



Doğru Akım Motor Sürücüsü Anahtarlama Frekansının Motor Performansına Etkileri

KORMAS Elektrikli Motor A.Ş. TOSB OSB, Kocaeli,

Buğra Er

Tuba Kocaer

Çağlar Acar

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,

Tokat,

Ahmet Fenercioğlu

Fırçasız Doğru Akım Motoru yüksek torkludur ve değişken hızlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Fırçalar olmadan mekanik aşınma, ses ve sıcaklık minimize edilebilir. Kontrol algoritması Doğru Akım fırçalı motorlarına oranla oldukça karmaşıktır. Rotor konumunun algılanarak komütasyon işlemi yapılması gerekir. Rotor konumunun algılanabilmesi için sensörlü kontrolde alan etkili sensörleri kullanılır. Yükte kalkması gereken uygulamalarda alan etkili sensörleri kullanmak avantajlıdır. Motor kalkışı için üç adet sensörden gelen verileri değerlendirerek uygun fazı tetikler. Hızlanmaya bağlı anahtarlama açılarının kontrolü zorunludur. Diğer taraftan, hızlanma oranı da yük özelliklerine bağlıdır.

Başlangıç süresini kısaltmak sürülen yükün özelliklerine bağlı olduğu gibi uygulanan kontrol yöntemine de bağlıdır. Sadece akımlar kontrol edildiğinde, motor hızı sistemin mekanik dinamiklerine göre artacaktır. FDAM sürücü dalga formları gözlemlenerek optimum çalışma durumu sağlayacak kontrol karakteristiği elde edilebilir. Uygulamanın gerektirdiği BLDC tork karakteristiği, motor akımı ve hızına göre uygun, önceden hesaplanmış açma ve kapama açıları uygulanarak daha sonra çalışma sırasında optimize edilebilir. Bu kontrol metoduyla beraber trapezodial bir sinyal ortaya çıkacaktır. Sürücü devresi üzerindeki anahtarlama frekansı etkisi motorun yük ve hızına bağlı olarak değişmektedir.



Kullanılan fırçasız doğru akım motoru ve Şekil kullanılan sürücü gösterilmiştir. Sürücü üzerinde besleme girişi, faz çıkışları, sensör beslemesi, sensör girişi ve hız bilgisi girişi bulunmaktadır. Kart yapısı; Mikroişlemci, MOSFET driver, MOSFET ve Regülatörden oluşmaktadır. Gerekli donanım hesaplamaları yapılmıştır.



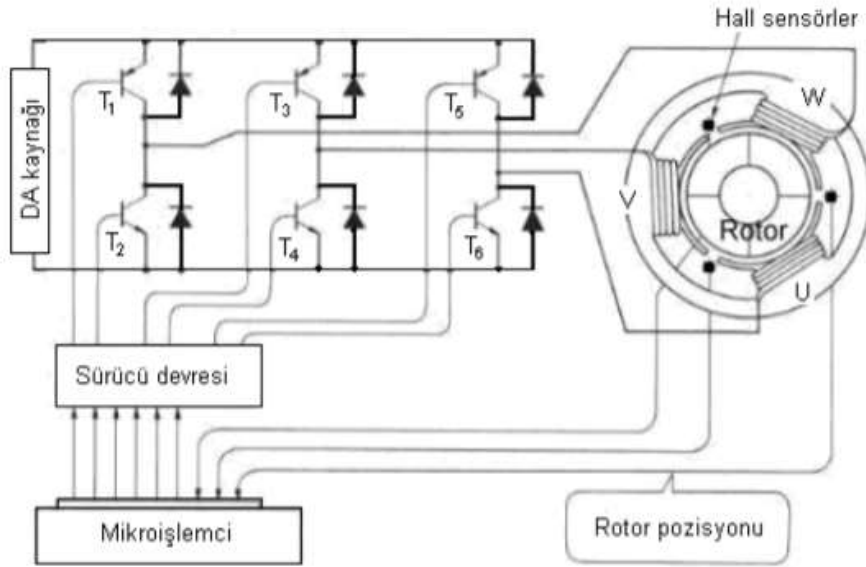
Papathanasopoulos ve arkadaşları, kritik uygulamalarda Fırçasız DC motor sürücüsünün güvenilir durum izlemesi için alternatif bir yaklaşım önermiştir. Alan etkili etkisi pozisyon sensörü tabanlı sürücülere odaklanarak, dengesiz sistem çalışması teşhisi için veri odaklı bir yaklaşım sunulmaktadır.

Pindoriya ve arkadaşları FPGA kullanarak fırçasız doğru akım motor sürücü tasarımını ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. FPGA, dijital darbe genişlik modülasyonu kontrol tekniğini kullanarak altı darbeli üç fazlı bir eviriciyi çalıştırır. Bu kontrol stratejisi basit ve güçlüdür, akım sensörü gerektirmeden motor kontrolü sağlanmıştır. Önerilen tekniğin simülasyonu MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş ve karşılık gelen sonuçlar FPGA kartının deneysel sonuçları ile doğrulanmıştır.

Zhang ve arkadaşları, Fırçasız DC motorun özelliklerine ve çalışma prensibine göre, donanım ve yazılım açısından fırçasız DC motorun bir sürücü kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrol sistemi, güç kaynağı devresi, sürücü devresi ve algılama devresi dahil olmak üzere mikroişlemci olarak olarak STM32F103RBT6 kullanılmıştır.

