM zamanlaması, faz voltajları ve BEMF sinyalleri osiloskop üzerinde başarıyla gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, sensörsüz ESC sistemlerinin düşük maliyetli ve güvenilir kontrol çözümleri sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: BLDC Motor, ESC, Elektronik Hız Kontrol Cihazı, Simülasyon, Sürücü Tasarımı.

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mahmutculfaz@subu.edu.tr

Cite as: Çulfaz, M.E. & Soyaslan, M. (2025). BLDC Motorlar İçin Sensörsüz Komütasyon Tabanlı Elektronik Hız Kontrol Cihazı Simülasyonu, *Journal of Smart Systems Research*, 6(1), 62-73.
<https://doi.org/10.58769/joinssr.1703625>

Simulation of a Sensorless Commutation-Based Electronic Speed Controller for BLDC Motors

ABSTRACT

In this study, a sensorless commutation-based motor driver for brushless direct current (BLDC) motors was designed and simulated. The system was developed using an Atmega328P microcontroller, and the control algorithm operates based on back electromotive force (Back-EMF) signals to estimate rotor position. The power driver stage was configured as a three-phase half-bridge topology utilizing IR2101 MOSFET driver ICs and IRFZ14 N-channel MOSFETs. The behaviour of the Electronic Speed Controller (ESC) system was modelled in simulation, and the control algorithm (including PWM generation, phase commutation, and feedback logic) was tested in a virtual environment. Simulation results confirmed the correct phase sequence and stable motor operation. PWM timing, phase voltages, and BEMF signals were successfully observed on the virtual oscilloscope. The findings demonstrate that sensorless ESC systems offer low-cost and reliable control solutions for BLDC motors.

Keywords: BLDC Motor, ESC, Electronic Speed Controller, Simulation, Driver Design.

1 Giriş

Günümüzde endüstriyel otomasyon, elektrikli araçlar, insansız hava araçları (İHA) ve robotik sistemler gibi birçok alanda, yüksek verimlilik, düşük bakım ihtiyacı ve uzun ömür gibi avantajları nedeniyle BLDC motorlar yaygın biçimde tercih edilmektedir. Ancak bu motorların etkin kontrolü, özel sürücü devrelerini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, elektronik hız kontrol cihazları (ESC), BLDC motorların hassas ve verimli biçimde çalışmasını sağlayan temel bileşenlerdir. BLDC motorlar, sabit mıknatıslı yapıya sahip olup, mekanik fırçalar yerine elektronik komütasyonla çalışan motor türleridir. Her ne kadar “doğru akım” motoru olarak adlandırılırsalar da, üç fazlı yapıları nedeniyle doğrudan doğru akımla çalışmazlar ve elektronik komütasyon gerektirirler [1]. Rotorlarında sabit mıknatıslar, statorlarında ise elektriksel olarak kontrol edilen sargılar bulunan bu motorlarda, mekanik komütasyon yerine elektronik komütasyon kullanılması daha uzun ömür ve kararlı çalışma koşulları sağlar [2]. Bu avantajları sayesinde BLDC motorlar, otomotivden robotik sistemlere kadar pek çok alanda tahrik sistemi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır [3, 4]. Elektronik komütasyon ihtiyacı, BLDC motorları geleneksel doğru akım motorlarına göre daha karmaşık sürücü sistemlerine bağımlı hâle getirmektedir. Bu motorlar, MOSFET veya IGBT gibi anahtarlama elemanlarıyla çalışan üç fazlı gerilim kaynaklarına ihtiyaç duyar. Anahtarlama elemanlarının doğru zamanlamayla iletme geçmesi, sistemin güvenli ve verimli çalışması açısından kritik öneme sahiptir [5]. BLDC motorların kontrolünde rotor konumunun doğru belirlenmesi, komütasyon sırasının sağlıklı yürütülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda iki temel kontrol yaklaşımı öne çıkmaktadır: sensörlü ve sensörsüz yöntemler. Sensörlü yöntemlerde, rotor konumu fiziksel algılayıcılarla doğrudan tespit edilir. En yaygın kullanılan Hall etkili sensörler düşük maliyetli ve uygulanabilir çözümler sunarken, optik sensörler ve manyetik enkoderler gibi daha hassas alternatifler de bulunmaktadır. Sensörsüz kontrol teknikleri, rotor konumunu motorun elektriksel tepkilerinden tahmin etmeye dayanır. En yaygın yaklaşım, sargı uçlarındaki gerilimlerin analizine dayanan geri EMK (Back-EMF) yöntemidir. Bu yöntem orta ve yüksek hızlarda etkin sonuçlar sunarken, düşük hız ve ilk kalkış anlarında bazı sınırlamalara sahiptir. Alternatif olarak sıfır geçiş tespiti, adaptif gözlemciler, Kalman filtresi ve yüksek frekans enjeksiyonu gibi gelişmiş tekniklerle daha geniş hız aralıklarında hassas kontrol sağlanabilir. Bu çalışmada geliştirilen ESC sistemi; Atmega328P mikrodenetleyicisi (Arduino Nano), IR2101 MOSFET sürücü entegresi ve IRFZ14 MOSFET’lerinden oluşmaktadır. Sensörsüz komütasyon temelli kontrol algoritması, Proteus simülasyon ortamında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu sayede, donanım üretimine geçilmeden önce sistemin doğruluğu ve performansı etkin biçimde değerlendirilmiştir. ESC performansında, kullanılan mikrodenetleyici ve MOSFET sürücülerinin özellikleri belirleyici rol oynamaktadır. IR2101 entegresi, yüksek ve alçak taraf MOSFET’leri güvenli ve zamanlamalı biçimde sürerken; IRFZ14 gibi düşük $R_{DS(on)}$ değerine sahip MOSFET’ler anahtarlama kayıplarını azaltarak verimliliği artırır.

