

YÜKSEK PERFORMANSLI SERVO UYGULAMALAR İÇİN MOTOR SÜRÜCÜSÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

The Driver Design and Implementation of Electric Motor for High Performance Servo Applications

Yusuf YAŞA, Ergin ŞAHİN, Çilem ACAR, Aybüke Gözütok, Ecem FIRAT, Erkan MEŞE

Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

yasa@yildiz.edu.tr, erginshn@gmail.com, cilemacar@gmail.com, r.aybukegozutok@gmail.com, firatecem@gmail.com, emese@yildiz.edu.tr

ÖZET

Endüstride son yıllarda hızla artan hareket uygulamaları, beraberinde motor tasarımı ve kontrolü konularını da popüler kılmıştır. Bu bildiride, 3 fazlı motor kontrolü için gerekli olan sürücünün tasarım evreleri aktarılmaktadır. Bu evreler sırasıyla; güç katı, besleme katı, hata koruma devresi, ADC sinyal koşullandırma devresi, Mosfet sürme devresi ve mikrodenetleyicidir. Bilgisayar ortamında tasarlanan bu devrede, hacimden maksimum faydalanabilmek amacıyla elemanların ve kartların yerleşimi optimize edilmiştir. DC kaynak olarak kullanılan bataryanın ömrünün uzatılması amacıyla analizi gerçekleştirilmiş ve gerekli tedbirler alınmıştır. Yerli üretime katkı sağlayacağı düşünüldükçe devrede kullanılan elemanların endüstri için fiyat araştırması ve optimizasyonu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnverter, üç fazlı sürücü, motor kontrolü, kalıcı mıknatıslı senkron motor kontrolü

ABSTRACT

In industry, the motion applications become very spread in recent years and it makes the design of motor and its control popular. In this paper, the stages of motor driver design will be presented. These stages are; power circuit, supply circuit, fault protection circuit, ADC signal conditioning circuit, Mosfet drive circuit and microcontroller. In this circuit that is designed in PC software, to maximize the usage from volume, the components and PCB cards placement are optimized. To extend battery life that is used as a DC power supply in the circuit is analyzed and its solution is presented. To make contribution to the domestic production in industry, the price of components that are used in the circuit are investigated and optimized.

1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda elektrik-elektronik araçların kullanımı sürekli artmaktadır. Özellikle fabrikalar ve atölyeler gibi üretim yapan yerlerde hareket gerektiren uygulamaların hassas konum ve hız kontrolü günümüzde vazgeçilmezler arasındadır. Endüstri geliştikçe gereksinimler de bu oranda artmaktadır. Bir otomotiv fabrikasında aracın dış gövdesine şekil verecek olan bir robot uygulaması buna örnek gösterilebilir. Robotun hareket yeteneğinin artmasıyla birlikte gövde çok daha detaylı şekillendirilecek ve fabrikada üretilen ürünün kalitesi ve pazarı bu oranda artacaktır.

Endüstrideki hassas konum, hız ya da moment kontrolü literatürde servo uygulamalar olarak adlandırılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorlar günümüz servo uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedenleri; motor tipinin sahip olduğu düşük atalet, yüksek verim, motorun moment bileşeninin direkt olarak kontrol edilebilmesi ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasıdır.

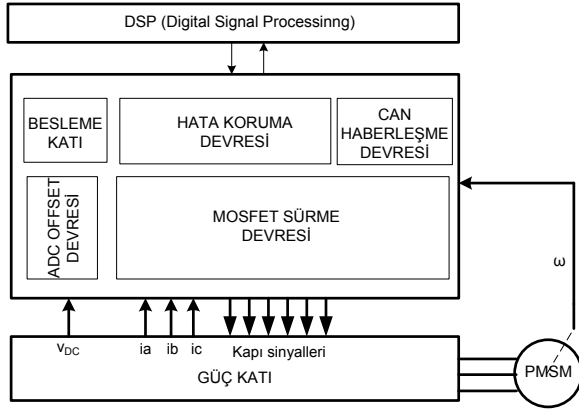
Kalıcı mıknatıslı senkron motorun (KMSM) servo uygulamalara uygun hale getirilmesi iki seçenekle mümkündür. Motorun tasarım aşamasında, vuruğu momenti ve moment dalgalılığı azaltılarak motorun sırasıyla yüksüz ya da hafif yükteki ve tüm yük aralığındaki dalgalılığı azaltılabilir. KMSM'nin Servo uygulamalara uygun hale getirilmesi sürücünün ve kontrol algoritmasının iyileştirilmesi ile de mümkündür.

