

BLDC Motorlarının Matematiksel Modellemesi, Matlab/Simulink Ortamında Simülasyonu ve Gerilim Düşümü Altında Dinamik Performans Analizi

Mathematical Modeling Of BLDC Motors, Simulation In Matlab/Simulink Environment, And Dynamic Performance Analysis Under Voltage Sag Conditions

Uğur Kızıldağ¹ , Metin Salih Muhsin^{1*} 

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, üç fazlı fırçasız doğru akım (BLDC) motorunun elektriksel ve mekanik dinamikleri matematiksel olarak modellenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında başarıyla simüle edilmiştir. Model üzerinde altı adım komütasyon tekniği uygulanarak, hem nominal çalışma gerilimi (24V) hem de düşük gerilim senaryoları (22V, 20V, 18V) altında motor performansı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, giriş geriliminin azalmasına bağlı olarak motor hızında düşüş, tork karakteristiğinde zayıflama ve kararlı duruma ulaşma süresinde uzama olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle düşük gerilim koşullarında sistemin dinamik tepkisinin azaldığı ve kararlılığın geciktiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda çalışma, BLDC motorların farklı gerilim seviyeleri altındaki davranışlarını sistematik biçimde inceleyerek, sürücü tasarımlarında performans optimizasyonu ve güvenilirlik artırımı açısından önemli veriler sunmaktadır.

Abstract

In this study, the electrical and mechanical dynamics of a three-phase Brushless DC (BLDC) motor were mathematically modeled and successfully simulated in the MATLAB/Simulink environment. By applying the six-step commutation technique to the developed model, performance analyses were conducted under both nominal operating voltage (24 V) and undervoltage scenarios (22 V, 20 V, and 18 V). The simulation results revealed that a decrease in the input voltage led to reductions in motor speed, a weakening of the torque response, and an increase in the settling time. Particularly under low-voltage conditions, it was observed that the dynamic response of the system deteriorated and the motor reached steady-state more slowly. Accordingly, this study offers valuable insights into the behavior of BLDC motors under varying input voltage levels and provides original data to support performance optimization and reliability enhancement in motor drive design.

Anahtar Kelimeler: BLDC motor, gerilim düşümü, Motor modelleme, MATLAB/Simulink

Keywords: BLDC motor, voltage sag, Motor modeling, MATLAB/Simulink

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): msalihmuhsin@ksu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received):07.05.2025, Kabul Tarihi (Accepted): 03.09.2025

1. Giriş

Endüstriyel otomasyon, tıp, havacılık ve elektrikli araçlar gibi pek çok alanda BLDC motorlarının kullanımı hızla artmaktadır [1]. BLDC motorlar, geleneksel fırçalı DC motorlara kıyasla daha uzun ömür, daha az bakım gereksinimi ve yüksek verimlilik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Mekanik komütasyon yerine elektronik komütasyon kullanılması, kıvılcım ve sürtünmeden kaynaklı problemleri ortadan kaldırmakta ve böylece bu motorların güvenilirliğini arttırmaktadır.

Yapısal olarak, BLDC motorların stator kısmında sargılar, rotor kısmında ise kalıcı mıknatıslar bulunmaktadır. Motorun çalışması sırasında rotor konumu genellikle Hall etkili sensörler yardımıyla algılanmakta ve bu bilgi, sürücü devresi tarafından motorun doğru zaman aralıklarında sürülmesi için kullanılmaktadır [2].

Motorlarda performansın belirleyici faktörlerinden biri üretilen torkun karakteristiğidir. BLDC motorlar trapezoidal zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK) üretir ve torkun dengeli olması, stator faz akımları ile zıt-EMK dalga formunun uyumuna bağlıdır. Yapılan çalışmalarda, trapezoidal ve sinüzoidal EMK modelleri karşılaştırılmış ve özellikle trapezoidal EMK ile oluşturulan DC tipi akım uygulamasının teorik olarak daha sabit tork elde edilmesini sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca bu modelde akım dalgalanmaları ve tork salınımlarının minimize edildiği, doğru akım profiliyle Simulink ortamında gerçekleştirilen analizlerle doğrulanmıştır. Böylece ideal trapezoidal EMK ile uyumlu bir akım şekli kullanılarak, motor torkundaki dalgalanmalar önemli ölçüde azaltılabilmektedir [3-5]

BLDC motorların analiz edilmesi ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için MATLAB/Simulink gibi simülasyon ortamları yoğun şekilde kullanılmaktadır [4]. Simülasyon modellerinde, motorun elektriksel dinamikleri ve mekanik dinamikleri bir bütün olarak ele alınmaktadır. Faz gerilimleri, akımları ve rotor pozisyonuna dayalı zıt-EMK değerleri kullanılarak oluşturulan matematiksel denklemler bilgisayara aktararak motorun performansını etkileyen parametrelerin görsel olarak grafik ortamlarda görüntülenmesine olanak sağlanmaktadır [6]. Ayrıca, söz konusu model ile motorun farklı çalışma koşullarında elde edilen faz akımı ve gerilim eğrileri detaylı şekilde analiz edilerek, rotor hızına bağlı dinamik davranışlar Simulink ortamında başarıyla doğrulanmıştır [7]

Kontrol uygulamalarında ise, motor hızının hassas ve kararlı bir şekilde kontrol edilebilmesi amacıyla PWM tabanlı sürücü devreleri ve PI (Proportional-Integral) kontrolörler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kontrol teknikleri, motorun referans hız değerine hızlı bir şekilde ulaşmasını ve çalışma esnasında kararlı performans sergilemesini sağlamaktadır [8]. BLDC motorlara ait kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve doğrulanması süreçlerinde, MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modeller sayesinde Model Tabanlı Tasarım (MBD) yaklaşımı etkin biçimde uygulanmakta; bu yöntem, motorun dinamik davranışlarının daha erken aşamalarda test edilmesini ve kontrol algoritmalarının HIL (Hardware-in-the-Loop) gibi gerçek zamanlı platformlara kolayca aktarılmasını mümkün kılmaktadır [9]

Son yıllarda, gerçek uygulamalarda motor verimliliğini artırmak ve sistem performansını optimize etmek amacıyla ileri düzey sürücü devreleri ve güç elektroniği çözümleri geliştirilmektedir. Özellikle güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan beslenen BLDC motor sistemleri üzerine yapılan çalışmalar hem enerji verimliliğini artırmakta hem de çevre dostu teknolojilerin gelişimine katkı sağlamaktadır [10].

Daha önceki çalışmalarımızda, sinüzoidal PWM (SPWM) ve uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) tekniklerinin teorik temelleri ile bu yöntemlerin BLDC motorlar üzerindeki performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmalar, kontrol algoritmalarının doğruluk, verimlilik ve tork dalgalanmaları açısından değerlendirilmesine olanak sağlamıştır [11].