2 Literatür Araştırması

BLDC motorlarının sürülmesine yönelik kontrol devreleri, son yıllarda literatürde sıkça ele alınan bir konu olmuştur. Yapılan çalışmalarda, farklı kontrol stratejileri ile sensörlü ve sensörsüz yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Mikrodenetleyici ve FPGA tabanlı sistem tasarımları bu alanda öne çıkan yaklaşımlar arasında yer almakta, ayrıca simülasyon temelli analizlere de yaygın biçimde başvurulmaktadır. Literatürdeki çalışmaların çoğu, sistemin maliyet, kontrol hassasiyeti ve uygulanabilirlik gibi kriterlerine bağlı olarak farklı yöntemlerin tercih edildiğini göstermektedir. Bu bağlamda hem donanım hem yazılım açısından farklılık gösteren çözümler geliştirilmiştir.

Mukherjee, Ray ve Das, düşük maliyetli ve mikrodenetleyici tabanlı bir BLDC motor sürücü sistemi tasarlamış ve hem simülasyon hem donanım düzeyinde uygulamıştır [7]. Çalışmada, PIC18F4331 mikrodenetleyicisi ile 120° altı adımlı komütasyon ve Hall sensörlerine dayalı kapalı çevrim hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Proteus VSM yazılımı, gerçek zamanlı simülasyon ve donanım entegrasyonu açısından etkin şekilde kullanılmıştır. Sistem, basit bir aç-kapa kontrol algoritması ile PWM darbe oranını ayarlayarak motor hızını düzenlemektedir. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin geçerliliğini ortaya koymuştur. Yan'ın çalışmasında, BLDC motorlara yönelik sürücü devresi tasarımı yapıldıktan sonra sistemin davranışı MATLAB ortamında simüle edilmiştir [8]. Simülasyonda, motorun dinamik özelliklerini temsil eden eşdeğer devre modeli oluşturulmuş; akım, moment ve devir sayısı gibi parametreler analiz edilmiştir. Farklı uyartım yöntemleri (bipolar ve unipolar) karşılaştırılarak hız ve moment üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yazılımsal analizlerin prototip geliştirme sürecinde önemli bir rehber olduğunu göstermektedir. İmren'in çalışmasında, fırçasız doğru akım motoru (BLDC) sürücüsünün hem matematiksel modeli hem de donanımda test edilebilecek bir simülasyon yapısı geliştirilmiştir [9]. MATLAB & Simulink ortamında oluşturulan motor modeli, HDL Coder ile VHDL koduna dönüştürülerek FPGA platformuna entegre edilmiştir. Sistem, donanım-yazılım birlikte test yöntemi olan HIL (Hardware-in-the-Loop) yapısında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon bloğunda trapezoidal komütasyon, üç fazlı motor dinamikleri, hall sensör tepkileri ve kontrol algoritması modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan sürücünün yazılım ve donanım geliştirme sürecine doğrudan katkı sağlamıştır. Aydoğdu ve Bayer'in çalışmasında, fırçasız doğru akım (BLDC) motorları için PIC 16F876 mikrodenetleyicisi tabanlı düşük maliyetli ve basit yapıda bir motor sürücü sistemi tasarlanarak uygulanmıştır [10]. Sistem, hall sensörlerinden alınan rotor konum bilgilerine göre kapalı çevrim komütasyon gerçekleştirmiştir. Güç ve kontrol katı arasında optik izolasyon sağlanmış, inverter kısmında P ve N kanallı MOSFET'ler kullanılmış ve bu elemanlar TC4427 sürücü entegresi ile sürülmüştür. Yazılım ASM diliyle geliştirilmiş, PWM sinyali yazılımsal olarak üretilmiştir. Test sonuçları, sistemin kararlı çalıştığını ve pratik uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.

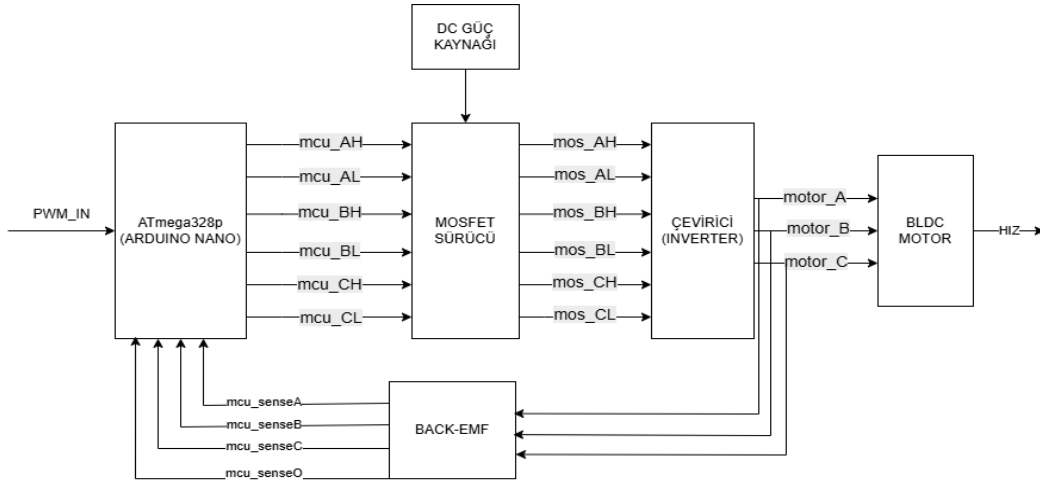
Literatürdeki birçok çalışma, sensörlü kontrol sistemlerine veya donanıma dayalı testlere odaklanmaktadır. Örneğin, Mukherjee ve arkadaşları hall sensörlü hız kontrolü geliştirirken, Aydoğdu ve Bayer düşük maliyetli bir sensörlü sistem tasarlamıştır [7, 10]. Simülasyon temelli çalışmalarda ise genellikle hazır motor modelleri üzerinden analiz yapılmakta, kontrol algoritmaları bütüncül olarak ele alınmamaktadır [8, 9]. Bu çalışmada ise, sensörsüz komütasyon temelli bir kontrol algoritması Proteus ortamında tam devre modeliyle entegre biçimde uygulanmış, BEMF sinyalleri üzerinden sıfır geçiş algılaması gerçekleştirilmiştir. Donanım üretimine gerek kalmadan sistemin kontrol mantığı yazılım düzeyinde test edilerek, literatürdeki mevcut yaklaşımlara göre düşük maliyetli ve bütünlük bir çözüm sunulmuştur.

