

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## **BİR FAZLI İNVERTER TASARIMI**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Faruk YALÇIN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK -ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU**

**Haziran 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR FAZLI İNVERTER TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Faruk YALÇIN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

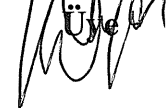
**Bu tez 09/06/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Prof.Dr.  
Uğur ARİFOĞLU  
Jüri Başkanı**

**Yrd.Doç.Dr.  
İrfan YAZICI**

**Üye**  


**Yrd.Doç.Dr.  
Kürşat AYAN**

**Üye**  


## TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aŐamasında önemli katkılarda bulunan değerli hocam sayın Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU 'na, manevi desteklerini her zaman yanımda olan aileme, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sayın Erdoğan TÜRKMEN 'e ve sayın Sedat AYDIN 'a teŐekkürlerimi bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
İNVERTERLER VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ.....	2
2.1. İnverterler.....	2
2.2. Besleme Özelliklerine Göre İnverterler.....	3
2.2.1. Gerilim beslemeli inverterler.....	3
2.2.2. Akım beslemeli inverterler.....	4
2.3. İnverterlerin Kullanıldıkları Yerler.....	4
2.3.1. İstenilen gerilimin elde edilmesinde.....	4
2.3.2. Elektrikli taşıma sistemlerinde.....	5
2.3.3. Bir fazdan üç faza çevirmede.....	5
2.3.4. Asenkron motor kontrolü.....	5
2.4. Temel İnverter Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	6
2.5. Bir Fazlı Köprü İnverter ve Çalışma Prensibi.....	9

### BÖLÜM 3.

#### İNVERTERDE ANAHTARLAMA YÖNTEMLERİ VE

PROGRAMLANMIŞ HARMONİK ELEMINASYONU.....	14
3.1. Kare Dalga Anahtarlama.....	14
3.2. Darbe Genlik Bindirimli Anahtarlama.....	15
3.3. Çift Yönlü Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Anahtarlama...	17
3.4. Tek Yönlü Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Anahtarlama...	18
3.5. Programlanmış Harmonik Eleminasyonu.....	19

### BÖLÜM 4.

BİR FAZLI İNVERTER TASARIMI.....	24
4.1. Tasarımın Amacı ve İnverterin Çalışma Prensibi.....	24
4.2. Tasarlanan Bir Fazlı İnverterin Kısımları.....	28
4.2.1. Frekans giriş devresi.....	29
4.2.2. IGBT tetikleme devresi.....	30
4.2.3. IGBT sürme katı.....	38
4.2.4. Köprü inverter katı.....	42

### BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
5.1. Sonuçlar.....	44
5.2. Öneriler.....	78

KAYNAKLAR.....	81
----------------	----

EKLER.....	83
------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	122
---------------	-----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_1$	: Alan-1
$A_2$	: Alan-2
AA	: Alternatif akım
AC	: Alternative current (alternatif akım)
$a_n$	: Sinüs bileşenli harmonik katsayıları
$b_n$	: Cosinüs bileşenli harmonik katsayıları
BJT	: Bipolar junction transistor (iki kutuplu jonksiyon transistörü)
C	: Kapasite / collector (kollektör)
$C_{dc}$	: Dc bara filtre kapasitesi
$C_g$	: IGBT kapı kapasitesi
$C_{snubber}$	: Snubber kapasitesi
$c_{CE}$	: IGBT kollektör-emetör kapasitesi
$c_{CG}$	: IGBT kollektör-kapı kapasitesi
$c_{GE}$	: IGBT kapı-emetör kapasitesi
$c_{ies}$	: IGBT giriş kapasitesi
$c_{oes}$	: IGBT çıkış kapasitesi
$c_{res}$	: IGBT ters transfer kapasitesi
dc	: direct current (doğru akım)
D1, D2, D3, D4	: Köprü inverter devresindeki serbest geçiş diyotları
E	: İnverter giriş doğru gerilimi / emitter (emetör)
f	: Frekans
f1	: İnverter giriş besleme gerilimi frekansı
f2	: İnverter çıkış gerilimi frekansı

G	: Gate (kapı)
GTO	: Gate turn off (kapıdan tıkanabilen tristör)
Hz	: Hertz
IGBT	: Insulated gate bipolar transistor (yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör)
$i_{hat}$	: Hat akımı
L	: Endüktans (self)
$L_{hat}$	: Kaçak hat endüktansı
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (metal oksit yarıiletken alan etkili transistör)
MW	: Mega Watt
PWM	: Pulse width modulation (darbe genişlik modülasyonu)
$R_{deşarj}$	: Deşarj direnci
$R_g$	: IGBT iç kapı direnci
$R_G$	: IGBT harici kapı direnci
$R_{G^*}$	: IGBT kapı-emetör arasına bağlanan direnç
$R_{softstart}$	: Diyot ve kapasite için pik akım sınırlayıcı direnç
s	: saniye
S1	: İdeal anahtar-1
S2	: İdeal anahtar-2
t	: zaman
$t_{iletim}$	: IGBT tam ilettime geçme süresi
$t_{kesim}$	: IGBT tam kesime geçme süresi
$t_n$	: $\alpha_n$ tetikleme açılarına bağlı iletim-kesim süreleri
T	: Periyot
T/4	: Çeyrek periyot
THD	: Total harmonic distortion (toplam harmonik bozunumu)
u	: gerilim
V	: Volt
$V_0$	: Doğru gerilim bileşeni

$V_{yük}$	: Yük gerilimi
$V_{CE}$	: IGBT kollektör-emetör gerilimi
$W$	: Watt
$\omega t$	: Açısal frekans eksenı
$\alpha_n$	: İnverterde çeyrek periyotta uygulanan tetikleme açıları
$\Phi$	: A ve B inverter çıkış gerilimleri arasındaki faz farkı
$\mu s$	: mikrosaniye



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Temel İnverter Gösterimi.....	3
Şekil 2.2.	Gerilim Beslemeli İnverter.....	3
Şekil 2.3.	Akım Beslemeli İnverter.....	4
Şekil 2.4.	Temel İnverter Yapısı.....	6
Şekil 2.5.	Şekil 2.4 ‘teki Devrede S1 ve S2 Anahtarlarının Dört Durumlu ve Periyodik Olarak Konumlanması İle Yük Uçlarındaki Gerilim Dalga Şeklinin Zamana Göre Değişimi.....	8
Şekil 2.6.	Bir Fazlı Köprü İnverter Devresi.....	9
Şekil 2.7.	Şekil 2.6 ‘da Gösterilen Bir Fazlı Köprü İnverter Devresinin Çıkışında Elde Edilmek İstenen Örnek Bir Gerilim Dalga Şekli...	10
Şekil 2.8.	Şekil 2.7 ‘deki Gerilim Dalga Şekli İçin Bir Fazlı Köprü İnverter Devresinde IGBT ‘lerin Uygun İletim-Kesim Durumları İçin Dalga Şekilleri.....	11
Şekil 3.1.	Kare Dalga Anahtarlama.....	15
Şekil 3.2.	Darbe Genlik Bindirimli Anahtarlama.....	16
Şekil 3.3.	Çift Yönlü PWM Anahtarlama.....	17
Şekil 3.4.	Tek Yönlü PWM Anahtarlama.....	19
Şekil 3.5.	Çeyrek Periyotta Tek Darbeli İnverter Çıkış Gerilimi.....	21
Şekil 3.6.	Çeyrek Periyotta Üç Darbeli İnverter Çıkış Gerilimi.....	23
Şekil 4.1.	Tasarlanan İnverter Devre Şeması.....	25
Şekil 4.2.	Tasarlanan İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli.....	25
Şekil 4.3.	Şekil 4.2 ‘deki Gerilim Dalga Şeklini Elde Etmek İçin İgbtlerin İletim-Kesim Durumları.....	26
Şekil 4.4.	Köprü İnverteri Besleyen Dc Baranın Eşdeğer Gösterimi.....	27

Şekil 4.5.	Snubber Kapasitesi Kullanılması ve Kullanılmaması Durumunda IGBT Kollektör-Emiter Gerilimi $V_{CE}$ 'nin Değişimi.....	28
Şekil 4.6.	Laboratuar Ortamında Oluşturulmuş İnverter Deney Düzeneği...	29
Şekil 4.7.	Laboratuar Ortamında Oluşturulan Deney Düzeneğinde Frekans Giriş Devresi.....	30
Şekil 4.8.	Laboratuar Ortamında Oluşturulan Deney Düzeneğinde IGBT Tetikleme Devresi.....	31
Şekil 4.9.	Tasarlanan İnverter İçin Ölü Zamanlı Anahtarlama.....	38
Şekil 4.10.	n-kanal IGBT Sembolü.....	39
Şekil 4.11.	Tasarımda Kullanılan IGBT Sürme Devresi.....	40
Şekil 4.12.	Laboratuar Ortamında Oluşturulmuş Deney Düzeneğinde IGBT Sürme Devresi.....	40
Şekil 4.13.	Eşdeğer IGBT Parazitik Kapasite Yapısı.....	41
Şekil 4.14.	Laboratuar Ortamında Oluşturulmuş Deney Düzeneğinde Köprü İnverter Katı.....	43
Şekil 5.1.	5 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli....	45
Şekil 5.2.	10 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	45
Şekil 5.3.	15 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	46
Şekil 5.4.	20 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	46
Şekil 5.5.	25 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	47
Şekil 5.6.	30 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	47
Şekil 5.7.	35 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	48
Şekil 5.8.	40 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	48
Şekil 5.9.	45 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	49
Şekil 5.10.	50 Hz Çalışma Frekansında İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli...	49
Şekil 5.11.	5 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri.....	50
Şekil 5.12.	6 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri.....	51
Şekil 5.13.	7 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri.....	51
Şekil 5.14.	8 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri.....	52
Şekil 5.15.	9 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri.....	52
Şekil 5.16.	10 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	53
Şekil 5.17.	11 Hz Çalışma Frekansını İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	53

Şekil 5.18.	12 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	54
Şekil 5.19.	13 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	54
Şekil 5.20.	14 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	55
Şekil 5.21.	15 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	55
Şekil 5.22.	16 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	56
Şekil 5.23.	17 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	56
Şekil 5.24.	18 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	57
Şekil 5.25.	19 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	57
Şekil 5.26.	20 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	58
Şekil 5.27.	21 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	58
Şekil 5.28.	22 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	59
Şekil 5.29.	23 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	59
Şekil 5.30.	24 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	60
Şekil 5.31.	25 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	60
Şekil 5.32.	26 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	61
Şekil 5.33.	27 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	61
Şekil 5.34.	28 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	62
Şekil 5.35.	29 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	62
Şekil 5.36.	30 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	63
Şekil 5.37.	31 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	63
Şekil 5.38.	32 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	64
Şekil 5.39.	33 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	64
Şekil 5.40.	34 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	65
Şekil 5.41.	35 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	65
Şekil 5.42.	36 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	66
Şekil 5.43.	37 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	66
Şekil 5.44.	38 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	67
Şekil 5.45.	39 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	67
Şekil 5.46.	40 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	68
Şekil 5.47.	41 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	68
Şekil 5.48.	42 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	69
Şekil 5.49.	43 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	69
Şekil 5.50.	44 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	70

Şekil 5.51.	45 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	70
Şekil 5.52.	46 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	71
Şekil 5.53.	47 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	71
Şekil 5.54.	48 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	72
Şekil 5.55.	49 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	72
Şekil 5.56.	50 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri...	73
Şekil 5.57.	İdeal ve İdeal Olmayan Anahtarlama Durumunda İnverter Çıkış Gerilimi.....	74

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	Farklı Çalışma Frekansları İçin Ana Harmonik Bileşeni Etkin Değerleri.....	32
Tablo 4.2.	Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Çeyrek Periyottaki Darbe Açılıarı.....	35
Tablo 4.3.	Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Anahtarlama Zamanları.....	36
Tablo 5.1.	Farklı Çalışma Frekansları İçin Ölçülen Ana Harmonik Bileşen Etkin Değerleri ve u/f sabitleri.....	77

## ÖZET

**Anahtar Kelimeler:** Bir fazlı inverter tasarımı, programlanmış harmonik eliminasyonu, asenkron motor kontrolü, harmonikler, güç elektroniği

Bu çalışmada, çalışma frekansı 5 Hz-50 Hz arasında değiştirilebilen bir fazlı inverter tasarımı yapılmıştır. Bir fazlı asenkron motorun hız kontrolüne uygun olarak inverter çıkış gerilimi/çalışma frekans ( $u/f$ ) değeri sabit tutularak, asenkron motor uygulamalarında hız kontrolü sırasında momentin sabit kalması sağlanmaya çalışılmıştır. İnverter çıkış gerilimi ve frekansı programlanmış harmonik eliminasyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemle, her bir çalışma frekansı için, istenilen çalışma frekansı ve ana harmonik genliği ayarlanırken, 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. gerilim harmoniklerin eliminasyonu amaçlanmıştır. Gerçek zaman uygulama sonucu yapılan ölçümlerde, çok küçük hata paylarıyla  $u/f$  oranının sabit tutulduğu ve eliminasyonu istenilen gerilim harmoniklerinin ihmal edilebilir değerlere indirildiği gözlemlenmiştir.

# **SINGLE PHASE INVERTER DESIGN**

## **SUMMARY**

**Key Words:** Single phase inverter design, programmed harmonic elimination, asynchronous motor control, harmonics, power electronics

In this study, a single phase inverter that works between 5 Hz and 50 Hz is designed. It is tried to keep the moment of the motor in asynchronous motor applications by keeping the ratio of inverter output voltage/operating frequency ( $u/f$ ) constant as suitable for single phase asynchronous motor speed control. Inverter output voltage and frequency is obtained by programmed harmonic elimination method. By this method, it is purposed to eliminate the 3., 5., 7., 9., 11. and 13. voltage harmonics while setting the inverter output voltage and frequency. In the result of real time applications, it is observed that  $u/f$  ratio is kept constant with very little error proportions and the voltage harmonics which are desired to be eliminate are reduced to neglectable values.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile beraber endüstriyel pazar ve ürünlerdeki talepler gün geçtikçe artmaktadır. Bu talep artışı, başta endüstriyel alanda olmak üzere elektrik enerjisinin kullanıldığı tüm uygulamalarda, bazı alanlarındaki teknolojik gelişmeleri daha da hızlanmaya zorlamaktadır. Bu alanların başında ise güç elektroniği gelmektedir. Müşterinin isteklerini karşılayabilmek için kendisine sağlanan enerji formunun istekleri doğrultusunda değiştirilmesi sıkça karşılaşılan durumdur. Bunu da sağlamanın en iyi yolu güç elektroniği sistemlerini kullanmaktır. Günümüzde sanayiden ev aletlerine, ticari aletlerden taşımacılığa, şebeke sistemlerinden havacılık ve uzay sistemlerine ve telekomünikasyon sistemlerine kadar birçok alanda güç elektroniği sistemleri, on W 'lar seviyesinden MW 'lar seviyesine kadar geniş bir güç aralığında kullanılmaktadır [1].

İnverterler ya da eviriciler piyasada geniş bir yelpazede kullanım alanı bulan güç elektroniği çeviricilerinden biridir. Çalışma prensipleri itibariyle çıkışlarında istenilen genlik ve frekansta gerilim üretebilmelerinden ötürü esnek düzeneklerdir. Bu esnek yapı başta otomasyon sistemlerinde olmak üzere birçok alanda önemli yer teşkil eder. Asenkron motor kontrolünde, bir faz - çok faz ya da çok faz - çok faz dönüşümlerinde, şebeke gerilimindeki bozuklukların düzeltilmesinde, kesintisiz güç kaynaklarında ve birçok uygulamada inverter uygulamaları ile karşılaşmak mümkündür.



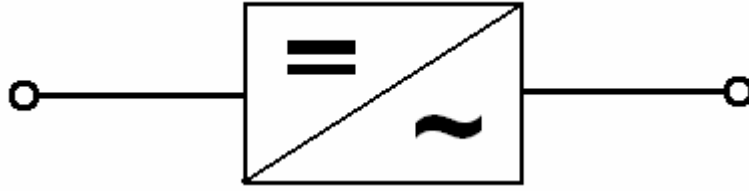
## BÖLÜM 2. İNVERTERLER VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

### 2.1. İnverterler

İnverterler (eviriciler) temel yapı olarak, doğru gerilimden genliği ve frekansı ayrı olarak ayarlanabilen alternatif gerilim üreten güç elektroniği çeviricileridir.

İnverter çalışmada temel ilke, IGBT, MOSFET, GTO, BJT gibi güç elektroniği yarı iletken anahtarlama elamanlarının uygun şekilde bağlanmaları ve uygun sıra ve zamanda iletim ve kesime sokularak, girişteki doğru gerilimi çıkışta alternatif gerilime dönüştürmektir. İnverterler gibi güç elektroniği çeviricilerinde yarı iletken elemanlar anahtarlama elemanı olarak kullanıldığından, bu yarı iletken elemanlar lineer bölgede değil doyum bölgesinde çalıştırılırlar.

İnverter çıkışında genliği ve frekansı belirlenebilen gerilim alternatiftir, ancak sinüzoidal değildir. Çıkışta elde edilmek istenen saf sinüzoidal bir alternatif gerilimdir. Ancak doğru gerilim formunun değiştirilmesi ile inverter çıkışında saf sinüzoidal bir gerilim elde etmek mümkün değildir. Elde edilen gerilim, çıkış dalga şekli frekansına sahip ve belli bir genliği olan sinüzoidal gerilim ve bu frekansın katlarına sahip ve belli genlikleri olan sinüzoidal gerilimlerden oluşur. Bir başka deyişle inverter çıkış gerilimi, içinde saf sinüzoidal ana harmonik gerilimine ilaveten harmonik bileşenleri bulunduran harmonikli bir dalga şeklindedir. Amaç çıkışta saf sinüzoidal bir gerilim dalga şekli elde etmek ise, tasarımda, oluşması kaçınılmaz bu harmoniklerin elemine edilmesi ya da ihmal edilebilir seviyelere indirgenmesi büyük önem kazanır. İnverter temel olarak Şekil 2.1 'deki gibi gösterilir.



Şekil 2.1. Temel İverter Gösterimi

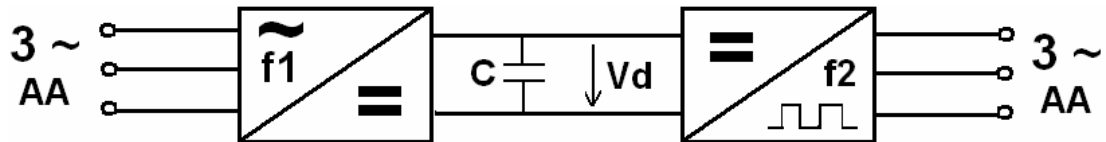
## 2.2. Besleme Özelliklerine Göre İverterler

İverterler uygulamadaki besleme özelliklerine göre akım beslemeli ve gerilim beslemeli olarak iki grupta toplanırlar. Akım beslemeli ya da gerilim beslemeli inverterler arasında yapılacak seçim yükün özelliklerine göre değişir.

### 2.2.1. Gerilim beslemeli inverterler

Gerilim beslemeli inverterlerde çıkış gerilim dalga biçimi, giriş doğru gerilimi ve anahtarlama yöntemi ile belirlenir. Yük bu dalga biçimine etki edemez. Eğer yük harmonik akımlara yüksek empedans gösteren bir özellik taşıyorsa, bu tip yükün gerilim beslemeli bir inverter ile sürülmesi daha uygundur. Gerilim beslemeli inverterlerde girişteki değişmez doğru gerilim, doğrultucu bir devre çıkışına paralel bağlanan çok büyük bir kapasite ile elde edilebilir [2, 3].

Şekil 2.2 'de üç faz - üç faz dönüştürücü sistem için gerilim beslemeli bir inverter gösterilmiştir.

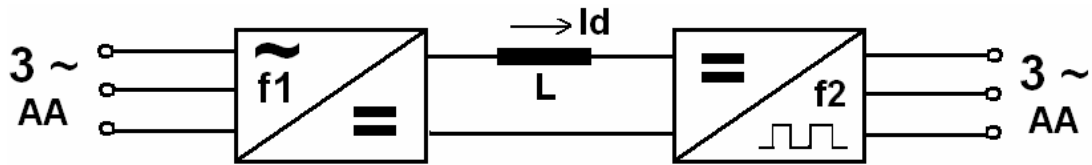


Şekil 2.2. Gerilim Beslemeli İverter

## 2.2.2. Akım beslemeli inverterler

Akım beslemeli inverterlerde, inverteri besleyen kaynak sabit bir akım kaynağı özelliği taşır. İnverterin kaynaktan çektiği akımın sabit kalması, doğrultucu bir devrenin çıkışına seri bağlanacak çok büyük bir self (endüktans) ile sağlanabilir. Eğer inverter çıkışındaki yükün harmonik akımlara düşük empedans gösteren bir özelliği varsa, bu durumda akım beslemeli inverter kullanmak daha uygun olur [2, 4].

Şekil 2.3 'te üç faz - üç faz dönüştürücü sistem için akım beslemeli bir inverter gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Akım Beslemeli İnverter

Bölüm 4 'te tasarlanan bir fazlı inverter, bir fazlı asenkron motorda skaler kontrol için tasarlanmıştır. Motorlar endüktif özellikte olduklarından harmonik akımlara yüksek empedans gösterirler. Bu sebeple tasarlanan bir fazlı inverter gerilim beslemelidir.

## 2.3. İnverterlerin Kullanıldıkları Yerler

İnverterler, çıkış dalga şekillerinin istenilen frekansta ve genlikte ayarlanabilmesi nedeniyle piyasada çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Sıkça kullanıldığı bazı uygulamalar, bu bölümün alt bölümlerinde açıklanmıştır.

### 2.3.1. İstenilen gerilimin elde edilmesinde

Şebekedeki bozulmalardan dolayı istenilen işletme nominal gerilimini sağlamak ve harmonikleri elemine etmek için inverterler kullanılır. Sistemin düzgün çalışması ve sistemde istenmeyen problemlerin yaşanmaması için gerekli olan gerilim dalga

şeklinde ve frekansında şebekedeki bozulmalardan dolayı istenmeyen uzaklaşmalar varsa, bu istenmeyen şebeke dalga şekli doğrultucu bir devre ile iyi bir şekilde doğrultulduktan sonra invertere uygulanıp istenen gerilim dalga şekli istenilen frekansta ve genlikte elde edilir ve sisteme uygulanır.

### **2.3.2. Elektrikli taşıma sistemlerinde**

Elektrikli taşıma sistemlerinde (tren, tramvay vs.) yüksek güçlere ihtiyaç vardır ve bu yüksek güçlerde kullanılacak trafolar güçleriyle orantılı olarak fiziksel olarak büyük trafolardır. Taşıma aracına yerleştirilecek bu trafolar önemli bir yer işgal eder ve çoğunlukla problem yaratır. Aynı trafonun işlevini yerine getirecek fakat küçük boyutlarda trafo kullanabilmek için uygulanacak gerilimin frekansının yüksek olması gerekmektedir. İnverter kullanarak şebeke geriliminin frekansı yükseltilir ve küçük boyutlardaki trafolarla uygulanarak çok büyük boyutlarda trafo kullanma zorunluluğu ortadan kalkar.

### **2.3.3. Bir fazdan üç faza çevirmede**

Endüstriyel alanda kullanılan çoğu alternatif akım cihazları (özellikle motorlar) üç fazlıdır. Fabrika ve sanayi işletmelerine göre daha küçük işletmelerde ya da üç fazlı yük kullanımı daha az olan yerlerde genellikle bir fazlı şebeke baraları bulunmaktadır. Bu sebeple üç fazlı yükleri beslemek için gerekli olan üç fazlı gerilim inverterlerle elde edilir. Piyasada satılan inverterlerin girişine direkt olarak bir faz ya da üç faz uygulanır ve çıkışlarında üç faz elde edilir. Bu inverterler öncelikli doğrultma işlevini kendi içlerinde bulunan doğrultucu devreler ile gerçekleştirirler ve daha sonra bu doğru gerilimi inverter katında alternatif gerilime çevirirler.

### **2.3.4. Asenkron motor kontrolü**

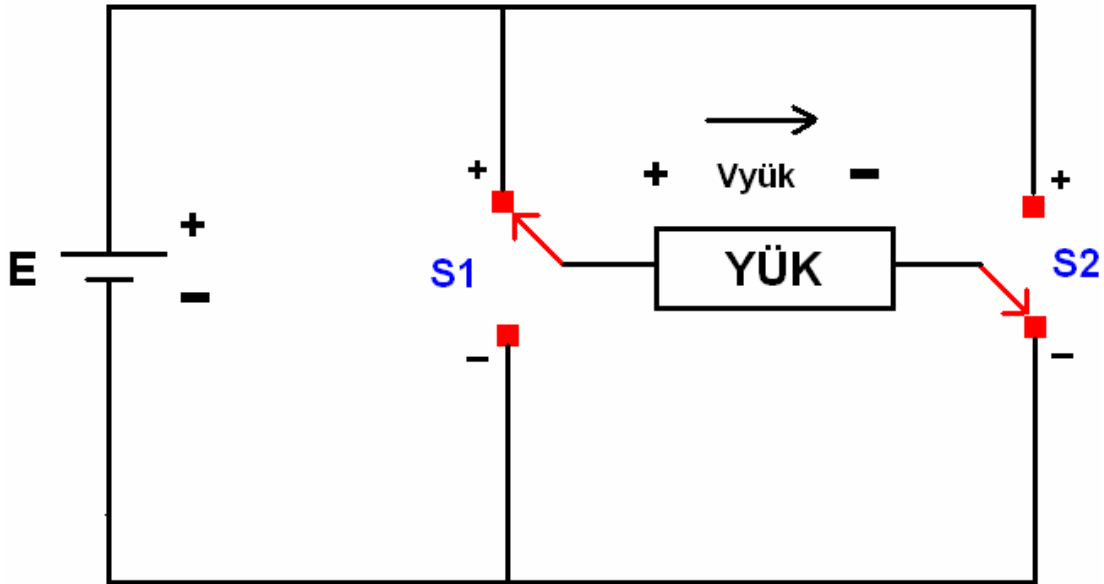
Asenkron motorlar az arıza yapmaları ve bakım problemlerinin olmaması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda geniş bir alanda kullanılmaktadır. Asenkron motorların (bir fazlı ya da üç fazlı) hızları, besleme gerilimlerinin frekansları ile doğru

orantılıdır. Ayrıca bu motorlarda momentin sabit tutulabilmesi için, besleme geriliminin frekansla beraber değiştirilmesi gerekmektedir. Üç fazlı asenkron motorlarda vektörel kontrol yöntemi ve bir fazlı asenkron motorlarda skaler kontrol yönetimiyle hız ve moment kontrolü yapılmaktadır. İnverterler ile gerilim genliği ve frekansı kontrol edilebildiğinden asenkron motor kontrolünde bu çeviriciler kullanılmaktadır.

## 2.4. Temel İnverter Yapısı ve Çalışma Prensibi

Daha önceden bahsedildiği üzere, inverterler, girişine uygulanan doğru gerilimden, yapısında bulunan güç elektroniği anahtarlama elemanlarının uygun sıra ve zamanda iletme ve kesime sokularak istenen genlik ve frekansta alternatif gerilim üreten güç elektroniği çeviricileridir. Uygun tasarımla bir fazlı ya da çok fazlı inverterler yapılabilir.

Şekil 2.4 'te temel inverter yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Temel İnverter Yapısı

Şekil 2.4 'te görülen devrede;  $E$ , inverteri besleyen doğru gerilimi,  $S1$  ve  $S2$  ideal anahtarları,  $V_{yük}$ , yük uçlarında görülen gerilimi ve  $YÜK$ , endüktans veya kapasite kombinasyonlarından oluşabilen lineer yükü ya da herhangi bir nonlineer yükü temsil etmektedir. Devrenin yapısına dikkat edilirse 4 farklı çalışma durumu olduğu görülür [5].

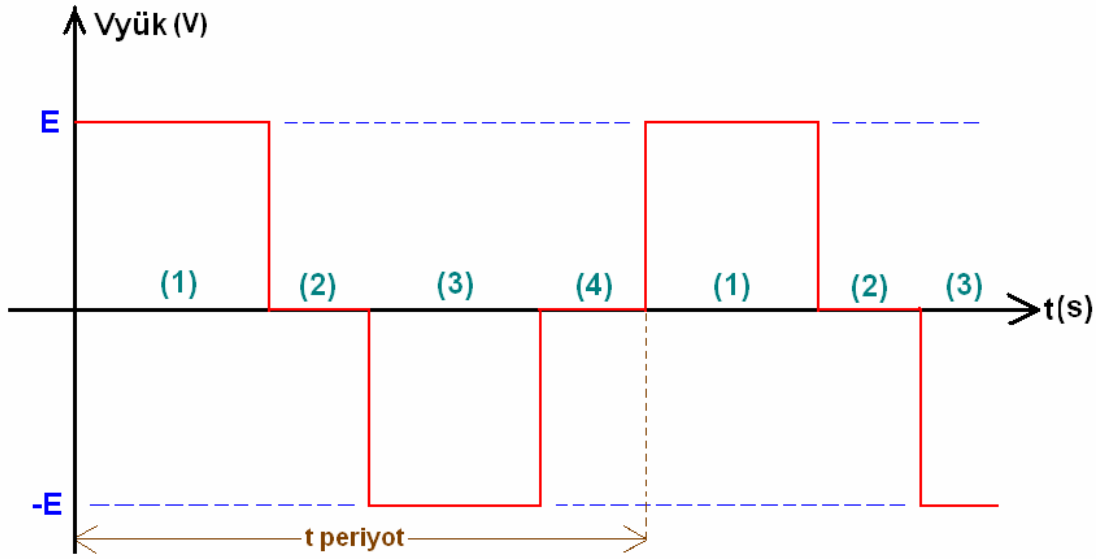
Birinci durumda  $S1$  anahtarı (+) konumda ve  $S2$  anahtarı (-) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında  $+E$  gerilimi görülür.

İkinci durumda  $S1$  anahtarı (+) konumda ve  $S2$  anahtarı da (+) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında sıfır gerilim görülür.

Üçüncü durumda  $S1$  anahtarı (-) konumda ve  $S2$  anahtarı (+) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülür.

Son ve dördüncü durumda ise  $S1$  anahtarı (-) konumda ve  $S2$  anahtarı da (-) konumda olabilir. Bu durumda yük uçlarında sıfır gerilim görülür.

Bu durumların sırasıyla gerçekleşmesi ve periyodik olarak devam etmesi sonucu yük uçlarında oluşacak  $V_{yük}$  gerilim dalga şekli Şekil 2.5 'te gösterilmiştir. Şekil 2.5 'te birinci durumun olduğu kısım (1), ikinci durumun olduğu kısım (2), 3.durumun olduğu kısım (3) ve dördüncü durumun olduğu kısım (4) ile sembolize edilmiştir.

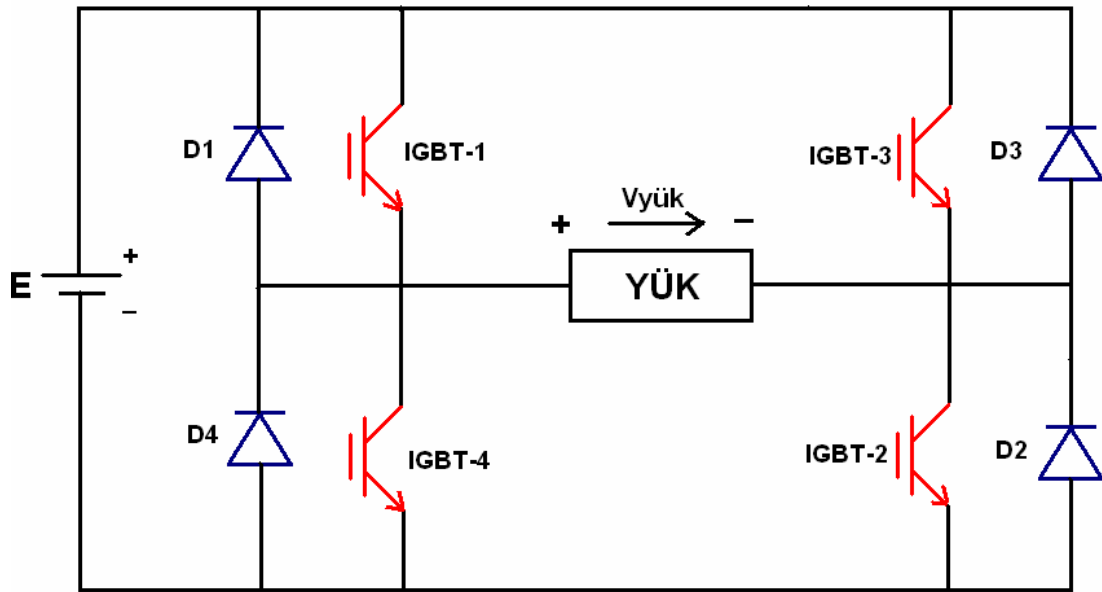


Şekil 2.5. Şekil 2.4 'teki Devrede S1 ve S2 Anahtarlarının Dört Durumlu ve Periyodik Olarak Konumlanması İle Yük Uçlarındaki Gerilim Dalga Şeklinin Zamana Göre Değişimi

Şekil 2.5 'ten görüldüğü üzere, bu sıralı ve periyodik dört durumlu çalışma sonucu yük uçlarında periyodu “tperiyot” olan kare dalga alternatif bir gerilim oluşur. Oluşan gerilim dalga şeklinin frekansı ise  $1/(tperiyot)$  olur. Şekil 2.5 'ten de görüldüğü üzere çalışma durumlarının süreleri değiştirilerek çıkış geriliminin frekansı da değiştirilebilir. Elde edilen gerilim dalga şekli alternatif olmasına rağmen sinüzoidal değildir. Bu dalga şekli, frekansı  $1/(tperiyot)$  olan ana harmonik gerilime ilave olarak ana harmonik frekansının katlarında harmonik bileşenleri içerir. Bu da tasarımcıları harmonik bileşenleri en aza indirgeyecek gerilim dalga şekilleri elde edecek tasarımlar yapmaya zorlamaktadır. Teorik hesaplamalar sonucu görülmüştür ki, alternatif gerilim dalga şekli sinüs formuna ne kadar çok benzetilirse, harmonik bileşenlerin genliği o derece az olmaktadır. Bu yaklaşım, inverter tasarımı için oldukça ilkel ama bir o kadar da temel bir genellemedir. İnverter çalışmada karşılaşılan bu harmonik problemleri çözmek için birçok anahtarlama yöntemleri geliştirilmiştir. Darbe genlik bindirimli anahtarlama, kare dalga anahtarlama, tek ve çift yönlü darbe genişlik modülasyonlu anahtarlama ve programlanmış harmonik eliminasyonu bu yöntemlerden bazılarıdır. Tasarımcı bu yöntemler dışında yeni yöntemler de geliştirebilir. Bölüm 4 'te anlatılan bir fazlı inverter tasarımında programlanmış harmonik eliminasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem detaylı olarak Bölüm 3 'te açıklanmıştır.

## 2.5. Bir Fazlı Köprü İverter ve Çalışma Prensibi

Şekil 2.6 'da bir fazlı köprü inverter devresi gösterilmiştir. Devrede örnek anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. Tasarıma göre diğer güç elektroniği anahtarlama elemanları da kullanılabilir. D1, D2, D3 ve D4 diyotları serbest geçiş diyotlarıdır. Yük, herhangi bir lineer ya da nonlineer yük olabilir. E, invertere uygulanan doğru gerilimdir.



Şekil 2.6. Bir Fazlı Köprü İverter Devresi

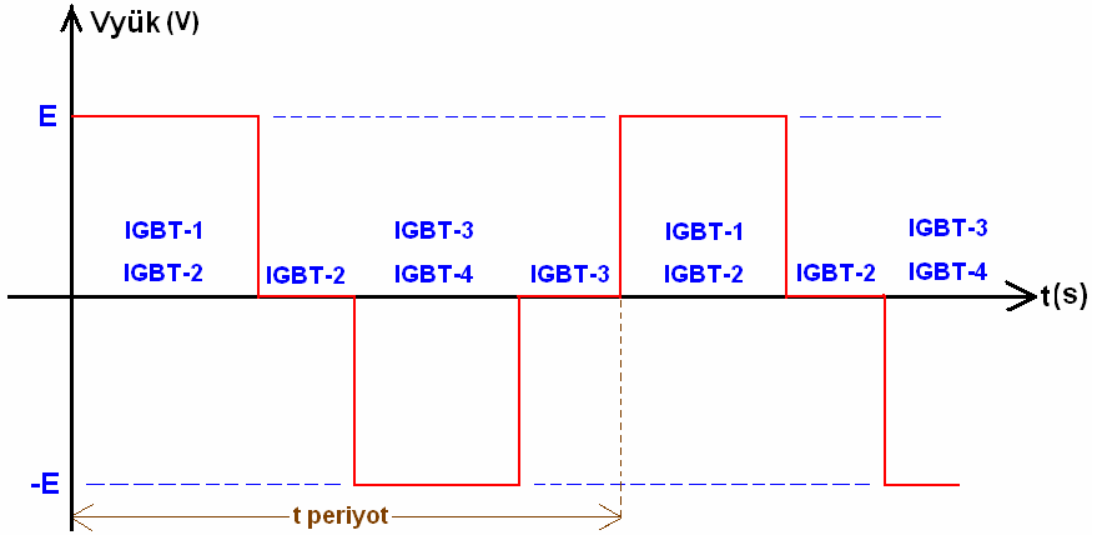
Şekil 2.6 'da görülen bir fazlı köprü inverter devresinde, IGBT-1 ve IGBT-2 elemanları ile IGBT-3 ve IGBT-4 elemanları eşlenik çalışmaktadır [6].

Devrenin genel çalışmasını incelemek için ve serbest geçiş diyotlarının işlevlerini açıklayabilmek için, yükün endüktif özellikte olduğu varsayılmıştır. IGBT-1 ve IGBT-4 ile IGBT-3 ve IGBT-2 anahtarlama elemanlarının hiçbir zaman aynı anda ilettime sokulmaması gerekir. Devre yapısından görüldüğü üzere, bu çiftler aynı anda ilettime sokulduğunda kısa devre oluşur ve elemanlar yanar.

Tasarıma göre anahtarlama elemanları uygun şekilde kontrol edilerek inverter çıkışında farklı gerilim dalga şekilleri oluşturulabilir. Şekil 2.6 'da görülen bir fazlı

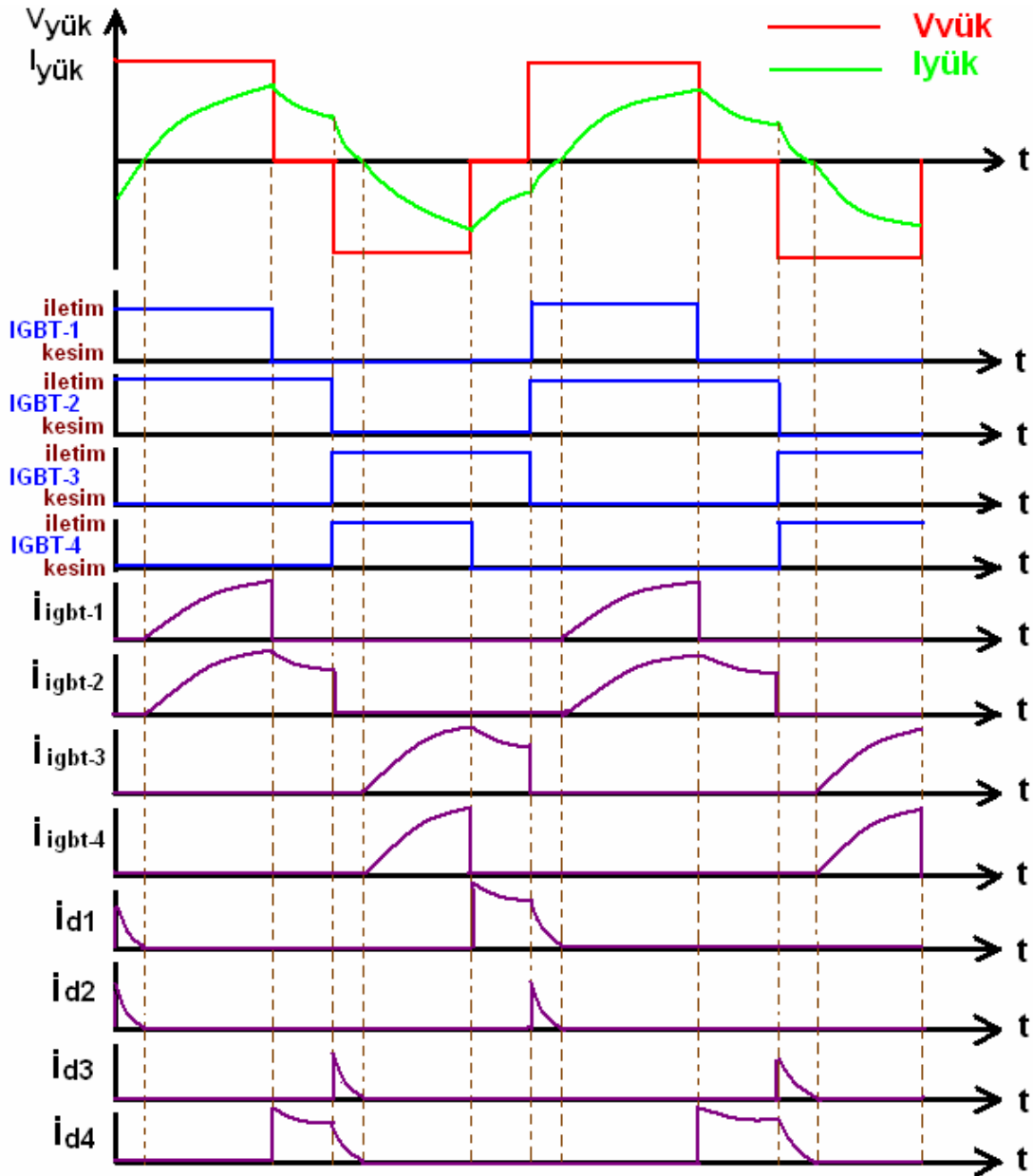


köprü inverter devresinin çalışma prensibini açıklamak için, çıkışta Şekil 2.7 'deki gerilim dalga şeklinin oluşturulmak istendiği varsayılmıştır. Daha öncede belirtildiği üzere yükün endüktif özellikte olduğu kabul edilmiştir. Şekilde, farklı bölgelerde sadece iletimde olan IGBT 'lerin isimleri belirtilmiştir.



Şekil 2.7. Şekil 2.6 'da Gösterilen Bir Fazlı Köprü İnverter Devresinin Çıkışında Elde Edilmek İstenen Örnek Bir Gerilim Dalga Şekli

Şekil 2.7 'deki gerilim dalga şeklini elde ederken bir fazlı köprü inverter devresinde, yük gerilimi ve akımı, IGBT 'lerin iletim-kesim durumları, IGBT ve serbest geçiş diyotlarının akım dalga şekilleri Şekil 2.8 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Şekil 2.7 'deki Gerilim Dalga Şekli İçin Bir Fazlı Köprü İnverter Devresinde IGBT 'lerin Uygun İletim-Kesim Durumları İçin Dalga Şekilleri

IGBT-1 ve IGBT-2 aynı anda ilettime sokulur ve IGBT-3 ile IGBT-4 kesimde bırakılırsa, devre yolunu IGBT-1 – YÜK – IGBT-2 üzerinden tamamlar ve yük uçlarında +E gerilimi görülür ve yük akımı bu yol üzerinden akar.

