T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

BLDC MOTORLARDA REJENERATİF FRENLEME

Alper Kağan CANDAN

Danışman
Doç. Dr. Hayati MAMUR

MANİSA–2020

Alper Kağan CANDAN	**BLDC MOTORLARDA REJENERATİF FRENLEME**	**2020**

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Alper Kağan CANDAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa
İÇİNDEKİLER I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ II
ŞEKİLLER DİZİNİ III
TABLO DİZİNİ V
TEŞEKKÜR VI
ÖZET VII
ABSTRACT VIII
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 4
2.1. BLDC Makine 4
2.2. Sürücü Devresi 7
2.3. Akü 9
2.4. DC-DC Yükseltici 9
2.5. STM32F407VG Kontrol Kartı 11
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER 13
3.1. Benzetim Çalışmaları 13
3.1.1. Motor Sürme Benzetim Çalışmaları 13
3.1.2. BLDC Makine Rejeneratif Frenleme Benzetim Çalışmaları 16
3.2. Deney Çalışmaları 20
3.2.1. BLDC Motor Sürme Deney Çalışmaları 20
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 30
4.1. Benzetim Çalışması Sonuçları 30
4.2. Deney Sonuçları 34
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 50
KAYNAKLAR 51
ÖZGEÇMİŞ 54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif akım
BJT	Çift kutuplu eklemli tranzistör
BLDC	Fırçasız Doürı Akım Motoru
D	Anahtarın iletimde kaldığı süre
DC	Doğru akım
EMK	Elektro motor kuvvet
FET	Alan etkili tranzistör asit
I	Akım
I_m	Akım genliği
i_A	A fazı akımı
i_B	B fazı akımı
i_C	C fazı akımı
km	Kilometre
K_T	Moment sabiti
m	Metre
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili tranzistör
N_1	Primer sarım sayısı
N_2	Sekonder sarım sayısı
P	Aktif güç
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RPM	Dakikadaki devir sayısı
T	Moment
T_A	A fazına ait moment
T_B	B fazına ait moment
T_C	C fazına ait moment
UART	Evrensel asenkron alıcı verici
V	Gerilim
V_i	Giriş gerilimi
V_o	Çıkış gerilimi
V_1	Primer gerilimi
V_2	Sekonder gerilimi
w	Açısal hız

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Zıt EMK türleri (a) trapezoidal (b) sinüsoidal 6
Şekil 2.2. BLDC motor sürücü eşdeğer devresi 8
Şekil 2.3. BLDC motor sürücü enerji akış şeması 8
Şekil 2.4. Bir faz trafo eşdeğer devresi 10
Şekil 2.5. DC-DC yükseltici eşdeğer devresi 10
Şekil 2.6. DC-DC yükseltici enerji akışı (a) MOSFET iletimde (b) MOSFET kesimde 11
Şekil 2.7. STM32F407 kartı genel görünümü 12
Şekil 3.1. Benzetimi yapılan çalışmanın blok diyagramı 13
Şekil 3.2. BLDC motor anahtarlaması için kullanılan lojik devre 14
Şekil 3.3. BLDC motorun sürülmesi esnasında kullanılan bloklar 16
Şekil 3.4. Yöntem 1'e göre zıt EMK'nın elde edilmesi modeli 17
Şekil 3.5. Yöntem 2'ye göre zıt EMK'nın elde edilmesi modeli 17
Şekil 3.6. DC-DC yükseltici 18
Şekil 3.7. Enerji hesaplama blokları 19
Şekil 3.8. Benzetim çalışması yapılan sistemin tüm görüntüsü 20
Şekil 3.9. IR2104 bağlantı şeması 21
Şekil 3.10. IR2104 doğruluk değer grafiği 22
Şekil 3.11. 6N137 bağlantı şeması 23
Şekil 3.12. Gerilim düzenleyicilerin bağlantı şeması 25
Şekil 3.13. Tasarlanan sürücü devresi 25
Şekil 3.14. Tasarlanan gerilim düzenleyiciler 26
Şekil 3.15. Kullanılan rölenin (a) kontak yapısı (b) görünmü 27
Şekil 3.16. Üç faz doğrultucu ve DC-DC yükseltici çevirici 27
Şekil 3.17. Tasarlanan sistemin açık devre güç şeması 29
Şekil 4.1. Yöntem 1'e göre 20 Ω'luk yükte elde edilen zıt EMK 30
Şekil 4.2. Yöntem 2'ye göre 20 Ω'luk yükte elde edilen zıt EMK 31
Şekil 4.3. Yükselten konvertör çıkış gerilimi 32
Şekil 4.4. Akü akım-zaman grafiği 32
Şekil 4.5. Akü şarj-zaman grafiği 33
Şekil 4.6. Rejeneratif frenleme uygulanmadan BLDC motor zıt EMK'sı 33
Şekil 4.7. Rejeneratif frenleme uygulandığında BLDC motor zıt EMK'sı 34
Şekil 4.8. 45 RPM anlık akım değerleri (mA) 36
Şekil 4.9. 45 RPM anlık gerilim değerleri (V) 36
Şekil 4.10. 45 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 37
Şekil 4.11. 84 RPM anlık akım değerleri (mA) 37
Şekil 4.12. 84 RPM anlık gerilim değerleri (V) 38
Şekil 4.13. 84 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 38
Şekil 4.14. 142 RPM anlık akım değerleri (mA) 39
Şekil 4.15. 142 RPM anlık gerilim değerleri (V) 39
Şekil 4.16. 142 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 40

Şekil 4.17. 212 RPM anlık akım değerleri (mA) 41
Şekil 4.18. 212 RPM anlık gerilim değerleri (V) 41
Şekil 4.19. 212 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 42
Şekil 4.20. 109 RPM anlık akım değerleri (mA) 43
Şekil 4.21. 109 RPM anlık gerilim değerleri (V) 43
Şekil 4.22. 109 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 44
Şekil 4.23. 160 RPM anlık akım değerleri (mA) 44
Şekil 4.24. 160 RPM anlık gerilim değerleri (V) 45
Şekil 4.25. 160 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 45
Şekil 4.26. 237 RPM anlık akım değerleri (mA) 46
Şekil 4.27. 237 RPM anlık gerilim değerleri (V) 46
Şekil 4.28. 237 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 47
Şekil 4.29. 320 RPM anlık akım değerleri (mA) 47
Şekil 4.30. 320 RPM anlık gerilim değerleri (V) 48
Şekil 4.31. 320 RPM anlık güç değerleri (mA×V) 48

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. 60 derece açı ile yerleştirilmiş hall sensörler 5
Tablo 2.2. 120 derece açı ile yerleştirilmiş hall sensörler 5
Tablo 3.1. Kullanılan anahtarlama şartları 28

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hayati MAMUR'a, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen aileme teşekkür ederim.

Alper Kağan CANDAN
Manisa, 2020

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BLDC MOTORLARDA REJENERATİF FRENLEME

Alper Kağan CANDAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hayati MAMUR

Fosil yakıtların kullanımının azaltılması ülkelerin hedefleri arasındadır. Çünkü gelecekte tükenecek olma ihtimalleri vardır ve çevreye sera gazı salınımına neden olurlar. Sera gazı salınımına neden olan sebeplerden biri fosil yakıtlı araçlardır. Son zamanlarda, fosil yakıtlı araçların yerini ulaşımda elektrikli araçların karşılayabileceği gözükmektedir. Elektrikli araçlar elektrik motorlarının içten yanmalı motorlara nazaran yüksek verimliliğe sahip olması nedeniyle daha düşük yakıt maliyetine sahiptirler. Bu tür araçların da bataryalarının yetersiz ve şarj istasyonlarının az olması belli mesafeler içinde kullanılmasını gerektirmektedir. Mesafeyi arttırmanın yollarından biri araç fren yaparken boşa kullanılan enerjinin tekrar kullanılabilir hale getirilmesi olan fırçasız doğru akım (BLDC) makinenin rejeneratif frenlemesidir. Bu tez çalışması, bir BLDC makinenin belirli bir süre motor olarak çalıştırılması bu sürenin dolmasının ardından rejeneratif frenleme ile durdurulması esnasında BLDC makinenin jeneratör olarak çalıştırılmasının benzetimini ve deney uygulamasını içermektedir. Matlab/Simulink programı kullanılarak BLDC makinenin motor ve jeneratör olarak çalıştırılmasının hem benzetimi hem de deneyleri sunulmuştur. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasına göre %6,21'lik bir enerji geri kazanımı sağlanmıştır. Bunun uygulaması yapıldığında %6,37 değerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BLDC makine, elektrikli araç, rejeneratif frenleme

2020, 54 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

REGENERATIVE BRAKING OF BLDC MOTORS

Alper Kağan CANDAN

Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hayati MAMUR

Reducing of the use of fossil fuels is among the targets of countries. Because they are likely to run out in the future and cause greenhouse gas emissions to the environment. One of the reasons that cause greenhouse gas emissions are fossil fuel vehicles. Recently, it seems that electric vehicles can be used for transportation instead of fossil fuel vehicles. Electric vehicles have lower fuel costs due to the high efficiency of electric motors compared to internal combustion engines. This type of vehicles can be used certain distances because of the insufficient batteries and battery charge stations. One of the ways to increase the distance is the regenerative braking that recycle the wasted energy of brushless direct current machine (BLDC) when the vehicle brakes. This thesis includes the simulation and experimental application of a BLDC machine working as a motor for certain period and after the time period BLDC machine worked as a generator during the stopping with regenerative braking. By using the Matlab/Simulink program, both simulation and experiments of working BLDC machine as a motor and a generator are presented. According to the simulation results, a energy recovery of 6.21% was achieved. A energy regeneration of %6.37 was reached by the experimental study.

Keywords: BLDC machine, electric vehicles, regenerative braking

2020, 54 pages

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlar enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan kaynaklar arasında en ön sırada yer almaktadır. Fakat tükenebilir niteliktedir ve sera gazı salınımı gibi doğaya zararlı etkileri vardır [1]. Artmakta olan nüfus ile birlikte tüketim ve zararlı etkileri giderek büyümektedir. Ayrıca bu kaynaklar belirli bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Bazı ülkeler bu kaynaklara sahipken bazılarında ise hiç yok denecek kadar azdır. Fosil yakıtların daha az olduğu ülkeler için bunlar önemli bir gider kalemi olmaktadır. Türkiye'de bu ülkeler arasındadır. Fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması Türkiye gibi fosil yakıt ithalatı yapan ülkeler için daha fazla önem arz etmektedir. Bunlar gibi nedenlerle bu yakıtların kullanımını azaltabilecek ve enerji verimliliğini yükseltecek sistemlerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

Bu çalışmaların ilk sonuçları olarak hibrit otomobiller ve elektrikli otomobiller geliştirilmiştir. Elektrikli otomobillerin diğer otomobillerden farkı elde edilen hareketin içten yanmalı motor yerine elektrik motorundan sağlanmasıdır. Bu araçların geliştirilmesinin iki büyük avantajı vardır. İlki kaynak çeşitliliğidir. Elektrik enerjisi üretiminin önemli bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmesine rağmen tek yol bu değildir. Fosil olmayan kaynaklardan üretilen elektrik bu taşıtlarda kullanılabileceğine göre tüketime çeşitlilik oluşturmaktadır. İkincisi ise verimliliktir. Araçlarda sıklıkla kullanılan ve içten yanmalı motorlar olan benzin ve dizel motorlar yaklaşık olarak %40-60 arası değişen verimliliğe sahiptir. Elektrik motorlarında verim %90 seviyelerine ulaşmaktadır [2]. Bu nedenle elektrikli araçların yakıt masrafları da geleneksel araçlara nazaran daha makuldür.

Yüksek verime sahip olmalarına karşın elektrikli araçlarda hala iyileştirilmesi gereken birtakım önemli sorunlar vardır. Bunlardan biri mesafe problemidir [3]. Günümüz batarya teknolojisinin buna izin vermemesi nedeniyle mesafeler hala istenen seviyelerde değildir [4, 5]. Bu dezavantaj ile birlikte elektrik şarj istasyonları henüz fosil yakıt istasyonları kadar fazla sayıda bulunmamaktadır. Bu da elektrikli araçların uzun mesafelerde kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca batarya dolumu için gereken zaman fosil yakıt dolum zamanı ile kıyaslandığında daha uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrikli araçlarda hareketi sağlayan parçanın elektrik motoru olması verimliliğin artmasına doğrudan katkı verdiği gibi birtakım sistemlerin eklenmesiyle dolaylı olarak verimliliğe katkı sağlamıştır. Bunlardan biri frenleme sistemidir. Sıradan disk fren sistemine

sahip araçlarda fren pedalına basıldığında balataların diskleri sıkmasıyla yavaşlama ve durma gerçekleşir. Bu esnada sürtünmeden dolayı balatalar aşınır ve ısı ortaya çıkar. Açığa çıkan ısı enerjisi ortamda kaybolur [6].

Diğer taraftan, elektrik motoruna sahip araçlarda ise frenleme esnasında harcanan enerjinin bir bölümünü geri kazanmak mümkündür. Bu rejeneratif frenleme ile gerçekleştirilir. Rejeneratif frenleme durma sırasında veya yokuş aşağı olarak kendi ivmesiyle dönmeye devam eden elektrik makinesinin jeneratör gibi çalışarak uçlarında gerilim indüklemesi yardımıyla yapılır [7]. Üretilen enerji daha sonra kullanılmak üzere bataryaya veya aküye depo edilir. Bu olay bataryanın enerjisini arttrarak alınan mesafenin artmasına katkı sağlar [8, 9].

Rejenerasyon hareket halindeki araca uygulandığı için önce motoru sürme işlemi gerçekleştirilmelidir. Elektrikli araçlarda çok kullanılan motor tiplerinden biri fırçasız doğru akım (BLDC) makineleridir [10]. Bu makinelerin Hall etkili sensörlü ve sensörsüz tipleri vardır. Hall etkili sensörlü motorlarda rotorun pozisyonu sensörler vasıtasıyla lojik olarak elde edilir. Pozisyon bilgisi yardımıyla anahtarlama devresindeki fazları kontrol eden yarı iletken elemanlar uygun sırayla anahtarlanır ve BLDC makine harekete başlar.

BLDC makinenin durması esnasında kendi ivmesiyle dönen elektrik makinesi jeneratör olarak çalışmaya başlar ve makine tarafından üretilen zıt elektro manyetik kuvvet (EMK) baskın hale gelir. Bu EMK değeri başlangıçta büyüktür ve makine hızının azalması ile sıfıra doğru gelir. Bu enerjinin batarya grubuna gönderilebilmesi için bataryanın geriliminden daha yüksek bir gerilimi sağlayan gerilim düzenleyici ve yükseltici çeviriciye ihtiyaç duyulur. Bu işlem DC-DC yükseltici çevirici ile yapılır ve frenleme esnasında açığa çıkan enerji batarya grubuna sonradan kullanılmak üzere gönderilir.

Enerji rejenerasyonu ve bunun uygulanabilirliğine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Cody ve ark. [11] ticari bir BLDC motor üzerinde bağımsız anahtarlama metoduyla rejeneratif frenleme yapmışlardır. Billah ve ark. [12] rejeneratif frenleme esnasında motora mekanik olarak değişken yük uygulamışlar ve kullandıkları batarya çok hücreli olduğu için farklı gerilim seviyeleriyle de deneyler yapmışlardır. Godfrey ve Sankaranarayanan [13] ise single switch, two switch, three switch ve plugging anahtarlama methodlarını deneyerek bu metotlardaki durma süreleri ve geri dönüştürülen enerji miktarlarını ölçmüş ve deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Maia ve ark. [14] bir elektrikli araç için bulanık mantık modelleme ile rejeneratif frenleme yaparken, Gökçe ve Üstün [15] de elektrikli motorsiklet üzerinde bulanık

mantık bir kontrolcü ile rejeneratif frenleme yapmışlardır. Chen ve ark. [16] dört tekerlekli bir araç için bağımsız bir şekilde çalışan rejeneratif frenlemeyi başarılı bir şekilde uygulamışlardır. Wu ve ark. [17] hibrit bir elektrikli araçta çok detaylı bir analitik çalışma ile rejeneratif frenlemeyi başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Geraee ve ark. [10] adaptif ve modifiyeli tork kontrolünü kullanarak bir elektrikli aracın rejeneratif frenlemesini yapmışlardır.

Bu yapılan çalışmalara dikkat edildiğinde bazıları sistemin analitiğine değinirken bazıları da uygulama alanına ağırlık vermişlerdir. Önerilen bu çalışmada rejeneratif frenlemenin daha iyi anlaşılabilmesi ve benzetim çalışmalarının daha rahat yapılabilmesi için Matlab/Simulink ortamında BLDC makinenin motor olarak çalıştırılması ve frenleme esnasında jeneratör olarak kullanılmasının detaylandırılmış bir benzetimi ve deneysel çalışması verilmiştir. Böylelikle elektrikli araçlardaki mesafe problemini gidermeye yönelik bir çalışma olmuştur. Elektrikli araçlarda sıklıkla kullanılan bir motor tipi olan BLDC makine rejeneratif frenleme yöntemiyle durdurulmaya çalışılmıştır. Rejeneratif frenleme yöntemiyle durma esnasında BLDC makineden enerji elde edilmiştir. Elde edilen enerji aküye daha sonra kullanılmak üzere depolanmıştır. Bu sayede aynı aküyle daha uzun mesafe alınması hedeflenmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde genel bir giriş yapıldıktan sonra ikinci bölümde kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise benzetim ve deney çalışmalarının yöntemleri açıklanmıştır. Elde edilen çıktılar ve grafikler dördüncü bölümde sunulmuştur. BLDC motorun rejeneratif frenlemesine ait hem benzetim hem de uygulama genel sonuçları ve öneriler beşinci bölümde ele alınmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. BLDC Makine

BLDC makineler rotoru sabit mıknatıstan oluşan makinelerdir [18]. Statorlarında ise birden fazla faz bulunur. Stator fazları belli bir sırayla anahtarlanarak bir döner manyetik alan oluşturulur. Bu döner manyetik alan içinde kalan rotora kuvvet etki etmesiyle hareket başlatılmış olur.

BLDC motorlar DC gerilim ile çalışan motorlardır. Fakat yapıları ve çalışma prensipleri üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlara benzemektedir. Diğer DC motorlarda fırçaların kollektör dilimlerine temasıyla endüvi bobinlerine enerji verilir ve motor dönmeye başlar. Endüvi kollektör ile birlikte dönmeye devam ettikçe fırçalar farklı dilimlere basar. Bu durum bir bobinin üzerinden geçen akımın yön değiştirmesi olarak nitelendirilen komütasyon işleminin yapılmasını sağlar. Böylece harekette süreklilik sağlanmış olur. BLDC ve sincap kafesli asenkron motorlarda ise diğer DC motorlarda olduğu gibi fırça bulunmaz dolayısıyla kollektöre de gerek yoktur [19]. Bu durum fırçaların meydana getirdiği sürtünme vb. kayıpların giderilmesini sağlar ve ortam sıcaklığını da arttırmaz. Aynı zamanda fırçaların kollektöre sürtmesiyle oluşan kıvılcım ortadan kaldırılmış olduğundan muhtemel bir yangın tehlikesi giderilerek güvenlik arttırılmış olur. Sürtünmeden dolayı zamanla aşınan fırçalar olmadığı için fırça değişim masrafları da ortadan kaldırılmış olur. BLDC motorlar fırçalı DC motorlara göre daha gürültüsüz çalışırlar ve daha uzun ömürlüdürler fakat fiyatları daha yüksektir.

BLDC motorlarda komütasyon işlemi sürücü devresinin yardımıyla elektronik olarak yapılır [20]. Bu motorlarda fazlar rotorun bulunduğu konuma göre anahtarlanmaktadır. Bu nedenle rotor konumunun tespiti bu motorlarda yüksek önem arz etmektedir [21]. Rotorun konumu iki şekilde tespit edilebilmektedir [22]. İlk yöntem sensörsüz motorlarda kullanılan zıt EMK yöntemidir. Bu yöntem ile stator sargılarında oluşan zıt EMK belirlenir ve buna göre rotorun pozisyonu hakkında bilgi elde edilir. İkinci yöntem ise sensörle konum belirlemedir. Sabit mıknatıstan oluşan rotor, statorun üzerine belirli açılarla yerleştirilen Hall Etkili sensörlerin algılama alanına girdiğinde ilgili sensör veya sensörlerin uçlarında gerilim oluşur [23]. Bu sayede rotorun konumu tespit edilir.

BLDC makinelerdeki sensörler çalışabilmeleri için besleme gerilimine ihtiyaç duyarlar. Stator üzerine birbiri arasında 60’ar derece veya 120’şer derece açı olacak şekilde yerleştirilirler [24]. Bu açıların derecelerine göre elde edilen sinyaller değişmektedir. Bu durumun doğal bir

sonucu olarak anahtarlanan fazlar da değişmektedir. Tablo 2.1'de 60 derece açı ile yerleştirilmiş hall sensörlü BLDC makinenin anahtarlama sinyal sırası verilmiştir. Ayrıca 120 derece açı ile yerleştirilmiş BLDC makinedeki hall sensörleri ve faz anahtarlaması tablo 2.2'de sunulmuştur.