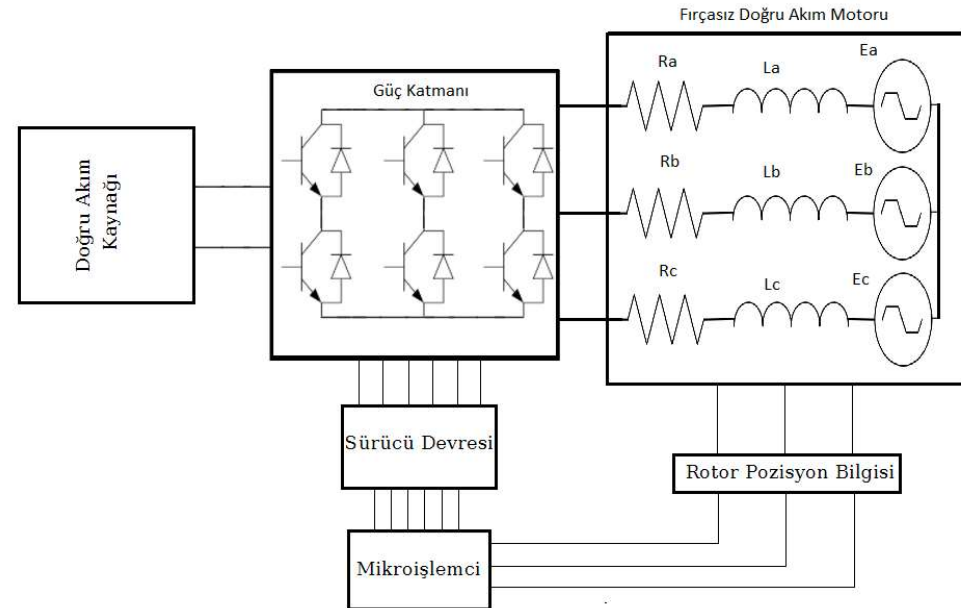
Ctibor ve arkadaşları, Fırçasız motorun sürücüsü STM32 ARM mikrodenetleyici kullanılmıştır. Uygulama yapısını, kullanılan sürücüleri ve çevre birimlerini ve uygulanan kademeli kontrol yapısını açıklamıştır.

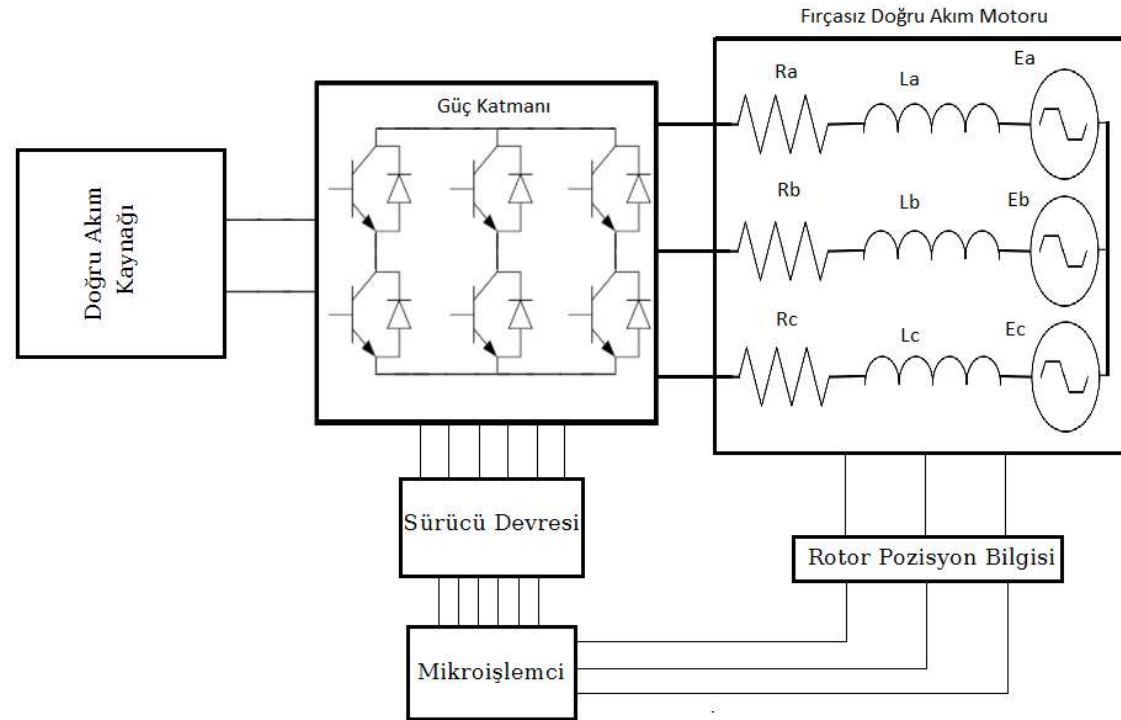
Echle ve arkadaşları, trapezoidal ters-emf dalga formuna sahip bir eksenel akıllı motor için FDAM sürücü yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır. 120 derece iletimli BLDC modunun en iyi verimlilik performansına sahip olduğu göstermiştir.



FDAM yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işleminde rotor pozisyon bilgisi gerekir. Bu çalışmada alan etkili sensörleri kullanılarak pozisyon bilgisi alınmıştır. Fırçasız DC motorların kontrolünde, iki ayrı kapalı çevrim kullanılır. Birincisi, iç kontrol çevrimidir ve burada motor akımı veya momentini kontrol edilir.