IGBT-1 ve IGBT-2 'nin iletimde olduğu durum devam ederken, yük uçlarında sıfır gerilim görülmek istenirse, yalnızca IGBT-1 kesime sokulur ve IGBT-2 iletimde bırakılır. IGBT-1 ve IGBT-2'nin her ikisinin de kesime sokulmaması, yükün

endüktif özelliğinden dolayı devam eden yük akımıdır. IGBT-1 ve IGBT-2 aynı anda kesime sokulursa, devam eden yük akımı yolunu tamamlamak için, akım yönüne uygun olan D3 ve D4 serbest geçiş diyotlarını kullanmak ister. D3 ve D4 ters kutuplandığı için, yükte bulunan self, lenz kanunu gereği gerekli gerilimi endükler, D3 ve D4 diyotları doğru kutuplanarak ilettime geçer. Böylelikle devam eden yük akımı yolunu bulmuş olur. Ancak bu durumda, D3 ve D4 diyotları ilettime geçtiği için yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülür. Halbuki yük uçlarında sıfır gerilim görülmek istenmiştir. Bu sebeple yük uçlarında  $+E$  gerilimi varken sıfır görülmek istendiğinde sadece IGBT-1 kesime sokulur, IGBT-2 iletimde bırakılır. Sadece IGBT-2 iletimde kaldığında, devam eden yük akımı yolunu, YÜK – IGBT-2 – D4 üzerinden tamamlar. Bu durumda yük uçlarında D4 diyotu uçlarındaki gerilim görülür. İdeal olarak diyot iletimde iken uçlarındaki gerilim sıfır olur, böylelikle yük uçlarında sıfır gerilim görülmesi sağlanır. Şekil 2.8 'e bakıldığında, IGBT-2 kesime sokulup IGBT-3 ve IGBT-4 ilettime sokulmak istendiğinde yükün endüktif özelliğinden dolayı pozitif yük akımı devam etme eğilimi gösterirse, yük akımı IGBT-3 ve IGBT-4 'ün polarmasına uygun olmadığı için IGBT-3 ve IGBT-4 ilettime giremez. Devam eden yük akımı IGBT-2 kesime sokulduğu için yolunu D3 – YÜK – D4 üzerinden tamamlamak ister. D3 ve D4 ise daha önceden belirtildiği üzere, IGBT-2 'nin kesime sokulmasıyla devam eden yük akımının yolunu tamamlamak için yük selfinin lenz kanunu gereği gerekli gerilimi endüklemesiyle ilettime geçer. D3 – YÜK – D4 yolunun açılmasıyla yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülür. Zira IGBT-3 ve IGBT-4 'ün ilettime sokulmak istendiği bu durumda yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülmek istendiğinden, amaca yine ulaşılmış olur. Pozitif yük akımı D3 – YÜK - D4 üzerinden sıfıra gittiğinde, daha önceden ilettime sokulmak istenen IGBT-3 ve IGBT-4 artık ilettime geçebilecek şartlara sahip olur, IGBT-3 – YÜK – IGBT-4 yolu açılır ve yine yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülür.

IGBT-3 ve IGBT-4 aynı anda ilettime sokulur ve IGBT-1 ile IGBT-2 kesimde bırakılırsa, devre yolunu, IGBT-3 – YÜK – IGBT-4 üzerinden tamamlar ve yük uçlarında  $-E$  gerilimi görülür ve yük akımı bu yol üzerinden akar.

IGBT-3 ve IGBT-4 'ün iletimde olduğu durum devam ederken, yük uçlarında sıfır gerilim görülmek istenirse, yalnızca IGBT-4 kesime sokulur ve IGBT-3 iletimde

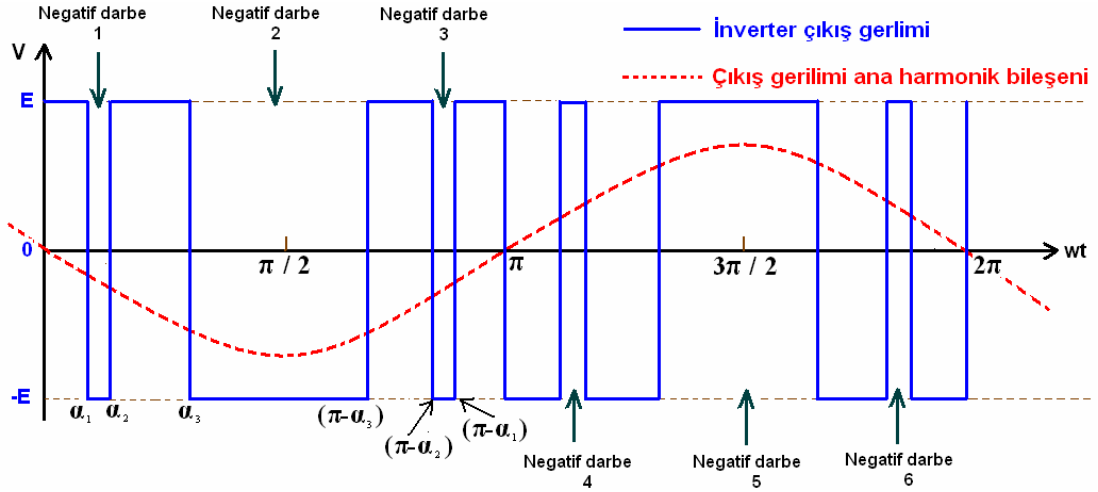
bırakılır. IGBT-3 ve IGBT-4 'ün her ikisinin de kesime sokulmaması, yükün endüktif özelliğinden dolayı devam eden yük akımıdır. IGBT-3 ve IGBT-4 aynı anda kesime sokulursa, devam eden yük akımı yolunu tamamlamak için, akım yönüne uygun olan D1 ve D2 serbest geçiş diyotlarını kullanmak ister. D1 ve D2 ters kutuplandığı için, yükte bulunan self, lenz kanunu gereği gerekli gerilimi endükler, D1 ve D2 diyotları doğru kutuplanarak ilettime geçer. Böylelikle devam eden yük akımı yolunu bulmuş olur. Ancak bu durumda, D1 ve D2 diyotları ilettime geçtiği için yük uçlarında +E gerilimi görülür. Halbuki yük uçlarında sıfır gerilim görülmek istenmiştir. Bu sebeple yük uçlarında -E gerilimi varken sıfır görülmek istendiğinde sadece IGBT-4 kesime sokulur, IGBT-3 iletimde bırakılır. Sadece IGBT-3 iletimde kaldığında, devam eden yük akımı yolunu, YÜK – IGBT-3 – D1 üzerinden tamamlar. Bu durumda yük uçlarında D1 diyotu uçlarındaki gerilim görülür. İdeal olarak diyot iletimde iken uçlarındaki gerilim sıfır oldur, böylelikle yük uçlarında sıfır gerilim görülmesi sağlanır. Şekil 2.8 'e bakıldığında, IGBT-3 kesime sokulup IGBT-1 ve IGBT-2 ilettime sokulmak istendiğinde yükün endüktif özelliğinden dolayı negatif yük akımı devam etme eğilimi gösterirse, yük akımı IGBT-1 ve IGBT-2'nin polarmasına uygun olmadığı için IGBT-1 ve IGBT-2 ilettime giremez. Devam eden yük akımı IGBT-3 kesime sokulduğu için yolunu D1 – YÜK – D2 üzerinden tamamlamak ister. D1 ve D2 ise daha önceden belirtildiği üzere, IGBT-3 'ün kesime sokulmasıyla devam eden yük akımının yolunu tamamlamak için yük selfinin lenz kanunu gereği gerekli gerilimi endüklemesiyle ilettime geçer. D1 – YÜK – D2 yolunun açılmasıyla yük uçlarında +E gerilimi görülür. Zira IGBT-1 ve IGBT-2 'nin ilettime sokulmak istendiği bu durumda yük uçlarında +E gerilimi görülmek istendiğinden, amaca yine ulaşılmış olur. Negatif yük akımı D1 – D2 üzerinden sıfıra gittiğinde, daha önceden ilettime sokulmak istenen IGBT-1 ve IGBT-2 artık ilettime geçebilecek şartlara sahip olur, IGBT-1 – YÜK – IGBT-2 yolu açılır ve yine yük uçlarında +E gerilimi görülür.

## **BÖLÜM 3. İNVERTERDE ANAHTARLAMA YÖNTEMLERİ VE PROGRAMLANMIŞ HARMONİK ELEMINASYONU**

İnverter tasarımında, çıkış geriliminin ana harmonik bileşeninin genliğinin ve frekansının istenen değere ayarlamasının yanı sıra harmonik bileşenlerinin en aza indirgenmesi oldukça önemlidir. Genel olarak çıkış gerilim dalga şeklinin sinüs formuna yaklaştırılması, harmonik bileşen değerlerini azaltır. Tasarıma göre birçok anahtarlama yöntemi kullanılarak harmonik bileşenlerinin indirgenmesi sağlanabilir. Darbe genlik bindirimli anahtarlama, kare dalga anahtarlama, tek ve çift yönlü darbe genişlik modülasyonlu anahtarlama ve programlanmış harmonik eliminasyonu sıkça kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Tasarımcı bu yöntemler dışında farklı anahtarlama metotları geliştirebilir.

### **3.1. Kare Dalga Anahtarlama**

Kare dalga anahtarlama, inverter çıkış gerilimi esas olarak bir kare dalgadır. Fakat ana harmonik bileşeninin genliğini kontrol etmek için birkaç negatif darbe eklenmiştir. Örnek bir negatif darbeli kare dalga inverter çıkışı Şekil 3.1 'de gösterilmiştir.

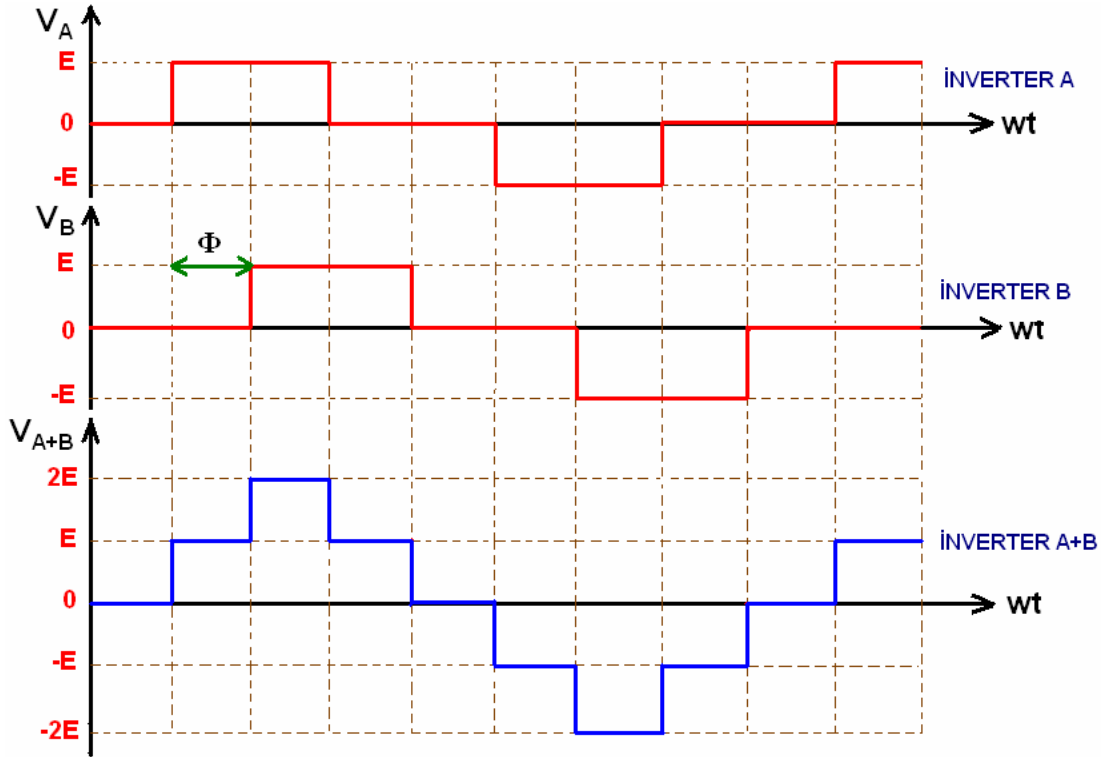


Şekil 3.1. Kare Dalga Anahtarlama

Gerilim dalga şeklindeki negatif darbeler çıkış geriliminin harmonikleri hesaba katılmadan oluşturulmaktadır. Bu sebeple harmonik bakımından kabul edilemez düzeyde olumsuzdur. Bu yöntem birkaç tristörlü inverter uygulaması dışında pek kullanılmamaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı basit olması ve yüksek güçlü tristörlü inverterlerde oldukça önemli olan anahtarlama sayısının azlığıdır.

### 3.2. Darbe Genlik Bindirimli Anahtarlama

Darbe genlik bindirimli anahtarlama yönteminde, birden fazla inverter çıkışı doğrudan ya da transformatör yardımıyla toplanır. Bu yöntemde amaç, toplam çıkış gerilimini sinüs formuna benzeterak harmonik bileşenleri azaltmaktır. Kare dalga anahtarlama iki farklı inverter çıkışları toplanarak elde edilen örnek bir darbe genlik bindirimli inverter çıkışı Şekil 3.2 'de gösterilmiştir [7].

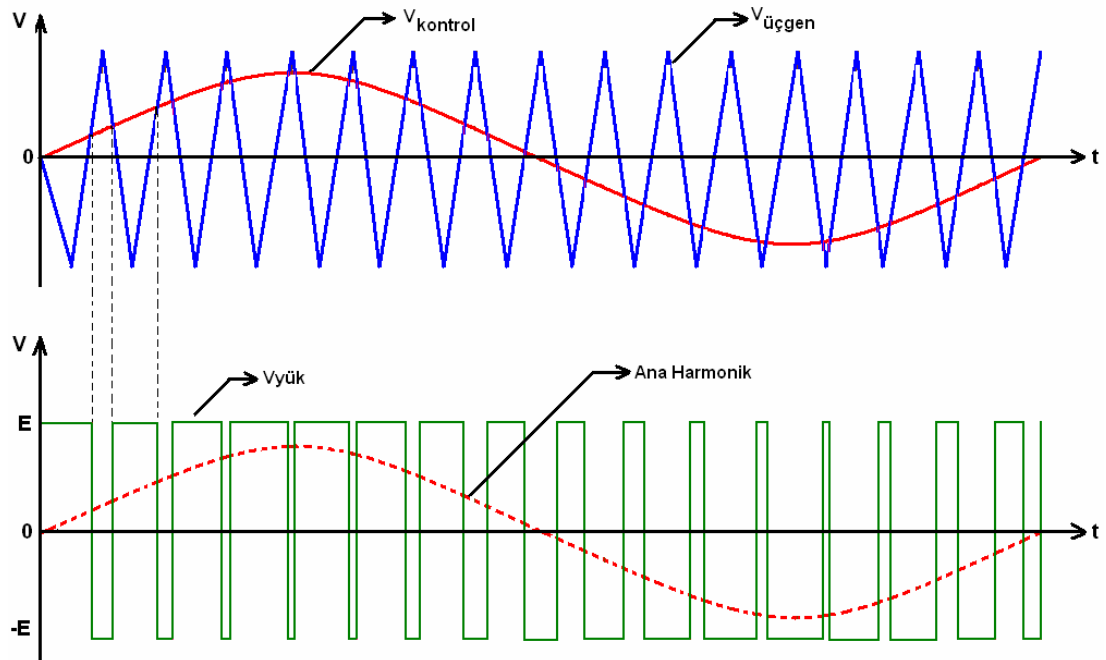


Şekil 3.2. Darbe Genlik Bindirimli Anahtarlama

Şekil 3.2 'de görüldüğü üzere, aynı çalışma frekansına sahip kare dalga anahtarlama, aralarında  $\Phi$  faz farkı bulunan A ve B inverter çıkış gerilimleri toplanarak farklı bir gerilim dalga şekli elde edilmiştir. Bu dalga şeklinin, A ve B inverter çıkış gerilim dalga şekline göre daha çok sinüzoidal forma benzetildiği görülmektedir. Elde edilen yeni dalga şekli, A ve B inverter çıkış gerilim dalga şekillerine göre daha az harmonik bileşen barındırır. Tasarımda kullanılan inverter sayısı artırılarak toplam gerilim dalga şeklinin sinüs formuna benzetimi artırılabilir. Dolayısıyla, darbe genlik bindirimli anahtarlama metodu, kare dalga anahtarlama göre harmonik açısından oldukça üstündür. Ayrıca anahtarlama frekansının düşük olması artı bir avantajdır, böylelikle yüksek anahtarlama frekansından kaynaklanan problemlerle karşılaşmaz. Fakat, kullanılan inverter bloğu sayısının artması maliyeti arttırdığından, pratik açıdan bu yöntem çok ta kullanışlı değildir.

### 3.3. Çift Yönlü Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) Anahtarlama

Genel olarak çift yönlü PWM anahtarlama, negatif darbeleri kare dalga anahtarlama metodunun anahtarlama sayısının artırılmış halidir. Genellikle anahtarlama kontrolü, sinüzoidal referans kontrol işareti ile üçgen dalga işaretinin karşılaştırılmasından elde edilir. Sinüzoidal referans kontrol işareti, inverter çıkış geriliminin frekansını belirler. Dolayısıyla çıkış ana harmonik bileşeninin frekansı, sinüzoidal referans kontrol işaretinin frekansı olur. Çift yönlü anahtarlama için kontrol sinyalleri ile inverter çıkış gerilimi Şekil 3.3 'te gösterilmiştir [8].



Şekil 3.3. Çift Yönlü PWM Anahtarlama

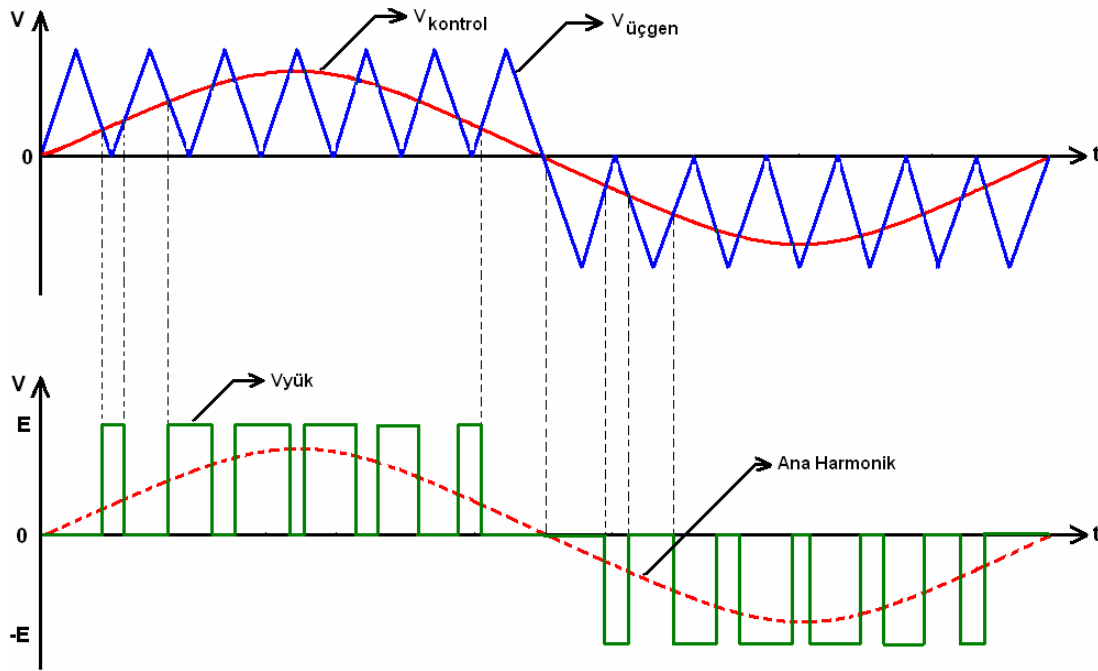
İnverter çıkışında, referans sinüzoidal kontrol işaretinin üçgen dalga işaretinden büyük olduğu durumlarda pozitif inverter besleme doğru gerilimi  $+E$ , küçük olduğu durumlarda ise negatif inverter besleme doğru gerilimi  $-E$  üretilir. Anahtarlama frekansını, üçgen dalga sinyalinin frekansı belirler. Bu yöntemde, referans sinüzoidal kontrol işareti ile üçgen dalga karşılaştırmasının yapılmadığı normal kare dalga anahtarlama göre harmonik azalımı daha fazladır. Anahtarlama frekansının artırılması ile sinüs formuna benzetim artırılabilir, böylelikle harmonik bileşenlerinin değeri azaltılabilir. Ancak anahtarlama frekansının artırılması,



anahtarlama kayıplarını ve güç elektroniği elemanlarının yüksek frekansta çalışma problemlerini doğurur. Çift yönlü çalışmadan ötürü, pozitif ve negatif alternans bölgeleri iç içe girmiştir, bu sebeple darbe genlik bindirimli anahtarlama yöntemine göre harmonik bozunumu daha fazladır. Fakat basit yapısı itibarı ile darbe genlik bindirimli anahtarlama yöntemine göre maliyeti oldukça düşüktür.

### **3.4. Tek Yönlü Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Anahtarlama**

Tek yönlü PWM anahtarlama yönetiminde çift yönlü PWM anahtarlama yönetiminden farklı olarak, üçgen dalga işareti, referans sinüzoidal kontrol işaretinin pozitif alternans bölgesinde pozitif yönde, negatif alternans bölgesinde ise negatif yönde salınım yapar. Referans sinüzoidal kontrol işareti ile üçgen dalga işareti karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucu inverter çıkışında, pozitif alternans bölgesinde referans sinüzoidal kontrol işaretinin üçgen dalgadan büyük olduğu durumda pozitif inverter besleme doğru gerilimi  $+E$ , küçük olduğu durumda sıfır gerilim üretilir. Negatif alternans bölgesinde ise, referans sinüzoidal kontrol işaretinin üçgen dalgadan küçük olduğu durumda negatif inverter besleme doğru gerilimi  $-E$ , büyük olduğu durumda sıfır gerilim üretilir. İnverter çıkış geriliminin frekansı referans sinüzoidal kontrol işareti tarafından belirlenir. Tek yönlü anahtarlama için kontrol sinyalleri ile inverter çıkış gerilimi Şekil 3.4 'te gösterilmiştir [9].



Şekil 3.4. Tek Yönlü PWM Anahtarlama

Tek yönlü PWM anahtarlama, tek yönlü çalışmadan ötürü pozitif ve negatif alternans bölgesi ayrılmıştır. Bu durum çift yönlü PWM anahtarlama yöntemine kıyasla, sinüs formuna daha yakın inverter çıkış gerilimi elde edilmesini sağlar. Böylelikle harmonik bozunumu daha az olur. Üçgen dalga işaretinin frekansı artırılarak anahtarlama frekansı artırılabilir. Anahtarlama frekansının artırılması, harmonik bileşenlerin değerlerini daha da azaltır. Fakat diğer anahtarlama yöntemlerinde olduğu gibi, anahtarlama frekansının artırılması, anahtarlama kayıpları ve güç elektroniği elemanlarının yüksek frekansta açma - kapama problemlerini doğurur.

### 3.5. Programlanmış Harmonik Eleminasyonu

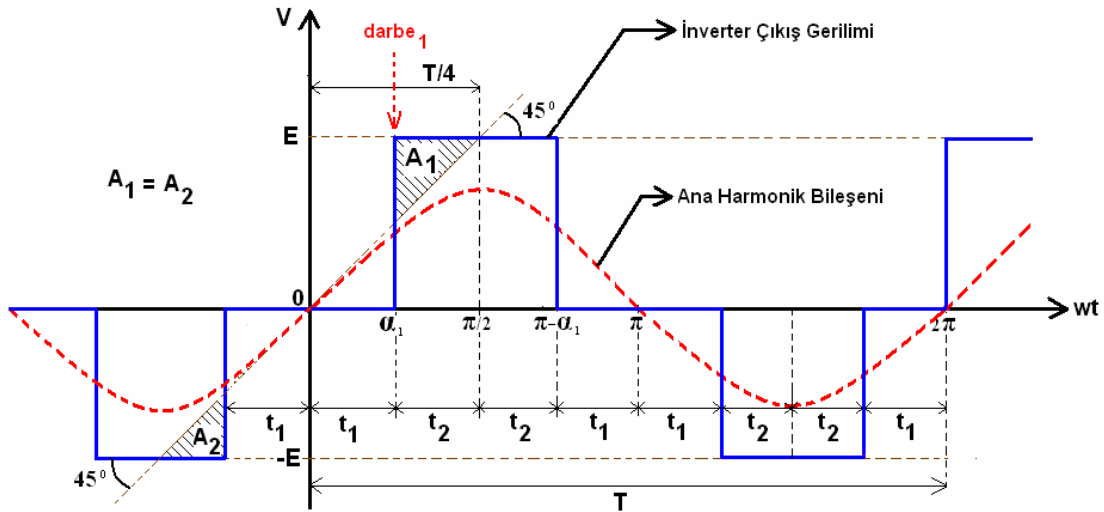
Önceki bölümlerde açıklandığı üzere, kare dalga anahtarlama yöntemi, inverter çıkış geriliminde kabul edilemez harmonik bozunumu oluşturmaktadır. Darbe genlik bindirimli anahtarlama yönteminde, harmonik bozunumu en aza indirmek için kullanılacak inverter bloğu sayısının artması maliyeti artırır, bu sebeple pratik uygulamalar için kullanışlı değildir. Çift yönlü PWM anahtarlama, harmonik bozunumu azaltmak için anahtarlama frekansı artırılabilir, fakat klasik kare dalga

anahtarlamamanın türevi olması, negatif ve pozitif alternans bölgelerinin iç içe girmesi sebebiyle harmonik seviyesi çok fazla azaltılamaz. Tek yönlü PWM anahtarlamada ise pozitif ve negatif alternans bölgelerinin ayrı olması sebebiyle daha iyi bir harmonik seviyesine ulaşılabilir ancak belli düzeyde harmonik bileşenleri yine de oluşacaktır.

Yukarıda adı geçen tüm yöntemlerde, inverter çıkış gerilim dalga şekilleri, anahtarlamada kullanılan kontrol işaretlerinin durumuna bağlıdır. Dolayısıyla ile, bu yöntemler, genel harmonik bozunumunu azaltma eğilimindedirler, ancak belli harmonik bileşenlerinin değerlerini noktasal olarak kontrol edemezler.

Programlanmış harmonik eliminasyon yönteminde noktasal olarak, istenilen harmonik bileşenlerin değerleri kontrol edilebilir. Böylece genellikle yüksek genliğe sahip harmonik dereceleri yok edilerek iyi bir harmonik sonucu elde edilebilir. Tasarımda, inverter çıkış gerilim dalga şekli ve anahtarlama sayısı daha önceden belirlenir. Belirlenen çıkış dalga geriliminde, kontrol edilmek istenen harmonik bileşenlerinin değerleri için gerekli hesaplamalar yapılarak anahtarlama zamanları bulunur ve anahtarlamalar bu zaman değerlerinde yapılır [10, 11].

Şekil 3.5 'te, çeyrek periyottan geçen dikey eksene göre eksenel simetriye, orijinden  $45^{\circ}$  eğimle geçen eksene göre noktasal simetriye ve tam periyotta yatay eksene göre eksenel simetriye sahip, çeyrek periyotta tek darbeli bir dalga şekli gösterilmiştir. Fourier analizinden bilindiği üzere, orijinden  $45^{\circ}$  eğimle geçen eksene göre simetrik bir dalga şeklinin fourier analizinde cosinüslü terimler ( $b_n=0$ ) ve çeyrek periyottan geçen dikey eksene göre simetrik bir dalga şeklinin fourier analizinde çift dereceli bileşenler ( $a_{2n}=0$ ,  $b_{2n}=0$ ) sıfır olur [12]. Aynı zamanda, tam periyotta yatay eksene göre eksenel simetriye sahip bir dalga şeklinin ortalama değeri sıfır olacağından, harmonik analizinde doğru bileşen değeri sıfır olur. Bu sebeple, Şekil 3.5 'teki dalga şekli, ana harmonik bileşen ile tek dereceden sinüzoidal harmonik bileşenlerden oluşur.



Şekil 3.5. Çeyrek Periyotta Tek Darbeli İnverter Çıkış Gerilimi

Şekil 3.5 ‘teki dalga şeklinin fourier açılımında,  $a_n$  sinüslü harmonik bileşenlerinin katsayılarını ve  $n$ , harmonik derecelerini göstermek üzere;

$$a_n = \frac{4E}{n} (1/\pi) \cos(n\alpha_1) \quad (3.1)$$

denklemini elde edilir. Yatay eksene göre simetriden dolayı cosinüslü terimler,  $b_n$ , sıfır değerini almaktadır. (3.1) denklemini (Bkz. Ek. A), sadece  $\alpha_1$  darbe açısına bağlı olduğu için, bir denklemden oluşan denklem takımı elde edilir. Tasarımda öncelikli amacın inverter çıkış gerilim dalga şeklinin ana harmonik frekansı ve genliğini ayarlamak olduğu düşünülürse, (3.1) denklemini sadece ana harmonik bileşeni için çözülür. Ana harmonik bileşen genliği  $V$  tepe değerine ayarlanmak istenirse,  $a_1$ , ana harmonik bileşenin katsayısı olmak üzere;

$$a_1 = 4E (1/\pi) \cos(\alpha_1) = V \quad (3.2)$$

elde edilir. (3.2) denkleminin çözümü için bulunan  $\alpha_1$  değeri için inverter anahtarlama yapılarak, çıkış geriliminin ana harmonik genliği  $V$  değerine ayarlanır. Bu durumda diğer harmonik bileşenleri sıfır yapılamaz. Diğer harmonik bileşenlerini kontrol edebilmek için, çeyrek periyottaki darbe sayısını arttırmak gerekir. Eklenen

her yeni darbe,  $a_n$  denklemine yeni bir değişken ekler. Bu sebeple, çeyrek periyotta, kontrol edilmek istenen harmonik bileşeni sayısında darbe oluşturmak gerekir.

Şekil 3.6 'da, Şekil 3.5 'teki dalga şekline iki darbe daha eklenmesiyle, çeyrek periyotta üç darbeleri bir dalga şekli gösterilmiştir. Bu dalga şeklinin fourier analizinde sinüslü bileşenlerin katsayıları :

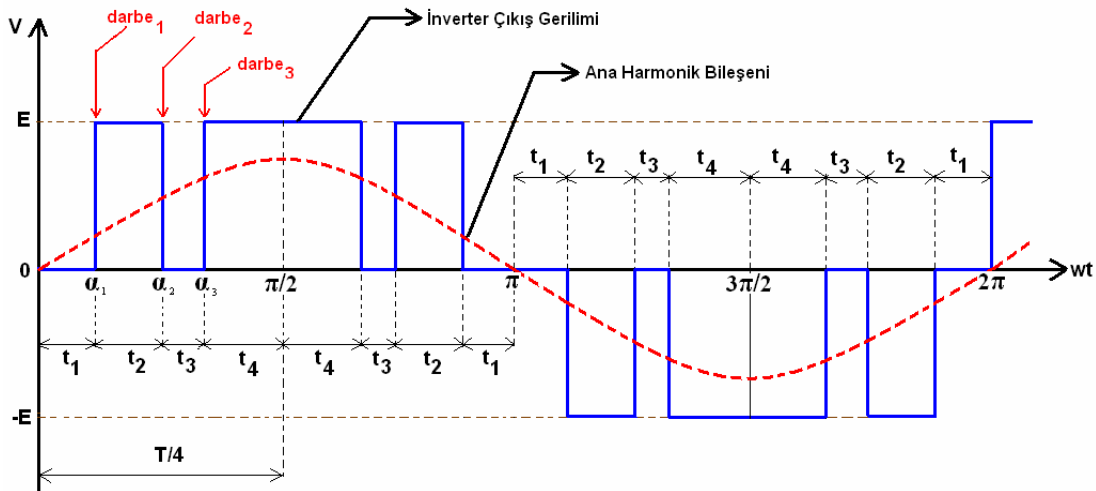
$$a_n = \frac{4E}{n} (1/\pi) [ \cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3) ] \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. (3.3) denklemi (Bkz. Ek. B),  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\alpha_3$  darbe açıları olmak üzere, üç bağımsız değişkene sahiptir. Bu sebeple,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\alpha_3$  bağımsız değişkenlere bağlı üç adet nonlinear denklem yazılabilir. Bu durumda, üç adet harmonik bileşene ait katsayılar belirlenebilir. Ana harmonik bileşen genliğini V değerine ayarlamak, üçüncü ve beşinci harmonik bileşen değerlerini sıfır yapmak istenirse, (3.4) nonlinear denklem takımı yazılabilir:

$$a_1 = \frac{4E}{1} (1/\pi) [ \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) ] = V$$

$$a_3 = \frac{4E}{3} (1/\pi) [ \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) ] = 0 \quad (3.4)$$

$$a_5 = \frac{4E}{5} (1/\pi) [ \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) ] = 0$$



Şekil 3.6. Çeyrek Periyotta Üç Darbeli İverter Çıkış Gerilimi

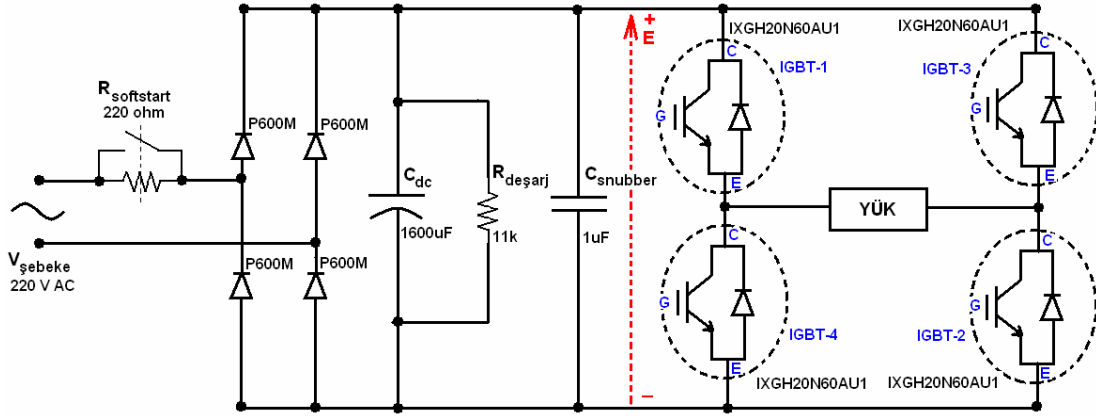
(3.4) denklem takımının çözülmesi ile elde edilen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\alpha_3$  anahtarlama açıları ile Şekil 3.6 'da elde edilen inverter çıkış gerilim dalga şeklinin, ana harmonik frekans genliği  $V$ , üçüncü ve beşinci harmonik bileşen değerleri sıfır olur, böylece bu harmonik bileşenleri elemine edilir. Diğer harmonik bileşenlerin değerleri  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve  $\alpha_3$  değişkenlerinden bağımsız olur.

Çeyrek periyotta  $n$  darbeleri bir gerilim dalga şekli için,  $n$  adet nonlineer denklem yazılabilir. Bu ise ana harmonik dahil,  $n$  adet harmonik bileşen değerini kontrol edebilmek için anahtarlama darbe açılarının tasarımcı tarafından belirlenebileceğini gösterir. Programlanmış harmonik eliminasyonu haricinde anlatılan diğer anahtarlama yöntemlerinde noktasal harmonik kontrolü olmadığından, programlanmış harmonik eliminasyonunun, harmonik düzeyi açısından daha üstün olduğu aşikardır. Pratik uygulamalarda anahtarlama sayısının artırılması, güç elektroniği elemanlarında açma-kapama problemlerini yaratır. Programlanmış harmonik eliminasyonu yöntemiyle, diğer yöntemlere göre daha az anahtarlama yaparak, hem yüksek anahtarlama problemlerinden kaçınılabilir hem de daha az harmonik düzeyi elde edilebilir.

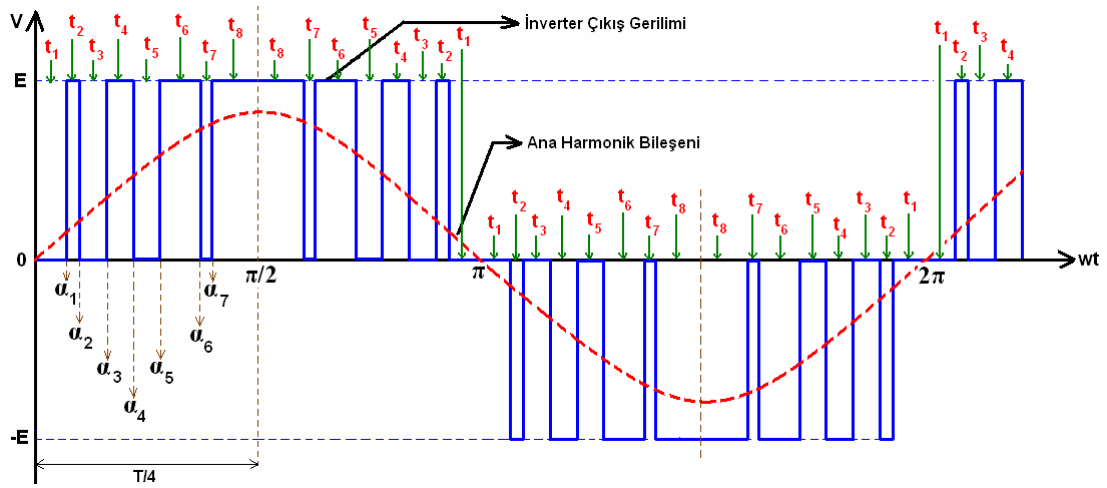
## BÖLÜM 4. BİR FAZLI İNVERTER TASARIMI

### 4.1. Tasarımın Amacı ve İnverterin Çalışma Prensibi

Bu çalışmada, bir fazlı köprü inverter tasarlanmıştır. Köprü inverter çalışma prensibi Bölüm 2.5 'te açıklanmıştır. İnverter çalışma frekansı, 5 Hz ile 50 Hz arasında tam değerlerde değiştirilebilmektedir. İnverter çıkışına bağlanacak bir fazlı asenkron bir motor için, skaler kontrol yapabilmek amacıyla, çıkış geriliminin çalışma frekansına oranı,  $u/f$  sabit tutulmuştur. Asenkron motora ilk enerji verildiğinde yumuşak başlaması için, inverter ilk enerjilendiğinde minimum çalışma frekansından belli bir süre içinde maksimum çalışma frekansına çıkacak şekilde tasarım yapılmıştır. Anahtarlama yöntemi olarak programlanmış harmonik eliminasyonu uygulanmıştır. Çıkış gerilim dalga şekli, Şekil 3.6 'daki dalga şeklinin türevi olarak, çeyrek periyotta yedi darbeli bir dalga şekli oluşturularak, 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. harmonik bileşenlerin eliminasyonu amaçlanmıştır. Şekil 4.1 'de tasarlanan inverter devre şeması ve Şekil 4.2 'de inverter çıkışında oluşturulmak istenen gerilim dalga şekli ve Şekil 4.3 'te bu dalga şekli için IGBT 'lerin iletim-kesim durumları gösterilmiştir. Bu dalga şekli, yatay eksene göre aksel simetriye, orijinden  $45^0$  eğimle geçen eksene göre noktasal simetriye ve çeyrek periyottan geçen dikey eksene göre aksel simetriye sahiptir. Böyle bir dalga şeklinde, cosinüslü ve çift dereceli harmonik bileşenlerin ve doğru bileşenin olmayacağı daha önceden belirtilmişti.

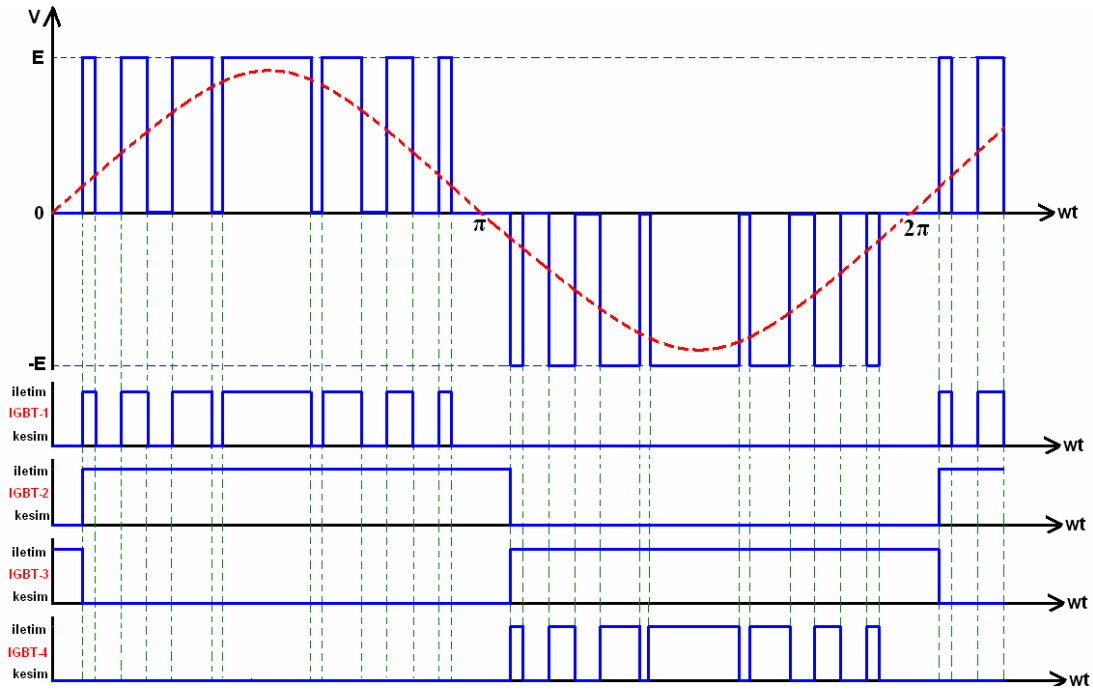


Şekil 4.1. Tasarlanan İnverter Devre Şeması



Şekil 4.2. Tasarlanan İnverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



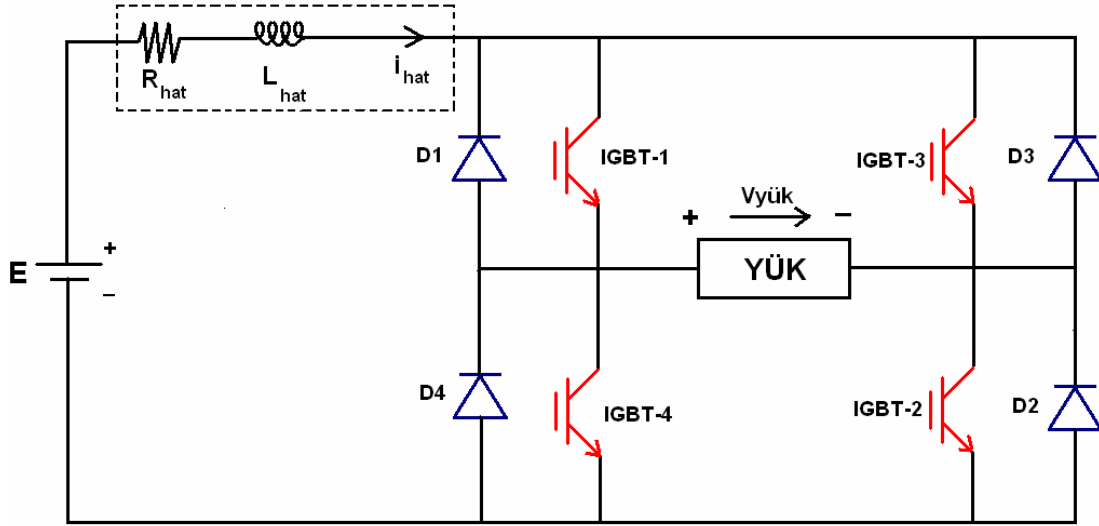


Şekil 4.3. Şekil 4.2 'deki Gerilim Dalga Şeklini Elde Etmek İçin İgbtlerin İletim-Kesim Durumları

Şekil 4.1 'deki devrede, inverter doğru besleme gerilimi, şebeke geriliminin P600M serisi güç diyotları ile oluşturulan köprü diyot katından elde edilir. Bu gerilimdeki dalgalanmaları filtrelemek için  $C_{dc}$  elektrolitik kapasitesi kullanılmıştır. Köprü diyot çıkışına bağlanacak kapasite değeri büyütülerek, dalgalı doğru gerilimdeki salınımlar en aza indirilebilir. Devreye ilk enerji verildiğinde,  $C_{dc}$  filtre kapasitesi deşarj durumda olduğundan, kapasite ve köprü diyotlardan pik akımları geçerek kapasite ve diyotlara zarar verebilir. Bu pik akımlarını önlemek için şebeke ucu ile köprü inverter girişi arasına  $R_{softstart}$  direnci bağlanmıştır. Kapasite,  $R_{softstart}$  direnci üzerinden dolduktan kısa süre sonra, normalde açık kontaklı bir röle ile  $R_{softstart}$  direnci iptal edilmiştir [13].  $C_{dc}$  filtre kapasitesine paralel bağlı  $R_{deşarj}$  direnci, şebeke geriliminin devreyi beslemesi kesildikten sonra  $C_{dc}$  kapasitesi üzerinde dolan gerilimin boşalmasını sağlar.