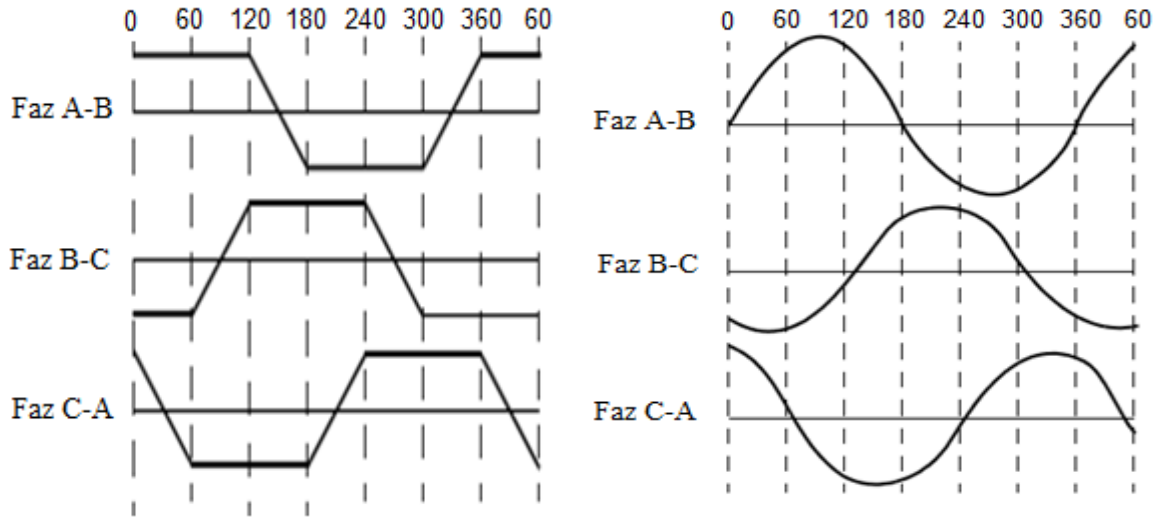
Tablo 2.1. 60 derece açı ile yerleştirilmiş hall sensörler

	Hall Sensör Sinyali			Fazlar		
	A	B	C	A	B	C
1	0	0	1	+		-
2	0	0	0	+	-	
3	1	0	0		-	+
4	1	1	0	-		+
5	1	1	1	-	+	
6	0	1	1		+	-

Tablo 2.2. 120 derece açı ile yerleştirilmiş hall sensörler

	Hall Sensör Sinyali			Fazlar		
	A	B	C	A	B	C
1	1	0	1	+	-	
2	1	0	0		-	+
3	1	1	0	-		+
4	0	1	0	-	+	
5	0	1	1		+	-
6	0	0	1	+	-	

BLDC motorların rotorun konumuna göre yani statorun iç kısmında veya dış kısmında olmasına göre iç ve dış çeşitleri vardır. Ürettikleri zıt EMK'ya göre ise trapezoidal ve sinüsoidal olarak isimlendirilebilirler. Şekil 2.1'de iki zıt EMK için dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Zıt EMK türleri (a) trapezoidal (b) sinüsoidal

Aşağıda 3 fazlı bir BLDC motora ait akım ve moment denklemleri verilmiştir. (2.1) numaralı denklemde her bir faz tarafından üretilen moment denklemleri bu fazlardan çekilen akımlarla ilişkili olarak gösterilmiştir. (2.2) numaralı denklemde fazlara ait akımlar, akımın maksimum değeriyle ilişkili olarak sunulmuştur. (2.3) numaralı denklem (2.1) ve (2.2) numaralı denklemlerin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Elde edilen denklemler faz akımlarının değerlerinden bağımsız olarak moment hesaplamasında kullanılmaktadır. (2.4) numaralı denklem (2.3) numaralı denklemin toplanmasıyla elde edilmiştir. Bu denklem BLDC motorun ürettiği toplam momentin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} T_A &= i_A K_T \, sin(\theta) \\ T_B &= i_B K_T \, sin(\theta - 2\pi/3) \\ T_C &= i_C K_T \, sin(\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \, sin(\theta) \\ i_B &= I_m \, sin(\theta - 2\Pi/3) \\ i_C &= I_m \, sin(\theta - 4\Pi/3) \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} T_A &= I_m K_T \, sin^2(\theta) \\ T_B &= I_m K_T \, sin^2(\theta - 2\Pi/3) \\ T_C &= I_m K_T \, sin^2(\theta - 4\Pi/3) \end{aligned} \tag{2.3}$$

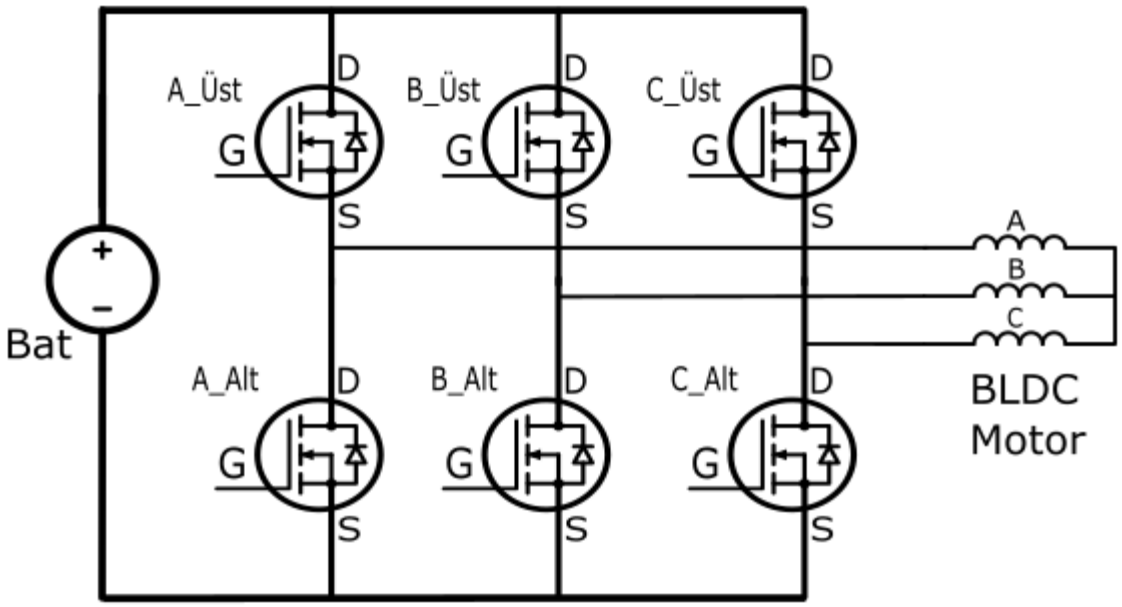
$$T = \frac{3}{2} K_T I_m \tag{2.4}$$

Denklem 2.1'deki T_A A fazının, T_B B fazının, T_C C fazının momentini temsil etmektedir. Denklem 2.2'deki i_A A fazının, i_B B fazının, i_C C fazının akım değerlerini simgelemektedir. Denklem 2.4'teki I_m akımın tepe değerini, K_T ise moment sabitini sembolize etmektedir.

2.2. Sürücü Devresi

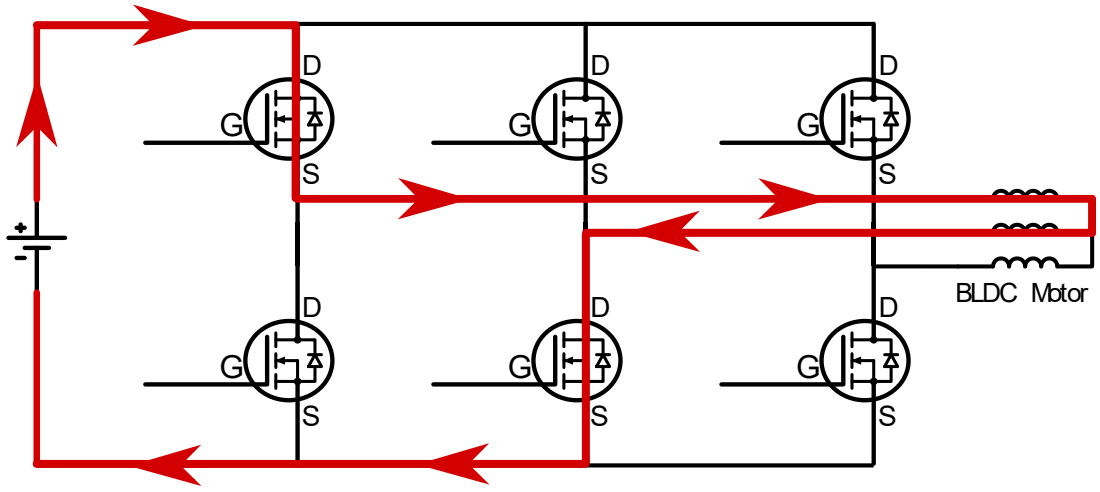
BLDC motorlarda hareket stator fazlarının belirli bir sıra içerisinde anahtarlanması ile başlar. Bu sıranın belirlenmesi rotor konumunun tespit edilmesi ile sağlanır. Sabit mıknatıstan oluşan rotor konum değiştirirken etrafındaki manyetik alanda bir değişim meydana gelir. Belirlenen rotor konumu sayesinde sürücü devresinde bulunan ilgili yarı iletken anahtarlama elemanları iletime geçirilerek enerjilendirilmesini sağlanır. Ayrıca bu sürücü devresi yardımıyla yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme uçlarına uygulanan darbe genişlik modülasyonu (PWM) değiştirilerek hız kontrolü de yapılabilmektedir.

Sürücü devresi üzerinde bulunan en önemli komponentler yarı iletken elemanlardır. Yüksek anahtarlama frekansına sahip bu elemanların bipolar jonksiyon transistör (BJT), alan etkili transistör (FET), metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET), tristör gibi farklı çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 2.2'de üç fazlı bir BLDC motorun basit sürücü devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.2. BLDC motor sürücü eşdeğer devresi

Her faz için iki adet olmak üzere altı adet yarı iletken eleman kullanılmıştır. Bu elemanlardan aynı faza ait olmayan iki tanesi iletime geçirilir. Bunlarda biri alt gruba diğeri üst gruba ait olacak şekilde seçilmektedir. Anahtarlanmış bir BLDC motorun enerji akışı Şekil 2.3'de sunulmaktadır.



Şekil 2.3. BLDC motor sürücü enerji akış şeması

Yukarıda yazan şartlara uygun altı farklı anahtarlama durumu vardır. Bu durumlar motorun dönüş yönü de dikkate alınarak belirli bir sıra ile ardışık olarak tekrarlanıp devam eder. Bu sayede hareketin devamlılığı sağlanmış olur. Motorun dönüş yönü bu sıranın değiştirilmesi ile yapılır.

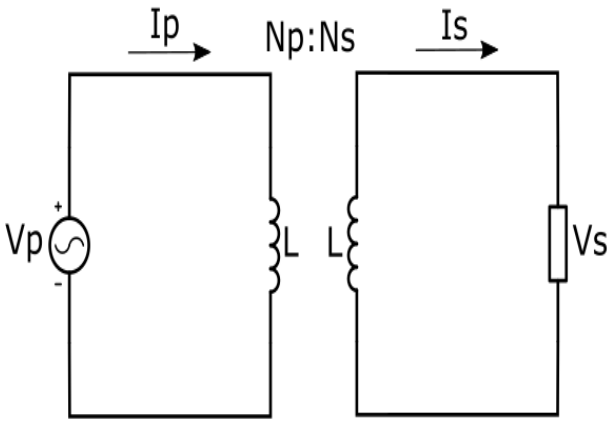
2.3. Akü

Akü elektrikli araçların en önemli bir parçasıdır. Bunun ile elektrik enerjisi depolanır ve tüm sistemin enerji beslemesi buradan sağlanır. Rejeneratif frenleme esnasında üretilen enerjinin depo edildiği yer aküdür [25]. Aküye enerji depolayabilmek için kendi geriliminden yüksek bir gerilim uygulamak gerekir. Gerilimin düşük olduğu sistemlerde enerjiyi depolamak amacıyla gerekli gerilim seviyesine ulaşmak için DC-DC yükseltici çeviriciler kullanılır.

Akülerin kurşun asit, lityum iyon gibi farklı tipleri vardır ve bunlar farklı özelliklere sahiptirler. Kurşun asit akülerde kurşun negatif elektrotta bulunur. Pozitif elektrotta ise kurşun dioksit ve elektrik yalıtım tabakası mevcuttur. Lityum iyon akülerde negatif kutup metal oksit tarafından oluşturulur. Pozitif kutup ise grafit karbon tabakasından meydana gelmektedir [26]. Lityun iyon aküler daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler [27]. Buna rağmen kurşun asit akülerde daha yüksek deşarj akımları oluşur. Kurşun asit aküler daha ağır olmaları sebebiyle elektrikli araç uygulamalarına uygun değil gibi görünselerde fiyatlarının daha düşük olması onları öne çıkarmaktadır.

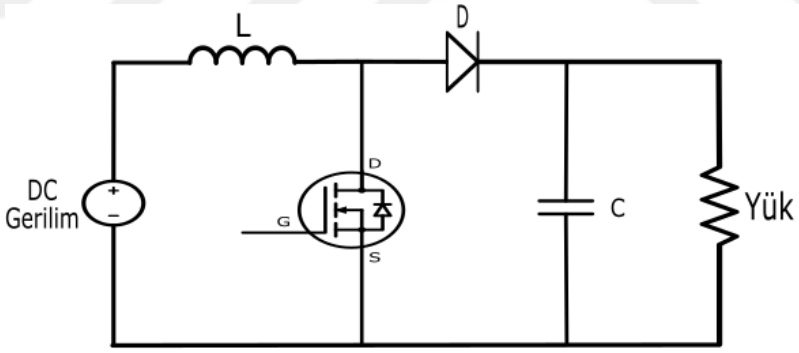
2.4. DC-DC Yükseltici

AC gerilim seviyesini değiştirmek transformatörler yardımıyla yapılır. Basit olarak anlatmak gerekirse bir nüve etrafına sarılan N_1 sarımlı bir bobin üzerine (primer) V_1 gerilimi uygulandığında nüvenin diğer tarafına sarılan N_2 sarımlı bobinin (sekonder) uçlarında indüklenen V_2 gerilimi $V_2 = V_1 \times (N_1/N_2)$ değerinde olur (Faraday ilkesi). Fakat aynı bobine (primer) DC uygulandığında herhangi bir indükleme oluşmayacağından sekonder uçlarından bir değer alınamaz. Bu nedenle DC gerilim seviyesini değiştirmek için transformatörler kullanılamaz. Şekil 2.4'de bir fazlı trafonun eşdeğer devresi gösterilmiştir.



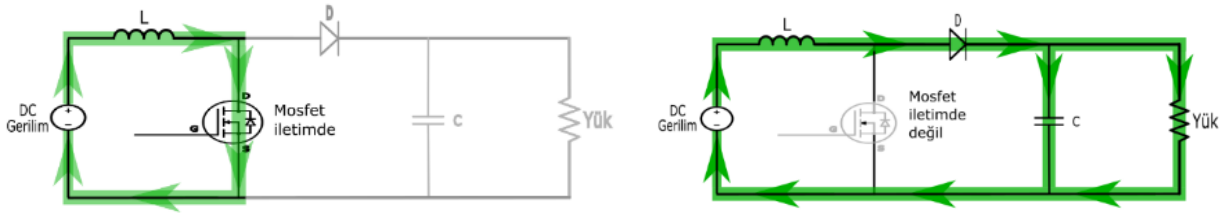
Şekil 2.4. Bir faz trafo eşdeğer devresi

Bunun yerine DC-DC yükseltici (boost converter) ve alçaltıcı (buck converter) devreler kullanılmaktadır. DC-DC yükseltici devre yapısında bobin, diyot, kondansatör ve yarı iletken anahtarlama elemanı bulunur. Anahtarlama elemanı iletimdeyken bobin üzerinden akım geçer ve enerji depolanır. Anahtarlama elemanı iletimde olmadığı sırada bobin üzerinde zıt EMK oluşur DC gerilim ve ilave zıt EMK yük üzerinden boşalır. Bu olay yüksek frekanslarda gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.5'te DC-DC yükseltici devre şeması gösterilmiştir. Bu devre şemasında yarı iletken anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır [28].



Şekil 2.5. DC-DC yükseltici eşdeğer devresi

Şekil 2.6(a)'da MOSFET'in iletimde olduğu durum için ve Şekil 2.6(b)'de MOSFET'in kesimde olduğu durum için akımın izlediği yol gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 2.6. DC-DC yükseltici enerji akışı (a) MOSFET iletimde (b) MOSFET kesimde

BLDC makinenin durması esnasında, indüklenen zıt EMK'nin değeri bataryayı depo etmek için yeterli değildir [29, 30]. Çünkü akünün gerilimi üretilen gerilimden yüksektir. Bu nedenle gerilimin yükseltilmesi gerekmektedir [31]. Fakat elde edilen gerilim AC dalga şeklinde olmadığı için sıradan trafolarla yükseltilemez. Bu nedenle DC-DC yükselten çevirici kullanılır. Yükseltici çevirici ile gerilim yükseltilirken bobinin çalışma karakteristiğinden yararlanılır. Yarı iletken anahtarlama elemanı iletimdeyken akım Şekil 2.6(a)'da görüldüğü gibi anahtarlama elemanının üzerinden akar. Kesimde olduğu zaman ise Şekil 2.6(b)'de görüldüğü gibi akımın yönü serbest geçiş diyotunun üzerinden yüke doğrudur. Yükseltici çeviricilerde akımın ve gerilimin görev çevrimine bağlı olarak yükseltme oranı aşağıdaki gibidir [32]:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \tag{2.5}$$

Burada, V_o çıkış gerilimi, V_i giriş gerilimi ve D ise anahtarın iletimde kaldığı süre olan görev çevrimidir.

2.5. STM32F407VG Kontrol Kartı

STM32F407 kartı STM firması tarafından üretilen bir mikrodenetletiyicidir. Bilgisayardan USB kablosu ile beslenebildiği gibi harici güç kaynağından 3 V veya 5 V ile beslenebilmektedir. Dördü kullanıcı için olmak üzere sekiz adet led bulunmaktadır. Bu ledler kırmızı, mavi, yeşil ve turuncu renklerdedir. Biri kullancı biri de reset komutu için kullanılabilen iki adet buton mevcuttur. 168 Mhz, 32 bit ARM Cortex M4 mimarili bir işlemciye sahiptir. Üzerinde ses sensörü ve üç eksen ivme ölçer bulunmaktadır. CS43L22 ses dönüştürücüsü sayesinde dahili olarak bulunan konnektöre ses çıkışı sağlama yeteneğine sahiptir. JP1 bağlantısnı söküp uçlara ampermetre bağlayarak kartın enerji tüketimi ölçülebilmektedir. Şekil 2.7'de STM3F407VG kontrol kartı görülmektedir.



Şekil 2.7. STM32F407 kartı genel görünümü

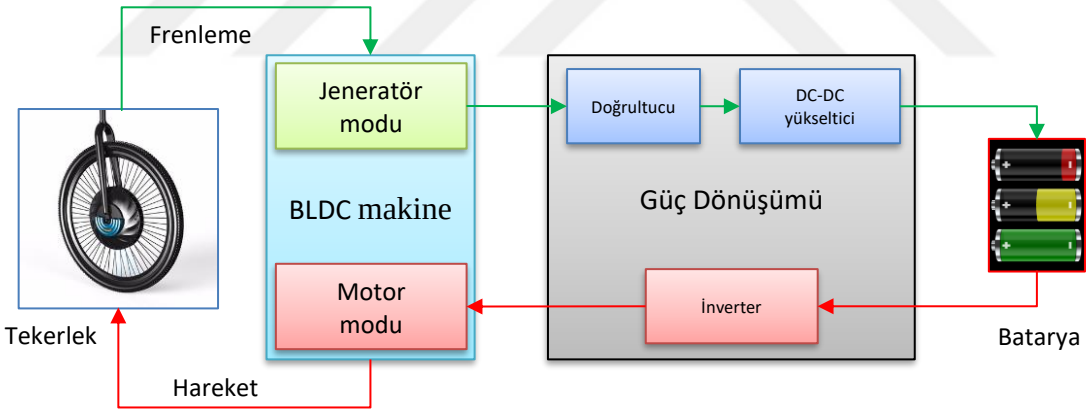
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde, BLDC makinenin motor ve jeneratör olarak çalıştırılmasında kullanılan materyaller açıklanmıştır. Bu bölüm iki ana kısma ayrılarak; birinci bölümünde benzetim çalışmaları, ikinci bölümünde deney çalışmalarının yapılması için kullanılan yöntemler ifade edilmiştir. Benzetim çalışmalarında ilk olarak rejeneratif frenleme uygulanmış olan BLDC makinenin motor olarak çalıştırılması sunulmuş ve daha sonra da sürme işlemi biten BLDC makinenin rejeneratif frenlenme çalışmaları verilmiştir.

3.1. Benzetim Çalışmaları

3.1.1. Motor Sürme Benzetim Çalışmaları

Benzetimi yapılan sistemin genel bir blok diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. BLDC makine iki modda çalıştırılmaktadır; ilk olarak motor ve ikinci olarak da jeneratördür. Elektrikli araç hareket ederken bataryadan enerji harcanır. Elektrik akımının izlediği yol batarya, inverter ve motordur. Elektrik enerjisi depo edilirken de bir diğer ifadeyle rejeneratif frenleme modunda da elektrik akımı BLDC jeneratör, doğrultucu, DC-DC yükseltici çevirici ve bataryadır.