Bu çalışmanın özgün katkısı, 24V besleme gerilimine sahip bir BLDC motorun gerçek parametrelerine dayalı matematiksel modellerinin oluşturulması ve bu modellerin düşük gerilim senaryolarında motorun dinamik performansına etkilerini teorik olarak analiz edecek şekilde yapılandırılmasıdır. Geliştirilen

model, altı adım komütasyon algoritmasıyla entegre edilmiş ve MATLAB/Simulink ortamında sistematik şekilde test edilmiştir. Farklı gerilim seviyelerinde oluşan hız, tork ve geçici rejim değişimleri, sayısal verilerle değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

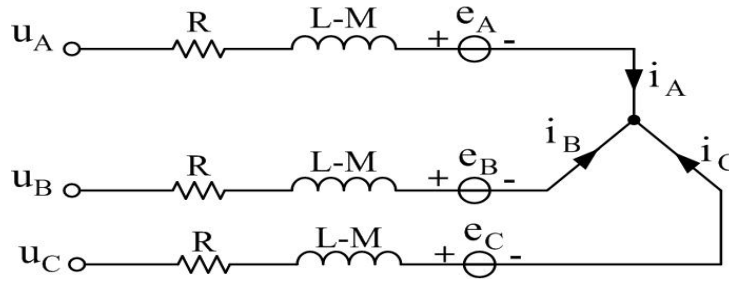
2.1. BLDC Motorlarının Matematiksel Modeli

BLDC motor, fırçasız dc motor olarak adlandırılan ve trapezoidal zıt-EMK 'ya sahip bir kalıcı mıknatıslı DC motordur. AC motorlardaki gibi statorlarında 3 fazlı sargılar bulunmakta ve eviriciler kullanılarak sürüşleri gerçekleştirilmektedir. Sürüş esnasında BLDC motorun iki fazı aynı anda etkinleştirilirken, üçüncü faz açıkta (boşta) kalır. Eviricinin (inverter) anahtarlama algoritması için rotorun konumu, statora etrafına 120 derece aralıklarla yerleştirilmiş üç adet Hall etkili sensör tarafından tespit edilmektedir [12].

Bu çalışmada fırçasız DC motorun modellenmesi sırasında aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Statorun bağlantı şeklinin Y bağlantılı olduğu kabul edilir.
- Her fazın direnci eşittir.
- Eviricinin anahtarlama elemanlarının ideal olduğu varsayılır.
- Demir kayıpları, girdap akımı kayıpları ve histerezis kayıpları ihmal edilir [7].

Bu kabullenmeler ışığında üç fazlı bir BLDC motorun yıldız bağlı eşdeğer devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 3 Fazlı BLDC motorun eşdeğer devresi

Şekil 1 'deki devrede:

U_A : A fazına uygulanan giriş gerilimi (V)

U_B : B fazına uygulanan giriş gerilimi (V)

U_C : C fazına uygulanan giriş gerilimi (V)

R: Faz başı sargı direnci (Ohm)

L: Faz başı sargı endüktansı (self endüktans) (H)

M: Fazlar arası endüktans (ortak endüktans) (H)

e_a : A fazı zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK, V)

e_b : B fazı zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK, V)

e_c : C fazı zıt elektromotor kuvveti (zıt-EMK, V)

i_a : A fazı anlık akımı (A)

i_b : B fazı anlık akımı (A)

i_c : C fazı anlık akımı (A)

Üç fazlı bir BLDC motorun faz gerilimleri aşağıdaki diferansiyel denklemlerle ifade edilir:

$$U_a = R i_a + (L-M) \frac{d i_a}{d t} + e_a \quad (1)$$

$$U_b = R i_b + (L-M) \frac{d i_b}{d t} + e_b \quad (2)$$

$$U_c = R i_c + (L-M) \frac{d i_c}{d t} + e_c \quad (3)$$

Herhangi bir anda üç fazdan ikisi beraber aktif durumda olduğundan:

$$U_{ab}=U_a-U_b \quad (4)$$

$$U_{ab}= R(ia - ib) + (L - M) \frac{d(ia-ib)}{dt} + e_a-e_b \quad (5)$$

$$U_{bc}=U_b-U_c \quad (6)$$

$$U_{bc}= R(ib - ic) + (L - M) \frac{d(ib-ic)}{dt} + e_b-e_c \quad (7)$$

$$U_{ca}=U_c-U_a \quad (8)$$

$$U_{ca}= R(ic - ia) + (L - M) \frac{d(ic-ia)}{dt} + e_c-e_a \quad (9)$$

Newton'un ikinci hareket yasasına göre, elektromanyetik tork T_e ile motor hızı ω_m arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (11)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

Zıt-EMK aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$e_a = \frac{ke}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (13)$$

$$e_b = \frac{ke}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (14)$$

$$e_c = \frac{ke}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (15)$$

Motorun ürettiği elektromanyetik tork (T_e), faz akımları ve zıt-EMK ile ilişkilidir:

$$T_a = \frac{kt}{2} ia F(\theta_e) \quad (16)$$

$$T_b = \frac{kt}{2} ib F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (17)$$

$$T_c = \frac{kt}{2} ic F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (18)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (19)$$

$$T_e = \frac{kt}{2} [ia F(\theta_e) + ib F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + ic F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)] \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki ke ve kt zıt-EMK ve tork sabitleridir.

Elektriksel açı θ_e , motorun mekanik açısının θ_m kutup çiftleri sayısı (p) ile çarpılmasıyla elde edilir:

$$\theta_e = \frac{p}{2} Qm \quad (21)$$

$F(\theta_e)$ fonksiyonu, rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur ve zıt-EMK'nin trapezoidal dalga formunu belirler. Bu fonksiyonun bir periyodu şu şekilde ifade edilebilir:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 < Qe < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \frac{2\pi}{3} < \theta_e < \pi \\ -1 & \pi < \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1 + \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \frac{5\pi}{3} < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (22)$$

BLDC motor modelinin diferansiyel denklemler kullanılarak oluşturulmasının ardından geliştirilen model, MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Faz gerilimleri, akımlar ve zıt-EMK değerleri ayrı ayrı modellenmiş; sistemin genel dinamik davranışı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Simülasyon sürecinde kullanılan parametreler, üretici firmanın sağladığı gerçek motor verilerine dayanmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçları, motorun hız-tork karakteristiğini ve geçici durum tepkisini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir.

2.2. MATLAB/Simulink ile Simülasyon Modeli

Simülasyon sürecinde özellikle uygulanan DC giriş geriliminin motor performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Motorun 24V nominal gerilim değeri esas alınmakla birlikte, 18V, 20V ve 22V gibi daha düşük voltaj seviyeleri de modele uygulanarak, seçilen çıkış değişkenleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu gerilim dalgalanmalarının; motorun kararlı hale gelme süresi, maksimum hız değeri, çıkış torku ve faz akımlarındaki tepe-genlik ilişkileri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Böylece, besleme gerilimi kaynaklı değişimlerin sistemin dinamik performansını nasıl etkilediği ortaya konmuştur.