3 Materyal ve Metodoloji

3.1 Simülasyon Ortamı ve Araçları

Simülasyon sisteminde kontrol birimi olarak Atmega328P tabanlı Arduino Nano sanal bileşeni tercih edilmiştir. Arduino bileşeni, hem PWM üretimi hem de komütasyon mantığının uygulanması açısından kullanılmış ve Proteus ortamında fiziksel mikrodenetleyicinin davranışı taklit edilmiştir. Bu mikrodenetleyici, sensörsüz komütasyon için gerekli olan 6-step geçiş algoritmasını çalıştırmakta ve üç

fazlı çıkışları kontrol etmektedir.



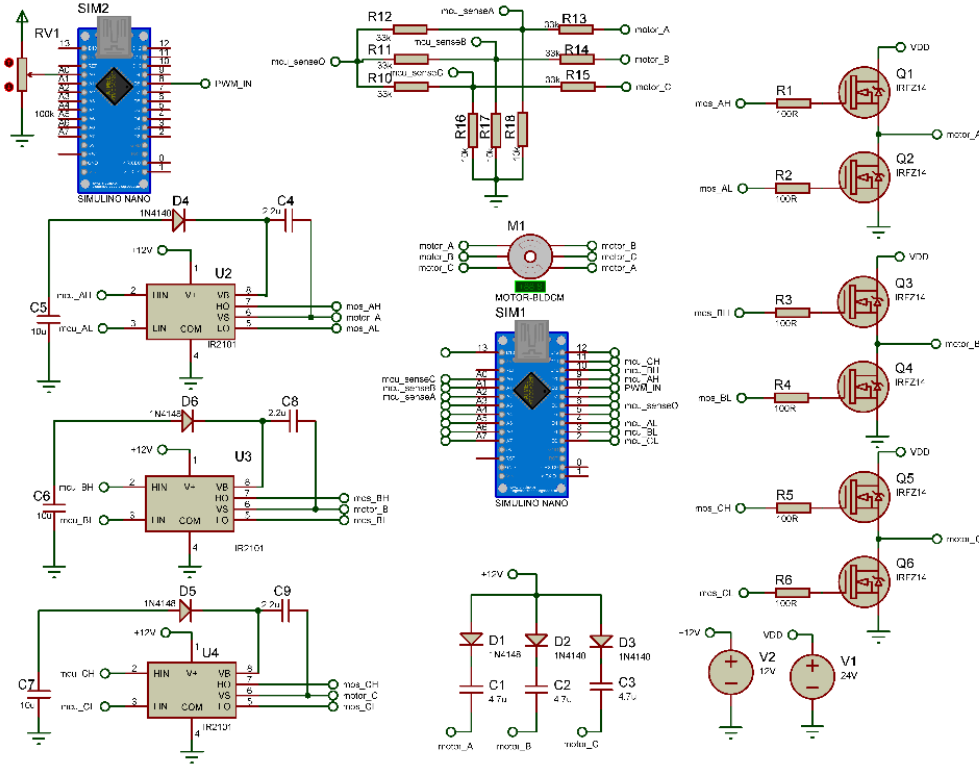
Şekil 1: Motor Sürücü Diyagramı

Güç sürücü katı, IR2101 yüksek/alçak taraf MOSFET sürücü entegresi ile modellenmiştir. Bu entegre, Arduino'dan gelen PWM sinyallerini izole etmeksizin alarak üç fazlı MOSFET anahtarlama devresini kontrol etmektedir. Her faz için IRFZ14 model numaralı N-kanal MOSFET'ler kullanılmış ve bunlar üçlü yarım köprü topolojisinde bağlanmıştır. Proteus ortamında IR2101 entegresiyle birlikte bu MOSFET'lerin davranışları detaylı olarak gözlemlenebilmiştir. Ayrıca, simülasyon sürecinde BLDC motorun modellenmesi için Proteus'ta hazır bir motor modeli kullanılmış; bu model üzerinden faz gerilimleri, akımlar ve motorun dönüş yönü gibi fiziksel parametreler ölçülmüştür.

Tablo 1. BLDC Motor Parametreleri

Va	12 V
RPM	600 dev/dk
Ra	6 ohm
La	10 mH

Sistemin geri besleme kısmı, hall sensör yerine boşta kalan fazlardan elde edilen ters elektromotor kuvveti (BEMF) sinyalleri üzerine kurgulanmış ve bu sinyaller dijital karşılaştırıcı (komparatör) ile sıfır geçiş noktalarında tespit edilmiştir. Sistemin doğruluğu, Proteus üzerinde yerleştirilen osiloskop ve voltmetre bileşenleri yardımıyla analiz edilmiş faz gerilimlerinin dalga şekilleri ve PWM sinyallerinin zamanlaması gerçek zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Böylece donanımsal üretim yapılmaksızın ESC yapısının doğru çalıştığı sanal ortamda gösterilmiştir. Şekil 1'de Proteus ortamında kurulan simülasyon devresi gösterilmiştir.