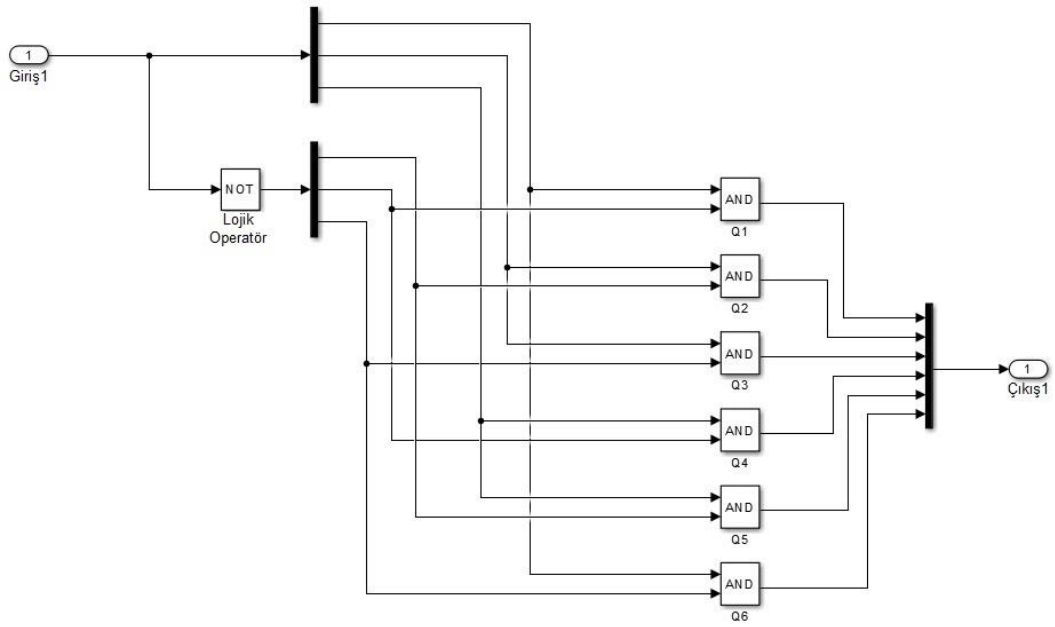


Şekil 3.1. Benzetimi yapılan çalışmanın blok diyagramı

Bu çalışmada, ilk önce BLDC makinenin motor olarak çalıştırılması hedeflenmiştir. Matlab/Simulink benzetiminde, motor olarak "Permanent Magnet Synchronous Machine" bloğu kullanılmıştır. Bu blokun iki çeşidi vardır. Bunlardan biri tork verisini isterken diğeri de açısal hız verisini ister. Uygulanan tork veya açısal hız verisi milde oluşan tork veya açısal hız değerini temsil eder. Bu çalışmada, sabit yük düşünülerek benzetim çalışması yapıldığından tork verisi tercih edilmiştir. Uygulamaların yapılması esnasında BLDC motorun enerjisinin aküden temin edileceği düşünülmüş ve benzetim çalışmasında enerji bir DC kaynaktan

sağlanmıştır. Motorun sürülmesinde anahtarlama bloğu olarak "Universal Switch" kullanılmıştır. Universal Switch bloğunda anahtarlama elemanı olarak MOSFET/Diode seçilmiştir.

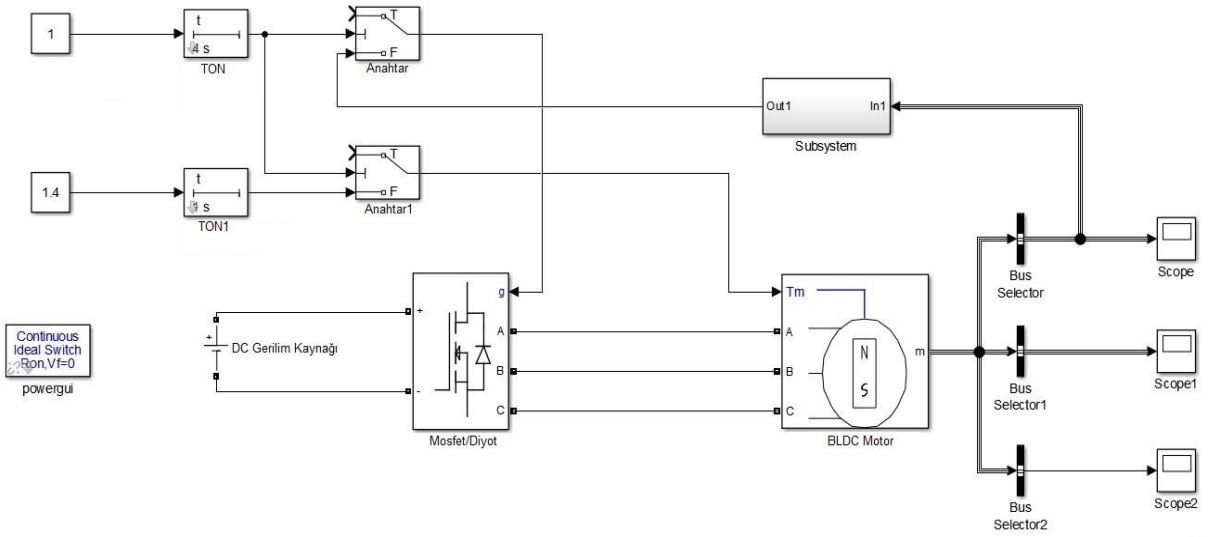
BLDC motorun dönmesi için fazlar sırayla anahtarlanmıştır. Bu sıranın belirlenmesi için rotor konumunun bilinmesi gerekir. Rotor konumu, motor bloğunun "m" ucuna bağlanan "bus selector" bloğundan hall etkili sinyalin alınmasıyla belirlenmiştir. Üç fazlı bir BLDC motorda rotor konumunu belirlemek için üç adet hall etkili sensör bulunur. Sinyallerin geldiği hall etkili sensörlere göre iletim koşulu sağlanan ilgili MOSFET'ler iletime geçer. Bu durum sinyallerin karşılaştırma bloklarında işlenmesiyle sağlanmıştır. Şartları sağlayan MOSFET'lerin G (gate) ucuna sinyal gönderilerek iletime geçirilmiştir. Şekil 3.2'de verilen "AND" blokları karşılaştırma için kullanılmıştır. Buna göre "Giriş1" girişi hall sensör'den alınmıştır. "Çıkış1" çıkışı ise anahtarlama elemanı olan MOSFET'e yani "Universal Bridge" bloğuna bağlanmıştır. NOT lojik operatörü ile çalışma esnasında hangi hall sensör veya sensörlerin pasif olduğu bilgisi alınmıştır. Bu sayede rotorun nerede olmadığı bilgisinin elde edinilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sinyaller "AND" bloklarında karşılaştırılmıştır. Bulunan altı adet "AND" bloğu altı farklı MOSFET için iletim koşulunun sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmiştir. Her rotor pozisyonu için "AND" bloklarından iki tanesi aktif olarak bağlı olduğu MOSFET'i iletime geçirmiştir.



Şekil 3.2. BLDC motor anahtarlaması için kullanılan lojik devre

Sistemde simülasyon ilk aşamalarda 10 saniye için çalıştırılmıştır. Rejeneratif frenlemenin gerçekleştirilmesi için simülasyonun başlamasından 4 sn sonra bir devre yardımıyla MOSFET'lere gönderilen sinyal ve BLDC makineye gönderilen tork verisi kesilerek makinenin kendi ataletiyle durması sağlanmıştır. Bu esnada alınan "consecutive zero crossing" hatası "set_param('simulinkdosyaismi','MaxConsecutiveZCsMsg','none')" kodunun yazılmasıyla giderilmiştir. Simülasyon çok ağır bir şekilde ilerlediğinden dolayı tork verisine 1 sn gecikme eklenmiş ve bu sayede programın hızlanması sağlanmıştır. Sistemi kurma aşamaları tamamlandıktan sonra deney çalışması ile karşılaştırmak için simülasyon 16 saniye yapılmıştır. BLDC makine 12 saniye boyunca motor olarak çalıştırılmıştır. Deney aşamasında motor boşta çalıştırıldığı için simülasyonda tork verisi sıfıra ayarlanmış ve gecikme kaldırılmıştır.

Şekil 3.3'de, BLDC motorun anahtarlama bloğu ve verilerin alınması gösterilmiştir. "TON" blokları çekmede gecikmeli zaman rölelerini temsil etmiştir. Üstte bulunan TON bloğu dört saniye olarak ayarlanmıştır. Bu sayede ilk dört saniye boyunca BLDC makineye tork, MOSFET'e de anahtarlama sinyalinin ulaştırılması sağlanmıştır. "Switch" bloklarına dördüncü saniyede darbe sinyali gönderilerek "Switch" kontaklarının konumu değiştirilmiş ve veri akışı kesilmiştir. Bu durum ilk dört saniye boyunca BLDC makineye enerji verilmesini dördüncü saniyeden sonra da BLDC makinenin yavaşlayarak kendiliğinden durmasını sağlamıştır. Altta bulunan bulunan "TON" bloğu bir saniye olarak ayarlanmıştır. Bu blok ile benzetimin hızlandırılması için tork verisinin bir saniye gecikmesi sağlanmıştır. "Subsystem" Şekil 3.2'de görülen sistemin kapalı halidir. Fazla yer kaplamaması ve görüntünün daha anlaşılabilir hale getirilmesi için "subsystem" bloğunun içine konulmuştur. "Scope" bloklarında "bus selector" blokları yardımıyla seçilen veriler gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3. BLDC motorun sürülmesi esnasında kullanılan bloklar

Buraya kadar olan kısmın aşama aşama sağlıklı bir şekilde benzetimi yapıldıktan sonra aküyü benzetime dâhil etmek için DC kaynak yerine "Battery" bloğu kullanılmıştır. Benzetim esnasında hall sinyali, stator akımı, devir sayısı vb. ölçümler BLDC makinenin "m" ucundan alınan sinyal ve "scope" bloğu yardımıyla yapılmıştır. Aynı şekilde "Battery" bloğundan da değerler alınmıştır.

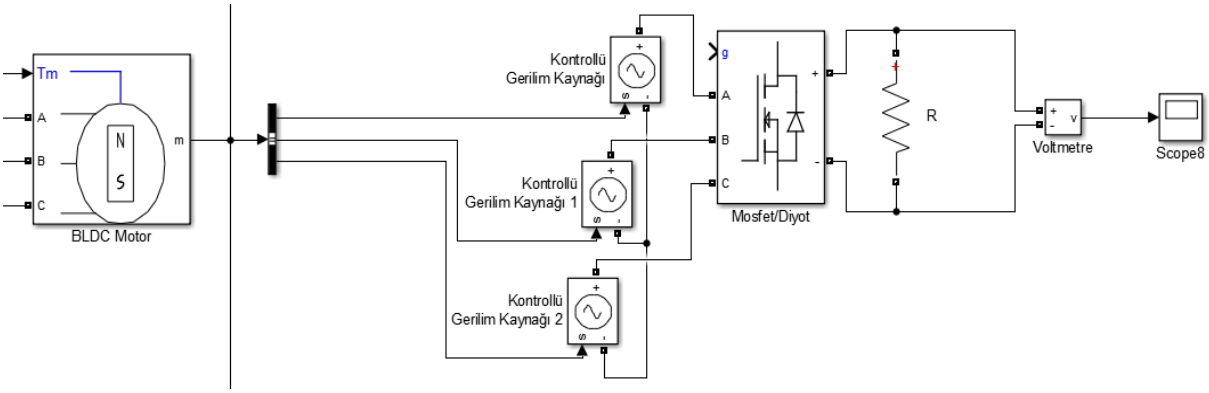
3.1.2. BLDC Makine Rejeneratif Frenleme Benzetim Çalışmaları

BLDC motorun sürme işlemleri tamamlandıktan sonra rejeneratif frenleme kısmına geçilmiştir. BLDC makine bloğunun "m" ucundan alınan veriler arasında zıt EMK'da vardır.

0–12 saniye arası BLDC makineye enerji verilen zaman aralığıdır. Onikinci saniyeden sonra ise makineden enerjinin kesilip kendi ataletiyle durmasının beklendiği bölümdür. Ayrıca bu süreden sonra da rejeneratif frenleme yapılmıştır. Motor yavaşlarken fazlarda gerilim indüklemesi beklenir. Üretilen enerjinin aküye depolanabilmesi için bu gerilimin akü geriliminden daha yüksek bir değere ulaştırılması gerekir [33].

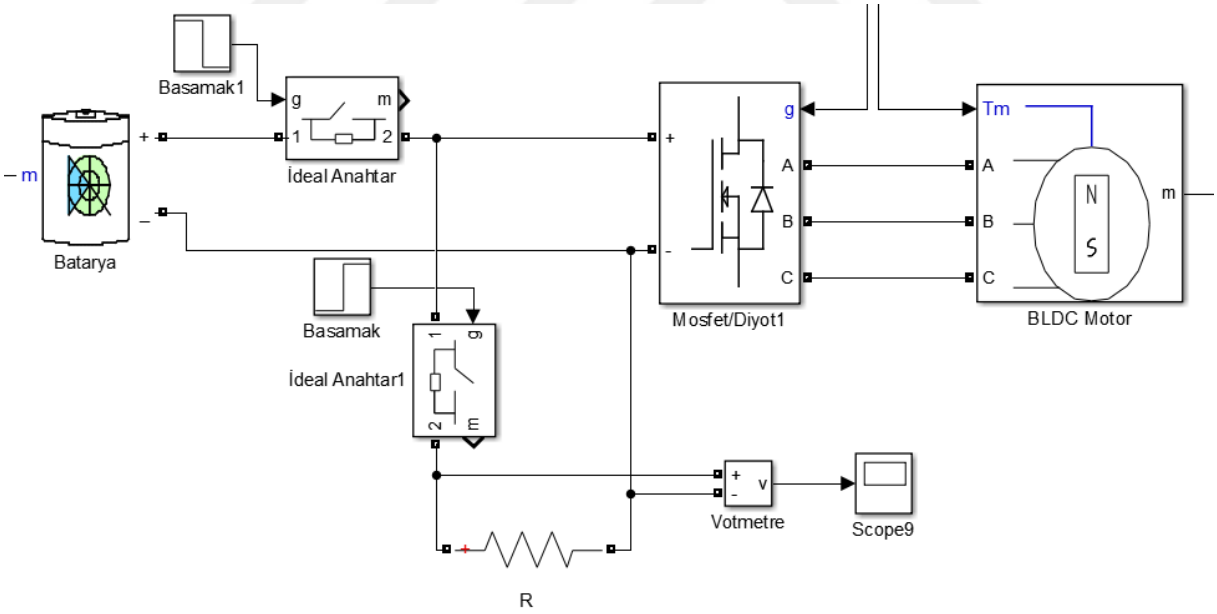
Simülasyonlar sırasında ilk önce gerilim kullanabilir hale getirilmiştir. BLDC makinenin "m" ucundan ölçülen zıt EMK değerini direnç, bobin gibi devre elemanlarına doğrudan bağlamak Matlab/Simulink programında mümkün değildir. Fakat "Bus selector"'den alınan sinyal, blokların kontrol uçlarına bağlanabilir. Bu nedenle grafikte görülen veriler kontrollü gerilim kaynaklarının kontrol ucuna bağlanmıştır. Kontrollü gerilim kaynaklarının negatif kutupları birbirlerine kısa devri edilmiştir. Elde edilen gerilim MOSFET'lerin diyotları

sayesinde doğrultulmuş ve 20 Ω'luk bir direnç üzerinden gerilim değeri alınmıştır. Şekil 3.4'te zıt EMK'nın elde edilmesi yönteminin benzetim modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yöntem 1'e göre zıt EMK'nın elde edilmesi modeli

Başka bir yöntem olarak da kullanılacak olan zıt EMK'nın BLDC motorun sürüldüğü MOSFET sürücünün uçlarından alınmasıdır. Bu durumda direnç bu iki uç arasına bağlanır. Bu durum Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

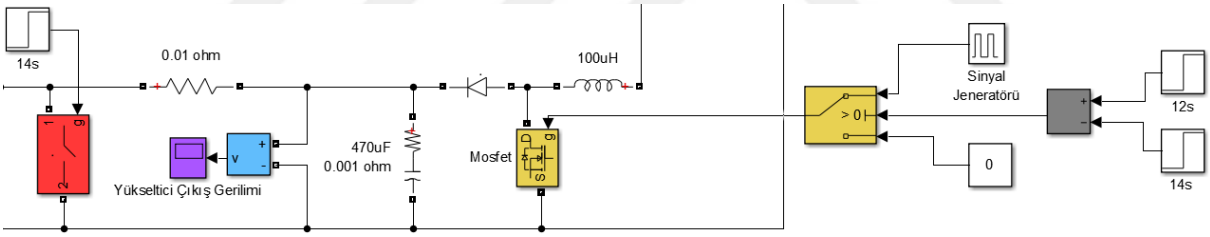


Şekil 3.5. Yöntem 2'ye göre zıt EMK'nın elde edilmesi modeli

Bu iki yöntemi birbirinden ayıran en önemli fark direnç yani elektriksel yük değiştirildiğinde yapılan bu etkiye karşı sistem tarafından tepki gösterilip gösterilmediğidir.

Bu yöntemlerden biri sayesinde elde edilen zıt EMK'nın, aküye gönderilmesinden önce bir regülasyonun uygulanması gerekir. Fakat Matlab/Simulink programında zener diyot olmadığı için regülasyon devresinin kurulması burada gerçekleştirilmemiştir. Bunun yerine zıt EMK yükseltici konvertör yardımıyla belirli değere çıkarılarak doğrudan aküye yönlendirilmiştir.

Yükseltici konvertörü oluşturan bloklar Şekil 3.6'da detaylıca verilmiştir. Yükseltici konvertör kısmındaki "pulse generator" bloğu yüksek frekans ile çalıştığından simülasyonu yavaşlatmıştır. Rejeneratif frenlemeden elde edilen enerjinin zamanla azalması nedeniyle geri dönüştürülen enerji oldukça önemsiz seviyelere geldikten sonra "pulse generator" ile yükseltici konvertörde bulunan MOSFET bağlantısı kesilmiştir. Bu olay ondördüncü saniyede gerçekleştirilmiştir. Bu sayede simülasyon daha hızlı bir hale getirilmiştir. Burada bulunan matematiksel işlem bloğu ile şekilde görülen anahtarın kontağı değiştirilerek MOSFET'in onikinci saniyede devreye girip ondördüncü saniyede devreden çıkması sağlanmıştır. "Pulse Generator" bloğu tarafından üretilen anahtarlama sinyali "MOSFET" bloğuna bu aralıkta ulaşmıştır.

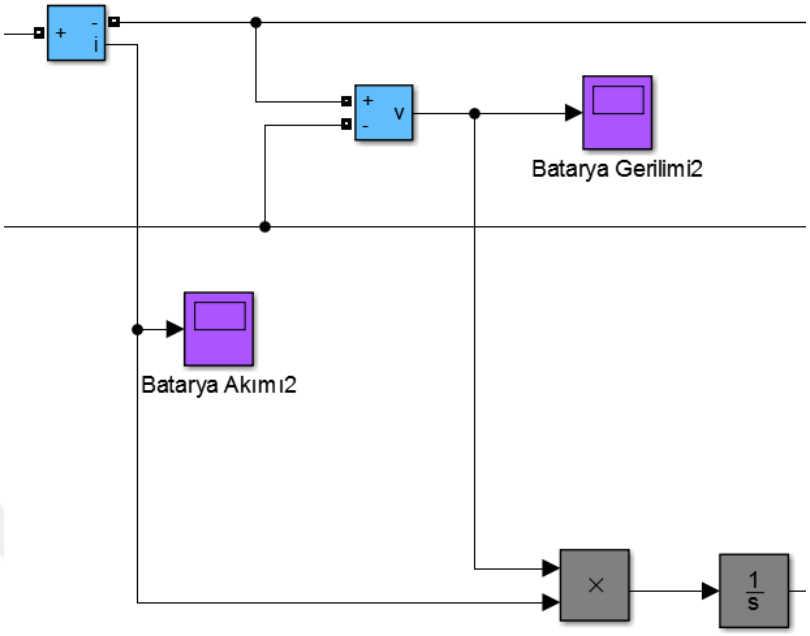


Şekil 3.6. DC-DC yükseltici

DC-DC yükselten konvertörün çıkışında bulunan anahtar ondördüncü saniyede devreye girerek kondansatörlerin üzerinde bulunan gerilimin direnç üzerinden deşarj edilmesini ve alınan ölçüm değerlerinin parazitsiz olmasını sağlamıştır. Şekil 3.6'da görülen 0,01 Ω'luk direnç ile hat direnci sembolize edilmiştir. Ayrıca, yükseltici konvertör hattı üzerinde bulunan diyotlar geri beslemeyi önlemek için konulmuştur.