Bu bildiride, yüksek performans gerektiren servo uygulamalarda kullanılan sabit mıknatıslı senkron motor için sürücü tasarımındaki aşamalar ve kontrol algoritması anlatılacaktır. Bildiride ayrıca tasarlanan sürücünün fiyat/performans analizi-optimizasyonu gerçekleştirilecektir.

2. SÜRÜCÜ TASARIMI

Servo motor sürücüsü genel olarak 3 bölüme ayrılmaktadır; güç katı, kontrol katı ve mikro

denetleyici. Bu bildiride kısımlar sırasıyla incelenecektir.



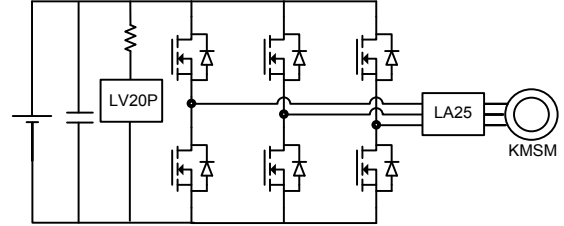
Şekil-1: Sürücü Blok Şeması

Şekil-1’de servo uygulamalar için geliştirilmiş sürücünün blok diyagramı görülmektedir. KMSM sürücüsü genel olarak üç fazlı ve iki seviyeli inverter topolojisi ile oluşturulmaktadır. Güç katında bulunan 6 yarı iletken anahtar kontrol katı ile sürülmekte ve motorun akım, gerilim ve hız bilgisi mikro denetleyici tarafından okunarak sürme sinyalleri elde edilmektedir. Mikrodenetleyici vasıtasıyla geri besleme alınarak kontrol edilen inverter, KMSM’nin geniş hız aralığında ve hassas ayarlanabilen pozisyonlarda çalışmasını sağlar. Kontrol katında sırasıyla besleme devresi, hata koruma devresi, ADC sinyal koşullandırma devresi, mosfet sürme devresi ve CAN haberleşme arabirim devresi bulunmaktadır. Kontrol katı, motor kontrolünün daha hızlı ve güvenilir yapılabilmesi için DSP ile kontrol edilecektir. Ayrıca DSP’ye bağlanabilecek bir PC ile motorun tüm çalışma şartları PC ile kolaylıkla takip edilebilecektir.

2.1. GÜÇ DEVRESİ

3 fazlı bir inverterin güç devresi genel olarak; 6 adet yarı iletken anahtar, gerilim sensörü, akım sensörleri ve dc kaynaktan oluşmaktadır. Bu uygulamada inverterin hareket eden bir araç üzerinde kullanılması planlandığı için dc kaynağın 21 V gerilime sahip bir batarya olduğu kabul edilmiştir. Akım ve gerilim sensörleri kapalı çevrim çalışma için gereklidir.

Güç devresinde dc bara gerilimi 21 V gibi düşük bir değere sahip olduğundan ve en fazla 50 A dc bara akımı için 1.05 kW değerinde düşük güce sahip olacağı için yarı iletken elemanlardan mosfetin kullanılması fiyat-performans açısından daha uygun olacaktır. İnverterin çıkış akımı efektif değeri 25 A değerini geçmeyeceğinden LEM marka yüksek frekans algısına sahip LA25 akım sensörlerinin kullanılması uygun görülmüştür. Gerilim sensörü olarak LEM marka LV20P kullanılmıştır. Güç devre şeması şekil-2 de görülmektedir.



Şekil-2: Güç Devresi

İnverter topolojisi zorlamalı komutasyon karakteristiğine sahip olduğundan dolayı mosfet, BJT veya IGBT yarı iletken elemanları kullanılabilir. Yarı iletken elemanlarda kayıp, iletim ve anahtarlama kaybından oluşmaktadır. Bu kayıpları en aza indirebilmek için doğru tipte ve gerek duyulan teknik özelliklerde anahtar seçimi birinci derece öneme sahip olmaktadır. Buna göre,

- Mosfet : düşük güç-yüksek frekanslarda,
- IGBT : orta güç – orta frekanslarda,
- BJT : orta güç – düşük frekanslarda

kullanılması yarı iletken anahtar kayıplarını minimum değere indirmektedir. Bunun yanında fiyat-performans kriteri göz önüne alındığında,

- Mosfet: düşük gerilimlerde,
- IGBT: orta- yüksek gerilimlerde,
- BJT: orta gerilimlerde

seçilmesi uygun olacaktır. Uygulamamız düşük gerilim-düşük güç olduğundan dolayı mosfet seçilmiştir. Güç devresinde kullanılan elemanların fiyat araştırılması yapılmış olup, seçilen elemanların listesi Tablo-I’de verilmiştir.