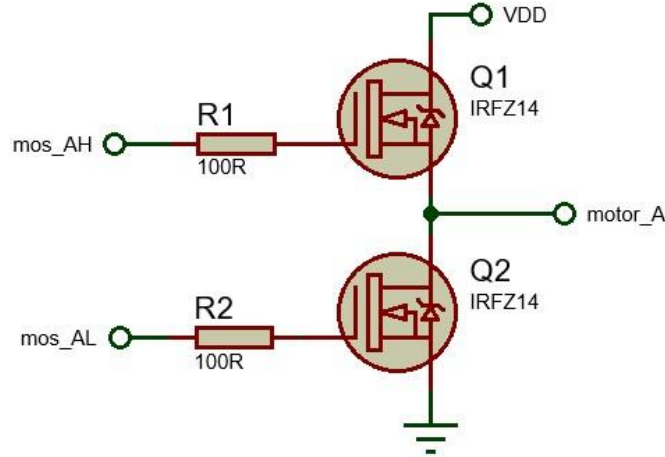


Şekil 2: Simülasyon Devre Şeması

3.2 MOSFET Anahtarlama Yapısı

BLDC motorların üç fazlı yapısı, her fazın belirli bir sırayla enerjilendirilmesini gerektirir. Bu işlem, genellikle altı adımlı (6-step) komütasyon algoritması ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan simülasyon devresinde her faz için iki adet IRFZ14 N-kanal MOSFET kullanılmış ve toplamda altı MOSFET'ten oluşan bir üç fazlı yarım köprü topolojisi kurulmuştur. MOSFET'lerin anahtarlama hızı, Arduino (Atmega328P) tarafından üretilen PWM sinyalleri ile kontrol edilmektedir.

Her komütasyon adımında bir faz PWM sinyali ile sürülürken diğer iki faz HIGH/LOW seviyelerine ayarlanmakta ve bu döngü sürekli olarak altı adımda tamamlanmaktadır. Bu sayede motor sargılarında sıralı bir akım akışı sağlanmakta ve rotor sürekli döndürülmektedir. MOSFET'lerin anahtarlama hızı, dikkat edilen en önemli nokta, aynı fazın üst ve alt tarafındaki MOSFET'lerin aynı anda iletme geçmemesidir. Bu duruma “çapraz iletim” (shoot-through) denir ve devre elemanlarının zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle IR2101 entegresi, uygun ölü zaman (dead-time) oluşturarak iki MOSFET arasında güvenli bir geçiş sağlamaktadır. Simülasyon ortamında MOSFET'lerin açılma ve kapanma durumları, IR2101 çıkış uçları (HO- high output ve LO- low output) üzerinden izlenebilmekte ve PWM zamanlaması osiloskop yardımıyla doğrulanabilmektedir. Böylece fazlar arasındaki akım yönü ve motorun dönüş yönü gözlemlenebilir hâle gelmiştir. Şekil 2’de tek faz MOSFET bağlantı şeması paylaşılmıştır.

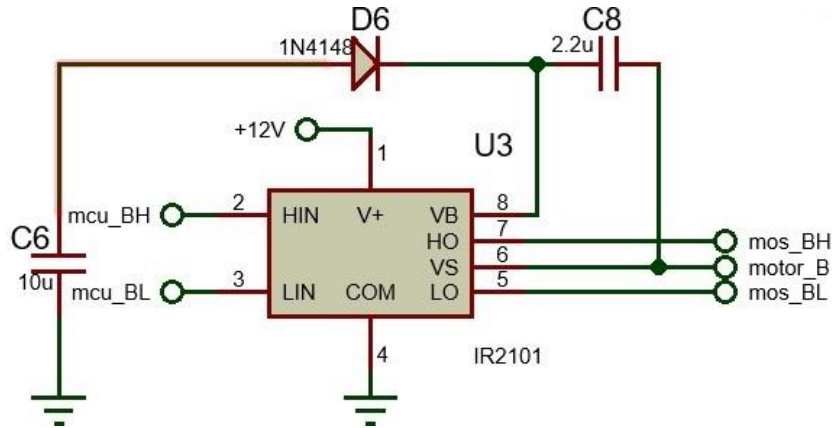


Şekil 3: Tek Faz MOSFET Bağlantısı

3.3 MOSFET Sürücü Kullanımı ve IR2101 Entegresinin Çalışma Prensibi

BLDC motor sürücü sistemlerinde, MOSFET'lerin hızlı ve güvenli bir şekilde anahtarlanabilmesi için doğrudan mikrodenetleyici bağlantısı yeterli değildir. Mikrodenetleyiciler genellikle düşük akım sağlayabildikleri için yüksek kapasiteli MOSFET kapılarının doğrudan sürülmesinde yetersiz kalır. Ayrıca, üç fazlı sistemlerde üst (high-side) MOSFET'lerin kapı gerilimi, motor faz gerilimine göre dinamik olarak değiştiğinden, bu gerilimi güvenli şekilde uygulayacak bir ara katmana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür durumlarda MOSFET sürücü entegreleri devreye girer.

Bu çalışmada IR2101 yarım köprü sürücü entegresi kullanılarak hem alt (low-side) hem de üst (high-side) MOSFET'ler sürülmüştür. IR2101, iç yapısında yer alan bootstrap devresi ile yüksek taraf MOSFET'in kapı gerilimini dinamik olarak oluşturur. Böylece hem düşük hem de yüksek taraf MOSFET'ler doğru zamanlamayla sürülebilir. Entegre, input pinlerinden aldığı PWM sinyaline göre HO ve LO uçlarından çıkış vererek MOSFET kapılarını kontrol eder.