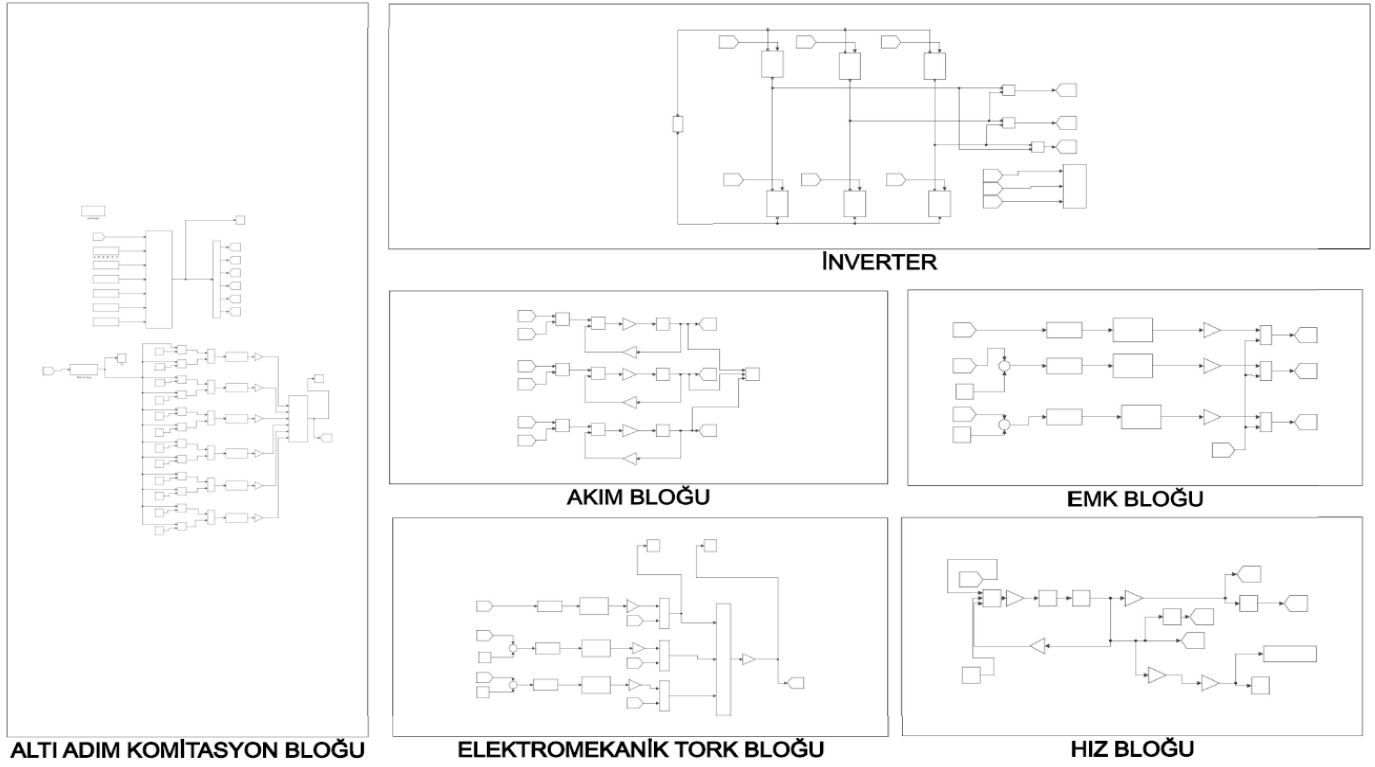
Bu çalışmada kullanılan BLDC motor, Microchip 'in DMA0204024B101 model numaralı 24V 3-Faz BLDC Motoru olup, motor parametreleri aşağıdaki gibidir [13]:

- Fazlar Arası Direnç (R_{tm}): 0.57 Ω
- Elektriksel Zaman Sabiti (t_e): 1.123 ms
- Fazlar Arası Endüktans (L_{tm}) @ 1 kHz: 0.64 mH
- Mekanik Zaman Sabiti (t_m): 2.882 ms
- Tork Sabiti (K_t): 8.38 oz.in./Amp
- Termal Direnç (R_{th}): 21.5 $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$
- Gerilim Sabiti (K_e): 6.2 $V_{\text{peak}}/\text{KRPM}$
- Termal Zaman Sabiti (t_{th}): min.
- Rotor Atalet Momentu (J_r): 0.00251 oz-in-s²
- Yığın Uzunluğu: 3.00 inç

Motor, 12 oluklu Y- bağlantılı bir yapıya sahiptir ve 10 kutupludur. Bu motorun yüksek performansı ve düşük kayıplarla çalışması, özellikle endüstriyel otomasyon ve elektrikli araç uygulamalarında tercih edilmesini sağlamaktadır [14]. Altı adım komütasyon yöntemi kullanılarak motor sürülmüştür. Rotorun her 60°'lik elektriksel dönüşü sonrası faz kombinasyonları değiştirilerek tork üretimi sağlanmıştır.

2.2.1 Adım Komütasyon ile Tasarlan BLDC Motorun Matematiksel Modelinin Genel Blok Şeması

Şekil'2 de sunulan sistem blok diyagramı, fırçasız doğru akım motorunun (BLDC) altı adım komütasyonuna dayalı modellenmiş bir kontrol yapısını kapsamaktadır. Diyagramda, motorun çalışmasını belirleyen temel alt bileşenler ayrı ayrı bloklar halinde sunulmuştur. **Altı adım komütasyon bloğu**, rotorun elektriksel konumuna göre doğru sektörü belirleyerek inverter sürücüyü lojik geçiş sinyallerini üretir. **İnverter bloğu**, bu sinyalleri kullanarak üç fazlı çıkış gerilimlerini oluşturur. **Akım bloğu**, faz akımlarının hesaplanmasını sağlarken, **EMK bloğu** motorun fazlarına ait geri elektromotor kuvvetini (EMK) üretir. **Elektromekanik tork bloğu**, EMK ve akım verilerine dayanarak motorun ürettiği momenti hesaplar. **Hız bloğu** ise sistemin dinamik yanıtını simüle ederek, rotorun dönme hızının zamanla nasıl değiştiğini belirler. Bu genel yapıya ait her bir alt blok, makale içerisinde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