Tablo-I

Eleman adı	Adeti	Kodu	Maliyeti
Mosfet	6	IXTP98N075T	6\$ (6x1\$)
2200 µF	4	KE2200B200V3550K	13,2\$
Akım sensörü	3	LA25-P	45\$
Gerilim sensörü	1	LV20	30\$

Bataryaların dalgalanma akımı arttıkça bataryanın

$$\Delta T = I^2 R / (A * H) \quad (1)$$

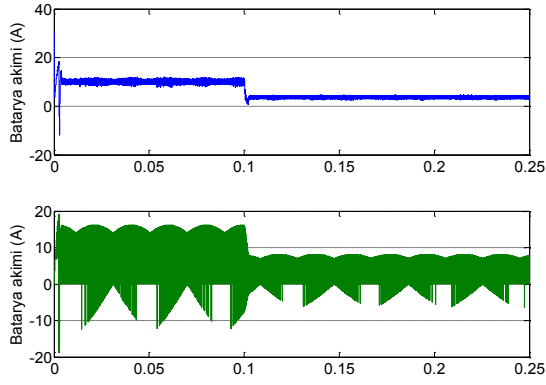
I: akım dalgalılığı

R: batarya iç direnci

A: batarya alanı

H: batarya ısı transfer katsayısı

(1) denkleminde göre iç direncinden dolayı sıcaklığı akım dalgalılığıyla artmaktadır[1]. Sıcaklık artışı bataryaların ömrünü kısaltmaktadır. Bataryanın ömrünü uzatmak amacıyla dc baraya kondansatör eklenilmesi düşünülmüş ve sürücü sisteminin simülasyonu Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilmiş, sonuçlar şekil-3’de verilmiştir.



Şekil-3: Batarya akımı dc bara kondansatörlü (üstte), dc bara kondansatörsüz (altta)

Şekil-3'ten de görüleceği üzere, dc baraya eklenen 4 adet 8800 uF değerinde kondansatör bataryadan çekilen akımın yaklaşık $\pm 1\%$ bant genişliğinde dalgalanmasını sağlamaktadır. Bu durumda bataryadan çekilen anlık akımların değeri azalacağı için batarya ömrü uzayacaktır[2]. Tablo-II'de 8800 uF kondansatör değeri için maliyet analizi yapılmıştır. Buna göre 2200 μ F'lık 4 adet paralel bağlanmış kondansatörün fiyatı diğer opsiyonlara göre daha uygun fiyata sahip olduğu için 4 adet 2200 uF kondansatör bu sürücüde kullanılacaktır.

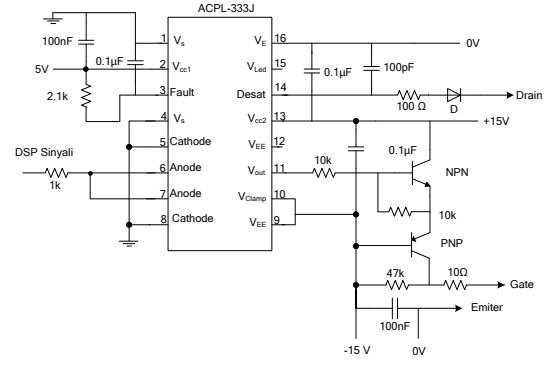
Tablo-II

Değeri	Adet	Maliyet
9000-10000 μ F	1	28\$
4700 μ F	2	25\$ $\times$ 2=50\$
2200 μ F	4	3,3\$ $\times$ 4=13,2\$

2.2. KONTROL DEVRESİ

2.2.1. Mosfet Sürme Devresi

Mikrodenetleyici tarafından üretilen tetikleme sinyallerinin güç elemanlarına verilmeden önce sürme devreleri ile yükseltilmesi ve izole edilmesi gerekir. [3] İzolasyon işlemi ile iki devre arasındaki elektriksel bağ koparılır. Bunun yerine manyetik veya optik bir bağ kurulur. Manyetik bağ, transformatör ile; optik bağ ise opto-transistor, optotriyak veya foto-diyot ile sağlanır. Böylece güç elemanı korunmuş olur. Burada izolasyon, ACPL-333 entegresinin yapısında bulunan foto-diyot ile sağlanmaktadır.