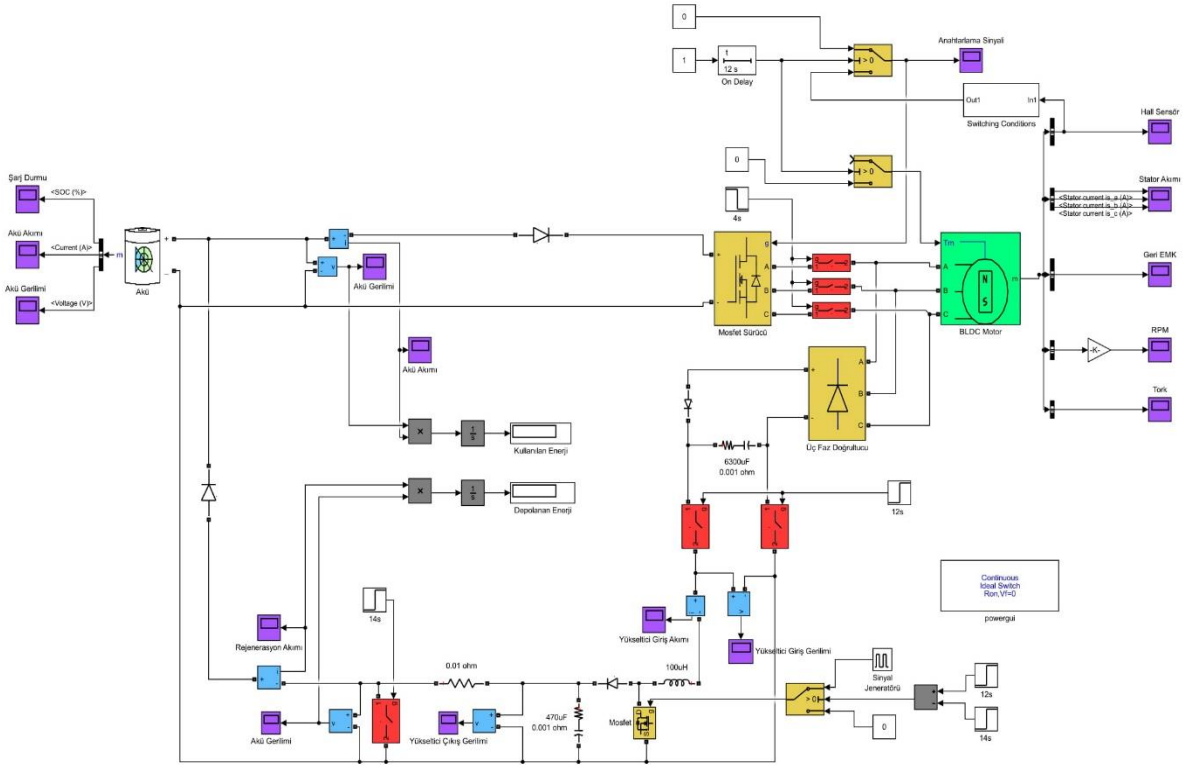
Sistemde harcanan enerji, geri dönüştürülen enerji ve geri depolanan enerjinin gösterilmesi için çarpma işlemi ve integral blokları kullanılmıştır. Aküden çıkan gerilim ve akım değerlerinin ölçülmesiyle $P = V \times I$ denkleminden çekilen anlık güç değeri bulunmuştur. Gücün zamana göre integrali alınarak toplam harcanan enerji hesaplanmıştır. Geri depolanan enerji DC-DC yükselten çevirici çıkışından aküye doğru giden yoldaki akım ve gerilim

değerlerinin ölçülmesiyle bulunmuştur. Yine $P = V \times I$ denkleminden bulunan gücün integrali alınmıştır. Bu hesaplamanın benzetim blokları Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Enerji hesaplama blokları

Kurulan sistemin tüm bloklarının birleştirilmiş son hali Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Benzetim çalışması yapılan sistemin tüm görüntüsü

3.2. Deney Çalışmaları

3.2.1. BLDC Motor Sürme Deney Çalışmaları

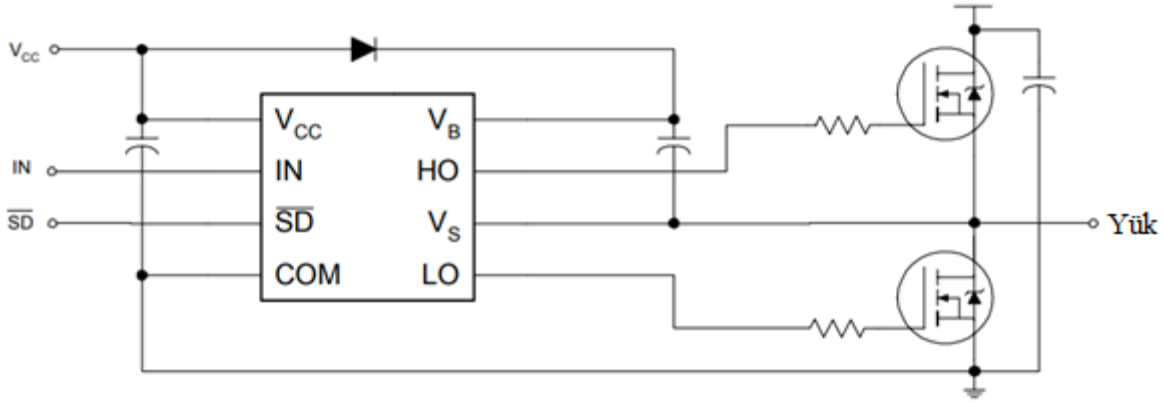
Yapılan çalışma 250 W güce sahip 48 V gerilimle çalışan bir tekerlek içi (hub) BLDC makine ile gerçekleştirilmiştir. Tekerlek içi BLDC motorlar daha çok elektrikli bisiklet, elektrikli motorsiklet gibi araçlarda kullanılmaktadırlar. Bu tip motorlara yüksek tork elde edebilmek için daha fazla kutup sarılmaktadır. Daha fazla kutup olması nedeniyle de devir sayıları göreceli olarak daha düşüktür.

Deneyler esnasında kullanılan motor sensörlü tiptedir. Sensörler stator üzerine birbiri arasında 120'şer derece açı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Motorda beş adet sensör kablosu bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi sensörlerin besleme uçlarıdır ve 5 V gerilim ile beslenmiştir. Diğer üç tanesi motorun konumunu belirlememize yarayan hall sensör uçlarıdır ve her faz için bir adet vardır.

Motorun hareketi üç faz sürücü devresi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu devrede yarı iletken eleman olarak 75NF75 kodlu MOSFET'ler kullanılmıştır. Bu MOSFET'lerde üst çalışma geriliminin Drain-Source arası 75 V üst çalışma akımının Drain-Source arası 75 A

olduğu bilgisi kullanım kitapçığından elde edilmiştir. Kullanılan MOSFET'lerin iletime girme ve iletimden çıkma zamanları da nano saniyeler mertebesindedir.

MOSFET'leri anahtarlamak için IR2104 motor sürücü entegreleri tercih edilmiştir. Bu entegrelerin bağlantı şeması Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

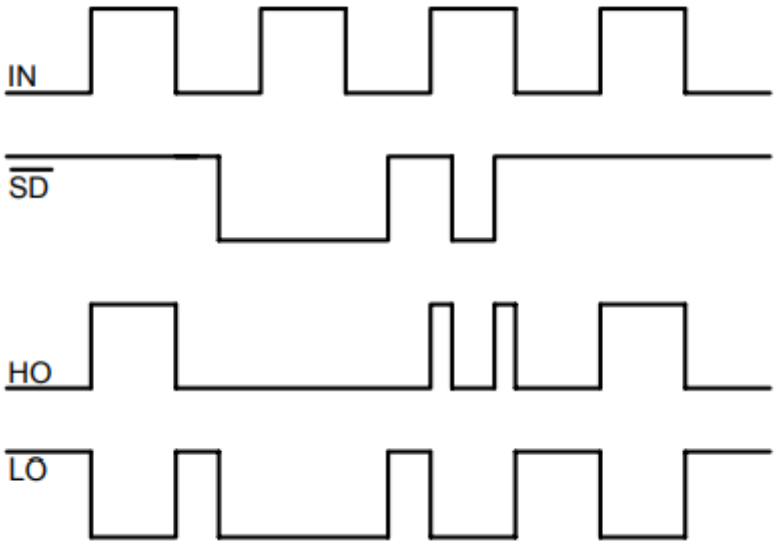


Şekil 3.9. IR2104 bağlantı şeması

V_B ve V_S arasına bağlanan kondansatör üstte bulunan ve artı kutbun oluşmasını sağlayan MOSFET'in tetiklenmesi için kullanılmaktadır. Değeri 47 µF 50 V olarak seçilmiştir. Bu kondansatörün güç kaynağına geri besleme yapmasını engellemek için V_{CC} ile V_B arasına kodu SB560 olan diyot konulmuştur. Bu diyotların çalışma sınırları ters gerilimde tepe değeri 60 V, etkin değeri 42 V olacak şekildedir. İletim esnasında da 5 A'e kadar akım dayanımına sahiptirler. Üstte bulunan MOSFET'in anahtarlanması ile çalışacağı nedeniyle de hızlı tepki verebilmesi için schotky tipinde diyot seçilmiştir.

Giriş kısmında bulunan kondansatör ise IR2104'ün çalışması için zorunlu bir ekipman değildir. Oluşabilecek gerilim dengesizliklerini ortadan kaldırılması için kullanılmıştır. Değeri 10 µF 50 V'tur.

IR2104 çalışmak için bir besleme gerilimine ihtiyaç duyar. Ürünün kullanım kılavuzunda bu besleme gerilimi 10 V – 20 V arasında tavsiye edilmiştir. Bu gerilim *Vcc* ile *COM* girişleri arasına uygulanmaktadır. IN ve SD girişlerine ise istenen durumlarda 5 V gerilim uygulanmıştır. Bu girişler MOSFET'leri tetikleyen *HO* ve *LO* uçlarını aktif etmektedir. Gerilim uygulanan uçlara göre aktif edilen çıkışların lojik tablosu Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



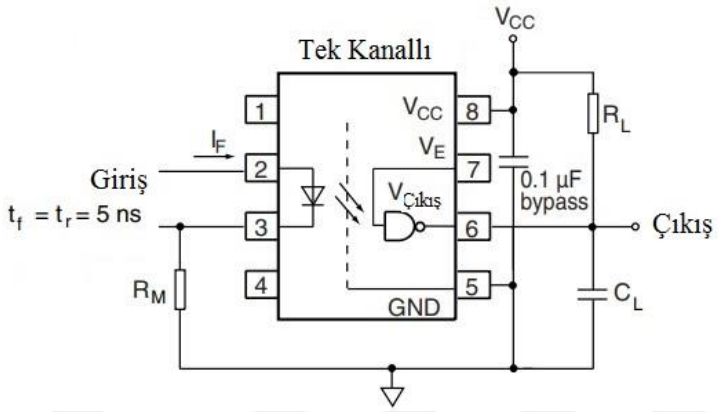
Şekil 3.10. IR2104 doğruluk değer grafiği

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere lojik olarak hem *IN* = 0, *SD* = 0 iken hem de *IN* = 1, *SD* = 0 iken *HO* = 0 ve *LO* = 0 konumundadır. Bu çalışmada *HO* ve *LO* uçlarını pasif etmek için tetikleme sinyali lojik olarak *IN* = 1, *SD* = 0 olarak kullanılmıştır.

IR2104 entegresinin *IN* ve *SD* uçları doğrudan kontrol kartının dijital çıkışlarından beslenmemiştir. Yüksek akım, yüksek gerilim, kısa devre veya oluşması istenmeyen başka durumlarda kartın zarar görmesini engellemek için kontrol kartı ile IR2104 arasına iki devrenin elektriksel olarak birbirinden yalıtılmasını sağlayan optokuplör entegresi konulmuştur. Bu çalışmada tercih edilen optokuplör entegresi 6N137 dir. 6N137 her bir sinyal ucu için bir tane olmak üzere toplam altı adet kullanılmıştır. Bu entegre diğer optokuplör entegrelerine nazaran fiyat olarak daha yüksektir. Buna rağmen tercih edilmesinin nedeni nano saniyeler mertebesinde cevap verme hızıdır. Bahsi geçen fiyatı daha düşük optokuplörlerde bu olay mikro saniyeler mertebesindedir.

6N137 optokuplör tersinir çalışan bir devre elemanıdır. Girişine gerilim uygulandığı zaman çıkışı pasif hale gelmektedir. Şekil 3.11'de de görüldüğü üzere çıkışındaki V_{CC} ve *GND* uçları haricen bir kaynaktan beslenmektedir. Ayrıca bu iki uç arasına bypass kondansatörü bağlanmaktadır. Bu çalışma için tarafımızdan bağlanan bypass kondansatörün değeri 0,1 µF 50 V'tur. V_E ucu girişe enerji verilmediği zaman çıkış ucundan, 6 numaralı pinden, alınması istenen sinyaldir. Bu çalışmada V_E ile V_{CC} aynı kaynaktan beslenmiştir dolayısı ile aynı gerilim seviyesine sahiptir. Çıkış kısmı pasif yapılmak istendiğinde girişe enerji verilir bu sayede V_E

$V_{Çıkış}$'a eşit olur. $V_{Çıkış}$ ile V_{CC} aynı gerilim seviyesine sahip olduğu içinde çıkışa sıfır volt yansımış olur. Çıkış aktif yapılmak istenildiğinde ise girişe uygulanan gerilim kesilir. $V_{Çıkış}$ pini 0 V olur. Dolayısıyla çıkış *Vcc* tarafından beslenir. Direnç değerleri R_M = 75 Ω, R_L = 300 Ω olarak seçilmiştir. *Vcc* ve dolayısıyla V_E uçlarına 5 V gerilim uygulanmıştır.



Şekil 3.11. 6N137 bağlantı şeması

Kontrol kartı olarak STM32F407 kartı tercih edilmiştir. STM'nin 32F4 serisinin tercih edilmesinin nedeni Matlab/Simulink ortamında programlanabilmesidir. Kartın kütüphanesini yüklendikten sonra istenen program bloklar vasıtası ile yazılıp Simulink vasıtası ile derlenir. Gerçek zamanlı olarak Simulink ortamında veri izleme olanağı da sağlar. Karttan bilgisayar ortamına veri atmak için UART modülü kullanılmıştır.

Bu çalışmada iki adet STM32F407 kartı kullanılmıştır. Bir tanesi motor kontrol, rejenerasyona geçiş anı ve hall sinyallerin işlenmesi gibi deneyin yapılmasını sağlayan karttır. Diğeri ise bu deney sırasında elde edilen verilerin sensörler ve UART yardımıyla bilgisayar ortamına alınmasını sağlayan karttır. Bu iki işlem aslında tek bir karttan da yapılabilir. Başlangıçta yapılan deneylerde tek kart kullanılmıştır. Fakat tek bir karta fazla giriş çıkış modülü bağlanması ve PWM üretilmesi gibi nedenlerden dolayı ölçüm yapılan pinlerdeki elektriksel gürültüler kabul edilebilir düzeyin üstünde olmuştur. Bu nedenle ikinci bir kart ölçümler için kullanılmıştır. Bu durumda parazitlerin en düşük düzeye indiği belirlenmiştir.

Elektriksel gürültüler sadece yeni kart kullanılarak giderilmemiştir. Yeni kart kullanılmakla birlikte ortalama alma yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntem ile alınan bir veri kümesi tek tek toplanıp aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu kümenin sayısı 20 bin olarak belirlenmiştir. Yani her 20 bin veride bir aritmetik ortalama alarak tek bir veri elde edilmiştir.

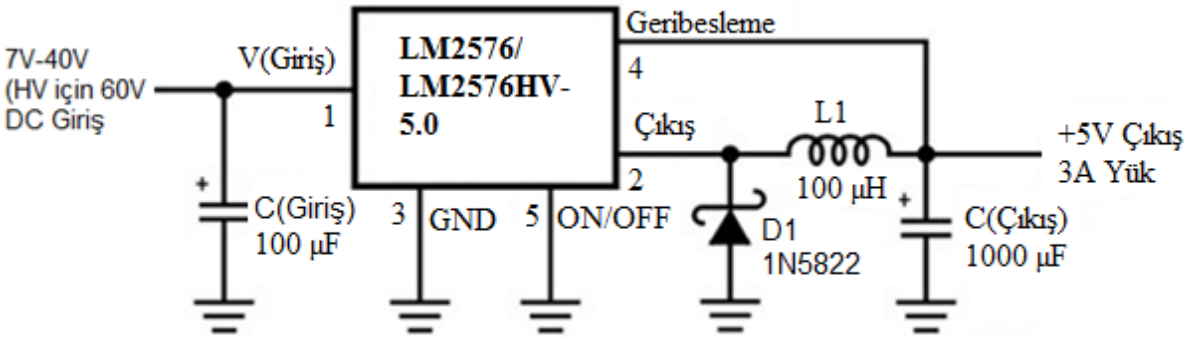
Bu işlem yazılımsal olarak Matlab'da gerçekleştirilmişir. Bu çözüm yolu gürültülerin azaltılmasında önemli bir rol oynamıştır.

Yapılan çalışmada alınan değerler yaklaşık olarak 12 saniye boyunca boşta çalıştırılan bir BLDC motorun ve bu süre sonunda rejeneratif frenleme yaptırılarak durdurulması sağlanan bir sistemin verileridir. Bu sisteme enerji aküler tarafından sağlanmıştır. BLDC motor çalıştığı 12 saniye boyunca aküden akım çekmiş yani enerji tüketmiştir. Bu sürenin sonunda rejeneratif frenlemenin başlaması ile aküye kısa sürede olsa enerji depolanmış yani enerji üreten konuma geçilmiştir. Önce aküden enerjinin deşarj olması sonra durma esnasında akünün bir miktar şarj edilmesi akımın yönünün değiştirilmesi vasıtasıyla sağlanmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde ilk adım kullanılan röle kartındaki rölelerin kontaklarının konumlarının değiştirilmesidir.

12 saniye dolduğunda kontrol kartımız olan STM32F407'den röle bobinlerine enerji gönderilerek kontaklarının konum değiştirilmesi sağlanmıştır. Bu esnada IR2104 motor sürücü entegrelerine lojik olarak $IN = 1$ ve $SD = 0$ olacak şekilde enerji gitmesi sağlanmıştır. Bu sayede IR2104 ün anahtarlama uçları olan *HO* ve *LO* lojik sıfıra eşit olmuş ve tüm MOSFET'ler iletimden çıkmıştır. Rölelerin kontak değiştirmesiyle de sürücü kartına bağlı olan BLDC makine faz iletkenleri üç faz doğrultucuya bağlanmıştır.

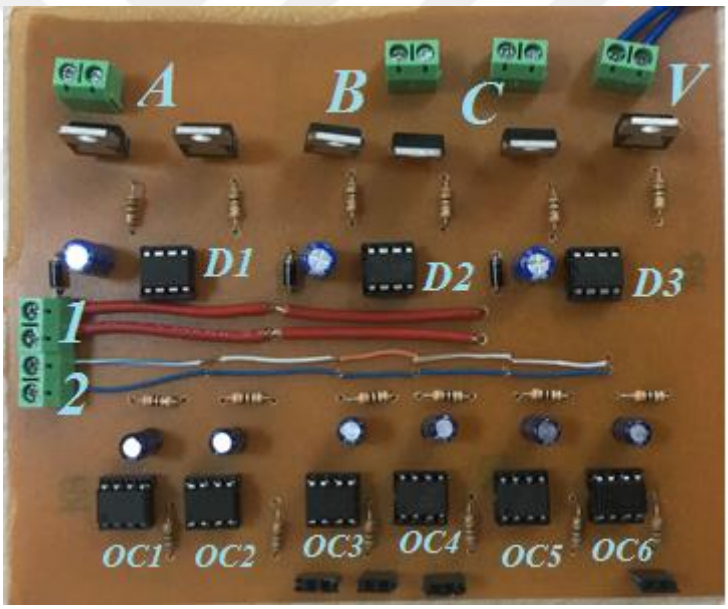
Üç faz doğrultucunun çıkışına üretilen gerilimi akünün geriliminden yukarı çekmek amacıyla CN6009 koduna sahip olan ayarlı DC-DC yükseltici çevirici kartı bağlanmıştır. Bu sayede üretilen enerji aküye depo edilebilmiştir.

Deneyler aşamasında bilgisayara veri aktarıldığı için UART ve kontrol kartları bilgisayardan beslenmiş röle kartı da kontrol kartından beslenmiştir. Sürücü kartında tüm ekipmanlara enerji gerilim düzenleyicileri vasıtası ile akü grubu tarafından sağlanmıştır. İki adet gerilim düzenleyicisi kullanılmıştır. İlki hall sensörleri ve optokuplör çıkışını besleyen 5 V gerilim düzenleyicisidir. İkincisi motor sürücü entegrelerinin beslemesi olarak 12 V gerilim düzenleyicisidir. 5 V için LM2576HVT-5.0 P+ gerilim düzenleyici entegresi, 12 V için ise LM2576HVT-12 P+ gerilim düzenleyici entegresi kullanılmıştır. Bu kodlardaki HV entegrenin yüksek giriş geriliminde çalışabilecek yetenekte olduğu, P+ ise pozitif çıkış verdiği anlamına gelmektedir. Gerilim düzenleyicilerin bağlantı şeması Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Giriş tarafındaki kondansatörün değeri 100 µF 63 V, çıkış tarafındaki kondansatörün değeri ise 1000 µF 63 V'tur.



Şekil 3.12. Gerilim düzenleyicilerin bağlantı şeması

Deneyler sırasında öncelikli hedef BLDC motorun sürülmesi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle ilk olarak sürücü kartı tasarımı yapılmış ve basılmıştır. Sürücü kartının son hali Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Tasarlanan sürücü devresi

Şekilde görülen A, B ve C ikili klemenslerine BLDC makine faz iletkenleri bağlanmıştır. Bu ikili klemenslerin sadece bir ucu kullanılmış, diğer uçları boş bırakılmıştır. Bunlar arasında elektriksel olarak hiçbir bağlantı yoktur. V klemensi Şekil 3.17'deki "Bat" gerilimine karşılık gelmektedir. Başka bir ifadeyle motora uygulanacak olan gerilimdir. D1, D2 ve D3 entegreleri ise yukarıda bahsedilen IR2104 motor sürücü entegreleridir. 1 numaralı klemens Şekil 3.13'te görülen V_{CC}'ye yani IR2104 besleme gerilimine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada 12 V olarak uygulanmıştır. OC ile isimlendirilmiş devre elemanları optokuplörlerdir.