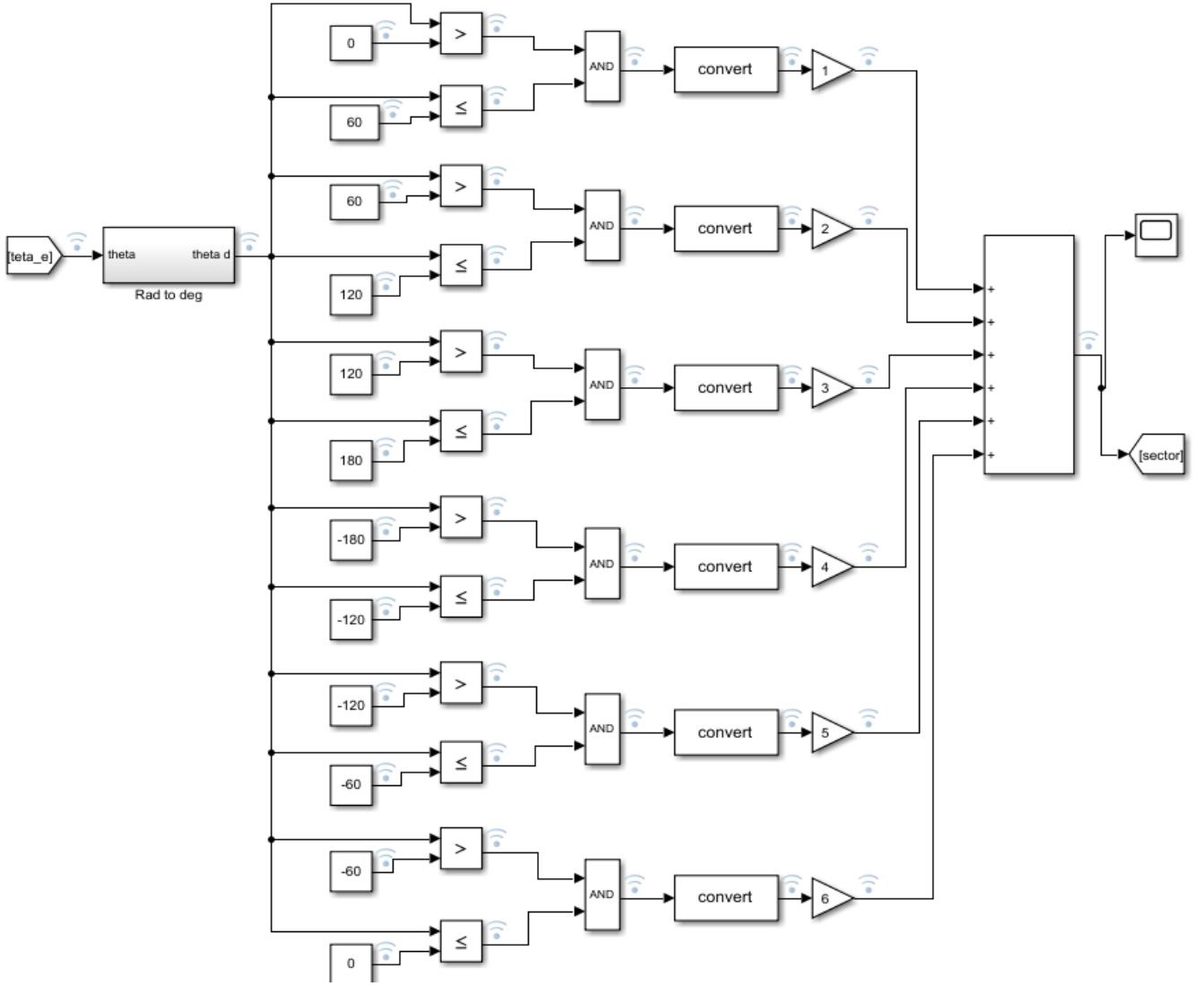


Şekil 2. BLDC motorun matematiksel modellenmesinin genel blok şeması

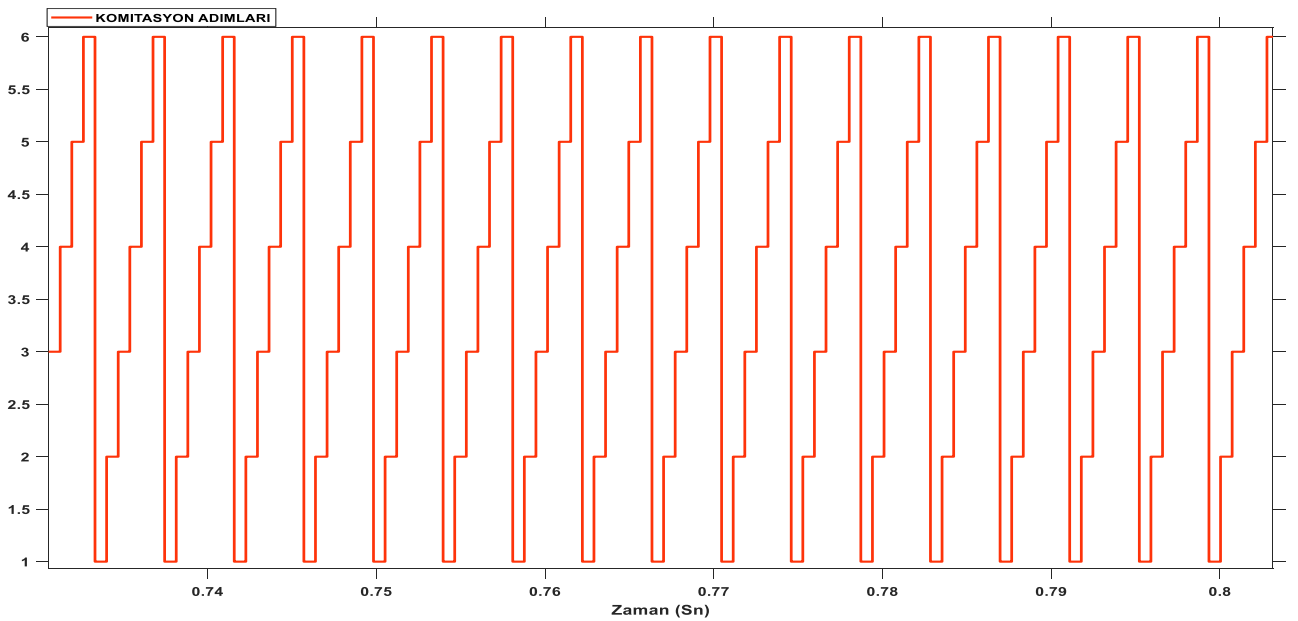
2.2.2 Altı Adım Komütasyon Bloğunun Modellenmesi:

Şekil 3’de Matlab Simulink programında tasarlan blok diyagram, fırçasız doğru akım motorlarının (BLDC) 6 adım komütasyonuna dayalı kontrol algoritmasında kullanılan sektör tespiti yapısını göstermektedir. Bu yapı, rotorun elektriksel konumunu (θ_e) derece cinsine çevirerek -180° ile $+180^\circ$ aralığında altı eşit sektöre böler ve her bir sektör için karşılaştırma işlemleriyle mantıksal ifadeler üretir. Bu mantıksal işlemler sonucunda belirli bir anlık rotor konumuna karşılık gelen sektör tespit edilerek, uygun sektör numarası (1–6 arası) çıkışa verilir.

Şekil 4 altı adım komütasyon çıkış grafiğinde, sektör numarasının periyodik olarak 1’den 6’ya doğru ilerlediği ve döngüsel olarak tekrarlandığı görülmektedir. Bu, rotorun sabit hızda döndüğünü ve komütasyonun 60° elektriksel aralıklarla düzenli biçimde gerçekleştiğini göstermektedir. Elde edilen şekil, altı adımlı komütasyonun karakteristik zaman-faz ilerleyişini temsil etmekte olup, sürücü devresinin doğru şekilde sektör geçişlerini gerçekleştirdiğini kanıtlamaktadır.

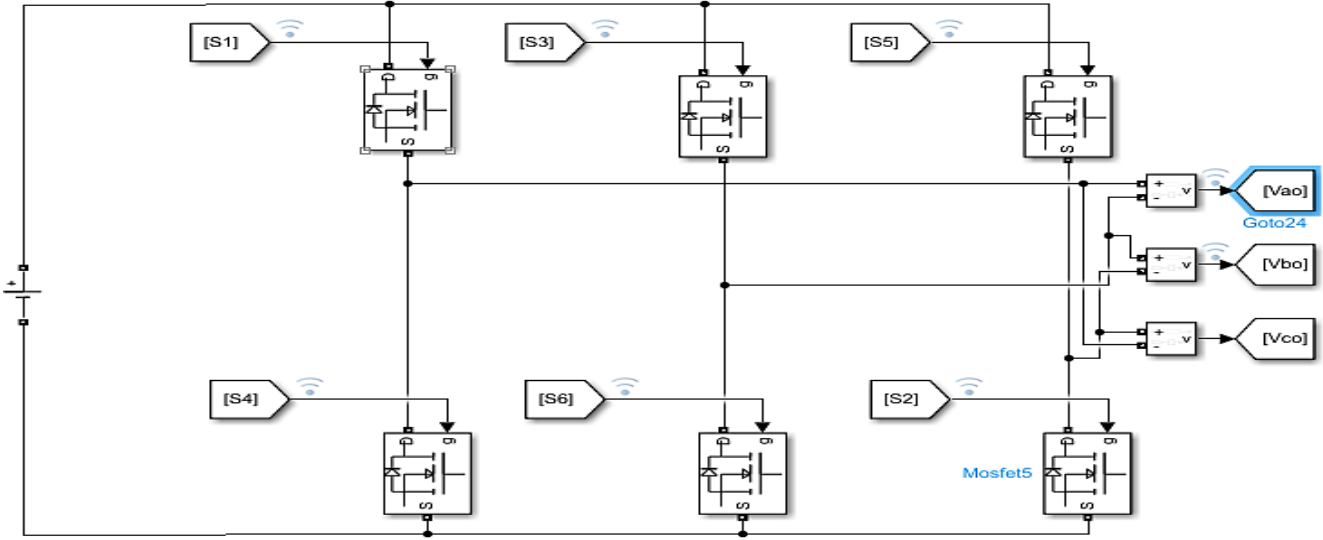


Şekil 3. Altı adım komütasyon yöntemi için elektriksel açığa bağlı sektör belirleme Simulink modeli