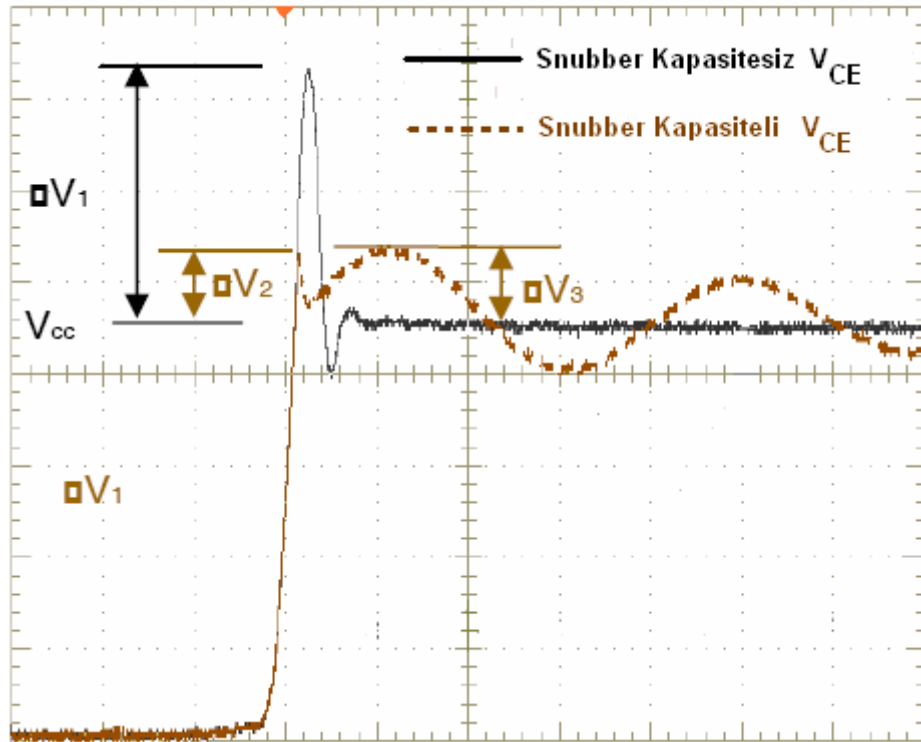
$C_{snubber}$  kapasitesi, özel bir kapasite olup, güç elektroniği elemanlarının anahtarlanması sırasında, dc bara kaçak endüktansından ötürü meydana gelecek gerilim endüklenmesini söndürmek için kullanılır. Tasarımda, inverter girişine

bağlandığı dc bara hatları düz çekilir, bu durumda hattın sadece direnci olması beklenir. Pratik açıdan incelendiğinde, bu hatların dirençlerinin yanı sıra kaçak endüktansları bulunur. Şekil 4.4 'te eşdeğer inverter da barası gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Köprü İnverteri Besleyen Dc Baranın Eşdeğer Gösterimi

Şekil 4.4 'te  $R_{hat}$  dc baraya ait hat direncini,  $L_{hat}$  dc bara hattının kaçak endüktansını göstermektedir. Anahtarlama esnasında  $i_{hat}$  hat akımının sıfıra götürülmesi durumunda,  $L_{hat}$  kaçak endüktansında büyük bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilim, dc bara gerilimi E ile birlikte güç elektroniği anahtarlama elemanlarını zorlar. Toplam gerilim, IGBT 'lerin dayanma gerilimini aşarsa, elemanlar delinir ve çalışamaz duruma gelir. Snubber kapasiteleri, özel kapasiteler olup, anahtarlama esnasında dc bara kaçak hat endüktansından kaynaklanan bu gerilim endüklenmelerini söndürerek güvenli çalışma değerine indirirler. İyi bir sonuç alabilmek için, snubber kapasitesinin inverter bloğuna mümkün olduğunca yakın bağlanması pratik açıdan büyük önem arz etmektedir. Şekil 4.5 'te snubber kapasitesinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda, IGBT kollektör-emiter gerilimi  $V_{CE}$  'nin yaklaşık değişimi gösterilmiştir [14].



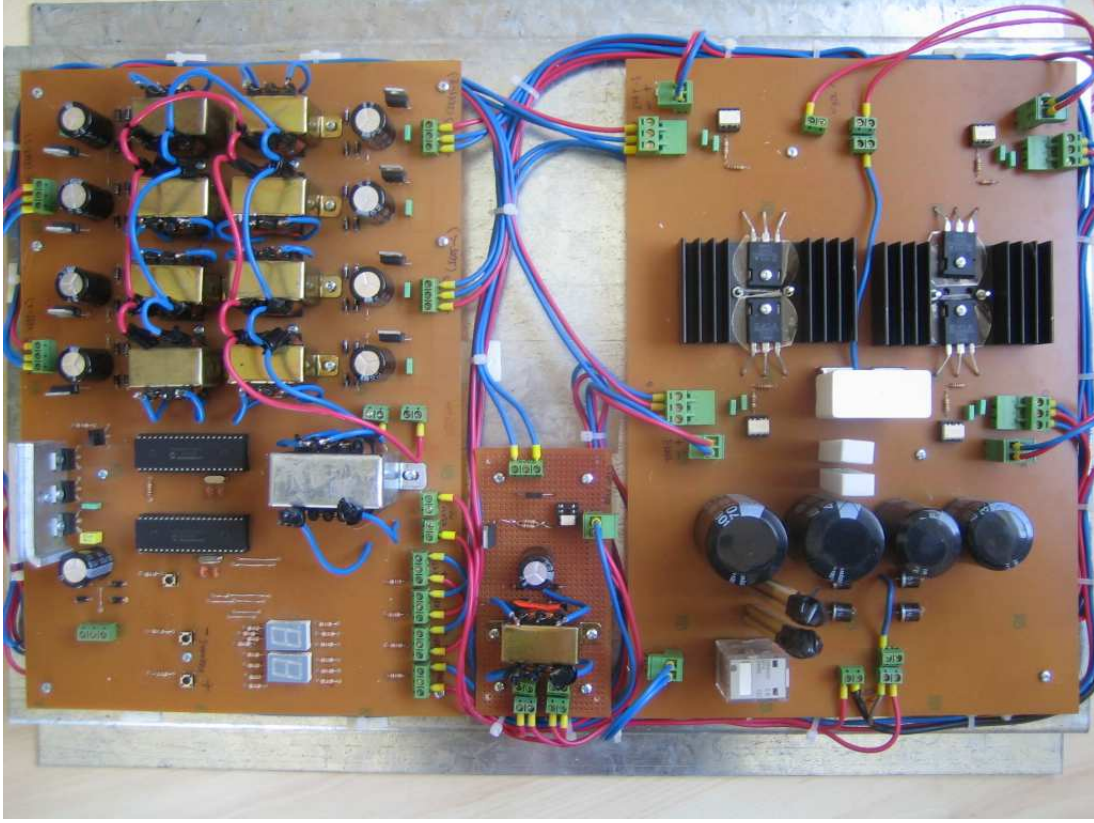
Şekil 4.5. Snubber Kapasitesi Kullanılması ve Kullanılmaması Durumunda IGBT Kollektör-Emiter Gerilimi  $V_{CE}$  'nin Değişimi

#### 4.2. Tasarlanan Bir Fazlı İnverterin Kısımları

Tasarlanan bir fazlı inverter dört kısımdan oluşmaktadır:

- 1-) Frekans giriş devresi
- 2-) IGBT tetikleme devresi
- 3-) IGBT sürme katı
- 4-) Köprü inverter katı

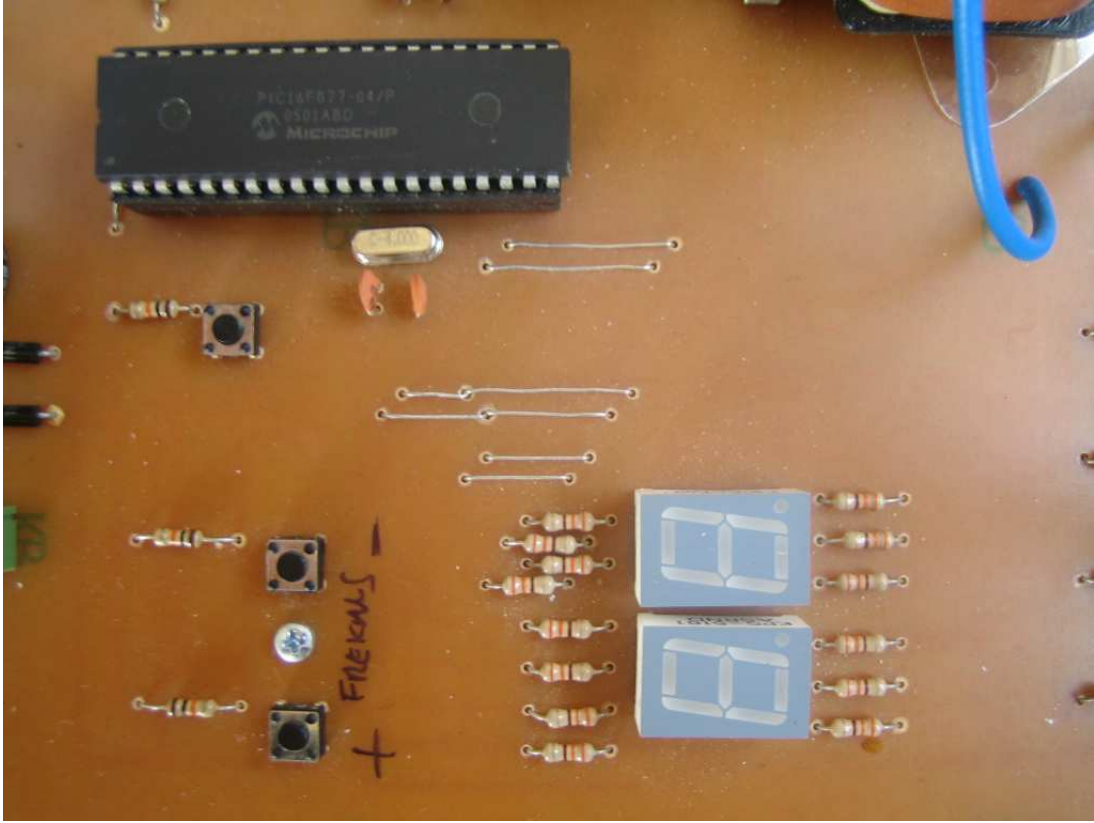
Laboratuar ortamında oluşturulmuş inverter deney düzeneği Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Laboratuvar Ortamında Oluşturulmuş İnverter Deney Düzenegi

#### 4.2.1. Frekans giriş devresi

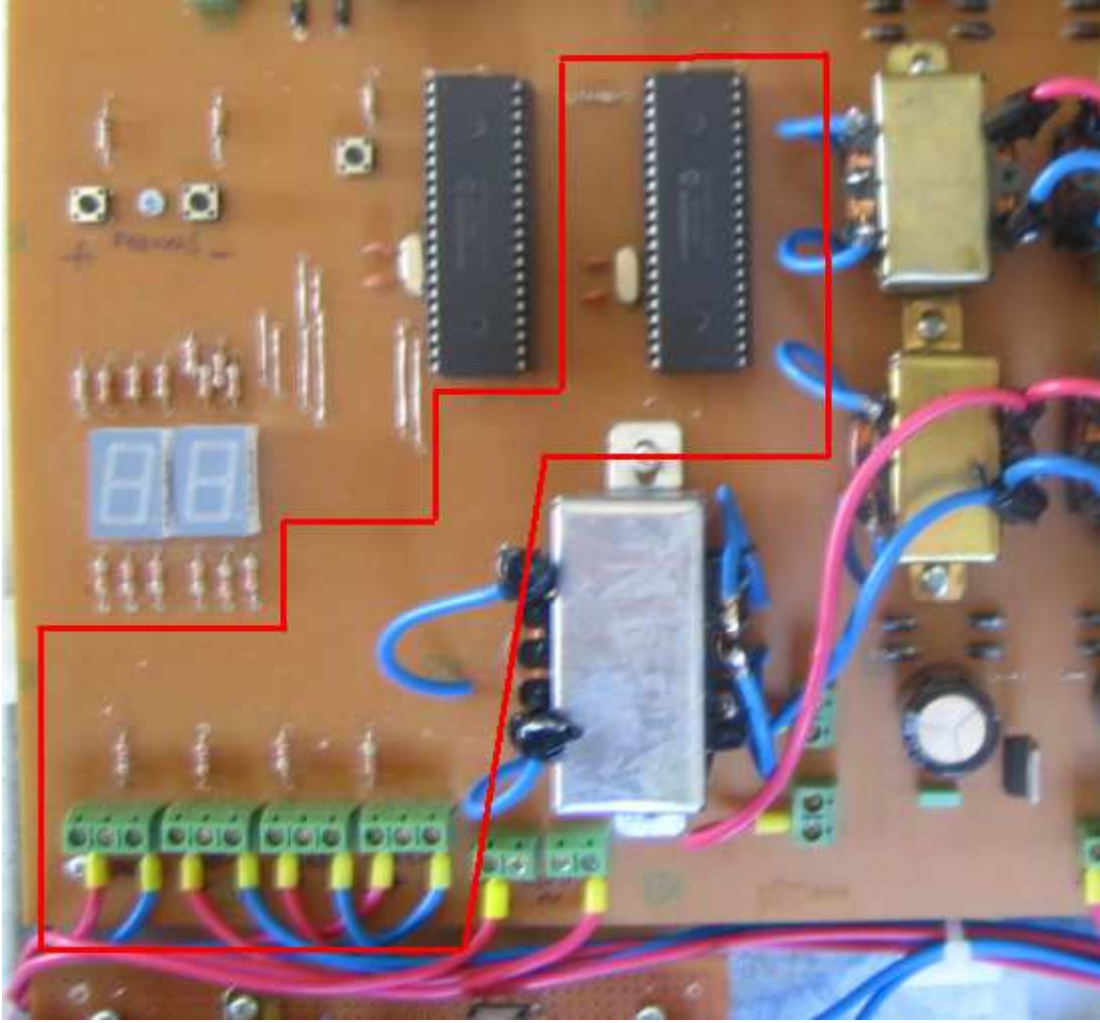
Laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneginde frekans giriş devresi Şekil 4.7 'de gösterilmiştir. Frekans kontrolü PIC16f877 mikrodnetleyicisi ile yapılmaktadır. Çalışma frekansı 5 Hz ile 50 Hz aralığında ve tam değerlerdedir. Arttırma ve azaltma butonları ile ilgili frekans değişim bilgileri mikrodnetleyici tarafından algılanır ve bu mikrodnetleyici ile çalışma frekans bilgisi bir byte veri yolu ile IGBT tetikleme devresindeki mikrodnetleyiciye yollanır.



Şekil 4.7. Laboratuvar Ortamında Oluşturulan Deney Düzeneginde Frekans Giriş Devresi

#### 4.2.2. IGBT tetikleme devresi

Igbt tetikleme devresi Şekil 4.8 'de gösterilmiştir. Bu kısım, frekans giriş devresinden gelen çalışma frekansı bilgisini alır ve köprü inverter devresindeki igbtlerin uygun şekilde anahtarlama yapmasını kontrol eder. Kontrol işlemi, bu devrede bulunan PIC16f877 mikrodenetleyicisi ile yapılır. Bu denetleyici, frekans kontrol devresindeki mikrodenetleyiciden aldığı bir bytelık frekans değerine göre, Bölüm 4.1 'de anlatılan ve Şekil 4.2 'de gösterilen dalga şeklini üretecek gerekli IGBT sürme sinyallerini üretir.



Şekil 4.8. Laboratuvar Ortamında Oluşturulan Deney Düzeneginde IGBT Tetikleme Devresi

Bu çalışmada, inverter çıkış gerilimi ve frekansı, bir fazlı asenkron motorda skaler kontrol baz alınarak ayarlanmak istenmiştir. İnverter dc barasının, 220V gerilime sahip şebekeden beslendiği düşünülerek, 50 Hz çalışma frekansı için inverter çıkış gerilimi ana harmonik bileşeninin etkin değerinin 220 V olması baz alınmıştır. Skaler kontrolün sağlanabilmesi için, diğer çalışma frekanslarındaki ana harmonik bileşen değerleri, 220V/50Hz oranına göre belirlenmiştir. Buna göre, tüm çalışma frekansları için ana harmonik bileşen değerleri Tablo 4.1 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı Çalışma Frekansları İçin Ana Harmonik Bileşeni Etkin Değerleri

Çalışma Frekansı (Hz)	Ana Harmonik Bileşeni Etkin Değeri (V)
50	220
49	215,6
48	211,2
47	206,8
46	202,4
45	198
44	193,6
43	189,2
42	184,8
41	180,4
40	176
39	171,6
38	167,2
37	162,8
36	158,4
35	154
34	149,6
33	145,2
32	140,8
31	136,4
30	132
29	127,6
28	123,2
27	118,8
26	114,4
25	110
24	105,6
23	101,2
22	96,8
21	92,4
20	88
19	83,6
18	79,2
17	74,8
16	70,4
15	66
14	61,6
13	57,2
12	52,8
11	48,4
10	44
9	39,6
8	35,2

Tablo 4.1. Farklı Çalışma Frekansları İçin Ana Harmonik Bileşeni Etkin Değerleri ( Devam )

7	30,8
6	26,4
5	22

Tablo 4.1 'deki çalışma frekansları için ana harmonik bileşen değerlerini ayarlarken, her çalışma frekansı için 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. harmonik bileşen değerlerinin elemine edilmesi istenmiştir. Bunun için, Şekil 4.2 'de elde edilmek istenen inverter çıkış gerilimi için, çeyrek periyotta uygulanan  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  ve  $\alpha_7$  darbe açılarının belirlenmesi gerekir. Şekil 4.2 'deki gerilim dalga şeklinin sinüslü harmonik bileşen katsayıları  $a_n$  ;

$$a_n = \frac{4E}{n} (1/\pi) [ \cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3) - \cos(n\alpha_4) + \cos(n\alpha_5) - \cos(n\alpha_6) + \cos(n\alpha_7) ] \quad (4.1)$$

olarak bulunur (Bkz. Ek. C).  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  ve  $\alpha_7$  darbe açıları ise ;

$$a_1 = \frac{4E}{1} (1/\pi) [ \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) - \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) - \cos(\alpha_6) + \cos(\alpha_7) ] = V$$

$$a_3 = \frac{4E}{3} (1/\pi) [ \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) - \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) - \cos(3\alpha_6) + \cos(3\alpha_7) ] = 0$$

$$a_5 = \frac{4E}{5} (1/\pi) [ \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) - \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) - \cos(5\alpha_6) + \cos(5\alpha_7) ] = 0$$



$$\begin{aligned}
a_7 &= \frac{4E}{7} (1/\pi) [ \cos(7\alpha_1) - \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) - \cos(7\alpha_4) \\
&\quad + \cos(7\alpha_5) - \cos(7\alpha_6) + \cos(7\alpha_7) ] = 0 \\
a_9 &= \frac{4E}{9} (1/\pi) [ \cos(9\alpha_1) - \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) - \cos(9\alpha_4) \\
&\quad + \cos(9\alpha_5) - \cos(9\alpha_6) + \cos(9\alpha_7) ] = 0 \\
a_{11} &= \frac{4E}{11} (1/\pi) [ \cos(11\alpha_1) - \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) - \cos(11\alpha_4) \\
&\quad + \cos(11\alpha_5) - \cos(11\alpha_6) + \cos(11\alpha_7) ] = 0 \\
a_{13} &= \frac{4E}{13} (1/\pi) [ \cos(13\alpha_1) - \cos(13\alpha_2) + \cos(13\alpha_3) - \cos(13\alpha_4) \\
&\quad + \cos(13\alpha_5) - \cos(13\alpha_6) + \cos(13\alpha_7) ] = 0 \tag{4.2}
\end{aligned}$$

nonlinear denklem takımı çözümlenir. (4.2) nonlinear denklem takımı MATLAB programı ile çözülmüştür, tüm çalışma frekansları için açık çözümü Ek D 'de gösterilmiştir. Tüm çalışma frekansları için, Tablo 4.2 'de  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  ve  $\alpha_7$  darbe açılarının radyan cinsinden değerleri ve Tablo 4.3 'te darbe açıları arasındaki  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$  ve  $t_8$  anahtarlama sürelerinin mikrosaniye cinsinden değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Çeyrek Periyottaki Darbe Açılı

Çalışma Frekans ( Hz )	Darbe Açılı ( radyan )						
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
50	0,28910	0,40413	0,58440	0,80466	0,89237	1,19614	1,21958
49	0,29559	0,41369	0,59890	0,82807	0,91998	1,25683	1,28488
48	0,29942	0,41783	0,60727	0,83821	0,93516	1,28076	1,31571
47	0,30258	0,42050	0,61403	0,84461	0,94690	1,29268	1,33499
46	0,30542	0,42245	0,62004	0,84915	0,95696	1,29912	1,34895
45	0,30807	0,42396	0,62558	0,85250	0,96595	1,30261	1,36000
44	0,31059	0,42514	0,63081	0,85501	0,97419	1,30430	1,36927
43	0,31302	0,42607	0,63579	0,85686	0,98185	1,30481	1,37737
42	0,31538	0,42679	0,64059	0,85818	0,98904	1,30452	1,38465
41	0,31768	0,42734	0,64522	0,85908	0,99585	1,30365	1,39134
40	0,31993	0,42774	0,64971	0,85961	1,00234	1,30234	1,39757
39	0,32213	0,42800	0,65409	0,85983	1,00856	1,30069	1,40345
38	0,32430	0,42815	0,65837	0,85979	1,01454	1,29878	1,40906
37	0,32643	0,42819	0,66255	0,85951	1,02031	1,29666	1,41444
36	0,32853	0,42813	0,66665	0,85902	1,02590	1,29437	1,41964
35	0,33061	0,42799	0,67067	0,85835	1,03132	1,29194	1,42468
34	0,33266	0,42776	0,67462	0,85751	1,03660	1,28939	1,42960
33	0,33469	0,42745	0,67851	0,85653	1,04175	1,28674	1,43440
32	0,33670	0,42707	0,68234	0,85541	1,04678	1,28400	1,43910
31	0,33869	0,42663	0,68611	0,85418	1,05171	1,28119	1,44372
30	0,34066	0,42612	0,68984	0,85283	1,05654	1,27831	1,44826
29	0,34261	0,42555	0,69351	0,85139	1,06128	1,27538	1,45275
28	0,34454	0,42493	0,69713	0,84985	1,06594	1,27240	1,45717
27	0,34646	0,42425	0,70072	0,84822	1,07052	1,26939	1,46154
26	0,34836	0,42353	0,70426	0,84652	1,07503	1,26629	1,46587
25	0,35025	0,42276	0,70776	0,84475	1,07948	1,26318	1,47015
24	0,35212	0,42194	0,71122	0,84290	1,08387	1,26004	1,47440
23	0,35397	0,42108	0,71465	0,84099	1,08821	1,25687	1,47861
22	0,35582	0,42018	0,71804	0,83903	1,09249	1,25367	1,48279
21	0,35764	0,41924	0,72140	0,83700	1,09673	1,25044	1,48695
20	0,35946	0,41826	0,72472	0,83493	1,10091	1,24718	1,49108
19	0,36126	0,41724	0,72801	0,83280	1,10506	1,24390	1,49518
18	0,36304	0,41620	0,73128	0,83063	1,10917	1,24060	1,49927
17	0,36481	0,41512	0,73451	0,82841	1,11324	1,23728	1,50334
16	0,36657	0,41400	0,73771	0,82615	1,11727	1,23394	1,50738
15	0,36832	0,41286	0,74089	0,82385	1,12127	1,23058	1,51142
14	0,37005	0,41169	0,74404	0,82151	1,12523	1,22720	1,51543
13	0,37176	0,41048	0,74716	0,81914	1,12917	1,22381	1,51944
12	0,37346	0,40926	0,75025	0,81673	1,13308	1,22039	1,52343
11	0,37515	0,40800	0,75332	0,81428	1,13696	1,21696	1,52741
10	0,37682	0,40672	0,75636	0,81180	1,14081	1,21351	1,53139
9	0,37848	0,40542	0,75938	0,80929	1,14464	1,21004	1,53535

Tablo 4.2. Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Çeyrek Periyottaki Darbe Açılı (Devam)

8	0,38013	0,40409	0,76237	0,80675	1,14844	1,20656	1,53931
7	0,38175	0,40274	0,76534	0,80418	1,15222	1,20306	1,54326
6	0,38337	0,40137	0,76828	0,80158	1,15598	1,19955	1,54720
5	0,38496	0,39997	0,77119	0,79895	1,15971	1,19601	1,55114

Tablo 4.3. Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Anahtarlama Zamanları

Çalışma Frekans ( Hz )	Anahtarlama Zamanları ( $\mu$ s )							
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$
50	920,26	366,14	573,80	701,11	279,20	966,94	74,60	1117,94
49	960,11	383,60	601,57	744,38	298,51	1094,12	91,10	928,66
48	992,83	392,60	628,14	765,75	321,45	1145,91	115,97	845,79
47	1024,63	399,31	655,36	780,82	346,38	1170,88	143,28	798,49
46	1056,72	404,93	683,62	792,71	373,00	1183,86	172,39	767,55
45	1089,59	409,87	713,11	802,57	401,24	1190,68	202,99	745,52
44	1123,48	414,32	743,95	810,96	431,10	1194,05	235,03	728,93
43	1158,61	418,40	776,26	818,22	462,62	1195,40	268,55	715,90
42	1195,13	422,17	810,16	824,57	495,86	1195,49	303,64	705,36
41	1233,19	425,68	845,77	830,18	530,92	1194,81	340,39	696,62
40	1272,96	428,97	883,22	835,16	567,90	1193,63	378,92	689,23
39	1314,60	432,06	922,65	839,61	606,93	1192,16	419,37	682,89
38	1358,27	434,97	964,21	843,61	648,13	1190,50	461,88	677,37
37	1404,15	437,72	1008,09	847,21	691,68	1188,74	506,63	672,53
36	1452,46	440,33	1054,47	850,47	737,76	1186,93	553,80	668,23
35	1503,40	442,79	1103,56	853,42	786,56	1185,12	603,61	664,39
34	1557,22	445,14	1155,59	856,11	838,32	1183,32	656,30	660,94
33	1614,19	447,36	1210,85	858,56	893,30	1181,55	712,12	657,82
32	1674,62	449,48	1269,61	860,80	951,79	1179,83	771,38	654,98
31	1738,85	451,49	1332,22	862,85	1014,13	1178,17	834,42	652,39
30	1807,26	453,40	1399,07	864,73	1080,69	1176,56	901,61	650,02
29	1880,28	455,21	1470,57	866,46	1151,90	1175,02	973,40	647,85
28	1958,43	456,94	1547,24	868,04	1228,27	1173,54	1050,27	645,84
27	2042,27	458,58	1629,64	869,50	1310,35	1172,12	1132,81	643,99
26	2132,46	460,14	1718,43	870,85	1398,80	1170,77	1221,66	642,28
25	2229,77	461,62	1814,37	872,09	1494,38	1169,48	1317,59	640,70
24	2335,08	463,02	1918,36	873,24	1597,99	1168,25	1421,50	639,23
23	2449,45	464,35	2031,43	874,30	1710,66	1167,09	1534,42	637,87
22	2574,12	465,61	2154,82	875,27	1833,64	1165,98	1657,59	636,60
21	2710,55	466,80	2290,01	876,17	1968,38	1164,94	1792,48	635,43
20	2860,51	467,93	2438,75	877,00	2116,65	1163,96	1940,86	634,34
19	3026,14	468,98	2603,19	877,77	2280,59	1163,03	2104,86	633,33

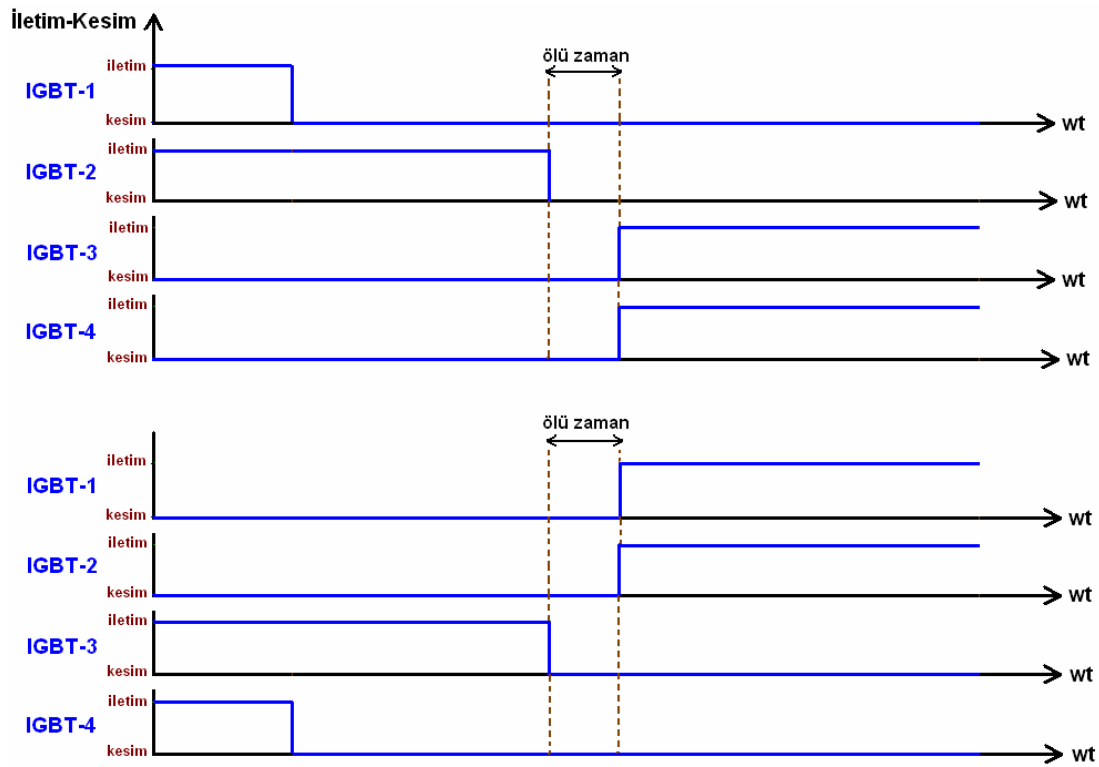
Tablo 4.3. Şekil 4.2 'de Tasarlanan Gerilim Dalga Şekli İçin Anahtarlama Zamanları ( Devam )

18	3210,05	469,98	2785,93	878,48	2462,81	1162,16	2287,10	632,40
17	3415,46	470,91	2990,20	879,13	2666,53	1161,34	2490,79	631,53
16	3646,42	471,79	3220,03	879,72	2895,78	1160,57	2719,97	630,73
15	3908,02	472,60	3480,52	880,27	3155,66	1159,86	2979,74	629,99
14	4206,83	473,36	3778,25	880,77	3452,75	1159,20	3276,67	629,31
13	4551,44	474,06	4121,80	881,23	3795,63	1158,59	3619,34	628,69
12	4953,29	474,71	4522,61	881,64	4195,73	1158,02	4019,20	628,12
11	5428,01	475,30	4996,30	882,02	4668,68	1157,51	4491,86	627,61
10	5997,43	475,83	5564,71	882,35	5236,32	1157,04	5059,17	627,14
9	6693,13	476,32	6259,42	882,65	5930,22	1156,62	5752,69	626,73
8	7562,46	476,75	7127,77	882,92	6797,72	1156,25	6619,78	626,36
7	8679,82	477,13	8244,17	883,15	7913,24	1155,92	7734,83	626,04
6	10169,22	477,45	9732,63	883,34	9400,78	1155,63	9221,85	625,76
5	12253,88	477,73	11816,36	883,51	11483,55	1155,39	11304,06	625,52

Tablo 4.3 'teki çalışma frekansları ve ilgili anahtarlama zamanları, IGBT tetikleme devresindeki mikrodenetleyiciye kaydedilerek bir çevrim tablosu oluşturulmuştur. Mikrodenetleyici, frekans giriş devresinden gelen frekans bilgisini alır, çevrim tablosundan ilgili frekans değeri için anahtarlama sürelerini alır ve igbt sürme devresine uygun anahtarlama sinyalleri gönderir. Anahtarlama sinyalleri, Şekil 4.2 'de oluşturulmak istenen dalga şekli için Şekil 4.3 'te gösterilen anahtarlama dalga şekline göre üretilmektedir.

İnverter bloğundaki aynı kolda bulunan igbtlerin, kısa devre durumundan ötürü aynı anda iletme sokulmaması gerektiği Bölüm 2.5'te açıklanmıştı. Şekil 4.1 'de tasarlanan devrede, IGBT-1 ile IGBT-4 ve IGBT-2 ile IGBT-3 kısa devre kollarını oluşturmaktadır. Şekil 2.8 'de gösterildiği üzere, Şekil 4.1 'deki devrede, sıfır gerilimden  $-E$  gerilimine geçişte IGBT-2 kesime sokulurken aynı anda IGBT-3 ve IGBT-4 iletme sokulmalıdır. Aynı şekilde sıfır gerilimden  $+E$  gerilimine geçişte, IGBT-3 kesime sokulurken IGBT-1 ve IGBT-2 iletme sokulmalıdır. Fakat şekil 4.3'deki anahtarlama dalga şekilleri ideal anahtarlara göre çizilmiştir. Pratik olarak, güç elektroniği yarı iletken anahtarlarının sıfırdan farklı iletme ve kesime geçme süreleri vardır. Gerçek zaman uygulamalarda, bir güç elektroniği yarı iletken elemanına kesime götüreceği sinyal uygulandığında, eleman, üretici firma tarafından belirlenen süre aralığında kesime gider. Bu durumda, kısa devre durumunun

oluşabileceği anahtarlama zamanlarında, kesime gitme süresi kadar ölü zaman bırakılmalıdır. Üretici firmalar, elemanların kesime gitme sürelerini, farklı test şartları için ilgili bilgi sayfalarında verirler. Pratik açıdan, bilgi sayfalarında verilen en uzun kesime gitme süresini baz almak güvenli çalışma için oldukça önemlidir. Tasarımda kullanılan IXGH20N60AU1 serisi igtler için veri sayfasında, endüktif yük akımında ve  $125^{\circ}\text{C}$ 'de yapılmış test sonucu için igt kesime gitme süresi  $1,5\ \mu\text{s}$  olarak verilmiştir (Bkz. Ek. E) [15]. Tasarımda güvenli çalışma için, verilen sınır değerleri üzerinde çalışma önemlidir. Bu sebeple kısa durumlarını önlemek için, igt tetikleme devresi mikrodenetleyicisi  $2\ \mu\text{s}$  ölü zaman oluşturmaktadır. Tasarlanan inverter için ölü zamanlı igt anahtarlama dalga şekilleri Şekil 4.9 'da gösterilmiştir.

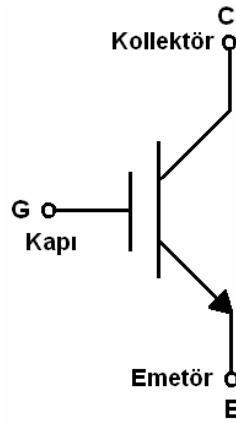


Şekil 4.9. Tasarlanan Inverter İçin Ölü Zamanlı Anahtarlama

### 4.2.3 İgt sürme katı

Tasarımda, güç elektroniği yarı iletken anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. IGBT'ler, BJT ve MOSFET'lerin avantajlı özellikleri birleştirilerek oluşturulmuş yarı iletken elemanlardır. BJT'ler ve MOSFET'ler çeşitli açılardan

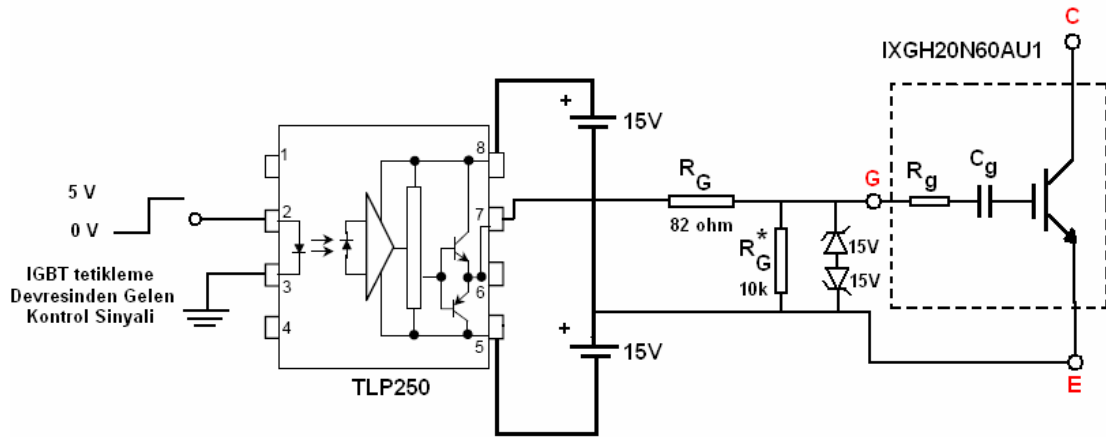
birbirini tamamlayan karakteristiklere sahiptirler. BJT'lerin özellikle tıkama gerilim değerleri büyük olanlarında iletim durumu kayıpları daha düşüktür fakat özellikle kesime gidişte anahtarlama süreleri daha uzundur. MOSFET'ler iletime ve kesime daha hızlı geçebilir fakat özellikle tıkama gerilim değerleri birkaç yüz volt ve daha büyük elemanlarda iletim durumu kayıpları daha büyüktür. Bu gözlemler, BJT ve MOSFET'leri aynı silisyum tabaka üzerinde tek parça olarak her iki elemanın en iyi özelliklerini bir araya getiren yeni bir eleman elde edilmesine neden olmuştur. Bu özelliklerin birleştirilmesiyle kapısı izole edilmiş iki kutuplu yeni bir tranzistör (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT ) elde edilmiştir. Şekil 4.10 'da n-kanal IGBT sembolü gösterilmiştir.



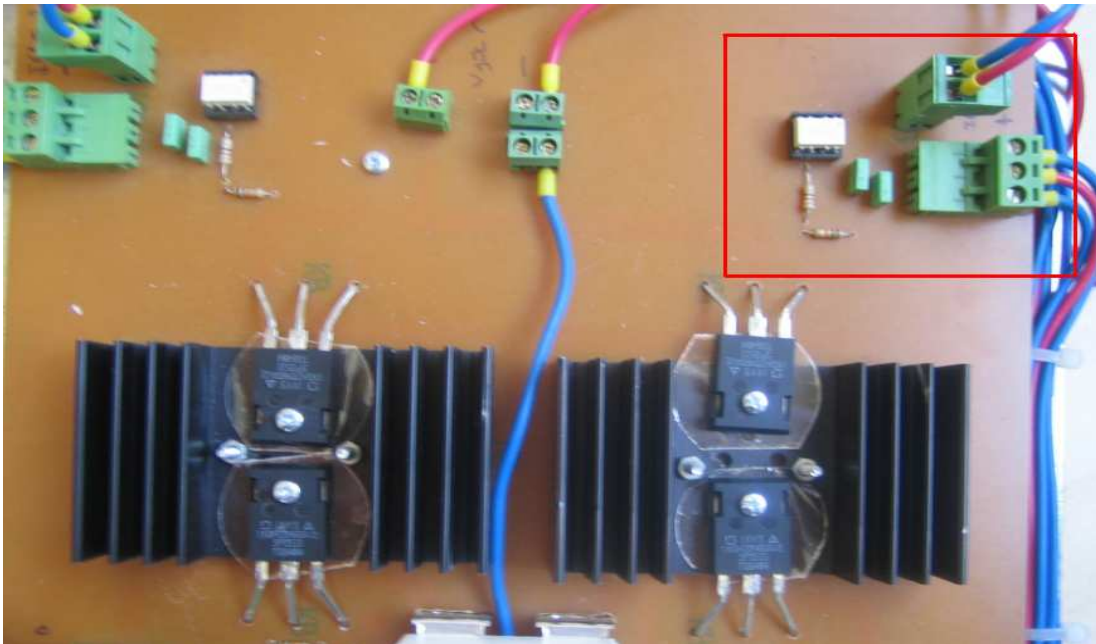
Şekil 4.10. n-kanal IGBT Sembolü

N-kanal bir IGBT , kapı-emetör arasına pozitif gerilim uygulandığında iletime geçerek kollektör-emetör arasında akım akmasına izin verir. Kapı-emetör arasına negatif gerilim uygulandığında ise kesime gider ve kollektör-emetör arasındaki akım akışını durdurur. Güç elektroniği çeviricilerinde kullanılan yarı iletken elemanlar anahtarlama elemanı olarak kullanıldığından lineer bölgede değil doyum bölgesinde çalıştırılırlar. Bu sebeple, IGBT'nin kapı-emetör arasına, üretici firma tarafından belirlenen tam iletime ve tam kesime sokulmasını sağlayan gerilim uygulanır. Genel olarak IGBT'ler -15V ile +15V kapı gerilimi aralığında çalışırlar. Bu değer aralığı, farklı üretici firmaların ürettiği farklı IGBT'ler için -20V ile +20V aralığına kadar değişebilmektedir. Tasarımda kullanılan IXGH20N60AU1 serisi IGBT'ler için üretici firma tarafından kapı gerilimi çalışma aralığı -15V - +15V olarak

belirlenmiştir. Bu IGBT'leri tam ilettime sokmak için kapı-emetör arasına +15V ve tam kesime sokmak için -15V uygulanmıştır. IGBT'ler, kapı-emetör geriliminin sıfır gerilime çekilmesiyle de kesime gidebilir. Ancak pratik açıdan, kapı-emetör arasına uygulanan negatif gerilim kapı-emetör arasından negatif bir akım akıtarak, IGBT'nin çok hızlı ve güvenli bir şekilde kesime gitmesini sağlar. Tasarımda kullanılan IGBT sürme devresi Şekil 4.11 'de gösterilmiştir. Laboratuar ortamında oluşturulmuş deney düzeneğinde IGBT sürme devresi ise Şekil 4.12 'de gösterilmiştir.