Şekil-4: Mosfet Sürme Devresi

Dsp tarafından üretilen sinyaller, bir güç elemanını süremeyecek kadar zayıf akıma sahip oldukları için, yükseltilecek ilgili elemanın kapısına uygulanır. Şekil-4'den de görüldüğü gibi; yükseltme işlemi genellikle bir npn ve bir pnp türü iki transistör ve iki yönlü DC gerilim kaynağı kullanılarak yapılır. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan elemanların doyumunda çalışması ve aynı zamanda da aşırı doyuma gitmemeleri gerekir. D diyodu aşırı doyumu engellemek için kullanılmıştır. Kullanılan dirençlerin koruma ve akım sınırlama görevleri vardır. Kondansatörler ise parazit önleme amaçlı konulmuştur. İnverterde kullanılan elemanların listesi Tablo -III'de verilmiştir.

Tablo-III

Eleman	Değer	Kod	Adet
Sürme Entegresi	---	ACPL-333J	6
Transistör	---	ZXTC2063E6	6
Diyot	---	BAV21WS	6
Direnç	10 Ω	---	6
Direnç	100 Ω	---	6
Direnç	1 k Ω	---	6
Direnç	2.1 k Ω	---	6
Direnç	10 k Ω	---	6
Direnç	47 k Ω	---	6
Kondansatör	100 pF	---	6
Kondansatör	100 nF	---	6

2.2.2. ADC Sinyal Koşullandırma Devresi

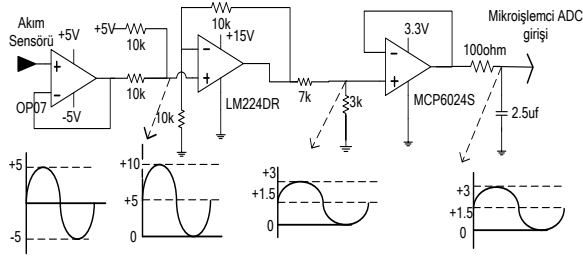
Dijital çalışan cihazlara bir analog bilgi aktarmak, analog sinyalin zaman içindeki bazı noktalarının örneklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Analog sinyali dijitale çevirmek için mikrodenetleyicilerin sahip olduğu ADC (Analog to Digital Converter) modülü özelliğinden faydalanılır. Analog sinyalin giriş gerilim denklemi aşağıda verilmiştir. Kullanılacak olan mikrodenetleyici 12 bitlik 0-3V ADC kanalına sahip olduğu için

$$V_{in} = \frac{D * (V_{ref+} - V_{ref-})}{2^n - 1} + V_{ref-}$$

V_{in} =Analog Giriş Gerilimi (0-3V)

V_{ref+} = 3V ; V_{ref-} = 0V ; n=12

D= Sayısal Sonuç (12 bit)



Şekil-5: ADC sinyal koşullandırma devresi

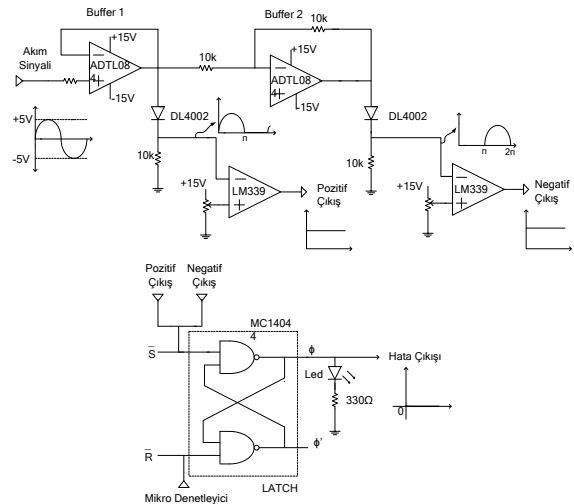
AC uygulamalarda akım bilgisi pozitif ve negatif değerlere sahip olduğundan akım sensörlerinden okunan değerlerin mikrodeneleyicinin adc kanalına iletilmeden önce sinyal koşullandırma devresinden geçirilmesi gerekmektedir. Tasarlanan sinyal koşullandırma devresi şekil-5’de gösterilmiştir. Akım sensörlerinden gelen ac akım bilgisi 0 V potansiyelin üzerine ötelenmiş ve son olarak adc kanalının orta gerilim değeri olan 1.5 V referansına çekilmiştir. Kullanılan elemanların listesi Tablo-IV’de verilmiştir.