Bu amaçla, motor faz sargılarının akımları sürekli takip edilerek, referans akımı izlemesi sağlanır. İkincisi ise, dış kontrol çevrimidir. Bu çevrimde, motor hızı kontrol edilir. Geri besleme olarak, pozisyon sensörlerinden alınan gerçek motor hız ve konum bilgisi hız denetleyicisinde işlenmektedir.





Şekil 3’de gösterilen FDAM Sürücü Şematik Diyagramı verilmiştir. Üç faz dengeli sistemlerde açı ile rotor relüktanslarında herhangi bir değişiklik olmadan nominal akımda çalışıldığı varsayılır ise $L_a = L_b = L_c = L_s$, Henry cinsinden armatür endüktansı ve $R_a = R_b = R_c = R$, ohm cinsinden armatür direncidir

$$V_a = R_a I_a + L_a \left(\frac{dI_a}{dt} \right) + E_a \quad (1)$$

$$V_b = R_b I_b + L_b \left(\frac{dI_b}{dt} \right) + E_b \quad (2)$$

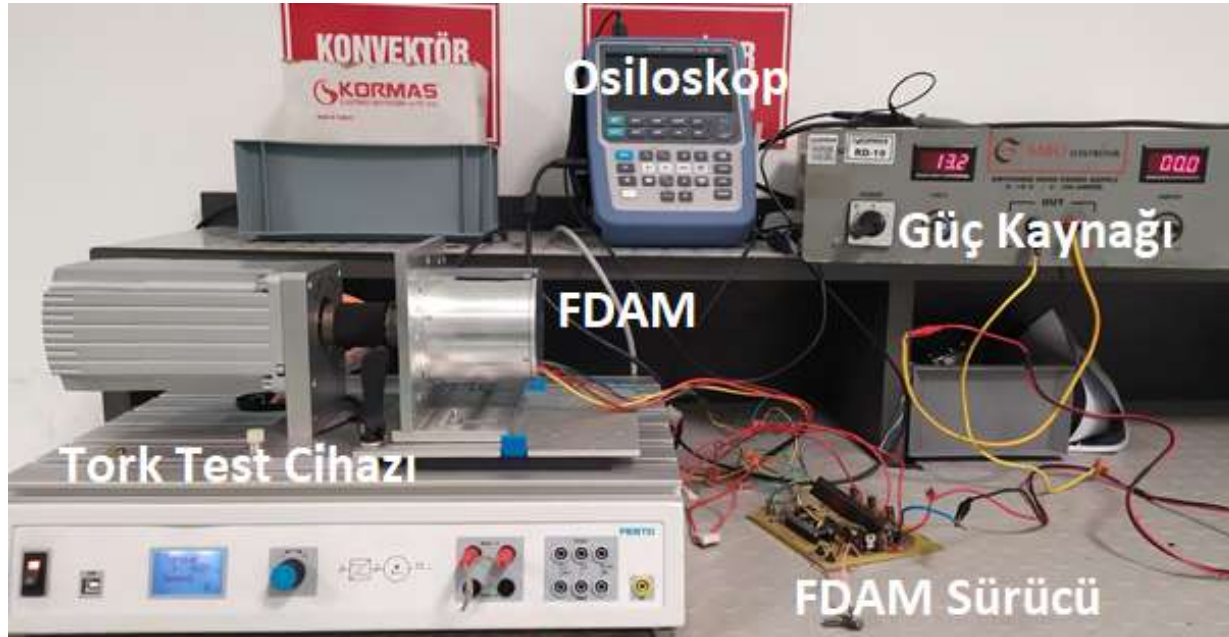
$$V_c = R_c I_c + L_c \left(\frac{dI_c}{dt} \right) + E_c \quad (3)$$

Tork	Hız	Akım
Nominal Hız	4000	Rpm
Nominal Gerilim	13	V
Stator sargı faktörü	0.866025	
d eksenli reaktif endüktansı L_d	5395.06	nH
d eksenli reaktif endüktansı L_q	5395.06	nH
d eksenli endüktansı $L_1 + L_d$	27593.9	nH
d eksenli endüktansı $L_1 + L_q$	27593.9	nH
Armatür kaçak endüktansı L_1	22198.9	nH
Sıfır dizi endüktansı L_0	4095.96	nH
Armatür faz direnci R_1	0.0282124	ohm
d eksenli zaman sabiti	191230	ns
q eksenli zaman sabiti	191230	ns

FDAM motorda ilk adımda dirence ve endüktansa bağlı olarak (1), (2), (3) formüllerinde yer verilen formüller kullanılmıştır. Armatür üzerindeki endüktans zamana bağlı bir değişken olup anahtarlama frekansı ile doğrudan bağlantılıdır. Üzerinde çalışılan FDAM için endüktansı ağırlıklı olmak üzere gerekli özellikleri Tabloda verilmiştir.

