

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

**İKİ SEVİYELİ İNVERTER ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ İÇİN  
MATLAB/GUI TABANLI İNTERAKTİF BENZETİM ORTAMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Samet KAYA**

**(112131112)**

**Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi**

**Programı: Telekomünikasyon Eğitimi**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erkan DENİZ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Mayıs 2017**

**MAYIS - 2017**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ SEVİYELİ İNVERTER ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ İÇİN  
MATLAB/GUI TABANLI İNTERAKTİF BENZETİM ORTAMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet KAYA

(112131112)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Mayıs 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Mayıs 2017

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erkan DENİZ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ALÇİN (B.Ü)

*E. Deniz*

*E. Tanyıldızı*

*O. Faruk Alçin*

MAYIS-2017

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, bilgisayar destekli eğitim, MATLAB GUI Editörü ve iki seviyeli inverter hakkında gerekli olan bilgiler sunulmuştur. Ayrıca endüstride ve ev uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan gerilim beslemeli bir iki seviyeli inverter ve onun farklı anahtarlama teknikleri için MATLAB GUI tabanlı bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Çalışmamda bana verdikleri destekten dolayı danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Erkan DENİZ'e ve desteğinden dolayı Doç. Dr. Ömür AYDOĞMUŞ' a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca eğitim hayatım boyunca benden hiçbir desteğini esirgemeyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

**Samet KAYA**  
**ELAZIĞ - 2017**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET .....	IV
SUMMARY .....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ .....	X
KISALTMALAR LİSTESİ .....	XI
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bilgisayar Destekli Eğitim Programları ve Avantajları .....	1
1.2 Literatür Taraması .....	3
1.3 Tezin Amacı .....	5
1.4 Tezin İçeriği .....	6
<b>2. İNVERTERLER.....</b>	<b>8</b>
2.1 Gerilim Kaynaklı İnverter .....	8
2.2 Akım Kaynaklı İnverter .....	9
2.3 Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı İnverter .....	9
2.4 Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM).....	11
2.5 Sinüzoidal PWM Tekniği (SPWM) .....	12
2.5.1 Doğal Örneklemeli SPWM .....	13
2.5.2 Düzenli Örneklemeli SPWM .....	14
2.5.2.1 Simetrik Düzenli Örneklemeli SPWM.....	15
2.5.2.2 Asimetrik Düzenli Örneklemeli SPWM.....	16
2.6 Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM Tekniği.....	18
2.7 Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (SVPWM Tekniği) .....	18
2.7.1 İki Seviyeli İnverter İçin SVPWM Tekniği .....	19
2.7.2 İki Seviyeli SVPWM'nin Gerçekleştirilmesi.....	21
2.8 Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu SHEPWM Tekniği.....	25
<b>3. MATLAB İLE GRAFİKSEL KULLANICI ARAYÜZÜ TASARIMI .....</b>	<b>29</b>
3.1 MATLAB GUI Editörü .....	29



3.2	GUI Editörünün Başlatılması.....	29
3.3	GUI Standart Araç Çubuğu .....	30
3.4	GUI Bileşenlerini Oluşturma ve Düzenleme.....	34
3.5	GUI Nesneleri ve Özellikleri.....	34
3.6	Nesnelerin Programlanması .....	36
3.7	Kodlama Düzeni.....	37
<b>4.</b>	<b>İKİ SEVİYELİ İNVERTERİN FARKLI ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ İÇİN MATLAB GUI TABANLI BENZETİM ORTAMI .....</b>	<b>42</b>
4.1	MATLAB GUI Tabanlı Benzetim Ortamı .....	42
4.2	Aynı Parametreler İçin Benzetim Sonuçları .....	46
4.2.1	Aynı Parametreler İçin Alınan Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	59
4.3.	Farklı Parametreler için Benzetim Sonuçları .....	61
4.3.1	Farklı Parametreler İçin Alınan Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	68
<b>5.</b>	<b>SONUÇ .....</b>	<b>69</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>71</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>76</b>

## ÖZET

Bilgisayar ve internet teknolojideki hızlı gelişmeler mühendislik eğitimde kullanılan materyallerde de olumlu değişim ve yenilikler meydana getirmiştir. Bu materyallerden biri bilgisayar destekli benzetim ortamlarıdır. Benzetim ortamları eğitimin süre ve sınıf ortamından bağımsız olmasını, maliyetinin azalmasını ve kalitenin artmasını sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında elektrik-elektronik mühendisliği alanında kullanılabilen MATLAB/GUI tabanlı bir benzetim ortamı gerçekleştirilmiştir. Benzetim ortamı endüstriyel, yenilenebilir enerji ve ev uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan iki-seviyeli inverter ve onun farklı anahtarlama teknikleri ile ilgilidir. Söz konusu ara yüzün kullanımı çok basite indirgenmiştir. Bu ara yüzde iki seviyeli inverter, RL yükü ve anahtarlama tekniği için gerekli parametreler kullanıcı tarafından girildiği zaman MATLAB SimPower Systems ve Simulink blokları yardımıyla oluşturulan modeller çalıştırılmaktadır. Kullanıcı seçtiği PWM yöntemine ilişkin dalga şekillerini kaydettikten sonra, benzetim ekranında bulunan “*Get Values*” butonuna tıklayarak benzetime ilişkin bazı değerleri de sayısal olarak kayıt edebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayar destekli eğitim, Eğitim ortamı, İki seviyeli inverter, MATLAB GUI, Anahtarlama tekniği.

## SUMMARY

### **MATLAB/GUI Based Interactive Simulation Environment for Two-Level Inverter Switching Techniques**

Rapid improvements in computer and internet technology have brought about positive changes and innovations to materials that is used in engineering education. One of these materials is computer based simulation environments. Simulation environments ensure the time and class independent education, reduce the cost and improve the quality as well.

In this dissertation study, a MATLAB / GUI-based simulation environment, which will be possible to perform in the field of electrical and electronics engineering, has been realized. The simulation environment concerns two-level inverters, which is commonly used in industrial, renewable energy and home application, and its different switching techniques. The usage of the interface in question is simplified to the great extent. When two-level inverter in this interface, RL load and the required parameters for the switching technique are entered by the user, the models formulated with MATLAB SimPower Systems and Simulink blocks are activated.

Once it is recorded the waveforms of the user-selected PWM method, it is possible to record some values numerically related to the simulant by clicking on the “*Get Values*” button.

**Key Words:** Computer based education, Educational environment, Two level inverter, MATLAB GUI, Switching technique.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Gerilim kaynaklı inverter.....	8
Şekil 2.2.	Akım kaynaklı inverter.....	9
Şekil 2.3.	(a) Üç fazlı iki seviyeli inverter devresi, (b) İnverterin MATLAB/SimPower Systems modeli.....	10
Şekil 2.4.	Üç-fazlı İnverterin; çıkış faz gerilimleri, hat gerilimleri ve faz akımının dalga şekilleri.....	11
Şekil 2.5.	(a) Doğal Örneklemeli SPWM üretilmesi, (b) A-Faz bacağı İçin üretilen SPWM sinyalleri.....	13
Şekil 2.6.	Simetrik düzenli örneklemeli modülasyon.....	15
Şekil 2.7.	MATLAB ortamında simetrik düzenli örneklemeli PWM üretimi.....	16
Şekil 2.8.	Asimetrik örneklemeli modülasyon.....	17
Şekil 2.9.	MATLAB ortamında simetrik düzenli örneklemeli PWM üretimi.....	17
Şekil 2.10.	(a) MATLAB Ortamında Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM üretilmesi, (b) A-Faz Bacağı İçin Üretilen PWM Sinyalleri.....	18
Şekil 2.11.	İki seviyeli inverter için gerilim vektör uzayı.....	20
Şekil 2.12.	Sektör-1 için $\vec{V}_{ref}$ 'in $\vec{V}_1$ , $\vec{V}_2$ ve $\vec{V}_0$ tarafından meydana getirilmesi.....	22
Şekil 2.13.	MATLAB Ortamında 3-Fazlı inverter için uzay vektör pwm üretimi....	24
Şekil 2.14.	Tek Sayıda Açık (TLN1) İçin inverter çıkış Faz-Nötr geriliminin Çeyrek dalga şekli.....	25
Şekil 2.15.	MATLAB GA Araç-kutusu kullanıcı arayüzü.....	27
Şekil 2.16.	Hesaplanan 11-Açının $M_a$ 'ya göre değişim grafiği.....	28
Şekil 2.17.	MATLAB Ortamında 3-fazlı inverter için SHEPWM üretimi.....	28
Şekil 3.1.	GUIDE hızlı başlat penceresi.....	30
Şekil 3.2.	Dosya (File) menüsü.....	30
Şekil 3.3.	Düzen (Edit) menüsü.....	31
Şekil 3.4.	Görünüm (View) menüsü.....	32
Şekil 3.5.	Yapı (Layout) menüsü.....	33
Şekil 3.6.	Araçlar (Tools) menüsü.....	33
Şekil 3.7.	Help (Yardım) menüsü.....	34

Şekil 3.8.	Matlab Gui nesne kutusu.....	35
Şekil 3.9.	Property Inspector penceresinin görünümü.....	37
Şekil 3.10.	GUI formu kodları.....	38
Şekil 3.11.	GUI Nesnesi (buton) kodları.....	39
Şekil 3.12.	Parametre atama kodları.....	40
Şekil 3.13.	Grafik çizim kodları.....	40
Şekil 3.14.	FFT Analiz aracı açılması için kullanılan butona ait kodlar.....	41
Şekil 3.15.	Varsayılan değerler onay kutusuna ait kodlar.....	41
Şekil 4.1.	Üç-fazlı İki Seviyeli İnverter ve 3-fazlı RL Yükün MATLAB Modelleri.....	42
Şekil 4.2.	Kullanıcı ara yüzünün giriş ekranı.....	43
Şekil 4.3.	Benzetim değer ekranı.....	44
Şekil 4.4.	Herhangi Bir PWM yöntemi için standart benzetim ekranı.....	44
Şekil 4.5.	Birden çok benzetimden sonra benzetim değer ekranı.....	45
Şekil 4.6.	Doğal örneklemeli SPWM için benzetim ekranı.....	47
Şekil 4.7.	Doğal Örneklemeli SPWM için FFT Analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları.....	48
Şekil 4.8.	Simetrik SPWM İçin Benzetim Ekranı.....	50
Şekil 4.9.	Simetrik SPWM için FFT Analizleri ve benzetim değer ekranı; a) Faz Gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları.....	51
Şekil 4.10.	Asimetrik SPWM için benzetim ekranı.....	52
Şekil 4.11.	Asimetrik SPWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları.....	53
Şekil 4.12.	3.Harmonik İlaveli SPWM İçin Benzetim Ekranı.....	54
Şekil 4.13.	3. Harmonik İlaveli SPWM için FFT Analizleri ve Benzetim Değer Ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları.....	55
Şekil 4.14.	Uzay Vektör PWM için benzetim ekranı.....	56

<b>Şekil 4.15.</b>	Uzay Vektör <i>PWM</i> için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; <b>a)</b> faz gerilimi FFT, <b>b)</b> hat gerilimi FFT, <b>c)</b> faz akımı FFT, <b>d)</b> benzetim sayısal sonuçları.....	57
<b>Şekil 4.16.</b>	SHE <i>PWM</i> için benzetim ekranı.....	58
<b>Şekil 4.17.</b>	Simetrik SPWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; <b>a)</b> faz gerilimi FFT, <b>b)</b> hat gerilimi FFT, <b>c)</b> faz akımı FFT, <b>d)</b> Benzetim sayısal sonuçları.....	59
<b>Şekil 4.18.</b>	$R=15\Omega$ , $L=15\text{mH}$ , $M_a=0.4$ , $f_s=1050\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=200\text{V}$ , $f=35\text{Hz}$ için Doğal Örneklemeli SPWM benzetim sonuçları.....	62
<b>Şekil 4.19.</b>	Doğal Örneklemeli SPWM için FFT analizleri, <b>a)</b> hat gerilimi, <b>b)</b> faz akımı.....	62
<b>Şekil 4.20.</b>	$R=10\Omega$ , $L=20\text{mH}$ , $M_a=0.6$ , $f_s=1350\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=100\text{V}$ , $f=25\text{Hz}$ için Simetrik SPWM benzetim sonuçları.....	63
<b>Şekil 4.21.</b>	Simetrik SPWM için FFT analizleri, <b>a)</b> hat gerilimi ve <b>b)</b> faz akımı.....	63
<b>Şekil 4.22.</b>	$R=20\Omega$ , $L=20\text{mH}$ , $M_a=0.7$ , $f_s=1350\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=150\text{V}$ , $f=40\text{Hz}$ için Asimetrik SPWM benzetim sonuçları.....	64
<b>Şekil 4.23.</b>	Asimetrik SPWM için FFT analizleri, <b>a)</b> hat gerilimi ve <b>b)</b> faz akımı.....	64
<b>Şekil 4.24.</b>	3. Harmonik İlaveli SPWM için benzetim ekranı.....	61
<b>Şekil 4.25.</b>	$R=10\Omega$ , $L=10\text{mH}$ , $M_a=0.85$ , $f_s=1650\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=120\text{V}$ , $f=33\text{Hz}$ için 3.Harmonik İlaveli SPWM benzetim sonuçları .....	65
<b>Şekil 4.26.</b>	$R=30\Omega$ , $L=20\text{mH}$ , $M_a=0.75$ , $f_s=1950\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=180\text{V}$ , $f=30\text{Hz}$ için Uzay Vektör <i>PWM</i> benzetim sonuçları.....	66
<b>Şekil 4.27.</b>	Uzay vektör <i>PWM</i> için FFT analizleri, <b>a)</b> hat gerilimi ve <b>b)</b> faz akımı.....	66
<b>Şekil 4.28.</b>	$R=10\Omega$ , $L=25\text{mH}$ , $M_a=0.98$ , $f_s=460\text{Hz}$ , $V_{\text{ref}}=200\text{V}$ , $f=20\text{Hz}$ için Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu <i>PWM</i> benzetim sonuçları.....	67
<b>Şekil 4.29.</b>	Uzay vektör <i>PWM</i> için FFT analizleri, <b>a)</b> hat gerilimi ve <b>b)</b> faz akımı.....	67
<b>Şekil 4.30.</b>	Benzetim sayısal sonuçları.....	68

## TABLÖLAR LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> İki-Seviyeli İnverter İçin Anahtarlama Durumları ve Karşılık Gelen Vektörler.....	20
<b>Tablo 2.2.</b> Sektör Belirleme Açıları.....	21
<b>Tablo 2.3.</b> Sektörler İçin Anahtarlama Sırası.....	24