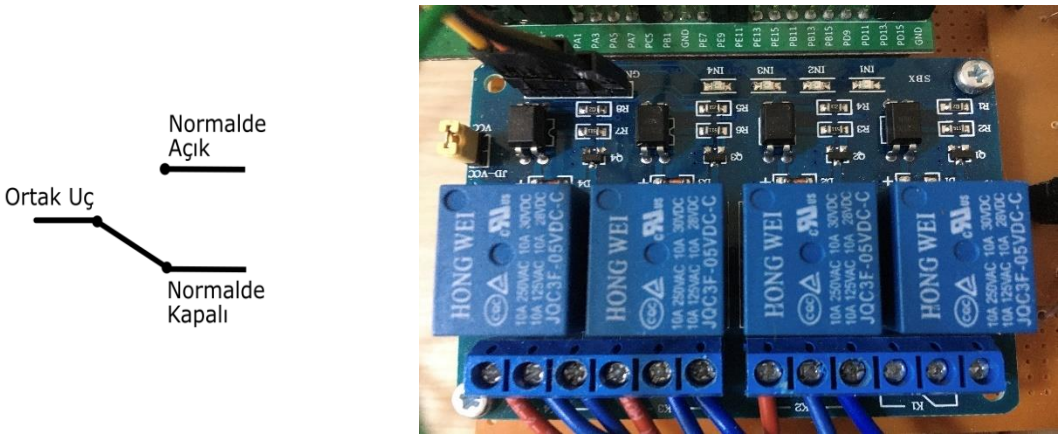
Şekil 3.9'da gösterilen ve 5 V olarak uygulanan V_{CC} gerilimi 2 numaralı klemensin uçlarına bağlanmaktadır. Şekil 3.13'ün alt kısmında görülen dişi bağlantı noktaları sürücü kartı ile kontrol kartı arasındaki bağlantının yapılması için kullanılmıştır. En sağda bulunan ikili dişi bağlantı noktasının sağdaki yuvası kontrol kartı ile sürücü kartının eksi kutuplarının ortaklanması için kullanılmıştır. Soldaki yuvanın herhangi bir elektriksel bağlantısı yoktur. Diğer altı bağlantı noktası MOSFET'lerin uygun zamanda anahtarlanması için optokuplörler aracılığı ile IR2104 girişine gönderilen sinyaller için kullanılmıştır.

Şekil 3.13'teki 1 ve 2 numaralı klemenslere enerji, gerilim düzenleyici devrenin çıkışından sağlanmıştır. Sistemin neredeyse tamamının enerji ihtiyacı aküden karşılanmıştır. Akü ile gerilim düzenleyici devresi arasında doğrudan bağlantı vardır. Şekil 3.14'ün sağ tarafında görülen ikili klemens grubuna aküden gelen artı ve eksi kutuplar bağlanmıştır.



Şekil 3.14. Tasarlanan gerilim düzenleyiciler

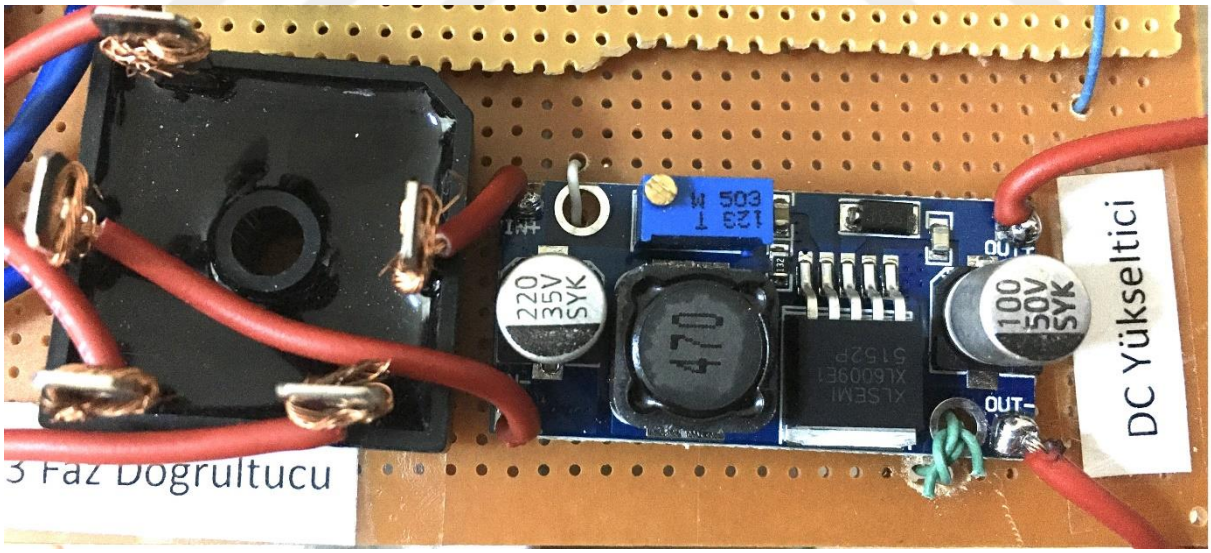
Deneyler sırasında kullanılan röle kartı şekik 3.15'te verilmiştir. BLDC makine faz uçları röle kartındaki rölelerin *COM* uçlarına, *NC* uçları motor sürücü kartına, *NO* uçları ise üç faz doğrultucu uçlarına bağlanmıştır. 12 saniye geçtikten sonra hem MOSFET'lerin iletimden çıkması için hem de röle kartındaki rölelerin kontaklarının yer değiştirilmesi için sinyaller gönderilmiştir. Kontakların yer değiştirmesi ile BLDC makine faz iletkenleri sürücü kartından üç fazlı doğrultucuya bağlanmış ve uygulanan enerji kesilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.15. Kullanılan rölenin (a) kontak yapısı (b) görünmü

Uygulanan enerjinin kesilmesiyle dönmeye devam eden BLDC makine jeneratör olarak çalışmaya başlar ve faz uçlarında gerilim indüklenir. Üretilen bu enerjiyi bataryaya depolamak için DC'ye çevirmek ve batarya geriliminden daha yüksek bir değere yükseltmek gerekir. Üç fazlı doğrultucu ile DC'ye dönüştürülen gerilim CN6009 DC-DC yükseltici çevirici kartı yardımıyla da batarya geriliminden daha yüksek bir seviyeye yükseltilmiştir. Kullanılan üç faz doğrultucu ve DC-DC yükseltici sistemi şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Üç faz doğrultucu ve DC-DC yükseltici çevirici

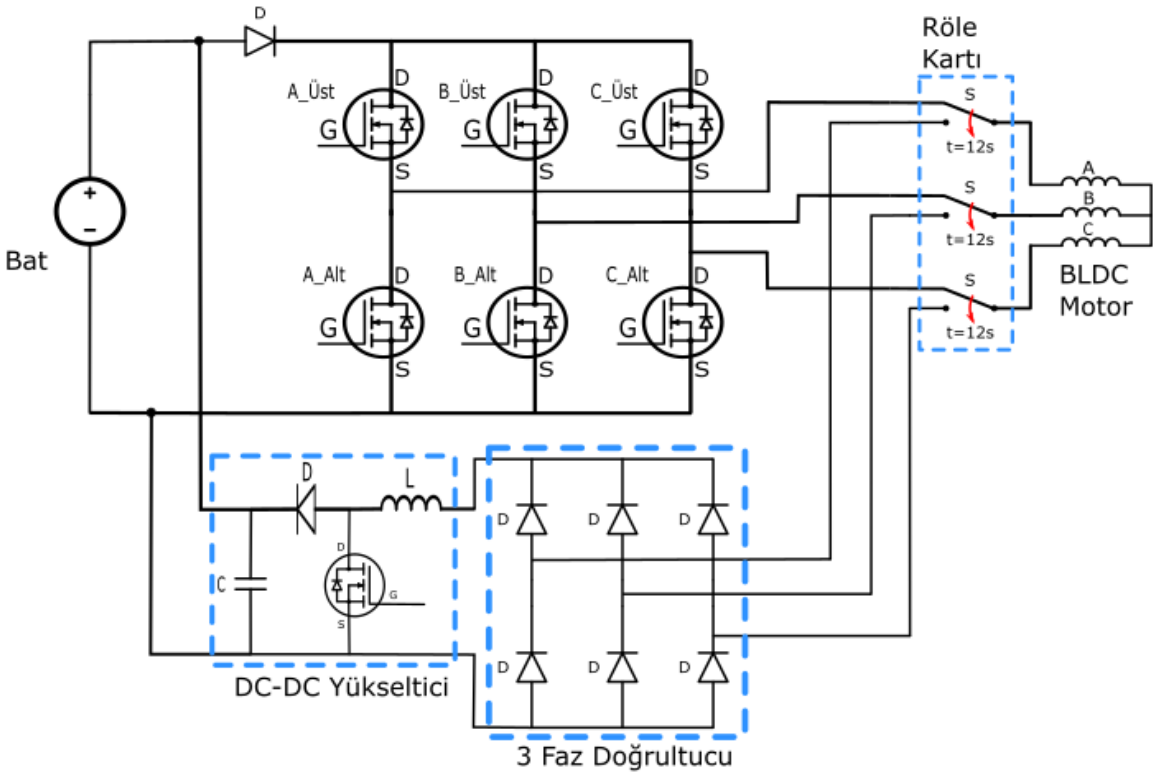
Sistem STM32F407 kontrol kartının PE3 pinine giriş sinyali gönderilmesiyle çalışmaya başlamıştır. Rotorun pozisyonuna göre çıkış sağlayan Hall_A, Hall_B ve Hall_C sensörlerinden gelen veri ile birlikte ilgili MOSFET'ler iletime geçirilmiştir. BLDC motorun sürülmesindeki anahtarlama şartları Tablo 3.1'de detaylıca gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan anahtarlama şartları

Hall_A	Hall_B	Hall_C	A	B	C
1	0	0	+		-
1	1	0		+	-
0	1	0	-	+	
0	1	1	-		+
0	0	1		-	+
1	0	1	+	-	

Hall sensörleri sırasıyla *PC13*, *PC14* ve *PC15* pinlerine bağlanmıştır. IR2104'ler vasıtasıyla MOSFET'leri iletime geçiren optokuplörler sırasıyla *PE9*, *PE11*, *PC8*, *PC9*, *PB4* ve *PB5* pinlerine bağlanmışlardır. Bu pinler analog pinlerdir. Dolayısıyla bu pinler uygulanan PWM sinyaline göre motora hız kontrolü yapılmasına olanak sağlamıştır.

PE3 pininin aktif olmasıyla birlikte zamanlayıcı saymaya başlamıştır. Ayarlanmış olan sürenin sonunda *PC1*, *PC2* ve *PC3* pinleri aktif hale gelmiştir. Bu pinler röle kartına bağlı olduğu için sürenin dolmasıyla birlikte röle kontakları pozisyon değiştirmiştir. Bu andan itibaren BLDC makine fazları sürücü devresine değil iç faz doğrultucuya bağlı hale gelmiştir. Üç faz doğrultucunun çıkışından alınan DC gerilim DC-DC yükseltici devresinde yükseltilerek depolanmak üzere aküye yönlendirilmiştir. Tasarlanan sistemin açık devre şeması Şekil 3.17'de verilmiştir.

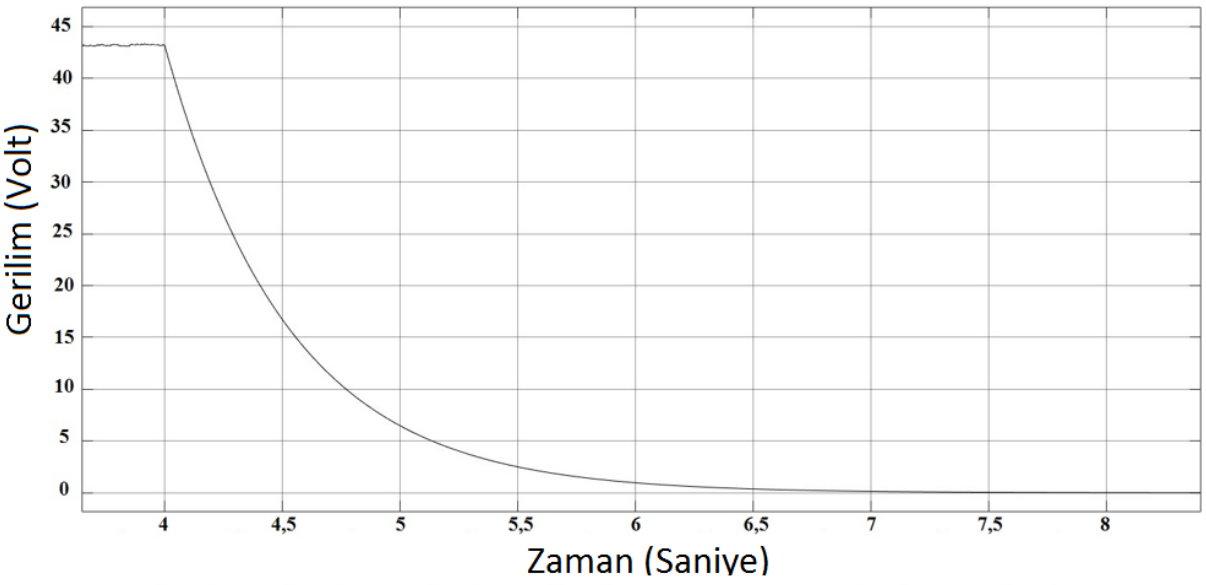


Şekil 3.17. Tasarlanan sistemin açık devre güç şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Benzetim Çalışması Sonuçları

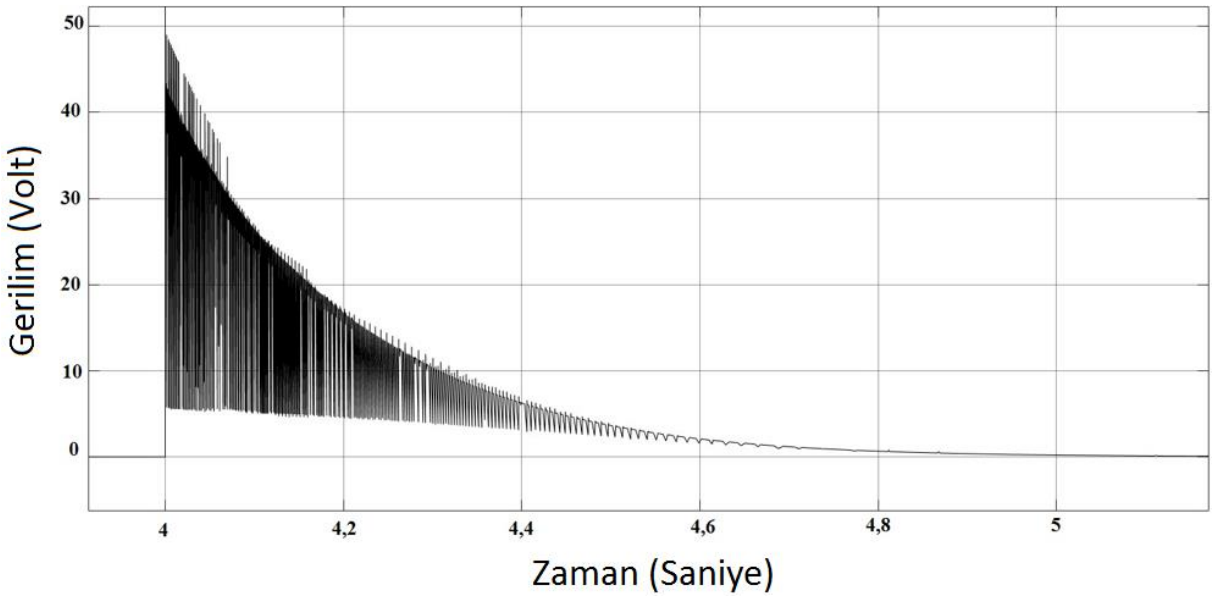
Benzetimi yapılan Matlab/Simulink modelindeki BLDC motora enerji akü tarafından sağlanmıştır. Motorun çalışma gerilimi ve akü gerilimi 48 V'tur. Rejeneratif frenleme esnasında kullanılacak olan zıt EMK'yı elde etmek için iki yöntem belirtilmiştir. İlk yöntem ile elde edilen zıt EMK'nin, zamana göre değişimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yöntem 1'e göre 20 Ω'luk yükte elde edilen zıt EMK

Şekildeki grafikte, eğrisi görülen BLDC makine ilk dört saniye boyunca motor olarak çalışmıştır. Bu sürenin sonunda BLDC makineden enerji kesilmiştir. Dördüncü saniyeden sonra herhangi bir frenleme uygulanmayan BLDC makinenin uçlarında indüklenen gerilim doğrusal olmayan bir şekilde azalmıştır. Süre altıyı geçtikten sonra ise eğri sıfıra oldukça yaklaşmıştır.

İkinci yöntem yardımıyla elde edilen gerilimin, zamana göre değişimi ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

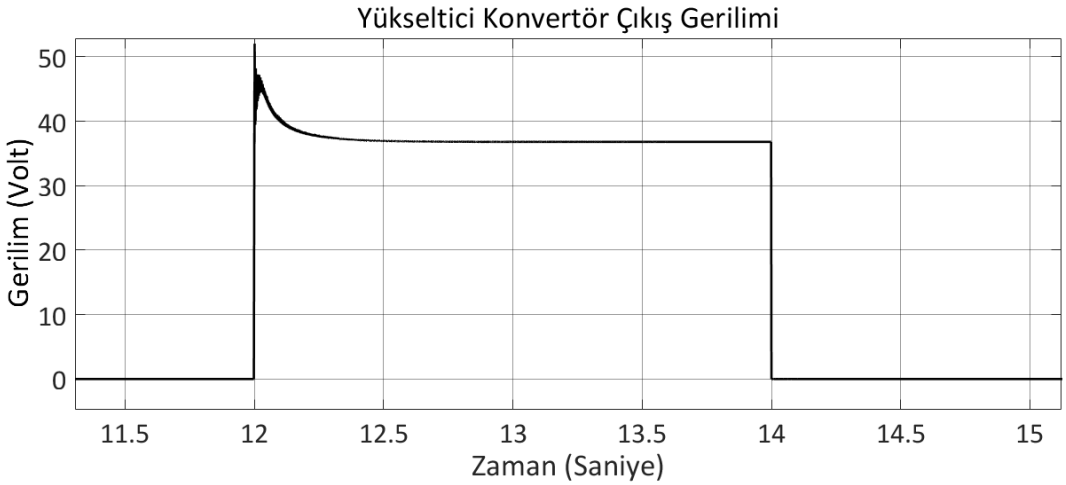


Şekil 4.2. Yöntem 2'ye göre 20 Ω'luk yükte elde edilen zıt EMK

İlk yöntem için kurulan devre, motordan alınan verilerle çalışsa da devre ile motor farklı gerilim kaynakları tarafından beslendiğinden bu devrede yapılan herhangi bir değişikliğin motora yansımadığı gözlemlenmemiştir. Örnek olarak Şekil 3.4'te görülen direncin değeri değiştirildiğinde motorun zıt EMK-zaman grafiğindeki eğride farklılık görülmesi beklenirken herhangi bir değişiklik gerçekleşmemiştir. BLDC makinenin farklı yük değerlerinde üzerindeki enerjiyi aynı sürede boşalttığı görülmüştür. Bu olası bir durum değildir.

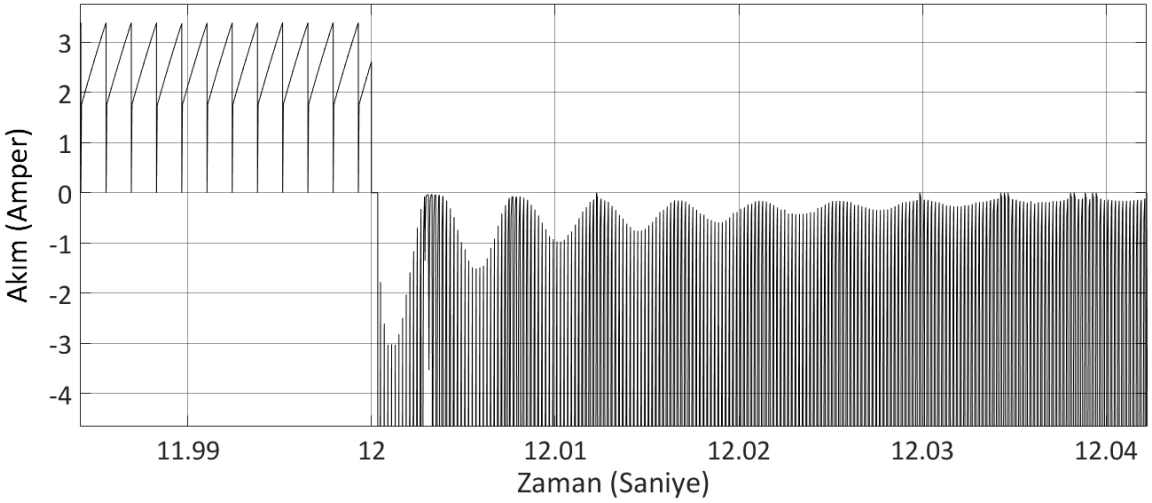
İkinci yöntemle elde edilen gerilim ise ilk yöntemle elde edilene göre daha bozuktur ama yükte yapılan değişikliklere tepki vermiştir. Bu nedenle ikinci yöntemle elde edilen zıt EMK'nın kullanımı daha elverişlidir.

Yükselten konvertör çıkış gerilimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere rejeneratif frenlemenin başlamasıyla girişe uygulanan gerilim batarya geriliminden daha yüksek bir seviyeye çıkarılmıştır. Belli bir zaman sonra batarya gerilimi ile aynı seviyeye gelmiştir. Ondördüncü saniyede yükselten konvertörün çıkışındaki anahtarın kapanmasıyla kondansatörler üzerinde kalan gerilim boşaltılmıştır.