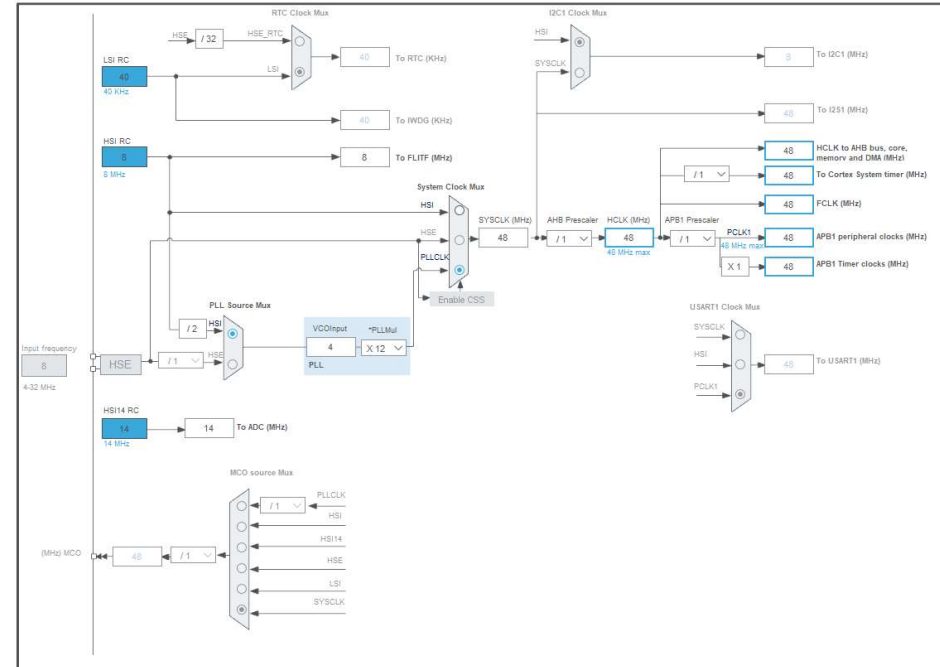
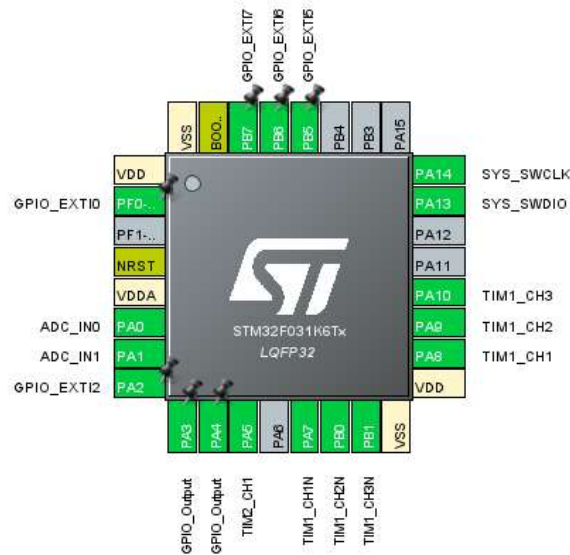
Sensor Lojik Konumları				Sürücü Çıkışları					
HA	HB	HC	YÖN	GLA	GLB	GLC	GHA	GHB	GHC
1	0	1	1	/PWM	0	1	PWM	0	0
1	0	0	1	0	/PWM	1	0	PWM	0
1	1	0	1	1	/PWM	0	0	PWM	0
0	1	0	1	1	0	/PWM	0	0	PWM
0	1	1	1	0	1	/PWM	0	0	PWM
0	0	1	1	/PWM	1	0	PWM	0	
1	0	1	0	1	0	/PWM	0	0	PWM
1	0	0	0	0	1	/PWM	0	0	PWM
1	1	0	0	/PWM	1	0	PWM	0	0
0	1	0	0	/PWM	0	1	PWM	0	0
0	1	1	0	0	/PWM	1	0	PWM	0
0	0	1	0	1	/PWM	0	0	PWM	0

Birçok çalışma altı adım sürüş uygulamalarında yüksek olan kanal ile beraber düşük kanaldan sadece bir kanalı açmıştır. Bu uygulamada yüksek olan kanala PWM sinyali uygulanırken aynı kanalın düşük kanalına ters PWM uygulanır. Böylece her bir sensör tarafında yüksek olan kanaldan bir MOSFET iletimde iken düşük olan kanallar tarafında iki adet MOSFET iletimdedir. Bu yöntem motor üzerindeki ilgili bobinin hızlı deşarjını sağlamasına yarar iken ölü zaman dikkat edilmesi gereken tehlikeli bir uygulamadır. Sensör konumlarına göre tetiklenecek ilgili fazlar Tabloda verilmektedir. Bu tetiklemeder sonucu motor trapezodial sinyal ile beraber sürülür.



12V FDAM sürücüsü ile birlikte çalıştırılmıştır. Festo tork testi ölçüm cihazına bağlanan motorun yük altındaki davranışı gözlenmiş olup, Motorun tork, hız, güç ve verim gibi grafikleri elde edilmiş ve motorun çalışma eğrisi çıkarılmıştır. Tork testi düzeneği Şekilde verilmiştir.

Alan etkili sensörleri barındırılan kesme girişleri,
Programlama Pinleri,
Darbe Genişliği Modülasyonu için Tim1 yapısı,
Hız ve Akım Analog girişlerini barındıran sistemde mikroişlemci yapısını ve hızını gösteren
şekiller verilmiştir.