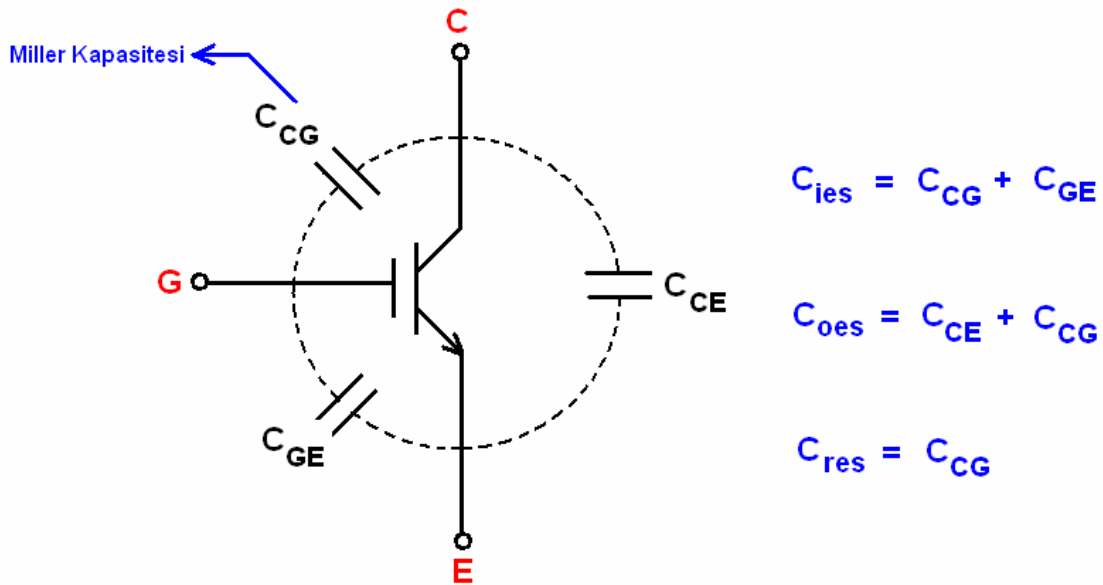


Şekil 4.11. Tasarımda Kullanılan IGBT Sürme Devresi



Şekil 4.12. Laboratuar Ortamında Oluşturulmuş Deney Düzeninde IGBT Sürme Devresi

IGBT sürme devresi, IGBT tetikleme devresinden gelen anahtarlama sinyallerine göre köprü inverter katında bulunan IGBT'lerin iletim ya da kesime sokulma işlemini yapar. IGBT sürme devresinin çalışmasını Şekil 4.11 'de gösterilen şema üzerinden açıklanabilir. IGBT tetikleme devresinden gelen lojik gerilimler TLP250 serisi opto-kuplör'e uygulanır [16]. Opto-kuplör, lojik kontrol sinyalini IGBT'yi sürececek şekilde yükseltir, aynı zamanda IGBT tetikleme devresini yüksek gerilim seviyesinde bulunan köprü inverter katından elektriksel olarak yalıtır. TLP250 opto-kuplörünün girişine lojik 1 uygulandığında, IGBT kapı-emetör girişine +15 V gerilim uygulanır, böylelikle IGBT iletime sokulur. TLP250'nin girişine lojik 0 uygulandığında, kapı-emetör girişine -15 V uygulanarak IGBT kesime sokulur. Kesikli çerçeve içerisinde eşdeğer IGBT kapı-emetör yapısı gösterilmiştir. Eşdeğer IGBT kapı-emetör devresi, seri bağlı çok küçük değerde kaçak empedans  $R_g$  ve iletim ve kesim durumlarında farklı değer alan  $C_g$  kapasitesi ile gösterilebilir. Şekil 4.13 'te IGBT eşdeğer parazitik kapasite yapısı gösterilmiştir [17].



Şekil 4.13. Eşdeğer IGBT Parazitik Kapasite Yapısı

Şekil 4.11'deki devrede gösterilen  $C_g$  kapasitesi iletim durumunda Şekil 4.13 'te gösterilen  $C_{ies}$  değerini ve kesim durumunda Şekil 4.13 'te gösterilen  $C_{res}$  değerini alır.  $R_g$  değeri çok küçük olduğundan, IGBT'yi iletim ya da kesime sokmak için

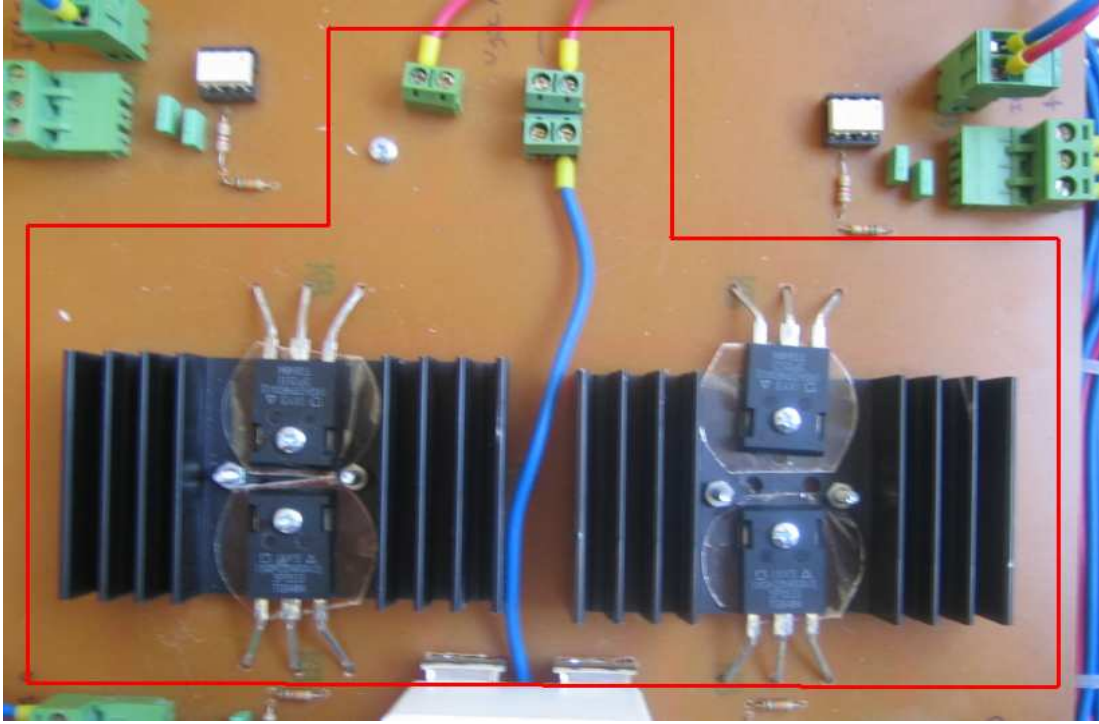


uygulanacak  $\pm 15$  V,  $C_g$  kapasitesi dolana kadar büyük pik akımı akıp kapı devresine zarar verebilir. Bu durumu engellemek için pik akımını sınırlayacak bir  $R_G$  direnci kapı girişine seri olarak bağlanır. Tasarımda  $R_G$  direnci belirlenen  $82 \Omega$  değeri, IXYS firması tarafından IXGH20N60AU1 serisi IGBT'ler için veri sayfalarında öngördüğü uygun değerdir.

Sırt sırta bağlı 15 V'luk zenerler, kapı devresine uygulanması muhtemel büyük gerilimleri  $\pm 15$  V'a sabitleyerek kapı devresinin zarar görmesini önlemek için kapı-emetör arasına paralel bağlanmıştır. Kolektör-emetör arası gerilim altında olan IGBT'nin kapı devresinin boşa kalması IGBT'ye zarar verir. Her ne kadar tasarımda kapı devresi boşa değilse de, herhangi bir problemten dolayı kapı devresinin boşa kalma ihtimalini engellemek için, kapı-emetör arasına paralel 10k'lık bir direç bağlanmıştır.

#### 4.2.4 Köprü inverter katı

Köprü inverter katı, Şekil 4.1 'de gösterilen devrede IXGH20N60AU1 serisi IGBT'lerin birbirine bağlanarak ve bu bağlantının uygun noktalarından yüke çıkarılan uçlarından oluşmaktadır. Laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneğinde köprü inverter katı Şekil 4.14 'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Laboratuar Ortamında Oluşturulmuş Deney Düzeneginde Köprü İnverter Katı

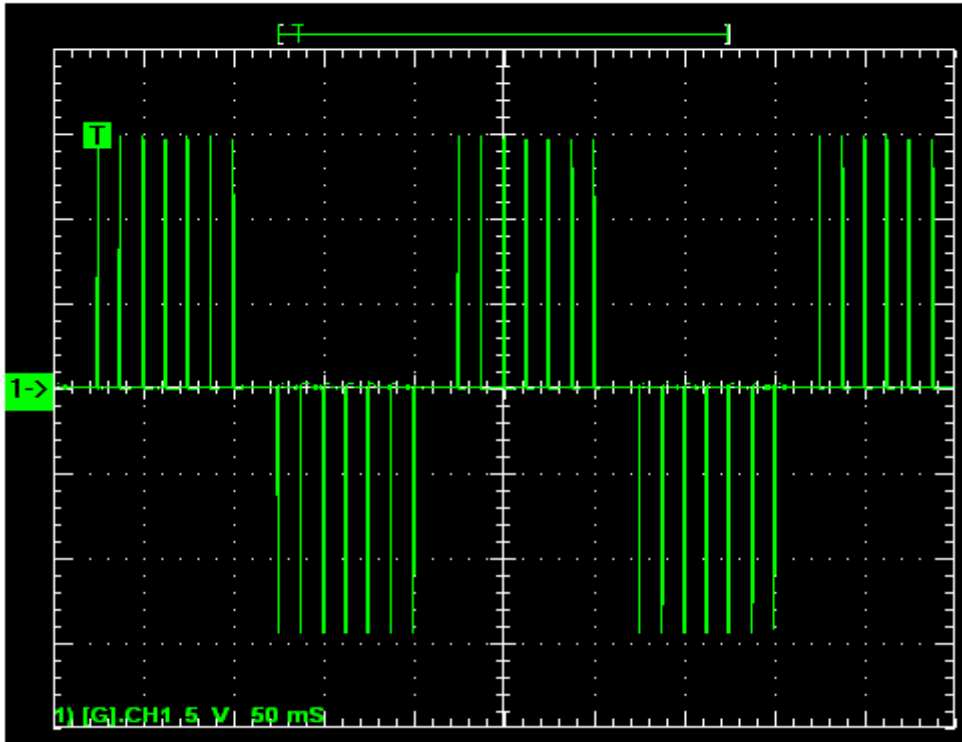
Köprü inverter katı, tasarımın amacının olduğu asıl kısımdır. Amaçlanan çıkış gerilim dalga şekli bu blokta oluşturulur ve yüke uygulanır. Köprü inverter çalışma prensibi Bölüm 2.5'te açıklanmıştır. Tasarımın amacına göre Şekil 4.2 'de elde edilmek istenen gerilim dalga şekli için IGBT tetikleme devresi uygun anahtarlama sinyallerini igbt sürme devresine gönderir ve sürme devresi köprü inverter katındaki IGBT'leri uygun şekilde iletme ve kesime sokarak çıkışta elde edilmek istenen gerilim dalga şekli oluşur.

## **BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

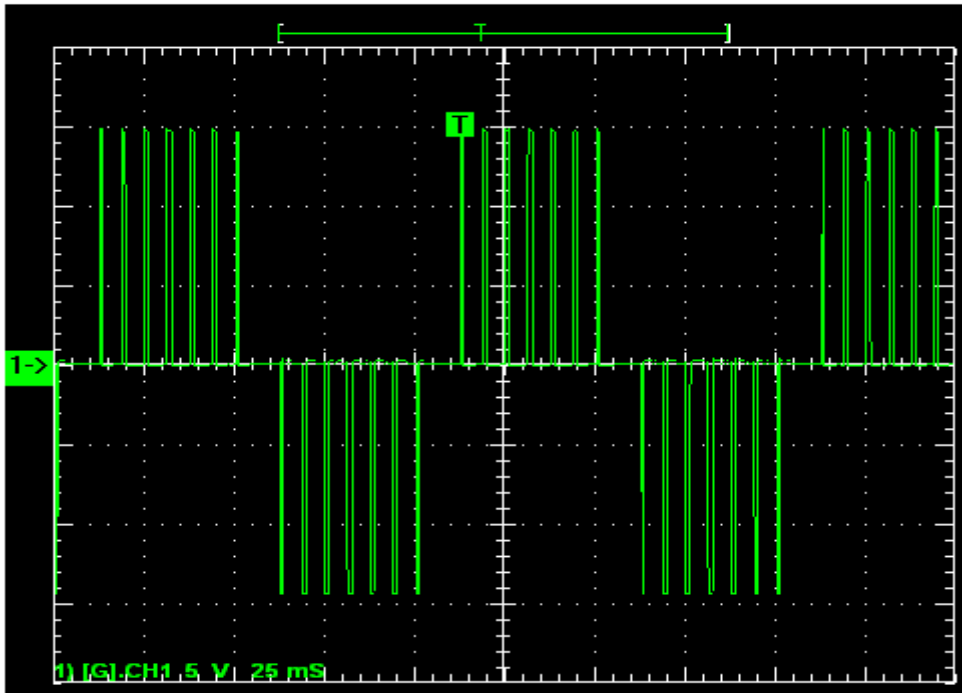
Gerçek zaman olarak tasarımı Bölüm 4 'te açıklanan bir fazlı invertere yük olarak bir fazlı asenkron motor bağlanmıştır ve inverter girişi 220 V'luk bir faz şebeke hattından beslenmiştir. Farklı çalışma frekansları için çıkış gerilim dalga şekilleri dijital osiloskop ile gözlemlenmiş ve yine dijital osiloskop ile örneklenmiştir. Örneklenmiş gerilim dalga şekli verileri MATLAB ortamında düzenlenerek harmonik analizleri yapılmıştır.

### **5.1 Sonuçlar**

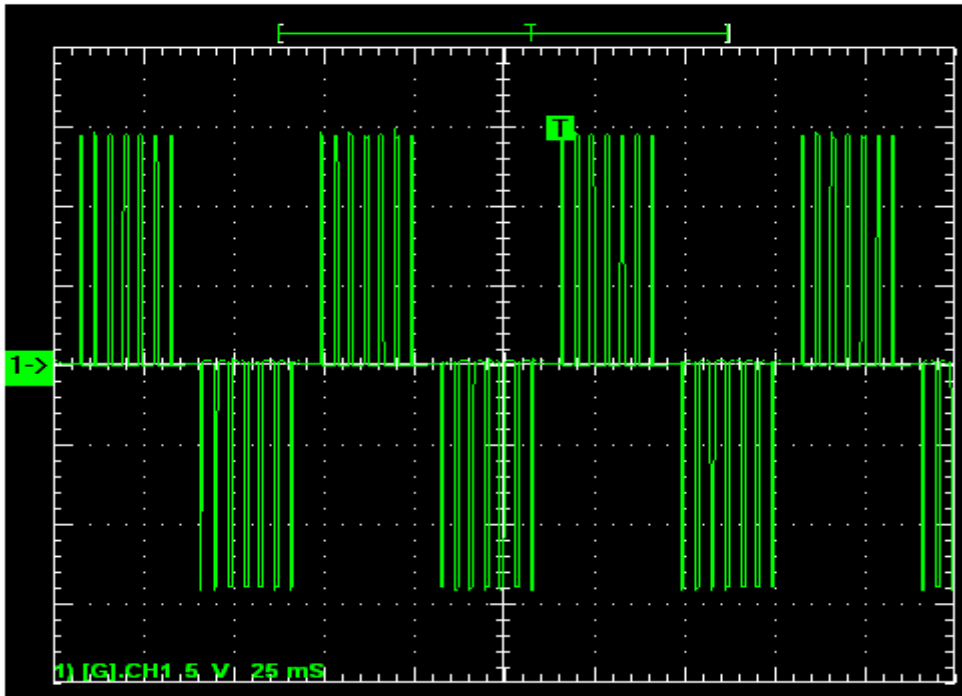
Bazı farklı çalışma frekanslarında endüktif yük altında, dijital osiloskopta elde edilen inverter çıkış gerilim dalga şekilleri Şekil 5.1 – Şekil 5.10 arasında gösterilmiştir.



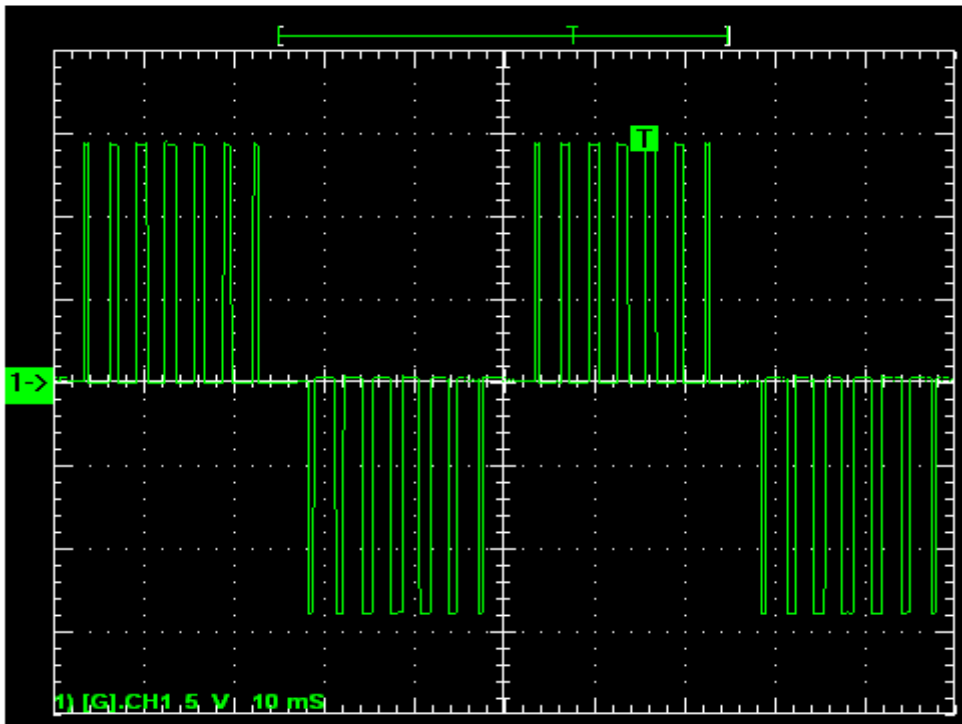
Şekil 5.1. 5 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



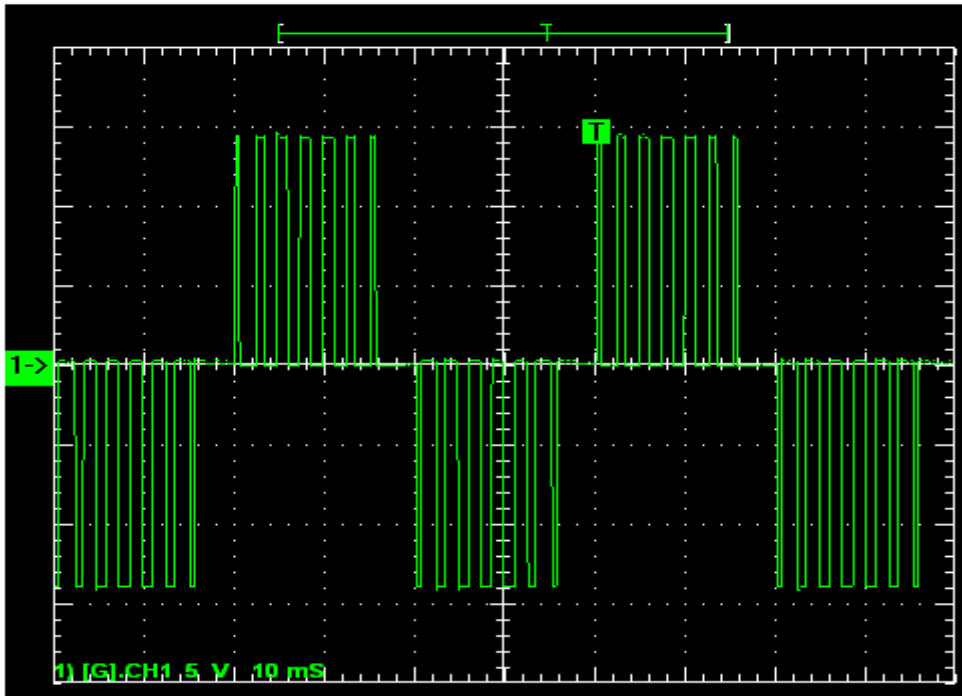
Şekil 5.2. 10 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



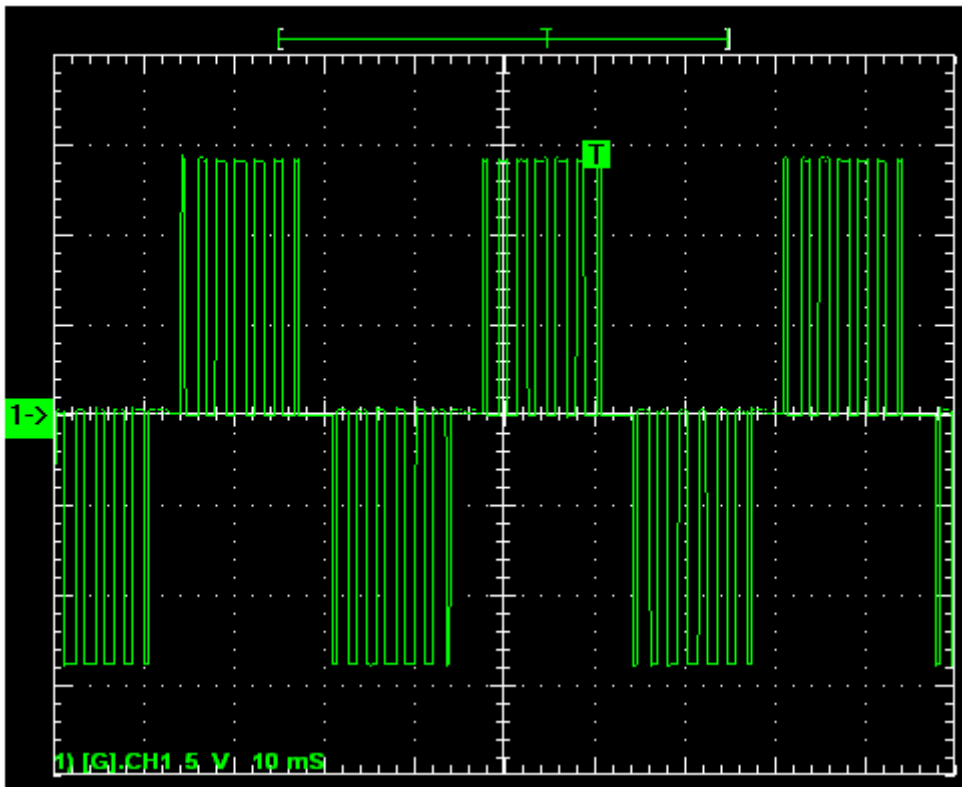
Şekil 5.3. 15 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



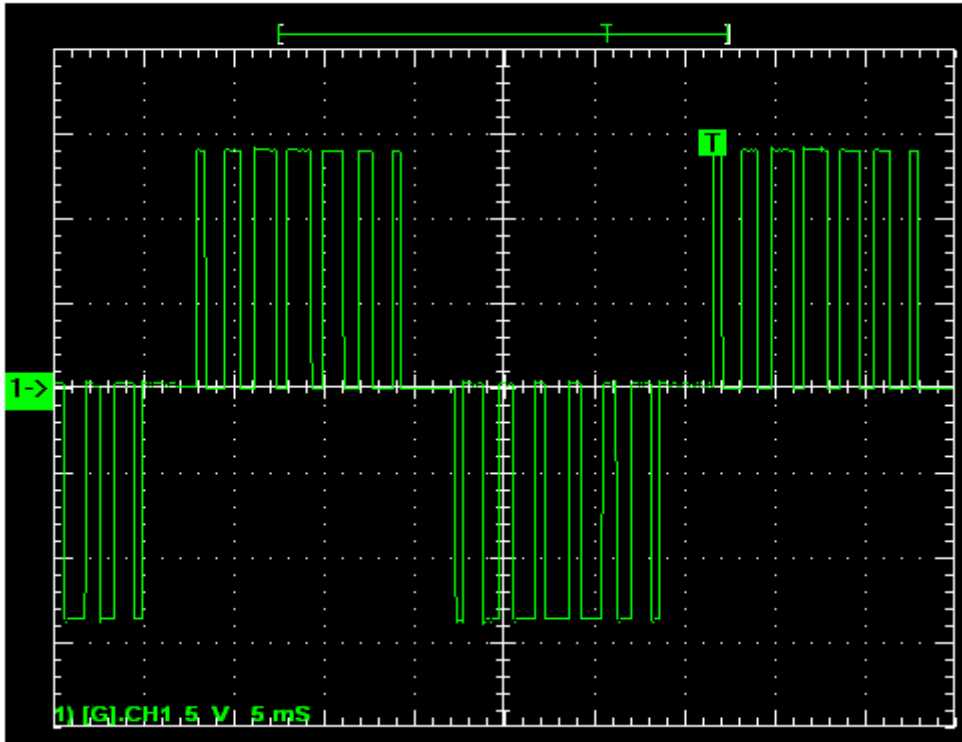
Şekil 5.4. 20 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



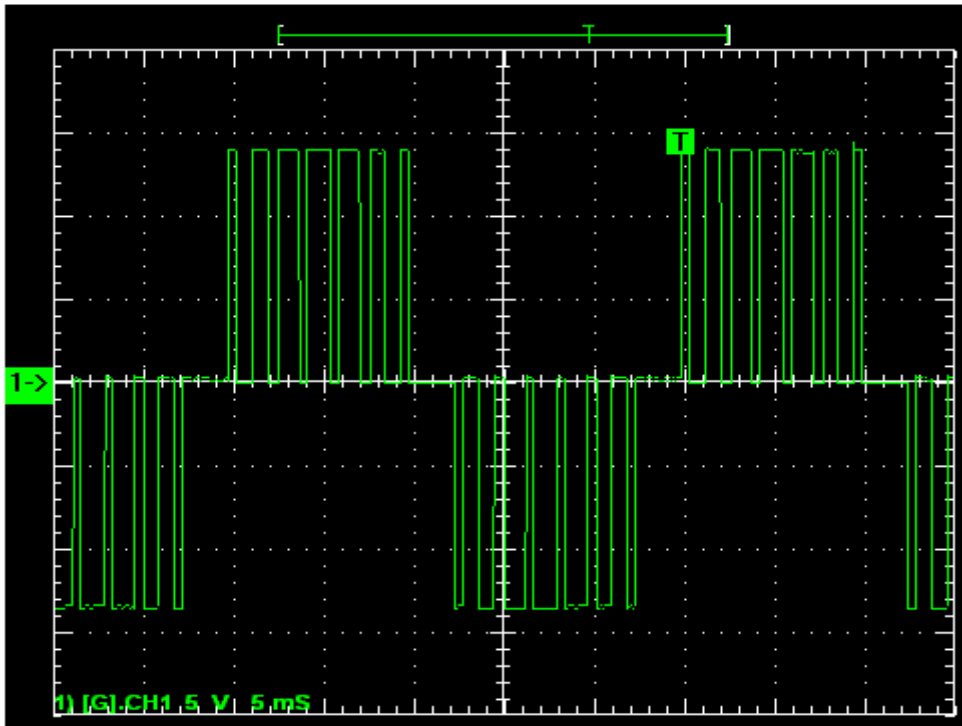
Şekil 5.5. 25 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



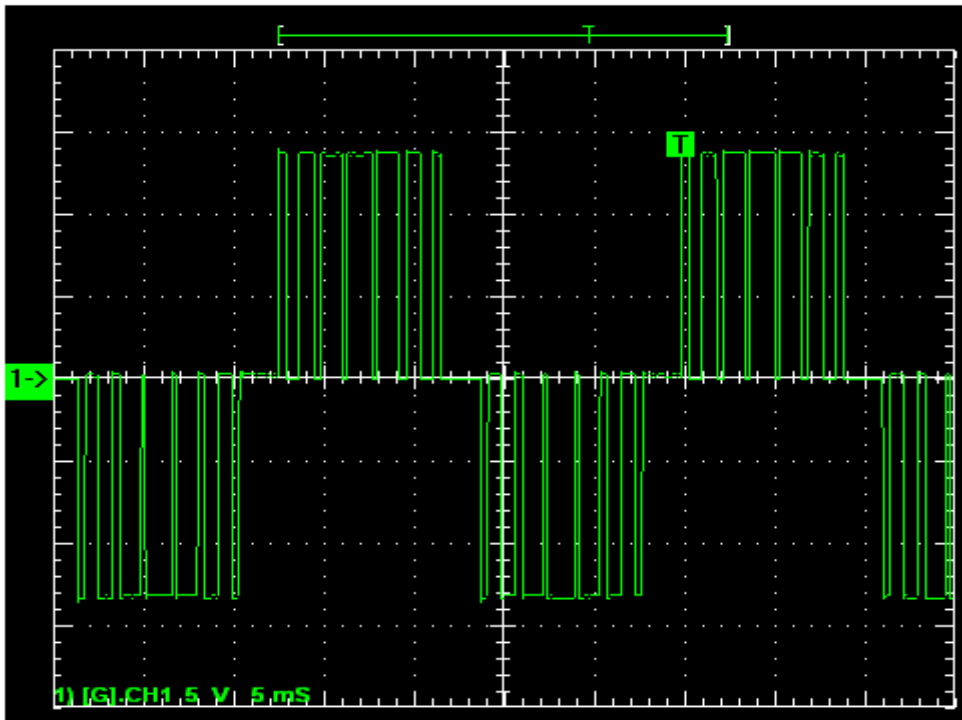
Şekil 5.6. 30 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



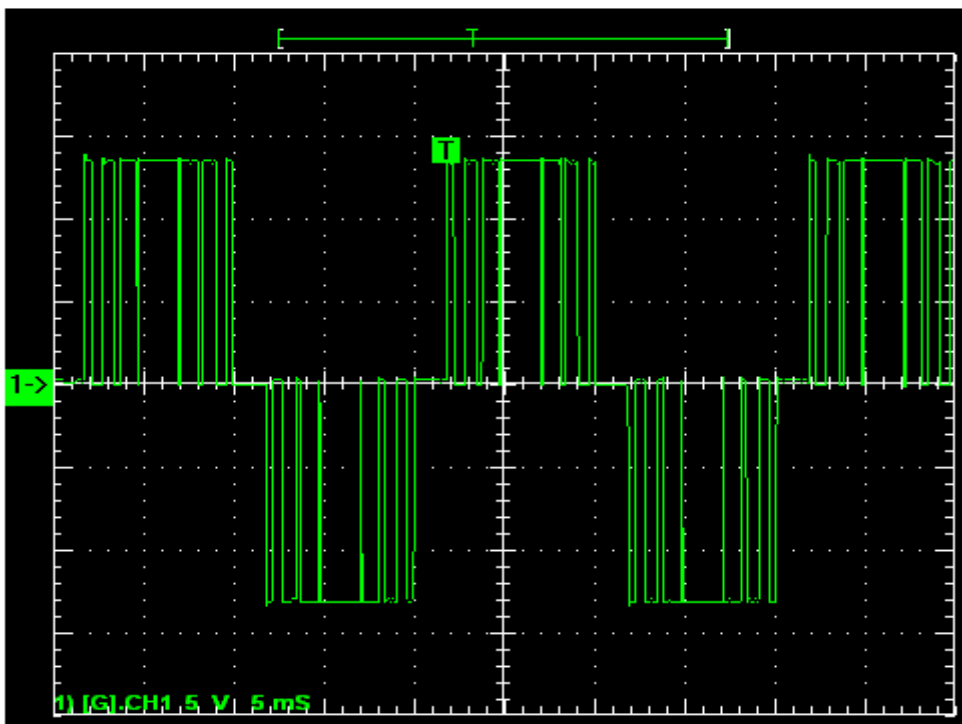
Şekil 5.7. 35 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



Şekil 5.8. 40 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



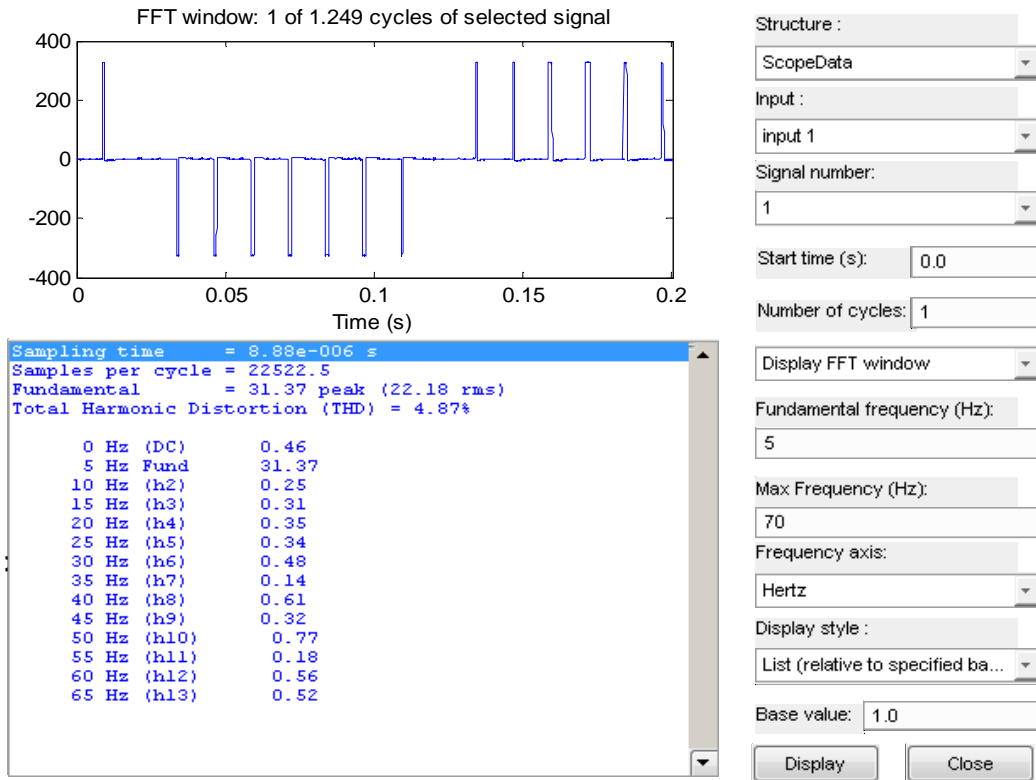
Şekil 5.9. 45 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



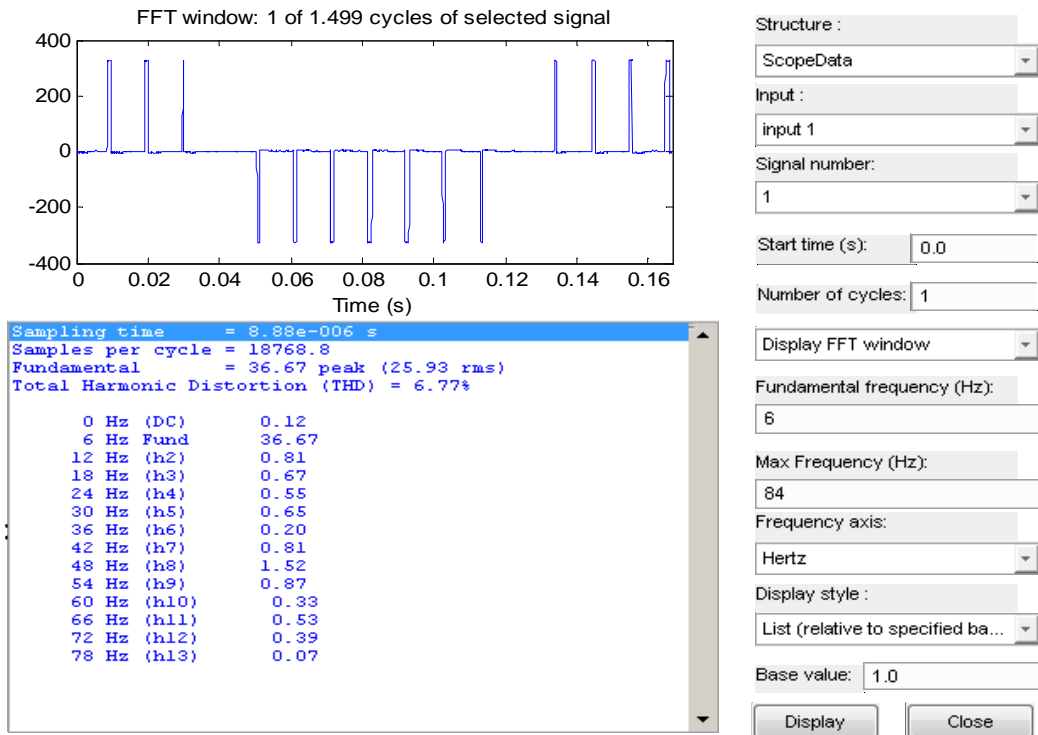
Şekil 5.10. 50 Hz Çalışma Frekansında İverter Çıkış Gerilim Dalga Şekli



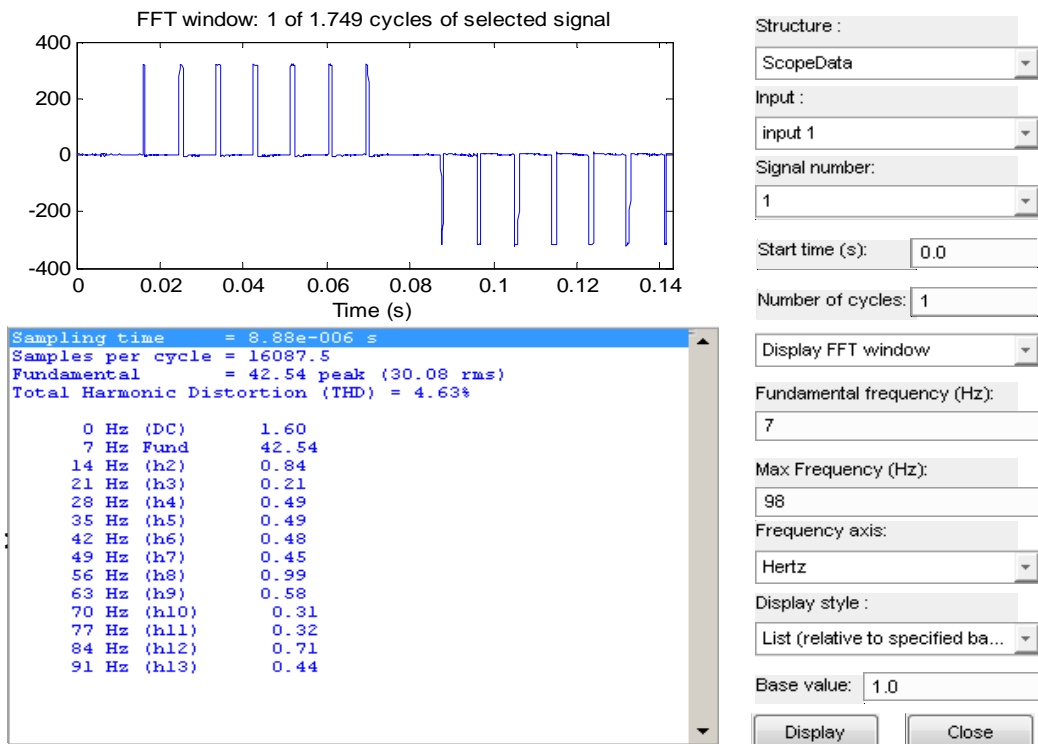
Tüm çalışma frekansları için elde edilen çıkış gerilim dalga şekilleri dijital osiloskopta örneklenerek MATLAB programına atılarak çizdirilmiştir. Çizdirilen bu dalga şekillerinin harmonik analizleri yine MATLAB programında yapılmıştır. Tüm çalışma frekansları için elde edilen harmonik analizleri Şekil 5.11 – Şekil 5.56 arasında gösterilmiştir.