Tablo-IV

Eleman	Değer	Kod	Adet
Opamp	---	OP07	1
Opamp	---	LM224DR	1
Opamp	---	MCP6024S	1
Direnç	100 Ω	---	4
Direnç	140 Ω	---	3
Direnç	350 Ω	---	1
Direnç	3 k Ω	---	3
Direnç	7 k Ω	---	3
Direnç	10 k Ω	---	12
Kondansatör	2.5 μ F	---	4

2.2.3. Hata Koruma Devresi

Analog devreler işlem hızı bakımından mikrodeneleyicilere göre çok daha hızlıdır. Özellikle koruma yapılması planlanıyor ise, bu algoritmanın analog devreler ile kurulması gerekmektedir. Hata koruma devresi güç elektroniği uygulamalarında özel bir öneme sahiptir. Geliştirilen bu devre, herhangi bir güç elektroniği uygulamasına kolaylıkla entegre edilebilir. Akım sensörlerinden okunan akım bilgisi, potansiyometre yardımı ile ayarlanabilen bir üst limit değeri ile karşılaştırılır. Ardından, akımın bu değeri aşması durumunda devrenin hatayı aktif duruma getirmesi ile birlikte mikroişlemciden kapı sürme devrelerine iletilen sinyaller kesilip devrenin kapanması sağlanır. Devrenin detaylı analizi şekil-6’da gösterilmiştir. Hatanın anlık, geçici oluşması, devre tarafından yine hata olarak algılanmakta, latch yapısı ile kısa süreli hatalar algılanıp, hafızada saklanmaktadır. Böylelikle kısa süreli hatalar gelse bile devre kendini kapamakta, kullanıcı tarafından reset bilgisi gelene kadar kapı sinyalleri anahtarlar iletilmemektedir. Böylelikle devrede tam bir koruma sağlanmaktadır.



Şekil-6: Hata koruma devresi

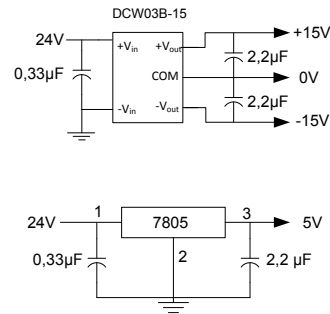
Kullanılan elemanların listesi Tablo-V’de verilmiştir.

Tablo-V

Entegre Adı	Adedi	Türü
ADTL084	2	Opamp
LM339	2	Opamp
MC14044B	1	Latch
10 k Ω	5	Direnç
50 k Ω	2	Trimpot
DL4002	2	Diyot

2.2.4. Besleme Devresi

Besleme katı, kontrol devresinin ihtiyaç duyduğu farklı seviyelerdeki gerilimleri üreten ve ilgili kısımlara iletilmesini sağlayan birimdir. Besleme katı giriş gerilimi, bu devrede tek ve sabit olup 24 V olarak belirlenmiştir. Devrede ihtiyaç duyulan gerilim seviyeleri +15V, -15V, 5V, 3.3V gibi farklılık göstermekte ve kontrol devresinin bazı kısımlarında ayrıca izolasyon gerekmektedir. İzolasyon gerekmediği durumlarda gerilim seviyeleri regülatörlerle sağlanmış, izolasyon gereken durumlarda DC/DC dönüştürücü kullanılmış ve ihtiyaç duyulan tek ve çift yönlü DC gerilim kaynakları elde edilmiştir (şekil-7).



Şekil-7: Besleme Devresi

İnverterdeki altsıra yarı iletken anahtarlar gibi potansiyel farkları aynı olan devreler tek dönüştürücü üzerinden beslenerek az eleman

kullanımı hedeflenmiştir. Üst sıra anahtarların potansiyel farkları aynı olmadığı için sürme devreleri ayrı ayrı 3w'lık DC/DC dönüştürücü üzerinden beslenmiştir.