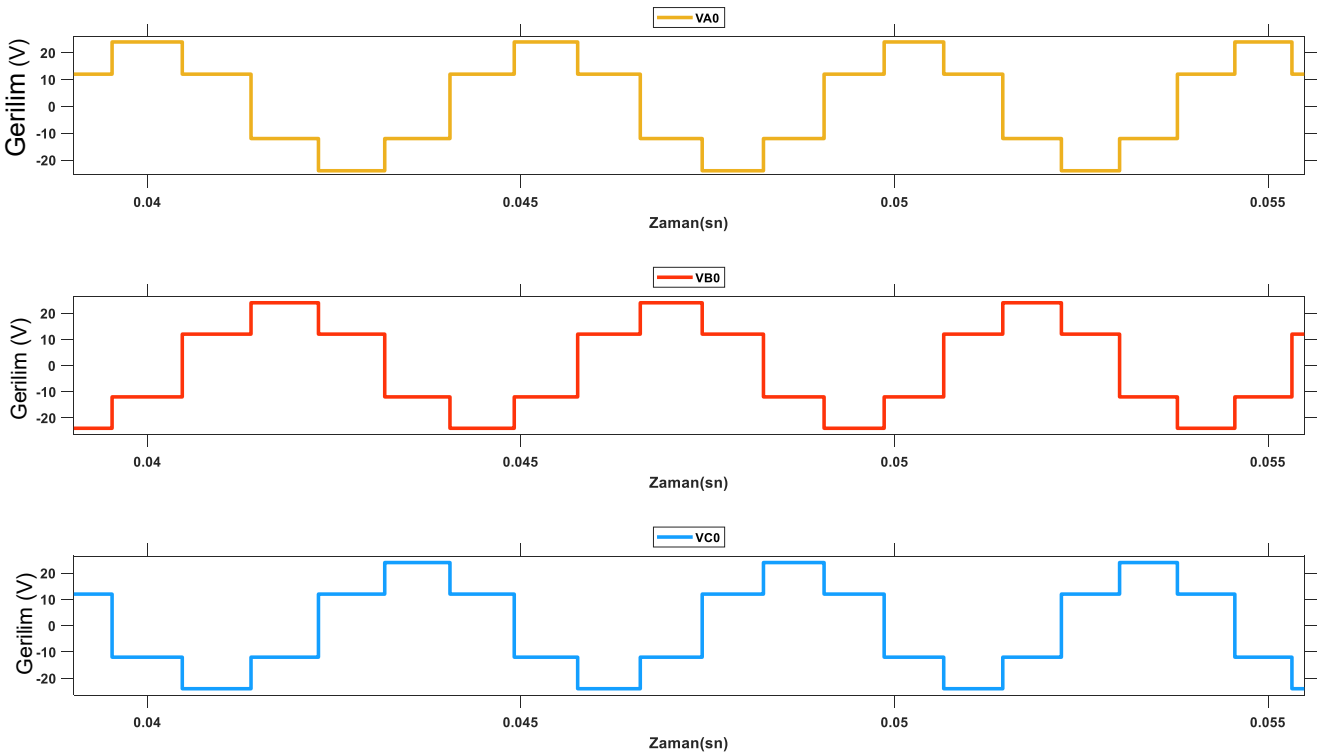
Şekil 4. Altı adım komütasyon çıkış grafiği

2.2.3 BLDC Motorun Faz Gerilimlerinin Modellenmesi:



Şekil 5. 3 Fazlı inverter topolojisi

BLDC motor için tasarlan inverter devresi Şekil 5'deki gibi tasarlanmıştır. Bu devreden elde edilen faz gerilimlerinin çıkışları Matlab Simulinkte aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

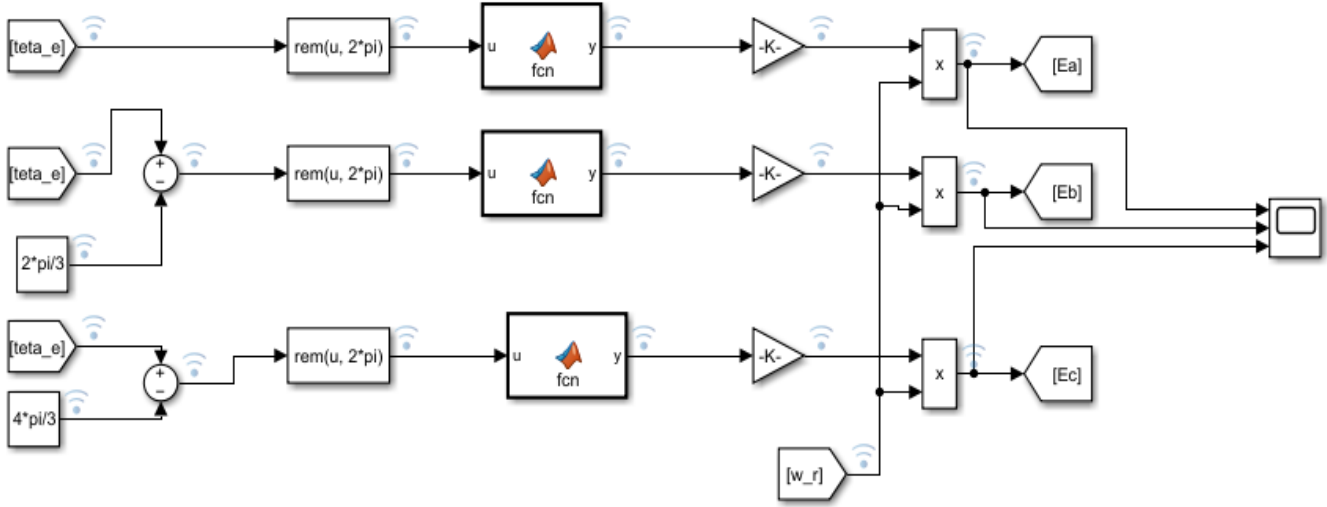


Şekil 6. İnverter çıkışlarından elde edilen VA0, VB0 ve VC0 gerilimleri

Şekil 6'da verilen inverter çıkış gerilimleri, altı adımlı komütasyon yöntemine özgü karakteristik davranışı sergilemektedir. Gerilimler her 60°'lik periyotlarda ani olarak değişmekte ve bu durum motor sargılarına uygulanan trapez dalga formlarını oluşturmaktadır. Bu yapı, klasik altı adımlı BLDC motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