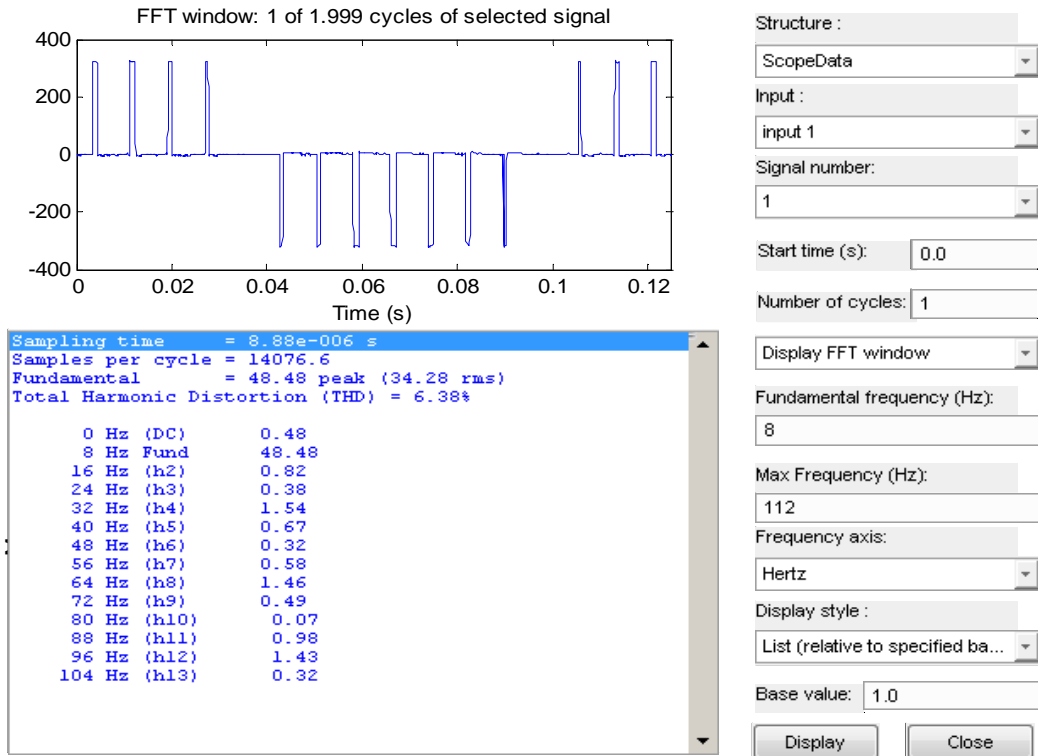
Şekil 5.11. 5 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



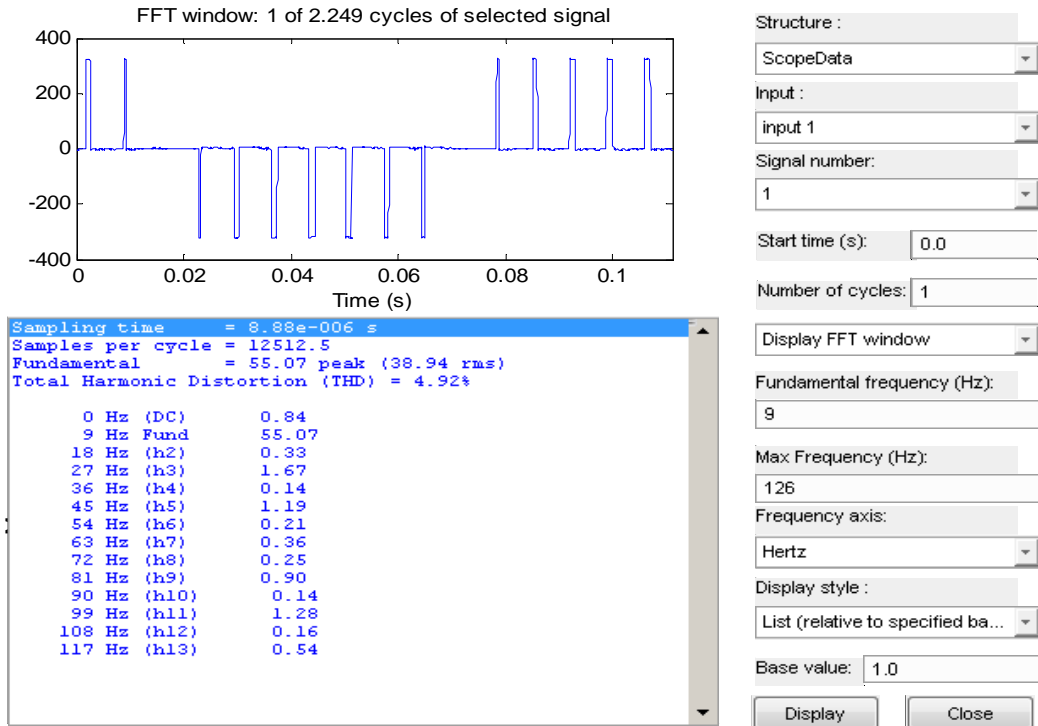
Şekil 5.12. 6 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



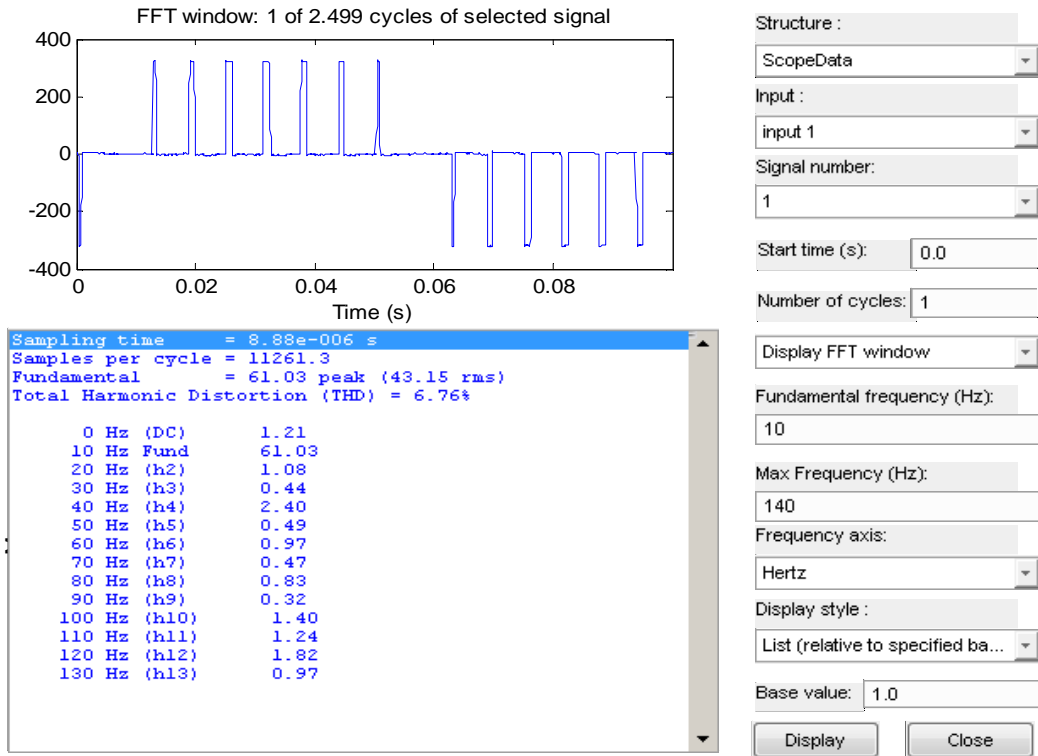
Şekil 5.13. 7 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



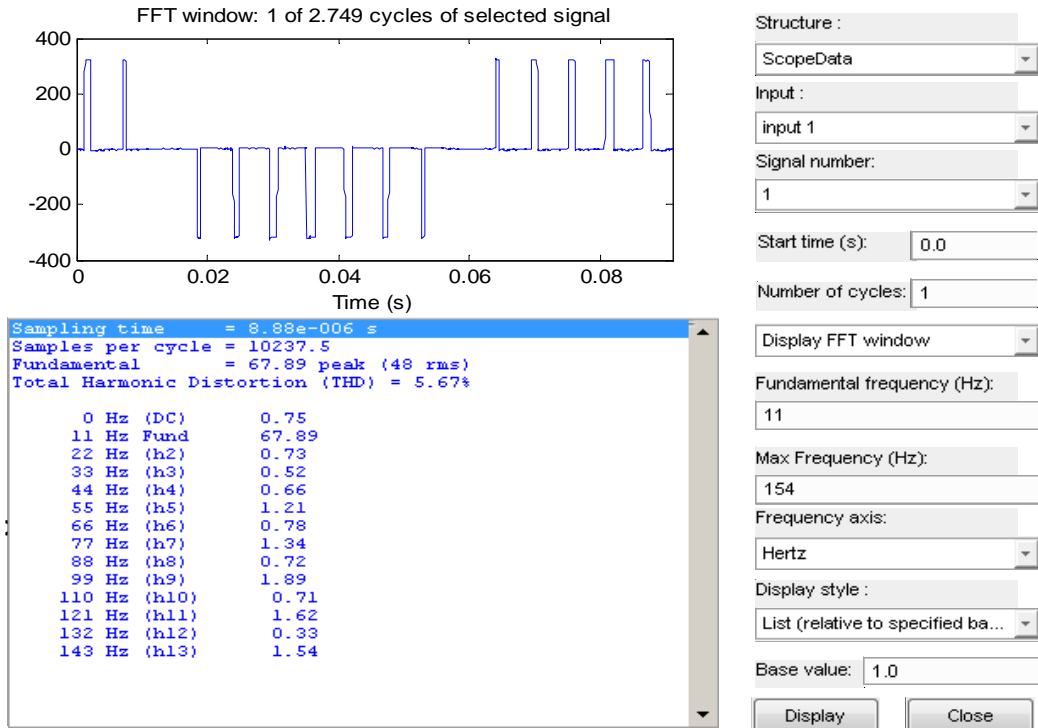
Şekil 5.14. 8 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



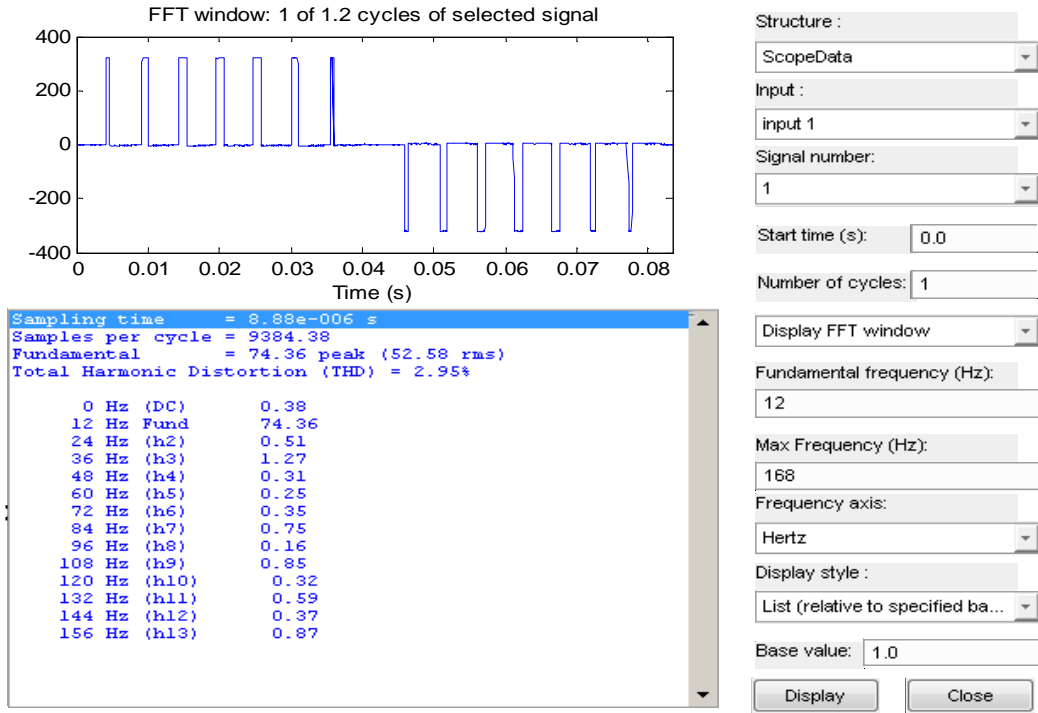
Şekil 5.15. 9 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



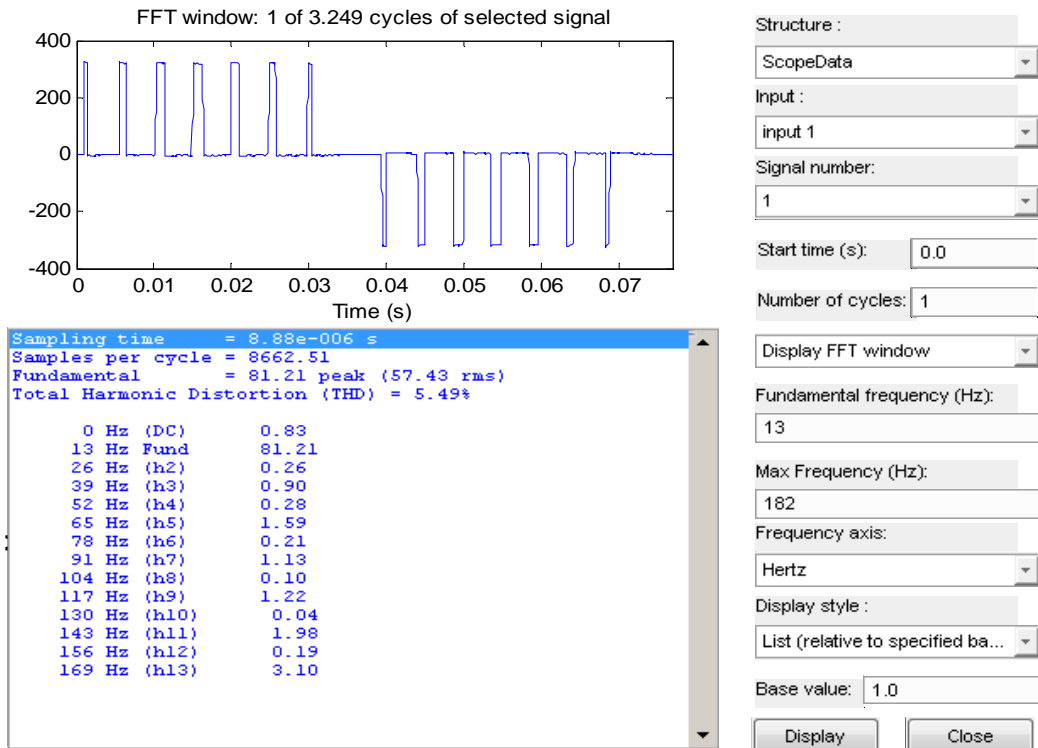
Şekil 5.16. 10 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



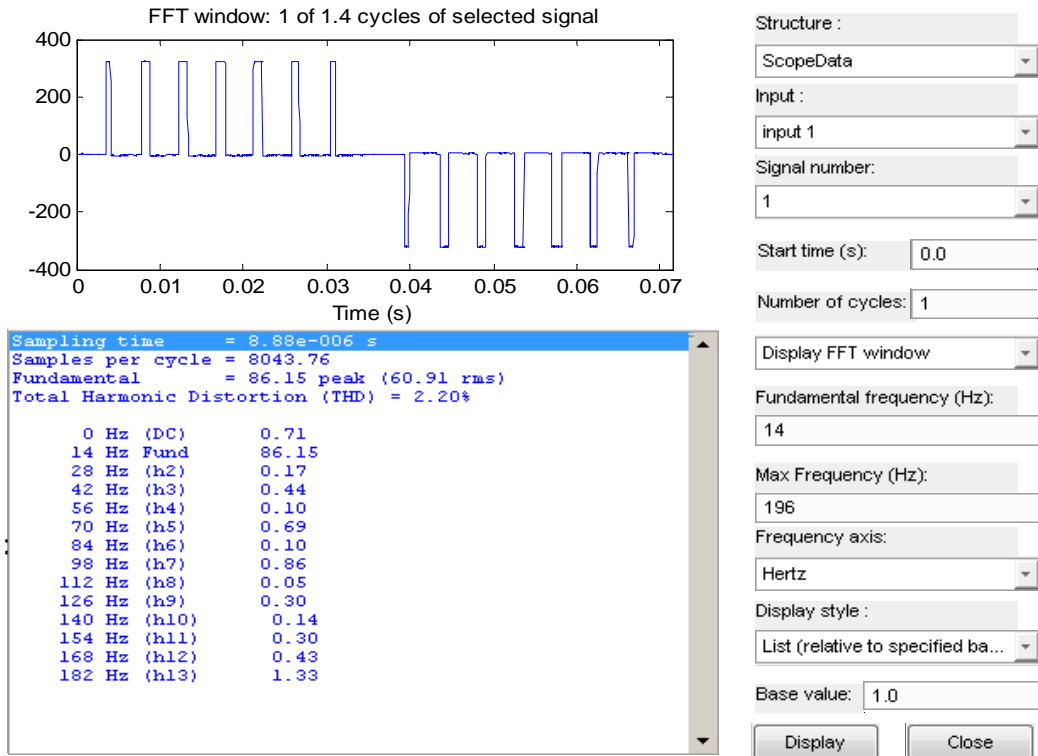
Şekil 5.17. 11 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



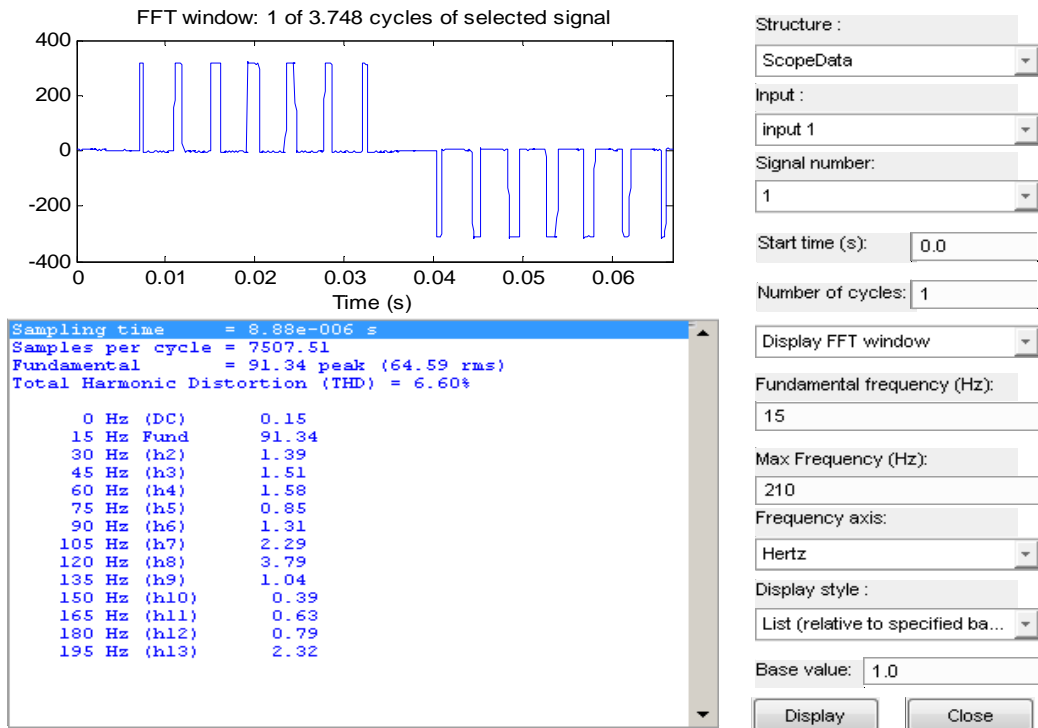
Şekil 5.18. 12 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



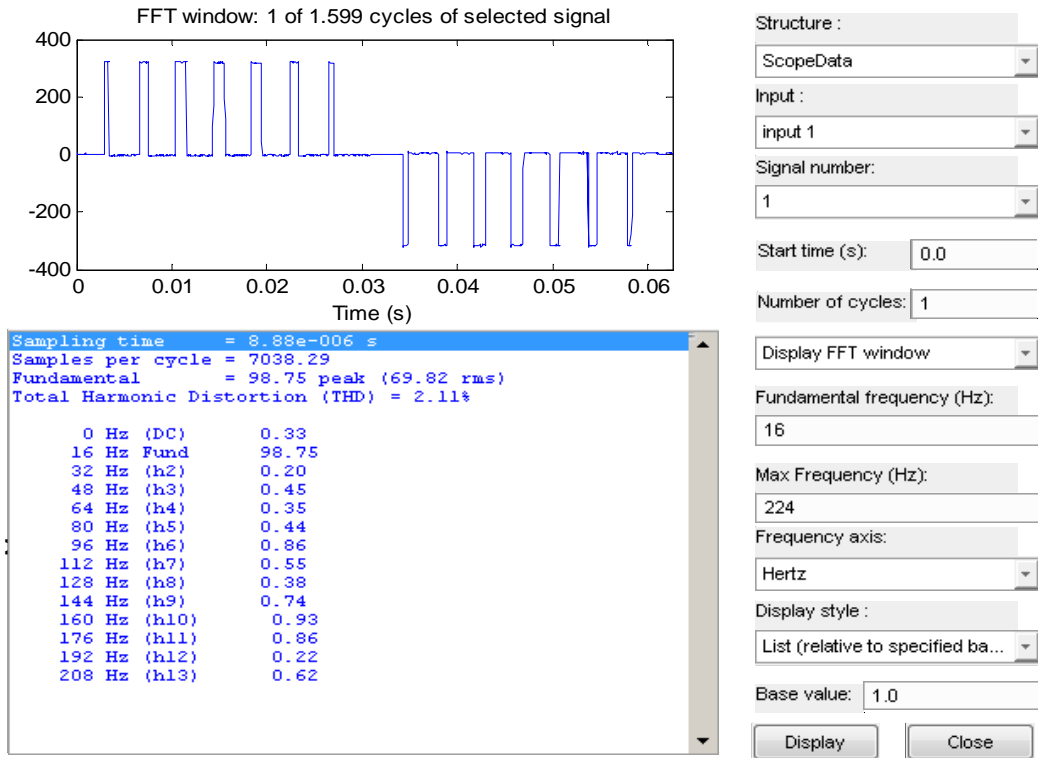
Şekil 5.19. 13 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



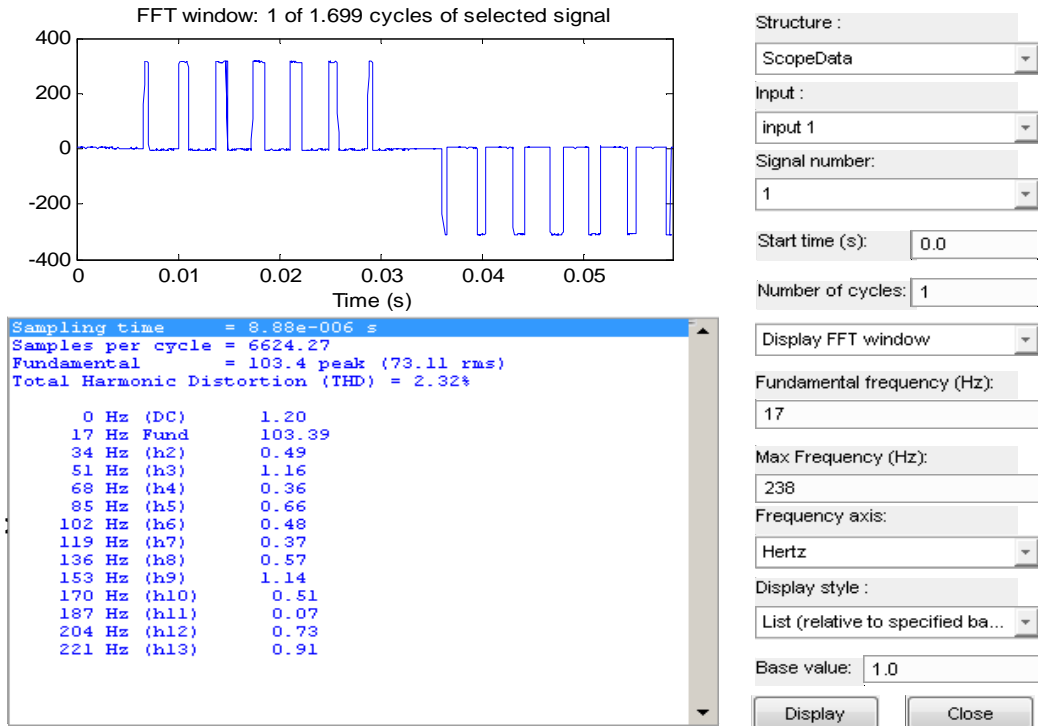
Şekil 5.20. 14 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



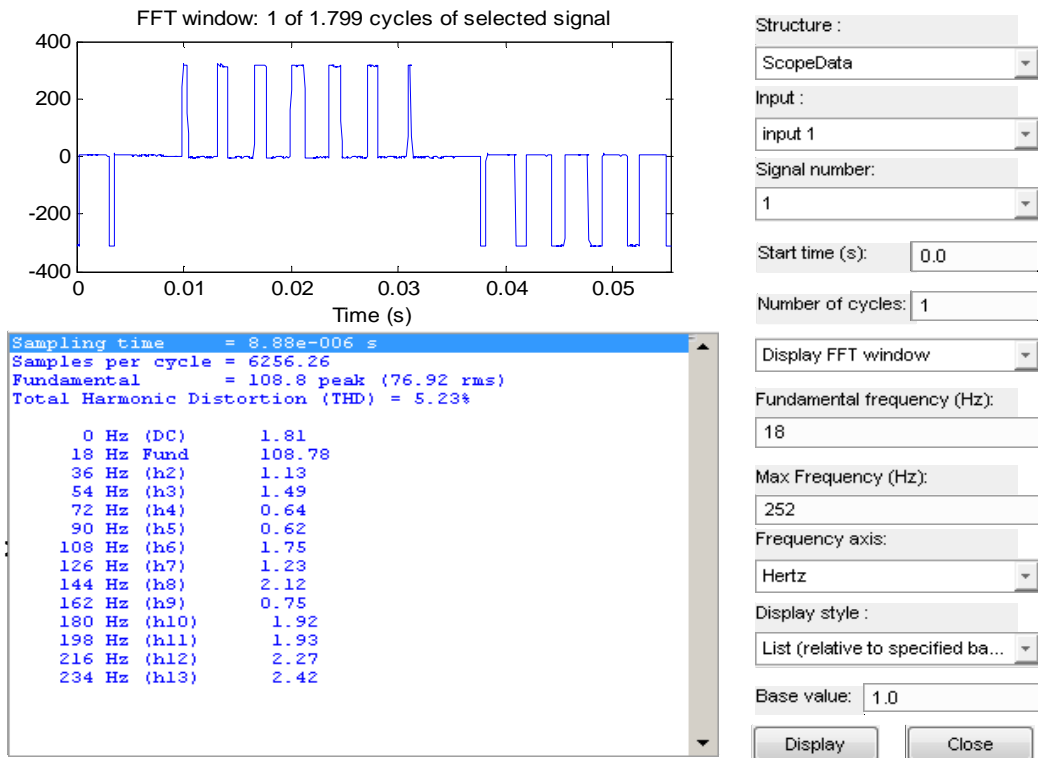
Şekil 5.21. 15 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



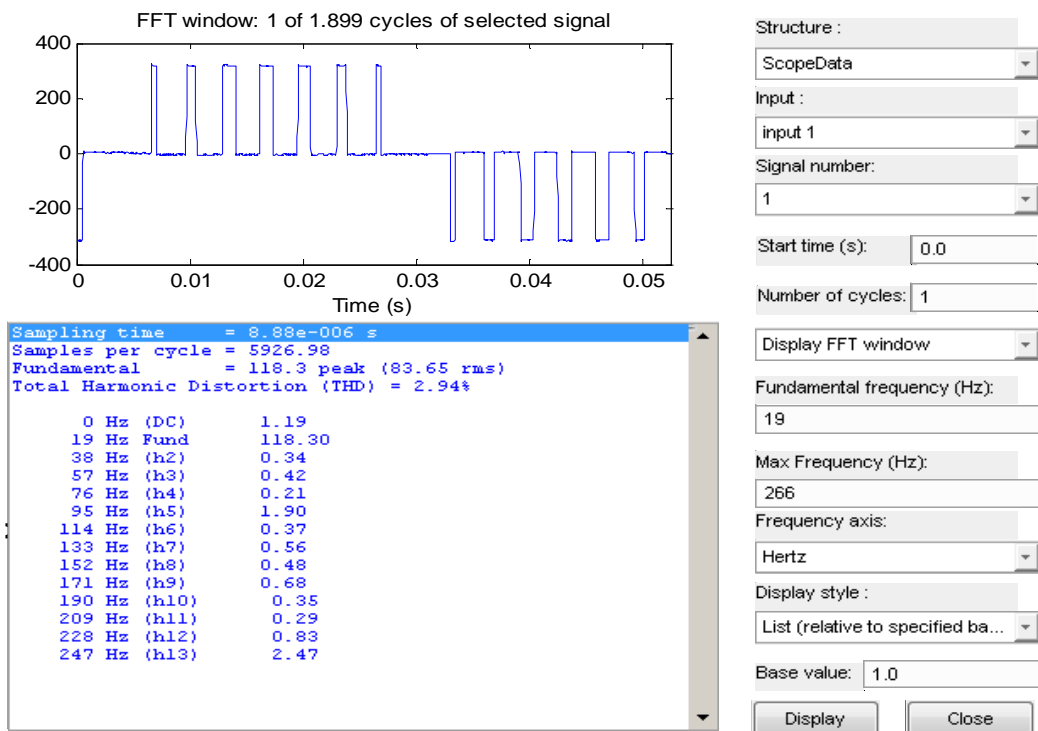
Şekil 5.22. 16 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



Şekil 5.23. 17 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

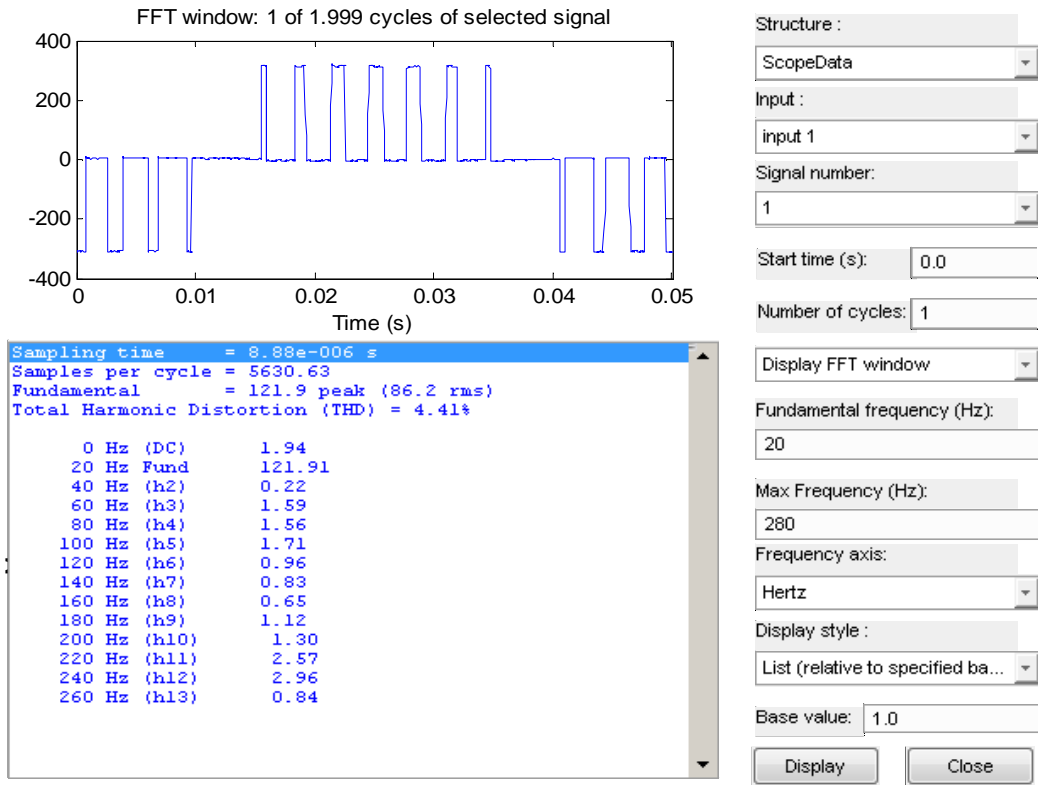


Şekil 5.24. 18 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

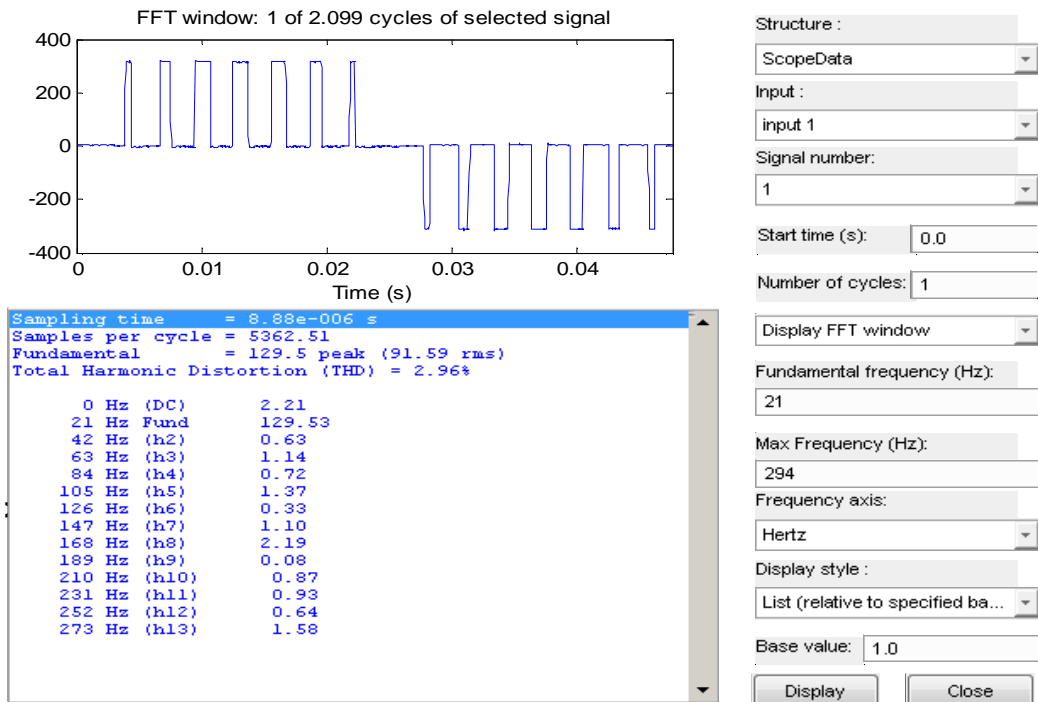


Şekil 5.25. 19 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

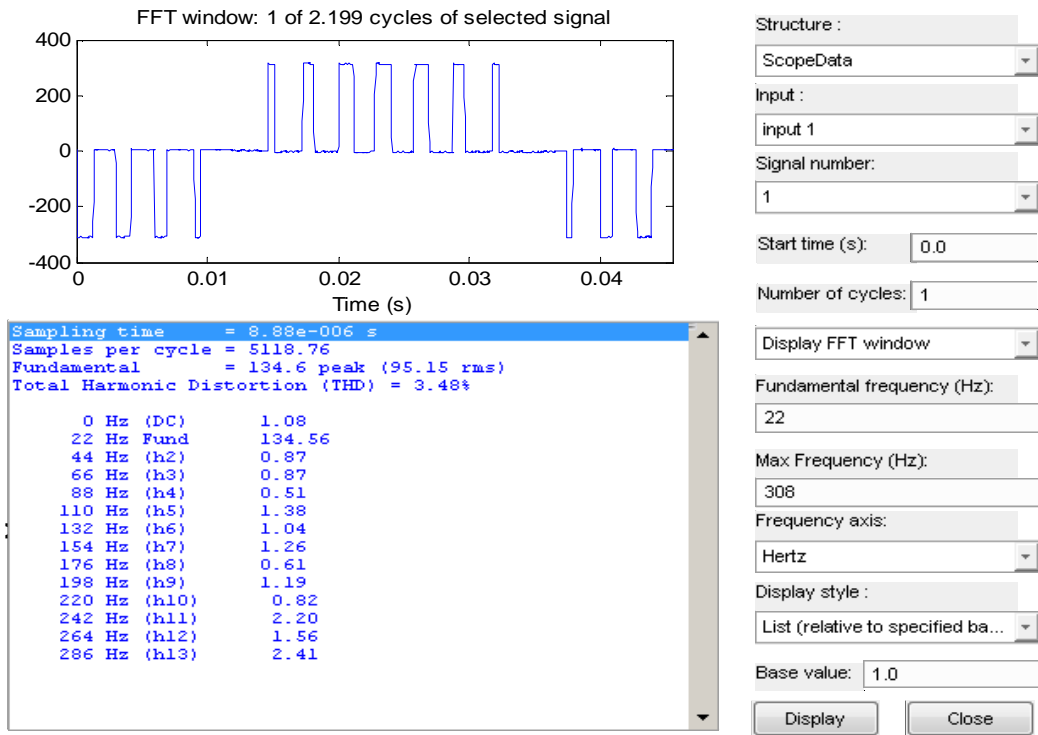




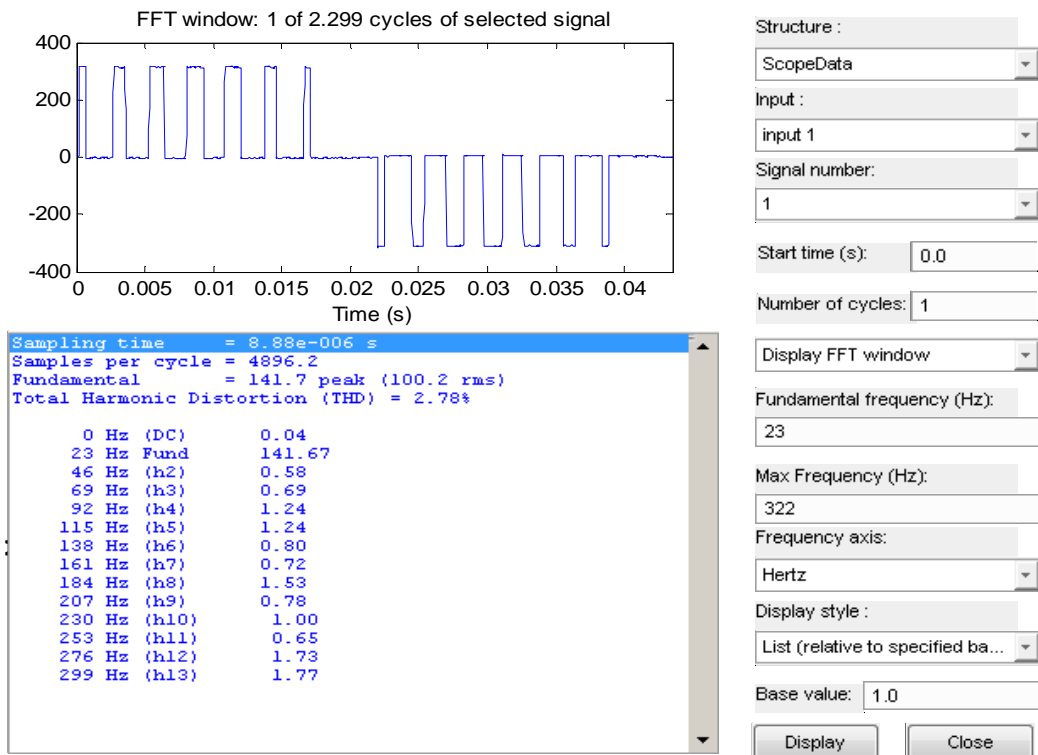
Şekil 5.26. 20 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



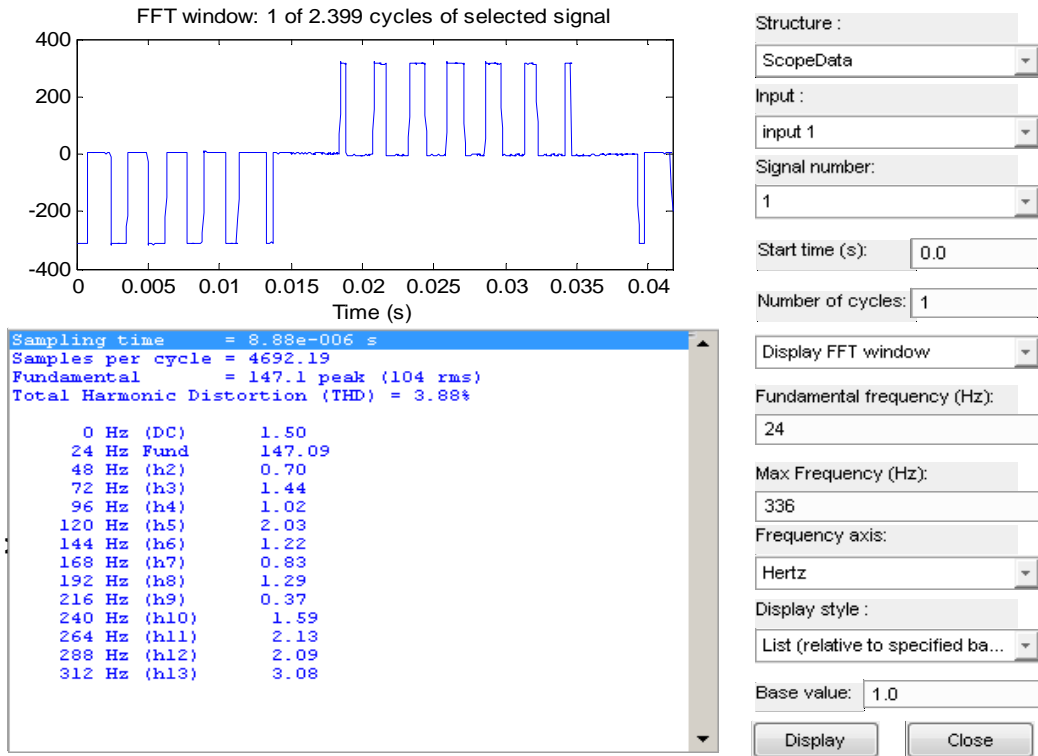
Şekil 5.27. 21 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



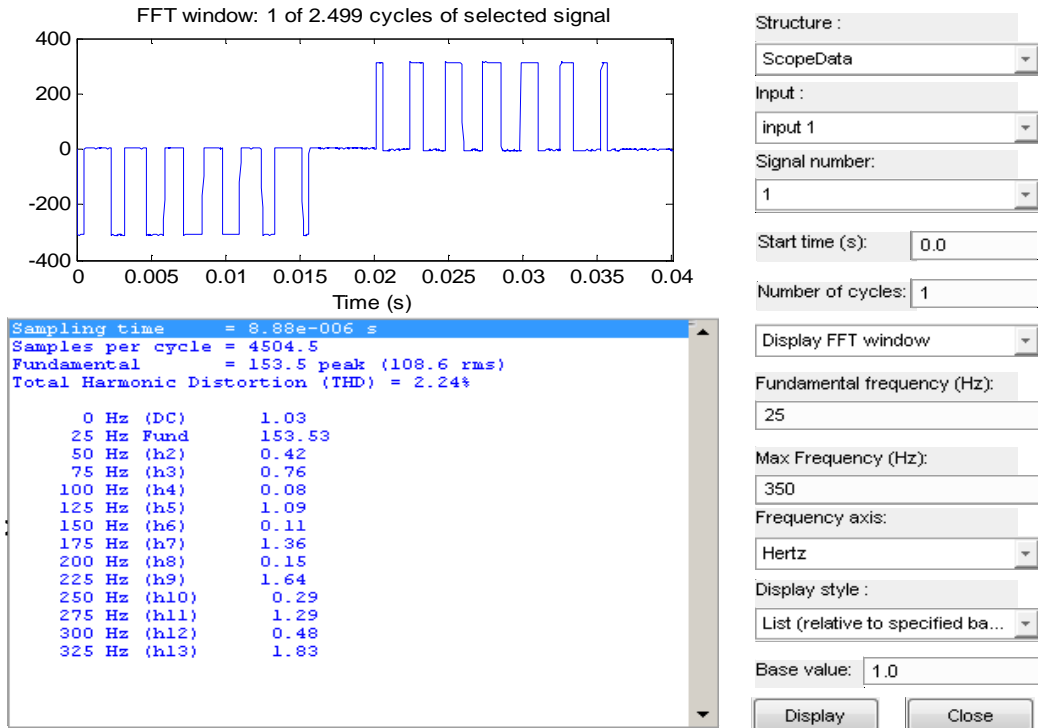
Şekil 5.28. 22 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



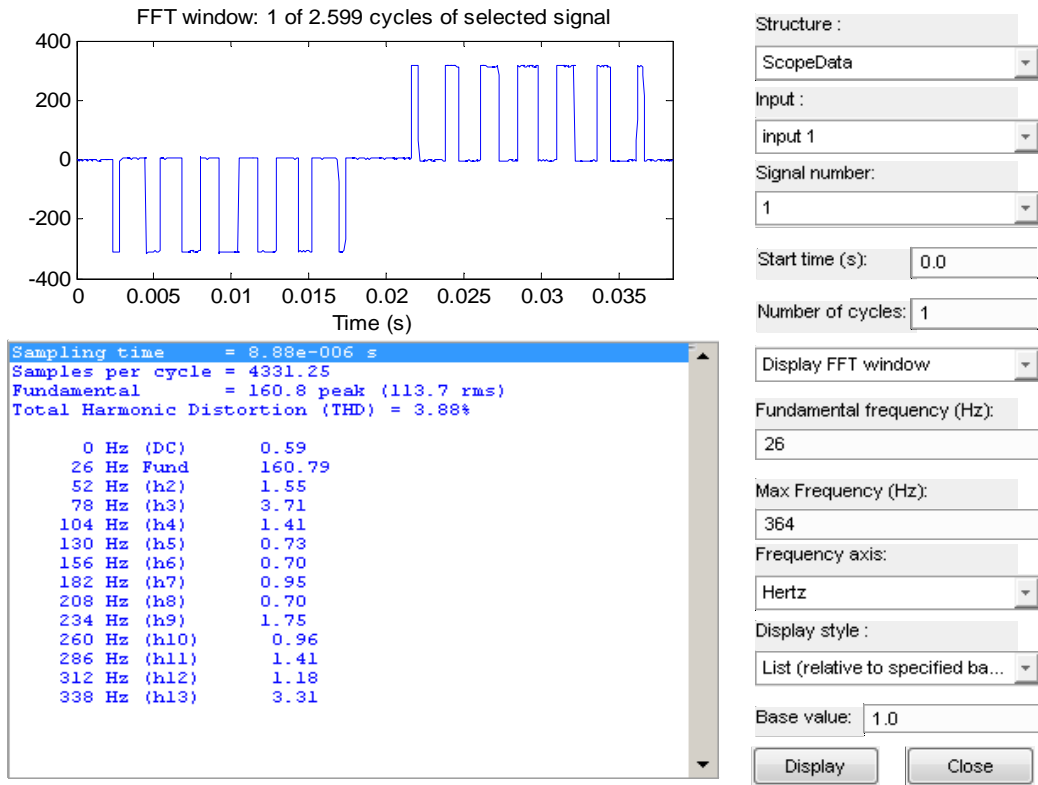
Şekil 5.29. 23 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