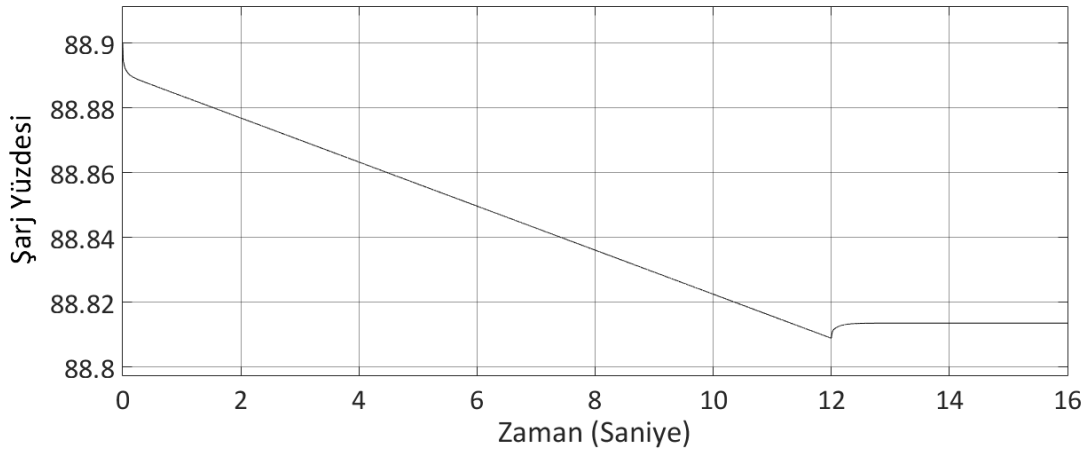
Şekil 4.3. Yükselten konvertör çıkış gerilimi

Şekil 4.4'te akünün akım-zaman grafiği gösterilmiştir. İlk oniki saniyede akım yönü aküden motora doğrudur. Bu durum bataryadan enerji harcandığını ifade etmektedir. Grafik pozitif bölgededir. Onikinci saniyede rejeneratif frenlemenin başlamasıyla birlikte akım-zaman grafiği negatif bölgeye geçmiştir. Akım yönü BLDC makineden bataryaya doğrudur. Bu durum BLDC makineden enerji elde edildiğini ve aküye depolandığını gösterir. Dahası bu gölge rejeneratif frenleme bölgesidir.



Şekil 4.4. Akü akım-zaman grafiği

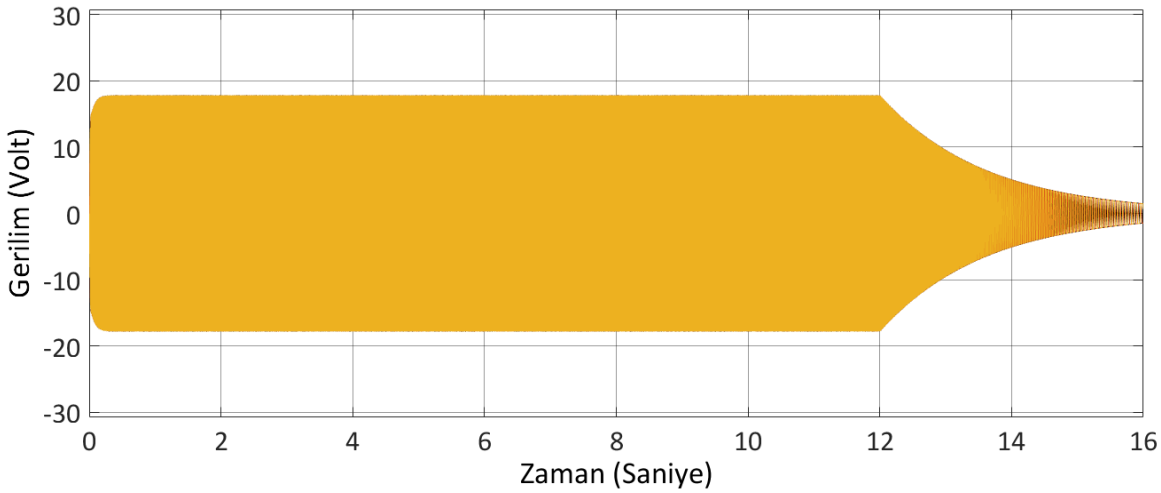
Aküye enerji depolanmasını gösteren şarj-zaman grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Onikinci saniyeye kadar azalmakta olan şarj yüzdesi onikinci saniyeden sonra rejeneratif frenleme sayesinde artmıştır.



Şekil 4.5. Akü şarj-zaman grafiği

Şekil 4.5 akünün şarj yüzdesine aittir. İlk 12 saniyelik kısım dikkatle incelenirse kalkış anında motorun fazla akım çekmesi nedeniyle başlangıçta akü şarjında daha hızlı bir azalma meydana gelmiştir. Akü şarjındaki en belirgin artış ise rejeneratif frenlemenin başladığı ilk an olan onikinci saniyede olmuştur. Bu en yüksek enerji kazancının rejeneratif frenlemenin ilk anında gerçkleştiğini göstermektedir.

Rejeneratif frenleme veya yük uygulanmadan çalıştığında motordan elde edilen zıt EMK Şekil 4.6'daki gibidir.

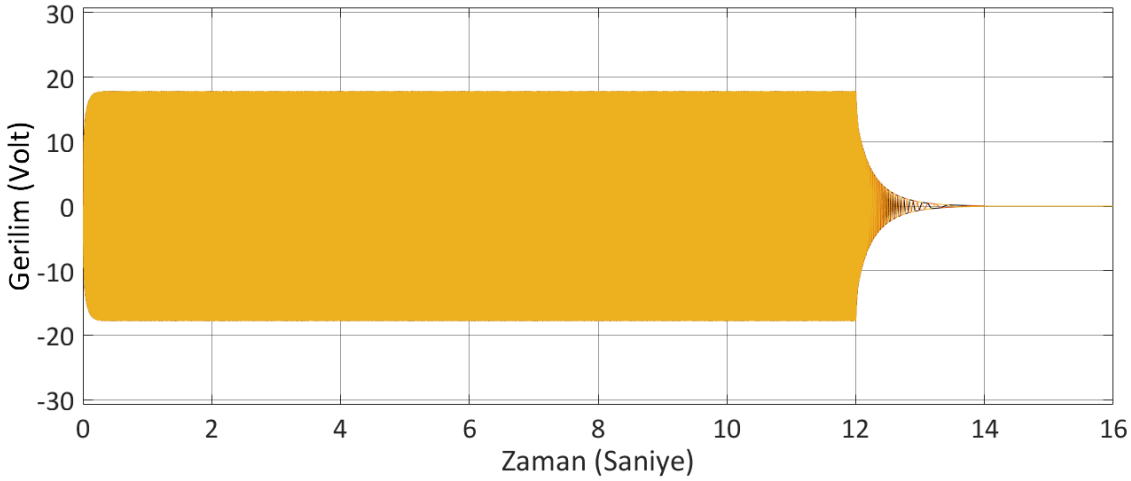


Şekil 4.6. Rejeneratif frenleme uygulanmadan BLDC motor zıt EMK'sı

Şekil 4.6 12 saniye boyunca motor olarak çalıştırılan, onikinci saniyede enerjisi kesilen BLDC makineye ait zıt EMK grafiğidir. Bu makineye rejeneratif frenleme dahil hiçbir frenleme uygulanmamıştır. Makineye herhangi bir frenleme uygulanmadığı için zıt EMK daha yavaş bir

şekilde sıfıra doğru gitmektedir. 12-16 saniye aralığında zıt EMK sıfıra doğru yaklaşmıştır. Bu süre yaklaşık dört saniyedir. Bu durum BLDC makinenin daha düşük bir ivmeyle durmakta olduğunu göstermektedir.

Motora rejeneratif frenleme uygulandığında ise gerilimin yükseltilmesiyle akü bir yük gibi beslenmiştir. Bu nedenle Şekil 4.7'deki zıt EMK eğrisi onikinci saniyeden sonra zaman ekseninde daralmıştır.



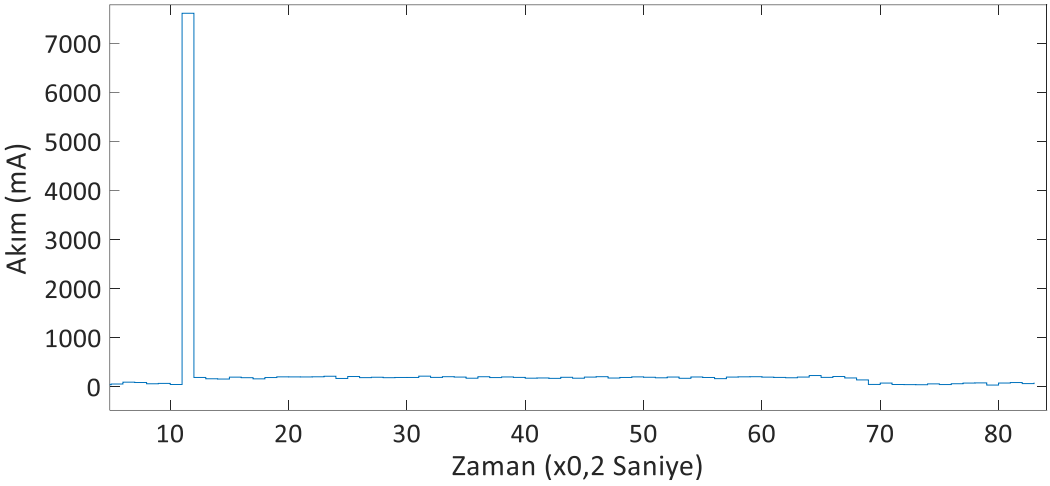
Şekil 4.7. Rejeneratif frenleme uygulandığında BLDC motor zıt EMK'sı

Ölçülen zıt EMK'nin, yavaşlamanın başladığı onikinci saniyede faz geriliminin yaklaşık 20 V, fazlar arası gerilimin de yaklaşık 40 V olduğu ve zamanla azaldığı iki grafikte de görülmektedir. Rejeneratif frenlemeden dolayı zıt EMK yaklaşık bir saniyede sıfırlanmıştır. Ayrıca bu grafiklerde ilk oniki saniyede de zıt EMK vardır. Fakat kullanıma uygun değildir. Çünkü bu sürede uygulanan gerilim daha baskındır. Gerçek dünyada kullanılamayacağı için simülasyonlarda da ilk dört saniyede görülen zıt EMK dikkate alınmamıştır.

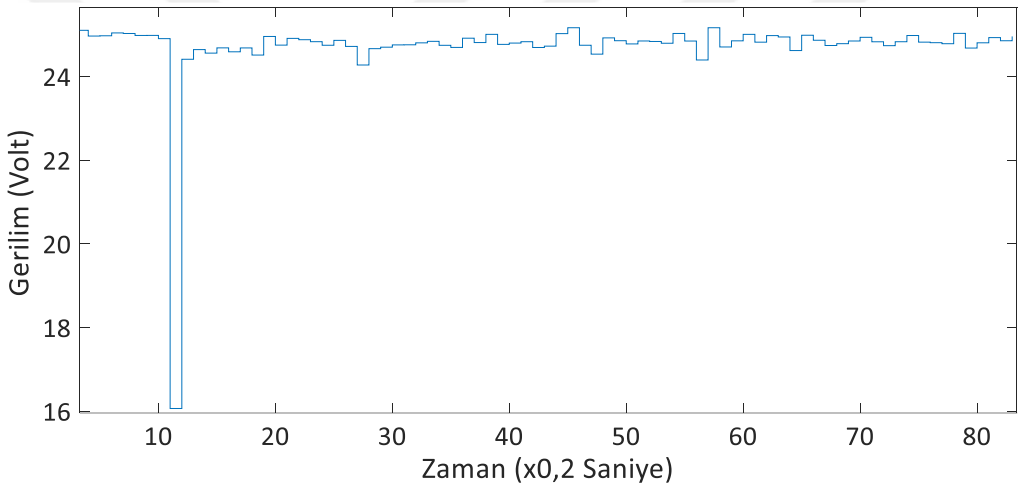
4.2. Deney Sonuçları

Deneyler iki farklı gerilim seviyesi ve her gerilim seviyesinde dört farklı hız olacak şekilde yapılmıştır. 12 saniye boyunca motor olarak çalışan BLDC makine, sürenin sonunda anahtarlamanın durdurulması ve rölelerin kontaklarının yer değiştirmesi ile jeneratör olarak çalışmaya başlatılmıştır. Bu esnada yapılan rejenerasyon ile birlikte makinede ani bir durma gerçekleşmiştir. Ani durmanın nedeni BLDC maknenin uçlarının DC-DC çevirici yardımıyla akünün uçlarına bağlanmasıdır. Akü burada BLDC makinenin uçlarının kısa devre edilmesine neden olur.

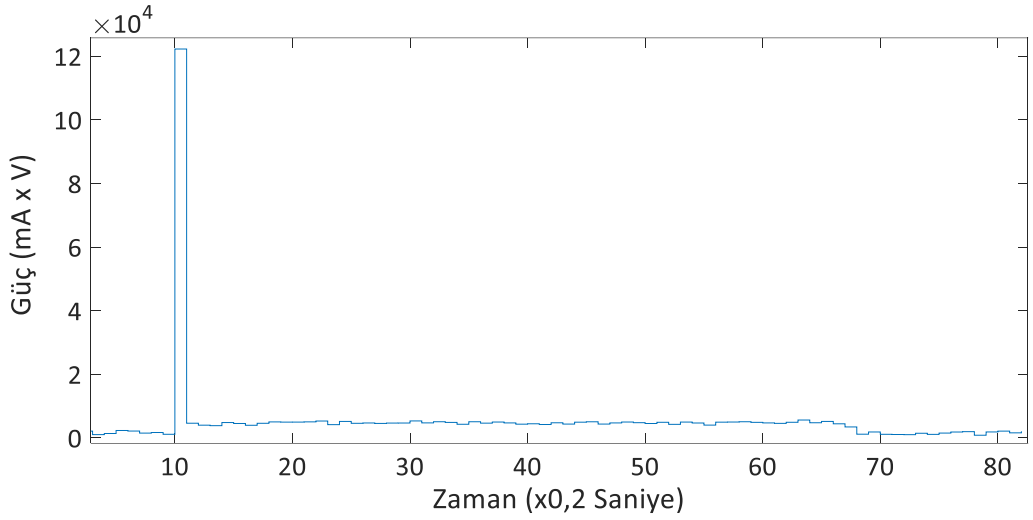
Öncelikle 12 V 7 AH'lik iki akü birbirine seri bağlanarak deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde giriş gerilimi yaklaşık olarak 25.23 V ölçülmüştür. DC-DC yükselticinin çıkış gerilimi de 28.74 V olarak ayarlanmıştır. BLDC makinenin hızı düşükten başlatılmış ve bunun hızı zamanla arttırılarak deneyler tekrar edilmiştir. Bu makineye %100, %75, %50 ve %40 PWM kademeleri uygulanmıştır. Bu PWM seviyeleri için hız değerleri sırasıyla 212 RPM,142 RPM, 84 RPM ve 45 RPM olmuştur. Şekil 4.8-19 arasındaki şekiller yukarıda verilen hız değerlerinde elde edilen akım, gerilim ve güç değerlerini içermektedir.



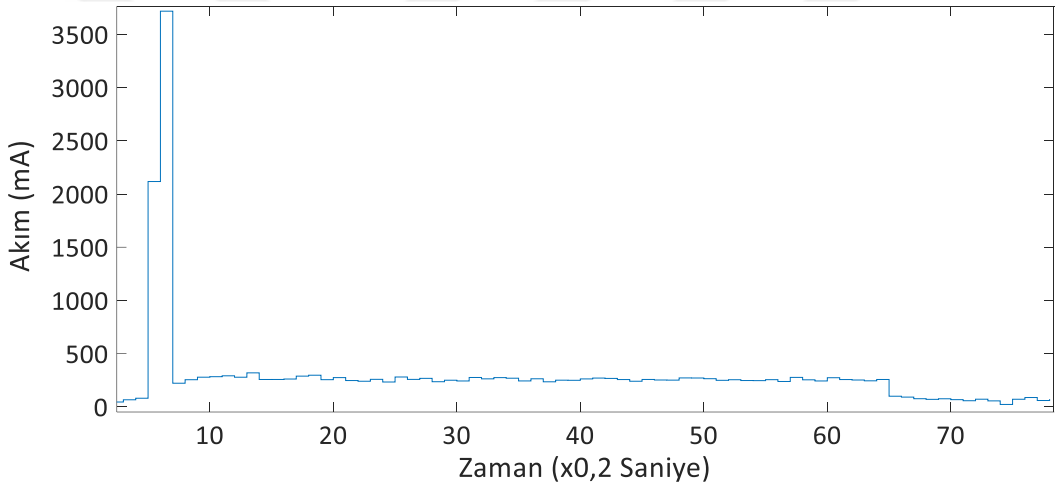
Şekil 4.8. 45 RPM anlık akım değerleri (mA)



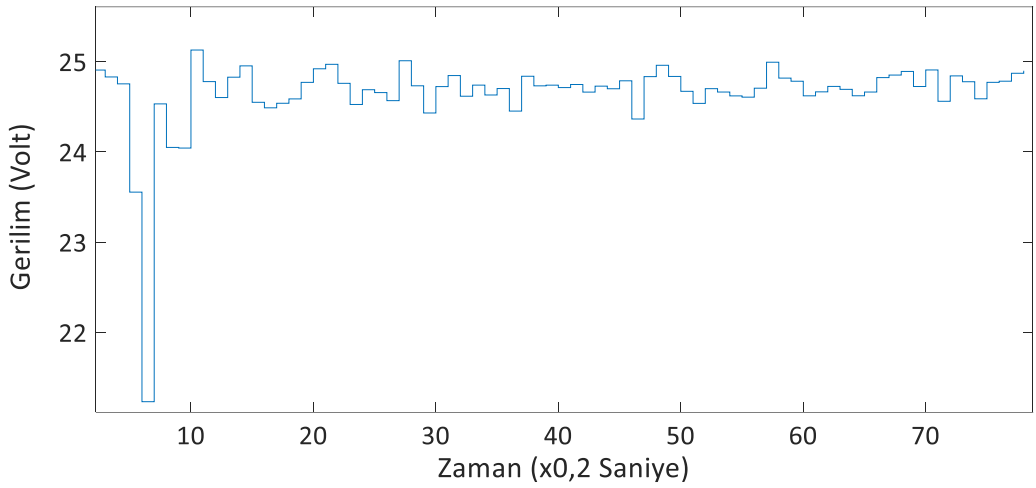
Şekil 4.9. 45 RPM anlık gerilim değerleri (V)



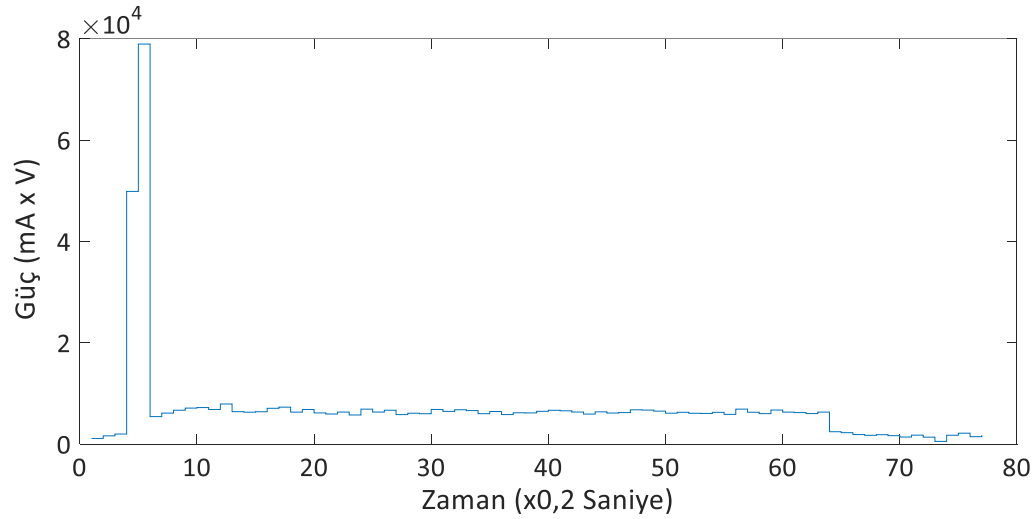
Şekil 4.10. 45 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



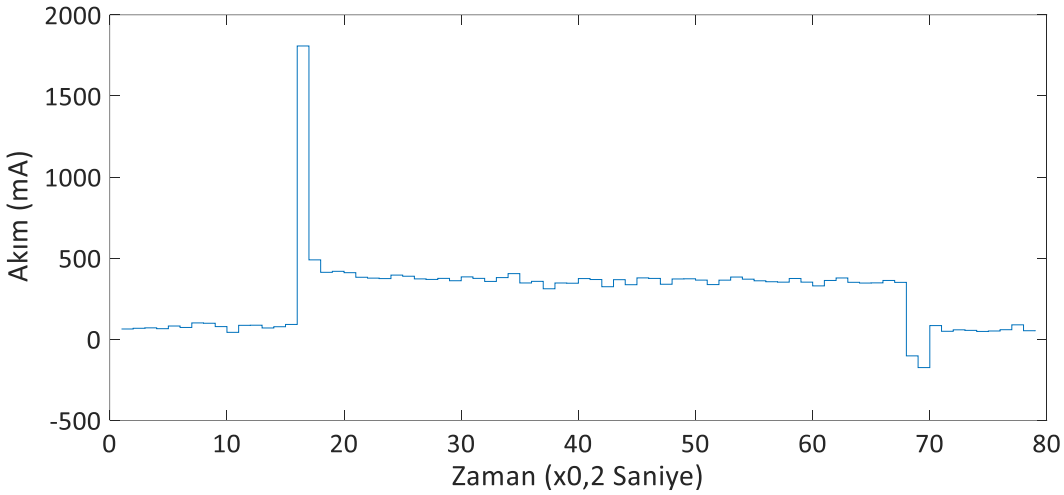
Şekil 4.11. 84 RPM anlık akım değerleri (mA)