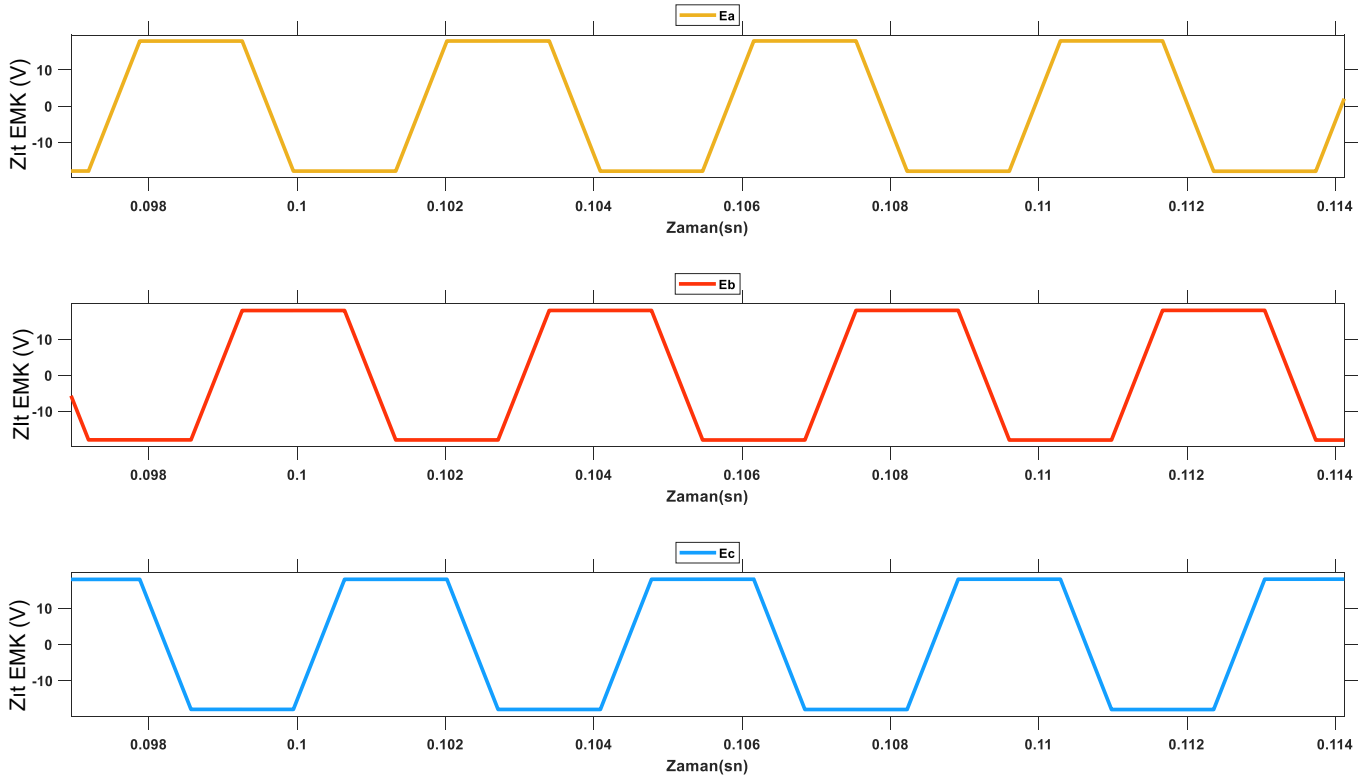
2.2.4 BLDC Motor EMF modellemesi

BLDC motor için EMF sinyalleri üren blok diyagram Matlab/Simulink programında aşağıdaki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 7. EMF sinyallerini üreten Matlab Simulink modeli

Şekil 7'deki simülasyon bloğu, BLDC motorun geri elektromotor kuvveti sinyallerini üretmek amacıyla tasarlanmıştır. Giriş olarak, elektriksel rotor açısı (θ_e) kullanılarak, her faz için uygun faz gecikmelerini de göz önünde bulundurarak ($\pm 2\pi/3$ ve $\pm 4\pi/3$) zıt-EMK sinyallerini üretmektedir. Bu açısı önce modülasyon işlemiyle ($\text{rem}(u, 2\pi)$) periyodik olarak sınırlandırılmakta, ardından fonksiyon bloğu aracılığıyla ideal EMK dalga formlarına dönüştürülerek her bir faz için E_a , E_b ve E_c voltajları üretilmektedir. Blok diyagramının çıkışında elde edilen E_a , E_b ve E_c sinyalleri Şekil 8'deki gibi elde edilmiştir.

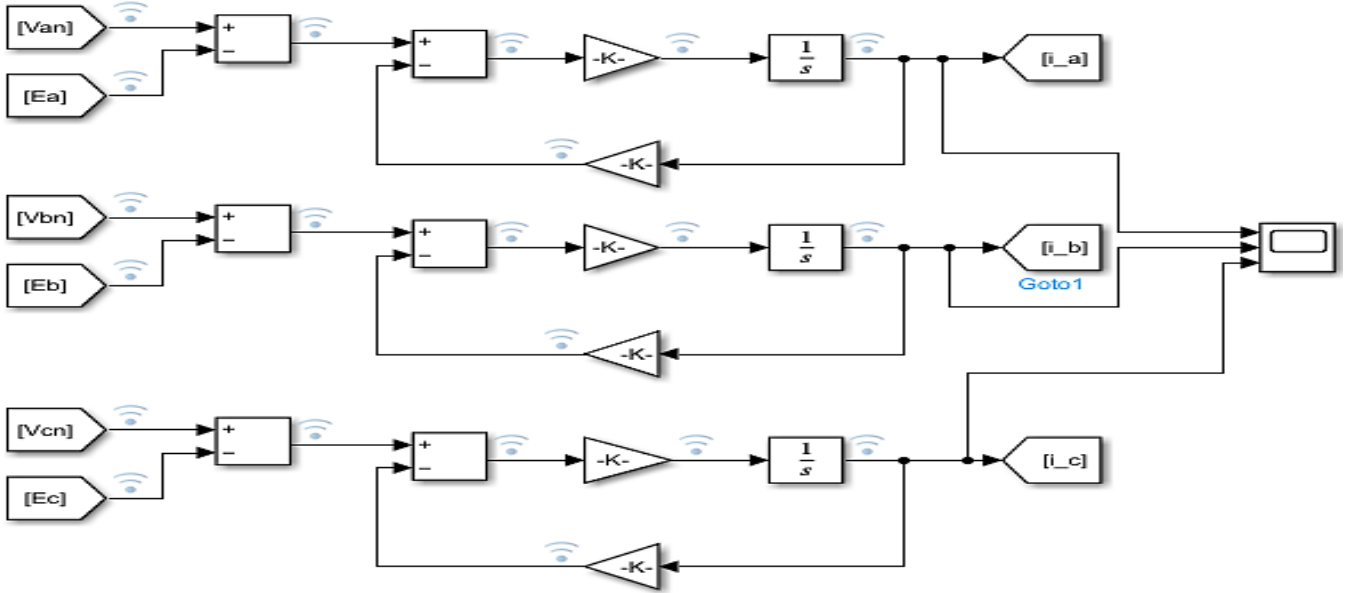


Şekil 8. Blok diyagramı çıkışında elde edilen zıt-EMK sinyalleri

Grafiklerden görüldüğü üzere, faz sinyalleri 120° faz gecikmeli olarak elde edilmiş olup, motorun manyetik alan geçişlerini yansıtan ideal bir gerilim profili oluşturmaktadır. Bu sinyaller, BLDC motorun simülasyon ortamında sürülmesinde referans sinyaller olarak kullanılmaktadır ve motorun hızına bağlı olarak genliği değişmektedir.