Darbe değışliği modülasyonu ve ilgili  n  l ekleyici yazılım ve mikro şlemci kontrol birimi gösterilmiştir. DGM sinyali, Ters DGM sinyali ve Lojik kullanılarak kapalı çevrimde gelen sensör bilgisine göre ilgili fazlar tetiklenmektedir.

```
153 HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
154 HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
155 HAL_TIMEx_PWMN_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
156 __HAL_TIM_SET_PRESCALER(&htim1, pres);
157 __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_3, 0);
158 __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_2, 0);
159 __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, 0);
```

7.3. SYS

mode: Debug Serial Wire

Timebase Source: SysTick

7.4. TIM1

Channel1: PWM Generation CH1 CH1N

Channel2: PWM Generation CH2 CH2N

Channel3: PWM Generation CH3 CH3N

7.4.1. Parameter Settings:

Counter Settings:

Prescaler (PSC - 16 bits value)	12 *
Counter Mode	Up
Counter Period (AutoReload Register - 16 bits value)	409 *
Internal Clock Division (CKD)	No Division
Repetition Counter (RCR - 8 bits value)	0
auto-reload preload	Disable

Trigger Output (TRGO) Parameters:

Master/Slave Mode (MSM bit)	Disable (Trigger input effect not delayed)
Trigger Event Selection	Update Event *

Break And Dead Time management - BRK Configuration:

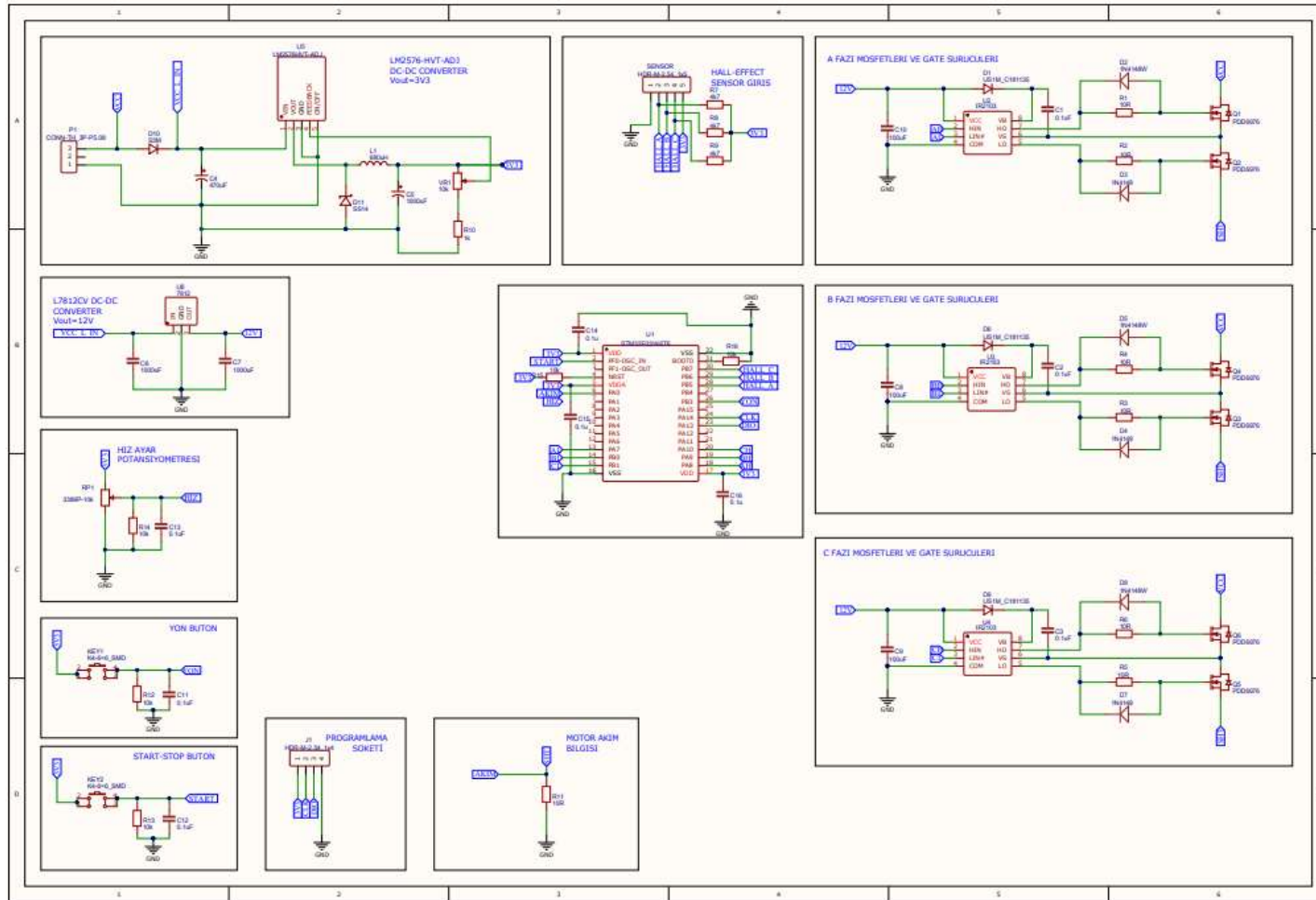
BRK State	Disable
BRK Polarity	High

Break And Dead Time management - Output Configuration:

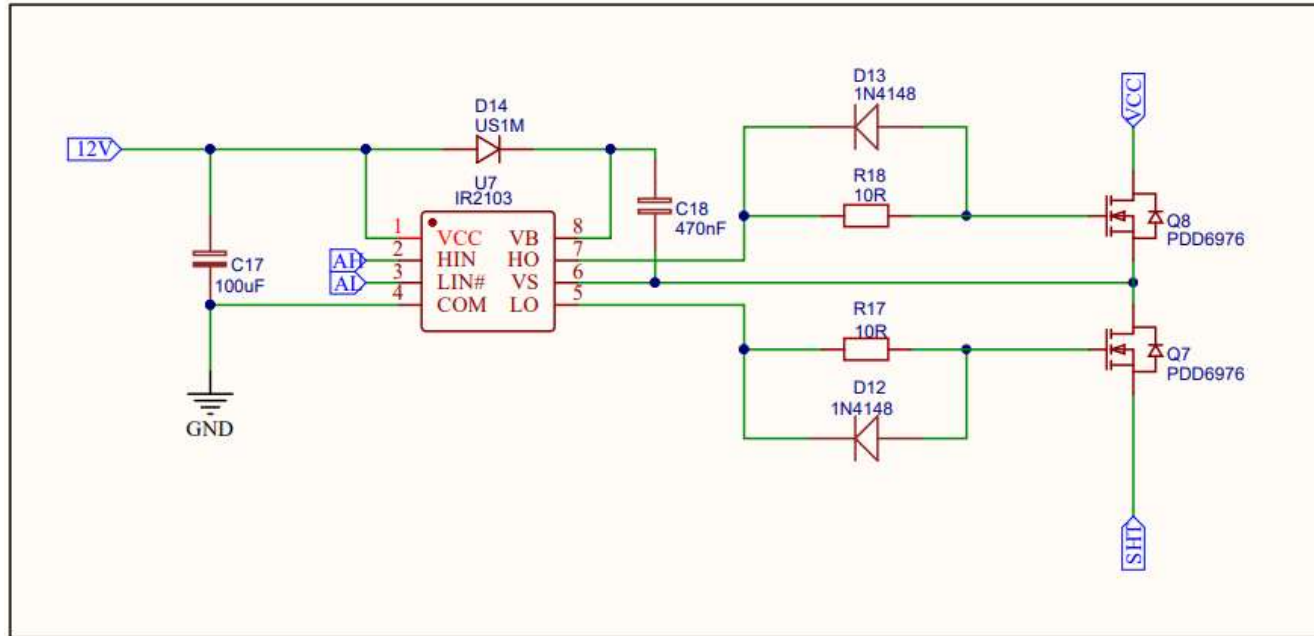
Automatic Output State	Disable
Off State Selection for Run Mode (OSSR)	Disable
Off State Selection for Idle Mode (OSSI)	Disable
Lock Configuration	Off
Dead Time	50 *

PWM Generation Channel 1 and 1N:

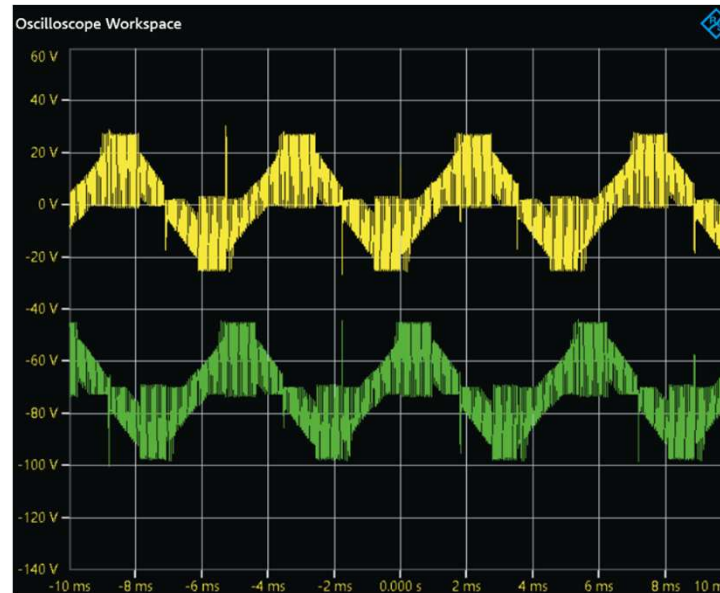
Mode	PWM mode 1
Pulse (16 bits value)	100 *
Output compare preload	Enable
Fast Mode	Disable
CH Polarity	High
CHN Polarity	High
CH Idle State	Reset



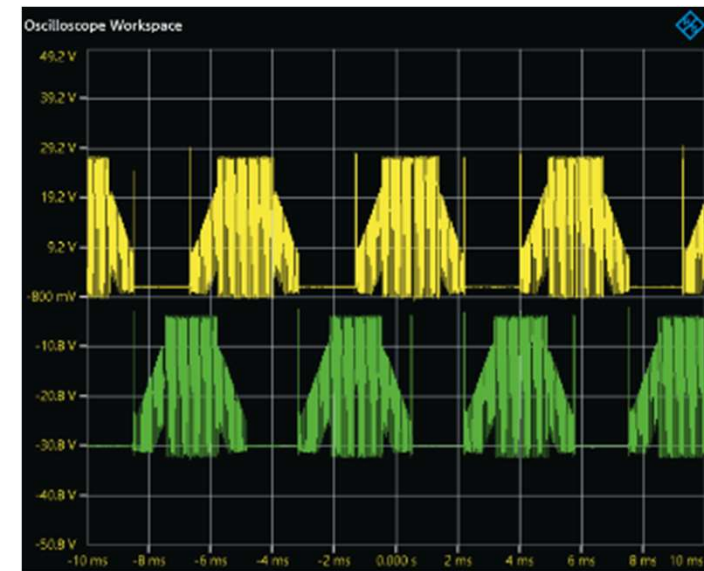
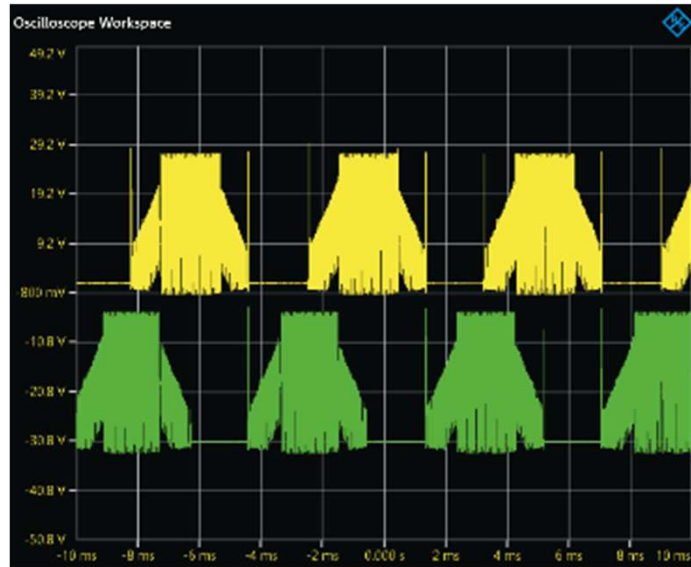
Motor sürücüsü kontrol devresi ve güç katmanı olmak üzere temelde iki temel kısımdan oluşmaktadır. Güç katmanı Mosfet (Metal Oxide Semiconductor Field Verimect Transistor) ve Mosfet sürücü (Mosfet Gate Driver) yapısı gibi güç elektroniği elemanlarından oluşurken, kontrol devresi kısmı mikrodeneleyici ve özel lojik yapılarından oluşmaktadır.