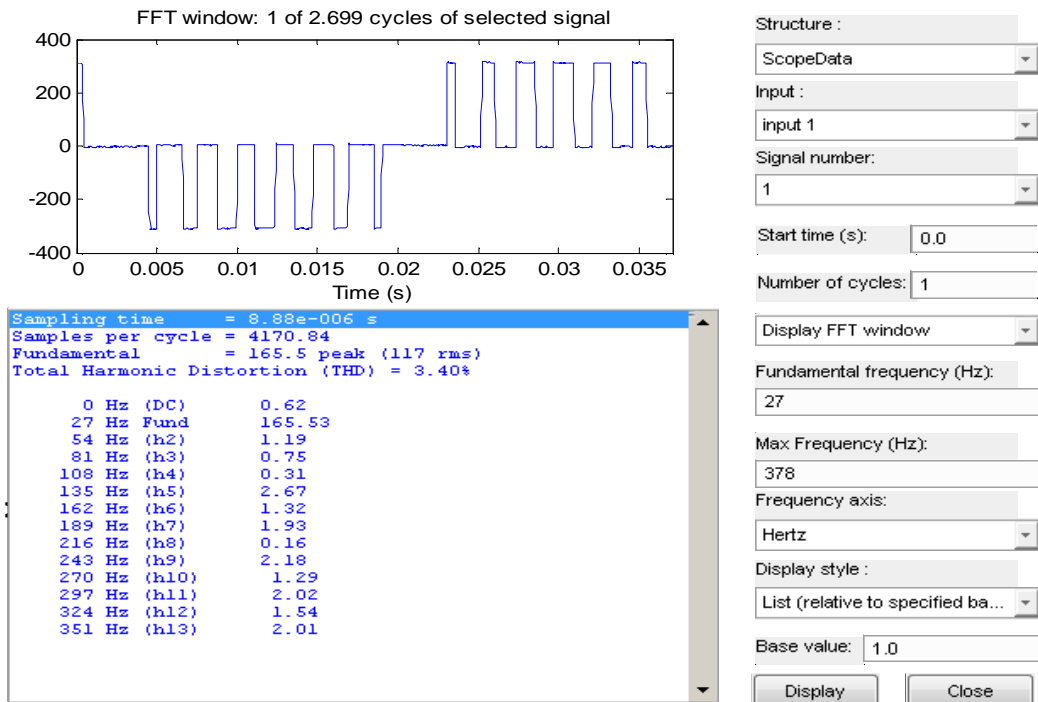
Şekil 5.30. 24 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



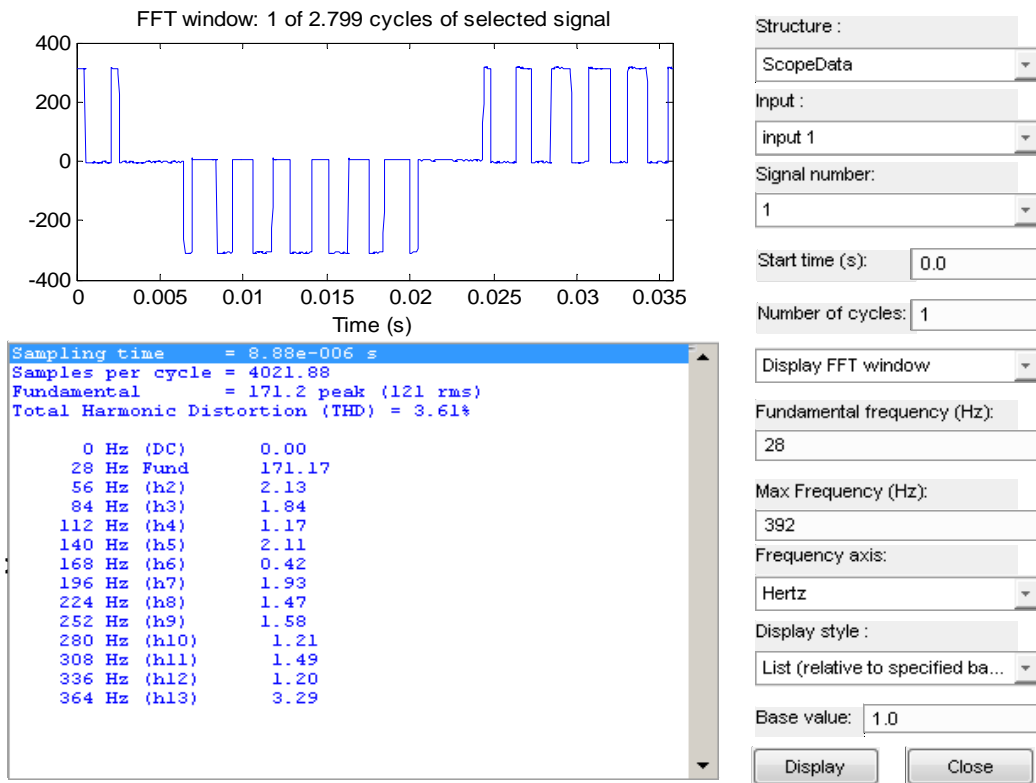
Şekil 5.31. 25 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



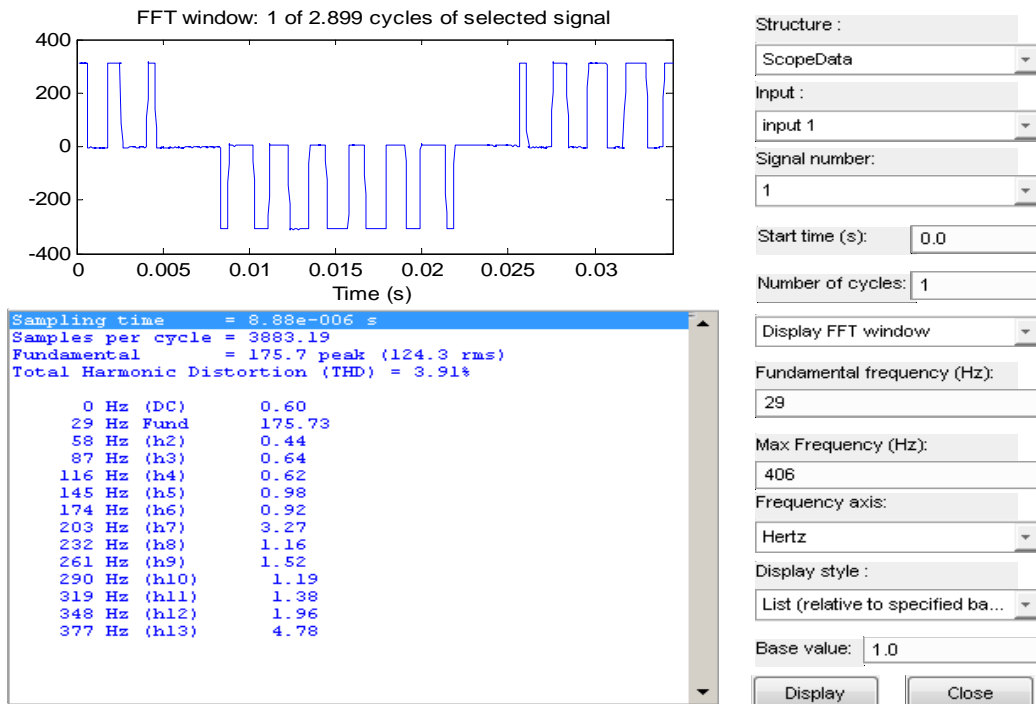
Şekil 5.32. 26 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



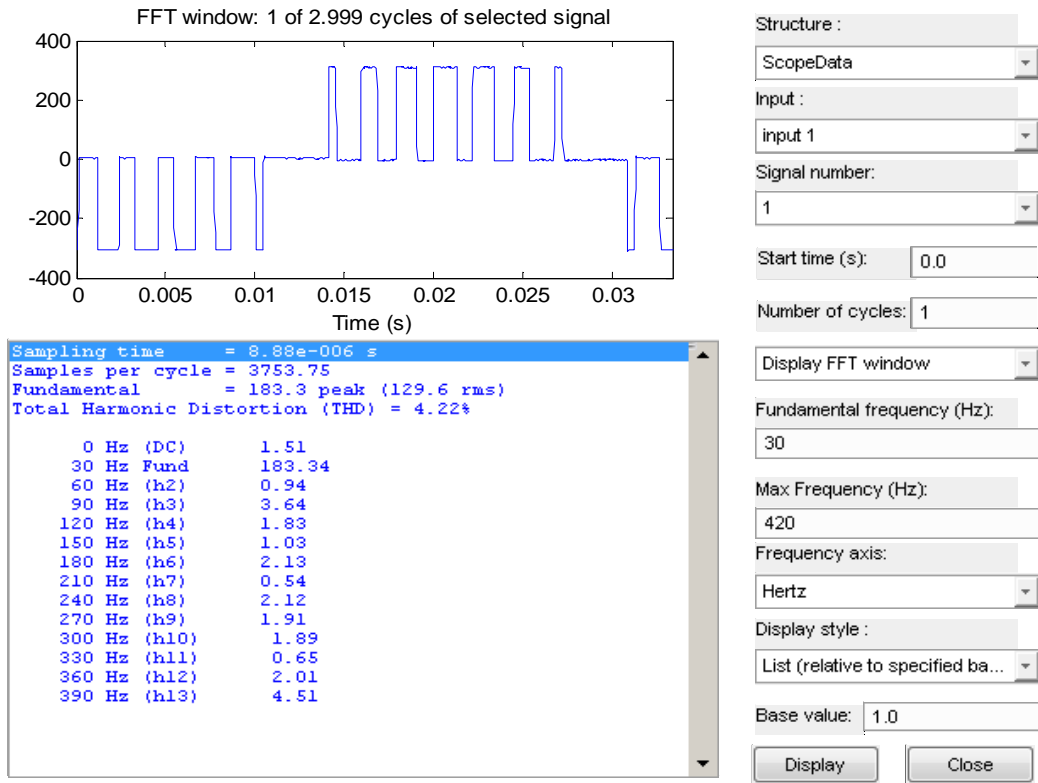
Şekil 5.33. 27 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



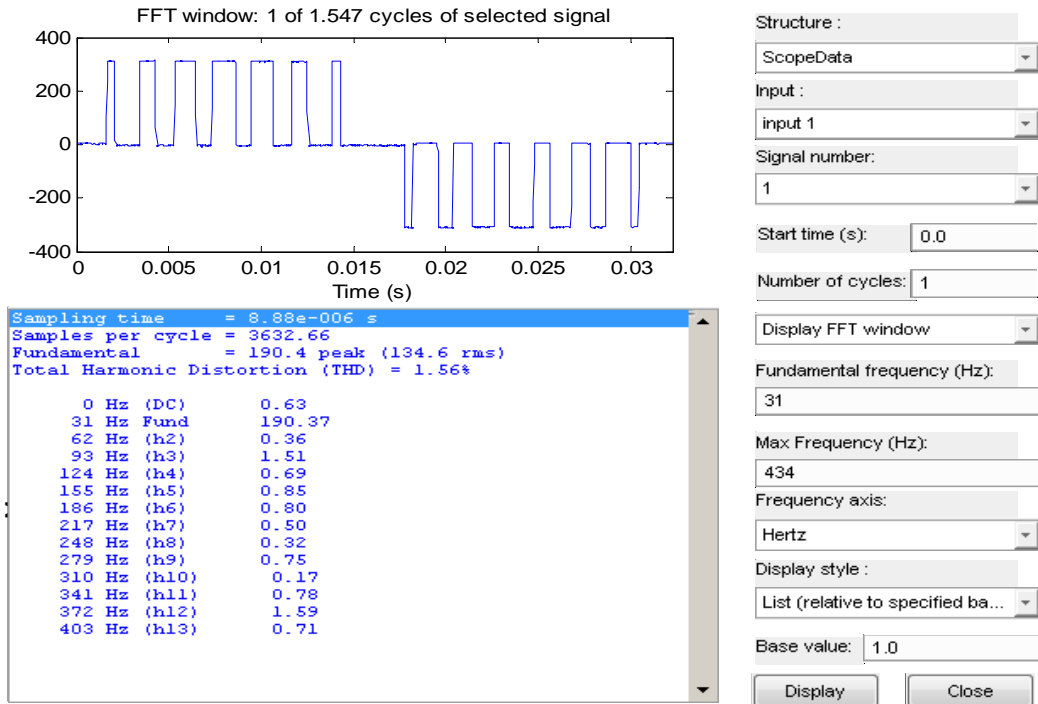
Şekil 5.34. 28 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



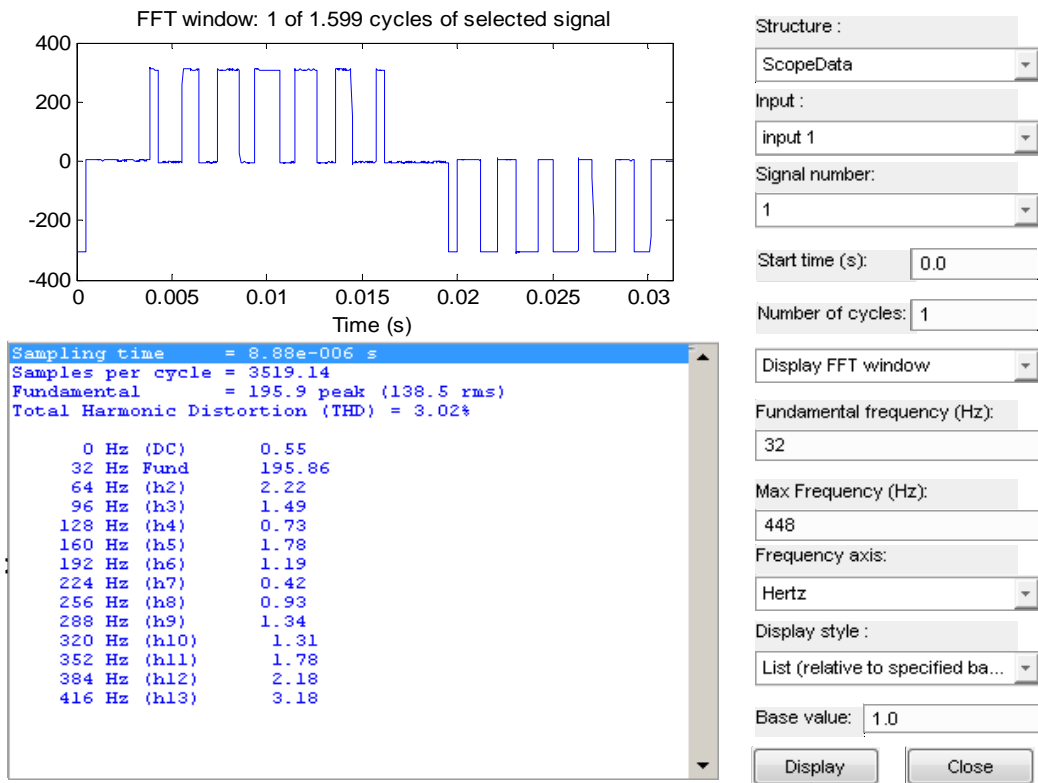
Şekil 5.35. 29 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



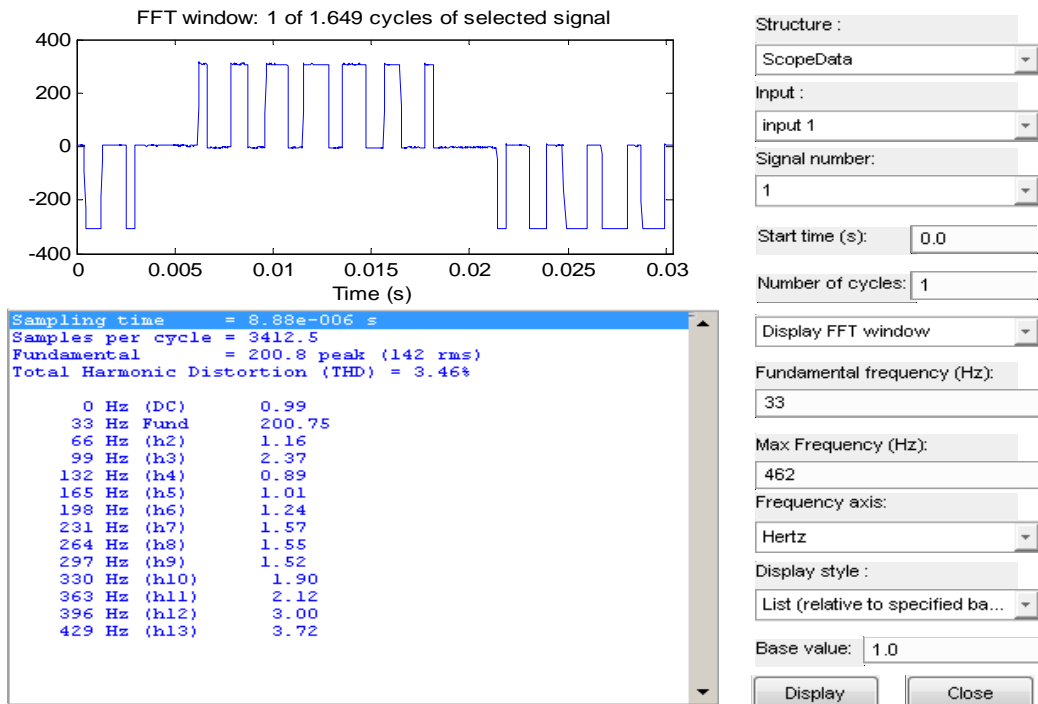
Şekil 5.36. 30 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



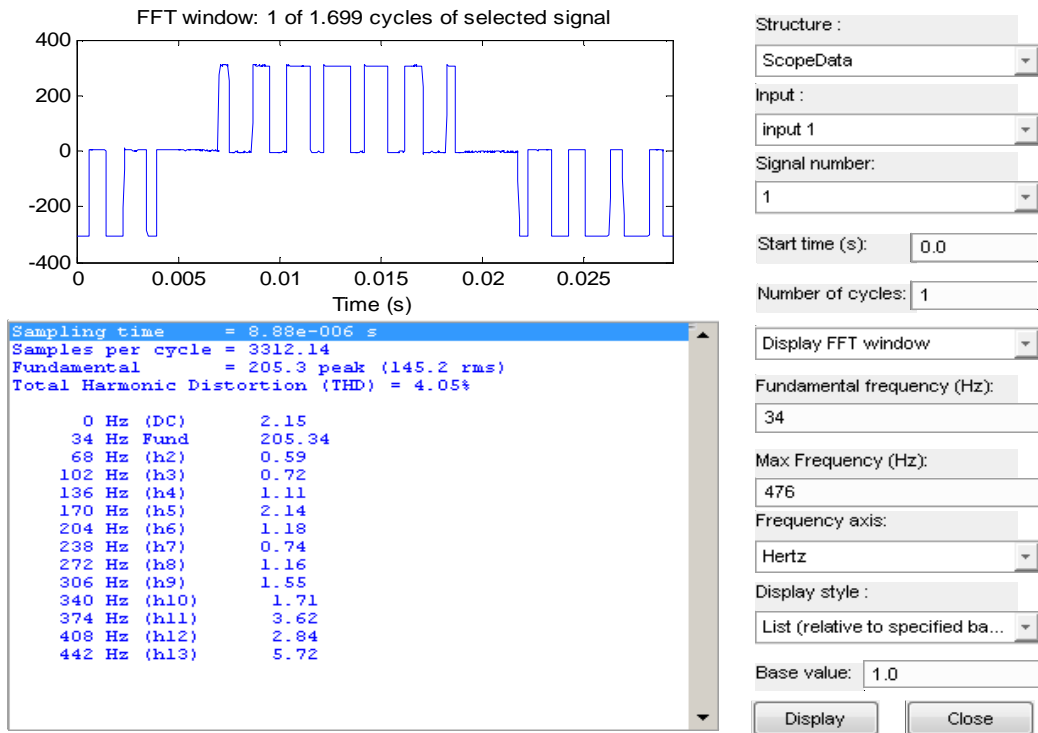
Şekil 5.37. 31 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



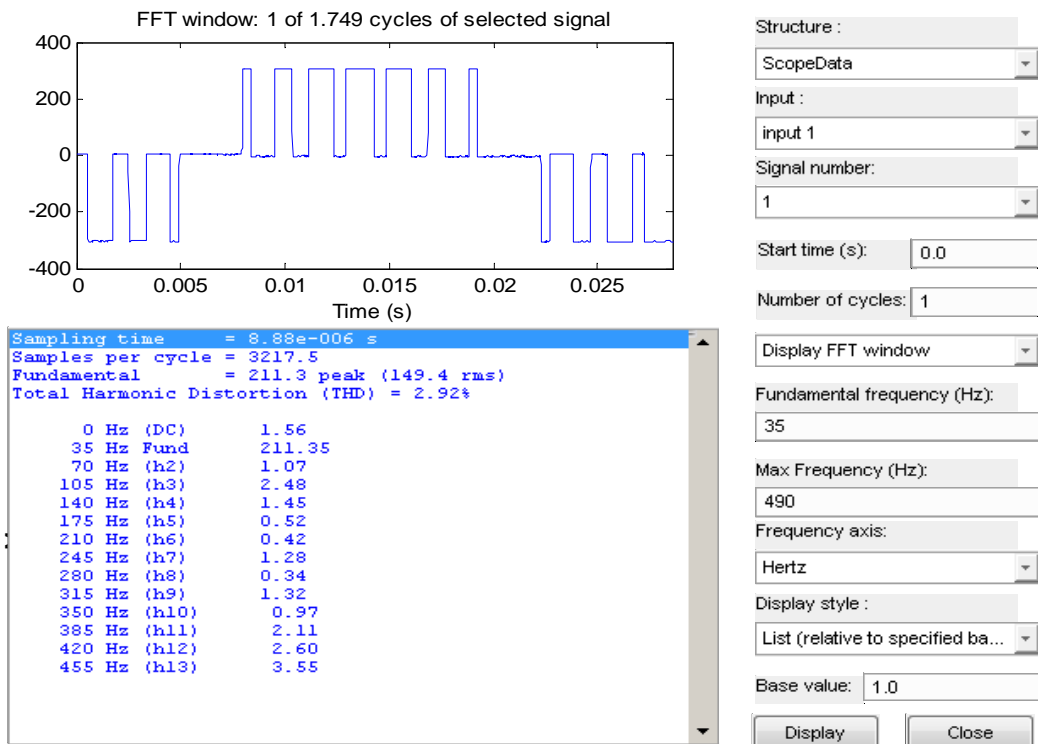
Şekil 5.38. 32 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



Şekil 5.39. 33 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

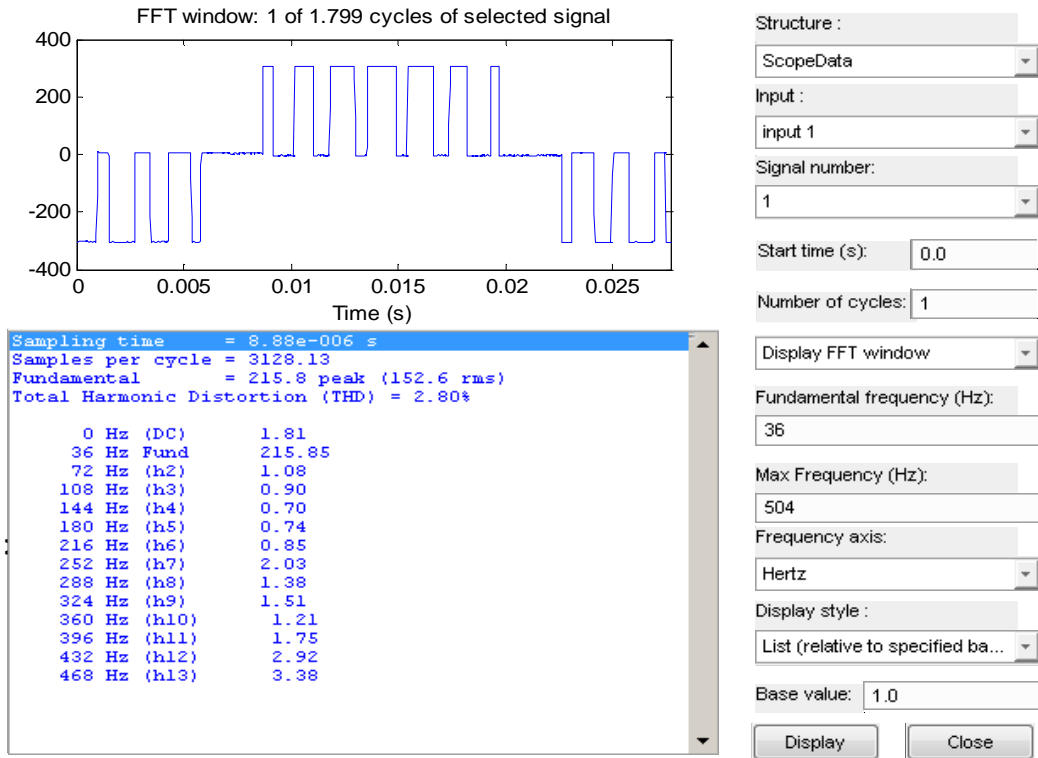


Şekil 5.40. 34 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

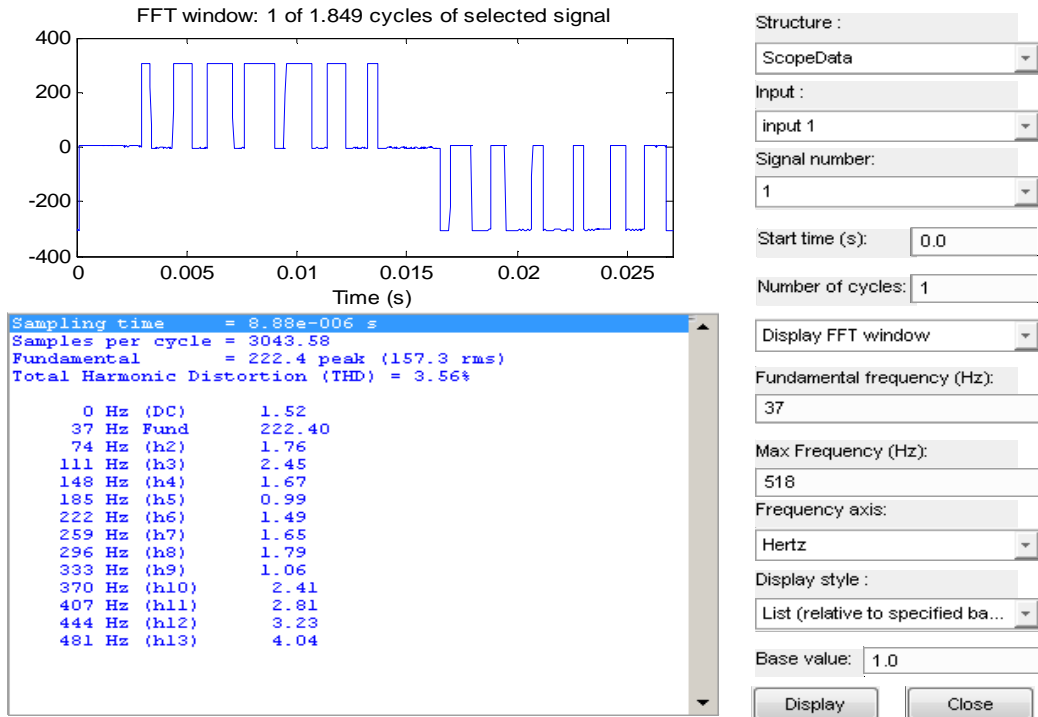


Şekil 5.41. 35 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

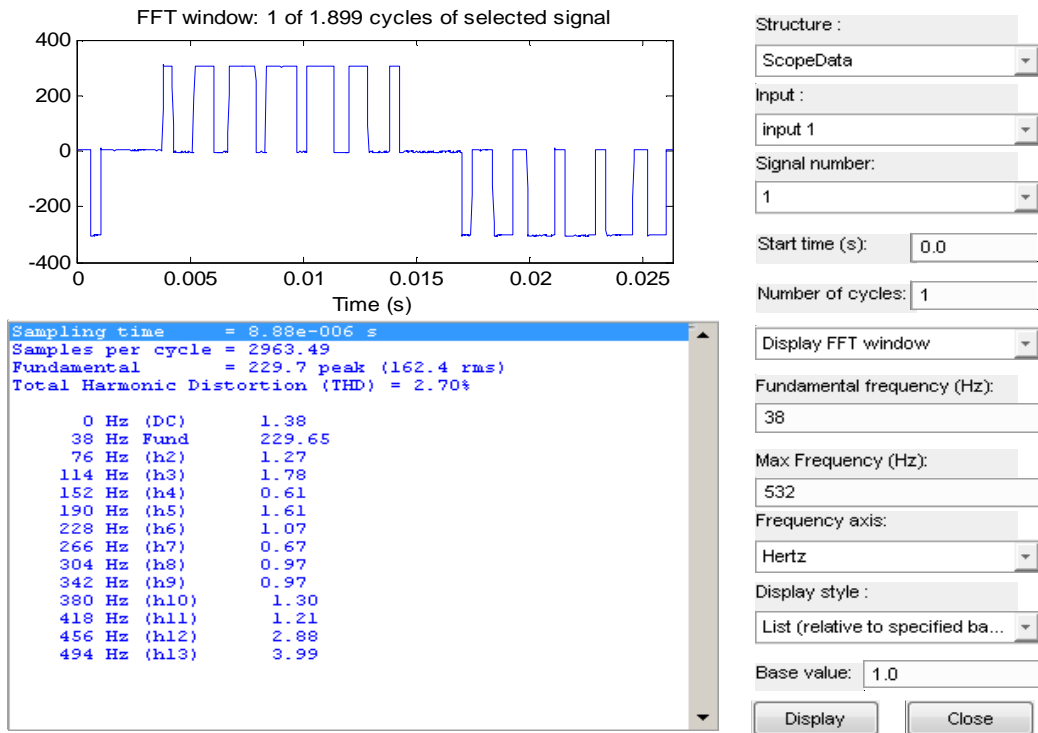




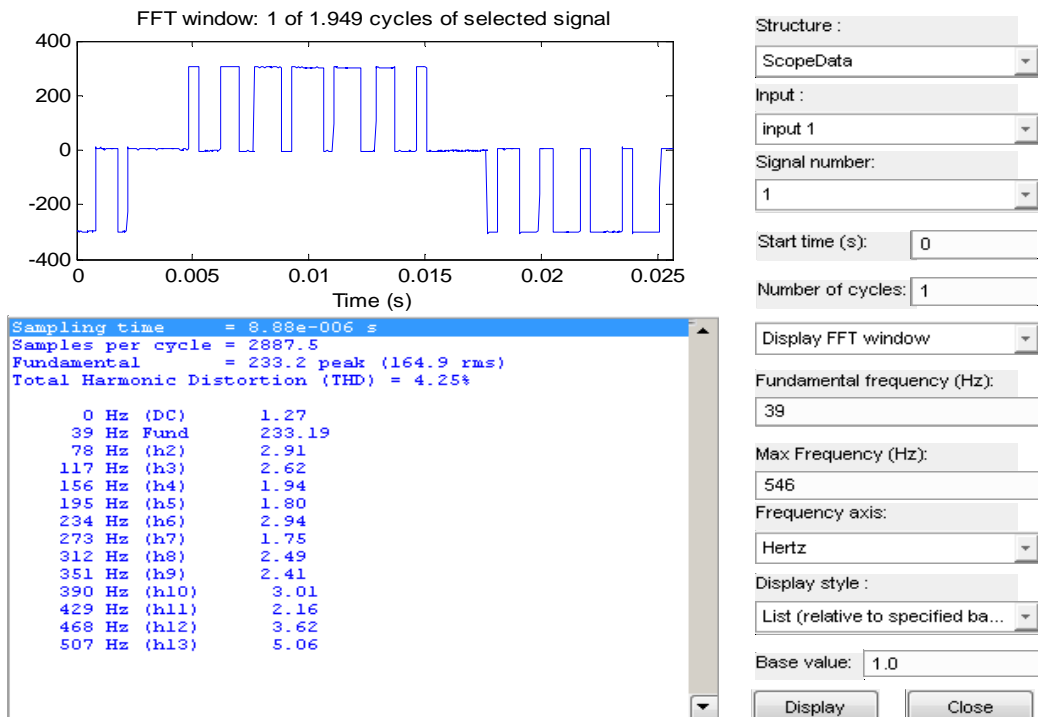
Şekil 5.42. 36 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



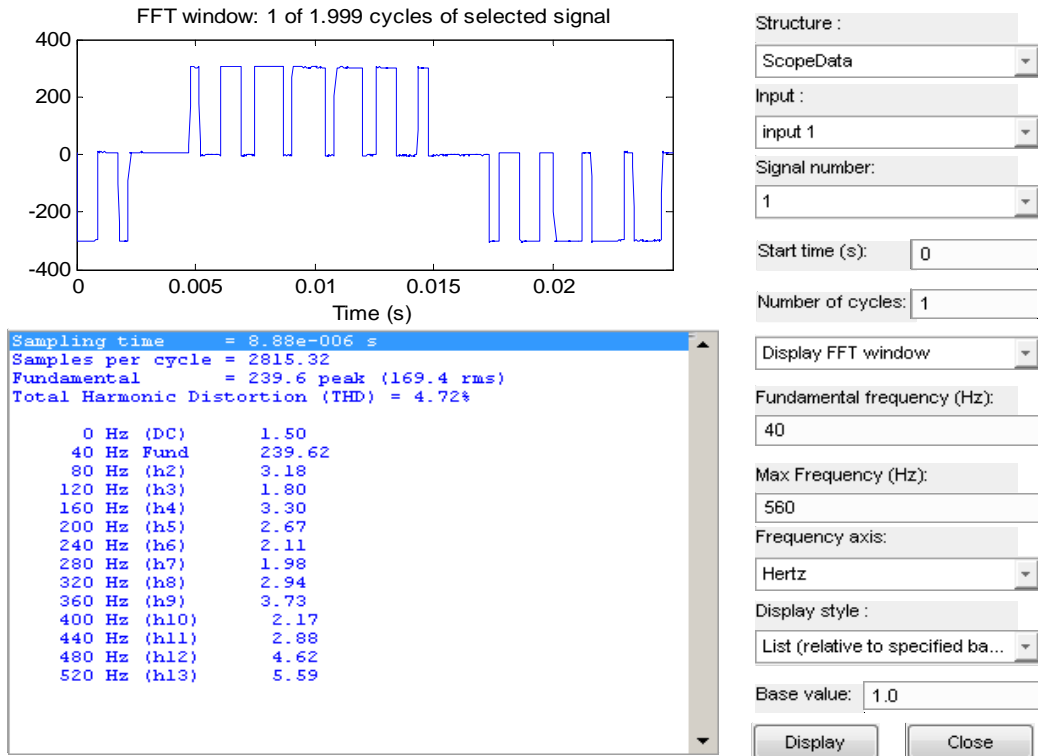
Şekil 5.43. 37 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



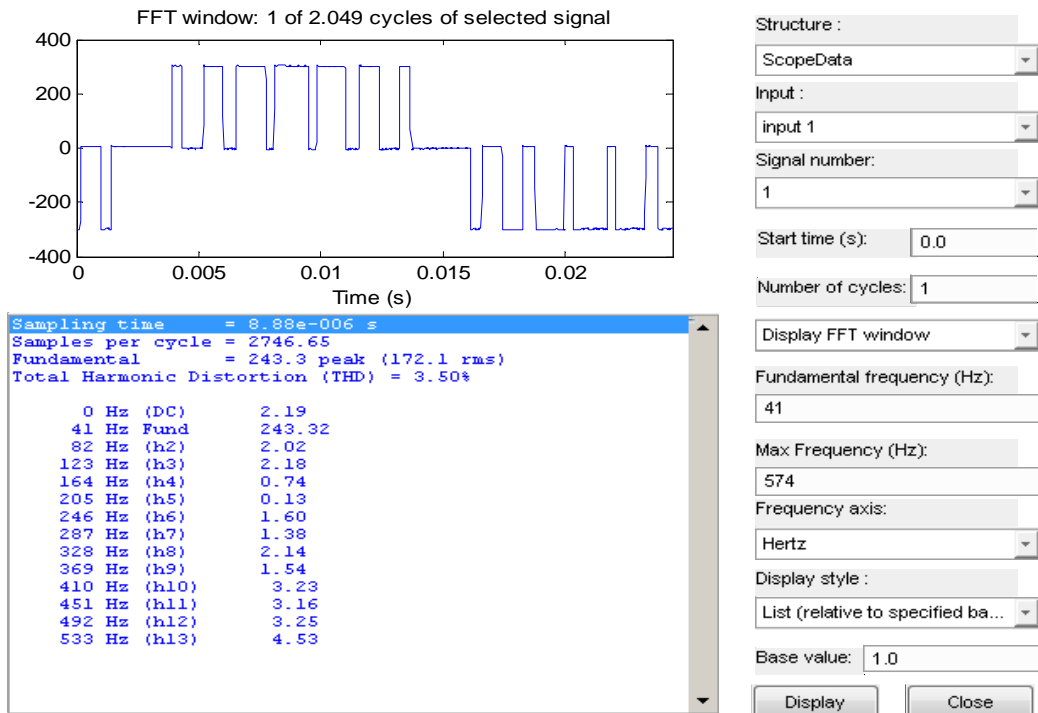
Şekil 5.44. 38 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



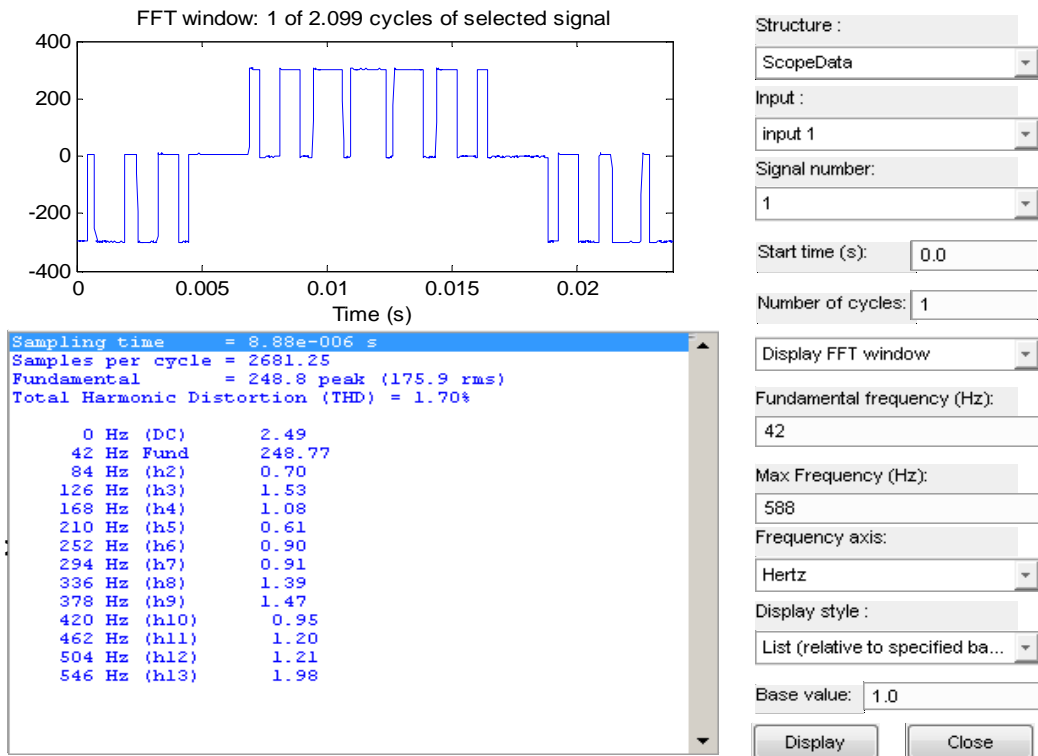
Şekil 5.45. 39 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



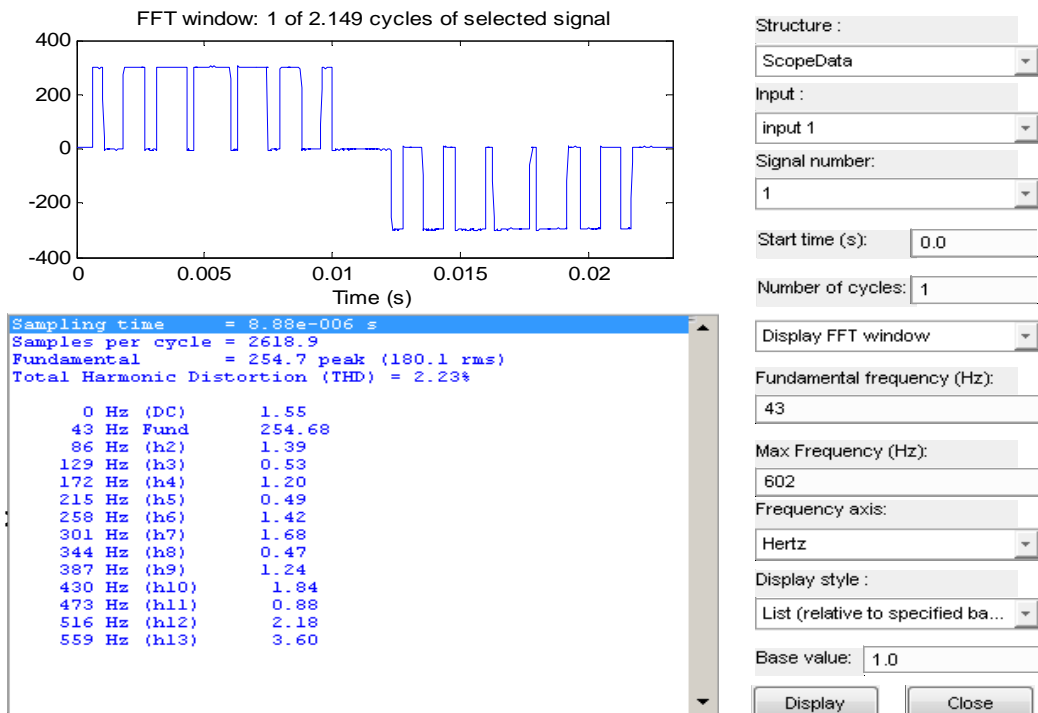
Şekil 5.46. 40 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



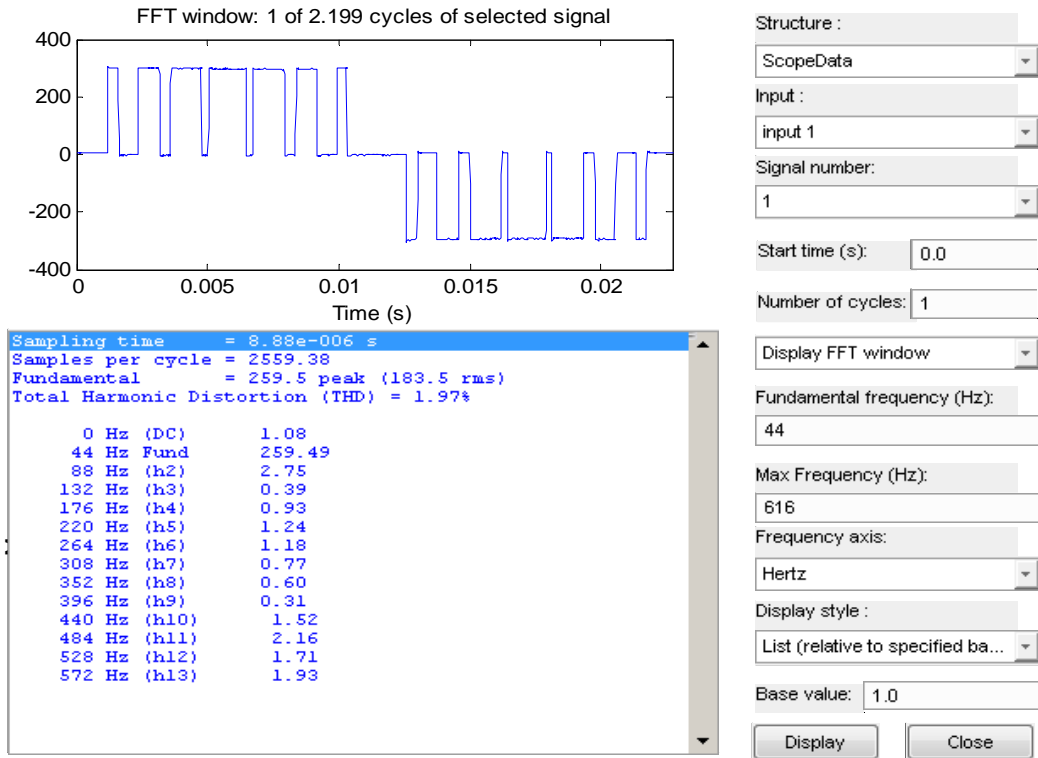
Şekil 5.47. 41 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