## SEMBOLLER LİSTESİ

$V_{dc}$  : Doğrusal Akım Gerilimi

$M_a$  : Modülasyon İndeksi

$M_f$  : Frekans İndeksi

$V_{a,b,c,R}$  : Referans Gerilimler

$f_s$  : Anahtarlama Frekansı

$t_{k,k+1,k+2}$  : Örnekleme Anları

$T_{a,b,0}$  : Anahtarlama Süreleri

$T_s$  : Anahtarlama Periyodu

$b_n$  : Fourier Serisi Katsayısı



## **KISALTMALAR**

<b>BDE</b>	: Bilgisayar Destekli Eğitim
<b>GUI</b>	: Grafiksel Kullanıcı Ara Yüzü
<b>PWM</b>	: Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>DC</b>	: Doğrusal Akım
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>GTO</b>	: Kapıdan Kapanabilir Silikon Kontrollü Doğrultucu
<b>BJT</b>	: Bipolar Jonksiyon Transistörü
<b>IGBT</b>	: Yalıtılmış Kapılı Bipolar Transistör
<b>MOSFET</b>	: Metal Oksit Yarı-İletken Alan Etkili Transistörü
<b>IGCT</b>	: Entegre Kapı Komütatörlü Tristör
<b>SPWM</b>	: Sinüs Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>SVPWM</b>	: Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>TH-SPWM</b>	: Üçüncü Harmonik İlaveli Sinüzoidal PWM
<b>SHE-PWM</b>	: Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM
<b>DSP</b>	: Sayısal İşaret İşleme
<b>ROM</b>	: Yalnızca Okunabilir Bellek
<b>FFT</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>GA</b>	: Genetik Algoritma
<b>RL</b>	: Yük

## 1. GİRİŞ

Günümüzde bilginin, bilgiye ihtiyaç duyan birey/öğrenci sayısının, maliyetin ve her alanda nitelikli bireylere olan ihtiyacın artması, geleneksel yöntemlerle yapılan eğitim-öğretimde çeşitli sorunları da beraberinde getirmiştir. Kullanılan geleneksel yöntemler ve eski müfredatlar ile eğitim-öğretim sürecinde karşılaşılan sorunlar ve yeni ihtiyaçlar karşılanamadığından çok ciddi aksaklıklar meydana gelmiştir. Söz konusu süreçte harcanan emek, zaman ve paraya rağmen devletlerin her alanda ihtiyaç duyduğu nitelikli birey ihtiyacı karşılanamadığı için yapılan bütün işlerde kalite azalmaktadır. Ayrıca çağımızda okul ve öğretmen kavramı da değişmiştir. Okul öğrencinin bilgi aldığı tek merkez ve öğretmen de bilgi edinilebilecek tek kaynak olmaktan çıkmıştır. Eğitim artık sınıflarda anlatılan sözlü ders değil de öğrencinin yaparak ve yaşayarak daha kalıcı öğrenmeler kazanmasını ve bu süreçte aktif olmasını gerektirmektedir [1].

### 1.1. Bilgisayar Destekli Eğitim Programları ve Avantajları

Bu sorunların üstesinden gelebilmek için eğitim ve öğretimin bütün alanlarında teknolojinin kullanımı yani Bilgisayar Destekli Eğitim (BDE) zorunlu hale gelmiştir. Dünyada 1970’li yıllardan beri bilgisayar destekli eğitim çalışmaları başlamıştır. Eğitim-öğretimde gerekli teknolojilerin kullanılması da bilişim çağındaki değişim ve yeniliklere ayak uydurmanın yani bilgi toplumu olmanın bir gereğidir. Bununla birlikte, bilgi ve teknoloji dünyası günümüzde olağanüstü hızla gelişmekte ve bu gelişmeye bağlı olarak da bilgi ve teknolojinin geçerlilik süresi kısalmaktadır. Bu durumda eğitim programlarının, eğitim araçlarının, eğitim-öğretim yöntem ve tekniklerinin sürekli olarak yenilenmesi gerekmektedir. Bu durum bilgisayar destekli yeni eğitim teknolojilerinin geliştirilmesini, örgün ve yaygın eğitime sokulmasını da zorunlu kılmıştır.

Herhangi bir alanda yapılan BDE’de, kullanılacak programların çeşitleri; donanım ve yazılım olanaklarına, konunun ve öğrencilerin özelliklerine ve süreye göre hassasiyetle belirlenmelidir. BDE programları dört başlık altında incelenebilir.

- **Alıştırma ve Tekrar Programları:** En yaygın olarak kullanılan uygulamalardır. Bu sayede işlenmiş konularla ilgili alıştırma ve tekrar yapılabilir. Ders işlendikten sonra veya bilgi verici materyaller öğrenciye sunulduktan sonra kullanılır.

- **Bire Bir Öğretim Programları:** En ideal öğrenme şekli olan bir öğretmen ve bir öğrenci çalışması mümkün olmadığı durumlarda kullanılan programlardır. Bir nevi bilgisayar öğretmen yerine geçerek, bir konu ile ilgili olgu, yöntem, kavram, ilke ve genellemeleri öğrenciye sunmasıdır.
- **Problem Çözmeye Yönelik Programlar:** Öğrencilere karşılaşılabilecekleri problemleri çözmeye becerisi kazandırmak için kullanılır. Ayrıca, problem çözümü becerileri yanında problem çözmek için gerekli olan bilgiler de verilir.
- **Benzetim (Simülasyon) Programları:** Gerçek hayattaki bir takım olayların ve durumların modellenmesi ile onlar hakkında bilgilenmeyi sağlayan güçlü bir öğretim tekniği olarak kabul edilmektedir. Bu tür programlar, öğretimi zenginleştiren, öğrencileri gerçek hayata hazırlayan ve bilgi ve becerileri yaparak ve yaşayarak kazanılmasını sağlayan programlardır. Mevcut olanaklarda gerçekleştirilmesi mümkün olmayan, yapılması itibariyle tehlike arz eden, maliyeti yüksek olan deneyler ve tekrarlanması zor olan deneyler gerçekleştirilirken benzetim programlarına başvurulabilir [2-5].

Birçok alanda olduğu gibi BDE, mühendislik alanındaki eğitimlerde de çok yaygın olarak geliştirilmeye ve kullanılmaya başlamıştır. Mühendislik alanında kullanılan materyallerinin, eğitim ihtiyacı ve kalitesini sağlamak için yeterli donanıma sahip olmaları gerekmektedir. Çünkü verilen teorik eğitim ancak pekiştirici bir uygulamayla kalıcı olacak şekilde öğrenilebilir. Bunu sağlamanın en önemli yolu laboratuvarlarda yapılan çalışmalardır. Laboratuvar çalışmaları, teorik bilgilerin daha iyi anlaşılmasını ve pekiştirilmesini sağlamaktadır. Fakat gerçek laboratuvar ortamı her zaman ulaşılabilir ve güvenli olma imkânlarını sağlayamayabilir. Bu sebeple sanal laboratuvarlar başka bir deyişle benzetim programları bu eksikliği giderebilmektedir. Bu tür uygulamalarda, gerçek laboratuvar ortamı ile birebir benzer deneyler yapılabilen ve istenilen sonuçlar alınabilmektedir. Ayrıca zamandan ve mekândan bağımsız olarak çalışma yapılabilir. Bunlarla beraber, gerçekleştirilmesi tehlike arz eden uygulamalar, benzetim uygulamaları ile rahatlıkla yapılabilir. Maliyeti yüksek olan deney takımları gibi temin edilmesi zor olan materyallerin yerini de ancak benzetim uygulamaları doldurabilir.

Benzetim ortamları her ne kadar birçok alanda kolaylıklar sağlasa da bazen de yetersiz kalabilmektedirler. Çoğu zaman da gerçek laboratuvar ortamının yerini tutamamaktadırlar. Bunun nedenleri arasında, birebir eğitimin gerçekleşmemesi, bilgisayarla çalışmanın

getirdiği dezavantajlar, geliştirilen uygulamaların yetersiz olması, sınıf ortamının olmaması gibi etkenler gösterilebilir.

## 1.2. Literatür Taraması

Mühendislik alanındaki eğitim-öğretim faaliyetlerinde benzetim ortamları oluşturmak amacı ile yaygın olarak kullanılan programlama dillerinden biri MATLAB'dır. MATLAB farklı mühendislik dallarına yönelik birçok farklı Araç Kutusuna (Toolbox) sahiptir. Bu araç kutularından “*Simulink*” ve “*SimPower Systems*”, Elektrik-Elektronik ve Mekatronik mühendislikleri alanlarında BDE tabanlı materyaller oluşturmak için çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu araç kutuları yardımı ile oluşturulan benzetim ortamları için gerekli olan kullanıcı ara yüzleri ise MATLAB GUI (Grafiksel Kullanıcı Ara yüzü) kullanılarak oluşturulmaktadır. Elektrik-Elektronik ve Mekatronik mühendislikleri alanlarında oluşturulan benzetim ortamları ile ilgili yapılan literatür taramasında, kullanıcı ara yüzü GUI kullanılarak oluşturulan bir çok çalışmaya rastlanmıştır.

Sanal elektrik makinaları laboratuvarının oluşturulması isimli doktora tez çalışmasında, elektrik makinaları laboratuvar dersine yardımcı olmak amacıyla senkron ve asenkron makine uygulamalarına yönelik bir sanal elektrik makinaları laboratuvarı web tabanlı olarak oluşturulmuştur [6-8]. Tosun [9], güç sistemleri eğitimi için MATLAB GUI tabanlı bir yük akış simülatörü hazırlamıştır. Bu simülatör sayesinde bara empedans ve bara admitans matrisleri yardımıyla yük akış analizleri yapılmıştır. Web tabanlı elektronik eğitimi uygulaması isimli yüksek lisans tezinde ise, ac/dc doğrultucu ve dc/dc konverter konularını kapsayan bir web tabanlı uygulamayı Flash MX ve Action Script dilleriyle gerçekleştirmiştir [10]. Mitchell [11], frekans bölgesinde öğrenme kontrolörü tasarımı için MATLAB ara yüzü çalışmasında, kontrol sistemleri dersinde öğrencilerin dersi ara yüz yardımıyla daha iyi anlamaları ve pekiştirmeleri için bir ara yüz geliştirmiştir. Sinyal İşleme dersi için [12]'da yapılan MATLAB GUI tabanlı bir eğitim aracı tasarımı isimli çalışmada, sinyal işleme dersinde öğrencilerin görsel ara yüz yardımıyla daha etkin öğrenmelerini sağlamayı hedeflemişlerdir. Dalgacık dönüşümü tabanlı gürültü azaltma tekniklerinin performanslarının GUI tabanlı karşılaştırılması isimli çalışmada, uygulanan tekniklerin performansları MATLAB GUI sayesinde görsel olarak değerlendirmişlerdir [13]. MATLAB GUI kullanarak step motorun değişken oran tabanlı mikro adımlarının incelenmesi isimli [14]'de gerçekleştirilen çalışmada, MATLAB/*Simulink*'ten de faydalanarak hem donanımsal hem de yazılımsal bir laboratuvar oluşturulmuştur. Vural

[15], elektrik enerji kalitesi ölçümleri için bir analizör prototipi geliştirilmesi isimli yüksek lisans tezinde MATLAB/*Simulink* tabanlı web erişimli bir ara yüz uygulaması geliştirmiş ve enerji kalitesini uzaktan ölçülmesini sağlamıştır. [16]'da yapılan güç elektroniği konvertörlerinin benzetimi için MATLAB GUI ara yüzü isimli çalışmalarında güç elektroniği dönüştürücülerinin davranışlarının analizini gerçekleştirmişlerdir. Üç seviyeli inverter beslemeli motor hızı kontrol sistemi için MATLAB benzetimi geliştirilmesi isimli çalışmalarında, bu tez çalışması ile benzer olarak üç seviyeli inverter beslemeli motorun hız kontrol ve analizini gerçekleştirmişlerdir [17]. Güç sistemleri ve enerji depolama ünitelerinde küçük sinyal karakteristikleri eğitim aracı için MATLAB GUI paketi isimli çalışmada [18], rüzgâr ve enerji kapasite sistemlerindeki kapasitör ve konvertörler için eğitici bir ara yüz geliştirmişlerdir. Irmak [19], uzaktan eğitim amaçlı internet tabanlı laboratuvar uygulaması isimli doktora tezinde, elektrik makinaları eğitimi için uzaktan erişimli bir benzetim ortamı oluşturmuştur. Web tabanlı sanal güç elektroniği laboratuvarı isimli çalışmalarında, dc/dc konvertörler için bir benzetim ortamı oluşturmuşlardır [20]. Akçayol ve Yiğit [21], statik konvertörlerin darbe genişlik modülatörü için bilgisayar tabanlı bir eğitim aracı isimli çalışmalarında, sinüs PWM ve harmonik ilaveli PWM teknikleri için bir grafiksel kullanıcı ara yüzü geliştirmişlerdir. Güç elektroniği devreleri için bir eğitim aracı isimli çalışmada, buck konvertör devreleri için bir uygulama [22]'de geliştirmişlerdir. Hurley ve Lee [23], bir web tabanlı güç elektroniği laboratuvarının geliştirilmesi, uygulanması ve değerlendirilmesi isimli çalışmalarında, web tabanlı bir dc/dc buck konverter benzetim yazılımı geliştirmişlerdir. Kayışlı, Tuncer ve Poyraz [24], temel dc/dc dönüştürücü devreler ve aktif güç faktör düzeltme uygulamaları için bir eğitim aracı isimli çalışmalarında, dc/dc dönüştürücü devreler için MATLAB GUI tabanlı bir eğitim aracı geliştirmişlerdir. [25]'de yapılan güç sistemleri koruma eğitiminde koruyucu röleler için bilgisayar tabanlı bir test sistemi isimli çalışmada MATLAB GUI tabanlı bir deney ortamı oluşturup, farklı rölelerin performansları ve sorunları değerlendirmişlerdir. Hernandez, Rosa, Baez-Lopez ve Enriques [26], güç laboratuvarı: elektrik makineleri ve güç elektroniği öğretim aracı isimli çalışmalarında, dc motor ve ac/dc dönüştürücüler için bir benzetim uygulaması geliştirmişlerdir. [27]'de yapılan güç elektroniği dersi için java teknolojileri tabanlı benzetim araçları isimli çalışmada, kontrolsüz ve kontrollü ac/dc dönüştürücüler için java tabanlı bir devre eğitimi aracı geliştirmişlerdir. Pires ve Silva [28], MATLAB/*Simulink* kullanarak güç elektronik PWM ac/dc dönüştürücüleri öğretimi için modelleme ve benzetim uygulaması geliştirmişlerdir. [29]'da asenkron motor rotor ve

stator sargılarının yerleştirilmesinde oluşan hataların tespiti için LabVIEW GUI tabanlı sanal bir elektrik makinesi laboratuvarı oluşturulmuştur.