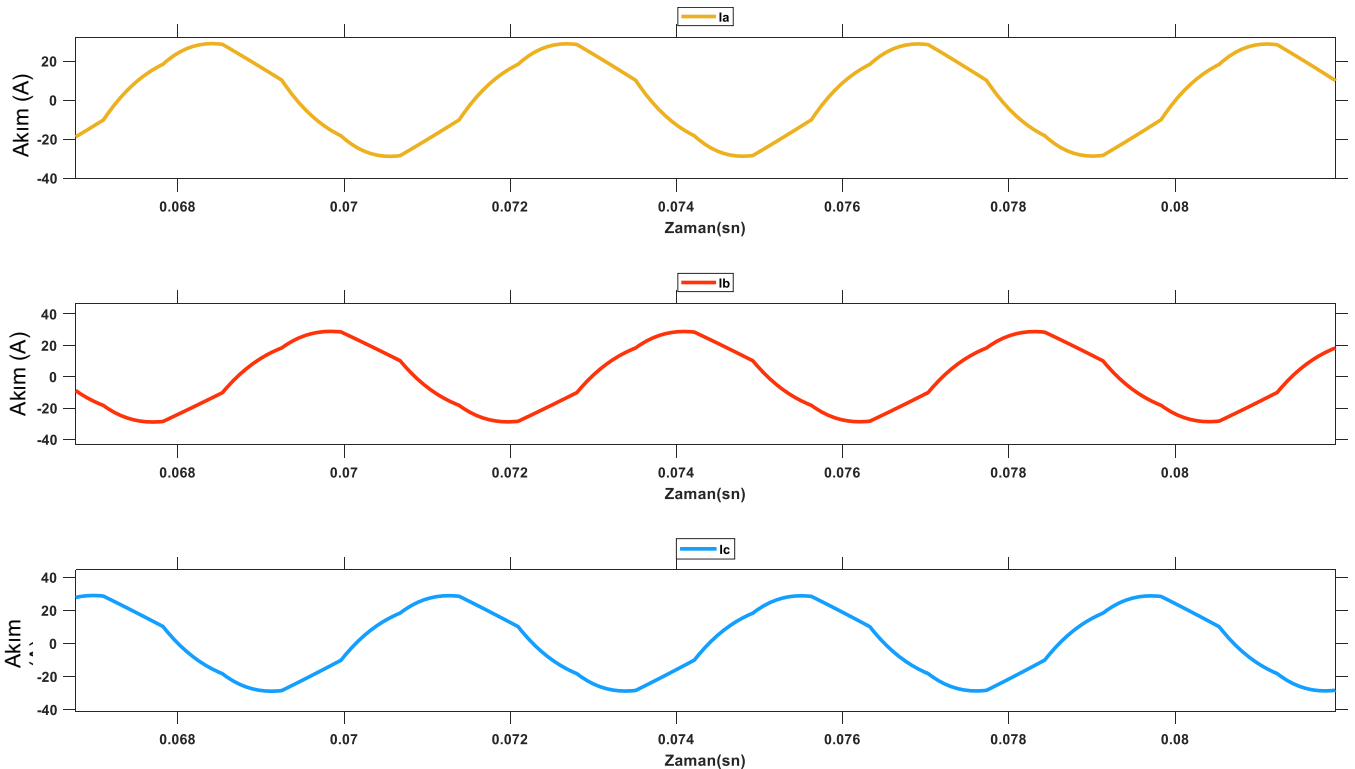
2.2.5 Faz Akım Akımlarının Modellenmesi

MATLAB Simulinkte faz akımlarını (i_a, i_b ve i_c) veren blok diyagram aşağıdaki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 9. Akım sinyalleri üreten blok diyagram

Tasarlanan blok diyagramın çıkışından elde edilen akım sinyallerinin grafikleri Şekil 10'daki gibi elde edilmiştir. Bloğu



Şekil 10. Blok diyagramı sonucunda oluşan akım çıkış grafikleri

Şekil 14'deki grafikte bulunan mavi renk, BLDC motorun hız-zaman tepkisini göstermektedir. Başlangıçta motor hareketsiz durumda olup $t=0$ anında hızlanmaya başlar. Kısa bir süre içinde motor referans hızına ulaşarak kararlı hale gelir. Grafikte görülen keskin yükseliş, motorun başlangıçta hızlı bir ivmelenme gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Aynı grafikte turuncu renkle gösterilen açısal konum zamanla doğrusal olarak artmaktadır. Bu doğrusal artış, motorun sabit bir açısal hızla döndüğünü göstermektedir. Başlangıçta düşük eğimli olan konum eğrisi, motorun hızlanma sürecine paralel olarak eğimini artırmakta ve ardından sabit hız rejimine ulaştığında doğrusal bir seyir izlemektedir. Bu durum, motorun sabit hızda dönmeye başladığı andan itibaren açısal konumun zamanla doğru orantılı olarak arttığını ortaya koymaktadır.

Gerilim düşmesi durumunda motor performansındaki değişimleri incelemek için motora 4 farklı gerilim seviyesi uygulanmış ve motor çıkışının Çizelge 1'de verilen parametreleri için elde edilen veriler tablo şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 1. Farklı gerilim değerleri için elde edilen parametreler ve değerleri

Elde Edilen Parametreler	Voltaj Değerleri			
	24V	22V	20V	18V
Elektriksel Açısal Hız (ω_e) [rad/s]	1522.84	1348.47	1155.46	942.2
Mekanik Açısal Hız (ω_r) [rad/s]	294.65	260.6	223.35	182.42
Elektriksel Devir (rpm)	1474.24	1304.01	1117.76	913.1
Mekanik Devir (rpm)	304.57	269.69	231.09	188.44
Elektromanyetik Tork (T_e) [Nm]	4.97	4.36	3.59	2.91
Faz Akımı i_a [A]	20.16	19.39	19.32	18.72
Faz Akımı i_b [A]	20.16	19.39	19.32	18.72
Faz Akımı i_c [A]	20.16	19.39	19.32	18.72
Faz zıt-EMK e_a [V]	16.48	14.59	12.36	10.11
Faz zıt-EMK e_b [V]	16.48	14.59	12.36	10.11
Faz zıt-EMK e_c [V]	16.48	14.59	12.36	10.11
Kararlı Hale Geçiş Süresi [s]	0.142	0.189	0.213	0.230

Çizelge 1'de verilen veriler incelendiğinde, giriş geriliminin azalmasıyla birlikte motorun elektriksel ve mekanik hız değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Örneğin, 24V gerilim altında 1474.24 rpm olan elektriksel devir, 18V gerilim altında 913.10 rpm'ye düşmüştür. Benzer şekilde, elektromanyetik tork değeri de 4.97 Nm'den 2.91 Nm'ye gerilemiştir. Bu durum, BLDC motorlarda tork üretiminin ve hız karakteristiğinin giriş gerilimine doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Yine Çizelge 1'e bakıldığında, faz akımlarının ve faz zıt EMK değerlerinin gerilim düşümü ile birlikte azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. 24V gerilimde yaklaşık 20 Amper olan faz akımları, 18V gerilim seviyesinde 18.72 Amper'e gerilemiştir. Ayrıca, faz başına üretilen zıt-EMK değerinin 16.48 Voltan 10.11 Volt seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, BLDC motorların giriş gerilim seviyesindeki değişimlere karşı oldukça hassas olduğunu ve motor kontrol tasarımlarında bu faktörün dikkate alınması gerektiği tavsiye etmektedir. Kararlı hale geçiş süreleri açısından yapılan değerlendirmelerde ise, gerilim seviyesinin azalması ile birlikte motorun kararlı duruma ulaşma süresinin arttığı görülmüştür. 24V çalışma koşulunda motor yaklaşık 0.142 saniyede kararlı hale gelirken, 18V koşulunda bu süre 0.23 saniyeye kadar uzamıştır. Bu durum, motorun düşük gerilim altında daha fazla geçici rejim dalgalanması sergilediğini ve kontrol sistemlerinin daha dikkatli tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, BLDC motorlarda gerilim düşümü senaryolarının dikkate alınması tork üretimi, hız kararlılığı ve kontrol tasarımı açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, düşük maliyetli sürücü tasarımlarında gerilim