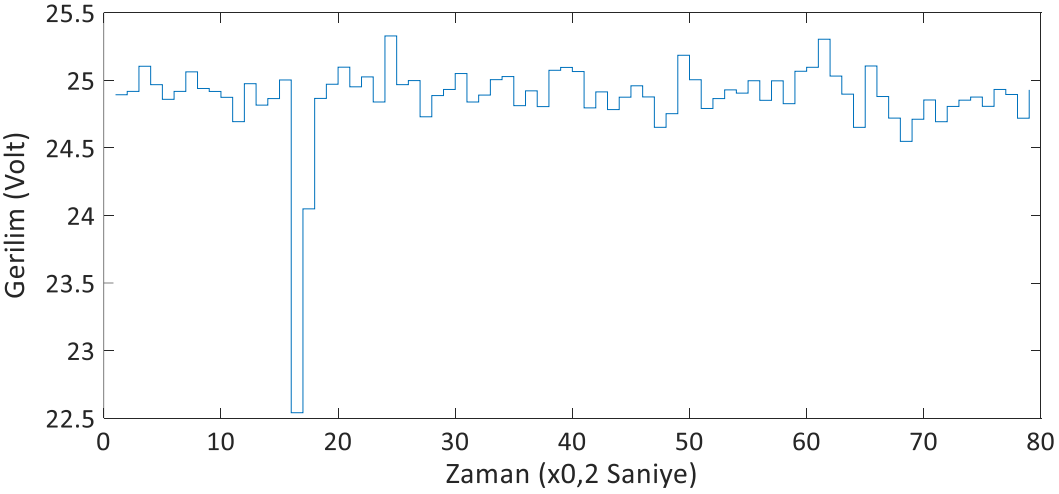
Şekil 4.12. 84 RPM anlık gerilim değerleri (V)



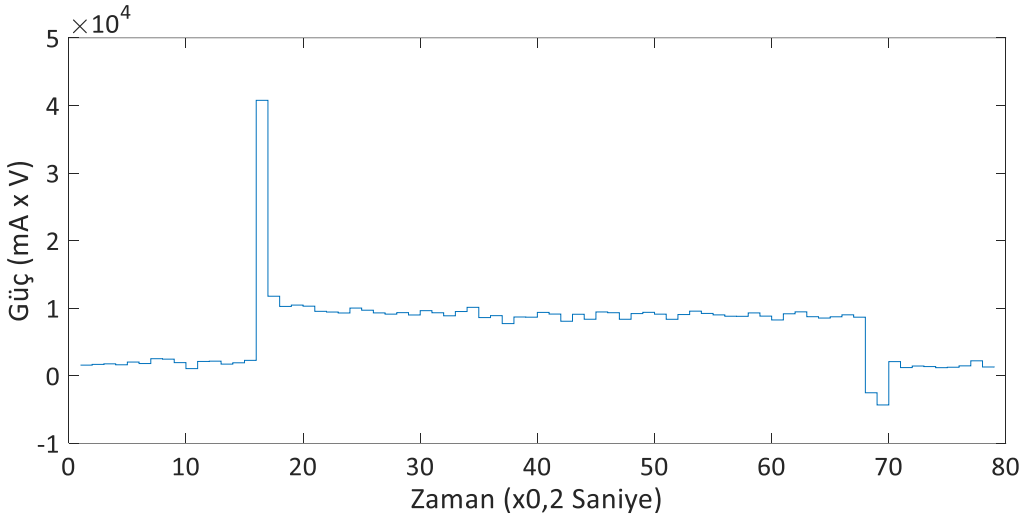
Şekil 4.13. 84 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



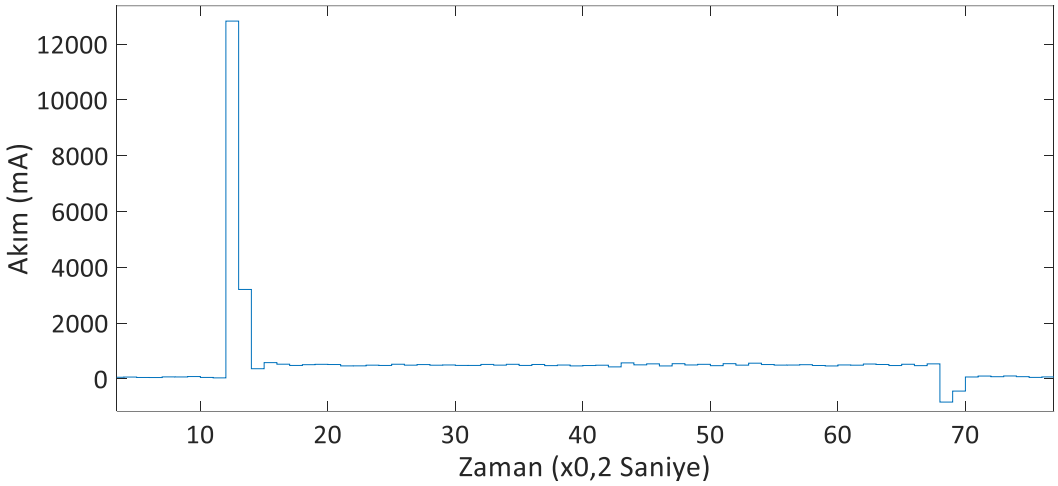
Şekil 4.14. 142 RPM anlık akım değerleri (mA)



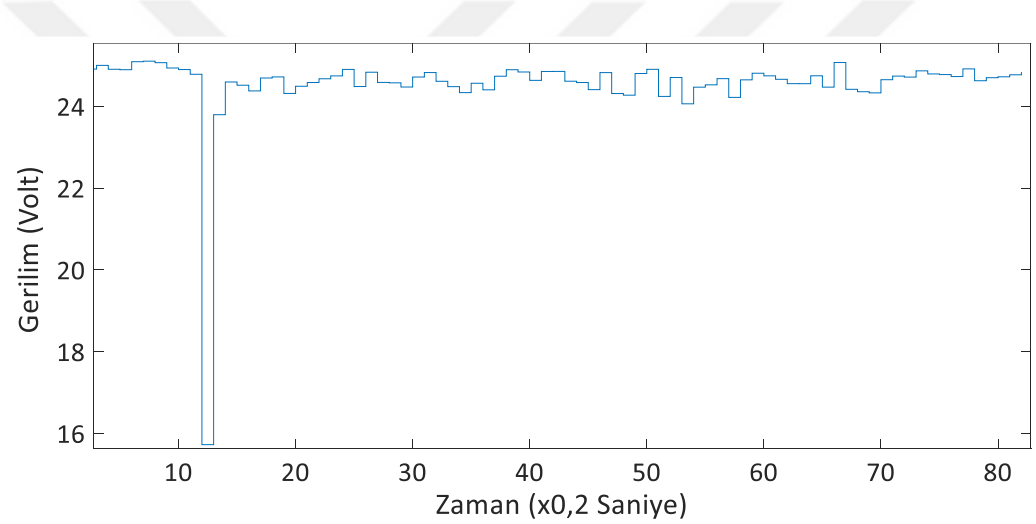
Şekil 4.15. 142 RPM anlık gerilim değerleri (V)



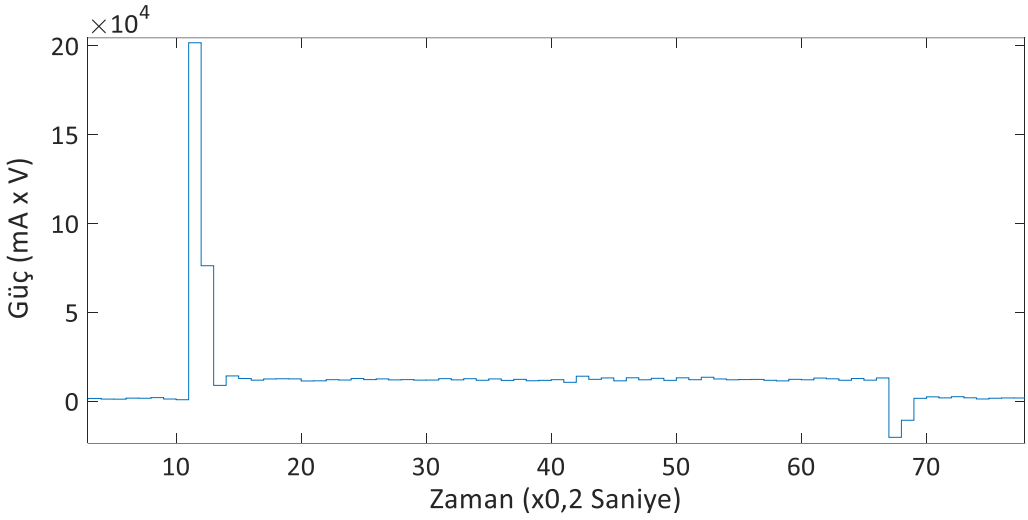
Şekil 4.16. 142 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



Şekil 4.17. 212 RPM anlık akım değerleri (mA)



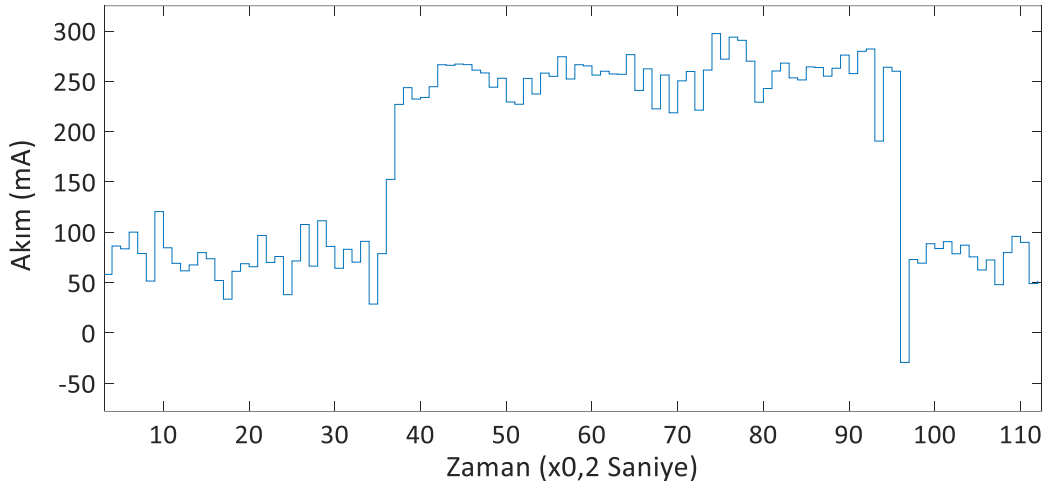
Şekil 4.18. 212 RPM anlık gerilim değerleri (V)



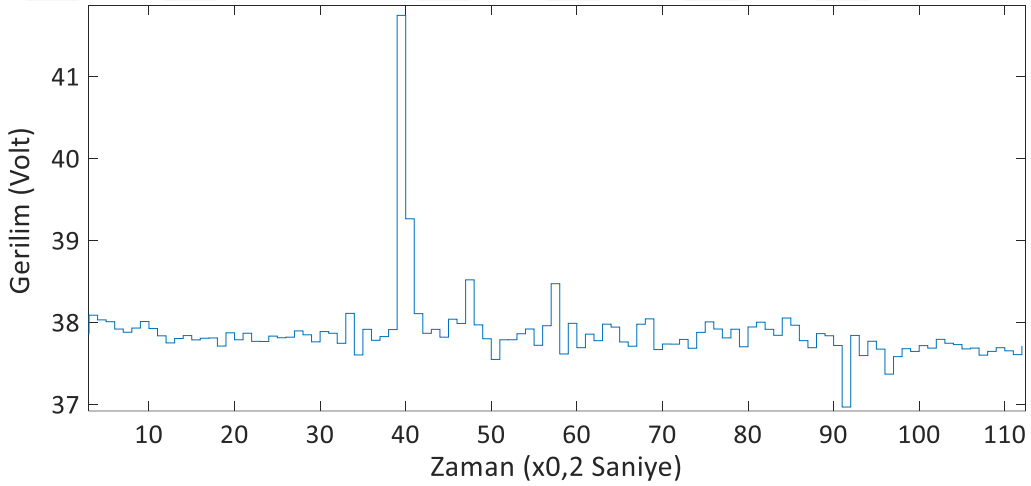
Şekil 4.19. 212 RPM anlık güç değerleri (mA×V)

Grafikler analiz edildiğinde, 45 RPM ve 84 RPM değerleri için rejenerasyon yapılamamıştır. 142 RPM değeri için %1,34, 212 RPM değeri için %3,3 enerji rejenerasyonu sağlanmış ve aküye enerji depo edilmiştir.

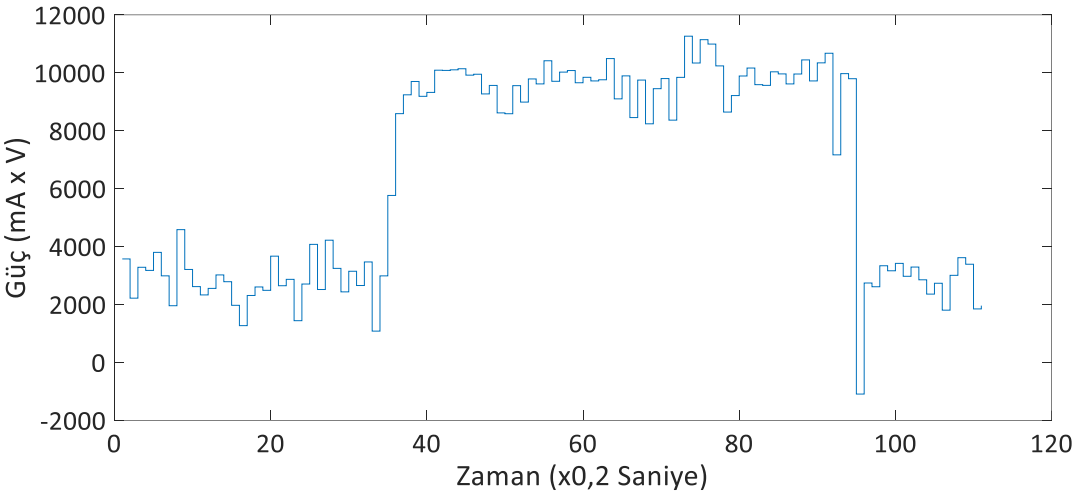
İki akü ile birlikte yapılan deneyler bittikten sonra 12 V 7 AH'lik üç akü birbirine seri bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde giriş gerilimi yaklaşık olarak 37,72 V olmuştur. DC-DC yükselticinin çıkış gerilimi de 39,5 V olarak ayarlanmıştır. İki akülü deneylerde olduğu gibi deneyler dört farklı PWM ve hız değeri için yapılmıştır. Bu PWM değerleri %100, %75, %50 ve %40 olarak belirlenmiştir. Bu PWM seviyeleri için hız değerleri sırasıyla 320 RPM, 237 RPM, 160 RPM ve 109 RPM olmuştur. Şekil 4.20-31 arasındaki şekiller yukarıda verilen hız değerlerinde elde edilen akım, gerilim ve güç eğrilerinin göstermektedir.



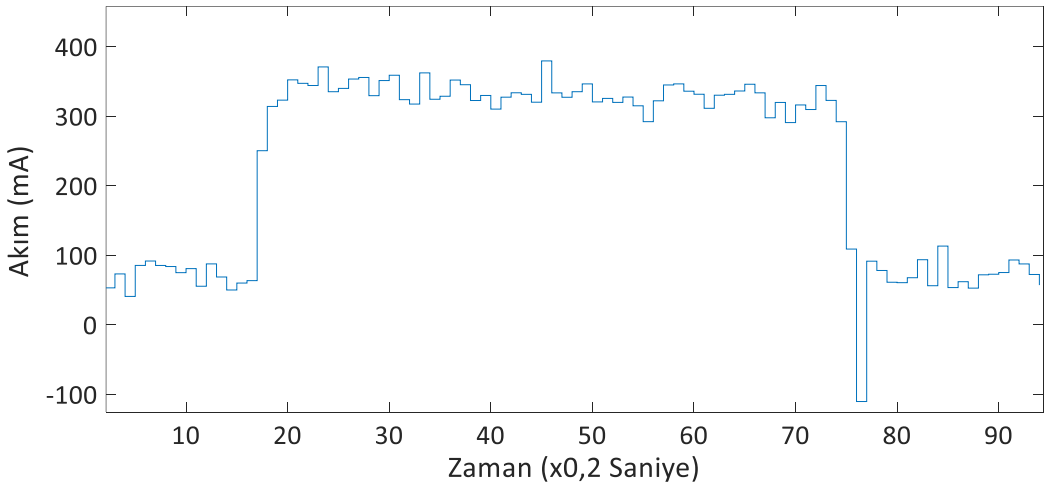
Şekil 4.20. 109 RPM anlık akım değerleri (mA)



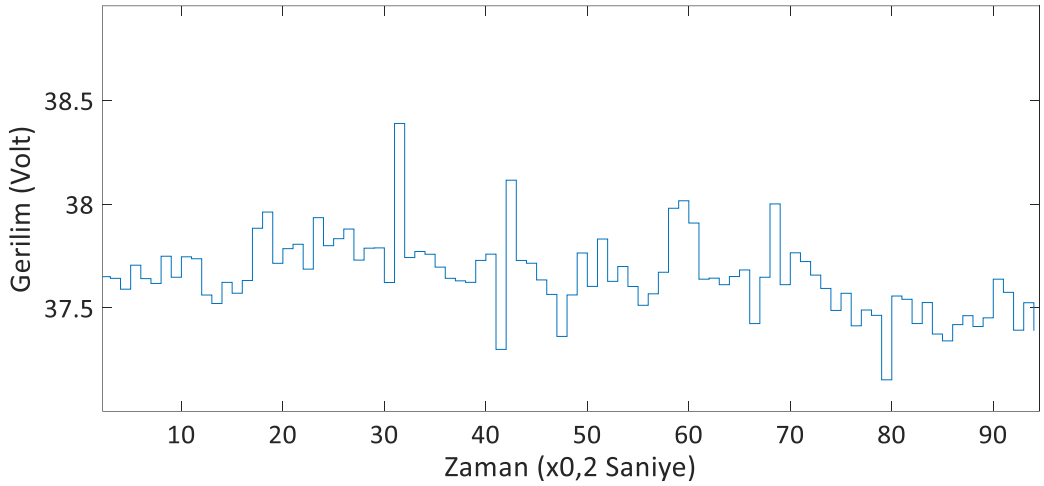
Şekil 4.21. 109 RPM anlık gerilim değerleri (V)



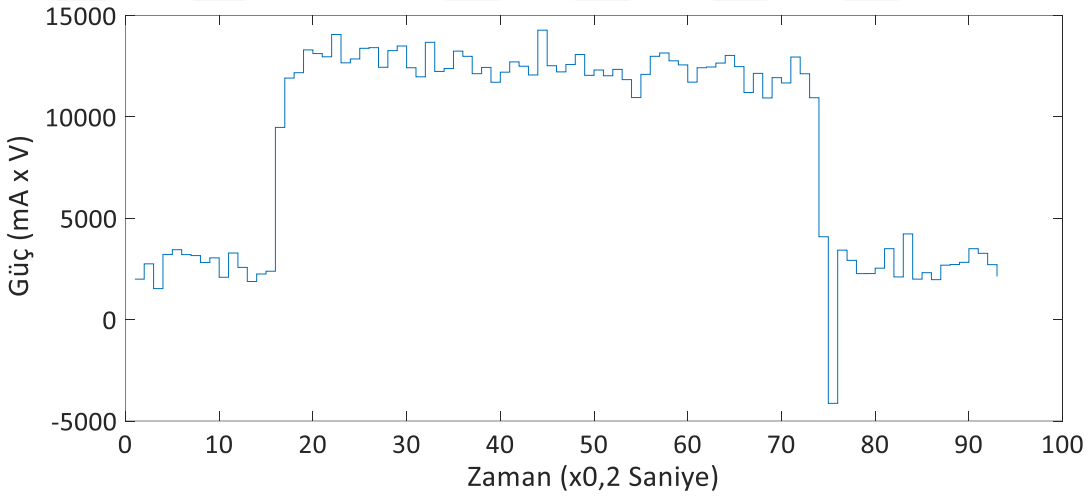
Şekil 4.22. 109 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



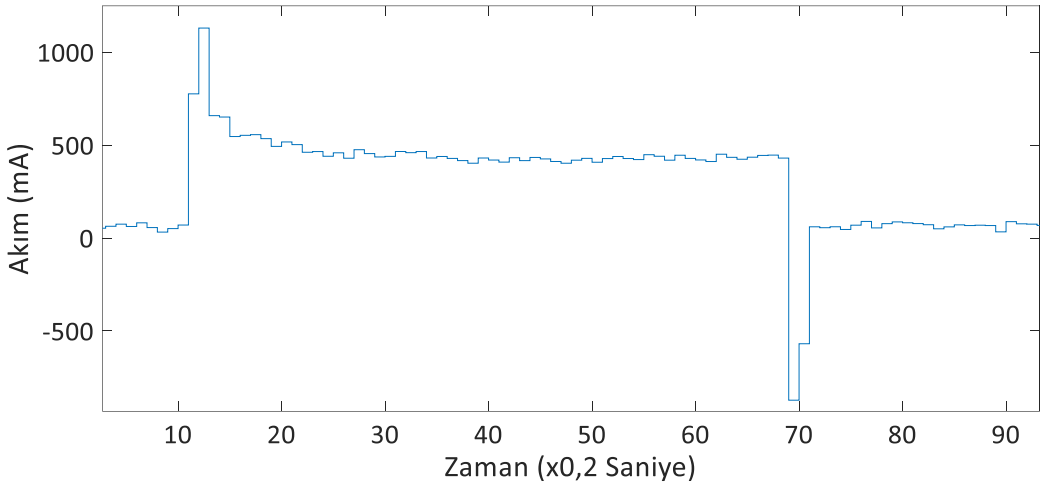
Şekil 4.23. 160 RPM anlık akım değerleri (mA)