### 1.3. Tezin Amacı

Gerilim kaynaklı üç-fazlı iki-seviyeli inverterler özellikle içerisinde motor bulunan konut ve endüstriyel uygulamalar ve yenilenebilir kaynaklardan şebeke gerilimi elde etme uygulamalarında yaygın ve zorunlu olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple Elektrik-Elektronik ve Mekatronik mühendislikleri alanlarında bu konuyla ilgili eğitimi-öğretim çok önem arz etmektedir.

Endüstride ve eğitim laboratuvarlarda kullanılan mevcut inverterler kapalı bir kutu şeklinde olup sadece bir PWM anahtarlama yöntemi ile sadece bir uygulama alanına uygun çalışacak şekilde imal edilmektedir. Örneğin bir atık su pompa motoru için kullanılan inverter ile solar sistemlerde kullanılan inverterlerin güç devresi aynı olsa bile kullanılan kontrol ve PWM anahtarlama teknikleri tamamen farklı olmaktadır. Kullanıcı sadece bu PWM yöntemini kullanarak özel bir uygulama için üretilen inverter giriş ve çıkış akım ve gerilim değerlerini sayısal olarak analiz edebilmektedir. Üretici tarafından seçilen PWM yönteminin uygulama alanı için uygun olup olmadığını anlayamamaktadır. Üstelik inverterin kullanıldığı uygulamadaki olumsuz değişikliklerde PWM yöntemine müdahale edemediğinden sistemin verimin düşmesini önleyememektedir. Ayrıca bu sabit PWM yöntemini kullanan inverterin başka bir uygulamalar için uygun olup olmadığına da tam olarak karar verememektedir.

Bu tez çalışmasında; üç-fazlı iki-seviyeli bir inverterin altı tane farklı anahtarlama teknikleri çalıştırılması ve dalga şekillenin analizi üzerine MATLAB/ *Simulink* ve *SimPower Systems* tabanlı bir benzetim ortamının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Benzetim ortamının kullanıcı ara yüzü MATLAB GUI kullanılarak geliştirilip, öğrencilerin zamana ve mekâna bağlı kalmadan, bilgisayar üzerinden farklı değerlerdeki yükü besleyen inverterin farklı anahtarlama teknikleri çalıştırılması üzerine deney yapımları ve çıkarımlarda bulunmaları sağlanacaktır. Benzetim ortamının hedef kitlesi ulusal ve uluslararası özellikle yüksek lisans ve doktora öğrencileridir. Bununla birlikte son sınıf lisans öğrencilerine de basit PWM tekniklerini öğretmek için benzetim ortamını kullanabilir.

Geliştirilen benzetim ortamının sağlayacağı avantajlar aşağıda sıralanmıştır;

- PWM tekniklerini öğrenmede gerçekte pahalı, tehlikeli ve zor bulanabilecek deney ortamı, ucuz ve etkili olarak sağlanmış olacaktır
- Farklı öğrenme kademesindeki ve kapasitesindeki öğrenciler için tamamen bağımsız eğitim-öğretim ortamı sağlanacaktır.
- Aynı veya farklı ac çıkış gerilim değerlerinde altı farklı PWM yöntemi için kullanıcı; inverterin girişindeki dc-hat gerilim değeri kolaylıkla belirleyerek kıyaslama yapabilecektir. Buna bağlı olarak ayrıca dc-hatta kullanılacak kondansatörlerin gerilim değerleri hakkında çıkarım yapabilecektir.
- Aynı veya farklı ac çıkış gerilim değerlerinde altı farklı PWM yöntemi için kullanıcı; inverterin çıkış gerilim ve yük akımlarının Toplam Harmonik Bozulma (THD) değerlerini belirleyebilecektir. Bu sonuçlardan yola çıkarak anahtarlama frekansının seçimi ve ayrıca inverter çıkışında filtre kullanıp kullanılmayacağına karar verebilecektir.
- Herhangi bir çıkış gerilimi için kullanıcı, yükün direnç (R) veya indüktans (L) değerini değiştirdiğinde çıkış geriliminin hiç etkilenmeyeceğini ancak çıkış akımının ve onun harmonik içeriğinin değişebileceğini görebilecektir.

Geliştirilen benzetim ortamının dezavantajları ise aşağıda verilmiştir;

- Bütün BDE tabanlı benzetim ortamlarında olduğu gibi, bu deney ortamının da gerçek deney ortamının verdiği ciddiyet ve etkileşimden uzak olmasıdır. Kullanıcının bir ac yükü (RL veya motor) besleyen üç-fazlı invertere bir bilgisayar ve sayısal işaret işlemci (DSP) üzerinden PWM sinyallerini göndermesi öğrenmeyi daha etkili ve kalıcı yapacaktır.

#### 1.4. Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasında MATLAB/*Simulink* ve *SimPower Systems* tabanlı iki seviyeli inverter anahtarlama teknikleri için interaktif bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Benzetim ortamının kullanıcı ara yüzü ise MATLAB/ GUI kullanılarak kullanımı basit olacak şekilde geliştirilmiştir. Giriş bölümünde mühendislik eğitiminde BDE'nin önemi açıklanarak, gerçekleştirilen benzetim ortamıyla ilgili literatür taraması yapılarak benzer çalışmalar incelenmiştir. İlave olarak tez çalışmasının amacı belirlenerek, geliştirilen benzetim ortamının getireceği avantajlar ve dezavantajı açıklanmıştır. İkinci bölümde bu

tez çalışmasında üç-fazlı iki-seviyeli inverter ve altı tane farklı PWM tekniği hakkında teorik bilgiler verilerek, altı PWM yönteminin MATLAB/*Simulink* modelleri oluşturulmuştur. Üçüncü bölümde MATLAB programlama dilinin GUI editörü hakkında bilgiler verilmiş ve GUI editörün kullanımından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise geliştirilen benzetim ortamının kullanımı anlatılarak alınan sonuçların nasıl kaydedileceği hakkında bilgiler verilmiştir. İlave olarak altı PWM yöntemi için tamamen aynı ve kısmen farklı parametreler girilerek, inverterin çıkış gerilimleri, yük akımları ve bu dalga şekillerinin harmonik analizi ile ilgili grafiksel ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Sonuç bölümünde ise benzetim ortamı ve alınan sonuçlar ile ilgili sonuçlar tartışılarak, daha sonraki çalışmalar için benzetim ortamının gerçeğe uygun olarak nasıl geliştirileceği hakkında öneri verilmiştir.

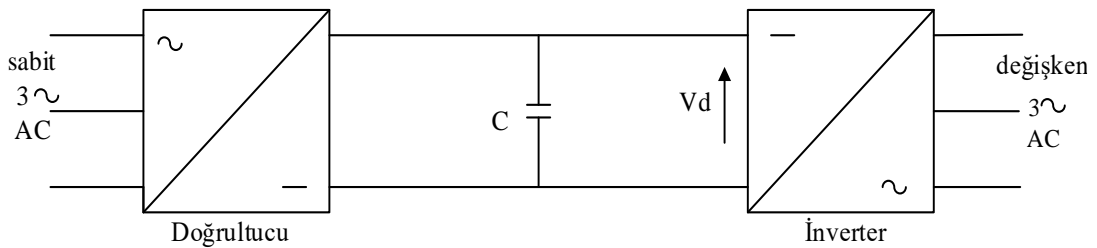


## 2. İNVERTERLER

İnverterler, dc bir kaynaktan yüke genellikle değişken frekans ve genlikte ac gerilim/güç sağlayan ve endüstride çok yaygın olarak kullanılan güç elektroniği devreleridir. Uygulamaya bağlı olarak, üretilen ac gerilimin genlik veya frekansı sabit de tutulabilir. İnverterler endüstride; değişken hızlı motor sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma, elektronik cihazların güç kaynakları, aydınlatma, yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisi elde etme, yüksek gerilim doğru akım iletim, kompanzasyon ve harmonik filtreleme gibi uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aküler, güneş pilleri, yakıt hücreleri vb. diğer dc kaynaklar inverterlere giriş olarak kullanılabilir [30]. Bunların dışında tek/üç-fazlı şebekeden beslenen bir/üç-fazlı kontrollü veya kontrolsüz doğrultucuların çıkışları invertere giriş olarak verilebilir. İnverterler çıkış geriliminin faz sayısına göre tek ve üç fazlı olarak sınıflandırılabilirdiği gibi, beslendikleri kaynağın türüne göre de *Akım Kaynaklı* ve *Gerilim Kaynaklı* inverterler olarak ta ikiye ayrılmaktadır [31].

### 2.1. Gerilim Kaynaklı İnverterler

Bu tür inverter küçük veya ihmal edilebilir bir empedansa sahip bir dc gerilim kaynağından beslenmektedir. Çıkış geriliminin dalga şekli tamamen yükten bağımsız ve yük akımının dalga şekli ve büyüklüğü yük empedansına bağlıdır. Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi inverter, bir dc gerilim kaynağından beslendiği için çıkış gerilimi her zaman dc gerilimin seviyesine bağlıdır [32]. Endüstriyel uygulamalarda, ac şebeke doğrultulduktan sonra değeri çok büyük olan paralel C kondansatörü üzerinden düzeltilmekte ve invertere sabit bir dc gerilim beslemesi yapılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan inverter türüdür [33].

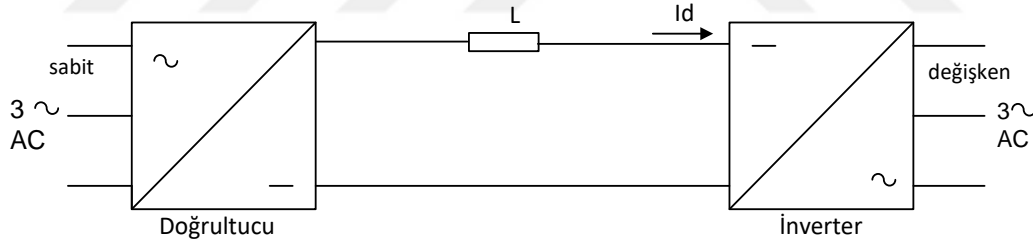


Şekil 2.1. Gerilim kaynaklı inverter

Gerilim kaynaklı inverterlerde doğru gerilim daima bir yöne sahiptir ve gücün ters dönüşü doğru akımın yönünün ters dönüşü ile sağlanmaktadır. Bu nedenle endüktif yük durumlarında devrenin sorunsuz çalışması için, bu inverterlerde serbest dolaşım diyotlu GTO, BJT, IGBT, güç MOSFET'leri ve IGCT'ler gibi yarı iletken anahtarlar kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda akım kaynaklı inverterlere göre daha çok tercih edilir ve uygulama alanının % 90 'ını oluşturmaktadırlar [34].

## 2.2. Akım Kaynaklı İverter

Bir gerilim kaynağı, bir seri endüktans bağlanarak bir akım kaynağına dönüştürülebilir ve daha sonra istenen akımı elde etmek için gerilim değiştirilebilir. Bu tür inverter; yüksek empedanslı bir dc gerilim kaynağından ayarlanabilir bir akım ile yani akım kaynağından beslenmektedir. Çıkış akımının genliği yükten bağımsız ve yük geriliminin büyüklüğü ve dalga şekli yük empedansının niteliğine bağlıdır [32]. Şekil 2.2' den de görüldüğü gibi şebeke gerilimi doğrultulduktan sonra çok büyük bir seri L endüktansı üzerinden sabit fakat ayarlanabilir bir akım kaynağı oluşturularak invertere doğru akım beslemesi yapılmaktadır [34]. Bu inverterler çok büyük güçlerde kullanılmaktadır.



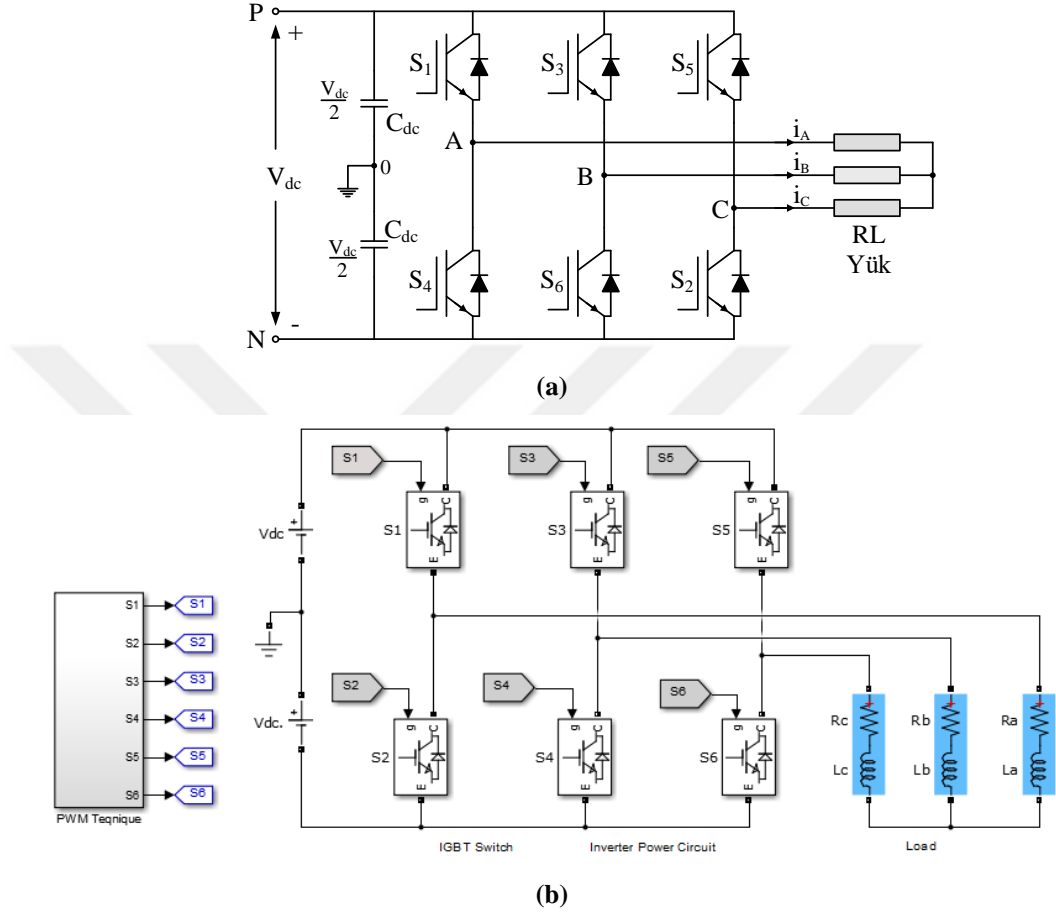
Şekil 2.2. Akım kaynaklı inverter

Bu tez çalışmasında farklı anahtarlama teknikleri için, üç-fazlı iki-seviyeli gerilim kaynaklı inverterin çıkış dalga şekillerinin analizi yapıldığı için burada sadece üç-fazlı gerilim kaynaklı inverter göz önüne alınacaktır.