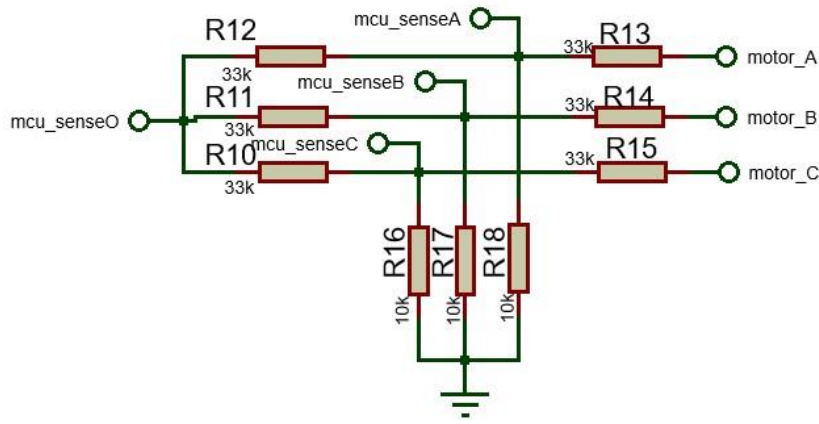
Şekil 4: Tek Faz için MOSFET Sürücü Entegresi

Proteus simülasyon devresinde her faz için bir IR2101 entegresi kullanılmıştır. Toplam üç adet IR2101 entegresiyle üç fazın tamamı sürülmüş, giriş PWM sinyalleri Arduino üzerinden sağlanmıştır. Bu yapı sayesinde MOSFET'lerin güvenli bir şekilde açılıp kapanması ve motorun düzgün komütasyonu sağlanmıştır. Şekil 3'te IR2101 ile tek faz MOSFET sürücü entegre bağlantı şeması verilmiştir.

3.4 Sensörsüz Geri Besleme: Ters Elektromotor Kuvveti Algılaması

BLDC motorlarda, rotor pozisyonunun doğru belirlenmesi komütasyon sırasının sağlıklı yürütülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Sensörsüz kontrol yöntemlerinde, bu bilgi harici hall sensörleri yerine motor fazlarından elde edilen ters elektromotor kuvveti (Back-EMF, BEMF) sinyalleri üzerinden çıkarılır [10]. Bu yöntem, sistem maliyetini düşürmenin yanı sıra fiziksel sensör arızalarının da önüne geçer.

BEMF temelli sürücü sistemlerinde, her komütasyon adımında bir faz sürülmez ve bu boşta kalan fazdan alınan BEMF sinyali analog karşılaştırıcı veya ADC (analog-dijital çevirici) aracılığıyla izlenir. Sıfır geçiş anı (zero crossing) tespit edildiğinde, rotorun manyetik alan yapısından dolayı bu sinyalin sıfıra yaklaşması bir sonraki komütasyonun zamanlamasını belirler. Simülasyonda, boşta kalan fazın gerilimi gerilim bölücü dirençler aracılığıyla Arduino'nun analog girişine uygulanmıştır. Bu sinyal program içinde dijital olarak yorumlanarak sıfır geçiş anında komütasyon adımı ilerletilmiştir. Şekil 4'te Back-EMF bağlantı şeması paylaşılmıştır.



Şekil 5: Back-EMF Bağlantı Şeması

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (1)$$

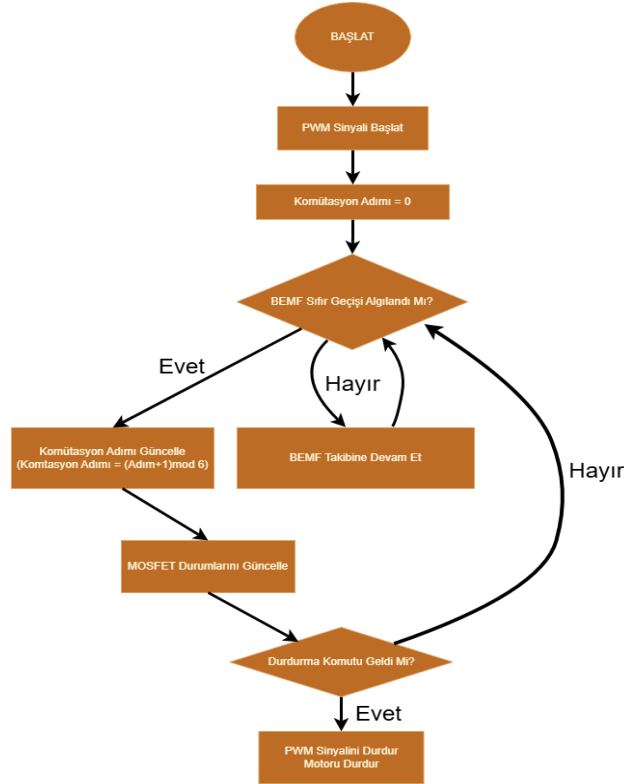
- $e(t)$: Zamanla değişen BEMF gerilimi (V)
- K_e : BEMF sabiti (V·s/rad veya V/rpm)
- $\omega(t)$: Rotorun açısal hızı (rad/s)

Denklem (1), ters elektromotor kuvveti (BEMF) ile rotorun açısal hızı (ω) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, rotor ne kadar hızlı dönerse, stator sargılarında indüklenen BEMF gerilimi de o oranda artış gösterir. Bu ilişki, sabit mıknatıs alanına ve sargı yapısına sahip BLDC motorlarda, rotor hızı ile indüklenen gerilim arasındaki bağıntının temelini oluşturur. Bu nedenle, BEMF sinyalleri rotorun anlık pozisyonu hakkında dolaylı bilgi vermekte olup, sensörsüz komütasyon algoritmalarında rotor konumunun ve dönüş hızının tahmini için etkin bir geri besleme kaynağı olarak kullanılmaktadır.