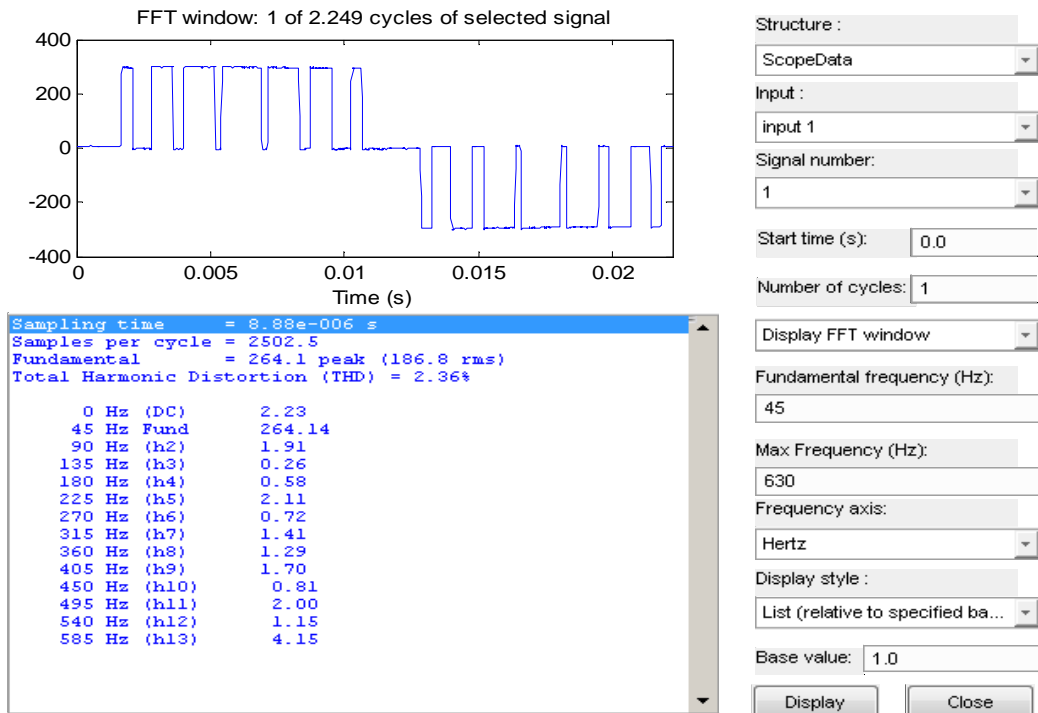
Şekil 5.48. 42 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



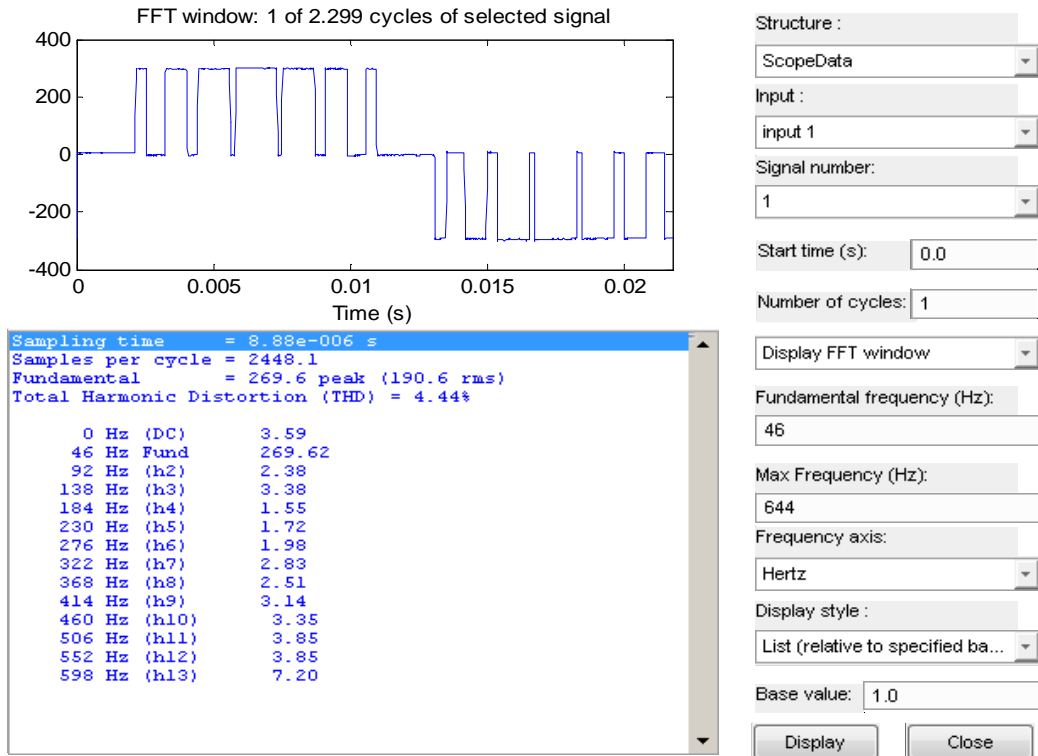
Şekil 5.49. 43 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



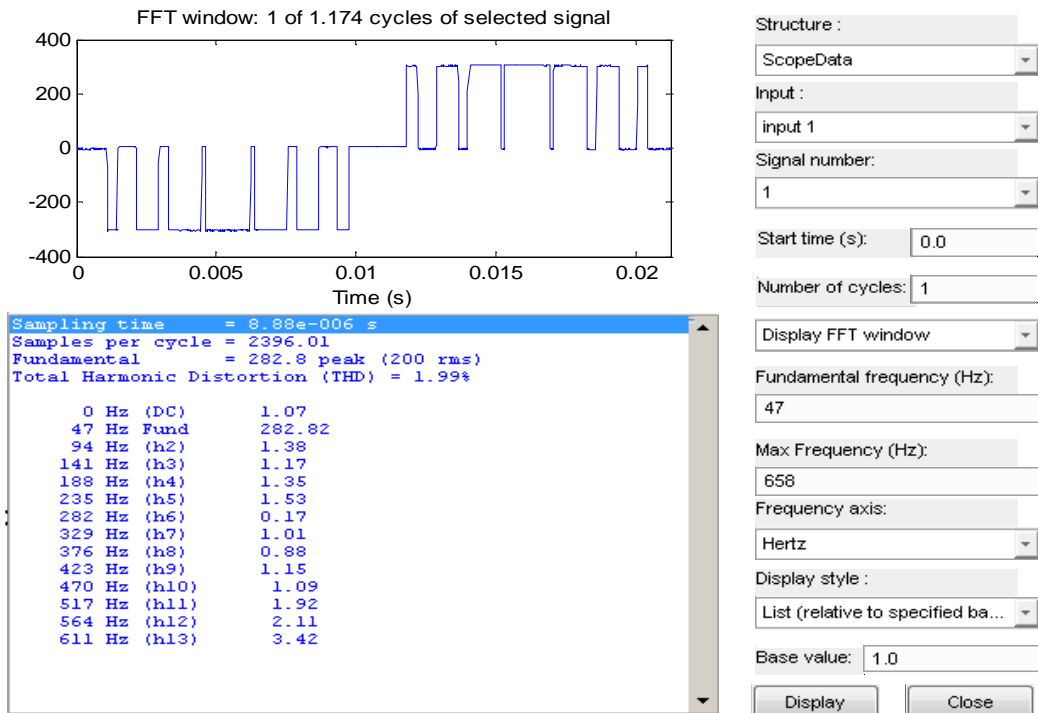
Şekil 5.50. 44 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



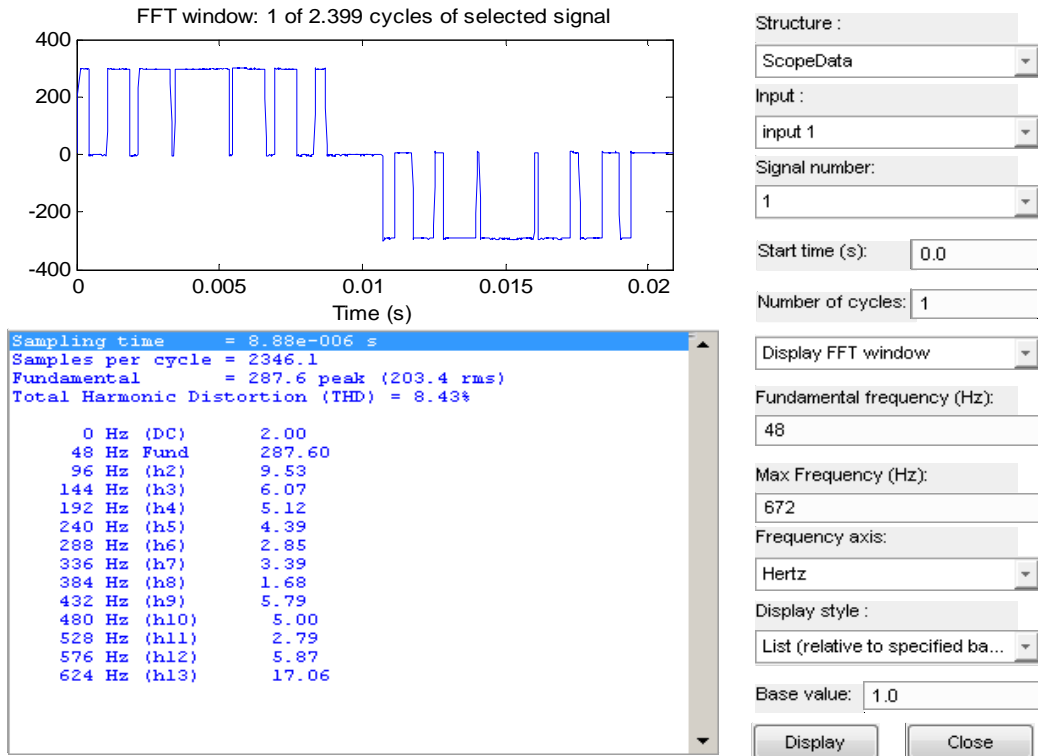
Şekil 5.51. 45 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



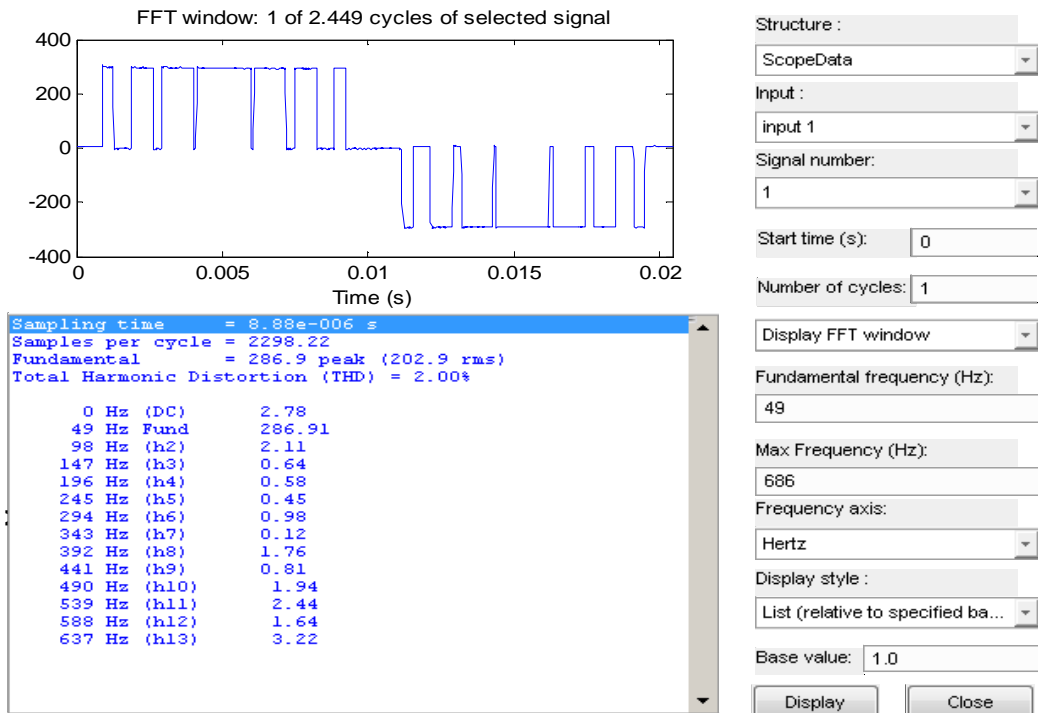
Şekil 5.52. 46 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



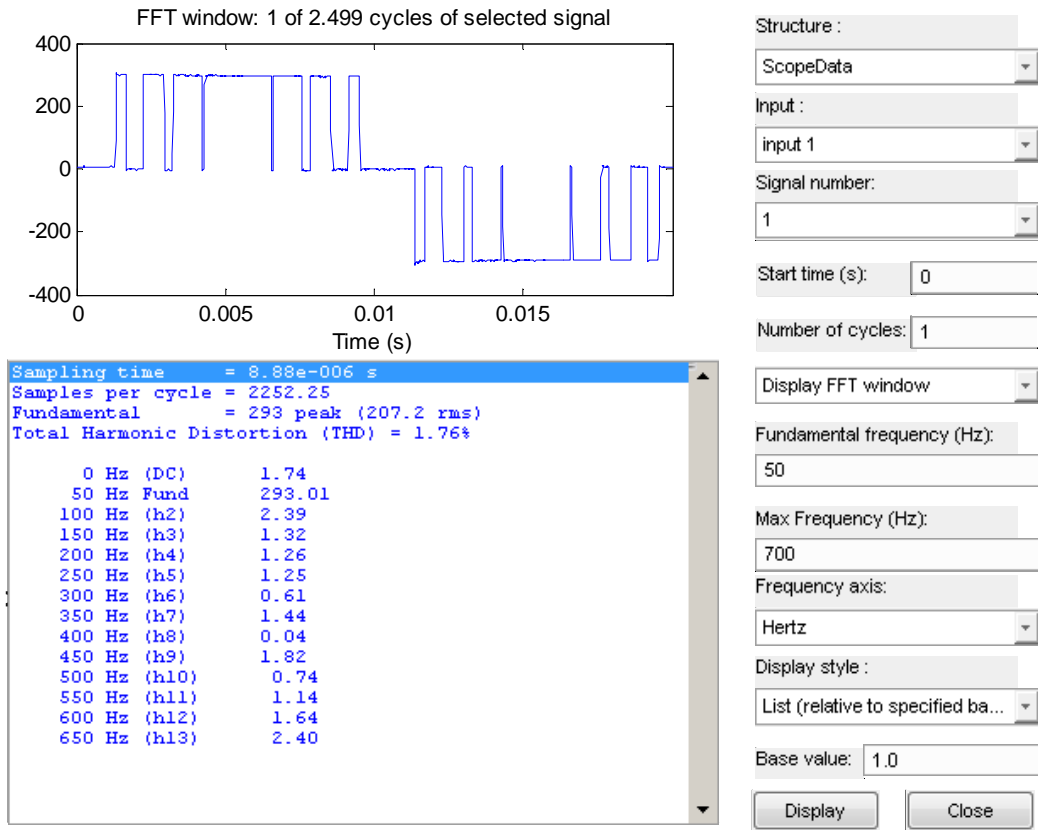
Şekil 5.53. 47 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



Şekil 5.54. 48 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



Şekil 5.55. 49 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri



Şekil 5.56. 50 Hz Çalışma Frekansı İçin Elde Edilen Harmonik Analizleri

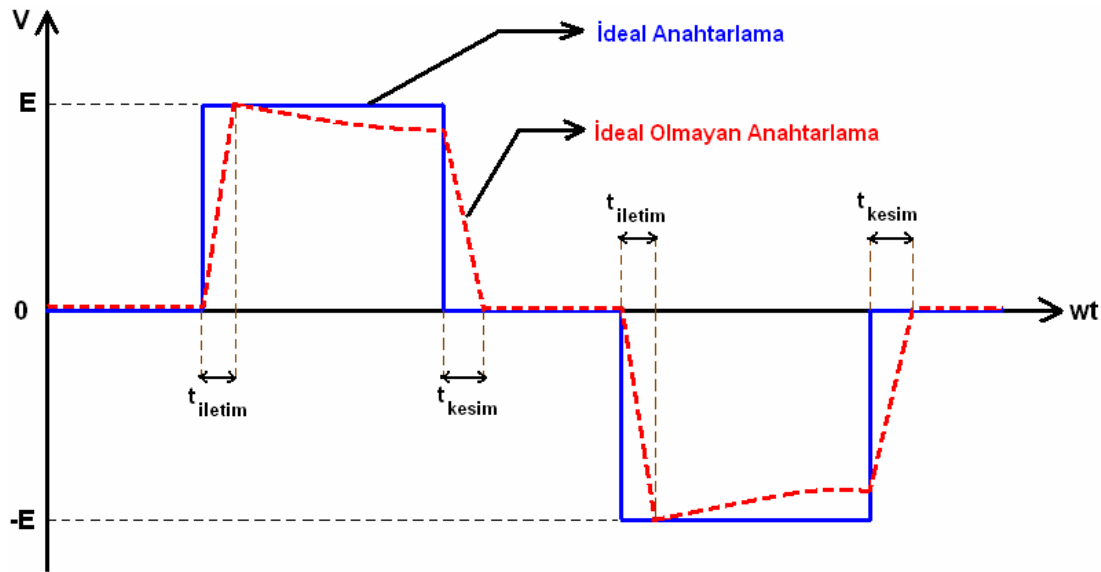
Şekil 5.11 – şekil 5.56 arasındaki harmonik analizleri incelendiğinde, Bölüm 4.1 ‘de belirtilen 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. harmoniklerin tam olarak sıfıra çekilemediği görülmektedir. Ayrıca tüm çalışma frekanslarında çift dereceden harmoniklerin ve dc bileşenin sıfır olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, gerçek zaman uygulamalarda ideal çalışma şartlarının elde edilememesidir.

Şekil 4.2 ‘de elde edilmek istenen gerilim dalga şekli, inverter girişi doğru geriliminin dalgasız olduğu ve anahtarlama elemanlarının ideal olduğu varsayımına göre belirlenmiştir ve tasarım amacına uygun tüm hesaplamalar ideal şartlara göre yapılmıştır. Halbuki gerçek zaman uygulama için oluşturulan deney düzeneğinde, inverter giriş doğru gerilimi sonlu değerdeki filtre kapasitesi üzerinden elde edilmiştir. Her ne kadar filtre kapasitesi değeri büyütülerek doğru gerilimdeki dalgalanmalar azaltılabilirse de sonlu değerdeki bir filtre kapasitesinde az da olsa gerilim dalgalanmaları olacaktır. Bölüm 4 ‘te elde edilen hesaplar, doğru gerilim



girişindeki filtre kapasitesinin sonsuz olduğu ve böylece tam düz bir doğru gerilimin elde edildiği varsayılarak yapılmıştır.

Tasarımda kullanılan yarı iletken elemanlar ideal anahtarlama yapamazlar. Tüm yarı iletken anahtarlama elemanlarının sıfırdan farklı iletme ve kesime geçme süreleri vardır. Bu sebeple Şekil 4.2 'deki ideal dalga şeklinde, tüm iletme-kesim darbelerinin  $90^\circ$ 'den küçük bir eğimi vardır. Bu da elde edilmek dalga şeklinden uzaklaşmaya neden olur. Ayrıca tüm yarı iletken elemanların iletme ve kesim süreleri birbirinden farklı olmakla beraber, genellikle kesim süreleri iletme sürelerinden uzundur. Bu durumda çıkış gerili dalga şeklinde asimetrinin oluşacağı aşikardır. Asimetrinin oluşması, çift dereceden harmonik bileşenlerin ve dc bileşenin oluşmasına yol açar. Şekil 5.57 'de ideal ve ideal olmayan anahtarlama durumunda inverter çıkışında oluşacak örnek bir gerilim dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 5.57. İdeal ve İdeal Olmayan Anahtarlama Durumunda İnverter Çıkış Gerilimi

IGBT sürme devresinde bulunan TLP250 opto-kuplörünün Şekil 4.11 'de gösterilen iç yapısına dikkat edilirse, ana yapı olarak npn ve pnp türü iki BJT'nin kombinasyonundan oluştuğu görülür. Bu BJT'ler de ideal anahtarlama yapamadıklarından, IGBT sürme devresinin, girişine gelen anahtarlama sinyallerine belli zaman gecikmeleri ile cevap verdiği ve IGBT'leri sürdüğü söylenebilir. Bu

durum, IGBT tetikleme devresinden gelen anahtarlama zamanlarında gecikmeler oluşmasını kaçınılmaz hale getirir. Böylece çıkış gerilim dalga şeklinde asimetri ve hesaplanan değerlerde anahtarlama yapamama durumu ortaya çıkar.

Yarı iletken elemanlarda anahtarlama yapılırken, anahtarlama esnasında çıkış geriliminde gürültüler oluşur. Bu ideal olmayan anahtarlarda kaçınılmaz bir durumdur.

İnverter giriş doğru geriliminin oluşturulduğu köprü doğrultucu girişi şebeke geriliminden beslenmektedir. Şebeke gerilimi müşteri yüklerinin talebine bağlı olarak sürekli değişir ve 220 V değeri sabit değildir. Tasarımın laboratuvar deneyleri sırasında şebeke geriliminin 210 V ile 220 V arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Şebeke geriliminin değişmesi , inverter doğru geriliminin değerini değiştirir.

Gerçek zaman uygulamalarda bahsedilen bu durumlar kaçınılmazdır ve hiçbir zaman teorik hesaplarda amaçlanan değerlere tam olarak ulaşamaz. Ancak bu pratik problemler ne kadar ideale yaklaştırılarak azaltılabilirse, amaçlanan değerlere o derece yaklaşılabilir.

Şelil 4.2’de amaçlanan çıkış gerilim dalga şekline mümkün olduğu kadar yaklaşmak için, tasarımda 1600  $\mu\text{F}$ ’lık büyük bir filtre kapasite grubu oluşturularak inverter girişinde az dalgalı bir doğru gerilim oluşturulmuştur. Ayrıca anahtarlama elemanı olarak hızlı iletme-kesime girebilen IXGH20N60AU1 serisi IGBT’ler kullanılmıştır.

Tasarımda, programlanmış harmonik eliminasyon yöntemi ile 13. harmoniğe kadar olan bileşenlerin yok edilmesi amaçlandığı için, harmonik analizleri 13. harmoniğe kadar yapılmıştır. Elbette ki tasarım yöntemi 13. harmonikle sınırlandırıldığı için 13. harmonikten sonraki bileşenler üzerinde bir kontrol yapılamayacaktır ve sıfırdan farklı değerleri bulunacaktır. Fakat fourier açılımından bilindiği üzere, harmonik dereceleri arttıkça harmonik bileşen değerlerinin genel olarak azalacağı söylenebilir.(Bkz. Ek. A) Şekil 5.11 – şekil 5.56 arasında gösterilen harmonik analizleri incelendiğinde, incelenen harmonik bileşenlerinin tam olarak elemine edilmediği ancak, ihmal edilebilir seviyelerde sıfır değerine çok yakın olduğu

görülmektedir. Analizlerde belirtilen Total Harmonic Distortion (THD) ile belirtilen birim, ana harmoniğe göre toplam harmonik bozunumunu ifade eder. Toplam harmonik bozunumu THD, (5.1) denklemi ile ifade edilir.

$$\% \text{ THD} = 10 \times \frac{(\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2)^{1/2}}{V_1} \quad (5.1)$$

Pratik uygulamalarda toplam harmonik bozunumun %5 ve altında olması istenir. Tasarlanan bir fazlı inverterde harmonik analizleri 13. bileşene kadar yapıldığı için, bulunan toplam harmonik bozunumları 13. harmonik bileşenine kadar olan harmonikler için elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, toplam harmonik bozunumların çoğu çalışma frekansı için %5'in altında olduğu, bazı çalışma frekansları için %5 veya biraz üzerinde olduğu görülmektedir.

Tasarımda, inverter çalışma frekansı ile birlikte ana harmonik genliğinin, bir fazlı asenkron motorda skaler kontrol yöntemiyle momenti sabit tutmak amacıyla değiştirilmek istendiği Bölüm 4 'te belirtilmişti. Baz olarak 50 Hz çalışma frekansında ana harmonik bileşen etkin değeri 220 V belirlenmişti ve diğer çalışma frekanslarındaki ana harmonik gerilim etkin değerleri  $u/f = 220 \text{ V} / 50 \text{ Hz} = 4,4 \text{ V/f}$  sabit değerine göre hesaplanmıştı. Şekil 5.56 'dan görüldüğü üzere, gerçek zaman uygulama sonucu 50 Hz çalışma frekansında ana harmonik bileşeni etkin değeri 207,2 V bulunmuştur. Bunun nedeni ölçüm esnasında, inverter giriş doğru geriliminin elde edildiği köprü doğrultucu girişindeki şebeke geriliminin o an için 220 V'un altında olmasıdır. Çünkü hesaplamalar şebeke geriliminin etkin değerinin 220 V olduğu, böylece doğrultulmuş ve filtre edilmiş gerilim değerinin  $220 \times \sqrt{2} = 311,12 \text{ V}$  olduğu varsayılarak yapılmıştır. Şebeke gerilimindeki düşüklüğün diğer çalışma frekansları için belirlenen ana harmonik bileşen değerlerinde de azalma meydana getirdiği görülmektedir. Daha önceden belirtilen gerçek zaman çalışmada oluşan durumlardan ötürü, tasarlanan gerilim dalga şeklindeki uzaklaşmaların da hesaplanan ana harmonik bileşen değerlerinin değişmesine neden olacağı aşıkardır. Tablo 5.1 'de farklı çalışma frekansları için ölçülen ana harmonik bileşen etkin değerleri ve u/f sabitleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı Çalışma Frekansları İçin Ölçülen Ana Harmonik Bileşen Etkin Değerleri ve u/f sabitleri

Çalışma Frekansı – f ( Hz )	Ana Harmonik Bileşeni Etkin Değeri – u ( V )	u/f sabiti ( V/Hz)
50	207,2	4,1440
49	202,9	4,1408
48	203,4	4,2375
47	200	4,2553
46	190,6	4,1434
45	186,8	4,1511
44	183,5	4,1704
43	180,1	4,1883
42	175,9	4,1880
41	172,1	4,1975
40	169,4	4,2350
39	164,9	4,2282
38	162,4	4,2736
37	157,3	4,2513
36	152,6	4,2388
35	149,4	4,2685
34	145,2	4,2705
33	142	4,3030
32	138,5	4,3281
31	134,6	4,3419
30	129,6	4,3200
29	124,3	4,2862
28	121	4,3214
27	117	4,3333
26	113,7	4,3730
25	108,6	4,3440
24	104	4,3333
23	100,2	4,3565
22	95,15	4,3250
21	91,59	4,3614
20	86,2	4,3100
19	83,65	4,4026
18	76,92	4,2733
17	73,11	4,3005
16	69,82	4,3637
15	64,59	4,3060
14	60,91	4,3507
13	57,43	4,4176
12	52,58	4,3816
11	48	4,3636
10	43,15	4,3150
9	38,94	4,3266

Tablo 5.1. Farklı Çalışma Frekansları İçin Ölçülen Ana Harmonik Bileşen Etkin Değerleri ve u/f sabitleri ( Devam )

8	34,28	4,2850
7	30,08	4,2971
6	25,93	4,2716
5	22,18	4,4360

Tablo 5.1 incelendiğinde, farklı çalışma frekansları için u/f oranının tam olarak sabit tutulmadığı, ancak yinede birbirine çok yakın değerde olduğu görülmektedir. Böylece tüm çalışma frekanslarında, yük olarak bağlanan bir fazlı asenkron motorda momentin yaklaşık olarak sabit tutulduğu söylenebilir. Çalışma frekansının değiştirilmesiyle asenkron motorun hızının ana harmonik frekansına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

## 5.2 Öneriler

İnverter tasarımında, girişe sabit ve dalgalanmaların olmadığı doğru bir gerilimin uygulanması çok önemlidir. Tasarım hesapları her zaman inverter girişine zamanla değişmeyen bir doğru gerilimin uygulandığı varsayılarak yapılır. Uygulama esnasında, doğru gerilimdeki değişimler, çıkış gerilim dalga şeklinde hesaplanan değerlerin ötesinde harmonikler oluşturur. Şebekeden beslenen köprü doğrultucu gibi çeviricinin çıkışına bağlanacak yüksek değerli bir filtre kapasitesi dalgalanmaları söndürebilir. Filtre kapasitesinin değerinin artırılarak dalgalanmalar minimuma indirilebilir. Dalgalanmaların düzeyi, inverter çıkışına bağlanacak yüke, dolayısıyla çekeceği akıma bağlıdır. Pratik açıdan sonsuz değerde bir kapasite bulunamayacağından, tasarımcı, tasarladığı inverter için kullanacağı filtre kapasitesinin sonlu değerini inverter çıkışında çekilmesini öngördüğü maksimum akım düzeyine göre belirlemelidir. Diğer taraftan, bu çalışmadaki gibi doğru gerilimin kontrolsüz köprü doğrultucu ile şebeke geriliminden elde edilmesi, şebeke gerilimindeki genlik değişimine bağlı olarak elde edilecek doğru gerilimin değerinin değişmesine engel olamaz. Bu durumu engellemek için, kontrolsüz doğrultucu ile inverter girişi arasına kontrollü alçaltıcı bir dc-dc çevirici konulmalıdır. Kontrollü dc-dc çevirici, çıkışındaki gerilimi sürekli kontrol ederek istenen gerilim seviyesinde sabit tutar.

İnvertere doğru gerilimin uygulandığı dc barada bulunan kaçak endüktanstan ötürü, anahtarlama esnasında oluşacak güvenli çalışma geriliminin üzerindeki gerilim endüklenmelerini söndürmek için, inverter katına paralel bir snubber kapasitesi bağlanmalıdır. Daha etkin bir sonuç alabilmek için, snubber kapasitesinin inverter katına mümkün olduğu kadar yakın olması oldukça önemlidir. Her ne kadar snubber kapasitesi bu gerilim endüklenmelerini güvenli çalışma bölgesine çekecek etki gösterse de, yüksek dc bara hat akımının aktığı çalışma durumlarında yeterli söndürmeyi yapamayabilir. Bu sebeple, dc bara kaçak endüktansının uygun devre dizaynı ile minimize edilmesi gerekir. Dc bara hattının inverter katına mümkün olduğu kadar düz ve paralel götürülmesi ve kısa tutulması, hat üzerinde oluşacak kaçak endüktans değerini çok küçük değerlere çeker. Böylelikle anahtarlama esnasında oluşacak gerilim endüklenmeleri azalacak ve snubber kapasitesinin işlevi kolaylaşacaktır.

Tasarımda kullanılacak yarı iletken anahtarlama elemanları için uygun sürme devreleri dizayn etmek düzgün bir çalışma için gereklidir. Çalışma esnasında oluşması mümkün gürültülerden ve kapı devresine kadar giden hat üzerinde oluşacak kaçak endüktansın yaratacağı olumsuz çalışma şartlarından kaçınmak için, sürme devreleri mümkün olduğunca yarı iletken anahtarlama elemanı kapı girişine yakın dizayn edilmelidir.

İnverter çalışmasını kontrol eden mikrodenetleyici ya da mikroişemcinin, trafoların ya da yüksek gerilim ve akımın bulunduğu devre hatlarından uzak tutularak bu bölgede oluşacak elektromanyetik alanlardan kaçınılmalıdır. Yüksek elektromanyetik alanlar denetleyici ya da işlemciyi kilitleyerek, inverterin hiç çalışmamasına ya da yanlış anahtarlama sinyalleri göndererek zarar görmesine neden olabilir. Denetleyici ya da işlemcinin ürettiği anahtarlama sinyalleri, inverter çalışma gerilimi altında bulunan sürme devrelerine gönderilir. İnverter çalışma gerilimi düzeyi, denetleyici ya da işlemcinin çalışma gerilimi düzeyine göre oldukça büyüktür ve sürme devresinde oluşabilecek bir problemten ötürü inverter çalışma geriliminin denetleyici ya da işlemciye ulaşması, denetleyici ya da işlemcinin zarar görmesine neden olur. Bu sebeple sürme devresi ile denetleyici ya da işlemci arasında elektriksel etkileşimi kaldıracak bir opto-kuplör kullanılması güvenli çalışma için iyi bir uygulamadır.

Tasarımda kullanılacak yarı iletken anahtarlanma elemanları tasarlanan devre çalışma sınırlarına göre büyük seçilmelidir. Köprü inverter katında kısa devre kollarında bulunan elemanların anahtarlama geçişleri arasında muhakkak ölü zaman bırakılmalıdır ve bu ölü zaman, anahtarlama elemanları için katalog değerlerinde verilen en yüksek kesime gitme süresinden daha fazla olacak şekilde belirlenmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] ARİFOĞLU, U., Güç elektroniği ders notları, Sakarya Üniversitesi, sf. 3, Sakarya, 2005
- [2] AHMED, A., Power electronics for technology, Prentice-Hall Inc., 1<sup>st</sup> ed., pp. 100-200, WA, USA, 1998
- [3] GÜLGÜN, R., Güç elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Evi, 2. baskı, sf. 272, İstanbul, 1999
- [4] GÜLGÜN, R., Güç elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Evi, 2. baskı, sf. 334, İstanbul, 1999
- [5] AHMED, A., Power electronics for technology, Prentice-Hall Inc., 1<sup>st</sup> ed., pp. 305, WA, USA, 1998
- [6] ARİFOĞLU, U., Güç elektroniği ders notları, Sakarya Üniversitesi, sf. 78, Sakarya, 2005
- [7] ARİFOĞLU, U., Güç elektroniği ders notları, Sakarya Üniversitesi, sf. 84, Sakarya, 2005
- [8] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., Güç elektroniği, Literatür Yayıncılık., 2. basımdan çeviri, sf. 227, İstanbul, 2007
- [9] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., Güç elektroniği, Literatür Yayıncılık., 2. basımdan çeviri, sf. 231, İstanbul, 2007
- [10] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., Güç elektroniği, Literatür Yayıncılık., 2. basımdan çeviri, sf. 258, İstanbul, 2007
- [11] ARİFOĞLU, U., Güç elektroniği ders notları, Sakarya Üniversitesi, sf. 86, Sakarya, 2005
- [12] ARİFOĞLU, U., Güç elektroniği endüstriyel uygulamaları ders notları (Güç elektroniği devreleri II), Sakarya Üniversitesi, sf. 68-69, Sakarya, 2005
- [13] [http://www.journal.au.edu/au techno/2005/apr05/vol8no4\\_abstract05.pdf](http://www.journal.au.edu/au techno/2005/apr05/vol8no4_abstract05.pdf), Mart 2009



- [14] [http://www.semikron.com/internet/webcms/objects/pdf/AN-7006\\_IGBT\\_PeakVoltage\\_Snubber.pdf](http://www.semikron.com/internet/webcms/objects/pdf/AN-7006_IGBT_PeakVoltage_Snubber.pdf), Aralık 2008
- [15] <http://www.ozdisan.com/datasheets/3001.pdf>, Nisan 2009
- [16] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/toshiba/2109.pdf> , Nisan 2009
- [17] <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9016.pdf>, Şubat 2009

## EKLER

### Ek. A. (3.1) Denklemine Çıkarılışı

Fourier göstermiştir ki periyodik bir dalga şekli, kendi frekansına ve katlarına sahip sinüzoidal ve kosinüzoidal işaretlerin ve sabit bir işaretin toplamından oluşur.  $V(\omega t)$  şeklindeki bir dalga şeklinin fourier açılımı (Ek A.1) denklemdeki gibi gösterilebilir.

$$V(\omega t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \Phi_2) + V_3 \sin(3\omega t + \Phi_3) + \\ + V_4 \sin(4\omega t + \Phi_4) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (\text{Ek A.1})$$

(Ek A.1) denklemde bulunan  $V_0$  dc bileşeni,  $V_1$  ana harmonik genliğini ve  $\Phi_1$   $V_1 \sin(\omega t + \Phi_1)$  işaretinin  $V(\omega t)$  sinyaline göre faz farkını göstermektedir. Aynı şekilde  $V_2$  ikinci ana harmonik genliğini ve  $\Phi_2$  ikinci harmonik sinüzoidal işaretin  $V(\omega t)$  işaretine göre faz farkını ve böylelikle,  $V_n$  n. harmonik genliğini ve  $\Phi_n$  n. harmonik sinüzoidal işaretin  $V(\omega t)$  işaretine göre faz farkını göstermektedir.

$V(\omega t)$  işaretinin farklı faz farklarına sahip sinüs fonksiyonlarından oluşan (Ek A.1) denklemi,  $V(\omega t)$  işareti ile aynı faz açısına sahip sinüs ve kosinüs fonksiyonlarından oluşan (Ek A.2) denklemi ile de gösterilebilir.

$$V(\omega t) = V_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + \dots + a_n \sin n\omega t + \\ + b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2\omega t + \dots + b_n \cos n\omega t \quad (\text{Ek A.2})$$

(Ek A.2) denklemde;

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) d\omega t \quad (\text{Ek A.3})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) \sin n\omega t d\omega t \quad (\text{Ek A.4})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) \cos n\omega t d\omega t \quad (\text{Ek A.5})$$

olarak ifade edilir. (Ek A.1) ve (Ek A.2) denklemi arasında;

$$a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t = V_n \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (\text{Ek A.6})$$

ilişkisi vardır. Şekil 3.5 ‘teki dalga şekli için, (Ek A.2), (Ek A.3), (Ek A.4) ve (Ek A.5) denklemleri ile  $a_n$ ,  $b_n$  ve  $V_0$  katsayıları aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_1} E \sin n\omega t d\omega t + \int_{\pi+\alpha_1}^{2\pi-\alpha_1} -E \sin \omega t d\omega t \right] \quad (\text{Ek A.7})$$

$$a_n = \frac{E}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_1} \sin n\omega t d\omega t - \int_{\pi+\alpha_1}^{2\pi-\alpha_1} \sin n\omega t d\omega t \right] \quad (\text{Ek A.8})$$

$$a_n = \frac{E}{\pi} \left[ \frac{-\cos n(\pi - \alpha_1)}{n} - \frac{-\cos n\alpha_1}{n} - \left( \frac{-\cos n(2\pi - \alpha_1)}{n} - \frac{-\cos n(\pi + \alpha_1)}{n} \right) \right] \quad (\text{Ek A.9})$$

$$a_n = \frac{E}{n\pi} [\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_1] \quad (\text{Ek A.10})$$

$$a_n = \frac{4E}{n\pi} (\cos n\alpha_1) \quad (\text{Ek A.11})$$

olarak bulunur.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_1} E \cos nwt dw + \int_{\pi+\alpha_1}^{2\pi-\alpha_1} -E \cos wtdwt \right] \quad (\text{Ek A.12})$$

$$b_n = \frac{E}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_1} \cos nwt dw - \int_{\pi+\alpha_1}^{2\pi-\alpha_1} \cos nwt dw \right] \quad (\text{Ek A.13})$$

$$b_n = \frac{E}{\pi} \left[ \frac{\sin n(\pi - \alpha_1)}{n} - \frac{\sin n\alpha_1}{n} - \left( \frac{\sin n(2\pi - \alpha_1)}{n} - \frac{\sin n(\pi + \alpha_1)}{n} \right) \right] \quad (\text{Ek A.14})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} [-\sin n\alpha_1 - \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_1] \quad (\text{Ek A.15})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} (0) = 0 \quad (\text{Ek A.16})$$

olarak bulunur.