## 2.3. Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı İverter

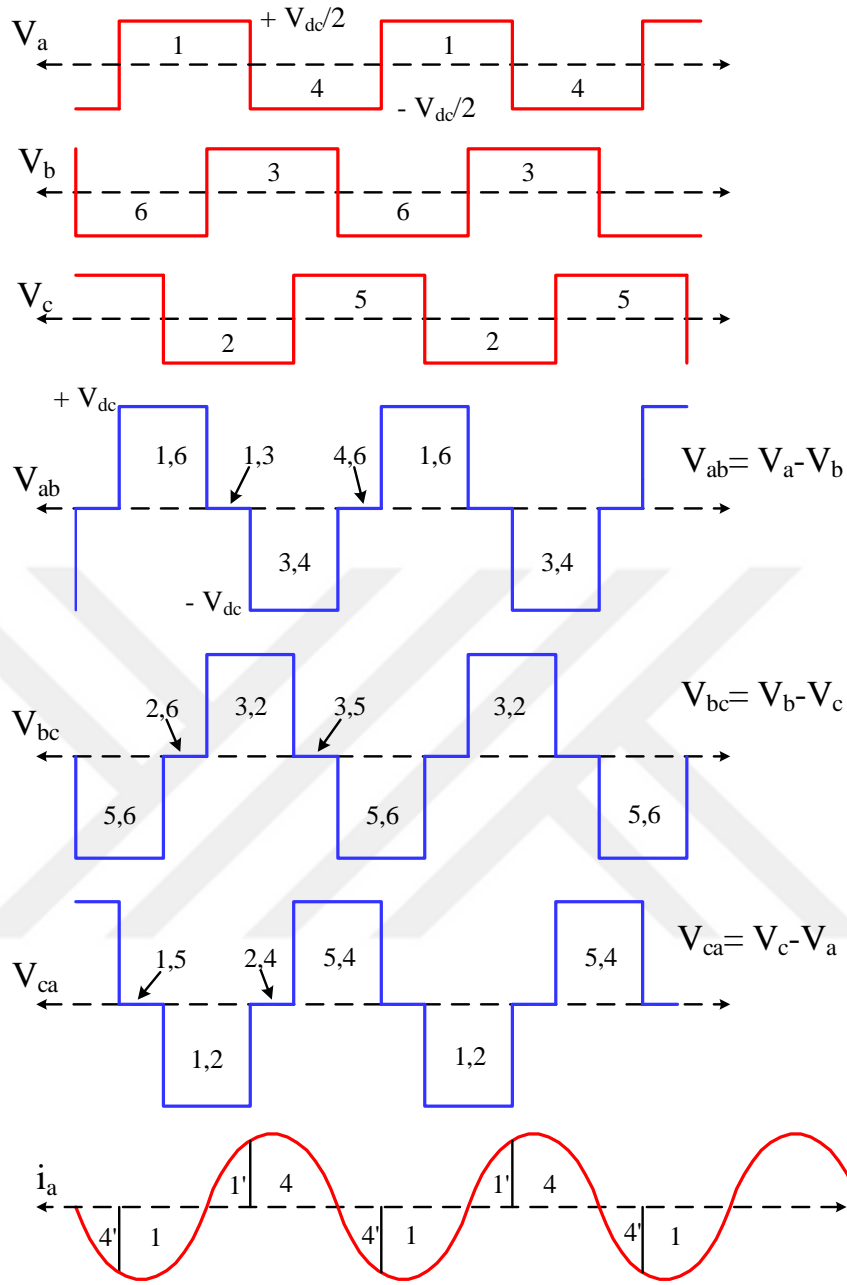
Üç fazlı inverter, birbiri ile uyum içinde çalışan üç faz bacağından meydana gelir. Şekil 2.3(a)'da üç-fazlı iki seviyeli bir gerilim kaynaklı inverter devresi gösterilmiştir. Bu devrede 6 adet IGBT denetimli anahtar ve aynı faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlar kesime sokulduğu zaman endüktif akımın üzerinden geçmesi için 6 adet boşluk diyotu kullanılmıştır. Şekil 2.3(a)'daki her faz bacağı bağımsız bir şekilde çalışır. Güç,

şebekeden kondansatöre doğru diyotlar, kondansatörden şebekeye doğru ise denetimli anahtarlar yardımı ile akmaktadır [29]. Şekil 2.3(a)'daki inverter için MATLAB/SimPower Systems blokları kullanılarak oluşturulan model ise Şekil 2.3(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Üç fazlı iki seviyeli inverter devresi, (b) İnverterin MATLAB/SimPower Systems modeli

Şekil 2.3'te ki inverterin üç-faz bacağındaki anahtarlar; inverter çıkışında  $120^\circ$  faz farkına sahip üç-fazlı gerilim elde edilecek şekilde anahtarlanır. Bu durumda Şekil 2.4'de görüldüğü gibi çıkış faz-nötr gerilimleri  $-V_{dc}/2$ ,  $+V_{dc}/2$  olmak üzere iki-seviyeli ve çıkış faz-faz gerilimleri  $-V_{dc}/2$ ,  $0$ ,  $+V_{dc}/2$  olmak üzere üç-seviyeli kare dalga şekline sahip olup çok sayıda harmonik içermektedir [30]. Bununla birlikte inverterin gerilim kaynaklı olmasından dolayı bu çıkış gerilim dalga şekilleri yükten bağımsızdır. İlave olarak inverterin bir RL yükünü beslemesi durumunda endüktansın bir alçak geçiren filtre olmasından dolayı yük akımının dalga şekli ise Şekil 2.4'de görüldüğü gibi sinüs veya düşük harmonikli bir sinüs olmaktadır [32].



Şekil 2.4. Üç-fazlı inverterin; çıkış faz gerilimleri, hat gerilimleri ve faz akımının dalga şekilleri

## 2.4. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)

Çıkışında değişken genlik ve frekansa sahip bir ac gerilim elde edebilmek inverterden istenilen en önemli özelliktir. Bununla birlikte çıkış dalga şekillerinin harmonik içeriğinin düşük yani sinüzoidal olması istenir. Ancak iki-seviyeli inverterlerin çıkış gerilim dalga şekilleri kare veya sözde kare dalga olup, bu dalga şekillerinin harmonik analizinde ana harmoniğe çok yakın frekanslarda genlikleri büyük harmonikler ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak yüksek toplam harmonik bozulmalı (THD) çıkış gerilimleri oluşmaktadır. Bu

durum yükü ve çalışmasını çok etkilemektedir. İnverter çıkış geriliminin ana harmoniğinin genliğini kontrol etmek ve aynı zamanda harmonik bileşenlerin etkisini azaltmak veya yok etmek için Darbe Genişlik Modülasyon (PWM) teknikleri kullanılmaktadır [35].

PWM tekniklerinde hedef; kare dalga şeklinde anahtarlama sinyalleri oluşturmak ve bu sinyallerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkıştaki dalga şeklinin hem ana harmoniğinin genliğini kontrol etmek hem de THD değerini düşürmektir. Böylece çıkış geriliminin genliği, frekansı ve harmonik içeriklerinin büyüklüğü aynı anda anahtarlama sinyalleri ile kontrol edilebilecektir. Yükün gerilim ve akım isteklerine daha hızlı cevap verebilmek amacıyla, anahtarlama sinyallerinin bir periyottaki sayısı yani anahtarlama frekansı artırılabilir. Bu durumda anahtarlama harmoniklerinin frekansı yükseltildiği için inverter çıkışının THD değeri de azalmaktadır. Ancak anahtarlama frekansının artması, bu kez anahtarlama kayıplarının artmasına sebep olur. Bundan dolayı en uygun PWM yöntemi seçilirken hem ana harmonik kontrolü ve düşük dereceli harmonik akımların engellenmesi sağlanmalı hem de anahtarlama kayıpları minimum yapılmalıdır [30, 32]. Üç-fazlı inverterlerin çıkış dalga şekillerinde ise çıkış gerilimleri arasında  $120^0$  faz farkı bulunduğundan, PWM sinyalleri arasında da  $120^0$  faz farkı bulunmalıdır. PWM tekniklerinin en yaygın olarak kullanılanları aşağıdaki gibidir [30, 36].

- Sinüzoidal PWM (SPWM)
  - a) Doğal örneklemeli SPWM
  - b) Düzenli örneklemeli SPWM
    - i. *Simetrik SPWM*
    - ii. *Asimetrik SPWM*
- Üçüncü Harmonik İlaveli Sinüzoidal PWM (TH-SPWM)
- Uzay Vektör PWM (SVPWM)
- Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM (SHE-PWM)

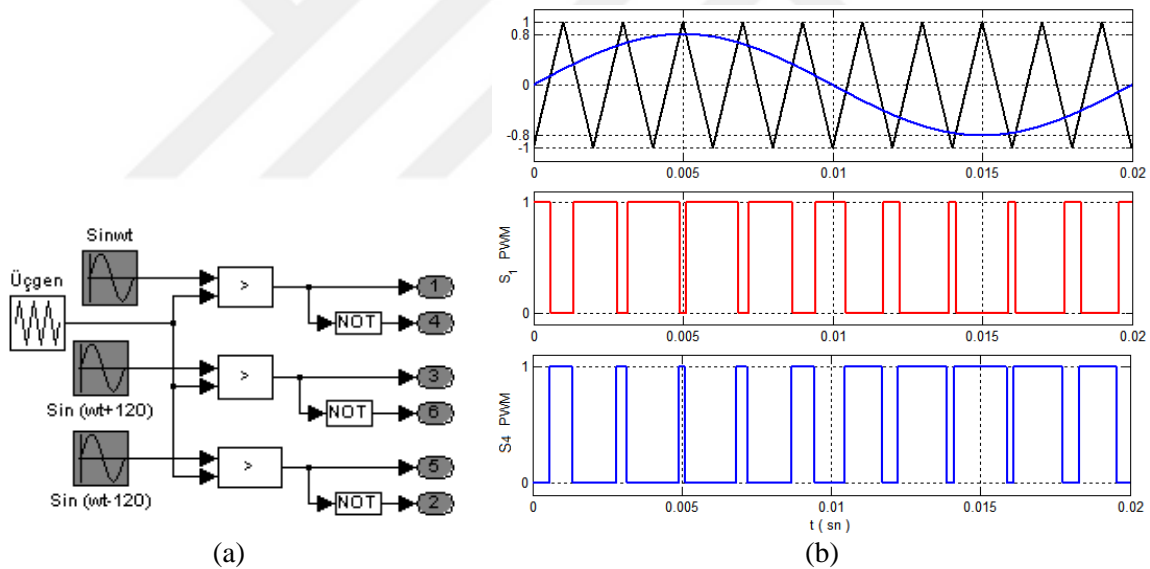
## 2.5. Sinüzoidal PWM Tekniği (SPWM)

SPWM tekniği inverter çıkışında gerilimin ana harmoniğini kontrol ve harmonikleri elimine etmek için kullanılan en eski tekniklerden biridir. Basit olması nedeniyle akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu teknikte modülasyon sinyali olarak bir sinüs dalgası kullanıldığı için Sinüzoidal PWM (SPWM) olarak adlandırılmaktadır. Referans sinüs sinyali ile üçgen taşıyıcı sinyal karşılaştırılarak

anahtarlar için PWM işaretleri üretilmektedir. Sinüzoidal PWM tekniği doğal örneklemeli, simetrik düzenli örneklemeli ve asimetrik düzenli örneklemeli olarak sınıflandırılmaktadır.

### 2.5.1. Doğal Örneklemeli SPWM

Doğal örneklemeli SPWM’de anahtarlama anlarını belirlemek için bir üçgen taşıyıcıyı dalga ile bir modülasyon sinüs dalgası ile doğrudan karşılaştırılır. Böylece örnekleme noktalarının kendiliğinden doğal olarak seçilmiş olur. Şekil 2.3’deki üç-fazlı iki-seviyeli inverter için gerekli SPWM sinyallerinin MATLAB ortamında üretilmesi Şekil 2.5(a)’da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi aralarında  $120^\circ$  şer derece faz farkı bulunan üç tane sinüsü dalgası bir üçgen taşıyıcı ile karşılaştırılarak anahtarlar için anahtarlama sinyalleri oluşturulmuştur. Şekil 2.3’deki inverterin A-faz bacağı için, sinüs üçgen karşılaştırılması ve bu faz bacağındaki  $S_1$  ve  $S_4$  anahtarların için üretilen PWM sinyalleri Şekil 2.5(b)’de gösterilmiştir [32,33].



Şekil 2.5. (a) Doğal örneklemeli SPWM üretilmesi, (b) A-faz bacağı için üretilen SPWM sinyalleri

Şekil 2.5’te modülasyon sinyali; genliği  $V_R$  ve frekansı  $f_0$  olan bir sinüs dalgasıdır. Taşıyıcı dalga ise birim genliğe sahip ve frekansı  $f_s$ ; inverterin anahtarlama frekansı olan bir üçgen dalgadır. Şekil 2.5(a)’da, eğer modülasyon sinyali taşıyıcı sinyalden daha büyük ise taşıyıcıya karşılık gelen aktif anahtar iletimde ve eğer daha küçük ise kesimde olacaktır. Modülasyon sinyalinin genliği ve frekansı, sırası ile inverter çıkış geriliminin ana harmoniğinin genliğini ve frekansını belirlemektedir [32,36]. SPWM tekniğinde

modülasyon indeksi  $M_a$  ve frekans indeksi  $M_f$  sırası ile denklem (2.1) ve denklem (2.2)'deki gibi ifade edilir.

$$M_a = \frac{V_R}{V_C} \quad (2.1)$$

$$M_f = \frac{f_s}{f_0} \quad (2.2)$$

İnverterin ana harmonik bileşeninin genliğinin  $M_a$  ile doğrusal değiştiği aralığa lineer bölge denir. Bu bölgede;  $0 \leq M_a \leq 1$  aralığında bir değer alır. Lineer bölgede SPWM tekniği ile çıkış geriliminin ana bileşeni en fazla  $M_a=1$  değerine kadar artırılabilir. Modülasyon indeksinin 1.0'ın üstüne çıktığı bölge; aşırı modülasyon bölgesi olarak adlandırılır. Sabit dc gerilimde inverter çıkış gerilimi yetersiz kalırsa aşırı modülasyon bölgesine çıkılabilir. Ancak bu bölgede çalışmanın en büyük dezavantajı inverter çıkış geriliminde daha önceden olmayan harmonik bileşenlerin ortaya çıkmaktadır.