3.5 Kontrol Akış Diyagramı

BLDC motorun sensörsüz kontrolü, sistemin başlatılması, PWM üretimi, BEMF sinyallerinin sıfır geçişlerinin algılanması ve bu geçişlere göre komütasyon adımının güncellenmesi gibi yazılım adımlarıyla gerçekleştirilir; Şekil 5'teki akış diyagramı, mikrodenetleyici yazılımının karar yapısını ve komütasyon adımlarının hangi koşullarda değiştiğini özetlemekte olup, bu akışın simülasyon ortamında

doğru modellenmesi, gerçek zamanlı kontrol mantığının doğruluğunu test etmek açısından önemlidir.

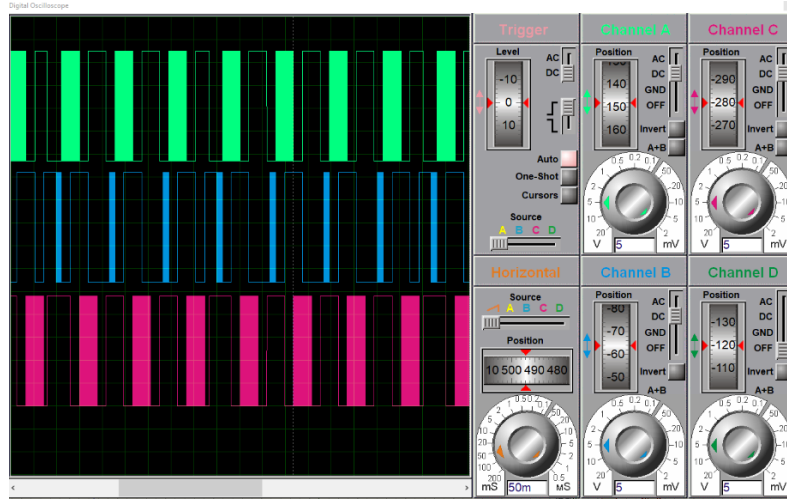


Şekil 6: Kontrol Akış Şeması

4 Bulgular ve Tartışma

4.1 Mikroişlemciden MOSFET Sürücülere Gelen PWM Sinyalleri

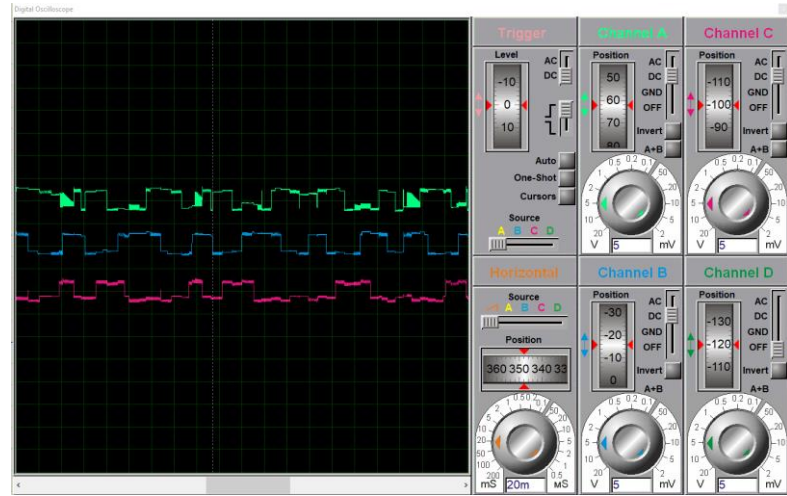
Şekil 6’da IR2101 entegresinin HIN (High-side Input) pinine uygulanan PWM sinyalinin osiloskop görüntüsü gözükmemektedir. Bu sinyal, ESC yazılımı tarafından Atmega328P mikrodenetleyicisi kullanılarak üretilmiş olup, IR2101’in üst MOSFET’i sürmesi amacıyla HO çıkışını tetikler. PWM sinyali yaklaşık 16 kHz frekansta olup, darbe genişliği motor hızını belirleyen temel parametredir. Bu sinyalin düzgün, kayıpsız ve sabit frekansta olması ESC’nin kararlı çalışması açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 7: MOSFET Sürücüye Gelen PWM Sinyalleri

4.2 BEMF Sinyalleri

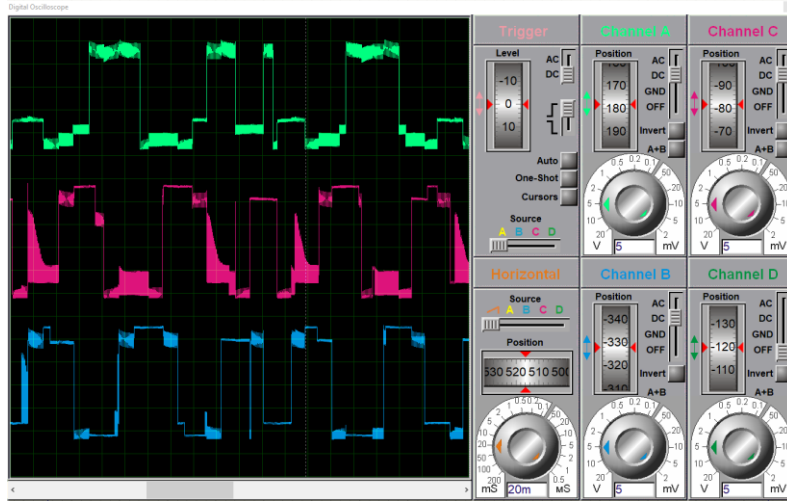
Şekil 7’de BLDC motorun üç fazından alınan BEMF sinyallerinin, gerilim bölücü devre sonrası mikroydenetleyiciye iletilen noktalarından (mcu_senseA/B/C) ölçülen osiloskop görünümü gösterilmiştir. Her faz için 33k Ω –10k Ω dirençlerden oluşan gerilim bölücü devresi aracılığıyla alınan sinyaller, motorun dönüşü sırasında ortaya çıkan faz gerilimlerini temsil etmektedir. Bu sinyallerin sıfır geçiş anları, sensörsüz komütasyon algoritmasında faz geçiş zamanlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Sinyaller, Atmega328P mikroydenetleyicisinin analog karşılaştırıcı girişlerine bağlanarak gerçek zamanlı işlenmiştir.