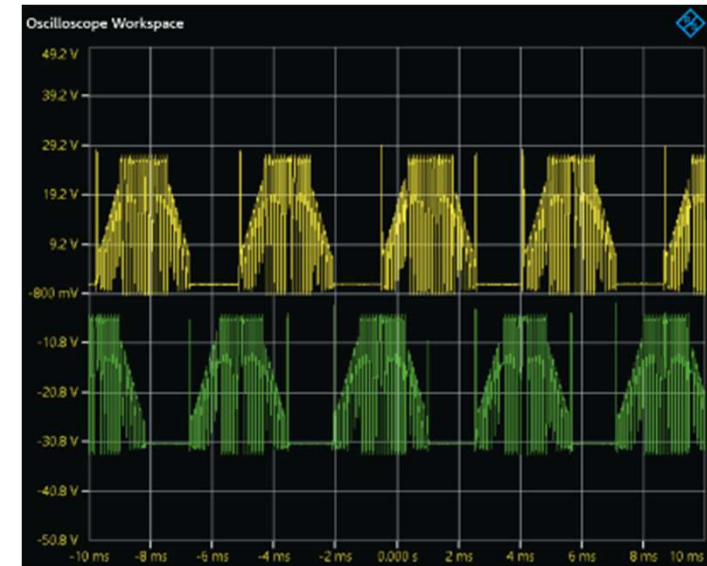
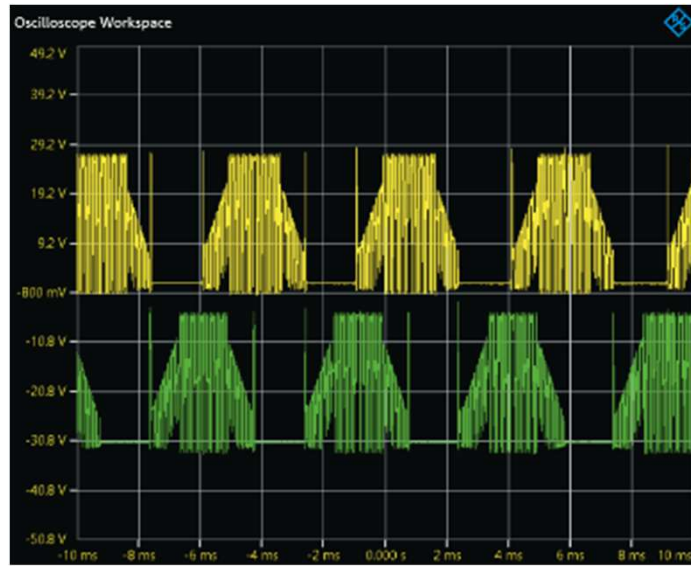


Anahtarlama frekansı olarak motor sarımdaki bobin endüktansına göre seçilmesi gereken anahtarlama frekansı vardır. Pompa motoru sürüşünde kalkıştan itibaren 9khzden başlayarak 15khz e ulaşması belirlenmiştir. Pompa yükünden ötürü kalkışlarda nispeten düşük frekans tercih edilmektedir. Nominal hızında ise 15Khz in daha iyi olduğu kararlaştırılmıştır. Çalışmalarda 8 kHz-12 kHz-15 kHz-20 kHz anahtarlama frekanslarında motor yüklenmiştir.