SPWM tekniğinde inverter çıkış geriliminin harmonik içeriğini denetlemek için frekans indeksi  $M_f$  değiştirilir. Çünkü inverter çıkış gerilim dalga şeklindeki harmonikler  $M_f$ 'nin katları ve bunun yan bantlarında ortaya çıkmaktadır. Anahtarlama frekansı artırılarak  $M_f$ 'nin büyük değerlerde seçilmesi ile meydana gelen harmonik bileşenler ana harmonikten uzaklaştırılır. Bir başka deyişle ana harmonik bileşenine etkileri azalır. Ancak yüksek anahtarlama frekansı yüksek anahtarlama kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır. Üç fazlı sistemlerde  $M_f$ 'nin üçün katları şeklinde seçilmesi tavsiye edilir. Böylece inverterin fazlar arası çıkış geriliminde üç ve üçün katları harmoniklerin doğrudan eliminasyonu sağlanmış olur [34].

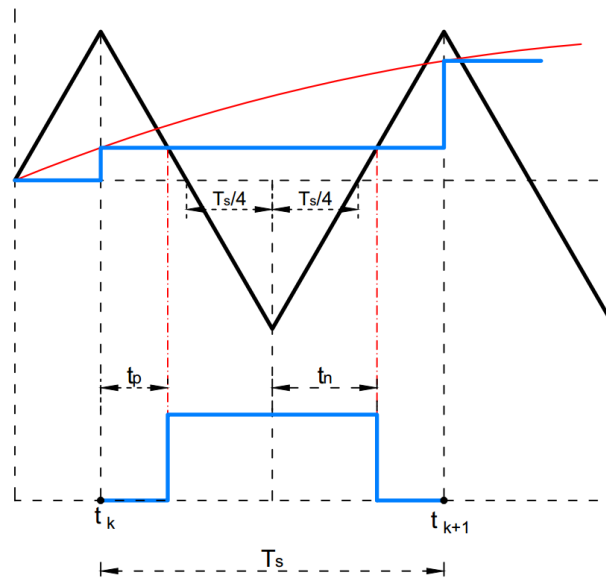
### 2.5.2. Düzenli Örneklemeli SPWM

Doğal örneklemeli SPWM'de, üçgen bir taşıyıcı dalga doğrudan sinüzoidal bir referans dalga ile karşılaştırılarak anahtarlama anları veya örnekleme noktaları ve dolayısı ile darbe genişlikleri kendiliğinden doğal olarak belirlenmektedir. Geleneksel doğal örneklemeli SPWM sistemi analog kontrol tekniği kullanmaktadır. Analog kontrol güvenilirlik, yinelenebilirlik, doğruluk ve kararlılık problemleri ile birlikte yüksek maliyetle sonuçlanan çok sayıda ayrık bileşene dayanmaktadır [37,38].

Sinüzoidal PWM'in mikroişlemciler ile veya dijital sinyal işlemciler (DSP) ile gerçekleştirilmesi; esneklik ve analog devre elemanları ile ilişkili sorunların ortadan kaldırılması nedeniyle yaygındır. Dijital PWM üretim süreci; yalnızca okunabilir bellekte (ROM) depolanan birim her bir sinüs-dalga örneklerinin çarpılarak ölçeklendirilmesini içermektedir. Çarpma işlemleri zaman alıcıdır. Bu nedenle doğal örnekleme mümkün değildir. Çarpma oranını en aza indirmek için referans sinüzoidal dalga düzenli olarak örneklenir yani sinüs-dalgası küçük basamaklardan oluşan adım adım haline getirilir. Düzenli örnekleme; "Örnekle ve Tut" prensibine dayandırılır ve mikroişlemci ve DSP uygulamasına uygundur. Dijital düzenli örneklemenin Simetrik ve Asimetrik olmak üzere iki türü vardır [39].

### 2.5.2.1. Simetrik Düzenli Örneklemeli SPWM

Şekil 2.6 'da gösterildiği gibi, simetrik örneklemede referans sinüs dalga taşıyıcı dalga şeklinin sadece pozitif tepe değerinde örneklenir ve örnek tam taşıyıcı periyodu boyunca sabit tutulur. Daha sonra üçgen taşıyıcı basamak sinüs dalgası örneği ile karşılaştırılır. Basamaklanmış sinüs dalgası ile üçgen taşıyıcının komşu kenarlarının kesişimi taşıyıcı tepe noktasına eşit mesafede olduğu için modülasyon işlemi simetrik modülasyon olarak adlandırılır. Bu şekilde örnekleme, modülasyon sinyalinde bozulmaya neden olmaktadır. Ayrıca çıkış geriliminin ana harmoniği ve modülasyon sinyali arasında faz kayması oluşturmaktadır. Şekil 2.6'dan gösterildiği gibi,  $t_k$  ve  $t_{k+1}$  örnekleme anlarıdır ve örnekleme frekansı ( $T_s$ ) taşıyıcı frekansına eşittir [38-40].



Şekil 2.6. Simetrik düzenli örneklemeli modülasyon

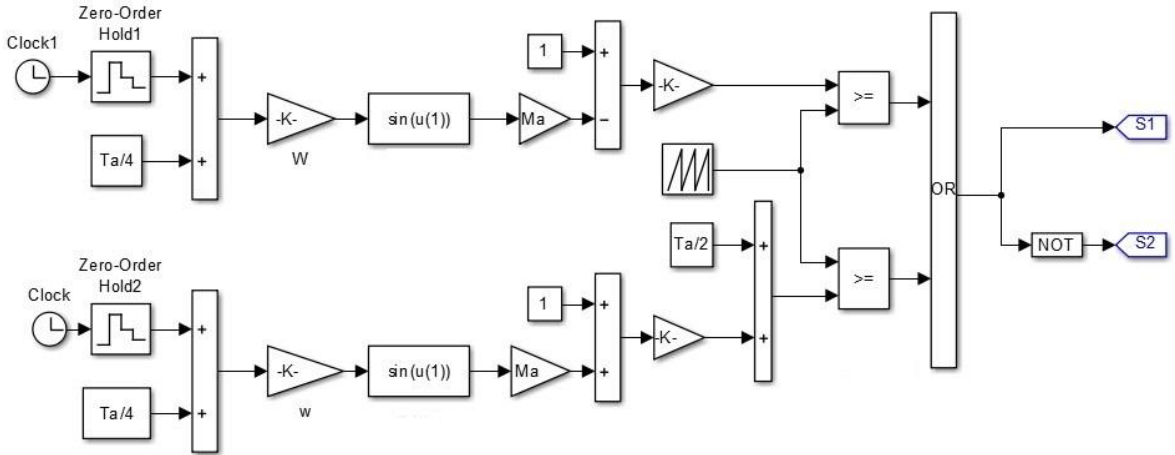


Şekil 2.6’da, simetrik örneklenmiş dalga ile taşıyıcı üçgen dalganın kesişme noktaları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$t_p = \frac{T_s}{4}(1 - M_a \sin \omega t_k) \quad (2.3)$$

$$t_n = \frac{T_s}{4}(1 + M_a \sin \omega t_k) \quad (2.4)$$

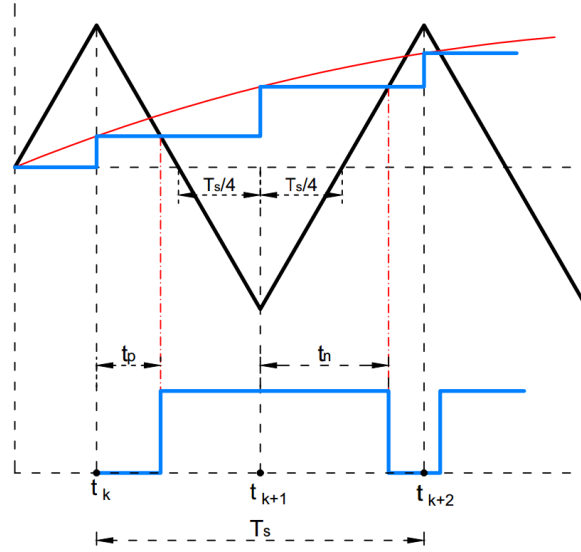
Şekil 2.3’te gösterilen üç-fazlı inverterin A-faz bacağındaki anahtarlar için simetrik düzenli örnekleme kullanarak PWM üretmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında hazırlanan benzetim algoritması Şekil 2.7’de verilmiştir. İnverterin B ve C faz bacağı için ise 120° şer derece faz farklı PWM sinyalleri üretilmiştir [39].



Şekil 2.7. MATLAB ortamında Simetrik düzenli örnekemeli PWM üretimi

### 2.5.2.2. Asimetrik Düzenli Örnekemeli SPWM

Şekil 2.8 ‘de gösterildiği gibi, Asimetrik örneklemede, referans sinüs dalga taşıyıcı dalga şeklinin hem negatif hem de pozitif tepe değerinde örneklenir ve örnek taşıyıcı periyodunun yarısı için sabit tutulur. Burada örnekleme frekansı ( $T_s$ ) taşıyıcı frekansının iki katıdır. Her bir anahtarlama kenarı yeni örneğin sonucu olduğu için Asimetrik örnekleme tercih edilen yöntemdir. Ayrıca Asimetrik örnekleme; üçüncü harmoniği simetrik örneklemedeki değerine göre yaklaşık %30 düşürmektedir. Şekil 2.8’de,  $t_k$ ,  $t_{k+1}$  ve  $t_{k+2}$  örnekleme anlarıdır [38-40].



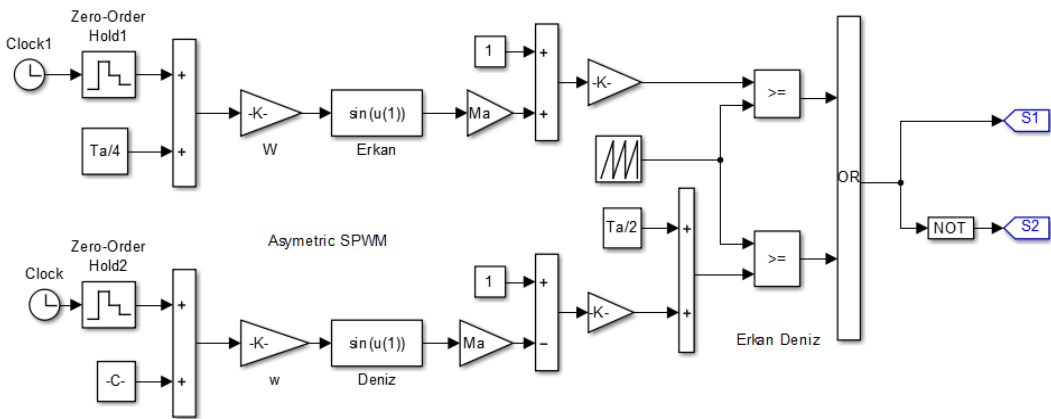
Şekil 2.8. Asimetrik örnelemeli modülasyon

Şekil 2.8’da, Asimetrik örneklenmiş dalga ile taşıyıcı üçgen dalganın kesişme noktaları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$t_p = \frac{T_s}{4} (1 - M_a \sin \omega t_k) \quad (2.5)$$

$$t_n = \frac{T_s}{4} (1 + M_a \sin \omega t_{k+1}) \quad (2.6)$$

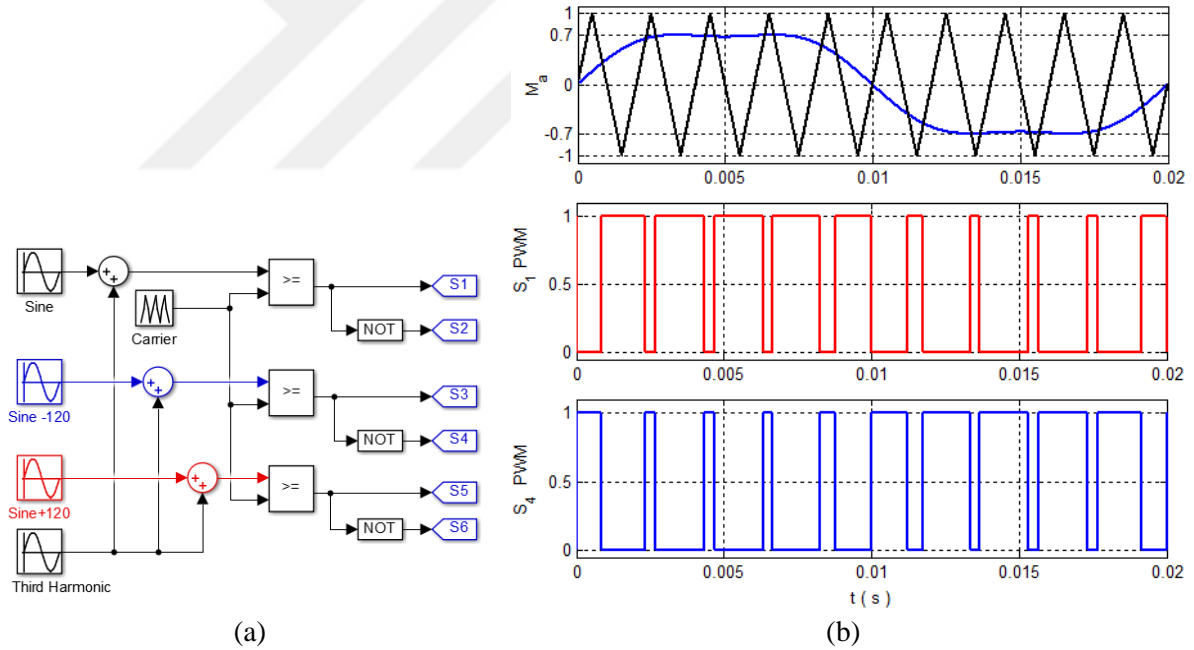
Şekil 2.3’te gösterilen üç-fazlı inverterin A-faz bacağındaki anahtarlar için Asimetrik düzenli örnekleme kullanarak MATLAB/Simulink ortamında PWM üretmek amacıyla hazırlanan benzetim algoritması Şekil 2.9’da verilmiştir. İnverterin B ve C faz bacağı için ise 120° şer derece faz farklı PWM sinyalleri üretilmiştir [39].