Şekil 8: BEMF Sinyalleri

4.3 Motor Faz Sinyalleri

Şekil 8’de BLDC motorun üç faz çıkışındaki gerilimlerin zamanla değişimi (motor_A, motor_B, motor_C) paylaşılmıştır. Bu osiloskop görüntüsünde, ESC tarafından uygulanan 6-step trapezoidal komütasyon algoritmasına uygun olarak her bir motor fazına sırasıyla gerilim uygulandığı görülmektedir. Sinyaller arasında yaklaşık 120° elektriksel faz farkı bulunmakta olup, bu durum ESC sisteminin doğru sırayla fazları sürerek rotor hareketini sağladığını göstermektedir. Fazlara uygulanan gerilimler, IRFZ14 MOSFET’lerinin anahtarlanması ile gerçekleştirilmiş ve PWM modülasyonu ile darbeli bir yapı kazanmıştır. Görselde, her faz için gerilim profili belirgin biçimde ayrılmış olup, sistemin simetrik ve dengeli çalıştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 9: Motor Faz Sinyalleri

Bu çalışmada, sensörsüz komütasyon yöntemiyle çalışan bir BLDC motor sürücüsü Proteus ortamında simüle edilmiştir. Sistem, Atmega328P mikrodeneleyicisiyle üretilen PWM sinyallerinin IR2101 entegresi aracılığıyla üç fazlı MOSFET devresine iletilmesiyle çalışmaktadır. Motorun yönü ve hızı, fazlardan alınan BEMF sinyalleriyle belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, motor doğru komütasyon sırasıyla çalışmış, PWM sinyalleri kararlı şekilde iletilmiş ve BEMF sinyallerinin sıfır geçişleri başarılı biçimde algılanmıştır. Faz gerilimlerinin 120° faz farkıyla sıralandığı ve motorun düzgün döndüğü gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar, geliştirilen sistemin temel işlevlerini doğru şekilde yerine getirdiğini ve sensörsüz kontrolün etkili bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir. Ayrıca simülasyon, donanım aşamasına geçmeden önce sistemin doğrulanması açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmiştir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, sensörsüz komütasyon yöntemine dayalı bir BLDC motor sürücü sistemi Proteus simülasyon ortamında geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. Atmega328P mikrodeneleyicisi, IR2101 MOSFET sürücü entegresi ve IRFZ14 MOSFET'lerinden oluşan yapıda; PWM üretimi, faz anahtarlama ve BEMF sinyallerine dayalı geri besleme algoritması başarıyla uygulanmıştır. Simülasyon bulguları, motorun doğru faz sıralamasıyla kararlı şekilde döndüğünü, PWM sinyallerinin düzenli üretildiğini ve sıfır geçiş tespitinin başarılı biçimde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Elde edilen veriler, düşük maliyetli bileşenlerle sensörsüz BLDC motor kontrolünün etkin bir biçimde gerçekleştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Proteus tabanlı simülasyon süreci, donanım üretimine geçmeden önce algoritmaların doğrulanması açısından önemli bir test ortamı sunmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre PWM sinyallerinde yaklaşık %50 duty cycle elde edilmiş, sinyallerin frekansı 20 kHz olarak ayarlanmıştır. Motorun simülasyon ortamında 1200–1500 rpm aralığında çalıştığı ve bu devirlerde BEMF sinyallerinin yeterli genlikte algılanabildiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, düşük maliyetli bileşenlerle gerçekleştirilen sensörsüz sürücü sisteminin hem yazılım hem donanım yönüyle etkin bir performans sergilediği söylenebilmektedir.

Simülasyon çıktıları, sistemin farklı açılardan etkinliğini ortaya koymaktadır. Üretilen PWM sinyallerinin frekansı yaklaşık 20 kHz olarak belirlenmiş ve %50 duty cycle değerinde kararlı biçimde üretildiği gözlemlenmiştir. Bu frekans seviyesi, hem motor sürücü devresinde anahtarlama kayıplarını minimize etmekte hem de MOSFET'lerin ısınmasını kontrol altında tutmaktadır. PWM sinyalleri IR2101 sürücü entegresi aracılığıyla üç fazlı çıkışlara aktarılmış, böylece motorun tork üretimi dengeli şekilde sağlanmıştır. BLDC motorun çalıştığı devir aralığı, simülasyon sırasında 500 ila 600 rpm arasında değişmektedir. Bu aralık, sistemin sensörsüz olarak orta hız bölgesinde istikrarlı