değişimlerine karşı alınması gereken önlemler ve performans optimizasyonu için önemli bir kaynak sağlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan simülasyonlarla, öncelikle motor girişine 24 V uygulanması durumunda motorun ürettiği faz gerilimleri, akımlar, zıt-EMK ve elektromanyetik tork değişimleri grafiksel olarak elde edilerek incelenmiştir. Sonrasında ise BLDC motorun girişine uygulanan farklı gerilim seviyelerine (24V, 22V, 20V ve 18V) verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Gerilim düşümü senaryoları için yapılan simülasyonlar, motorun hız, tork üretimi ve kararlı duruma geçiş süresinde kayda değer değişimler oluştuğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, BLDC motorların giriş gerilimindeki dalgalanmalara karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini ve performanslarının doğrudan bu değişimlerden büyük oranda etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, sadece kontrol algoritması seçiminin değil, aynı zamanda motor sürücü tasarımında kullanılacak gerilim regülasyon yöntemlerinin de kritik olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, BLDC motorların gerilim dalgalanmalarına karşı duyarlılığı, sistem güvenliği ve kararlılığı açısından dikkate alınması gereken temel bir unsur olduğu görülmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, üç fazlı bir BLDC motorun elektriksel ve mekanik davranışları matematiksel olarak modellenmiş, geliştirilen model MATLAB/Simulink ortamında başarıyla test edilmiştir. Altı adım komütasyon yöntemiyle yapılan simülasyonlarda, motorun geçici rejim ve kararlı durum tepkilerinin giriş gerilimine karşı yüksek derecede duyarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Özellikle giriş gerilimi 24 V'tan 18 V'a düşürüldüğünde, motorun mekanik açısal hızında yaklaşık %38 azalma ($294.65 \text{ rad/s} \rightarrow 182.42 \text{ rad/s}$), elektromanyetik torkta ise %41 oranında düşüş ($4.97 \text{ Nm} \rightarrow 2.91 \text{ Nm}$) tespit edilmiştir. Ayrıca, kararlı hale geçiş süresi 0.142 saniyeden 0.230 saniyeye yükselerek %62'lik bir artış göstermiştir. Bu bulgular, motorun düşük gerilim altında çalışmasının performans ve kararlılık açısından ciddi riskler barındırdığını ve sürücü tasarımında gerilim regülasyonunun kritik bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Gerilim düşümü senaryolarında gözlemlenen bu gecikme, teorik olarak da beklenen bir durumdur. Gerilim seviyesinin azalması, motorun tork üretme kapasitesini sınırlamakta ve bunun sonucunda hızlanma süresi uzamaktadır. Bu etki, model üzerinden yapılan matematiksel analizlerle öngörülmüş ve Simulink simülasyonları ile doğrulanmıştır. Böylece, çalışmada geliştirilen modelin sadece nominal koşullar için değil, düşük gerilim altındaki performans bozulmalarını da güvenilir şekilde yansıttığı ortaya konmuştur.

Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda SVPWM ve SPWM tekniklerine ilişkin daha önceki araştırmalar temel alınarak, mevcut altı adım komütasyon modeliyle karşılaştırmalı analizler yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, sensörlü ve sensörsüz kontrol stratejilerinin birleştirilmesiyle; tork dalgalanmaları, sistem verimliliği ve gerilim bozulmalarına karşı dayanıklılık gibi kritik performans parametrelerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi hedeflenmektedir. Böylece hem kontrol algoritmalarının hem de sürücü topolojilerinin farklı çalışma koşullarındaki performansları daha kapsamlı bir bakış açısıyla değerlendirilebilecektir.

Bu doğrultuda, düşük gerilim koşullarında oluşan geçici rejim salınımlarını bastırmak amacıyla; adaptif PID ayarları, gerilim duyarlı tork sınırlayıcı algoritmalar ve düşük gerilim algılamalı yumuşak başlatma (soft-start) mekanizmalarının entegrasyonu önerilmektedir. Gerilim düşüşü senaryolarında sistem kararlılığını koruyabilmek adına, gerilim kompanzasyonu ve moment optimizasyonuna yönelik ileri beslemeli (feedforward) stratejilerin kullanımı da değerlendirilebilir [15]. Bu öneriler, sürücü tasarımında

yalnızca nominal değil, zorlu çalışma koşullarının da göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 2024/6-4 D proje numaralı araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları maddi ve manevi desteklerden dolayı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'ne ve çalışmanın her aşamasında değerli katkı ve rehberliklerini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Metin Salihmuhsin'e ve proje ekibine çok teşekkür ederim.

Katkı Beyanı

Bu çalışma, araştırma fikrinin geliştirilmesinden makalenin yazımına kadar tüm aşamalarda Uğur Kızıldağ tarafından yürütülmüştür. Çalışmanın planlanması, veri analizi süreci ve elde edilen bulguların yorumlanması aşamalarında Dr. Öğr. Üyesi Metin Salihmuhsin danışmanlık ve akademik rehberlik sağlamıştır. Her iki yazar da çalışmanın son hâlini onaylamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları, çalışma kapsamında herhangi bir kurum, kuruluş veya kişi ile kişisel ya da finansal çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Maske V, Yadav MK, Halmare A. Mathematical modeling and simulation for performance analysis using Matlab/Simulink. *International Journal of Emerging Research in Electrical and Electronics Engineering* 2018;4(3):246-247.
- [2] Dash BK, Roshni S. Modeling of sensorized BLDC motor speed control using Matlab/Simulink. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering* 2018;13(6):67-76.
- [3] Yuan, T., & Zhang, Y. (2022). Current Harmonic Suppression of BLDC Motor Utilizing Frequency Adaptive Repetitive Controller. *Machines*, 10(11), 1071. <https://doi.org/10.3390/machines10111071>
- [4] Hussain, T. (2015). Analysis of brushless DC motor with trapezoidal back EMF with MATLAB. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 22(1), 45-51. <https://doi.org/10.25130/tjes.22.1.05>
- [5] MathWorks. (2024). To simulate the Back EMF voltage of a BLDC motor in Simulink. In this simulation, how to find the Rp? *MATLAB Answers*. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/2172626-to-simulate-the-back-emf-voltage-of-a-blcd-motor-in-simulink-in-this-simulation-how-to-find-the-rp> (Erişim tarihi: 18 Ocak 2025).
- [6] Gençer Ç, Önal A. Modeling and simulation of BLDCM using Matlab/Simulink. *Journal of Applied Sciences* 2006;6(3):688-691. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.688.691>
- [7] Manda P, Veeramalla SK. Brushless DC motor modeling and simulation in the Matlab/Simulink software environment. *Advances in Modelling and Analysis B* 2021;64(1-4):27-33.
- [8] Suneeta R, Srinivasan R, Sagar R. Co-simulation of BLDC motor commutation by using MATLAB Simulink and Xilinx System Generator. *International Journal of Engineering and Technology* 2016;8(2):899-902.
- [9] Hubík V, Toman J, Singule V. BLDC motor control design in MATLAB/SIMULINK. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* 2010;88:35-36.
- [10] Nahar S, Ahmed MR, Rahman MA. Performance analysis of BLDC motor using an improved methodology. In: *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*; 2020.
- [11] Kızıldağ U, Salihmuhsin M. Üç fazlı inverterlerde uzay vektör modülasyonu: Teorik temeller, simülasyon ve uygulamalar. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*; 2025. (Değerlendirme aşamasında)
- [12] MathWorks. Hall sensor sequence calibration of BLDC motor. <https://la.mathworks.com/help/mcb/gs/hall-sensor-sequence-calibration-blcd-motor.html> (Erişim Tarihi: 01.01.2025)
- [13] Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals (Application Note AN885). Chandler, AZ: Microchip Technology Inc.; 2003. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>

- [14] Microchip Technology. AC300022 - 24V 3-phase brushless DC motor with encoder.
<https://www.microchip.com> (Erişim Tarihi: 22.01.2025)
- [15] Kroičs, K., & Būmanis, A. (2024). BLDC Motor Speed Control with Digital Adaptive PID-Fuzzy Controller and Reduced Harmonic Content. *Energies*, 17(6), 1311. <https://doi.org/10.3390/en17061311>