Şekil 2.9. MATLAB ortamında Simetrik düzenli örnelemeli PWM üretimi

## 2.6. Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM Tekniği

Lineer modülasyon aralığında SPWM tekniği ile inverter çıkışından en fazla  $0.5xV_{dc}$  kadar bir çıkış faz gerilimi alınabilir. Motor tahrik uygulamalarında SPWM tekniğinin kullanılması durumunda elde edilen gerilim motoru nominal geriliminde çalıştırmak için yeterli değildir. Bu durumda motorun gücü düşer ve düşük moment üretir. Taşıyıcı tabanlı olan SPWM anahtarlama inverterin çıkış gerilimini artırmak için referans modülasyon sinyallerine belirli bir oranda üçüncü harmonik enjekte edilir [34,39]. Temel modülasyon sinyaline onun uygun değerinde üçüncü harmoniğinin eklenmesi, modülasyon sinyalinin tepe değerinde azalmaya sebep olur. Sonuç olarak, elde edilen modülasyon sinyalleri ile inverterin çıkışında  $0.5xV_{dc}$  değerinden %15 kadar daha yüksek bir gerilim elde edilebilir. Şekil 2.3'deki gösterilen inverterin A-faz bacağı için, üçüncü harmonik enjekte edilmiş referans sinüs sinyali ve üçgen karşılaştırılması ve bu faz bacağındaki S<sub>1</sub> ve S<sub>4</sub> anahtarların için üretilen PWM sinyalleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. (a) MATLAB ortamında üçüncü harmonik ilaveli SPWM üretilmesi, (b) A-faz bacağı için üretilen PWM sinyalleri

## 2.7. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (SVPWM) Tekniği

Bu PWM tekniği; alternatif akım makinalarının analizinde kullanılan uzay vektörü kavramından hareketle, üç fazlı inverterler için darbe genişlik modülasyonuna bir vektör yaklaşımı olarak geliştirilmiştir [41]. Bu darbe genişlik modülasyon tekniği SPWM

teknikğine göre inverter çıkışında daha düşük harmonik bozulmalı daha yüksek gerilim elde etmeyi sağlayan gelişmiş bir tekniktir. SVPWM tekniği Kartezyen koordinat ( $\alpha$ - $\beta$ ) düzleminde inverter geriliminin uzay vektör gösterimine dayandırılır. Bu teknik geleneksel modülasyon tekniklerine göre daha popülerdir [30]. Çünkü SVPWM tekniği;

- Dijital uygulamalarda kolay uygulanabilir,
- Diğer PWM tekniklerine göre daha düşük harmonik içeriğine sahiptir,
- DC kaynak geriliminin daha verimli kullanılmasını sağlar,
- Bir anahtarlama durumundan diğerine geçişte yapılan düzenleme ile anahtarlama sayısı ve buna bağlı olarak anahtarlama kayıpları azaltılır [39].

### 2.7.1. İki Seviyeli İverter İçin SVPWM Tekniği

İki seviyeli inverter için SVPWM tekniğinde, inverterin çıkışında elde edilmek istenilen üç fazlı referans gerilimler modülasyon tekniğinde giriş olarak kullanılır ve *Clarke* dönüşümü kullanılarak  $\alpha$ - $\beta$  düzleminde genliği ve açısı olan bir gerilim uzay vektörü ile temsil edilmektedir. Vektörün genliği ve faz açısı referans gerilimlerin anlık değerleri ile saptanmaktadır. Eğer bu referans gerilimler sinüzoidal ve dengeli ise vektör sabit bir genliğe sahip olacaktır ve sabit bir açısal hızla dönecektir. Üç fazlı gerilimlerin Kartezyen koordinat sisteminde karşılığı olan  $\vec{V}_{ref}$  referans gerilim vektörünü elde etmek için *Clarke* dönüşümü aşağıda verilmiştir [30,39].

$$\vec{V}_{ref} = V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3} (V_a e^{j0} + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{-j2\pi/3}) \quad (2.7)$$

Burada;  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  referans üç-fazlı gerilimler olup aşağıdaki şekilde ifade edilirler;

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \sin(\omega t) \\ V_b &= V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_c &= V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2.8)$$

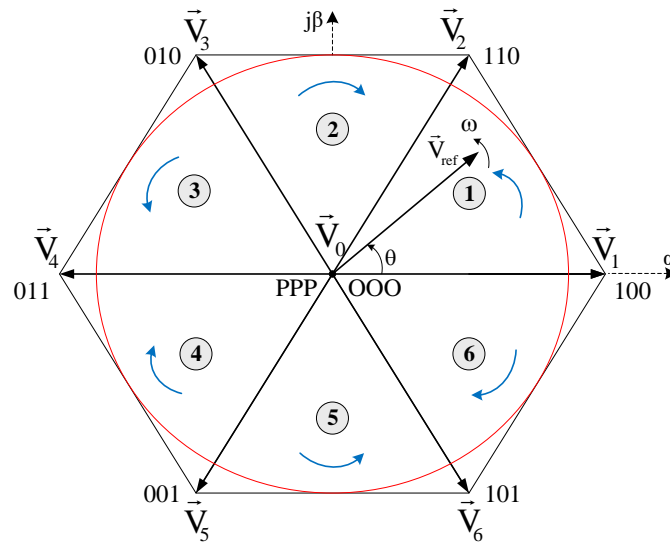
Şekil 2.3'de gösterilen üç fazlı inverterin çalışması, aynı koldaki iki elemanın aynı anda iletimde olmamasını gerektirir. Dolayısı ile iki seviyeli inverterin güç devresindeki anahtarların iletim ve kesim durumlarına bağlı olarak 8 tane olası anahtarlama durumu mevcuttur. İverter çıkış gerilimi bu 8 anahtarlama durumu tarafından belirlenir. Bununla

birlikte, iki seviyeli eviricilerde bu 8 farklı anahtarlama durumuna bağlı olarak sekiz farklı gerilim vektörü üretilmektedir. Tablo 2.1’de 8 farklı anahtarlama durumu ve oluşturdukları gerilim vektörleri verilmiştir. Tabloda “1” anahtarlama durumu, inverterin bir faz bacağında üst anahtarın iletimde ve “0” anahtarlama durumu, alt anahtarın iletimde olduğunu göstermektedir. Tablo 3.1’de verilen vektörlerin iki tanesi sıfır durum vektörü ( $\vec{V}_0$ ) ve altı tanesi aktif durum vektörüdür ( $\vec{V}_1 - \vec{V}_6$ ) [30,42].

**Tablo 2.1.** İki-seviyeli inverter için anahtarlama durumları ve karşılık gelen vektörler

Uzay Vektör	Anahtarlama Durumu	İletimdeki Anahtarlar	Vektör Tanımı
$\vec{V}_0$	[111] – [000]	S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>5</sub> – S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>2</sub>	$\vec{V}_0 = 0$
$\vec{V}_1$	[100]	S <sub>1</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>2</sub>	$\vec{V}_1 = (2/3)V_{dc} e^{j0}$
$\vec{V}_2$	[110]	S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>2</sub>	$\vec{V}_2 = (2/3)V_{dc} e^{j(\pi/3)}$
$\vec{V}_3$	[010]	S <sub>4</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>2</sub>	$\vec{V}_3 = (2/3)V_{dc} e^{j(2\pi/3)}$
$\vec{V}_4$	[011]	S <sub>4</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>5</sub>	$\vec{V}_4 = (2/3)V_{dc} e^{j(3\pi/3)}$
$\vec{V}_5$	[001]	S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>5</sub>	$\vec{V}_5 = (2/3)V_{dc} e^{j(4\pi/3)}$
$\vec{V}_6$	[101]	S <sub>1</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>5</sub>	$\vec{V}_6 = (2/3)V_{dc} e^{j(5\pi/3)}$

Şekil 2.11’de, altı aktif durum vektörü ve iki sıfır vektörünün  $\alpha$ - $\beta$  düzlemine yerleştirilmesi durumunda oluşan altı eşit sektöre sahip gerilim vektör uzayı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sıfır ve aktif vektörler sabit ancak referans gerilim vektörü  $\vec{V}_{ref}$   $\omega$  açısal hızla dönmektedir.



**Şekil 2.11.** İki seviyeli inverter için gerilim vektör uzayı

## 2.7.2. İki Seviyeli SVPWM'nin Gerçekleştirilmesi

Uzay vektör PWM aşağıdaki adımlar takip edilerek gerçekleştirilir [30, 42-43];

- 1. Adım:**  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$ ,  $\vec{V}_{ref}$  ve  $\theta$  hesaplanır,
- 2. Adım:**  $\vec{V}_{ref}$ 'in hangi sektörde olduğu belirlenir,
- 3. Adım:** Her sektör için  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_0$  anahtarlama süreleri hesaplanır,
- 4. Adım:** Her sektör için anahtarlama işaretleri üretilir ve inverterin güç anahtarlarına uygulanır.

### 1. Adım:

İnverterin üretmesi gereken  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  referans gerilimler denklem (3.5)'de verilen Clarke dönüşümü kullanılarak  $V_\alpha$ ,  $V_\beta$  bileşenlerine dönüştürülür. Referans gerilim vektörünün genliği ve açısı ise sırası ile denklem (2.10) ve (2.11) yardımıyla bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 1 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (2.10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (2.11)$$

### 2. Adım:

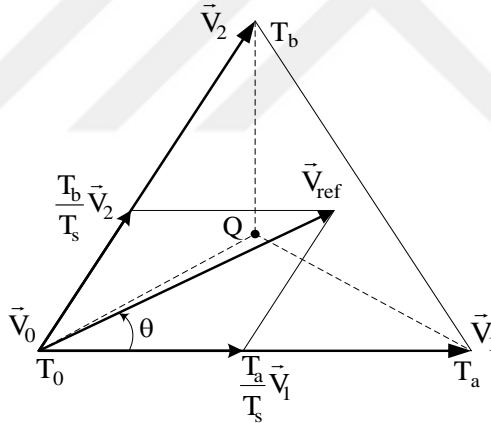
Referans gerilim vektörü  $\vec{V}_{ref}$ 'in altıgen içerisinde hangi sektörde yer aldığını tespit etmek için  $\theta$  açısına bakılır. Açılı değerine bağlı olarak  $\vec{V}_{ref}$ 'in hangi sektörde yer aldığı Tablo 2.2'de verilmiştir.

**Tablo 2.2.** Sektör belirleme açıları

$\theta$ Değeri	Sektör
$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	1
$60^\circ \leq \theta < 120^\circ$	2
$120^\circ \leq \theta < 180^\circ$	3
$180^\circ \leq \theta < 240^\circ$	4
$240^\circ \leq \theta < 300^\circ$	5
$300^\circ \leq \theta < 360^\circ$	6

### 3. Adım:

Şekil 2.3'te referans vektör  $\vec{V}_{ref}$ , sabit üç komşu vektör tarafından meydana getirilir. Bu vektörler için anahtarlama süresi; modülasyon şemasının bir anahtarlama periyodu  $T_s$  süresince seçilen anahtarların görev periyodu zamanını (iletim ve kesim durumu zamanı) ifade eder. Anahtarlama süresinin hesabı; "Gerilim-Zaman Eşitleme" prensibine dayandırılır [30,43,44]. Yani referans vektör  $\vec{V}_{ref}$  ve anahtarlama periyodu  $T_s$ 'nin çarpımı; seçilen uzay vektörlerin anahtarlama süresi ile çarpılan gerilim vektörlerinin toplamına eşittir. Anahtarlama periyodu  $T_s$ 'nin yeterince küçük olduğundan dolayı, referans vektör  $\vec{V}_{ref}$ ,  $T_s$  süresince sabit kabul edilebilir. Bu varsayım altında,  $\vec{V}_{ref}$  iki komşu aktif vektör ve bir sıfır vektör kullanılarak ifade edilebilir. Örneğin, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi  $\vec{V}_{ref}$  birinci sektörde yer aldığı zaman  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$  ve  $\vec{V}_0$  vektörleri tarafından meydana getirilir. Bu durumda gerilim-zaman eşitleme denklemi (2.12)'de gösterildiği gibi olur [39].



Şekil 2.12. Sektör-1 için  $\vec{V}_{ref}$ 'in  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$  ve  $\vec{V}_0$  tarafından meydana getirilmesi

$$\begin{aligned} \vec{V}_{ref} \cdot T_s &= \vec{V}_1 \cdot T_a + \vec{V}_2 \cdot T_b + \vec{V}_0 \cdot T_0 \\ T_s &= T_a + T_b + T_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Burada  $T_a$ ,  $T_b$  ve  $T_0$  sırasıyla  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$  ve  $\vec{V}_0$  vektörleri için anahtarlama süreleridir. Denklem (2.13)'deki uzay vektörler aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\vec{V}_{ref} = V_{ref} e^{j\theta}, \quad \vec{V}_1 = \frac{2}{3} V_{da}, \quad \vec{V}_2 = \frac{2}{3} V_{da} e^{j\frac{\pi}{3}} \quad \text{ve} \quad \vec{V}_0 = 0 \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'ün; denklem (2.12)'de yerine yazılması durumunda oluşacak sonuç denklemi  $\alpha$ - $\beta$  düzleminde reel ( $\alpha$ -ekseni) ve imajiner ( $\beta$ -ekseni) bileşenlerine ayrılırsa;

$$\begin{aligned} R_e : V_{ref} (\cos \theta) T_s &= \frac{2}{3} V_{da} T_a + \frac{1}{3} V_{da} T_b \\ \dot{I}_m : V_{ref} (\sin \theta) T_s &= \frac{1}{\sqrt{3}} V_{da} T_b \end{aligned} \quad (2.14)$$

elde edilir. Denklem (2.14),  $T_s = T_a + T_b + T_0$  ile birlikte çözümlerse, birinci sektör için  $T_a$ ,  $T_b$  ve  $T_0$  anahtarlama süreleri denklem (2.15)'deki gibi olacaktır [39,44,45].