çalışabileceğini göstermektedir. Bu hız aralığında BEMF (Back Electromotive Force) sinyalleri her fazda net şekilde algılanabilmiş ve sıfır geçiş noktaları başarılı şekilde tespit edilmiştir. Sıfır geçiş tespiti algoritması, her bir fazın gerilim sinyalinin referans (yarım DC besleme) ile karşılaştırılması esasına dayalıdır ve komütasyonun doğru zamanlamayla yapılmasına olanak sağlamıştır. Çalışmanın bir diğer önemli çıktısı, geliştirilen algoritmanın gerçek zamanlı sistemler için potansiyel taşımasıdır. Yazılım yapısının modüler olarak geliştirilmesi sayesinde, PWM üretimi, sıfır geçiş tespiti ve faz kontrolü ayrı bloklar halinde test edilmiştir. Bu yaklaşım, algoritmanın donanım ortamına aktarılmadan önce esnek biçimde denenebilmesine olanak tanımıştır. Proteus tabanlı simülasyon ortamı, fiziksel devre üretimi öncesinde önemli bir ön test imkânı sunmuş ve hata payını azaltmıştır. İlerleyen çalışmalarda sistemin gerçek donanım üzerinde test edilmesi, algoritmanın saha koşullarındaki kararlılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle düşük devirlerde BEMF sinyallerinin genliklerinin zayıflaması, analog karşılaştırıcılarla yapılan sıfır geçiş tespitinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, ADC (Analog-to-Digital Converter) tabanlı dijital sinyal işleme tekniklerinin entegre edilmesi, düşük hızlarda daha doğru geri besleme alınmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, literatürde etkinliği kanıtlanmış ileri düzey sensörsüz tekniklerden biri olan yüksek frekans enjeksiyonu (High Frequency Injection) yöntemi gibi alternatif yaklaşımların değerlendirilmesi, düşük hız performansını artırma açısından faydalı olacaktır.

Sistemin mevcut hali açık çevrim modda çalışmaktadır. Bu durum, motor hız ve akımındaki olası değişimlerin sürücü tarafından telafi edilememesine neden olabilir. Bu nedenle ileride kapalı çevrim kontrol (closed-loop control) tekniklerinin, özellikle PI veya adaptif kontrolcü tabanlı yaklaşımların entegrasyonu ile daha kararlı ve hassas bir motor kontrolü sağlanması mümkün olacaktır. Ek olarak, sistemin uzun süreli çalışma performansının değerlendirilmesi amacıyla MOSFET'lerin ve sürücü elemanlarının termal davranışı incelenmeli; uygun soğutma çözümleri entegre edilmelidir.

İlerleyen çalışmalarda sistemin gerçek donanım üzerinde test edilmesi, yazılımın sahadaki kararlılığını değerlendirmek açısından önem arz etmektedir. Özellikle düşük hızlarda zayıflayan BEMF sinyallerinin güvenilir biçimde algılanabilmesi için analog karşılaştırıcı yerine ADC tabanlı dijital işleme yöntemleri tercih edilebilir. Sistem, kapalı çevrim hız veya akım geri besleme kontrolü ile geliştirilebilir; bu sayede daha hassas ve adaptif bir motor kontrolü sağlanabilir. Ayrıca, düşük hız performansını artırmak amacıyla ileri düzey sensörsüz sürüş tekniklerinin (örneğin yüksek frekans enjeksiyonu) entegrasyonu değerlendirilebilir. Son olarak, sürücü bileşenlerinin termal performansı ve uzun süreli çalışma koşullarındaki davranışı da gelecekteki uygulamalarda dikkate alınmalıdır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen ESC sistemi, hem yazılım hem donanım açısından güçlü bir temel sunmakta ve gelecekteki gerçek zamanlı motor kontrol uygulamaları için uygulanabilir bir altyapı oluşturmaktadır.

6 Beyanname

6.1 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

6.2 Yazarların Katkıları

Sorumlu Yazar Adı SOYADI: Mahmut Esat ÇULFAZ

Araştırma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, tasarım süreçleri, makale yazımı.

2. Yazar Adı SOYADI: Mücahit SOYASLAN

Araştırma fikrinin oluşturulması, literatür incelemesi, tasarım süreçleri, makale yazımı.

Kaynakça

- [1] A. S. Al-Adsani, M. E. AlSharidah, and O. Beik, "BLDC motor drives: a single hall sensor method and a 160° commutation strategy," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 3, pp. 2025–2035, Sep. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3046183.
- [2] S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen, and K. Stockman, "A quantitative comparison between bldc, pmsm, brushed dc and stepping motor technologies," in *19th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. (ICEMS)*, Nov. 2016, pp. 1-5. [Online].
- [3] D. Mohanraj et al., "A review of bldc motor: state of art, advanced control techniques, and applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833–54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [4] B. Banu Rekha, B. Somasundaram, L. Ashok Kumar, and P. Balekai, "A technical review on advantages of using ec bldc fans in factory and commercial buildings," *Energy Eng.*, vol. 115, no. 3, pp. 57–74, May 2018, doi: 10.1080/01998595.2018.12002418.
- [5] K. FATHONI and A. B. UTOMO, "Perancangan kendali optimal pada motor arus searah tanpa sikat melalui metode lqri," (in Indonesia), *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 7, no. 2, p. 377, May 2019, doi: 10.26760/elkomika.v7i2.377.
- [6] M. Soyaslan, "External Rotor BLDC Motor Design for a Light Electric Vehicle: 24 Slot/22 Pole Combination," in *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202463.
- [7] A. Mukherjee, S. Ray, and A. Das, "Development of Microcontroller Based Speed Control Scheme of BLDC Motor Using Proteus VSM Software," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, pp. 1–7, 2014, doi: 10.12720/ijeee.2.1.1-7.
- [8] Yan, G. (2009). *Fırçasız Doğru Akım Motor Analizi ve Sürücü Devre Tasarımı* (Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). İstanbul.
- [9] İmren, B. (2022). *Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüsünün Simülasyonu, Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi* (Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). İstanbul.
- [10] Aydoğdu, Ömer, and Mert Bayer. "PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı." *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya* (2008).



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)