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_1} Edwt + \int_{\pi+\alpha_1}^{2\pi-\alpha_1} -Edwt \right] \quad (\text{Ek A.17})$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} [(\pi - \alpha_1) - \alpha_1 - (2\pi - \alpha_1) + (\pi + \alpha_1)] \quad (\text{Ek A.18})$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} (\pi - \alpha_1 - \alpha_1 - 2\pi + \alpha_1 + \pi + \alpha_1) = 0 \quad (\text{Ek A.19})$$

### Ek. B. (3.3) Denkleminin Çıkarılışı

Şekil 3.5 ‘teki dalga şekli için, (Ek A.2), (Ek A.3), (Ek A.4) ve (Ek A.5) denklemleri ile  $a_n$ ,  $b_n$  ve  $V_0$  katsayıları aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E \sin nwt dw + \int_{\alpha_3}^{\pi-\alpha_3} E \sin wtdwt + \int_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} E \sin nwt dw + \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} -E \sin nwt dw + \int_{\pi+\pi_3}^{2\pi-\alpha_3} -E \sin nwt dw + \int_{2\pi-\alpha_2}^{2\pi-\alpha_1} -E \sin nwt dw \right] \quad (\text{Ek B.1})$$

$$a_n = \frac{E}{n\pi} \left[ -\cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 - \cos n(\pi-\alpha_3) + \cos n\alpha_3 - \cos n(\pi-\alpha_1) + \cos n(\pi-\alpha_2) - \cos n(\pi+\alpha_2) + \cos n(\pi+\alpha_1) - \cos n(2\pi-\alpha_3) + \cos n(\pi+\alpha_3) - \cos n(2\pi-\alpha_1) + \cos n(2\pi-\alpha_2) \right] \quad (\text{Ek B.2})$$

$$a_n = \frac{E}{n\pi} \left[ -\cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_3 + \cos n\alpha_3 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 - \cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_3 + \cos n\alpha_3 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 \right] \quad (\text{Ek B.3})$$

$$a_n = \frac{4E}{n\pi} \left[ \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_3 \right] \quad (\text{Ek B.4})$$

olarak bulunur.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E \cos nwt dw + \int_{\alpha_3}^{\pi-\alpha_3} E \cos wtdwt + \int_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} E \cos nwt dw + \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} -E \cos nwt dw + \int_{\pi+\pi_3}^{2\pi-\alpha_3} -E \cos nwt dw + \int_{2\pi-\alpha_2}^{2\pi-\alpha_1} -E \cos nwt dw \right] \quad (\text{Ek B.5})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} \left[ \sin n\alpha_2 - \sin n\alpha_1 + \sin n(\pi - \alpha_3) - \sin n\alpha_3 + \sin n(\pi - \alpha_1) - \sin n(\pi - \alpha_2) - \right. \\ \left. \sin n(\pi + \alpha_2) + \sin n(\pi + \alpha_1) - \sin n(2\pi - \alpha_3) + \sin n(\pi + \alpha_3) - \sin n(2\pi - \alpha_1) + \right. \\ \left. \sin n(2\pi - \alpha_2) \right] \quad (\text{Ek B.6})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} \left[ \sin n\alpha_2 - \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_3 - \sin n\alpha_3 + \sin n\alpha_1 - \sin n\alpha_2 + \sin n\alpha_2 - \right. \\ \left. \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_3 - \sin n\alpha_3 + \sin n\alpha_1 - \sin n\alpha_2 \right] \quad (\text{Ek B.7})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} (0) = 0 \quad (\text{Ek B.8})$$

olarak bulunur.

$$V_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Edwt + \int_{\alpha_3}^{\pi - \alpha_3} Edwt + \int_{\pi - \alpha_2}^{\pi - \alpha_1} Edwt + \int_{\pi + \alpha_1}^{\pi + \alpha_2} -Edwt + \int_{\pi + \alpha_3}^{2\pi - \alpha_3} -Edwt + \right. \\ \left. \int_{2\pi - \alpha_2}^{2\pi - \alpha_1} -Edwt \right] \quad (\text{Ek B.9})$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} \left[ \alpha_2 - \alpha_1 + (\pi - \alpha_3) - \alpha_3 + (\pi - \alpha_1) - (\pi - \alpha_2) - (\pi + \alpha_2) + (\pi + \alpha_1) - \right. \\ \left. (2\pi - \alpha_3) + (\pi + \alpha_3) - (2\pi - \alpha_1) + (2\pi - \alpha_2) \right] \quad (\text{Ek B.10})$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} \left( \alpha_2 - \alpha_1 + \pi - \alpha_3 - \alpha_3 + \pi - \alpha_1 - \pi + \alpha_2 - \pi - \alpha_2 + \pi + \alpha_1 - 2\pi + \right. \\ \left. \alpha_3 + \pi + \alpha_3 - 2\pi + \alpha_1 + 2\pi - \alpha_2 \right) \quad (\text{Ek B.11})$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} (0) = 0 \quad (\text{Ek B.12})$$

### Ek. C. (4.1) Denkleminin Çıkarılışı

Şekil 4.2 'deki dalga şekli için, (Ek A.2), (Ek A.3), (Ek A.4) ve (Ek A.5) denklemleri ile  $a_n$ ,  $b_n$  ve  $V_0$  katsayıları aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\begin{aligned}
 a_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E \sin nwt dw + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} E \sin nwt dw + \int_{\alpha_5}^{\alpha_6} E \sin nwt dw + \int_{\alpha_7}^{\pi-\alpha_7} E \sin nwt dw + \right. \\
 \int_{\pi-\alpha_6}^{\pi-\alpha_5} E \sin nwt dw + \int_{\pi-\alpha_4}^{\pi-\alpha_3} E \sin nwt dw + \int_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} E \sin nwt dw + \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} -E \sin nwt dw + \\
 \int_{\pi+\alpha_3}^{\pi+\alpha_4} -E \sin nwt dw + \int_{\pi+\beta_5}^{\pi+\alpha_6} -E \sin nwt dw + \int_{\pi+\alpha_7}^{2\pi-\alpha_7} -E \sin nwt dw + \\
 \left. \int_{2\pi-\alpha_6}^{2\pi-\alpha_5} -E \sin nwt dw + \int_{2\pi-\alpha_4}^{2\pi-\alpha_3} -E \sin nwt dw + \int_{2\pi-\alpha_2}^{2\pi-\alpha_1} -E \sin nwt dw \right] \quad (\text{Ek C.1})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_n = \frac{E}{n\pi} \left[ -\cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_4 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_5 - \cos n(\pi-\alpha_7) + \right. \\
 \cos n\alpha_7 - \cos n(\pi-\alpha_5) + \cos n(\pi-\alpha_6) - \cos n(\pi-\alpha_3) + \cos n(\pi-\alpha_4) - \\
 \cos n(\pi-\alpha_1) + \cos n(\pi-\alpha_2) + \cos n(\pi+\alpha_2) - \cos n(\pi+\alpha_1) + \cos n(\pi+\alpha_4) - \\
 \cos n(\pi+\alpha_3) + \cos n(\pi+\alpha_6) - \cos n(\pi+\alpha_5) + \cos n(2\pi-\alpha_7) - \cos n(\pi+\alpha_7) + \\
 \cos n(2\pi-\alpha_5) - \cos n(2\pi-\alpha_6) + \cos n(2\pi-\alpha_3) - \cos n(2\pi-\alpha_4) + \cos n(2\pi-\alpha_1) - \\
 \left. \cos n(2\pi-\alpha_2) \right] \quad (\text{Ek C.2})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_n = \frac{E}{n\pi} \left[ -\cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_4 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_5 + \cos n\alpha_7 + \right. \\
 \cos n\alpha_7 + \cos n\alpha_5 - \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_4 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 - \\
 \cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_4 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_5 + \cos n\alpha_7 + \\
 \cos n\alpha_7 + \cos n\alpha_5 - \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_4 + \\
 \left. \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 \right] \quad (\text{Ek C.3})
 \end{aligned}$$

$$a_n = \frac{4E}{n\pi} \left[ \cos n\alpha_1 - \cos n\alpha_2 + \cos n\alpha_3 - \cos n\alpha_4 + \cos n\alpha_5 - \right. \\ \left. \cos n\alpha_6 + \cos n\alpha_7 \right] \quad (\text{Ek C.4})$$

olarak bulunur.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E \cos n\omega d\omega + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} E \cos n\omega d\omega + \int_{\alpha_5}^{\alpha_6} E \cos n\omega d\omega + \int_{\alpha_7}^{\pi-\alpha_7} E \cos n\omega d\omega + \right. \\ \int_{\pi-\alpha_6}^{\pi-\alpha_5} E \cos n\omega d\omega + \int_{\pi-\alpha_4}^{\pi-\alpha_3} E \cos n\omega d\omega + \int_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} E \cos n\omega d\omega + \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} -E \cos n\omega d\omega + \\ \int_{\pi+\alpha_3}^{\pi+\alpha_4} -E \cos n\omega d\omega + \int_{\pi+\alpha_5}^{\pi+\alpha_6} -E \cos n\omega d\omega + \int_{\pi+\alpha_7}^{2\pi-\alpha_7} -E \cos n\omega d\omega + \\ \left. \int_{2\pi-\alpha_6}^{2\pi-\alpha_5} -E \cos n\omega d\omega + \int_{2\pi-\alpha_4}^{2\pi-\alpha_3} -E \cos n\omega d\omega + \int_{2\pi-\alpha_2}^{2\pi-\alpha_1} -E \cos n\omega d\omega \right] \quad (\text{Ek C.5})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} \left[ \sin n\alpha_2 - \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_4 - \sin n\alpha_3 + \sin n\alpha_6 - \sin n\alpha_5 + \sin n(\pi-\alpha_7) - \right. \\ \sin n\alpha_7 + \sin n(\pi-\alpha_5) - \sin n(\pi-\alpha_6) + \sin n(\pi-\alpha_3) - \sin n(\pi-\alpha_4) + \\ \sin n(\pi-\alpha_1) - \sin n(\pi-\alpha_2) - \sin n(\pi+\alpha_2) + \sin n(\pi+\alpha_1) - \sin n(\pi+\alpha_4) + \\ \sin n(\pi+\alpha_3) - \sin n(\pi+\alpha_6) + \sin n(\pi+\alpha_5) - \sin n(2\pi-\alpha_7) + \sin n(\pi+\alpha_7) - \\ \sin n(2\pi-\alpha_5) + \sin n(2\pi-\alpha_6) - \sin n(2\pi-\alpha_3) + \sin n(2\pi-\alpha_4) - \sin n(2\pi-\alpha_1) + \\ \left. \sin n(2\pi-\alpha_2) \right] \quad (\text{Ek C.6})$$

$$b_n = \frac{E}{n\pi} \left[ \sin n\alpha_2 - \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_4 - \sin n\alpha_3 + \sin n\alpha_6 - \sin n\alpha_5 + \sin n\alpha_7 - \right. \\ \sin n\alpha_7 + \sin n\alpha_5 - \sin n\alpha_6 + \sin n\alpha_3 - \sin n\alpha_4 + \sin n\alpha_1 - \sin n\alpha_2 + \\ \sin n\alpha_2 - \sin n\alpha_1 + \sin n\alpha_4 - \sin n\alpha_3 + \sin n\alpha_6 - \sin n\alpha_5 + \sin n\alpha_7 - \\ \sin n\alpha_7 + \sin n\alpha_5 - \sin n\alpha_6 + \sin n\alpha_3 - \sin n\alpha_4 + \\ \left. \sin n\alpha_1 - \sin n\alpha_2 \right] \quad (\text{Ek C.7})$$



$$b_n = \frac{E}{n\pi} (0) = 0 \quad (\text{Ek C.8})$$

olarak bulunur.

$$\begin{aligned}
V_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Edwt + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} Edwt + \int_{\alpha_5}^{\alpha_6} Edwt + \int_{\alpha_7}^{\pi-\alpha_7} Edwt + \int_{\pi-\alpha_6}^{\pi-\alpha_5} Edwt + \int_{\pi-\alpha_4}^{\pi-\alpha_3} Edwt + \right. \\
\left. \int_{\pi-\alpha_2}^{\pi-\alpha_1} Edwt + \int_{\pi+\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} -Edwt + \int_{\pi+\alpha_3}^{\pi+\alpha_4} -Edwt + \int_{\pi+\alpha_5}^{\pi+\alpha_6} -Edwt + \int_{\pi+\alpha_7}^{2\pi-\alpha_7} -Edwt + \right. \\
\left. \int_{2\pi-\alpha_6}^{2\pi-\alpha_5} -Edwt + \int_{2\pi-\alpha_4}^{2\pi-\alpha_3} -Edwt + \int_{2\pi-\alpha_2}^{2\pi-\alpha_1} -Edwt \right] \quad (\text{Ek C.9})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_0 = \frac{E}{2\pi} \left[ \alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_3 + \alpha_6 - \alpha_5 + (\pi - \alpha_7) - \alpha_7 + (\pi - \alpha_5) - (\pi - \alpha_6) + \right. \\
(\pi - \alpha_3) - (\pi - \alpha_4) + (\pi - \alpha_1) - (\pi - \alpha_2) - (\pi + \alpha_2) + (\pi + \alpha_1) - (\pi + \alpha_4) + \\
(\pi + \alpha_3) - (\pi + \alpha_6) + (\pi + \alpha_5) - (2\pi - \alpha_7) + (\pi + \alpha_7) - (2\pi - \alpha_5) + \\
\left. (2\pi - \alpha_6) - (2\pi - \alpha_3) + (2\pi - \alpha_4) - (2\pi - \alpha_1) + (2\pi - \alpha_2) \right] \quad (\text{Ek C.10})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_0 = \frac{E}{2\pi} \left( \alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_3 + \alpha_6 - \alpha_5 + \pi - \alpha_7 - \alpha_7 + \pi - \alpha_5 - \pi + \alpha_6 + \right. \\
\pi - \alpha_3 - \pi + \alpha_4 + \pi - \alpha_1 - \pi + \alpha_2 - \pi - \alpha_2 + \pi + \alpha_1 - \pi - \alpha_4 + \\
\pi + \alpha_3 - \pi - \alpha_6 + \pi + \alpha_5 - 2\pi + \alpha_7 + \pi + \alpha_7 - 2\pi + \alpha_5 + 2\pi - \\
\left. \alpha_6 - 2\pi + \alpha_3 + 2\pi - \alpha_4 - 2\pi + \alpha_1 + 2\pi - \alpha_2 \right) \quad (\text{Ek C.11})
\end{aligned}$$

$$V_0 = \frac{E}{2\pi} (0) = 0 \quad (\text{Ek C.12})$$

### Ek. D. (4.2) Denklem Takımının MATLAB Çözümü

Bölüm 4.2.2 'de (4.2) nonlinear denklem takımının tüm çalışma frekansları için Tablo 4.2 ve Tablo 4.3 'te gösterilen değerler, MATLAB programında bulunmuştur. (4.2) nonlinear denklem takımı ve hesaplanması istenilen anahtarlama açıları ve süreleri için gerekli denklemler inverter.m adlı MATLAB dosyasında oluşturulmuştur. 50 Hz çalışma frekansında ana harmonik gerilimi tepe değeri 311,12 V, yani etkin değeri 220 V olacak şekilde yazılan örnek MATLAB m-dosyası programı aşağıdaki gibidir:

```
function F=inverter(x)
f=50;
A1=220*sqrt(2);
E = 311.12;
a=(4*E)/pi;

F=[a*(cos(x(1))-cos(x(2))+cos(x(3))-cos(x(4))+cos(x(5))-cos(x(6))+cos(x(7)))-A1;
(a/3)*(cos(3*x(1))-cos(3*x(2))+cos(3*x(3))-cos(3*x(4))+cos(3*x(5))-
cos(3*x(6))+cos(3*x(7)));
(a/5)*(cos(5*x(1))-cos(5*x(2))+cos(5*x(3))-cos(5*x(4))+cos(5*x(5))-
cos(5*x(6))+cos(5*x(7)));
(a/7)*(cos(7*x(1))-cos(7*x(2))+cos(7*x(3))-cos(7*x(4))+cos(7*x(5))-
cos(7*x(6))+cos(7*x(7)));
(a/9)*(cos(9*x(1))-cos(9*x(2))+cos(9*x(3))-cos(9*x(4))+cos(9*x(5))-
cos(9*x(6))+cos(9*x(7)));
(a/11)*(cos(11*x(1))-cos(11*x(2))+cos(11*x(3))-cos(11*x(4))+cos(11*x(5))-
cos(11*x(6))+cos(11*x(7)));
(a/13)*(cos(13*x(1))-cos(13*x(2))+cos(13*x(3))-cos(13*x(4))+cos(13*x(5))-
cos(13*x(6))+cos(13*x(7))];

t1=((x(1)*180/pi)/360)*(1/f)*1000000
t2=((x(2)*180/pi)/360)*(1/f)*1000000
t3=((x(3)*180/pi)/360)*(1/f)*1000000
```

$$t_4 = ((x(4) * 180 / \pi) / 360) * (1/f) * 1000000$$

$$t_5 = ((x(5) * 180 / \pi) / 360) * (1/f) * 1000000$$

$$t_6 = ((x(6) * 180 / \pi) / 360) * (1/f) * 1000000$$

$$t_7 = ((x(7) * 180 / \pi) / 360) * (1/f) * 1000000$$

$$t_8 = ((1/f) / 4) * 1000000$$

$$T_1 = t_1$$

$$T_2 = t_2 - t_1$$

$$T_3 = t_3 - t_2$$

$$T_4 = t_4 - t_3$$

$$T_5 = t_5 - t_4$$

$$T_6 = t_6 - t_5$$

$$T_7 = t_7 - t_6$$

$$T_8 = t_8 - t_7$$

Bu programda  $f$ , çalışma frekansını göstermektedir ve her çalışma frekansı için değeri değiştirilmiştir.  $A_1$ , ilgili çalışma frekansında elde edilmek istenen ana harmonik gerilimi tepe değerini göstermektedir.  $A_1$  ana harmonik gerilimi tepe değerleri, Tablo 4.1’de belirtilen etkin değerlere bağlı olarak programa girilmiştir.  $E$ , inverter giriş doğru gerilimini göstermektedir ve bu değer tüm çalışma frekansı için yapılan çözümlerde sabittir.

Çözüm sonrası elde edilen  $x$  vektöründeki değerler sırasıyla Şekil 4.2 ‘de gösterilen  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  ve  $\alpha_7$  darbe açılarının radyan cinsinden değerlerini göstermektedir.  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  ve  $T_7$  değerleri,  $x$  vektörü ile elde edilen  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  ve  $\alpha_7$  darbe açılarının  $\mu s$  cinsinden değerlerini ve  $T_8$  değeri de  $\pi/2$  açısı olan çeyrek periyot açısının  $\mu s$  cinsinden değerini göstermektedir.  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7$  ve  $t_8$  anahtarlama zamanlarını göstermektedir.

$x_0$ , nonlinear denklem takımının çözülmesi için radyan cinsinden verilen başlangıç değerlerinden oluşan vektördür.

Tüm çalışma frekansları için inverter.m adlı MATLAB dosyasında ilgili değerlerin değiştirilmesiyle MATLAB Command Window 'da yazılan komutlar ve elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

\* Çalışma frekansı 50 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 220 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 9.202624840470841e+002
t2 = 3.661434161738627e+002
t3 = 5.738016138681257e+002
t4 = 7.011096838575081e+002
t5 = 2.791985500371984e+002
t6 = 9.669398453432045e+002
t7 = 74.60388404339028
t8 = 1.117940522629626e+003

x = 0.28910898592566
    0.40413633256687
    0.58440142604148
    0.80466152925822
    0.89237434062720
    1.19614745208654
    1.21958493531731
```

\* Çalışma frekansı 49 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 215,6 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 9.600910755235407e+002
t2 = 3.836005047108245e+002
t3 = 6.015503820163985e+002
t4 = 7.443627736094149e+002
t5 = 2.984932938194052e+002
t6 = 1.094064125071868e+003
```

```
t7 = 91.07267378112556
t8 = 9.288059877939531e+002
```

```
x = 0.29558907682490
    0.41369049652116
    0.59889347009004
    0.82806496296539
    0.91996390818826
    1.25680008234069
    1.28483916099866
```

\* Çalışma frekansı 48 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 211,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 9.928135108931292e+002
t2 = 3.925975495389250e+002
t3 = 6.281206708013190e+002
t4 = 7.657496620348697e+002
t5 = 3.214355584594209e+002
t6 = 1.145901058072167e+003
t7 = 1.158466052219628e+002
t8 = 8.458687183115389e+002
```

```
x = 0.29942550069183
    0.41783013212692
    0.60726686348282
    0.83821152070563
    0.93515420125526
    1.28074981845017
    1.31568831186011
```

\* Çalışma frekansı 47 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 206,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 1.024616067462930e+003
```

```
t2 = 3.993138598033750e+002
```

```
t3 = 6.553422314222344e+002
```

```
t4 = 7.808213227603983e+002
```

```
t5 = 3.463631241111807e+002
```

```
t6 = 1.170888291818901e+003
```

```
t7 = 1.432532209446035e+002
```

```
t8 = 7.985508178465898e+002
```

```
x = 0.30257907316741
```

```
0.42050033308029
```

```
0.61402925702367
```

```
0.84461337497060
```

```
0.94689776851172
```

```
1.29267244975246
```

```
1.33497649691289
```

\* Çalışma frekansı 46 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 202,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 1.056713868835095e+003
```

```
t2 = 4.049339376741420e+002
```

```
t3 = 6.836059911744678e+002
```

```
t4 = 7.927147559564560e+002
```

```
t5 = 3.729825951915741e+002
```

```
t6 = 1.183874644089618e+003
```

```
t7 = 1.723662911055635e+002
```

```
t8 = 7.675905246687353e+002
```

```
x = 0.30541833650965
```

```
0.42245498501799
```

```
0.62003524852176
```

0.84915083906263  
 0.95695270211193  
 1.29912387549910  
 1.34894228539376

\* Çalışma frekansı 45 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 198 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.089578066997166e+003
t2 = 4.098727256206496e+002
t3 = 7.130934348710036e+002
t4 = 8.025741204694500e+002
t5 = 4.012200419820033e+002
t6 = 1.190700065786098e+003
t7 = 2.029601579895352e+002
t8 = 7.455569418396499e+002
```

x = 0.30807094057118  
 0.42395972350568  
 0.62558214217392  
 0.85250462864845  
 0.96594692292118  
 1.30260943505841  
 1.35999504751092

\* Çalışma frekansı 44 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 193,6 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.123475823778784e+003
t2 = 4.143256678162040e+002
t3 = 7.439347756863494e+002
t4 = 8.109660924384471e+002
t5 = 4.310775583921582e+002
```

```
t6 = 1.194079322039363e+003
t7 = 2.350006336370461e+002
t8 = 7.289583080298307e+002
```

```
x = 0.31059629871329
    0.42514083644333
    0.63080915873540
    0.85500896914712
    0.97418473711748
    1.30430008979865
    1.36926838064659
```

\* Çalışma frekansı 43 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 189,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.158601239661387e+003
t2 = 4.184027506290734e+002
t3 = 7.762468493168458e+002
t4 = 8.182273964971719e+002
t5 = 4.625960864818298e+002
t6 = 1.195421484186576e+003
t7 = 2.685271199062245e+002
t8 = 7.159305616929842e+002
```

```
x = 0.31302737029458
    0.42607015694973
    0.63579417727973
    0.85686037457065
    0.98184318272153
    1.30481853505063
    1.37736835766433
```



\* Çalışma frekansı 42 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 184,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.195119644656776e+003
t2 = 4.221735176968130e+002
t3 = 8.101460658416215e+002
t4 = 8.245822155482574e+002
t5 = 4.958422689485856e+002
t6 = 1.195516510700737e+003
t7 = 3.036158753448544e+002
t8 = 7.053848536433079e+002
```

```
x = 0.31538464404842
    0.42679361067429
    0.64058612069204
    0.85818824086640
    0.98903793294173
    1.30452730747180
    1.38464962873263
```

\* Çalışma frekansı 41 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 180,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.233186408610441e+003
t2 = 4.256856221481521e+002
t3 = 8.457542596991134e+002
t4 = 8.301911593195205e+002
t5 = 5.309030755764720e+002
t6 = 1.194832904166257e+003
t7 = 3.403666109847227e+002
t8 = 6.966409351050779e+002
```

```

x = 0.31768188766738
    0.42734301517630
    0.64521827543536
    0.85908431610522
    0.99585057466916
    1.30365219313684
    1.39133421846129

```

\* Çalışma frekansı 40 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 176 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.272956566689464e+003
t2 = 4.289736605015644e+002
t3 = 8.832021249047643e+002
t4 = 8.351750686431437e+002
t5 = 5.678836406384153e+002
t6 = 1.193660519793465e+003
t7 = 3.788973901781756e+002
t8 = 6.892510286510078e+002

```

```

x = 0.31992887986004
    0.42774171989326
    0.64971462447212
    0.85961701328097
    1.00234173916285
    1.30234134875191
    1.39756862852236

```

\* Çalışma frekansı 39 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 171,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.314590674066509e+003
t2 = 4.320638558917547e+002

```

t3 = 9.226317799690121e+002  
t4 = 8.396280126632018e+002  
t5 = 6.069067180299280e+002  
t6 = 1.192184569323252e+003  
t7 = 4.193430177759710e+002  
t8 = 6.829077825367822e+002

x = 0.32213285552175  
0.42800760909474  
0.65409320040444  
0.85983919771825  
1.00855818528686  
1.30069613149417  
1.40345369621145

\* Çalışma frekansı 38 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 167,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.358259008120284e+003
t2 = 4.349767541770430e+002
t3 = 9.641990725973178e+002
t4 = 8.436250496863186e+002
t5 = 6.481131141025235e+002
t6 = 1.190526359928070e+003
t7 = 4.618551426658396e+002
t8 = 6.773928671436561e+002
```

x = 0.32429933564030  
0.42815483857107  
0.65836801352438  
0.85979280916877  
1.01453697141371  
1.29878828524909

1.40906127921729

\* Çalışma frekansı 37 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 162,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 1.404145068576812e+003

t2 = 4.377288798096754e+002

t3 = 1.008075912713670e+003

t4 = 8.472271936936741e+002

t5 = 6.916628232725075e+002

t6 = 1.188766837891832e+003

t7 = 5.066033592147951e+002

t8 = 6.725466815837908e+002

x = 0.32643263556913

0.42819490721662

0.66255023445813

0.85951179630272

1.02030808678492

1.29667005297658

1.41444409487761

\* Çalışma frekansı 36 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 158,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 1.452448862704973e+003

t2 = 4.403338067814748e+002

t3 = 1.054452801888765e+003

t4 = 8.504847682767304e+002

t5 = 7.377367545939474e+002

t6 = 1.186960748047699e+003

t7 = 5.537770149549469e+002

t8 = 6.682496871959074e+002

```

x = 0.32853619272879
    0.42813735330965
    0.66664895797956
    0.85902408038015
    1.02589620291326
    1.29438039887722
    1.41964178746039

```

\* Çalışma frekansı 35 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 154 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.503390265160096e+003
t2 = 4.428028809630928e+002
t3 = 1.103541682866573e+003
t4 = 8.534397687697024e+002
t5 = 7.865390226551672e+002
t6 = 1.185145436696324e+003
t7 = 6.035876208988766e+002
t8 = 6.644104648473103e+002

```

```

x = 0.33061278687538
    0.42799022632292
    0.67067171739058
    0.85835292493996
    1.03132189001342
    1.29194898382867
    1.42468481309216

```

\* Çalışma frekansı 34 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 149,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.557212656881448e+003
t2 = 4.451457244724415e+002

```

t3 = 1.155579221757299e+003  
 t4 = 8.561275818959712e+002  
 t5 = 8.382998293226851e+002  
 t6 = 1.183346479577823e+003  
 t7 = 6.562718581391218e+002  
 t8 = 6.609578244237991e+002

x = 0.33266469331963  
 0.42776041788864  
 0.67462484306118  
 0.85751792334494  
 1.03660249114572  
 1.28939878841445  
 1.42959700879535

\* Çalışma frekansı 33 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 145,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.614187015576612e+003
t2 = 4.473705981927137e+002
t3 = 1.210830641863549e+003
t4 = 8.585782712267378e+002
t5 = 8.932790034165746e+002
t6 = 1.181581366654392e+003
t7 = 7.120952343709569e+002
t8 = 6.578354444560400e+002
```

x = 0.33469379259726  
 0.42745390078841  
 0.67851371963692  
 0.85653573013850  
 1.04175276795130  
 1.28674789246391

1.43439733944882

\* Çalışma frekansı 32 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 140,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 1.674616627677275e+003

t2 = 4.494846688114708e+002

t3 = 1.269594246371013e+003

t4 = 8.608175588826375e+002

t5 = 9.517703028851302e+002

t6 = 1.179861964346820e+003

t7 = 7.713564901646259e+002

t8 = 6.549981408610274e+002

x = 0.33670165088578

0.42707590582589

0.68234297510199

0.85542061472227

1.04678538857499

1.28401071205928

1.43910111511420

\* Çalışma frekansı 31 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 136,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 1.738842608462695e+003

t2 = 4.514942097193818e+002

t3 = 1.332206795930985e+003

t4 = 8.628675885859357e+002

t5 = 1.014106624188954e+003

t6 = 1.178196190003546e+003

t7 = 8.343928988272410e+002

t8 = 6.524092133135200e+002

```

x = 0.33868958019871
    0.42663105552706
    0.68611662268293
    0.85418488827691
    1.05171130334846
    1.28119887803862
    1.44372085779762

```

\* Çalışma frekansı 30 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 132 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.807250450186499e+003
t2 = 4.534047549441114e+002
t3 = 1.399049947456972e+003
t4 = 8.647475275605812e+002
t5 = 1.080666310875326e+003
t6 = 1.176589168045901e+003
t7 = 9.015866526087330e+002
t8 = 6.500385216552113e+002

```

```

x = 0.34065868425016
    0.42612346708427
    0.68983816930043
    0.85283923808809
    1.05654003868176
    1.27832187187934
    1.44826693056310

```

\* Çalışma frekansı 29 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 127,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.880277868050907e+003
t2 = 4.552212190097223e+002

```



$t_3 = 1.470558014892345e+003$   
 $t_4 = 8.664740472819995e+002$   
 $t_5 = 1.151880812199321e+003$   
 $t_6 = 1.175044038757810e+003$   
 $t_7 = 9.733725874902393e+002$   
 $t_8 = 6.478610674900701e+002$

$x = 0.34260989394462$   
 $0.42555683291377$   
 $0.69351069977705$   
 $0.85139299286215$   
 $1.06127993011230$   
 $1.27538749386105$   
 $1.45274800207719$

\* Çalışma frekansı 28 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 123,2 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.958424283952068e+003
t2 = 4.569479916019086e+002
t3 = 1.547227385610273e+003
t4 = 8.680617116083317e+002
t5 = 1.228244018464709e+003
t6 = 1.173562530493207e+003
t7 = 1.050247574742567e+003
t8 = 6.458559320983641e+002

```

$x = 0.34454399521224$   
 $0.42493448460763$   
 $0.69713694313934$   
 $0.84985433571821$   
 $1.06593830929077$   
 $1.27240221305301$

1.45717139499412

\* Çalışma frekansı 27 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 118,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 2.042262383872100e+003

t2 = 4.585890132903244e+002

t3 = 1.629628023911528e+003

t4 = 8.695232930805369e+002

t5 = 1.310323699521568e+003

t6 = 1.172145368420564e+003

t7 = 1.132782007131152e+003

t8 = 6.440054700314868e+002

x = 0.34646165110127

0.42425944436044

0.70071932547269

0.84823047691471

1.07052165555975

1.26937143259169

1.46154335092599

\* Çalışma frekansı 26 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 114,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

t1 = 2.132452315589034e+003

t2 = 4.601478367924533e+002

t3 = 1.718417625125228e+003

t4 = 8.708700328153454e+002

t5 = 1.398775606245743e+003

t6 = 1.170792568879118e+003

t7 = 1.221633940877123e+003

t8 = 6.422946890605708e+002

```

x = 0.34836341949682
    0.42353446680571
    0.70426001252412
    0.84652779518498
    1.07503571995230
    1.26629969328224
    1.46586923456894

```

\* Çalışma frekansı 25 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 110 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 2.229759272343795e+003
t2 = 4.616276770523350e+002
t3 = 1.814359163640530e+003
t4 = 8.721118556168121e+002
t5 = 1.494360975594216e+003
t6 = 1.169503652779657e+003
t7 = 1.317566635076396e+003
t8 = 6.407107678962584e+002

```

```

x = 0.35024976746345
    0.42276207340952
    0.70776094438284
    0.84475195431855
    1.07948562745546
    1.26319083165141
    1.47015369281296

```

\* Çalışma frekansı 24 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 105,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 2.335075454927975e+003
t2 = 4.630314525589488e+002

```

t3 = 1.918342825618782e+003  
t4 = 8.732575491909493e+002  
t5 = 1.597968427927984e+003  
t6 = 1.168277801135627e+003  
t7 = 1.421470478207726e+003  
t8 = 6.392426770986749e+002

x = 0.35212108294942  
0.42194458101695  
0.71122386396242  
0.84290800002147  
1.08387596196612  
1.26004810392131  
1.47440078010937

\* Çalışma frekansı 23 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 101,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 2.449447748583319e+003
t2 = 4.643618197256183e+002
t3 = 2.031413661488633e+003
t4 = 8.743149143354931e+002
t5 = 1.710641590136951e+003
t6 = 1.167113968860386e+003
t7 = 1.534390636051907e+003
t8 = 6.378808782089964e+002
```

x = 0.35397768440587  
0.42108412575291  
0.71465034057831  
0.84100044092112  
1.08821083733610  
1.25687428417789

1.47861405824288

\* Çalışma frekansı 22 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 96,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 2.574112936100176e+003
```

```
t2 = 4.656212017162502e+002
```

```
t3 = 2.154806778630966e+003
```

```
t4 = 8.752908914768241e+002
```

```
t5 = 1.833614263765717e+003
```

```
t6 = 1.166010968234344e+003
```

```
t7 = 1.657562240877083e+003
```

```
t8 = 6.366170828350041e+002
```

```
x = 0.35581982874076
```

```
0.42018268319413
```

```
0.71804178960284
```

```
0.83903331671722
```

```
1.09249395714202
```

```
1.25367174278167
```

```
1.48279667647380
```

\* Çalışma frekansı 21 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 92,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.18;0.36;0.54;0.72;0.9;1.08;1.26];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 2.710542961624522e+003
```

```
t2 = 4.668118127840980e+002
```

```
t3 = 2.289992588008286e+003
```

```
t4 = 8.761916677940726e+002
```

```
t5 = 1.968355650955467e+003
```

```
t6 = 1.164967530181804e+003
```

```
t7 = 1.792455635250273e+003
```

```
t8 = 6.354440581633808e+002
```

```

x = 0.35764771793012
    0.41924208551948
    0.72139948895248
    0.83701025583298
    1.09672866524611
    1.25044250949468
    1.48695143647207

```

\* Çalışma frekansı 20 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 88 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 2.860503764912580e+003
t2 = 4.679356789508661e+002
t3 = 2.438735623884030e+003
t4 = 8.770227683054154e+002
t5 = 2.116629156616623e+003
t6 = 1.163982349221349e+003
t7 = 1.940835189340551e+003
t8 = 6.343554687685864e+002

```

```

x = 0.35946150453661
    0.41826403619040
    0.72472459299207
    0.83493452442964
    1.10091798878167
    1.24718832467055
    1.49108084535814

```

\* Çalışma frekansı 19 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 83,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 3.026132687304307e+003
t2 = 4.689946556767118e+002

```

$t3 = 2.603171937463754e+003$   
 $t4 = 8.777891336263774e+002$   
 $t5 = 2.280569767054971e+003$   
 $t6 = 1.163054116346077e+003$   
 $t7 = 2.104836692317578e+003$   
 $t8 = 6.333457470523299e+002$

$x = 0.36126129633048$   
 $0.41725012259466$   
 $0.72801814431581$   
 $0.83280906827267$   
 $1.10506467486747$   
 $1.24391068103780$   
 $1.49518715936224$

\* Çalışma frekansı 18 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 79,2 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 3.210041673102250e+003
t2 = 4.699904430533784e+002
t3 = 2.785912287827540e+003
t4 = 8.784951865715739e+002
t5 = 2.462787227925421e+003
t6 = 1.162181542945991e+003
t7 = 2.287070541004236e+003
t8 = 6.324099864584987e+002

```

$x = 0.36304716016566$   
 $0.41620182699920$   
 $0.73128108377065$   
 $0.83063654864715$   
 $1.10917122210094$   
 $1.24061085800938$

1.49927242002346

\* Çalışma frekansı 17 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 74,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 3.415456889248116e+003
```

```
t2 = 4.709245988586667e+002
```

```
t3 = 2.990181752419108e+003
```

```
t4 = 8.791448894205050e+002
```

```
t5 = 2.666505643693144e+003
```

```
t6 = 1.161363378092257e+003
```

```
t7 = 2.490761348262948e+003
```

```
t8 = 6.315438529464318e+002
```

```
x = 0.36481912524509
```

```
0.41512053609084
```

```
0.73451425898498
```

```
0.82841937327049
```

```
1.11323990766388
```

```
1.23728994999382
```

```
1.50333848441297
```

\* Çalışma frekansı 16 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 70,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 3.646410697036834e+003
```

```
t2 = 4.717985499402803e+002
```

```
t3 = 3.220011691323374e+003
```

```
t4 = 8.797417932313219e+002
```

```
t5 = 2.895755431876583e+003
```

```
t6 = 1.160598420829356e+003
```

```
t7 = 2.719939904548242e+003
```

```
t8 = 6.307435112140083e+002
```



```

x = 0.36657718584903
    0.41400754931996
    0.73771843168588
    0.82615972303536
    1.11727281075940
    1.23394888988405
    1.50738705053694

```

\* Çalışma frekansı 15 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 66 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 3.908010407952473e+003
t2 = 4.726136020488234e+002
t3 = 3.480508496407134e+003
t4 = 8.802890804643139e+002
t5 = 3.155642063653275e+003
t6 = 1.159885528804243e+003
t7 = 2.979711924416426e+003
t8 = 6.300055629199796e+002

```

```

x = 0.36832130363328
    0.41286408623877
    0.74089428393086
    0.82385957517752
    1.12127183291348
    1.23058846860238
    1.51141967882728

```

\* Çalışma frekansı 14 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 61,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 4.206822216210025e+003
t2 = 4.733709484301662e+002

```

t3 = 3.778237518287681e+003  
t4 = 8.807896018611918e+002  
t5 = 3.452729983095735e+003  
t6 = 1.159223624140530e+003  
t7 = 3.276641970383147e+003  
t8 = 6.293269947343797e+002

x = 0.37005140954330  
0.41169129297561  
0.74404242344277  
0.82152072343460  
1.12523871562684  
1.22720935142793  
1.51543781043894

\* Çalışma frekansı 13 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 57,2 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 4.551432326949970e+003
t2 = 4.740716773252789e+002
t3 = 4.121784189750050e+003
t4 = 8.812459084096499e+002
t5 = 3.795603723672964e+003
t6 = 1.158611697282373e+003
t7 = 3.619314572885744e+003
t8 = 6.287051344932006e+002
```

x = 0.37176740540309  
0.41049024797085  
0.74716338815608  
0.81914479562459  
1.12917505575455  
1.22381209166473

1.51944278292669

\* Çalışma frekansı 12 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 52,8 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 4.953288644713854e+003
```

```
t2 = 4.747167785217025e+002
```

```
t3 = 4.522595710289412e+003
```

```
t4 = 8.816602790768575e+002
```

```
t5 = 4.195709586449999e+003
```

```
t6 = 1.158048809361048e+003
```

```
t7 = 4.019175910859729e+003
```

```
t8 = 6.281376140607317e+002
```

```
x = 0.37346916521623
```

```
0.40926196707078
```

```
0.75025765007722
```

```
0.81673326901426
```

```
1.13308231893556
```

```
1.22039714210325
```

```
1.52343584376329
```

\* Çalışma frekansı 11 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 48,4 V için sonuçlar:

```
>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
```

```
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
```

```
t1 = 5.428001561231831e+003
```

```
t2 = 4.753071490994471e+002
```

```
t3 = 4.996281830367948e+003
```

```
t4 = 8.820347448636003e+002
```

```
t5 = 4.668656418687810e+003
```

```
t6 = 1.157534093439856e+003
```

```
t7 = 4.491834591755272e+003
```

```
t8 = 6.276223378269642e+002
```

```

x = 0.37515653622568
    0.40800740807749
    0.75332561853554
    0.81428748377838
    1.13696185133424
    1.21696486462731
    1.52741816206818

```

\* Çalışma frekansı 10 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 44 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 5.997425212178276e+003
t2 = 4.758435984371399e+002
t3 = 5.564696105578866e+003
t4 = 8.823711096799507e+002
t5 = 5.236296862549647e+003
t6 = 1.157066755031901e+003
t7 = 5.059142900687704e+003
t8 = 6.271574558565153e+002

```

```

x = 0.37682933974067
    0.40672747480283
    0.75636764289775
    0.81180865481596
    1.14081488992399
    1.21351553827041
    1.53139083885614

```

\* Çalışma frekansı 9 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 39,6 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 6.693126235067653e+003
t2 = 4.763268525975991e+002

```

$t3 = 6.259404652239374e+003$   
 $t4 = 8.826709684143243e+002$   
 $t5 = 5.930196105732313e+003$   
 $t6 = 1.156646072039563e+003$   
 $t7 = 5.752665550684826e+003$   
 $t8 = 6.267413410021254e+002$

$x = 0.37848737177348$   
 $0.40542302070838$   
 $0.75938401479216$   
 $0.80929788213050$   
 $1.14464257149257$   
 $1.21004936594159$   
 $1.53535491604965$

\* Çalışma frekansı 8 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 35,2 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 7.562454091928667e+003
t2 = 4.767575581408910e+002
t3 = 7.127756468360879e+003
t4 = 8.829357225455533e+002
t5 = 6.797702197668952e+003
t6 = 1.156271394346404e+003
t7 = 6.619749997728803e+003
t8 = 6.263725692798507e+002

```

$x = 0.38013040349301$   
 $0.40409485216819$   
 $0.76237496988947$   
 $0.80675615996212$   
 $1.14844594052993$   
 $1.20656648001849$

1.53931138446441

\* Çalışma frekansı 7 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 30,8 V için sonuçlar:

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];

>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)

t1 = 8.679814521956911e+003

t2 = 4.771362854320214e+002

t3 = 8.244156885064856e+003

t4 = 8.831665935717465e+002

t5 = 7.913219496378781e+003

t6 = 1.155942143179542e+003

t7 = 7.734799885816072e+003

t8 = 6.260499028857812e+002

x = 0.38175818151383

0.40274373140087

0.76534068927313

0.80418438482478

1.15222595612972

1.20306694695955

1.54326119093890

\* Çalışma frekansı 6 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 26,4 V için sonuçlar:

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];

>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)

t1 = 1.016921644276582e+004

t2 = 4.774635314896659e+002

t3 = 9.732614467041336e+003

t4 = 8.833646344915833e+002

t5 = 9.400755564494841e+003

t6 = 1.155657810349148e+003

t7 = 9.221821940933049e+003

t8 = 6.257722751012188e+002

```

x = 0.38337042803229
    0.40137037910691
    0.76828130042546
    0.80158336257937
    1.15598349801470
    1.19955077105938
    1.54720524475240

```

\* Çalışma frekansı 5 Hz ve ana harmonik genliği etkin değeri 22 V için sonuçlar:

```

>> x0=[0.29;0.5;0.81;0.96;1.31;1.42;1.47];
>> [x,fonksiyondegeri,kontrol,ozellik]=fsolve('inverter',x0)
t1 = 1.225387512856064e+004
t2 = 4.777397224165361e+002
t3 = 1.181634419036587e+004
t4 = 8.835307395328164e+002
t5 = 1.148352434273439e+004
t6 = 1.155417957443606e+003
t7 = 1.130402914311831e+004
t8 = 6.255387758278375e+002

```

```

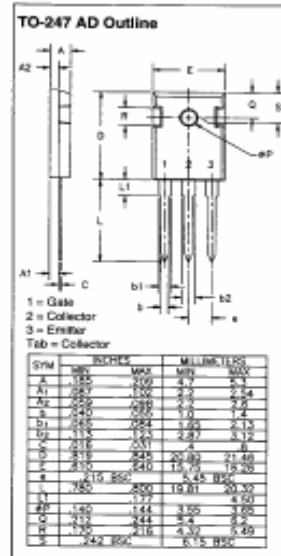
x = 0.38496684081893
    0.39997547684165
    0.77119687784906
    0.79895381465444
    1.15971937177897
    1.19601789744828
    1.55114442345428

```

Ek. E. IXGH20N60AU1 İçim İletim - Kesim Bilgileri



Symbol	Test Conditions	Characteristic Values (T <sub>j</sub> = 25°C, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
B <sub>s</sub>	I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>CE</sub> = 10 V, Pulse test, 1 ≤ 300 μs, duty cycle ≤ 2 %	6	14	S
C <sub>iss</sub>	V <sub>CE</sub> = 25 V, V <sub>GS</sub> = 0 V, f = 1 MHz		1500	pF
C <sub>oss</sub>			275	pF
C <sub>res</sub>			40	pF
Q <sub>on</sub>	I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>GS</sub> = 15 V, V <sub>CE</sub> = 0.5 V <sub>CE(sat)</sub>		100	120 nC
Q <sub>off</sub>			20	30 nC
Q <sub>sp</sub>			60	90 nC
t <sub>on</sub>	Inductive load, T <sub>j</sub> = 25°C I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>CE</sub> = 15 V, L = 300 μH, V <sub>CE</sub> = 0.8 V <sub>CE(sat)</sub> R <sub>θj-c</sub> = R <sub>θj-e</sub> = 82 Ω Remarks: Switching times may increase for V <sub>CE</sub> (Clamp) > 0.8 * V <sub>CE(sat)</sub> higher T <sub>j</sub> or increased R <sub>θj-c</sub>		100	ns
t <sub>r</sub>			200	ns
t <sub>off</sub>			600	ns
t <sub>s</sub>			400	ns
E <sub>off</sub>			200	400 ns
		20N60U1	1.5	mJ
t <sub>on</sub>	Inductive load, T <sub>j</sub> = 125°C I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>CE</sub> = 15 V, L = 300 μH V <sub>CE</sub> = 0.8 V <sub>CE(sat)</sub> , R <sub>θj-c</sub> = R <sub>θj-e</sub> = 82 Ω Remarks: Switching times may increase for V <sub>CE</sub> (Clamp) > 0.8 * V <sub>CE(sat)</sub> higher T <sub>j</sub> or increased R <sub>θj-c</sub>		100	ns
t <sub>r</sub>			200	ns
E <sub>on</sub>			2	mJ
t <sub>off</sub>			900	1500 ns
t <sub>s</sub>			530	2000 ns
		20N60AU1	250	600 ns
E <sub>off</sub>		20N60U1	3.2	mJ
		20N60AU1	2.0	mJ
R <sub>th(j-c)</sub>				0.83 K/W
R <sub>th(j-e)</sub>				0.25 K/W



Symbol	Test Conditions	Characteristic Values (T <sub>j</sub> = 25°C, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
V <sub>s</sub>	I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>CE</sub> = 0 V, Pulse test, 1 ≤ 300 μs, duty cycle d ≤ 2 %			1.5 V
I <sub>RM</sub>	I <sub>C</sub> = I <sub>CRM</sub> , V <sub>CE</sub> = 0 V, -di/dt = 240 A/μs V <sub>GS</sub> = 360 V I <sub>C</sub> = 1 A; -di/dt = 100 A/μs; V <sub>GS</sub> = 30 V		10	15 A
t <sub>on</sub>			150	ns
t <sub>off</sub>			35	50 ns
R <sub>th(j-c)</sub>				1 K/W

IXYS MOSFETs and IGBTs are covered by one of the following U.S. patents: 4,025,982 4,881,106 5,017,509 5,049,901 5,107,117 5,486,716 4,862,072 4,891,944 5,034,795 5,052,307 5,207,481 5,381,026



## ÖZGEÇMİŞ

Faruk Yalçın, 21.05.1984 'te Sakarya 'da doğdu. İlkokulu Adapazarı 'nda Zübeyde Hanım İlköğretim Okulu 'nda, ortaokul ve liseyi Adapazarı 'nda Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi 'nde bitirdi. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliđi Bölümüne girdi ve 2006 yılında mezun oldu. Aralık 2006 da asteğmen olarak askere gitti ve Kasım 2007 de askerlik görevini tamamladı. Ocak 2008 – Nisan 2009 arasında Enko Teknik Elektrik Makine ve Kontrol Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti 'nde elektrik-elektronik mühendisi olarak çalıştı ve bu süre içinde endüstriyel otomasyon projelerini yürüttü. Mayıs 2009 da SEDAŞ 'ta (Sakarya) elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.