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ T_b &= \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin(\theta) \\ T_0 &= T_s - T_a - T_b \end{aligned} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)'de  $\theta$  yerine genel bir ifade yazılması durumunda Şekil 2.3'de gösterilen gerilim vektör uzayındaki bütün sektörler için  $T_a$ ,  $T_b$  ve  $T_0$  anahtarlama sürelerinin genel ifadesi denklem (2.16)'daki gibi elde edilmiş olur. Burada "k" referans vektörün bulunduğu sektörü belirtmektedir ( $k=1, \dots, 6$ ) [22].

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(k \frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ T_b &= \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(\theta - \frac{(k-1)\pi}{3}\right) \\ T_0 &= T_s - T_a - T_b \end{aligned} \quad (2.16)$$

#### 4. Adım:

Verilen bir referans vektör  $\vec{V}_{ref}$  için anahtarlama işaretleri üretilirken öncelikle uzay vektörlerin uygulanma sırasının belirlenmesi gerekmektedir. Bu uygulama sırası birden fazla şekilde tasarlanabilir. Ancak minimum anahtarlama frekansının ve optimum harmonik performansının elde edilmesi için aşağıdaki iki gereksinimin yerine getirilmesi gerekir [45]. Bu gereksinimler;



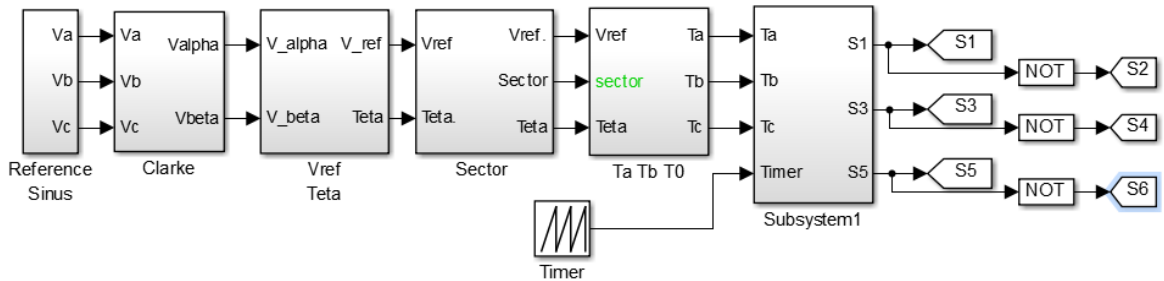
- Bir anahtarlama durumundan diğerine geçiş, aynı inverter bacağındaki biri iletimde diğeri kesimde olan sadece iki anahtarı içermelidir.
- Gerilim vektör uzayında referans vektörün bir sektörden diğerine geçişi en az sayıda anahtarlama içermelidir.

Şekil 2.3'deki gerilim vektör uzayındaki altı sektör için anahtarlama şeması yukarıdaki iki gereksinim dikkate alınarak belirlenmiş ve Tablo 2.3'de verilmiştir. Tabloda verilen anahtarlama sıralarının, Şekil 2.3'de her sektör için belirtilen yönler takip edilerek yazıldığına ayrıca dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, Tablo 2.3'de görüldüğü gibi her bir anahtarlama periyodu daima bir sıfır durum anahtarlama ile başlar ve biter. Ayrıca anahtarlama bütün bir periyot boyunca simetrik olmaktadır.

**Tablo 2.3.** Sektörler için anahtarlama sırası

<b>Sektör 1:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_0$
<b>Sektör 2:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_0$
<b>Sektör 3:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_0$
<b>Sektör 4:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_0$
<b>Sektör 5:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_0$
<b>Sektör 6:</b>	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_0$

Şekil 2.13'te gösterilen üç-fazlı inverterin A-faz bacağındaki anahtarlar için Uzay Vektör kullanarak MATLAB/Simulink ortamında PWM üretmek amacıyla hazırlanan benzetim algoritması Şekil 2.9'da verilmiştir [39].



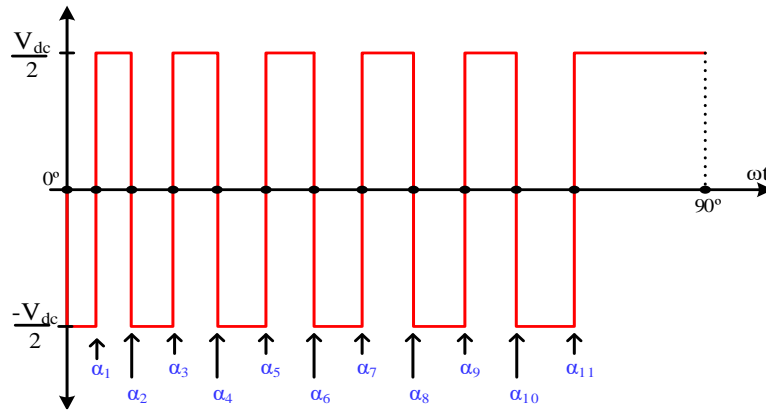
**Şekil 2.13.** MATLAB ortamında 3-fazlı inverter için Uzay Vektör PWM üretimi

## 2.8. Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu (SHEPWM) Tekniği

Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu (SHE), inverterlerin çıkış gerilim dalga şeklinde ana harmoniği kontrol etmek ve istenmeyen düşük-dereceli harmonikleri elimine etmek için kullanılan bir PWM tekniğidir. Bu teknik sayesinde, elimine edilen düşük derecelilerden dışında kalan yüksek-dereceli harmonikler ise yüke veya şebekeye harmoniklerin etkisini azaltmak için küçük bir pasif filtre kullanılarak elimine edilebilir düşük anahtarlama frekanslarında çalışan bir tekniktir. SHEPWM tekniğinin sağladığı önemli avantajlar aşağıdaki gibidir [39,46].

- Üçüncü Harmonik İlaveli ve Uzay Vektör PWM de olduğu gibi aşırı modülasyonun mümkün olmasından dolayı daha yüksek gerilim elde edebilme,
- DC-hat geriliminde daha az dalgalanma,
- Anahtarlama frekansının düşük olmasından dolayı daha düşük anahtarlama kaybı,
- Düşük dereceli harmoniklerin elimine edilmesi.

Şekil 2.3'te gösterilen üç-faz iki-seviyeli inverterin bir faz bacağından kaynağın orta noktasına göre elde edilecek bipolar faz-nötr çıkış gerilim dalga şekli çeyrek ve tek dalga simetrisine sahip olup Şekil 2.14'te gösterilmiştir. SHEPWM, üç-faz faz-nötr (TLN) çıkış gerilim dalga şeklinde ana harmoniği kontrol etmek ve daha önceden hedeflenen harmonikleri elimine etmek için kullanılmaktadır. Bunun için Şekil 2.14'te gösterildiği gibi faz-nötr gerilim dalga şekli üzerinde önceden belirlenen açılarda ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ ) PWM çentikleri oluşturulmalıdır. Elimine edilecek harmonikler ve kontrol edilecek ana harmoniğin toplam sayısı  $N$  olmak üzere, eğer  $N$  tek sayı ise TLN1 tekniği, eğer  $N$  çift sayı ise TLN2 tekniği literatürde kullanılmaktadır [47].



Şekil 2.14. Tek sayıda açılı (TLN1) için inverter çıkış faz-nötr geriliminin çeyrek dalga şekli

Şekil 2.3'te gösterilen inverterin çıkış faz-nötr geriliminin Fourier serisi açılımı ve bu seride ki katsayıları aşağıdaki gibi verilir [36];

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.17)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega t \, d\omega t$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega t \, d\omega t \quad (2.18)$$

Faz-nötr geriliminin dalga şekli tek ve çeyrek periyot simetriye sahip olduğundan, Fourier serisi açılımında çift harmonikler elenecek ve sadece sinüs bileşenli tek harmonikler ( $b_1, b_3, b_5, \dots, b_n$ ) olacaktır. Dolayısı ile Fourier açılımı aşağıdaki gibi olur.

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \sin n\omega t \, d\omega t \quad (2.19)$$

Bu tez çalışmasında, gerilim dalga şeklinde 10-tane düşük dereceli harmonik (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31) elimine edilmesine ilave olarak ana harmoniğin kontrol edileceği için  $N=11$  olarak alınmıştır.  $N$  tek sayı olduğu için dalga şeklinin Fourier serisi açılımı TLN1 tekniğine göre düzenlenmiştir. Şekil 2.13'te ki dalga şeklinde açılar ile 11 tane çentik oluşturulmuştur. Bu dalga şekli; Fourier serisi katsayısı  $b_n$  ve anahtarlama açılarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[ -1 - 2 \sum_{k=1}^N (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (2.20)$$

Denklem (2.20) 11-tane açı için ayrı ayrı genişletilirse; 1., 5., 7., 11., 13., 17., 19., 23, 25., 29. ve 31. harmonikleri ifade eden lineer olmayan denklem takımı aşağıdaki gibi elde edilmiş olur [48].

$$b_1 = \frac{4}{\pi} [-1 + 2 \cos 1\alpha_1 + \dots + 2 \cos 1\alpha_{11}] = M_a$$

$$b_5 = \frac{4}{5\pi} [-1 + 2 \cos 5\alpha_1 + \dots + 2 \cos 5\alpha_{11}] = 0$$

.....

$$b_{31} = \frac{4}{31\pi} [-1 + 2 \cos 31\alpha_1 + \dots + 2 \cos 31\alpha_{11}] = 0$$

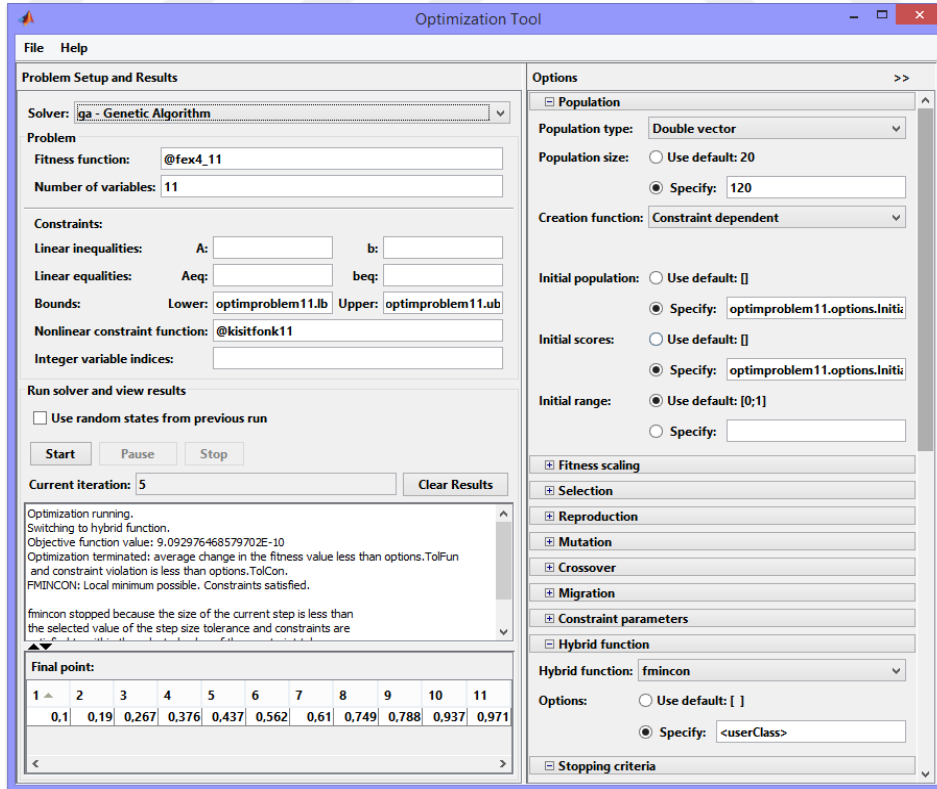
Şekil 2.14 ve Denklem (2.21) verilen açılar arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir;

$$0^\circ < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{10} < \alpha_{11} < 90^\circ \quad (2.22)$$

SHEPWM tekniğinde inverter anahtarlama frekansı ( $f_s$ ); açılı sayısı ve ana harmoniğin frekansına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir ve her zaman sabit kalmaktadır.

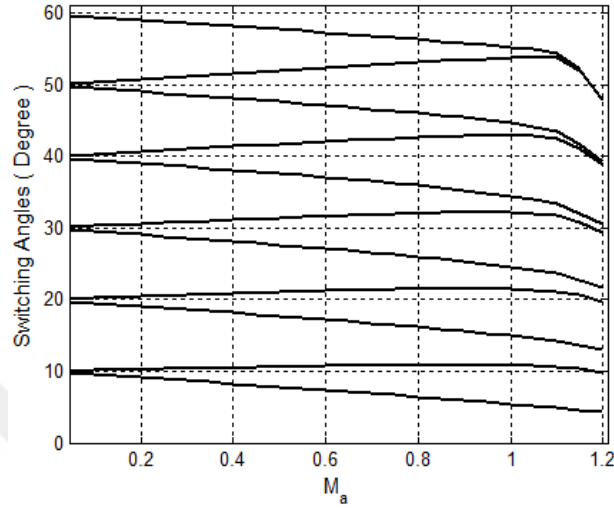
$$f_s = (2N + 1)f_1 \quad (2.23)$$

On bir anahtarlama açısının belirlenerek SHEPWM sinyallerinin üretilebilmesi için öncelikle, Denklem (2.21)'de ki lineer olmayan denklem takımının bir optimizasyon yöntemi kullanılarak çözülmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında denklem (2.21)'de ki lineer olmayan denklem takımı *MATLAB/Genetik Algoritma (GA) Araç Kutusu* kullanılarak  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  için optimize edilmiştir. Denklem (2.21) yardımı ile oluşturulan amaç fonksiyonu (@fex4\_11) ve denklem (2.22)'deki kısıtlama fonksiyonu (@kisistfonk\_11) Şekil 2.15'te gösterilen GA Araç Kutusunda gerekli yerlere yazılmıştır.