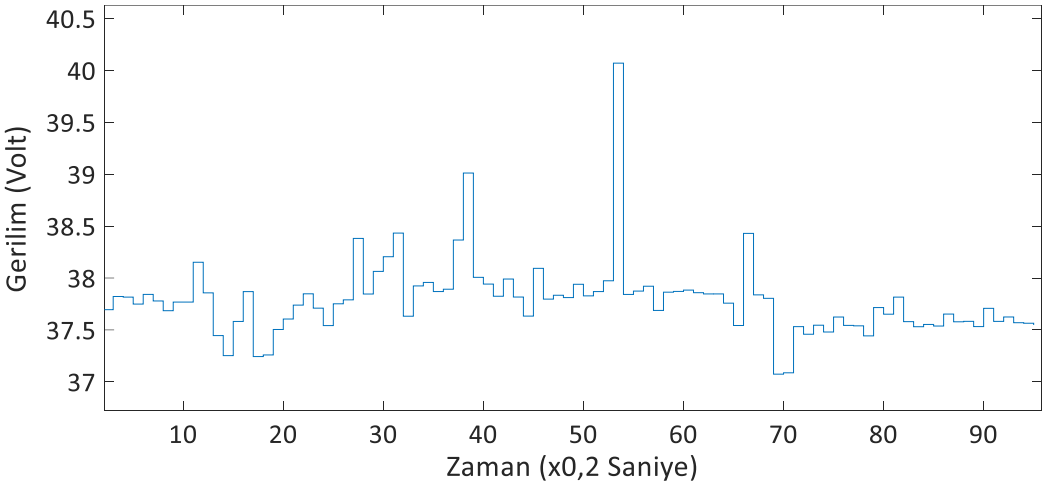
Şekil 4.24. 160 RPM anlık gerilim değerleri (V)



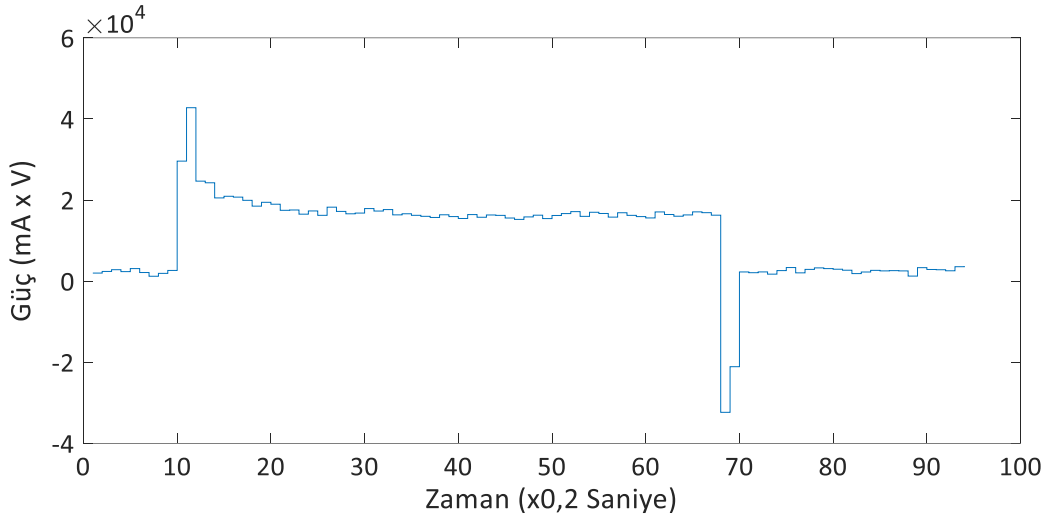
Şekil 4.25. 160 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



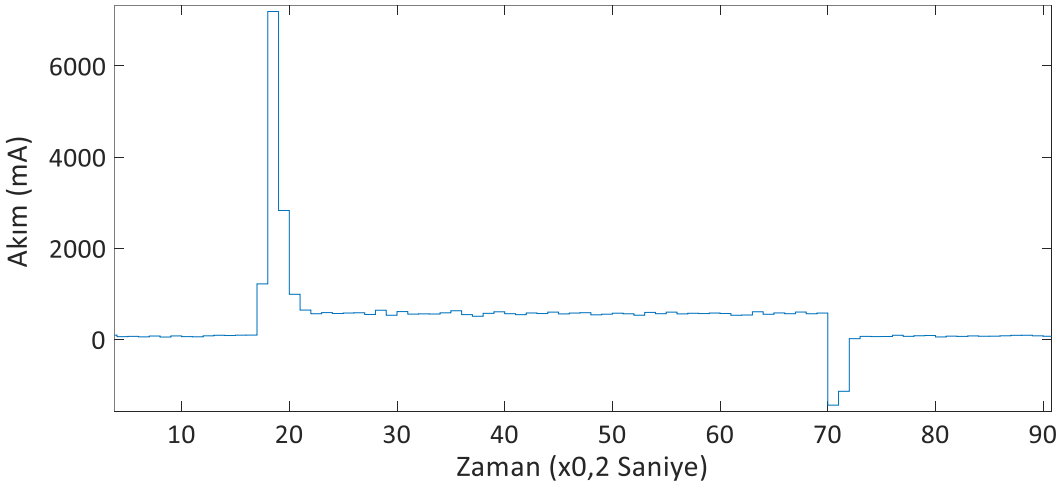
Şekil 4.26. 237 RPM anlık akım değerleri (mA)



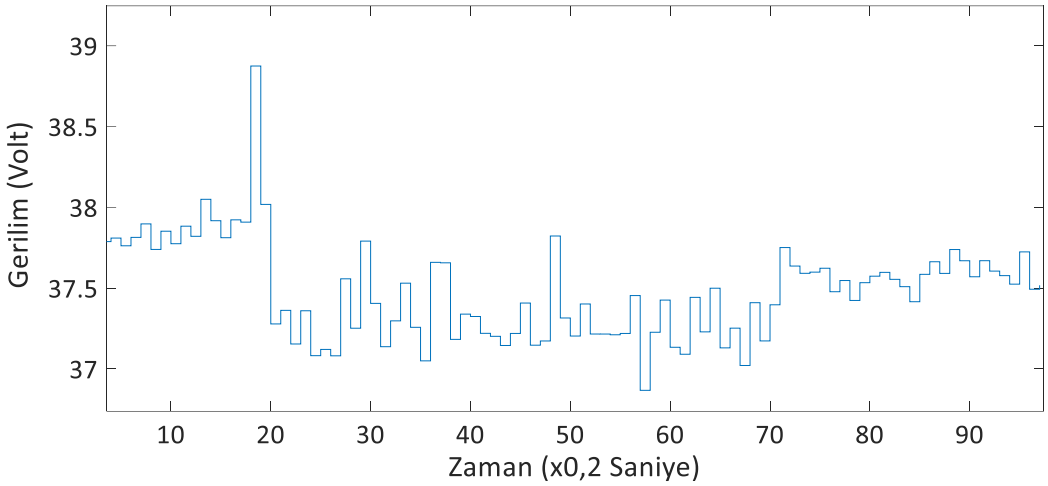
Şekil 4.27. 237 RPM anlık gerilim değerleri (V)



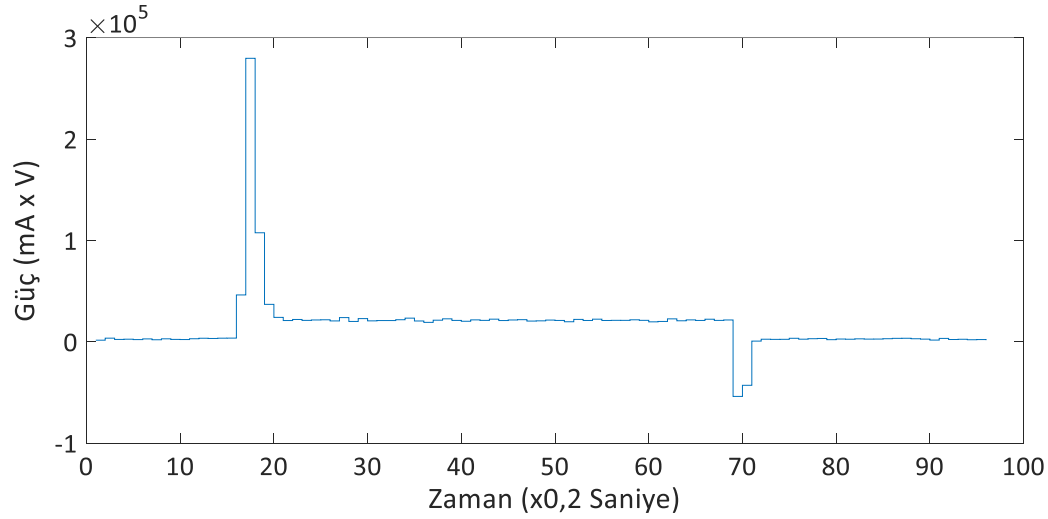
Şekil 4.28. 237 RPM anlık güç değerleri (mA×V)



Şekil 4.29. 320 RPM anlık akım değerleri (mA)



Şekil 4.30. 320 RPM anlık gerilim değerleri (V)



Şekil 4.31. 320 RPM anlık güç değerleri (mA×V)

Grafiklerden elde edilen veriler analiz edildiğinde tüm değerler için enerji rejenerasyonu sağlanmıştır. 109 RPM için %0,19, 160 RPM değeri için %0,57, 237 RPM için %5,15 ve 320 RPM değeri için %6,37 enerji rejenerasyonu elde edilmiştir.

Simülasyonu ve deneysel çalışması yapılan sistem bir arabanın düz yolda belli bir süre çalıştırılıp daha sonra herhangi bir frene basmadan boşa alınarak kendiliğinden durması düşünülerek yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda bu koşullara göredir. Sistemin bu koşullarda 10 saniyelik çalışma süresinde üretilen enerjiyi depolaması başarıyla gözlemlenmiştir. Gerçek ortamda çalışma durumunda aracın yokuş aşağı gittiği düşünülürse geri dönüştürülen enerjinin artabileceği tahmini yapılabilir. Ayrıca şehir için yollarda araçların sürekli dur kalk yapması için frene daha sık basıldığı düşünülürse bu geri kazanılan enerjinin miktarı artacaktır. Bir

senaryo ile geri kazanılacak enerjinin miktarı burada hesaplansın. Yoğun trafiğin olduğu düz bir alanda bulunan ve paket servis hizmeti veren bir işletme düşünülsün. Yoğun trafikten dolayı servisi yapan araç ani fren yapmadan sık sık dur kalk yapmış olacaktır. Her dört saniyede bir aracın dur kalk yaptığı varsayılsın. Bu durumda deney çalışmasından alınan değerlerde enerji geri kazanımı %6,37 elde edilmiştir. Bu demektir ki belirtilen koşullarda yapılan her 100 km aküye 6,37 km'ye kadar enerji sağlayabilmektedir. Bu oran frene basma frekansı arttığında yükselecektir. Böylelikle frenleme esnasında da enerjinin daha fazla geri dönüşümü sağlamış olacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılabilen bir makine tipi olan BLDC makinenin Matlab/Simulink'te bir rejeneratif frenleme benzetim çalışması ve bunun deneysel gerçekleştirilmesi yapılmıştır.

Benzetim çalışmasında BLDC makine 16 saniye için hem motor hemde jeneratör olarak kullanılmıştır. BLDC makine benzetiminin ilk oniki saniyesinde aküden enerji alarak motor olarak kullanılmıştır. Onikinci saniyeden sonra BLDC makinenin enerjisi kesilmiştir. BLDC makine kendi ivmesiyle dönmeye devam ederken ürettiği zıt EMK değeri yükselten çevirici ile belirli bir değere akünün şarj edilmesi için çıkartılmıştır. Bu durumda BLDC makine jeneratör olarak kullanılmış ve rejeneratif frenleme yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda motorun harcadığı enerji 1206 W×s ve aküye depo edilen enerji 74,92 W×s olarak bulunmuştur. Başka bir ifadeyle benzetimi yapılan senaryo ile bu sistemde harcanan enerjinin %6,21'i de yeniden kullanılmak üzere aküye depo edilebilmiştir.

Deney çalışması 12 saniye için birbirine seri bağlı 12 V 7 AH iki farklı akü gerilimiyle sekiz farklı hız değerinde yapılmıştır. Literatürde değişken hızlarla yapılan çalışmalara rastlanılmamaktadır. Bu çalışma ile birlikte değişken hızlarda, rejeneratif frenlemenin enerji geri dönüşüm oranına etkisi daha belirgin bir şekilde araştırılmış ve analiz edilmiştir. Grafiklerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde hız değeri arttıkça rejenerasyondan elde edilen enerjinin aynı şekilde arttığı görülmüştür. Rejenerasyondan elde edilen enerjinin en fazla olduğu zaman rejeneratif frenlemenin başladığı an olarak tespit edilmiştir. Grafiklerin çoğunda motorun ilk kalkış anında yüksek akım çektiği saptanmıştır. Bu anların en fazla enerji harcanan zaman aralıkları olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, bir BLDC makinenin belirli bir süre boşta çalışıp süre sonunda sadece rejeneratif frenleme yaparak durması senaryosu ile elde edinilmiştir. Trafik ortamında birçok farklı senaryo ile karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle binek bir araç üzerinde dış ortamda yapılacak olan deneyler rejeneratif frenlemenin elektrikli araçlardaki verime etkisini daha gerçekçi olarak verecektir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan sisteme akım sınırlaması ve batarya şarj ölçüm ünitesi gibi birimler eklenerek dış ortamda kullanıma uygun hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Solmaz, H., Çelikten, İ. Estimation of number of vehicles and amount of pollutants generated by vehicles in Turkey until 2030. Gazi University Journal of Science. 2012, 25(2), 495-503.

[2] Li, L., Zhang, Y., Yang, C., Yan, B., Martinez, C. M. Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus. Energy Conversion and Management. 2016, 111, 299-314.

[3] Yoong, M. K., Gan, Y. H., Gan, G. D., Leong, C. K., Phuan, Z. Y., Cheah, B. K., Chew, K. W. Studies of regenerative braking in electric vehicle. In 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology, Kasım, 2010, (Bildiri Özetleri Kitabı, 40-45.)

[4] Hua, C. C., Kao, S. J., Fang, Y. H. Design and implementation of a regenerative braking system for electric bicycles with a DSP controller. In 2013 1st International Future Energy Electronics Conference IEEE, Kasım, 2013, (Bildiri Özetleri Kitabı, 641-645.)

[5] Pan, C., Chen, L., Chen, L., Jiang, H., Li, Z., Wang, S. Research on motor rotational speed measurement in regenerative braking system of electric vehicle. Mechanical Systems and Signal Processing. 2016, 66, 829-839.

[6] Ahn, J. K., Jung, K. H., Kim, D. H., Jin, H. B., Kim, H. S., Hwang, S. H. Analysis of a regenerative braking system for hybrid electric vehicles using an electro-mechanical brake. International Journal of Automotive Technology. 2009, 10(2), 229-234.

[7] Qiu, C., Wang, G. New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles. Energy Conversion and Management. 2016, 119, 389-398.

[8] Guo, J., Wang, J., Cao, B. Regenerative braking strategy for electric vehicles. In 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Haziran, 2009, (Bildiri Özetleri Kitabı, 864-868.)

[9] Kivanc, O. C., Ustun, O., Tosun, G., Tuncay, R. N. On regenerative braking capability of BLDC motor. In IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Ekim, 2016, (Bildiri Özetleri Kitabı, 1710-1715.)

[10] Geraee, S., Mohammadbagherpoor, H., Shafiei, M., Valizadeh, M., Montazeri, F., Feyzi, M. R. Regenerative braking of electric vehicle using a modified direct torque control and adaptive control theory. Computers and Electrical Engineering. 2018, 69, 85-97.

[11] Cody, J., Göl, Ö., Nedic, Z., Nafalski, A., & Mohtar, A. (2009). Regenerative braking in an electric vehicle (Doctoral dissertation, Branzowy Osrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych" Komel").

[12] Billah, S. B., Jakaria, M., Nath, P. A Novel Regenerative Braking System of BLDC Motor for Lightweight Electric Vehicles: An Analysis of Braking Characteristics. In 2017 2nd international Conference on Electrical ve Electronic Engineering IEEE, Aralık, 2017, (Bildiri Özetleri Kitabı 1-4.)

[13] Godfrey, A. J., Sankaranarayanan, V. A new electric braking system with energy regeneration for a BLDC motor driven electric vehicle. Engineering Science and Technology an International Journal. 2018, 21(4), 704-713.

[14] Maia, R., Silva, M., Araújo, R., Nunes, U. Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking. Expert Systems with Applications. 2015, 42(22), 8504-8519.
[15] Gökçe, C., Üstün, Ö. Elektrikli araçlarda tam elektrikli frenleme için bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntemin geliştirilmesi ve uygulaması. Sakarya University Journal of Science. 2015, 19(3), 339-352.
[16] Chen, J., Yu, J., Zhang, K., Ma, Y. Control of regenerative braking systems for four-wheel-independently-actuated electric vehicles. Mechatronics. 2018, 50, 394-401.
[17] Wu, J., Wang, X., Li, L., Du, Y. Hierarchical control strategy with battery aging consideration for hybrid electric vehicle regenerative braking control. Energy. 2018, 145, 301-312.
[18] Rakesh, M., Narasimham, P. V. R. L. Different braking techniques employed to a brushless DC motor drive used in locomotives. International Electrical Engineering Journal. 2012, 3(2), 784-790.
[19] Sandilya, D. K., Goswami, S., Kalita, B., Chakraborty, S. A study on Regenerative braking system with matlab simulation. In 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control IEEE, Haziran, 2017, (Bildiri Özetleri Kitabı, 1-6.)
[20] Wu, H. X., Cheng, S. K., Cui, S. M. A controller of brushless DC motor for electric vehicle. IEEE Transactions on magnetics. 2005, 41(1), 509-513.
[21] Nian, X., Peng, F., Zhang, H. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014, 61(10), 5798-5808.
[22] Sindhuja, V., Ranjitham, G. Regenerative braking system of electric vehicle driven by BLDC motor using neuro fuzzy and PID. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology. 2014, 3(12), 17847-17854.
[23] Elavarasi, R., SenthilKumar, P. K. An FPGA based Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by BLDC Motor. Indian Journal of Science and Technology. 2014, 7(S7), 1-5.
[24] Karabacak, Y., Uysal, A. Fuzzy logic controlled brushless direct current motor drive design and application for regenerative braking. In 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium IEEE, Eylül, 2017, (Bildiri Özetleri Kitabı, 1-7.)
[25] Junzhi, Z., Yutong, L., Chen, L., Ye, Y. New regenerative braking control strategy for rear-driven electrified minivans. Energy conversion and management. 2014, 82, 135-145.
[26] Kozak, M., Kozak, Ş. Enerji depolama yöntemleri. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi. 2012, 4(2), 17-29.
[27] Sayin, A. A., Yüksel, İ. Elektrikli Renault fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. Engineer and the Machinery Magazine. 2011, (615).
[28] Mamur, H., Coban, Y. Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2020, 28(1), 124-139.
[29] Yang, M. J., Jhou, H. L., Ma, B. Y., Shyu, K. K. A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009, 56(6), 2203-2212.

[30] Zhou, X., Fang, J. Precise braking torque control for attitude control flywheel with small inductance brushless DC motor. IEEE Transactions on Power Electronics. 2013, 28(11), 5380-5390.
[31] Bobba, P. B., Rajagopal, K. R. Compact regenerative braking scheme for a PM BLDC motor driven electric two-wheeler. In 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Aralık, 2010, (Bildiri Özetleri Kitabı, 1-5.)
[32] Rosas-Caro, J. C., Ramírez, J. M., García-Vite, P. M. Novel DC-DC multilevel boost converter. In 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference IEEE, Haziran, 2008, (Bildiri Özetleri Kitabı, 2146-2151)
[33] Long, B., Lim, S., Ryu, J., Chong, K. Energy-regenerative braking control of electric vehicles using three-phase brushless direct-current motors. Energies. 2014, 7(1), 99-114.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper Kağan CANDAN

Doğum Yeri ve Yılı : İZMİR, 1995

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : kagan.candan@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Karataş Lisesi, 2013

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2017

Mesleki Deneyim

Drivetech Mühendislik Otomasyon San. Tic. Ltd.Şti. 30.06.2017-30.09.2017

M.C.B.Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Arş. Gör. 11.03.2019-(halen)

Yayınları

Mamur, H. ve Candan, A.K. Simulation of regenerative braking in electric vehicles. International Conferences on Science and Technology, Engineering Science and Technology (ICONST–EST–2019), Prizren, Kosovo, 52-57, 26-30 August 2019.

Mamur, H ve Candan, A.K. Detailed Simulation of Regenerative Braking (Kabul edildi, Bilge International Journal of Science and Technology Research)