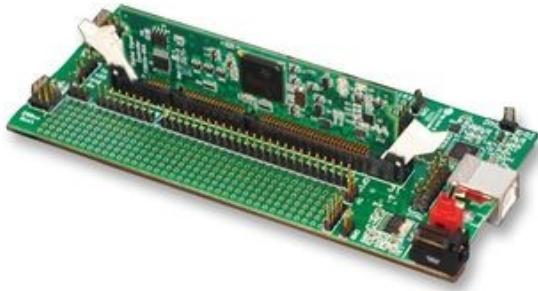
Kullanılan elemanların listesi Tablo-VI'da verilmiştir.

Tablo-VI

Eleman	Değer	Kod	Adet
DC/DC dönüştürücü	3 w	DCW03B-15	4
DC/DC dönüştürücü	8 w	DCW08B-15	1
Regülatör	2,5 w	LM78M05	5
Kondansatör	0,22 μ F	---	15
Kondansatör	0,33 μ F	---	10

2.3. MİKRODENETLEYİCİ

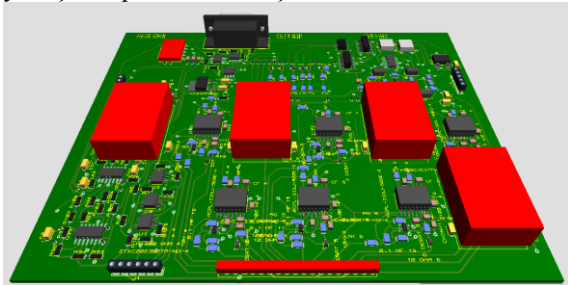
Mikrodenetleyici, motor sürücüsünün beyin işlevini üstlenen parçasıdır. Uygulamada mikrodenetleyici olarak TMDSDOCK28335 serisi floating point özelliği bulunan DSP kullanılmıştır. Bu dsp 150 MHz işlem hızına ve motor kontrolü için özel PWM, enkoder gibi modüllere sahiptir. (şekil-8)



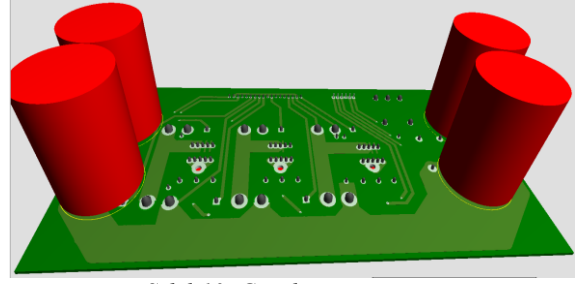
Şekil-8: Besleme Devresi

3. UYGULAMA

İnverter devresi uygulaması Proteus-isis ve ares devre çizim arayüzleri ile gerçekleştirilmiştir. Devre, şekil 9 ve 10'dan görüldüğü üzere kontrol kartı ve güç kartı olmak üzere iki parçadan oluşmakta ve pinler yardımı ile birbirine geçmektedir. İnverterin endüstride sürücü olarak kullanılması düşünüldüğünden, hacimden maksimum faydalanabilmesi için kartların ve elemanların yerleşimi optimize edilmiştir.



Şekil-9: Kontrol devresi tasarımı



Şekil-10: Güç devresi tasarımı



Şekil-11: İnverter devresi yerleşimi

Tasarlanan inverter devresinin entegre ve diğer elektriksel elemanların yerleştirilmeden önceki fotoğrafı şekil-11'de gösterilmektedir. Devre şuan montaj aşamasındadır.

4. SONUÇLAR

Bu bildiride, yüksek performanslı servo uygulamalarda kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron motor için sürücü tasarımı aşamaları anlatılmıştır. Tasarlanan devrelerin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılmış ardından fiyat-performans karşılaştırması yapılarak ilgili devre elemanları seçilmiştir. DC kaynak olarak kullanılan bataryanın ömrünün uzaması amacıyla, bataryaya paralel kondansatör kullanılması düşünülmüş ve analizi yapılarak yeterli olacak $\pm 1\%$ akım dalgalılığını elde edebilmek için 8800 uF kondansatörün yeterli olduğu görülmüştür. Devre Proteus PC arayüzü ile tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca sürücünün PC ortamında termal analizi, gelecekte yapılması planlanan çalışmalardandır.

5. KAYNAKLAR

[1] A Technical Note from the experts in business-critical continuity, "Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life", Y. 2010

[2] Nor, J.K., "Art of Charging Electric Vehicle Batteries", WESCON/93. Conf. Rec., San Francisco, CA, pp. 521-525, 1993.

[3] Bodur, H., "Güç Elektroniği", Y. 0029, 975-511-546-7, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010, pp 352