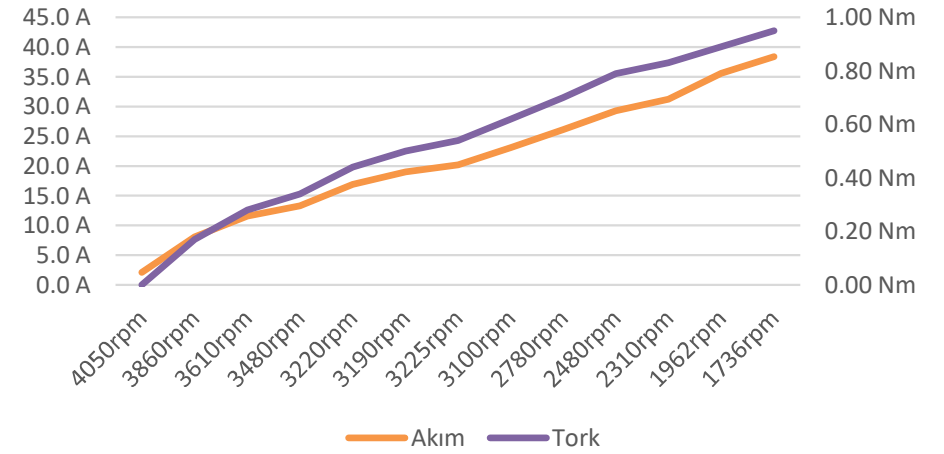
PWM = 10 kHz,	Tork	Hız	Akım	Gerilim	Pelk	Pmek	Verim
	0.17 Nm	3810rpm	8.1 A	13 V	105.30 W	67.83 W	64%
	0.36 Nm	3390rpm	13.6 A	13 V	175.44 W	127.81 W	73%
	0.55 Nm	3200rpm	19.4 A	14 V	265.78 W	184.32 W	69%
PWM = 15 kHz,	Tork	Hız	Akım	Gerilim	Pelk	Pmek	Verim
	0.17 Nm	3860rpm	8.5 A	13 V	110.50 W	68.72 W	62%
	0.34 Nm	3480rpm	13.5 A	13 V	175.50 W	123.91 W	71%
	0.54 Nm	3176rpm	20.2 A	14 V	274.72 W	179.61 W	65%
PWM = 20 kHz,	Tork	Hız	Akım	Gerilim	Pelk	Pmek	Verim
	0.17 Nm	3900rpm	8.6 A	13 V	112.66 W	69.43 W	62%
	0.39 Nm	3350rpm	15.4 A	13 V	200.20 W	136.82 W	68%
	0.57 Nm	2550rpm	23.4 A	12 V	285.48 W	152.22 W	53%



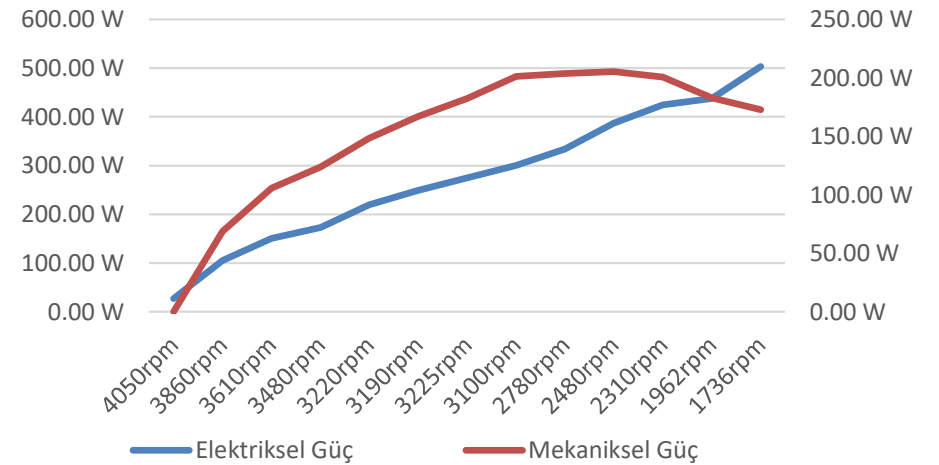


Tork	Hız	Akım	Gerilim	Elektriksel Güç	Mekaniksel Güç	Verim
0,00 Nm	4050rpm	2,1 A	13,0 V	27,30 W	0,00 W	0%
0,17 Nm	3860rpm	8,1 A	13,0 V	105,30 W	68,72 W	65%
0,28 Nm	3610rpm	11,6 A	13,0 V	150,80 W	105,86 W	70%
0,34 Nm	3480rpm	13,3 A	13,0 V	172,90 W	123,91 W	72%
0,44 Nm	3220rpm	16,9 A	13,0 V	219,70 W	148,37 W	68%
0,50 Nm	3190rpm	19,0 A	13,1 V	248,90 W	167,04 W	67%
0,54 Nm	3225rpm	20,2 A	13,6 V	274,72 W	182,38 W	66%
0,62 Nm	3100rpm	23,1 A	13,0 V	300,30 W	201,28 W	67%
0,70 Nm	2780rpm	26,1 A	12,8 V	334,08 W	203,80 W	61%
0,79 Nm	2480rpm	29,3 A	13,2 V	386,76 W	205,18 W	53%
0,83 Nm	2310rpm	31,2 A	13,6 V	424,32 W	200,79 W	47%
0,89 Nm	1962rpm	35,6 A	12,3 V	437,88 W	182,87 W	42%
0,95 Nm	1736rpm	38,4 A	13,1 V	503,04 W	172,71 W	34%
0,17 Nm	3860rpm	8,1 A	13,0 V	105,30 W	68,72 W	65%
0,28 Nm	3610rpm	11,6 A	13,0 V	150,80 W	105,86 W	70%
0,34 Nm	3480rpm	13,3 A	13,0 V	172,90 W	123,91 W	72%
0,44 Nm	3220rpm	16,9 A	13,0 V	219,70 W	148,37 W	68%

Akım, Tork - Hız Grafiği



Güç-Hız Grafiği



TEŞEKKÜR EDERİZ