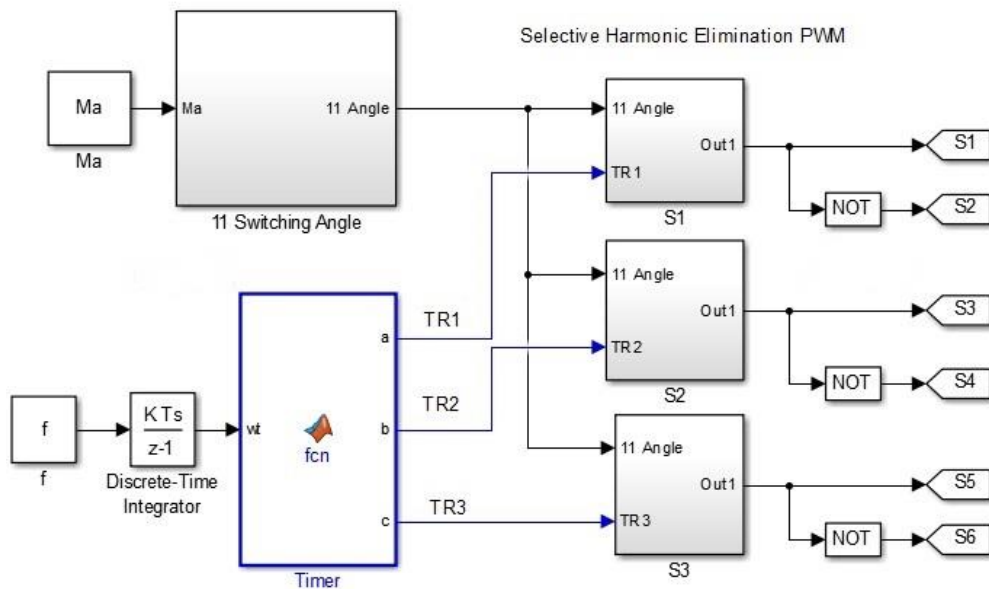
Şekil 2.15. MATLAB GA Araç-Kutusu kullanıcı arayüzü

Amaç fonksiyonunda bir değişken olan modülasyon indeksinin  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  değerleri için yapılan optimizasyonu sonucu elde edilen 11 tane açının modülasyon indeksi ile değişimi ise Şekil 2.16’da gösterilmiştir [39,46-48].



Şekil 2.16. Hesaplanan 11-açının  $M_a$ 'ya göre değişim grafiği

GA Araç Kutusu ile optimizasyondan elde edilen açılar kullanılarak, 11-anahtarlama açısı için  $M_a$ 'ya bağlı denklemler uydurulmuştur. Modülasyon indeksinin  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  aralığında girilen herhangi bir değeri için Şekil 2.17’den görüldüğü gibi hesaplanan 11-anahtarlama açısı ve çıkış frekansı kullanılarak PWM sinyalleri üretilmiş ve RL yükünü besleyen inverter anahtarlannmıştır [39].



Şekil 2.17. MATLAB ortamında 3-fazlı inverter için SHEPWM üretimi

### 3. MATLAB İLE GRAFİKSEL KULLANICI ARAYÜZÜ TASARIMI

Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Ara Yüzü - GUI); bilgisayarlarda işletilen komutlar ve bunların çıktıları yerine simgeler, pencereler, düğmeler ve panellerin tümünü ifade etmek için kullanılan genel addır. GUI, bilgisayar kullanıcılarının komut satırı kodlarını ezberlemeden fare, klavye gibi araçlar sayesinde bilgisayarları kontrol etmelerini sağlamaktadır[49].

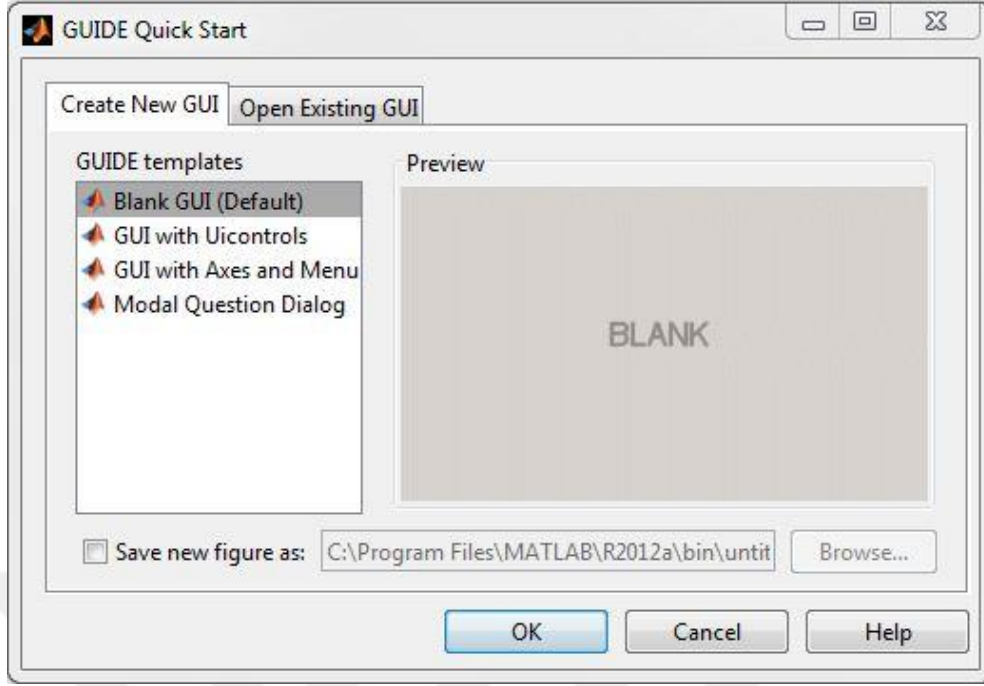
#### 3.1. MATLAB GUI Editörü

MATLAB ile ara yüz tasarlamının en pratik ve kolay yolu “*guide*” editörünü kullanmaktır. Guide kullanılarak pencere içerisinde grafik gösterimi yapılabilir ve kullanıcı erişimli interaktif uygulamalar oluşturulabilir. Bir GUI; menü, araç kutusu, butonlar, liste kutuları, metin kutuları grafikler ve sabit metinler gibi nesnelere oluşur. Bu nesnelere programlaması da kaynak program dosyasında (M-File) oluşturulan kod satırlarıyla sağlanır. Guide editörünün, oluşturulan ara yüzleri saklamak ve çalıştırmak için iki dosyaya ihtiyacı vardır:

- Şekil dosyası (.fig uzantılı): Ara yüzün genel görünümü, nesnelere yerleşim alanları, nesnelere açılma ve özelliklerinin bulunduğud dosyadır.
- Kod dosyası (.m uzantılı): Ara yüzün ve üzerinde bulunan nesnelere çalıştırdığı kodların saklandığı dosyadır.

#### 3.2. GUI Editörünün Başlatılması

Guide editörü MATLAB komut penceresine “*guide*” yazılarak, MATLAB penceresindeki “*File*” menüsünden “*New*” sonra “*GUI*” seçilerek veya ana penceredeki Guide kısa yoluna tıklanarak başlatılabilir. Guide hızlı başlat penceresinden yeni bir gui veya daha önce kaydedilen çalışmalar açılabilir. Guide hızlı başlat ekranı Şekil 3.1.’de gösterilmiştir. Ayrıca MATLAB aktif klasör penceresinden daha önce üzerinde çalışma yapılan .fig uzantılı dosyalara sağ tıklamp “*Open in GUIDE*” seçilerek, gui editörü başlatılabilir. İsteğe ve ihtiyaca bağlı olarak da editörün hazır olarak sunduğud gui şablonlarından faydalanılabilir. Ayrıca seçilen nesnenin ön izlemesi de “*Preview*” bölümünden görülebilir. “*Save new figure as*” çentiğine tıklanarak da şekil dosyasının farklı kaydedileceğid klasör seçilebilir.



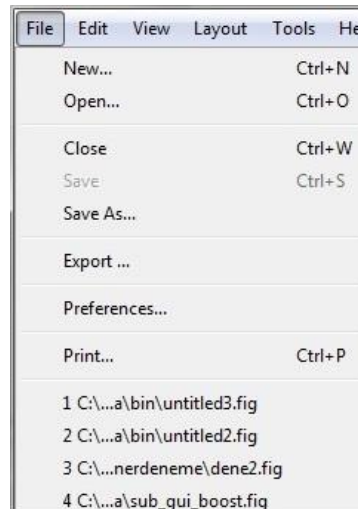
Şekil 3.1. GUIDE Hızlı Başlat Penceresi

### 3.3. GUI Standart Araç Çubuğu

MATLAB GUI standart araç çubuğu, MATLAB ana penceresindeki araç çubuğunun yanı sıra kendisine özgü bazı seçenekler de içermektedir.

#### a. Dosya (File) Menüsü

Bu menüde temel dosya seçenekleri yer almaktadır. Yeni GUI oluşturma, oluşturulan GUI'yi kaydetme vb. seçenekler bu menüde bulunmaktadır. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Dosya (File) Menüsü

- **New:** Yeni bir gui tasarım penceresi açar.
- **Open:** Daha önceden üzerinde çalışılmış ve kaydedilmiş gui dosyası açar.
- **Close:** Aktif gui tasarım penceresini kapatır.
- **Save:** Aktif gui' yi kaydeder.
- **Save as:** Aktif gui' yi farklı kaydeder.
- **Export:** Bu özellik seçildiğinde “.fig” uzantılı şekil dosyası ve “.m” uzantılı kod dosyasından oluşan gui uygulaması, tek dosyadan oluşan “.m” uzantılı bir M fonksiyon olarak kaydedilir.
- **Preferences:** Gui uygulama tercihlerinin ayarlandığı pencereyi açar ve kullanıcının uygulama ayarlarını değiştirmesine olanak tanır.
- **Print:** Oluşturulan şekil dosyasını yazdırmak için yazıcı penceresini açar ve yazdırma tercihlerinin yapılmasını sağlar.

#### b. Düzen (Edit) Menüsü

Bu menüde de form işlemleri ile ilgili seçenekler ve kısa yolları yer almaktadır. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Düzen (Edit) Menüsü

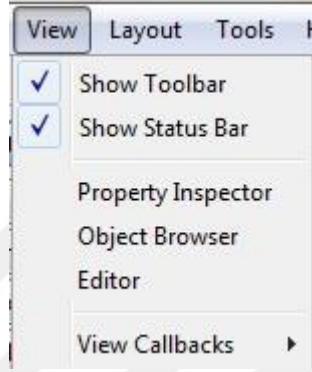
- **Undo:** Son yapılan değişikliği geri alır.
- **Redo:** Geri alınan değişikliği tekrar uygular.
- **Cut:** Seçilen nesneyi keser.
- **Copy:** Seçilen nesneyi kopyalar.
- **Paste:** Kesilen veya kopyalanan nesneyi yapıştırır.



- **Clear:** Seçilen nesneyi temizler.
- **Select All:** Şekil dosyasında bulunan tüm nesnelere seçer.
- **Duplicate:** Seçilen nesneyi çoğaltır.

#### c. Görünüm (View) Menüsü

Bu menüde ise araç kutusu, durum çubuğu, özellik görüntüleyicisi, nesne görüntüleyicisi, düzenleme editörü ve nesnelerin “*CallBack*” lerini göstermeyi sağlayan öğeler bulunmaktadır. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.4.’te gösterilmiştir.

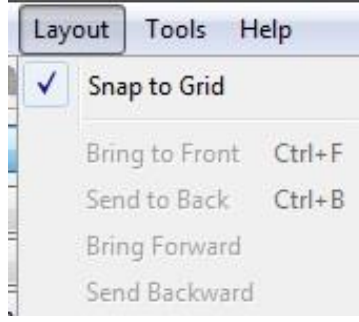


Şekil 3.4. Görünüm (View) Menüsü

- **Show Toolbar:** GUI editörünün üst kısmında bulunan ve kısa yolları barındıran araç kutusunu göstermek veya gizlemek için kullanılır.
- **Show Status Bar:** GUI editörünün alt kısmında bulunan, nesnelerin konumlarını ve etiketlerini gösteren durum çubuğunu göstermek veya gizlemek için kullanılır.
- **Property Inspector:** Şekil dosyasında bulunan nesnelerin özelliklerini görüntüleyen bir pencere açar.
- **Object Browser:** Şekil dosyasında bulunan nesnelerin listesini açar.
- **Editor:** Kod dosyası (.m file) editörünü açar.
- **View Callbacks:** Şekil dosyasında bulunan nesnelere ait kod satırlarını açar.

#### d. Yapı (Layout) Menüsü

Bu menüde nesnelerin hizalanması ve yerleşimlerinin düzenlenmesi ile ilgili öğeler yer almaktadır. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.5.’de gösterilmiştir.

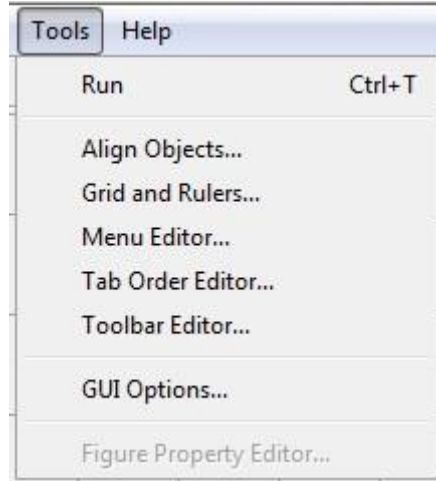


Şekil 3.5. Yapı (Layout) Menüsü

- **Snap to Grid:** Nesneleri bölümlenmiş alanda hizalar.
- **Bring to Front:** Üst üste gelen nesnelere seçileni en öne getirir.
- **Send to Back:** Üst üste gelen nesnelere seçileni en arkaya gönderir.
- **Bring Forward:** Seçilen nesneyi bir adım öne getirir.
- **Send Backward:** Seçilen nesneyi bir adım arkaya gönderir.

#### e. Araçlar (Tools) Menüsü

Bu menüde çeşitli araç kutularını açmaya yarayan öğeler yer almaktadır. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Araçlar (Tools) Menüsü

- **Run:** GUI uygulamasını çalıştırır.
- **Align Objects:** Nesneleri hizalar.
- **Grid and Rulers:** Piksel cetveli ve bölümlendirme penceresini açarak çalışma yüzeyini ince çizgilerle istenilen ölçülere böler.
- **Menu Editor:** Menü editörünü açar.

- **Tab Order Editor:** Sekme editörünü açar.
- **Toolbar Editor:** Araç çubuğu editörünü açar.
- **GUI Options:** Uygulama özelliklerini açar.
- **Figure Property Editor:** Şekil dosyasının özellik düzenleme editörünü açar.

#### f. Help (Yardım) Menüsü

Bu menüde, MATLAB programının içinde bulunan yardım bölümünde kayıtlı olan GUI örnekleri görüntülenebilir, nesnelere, özellikleri ve işlevleri hakkında yardım alınabilir. Ayrıca çevrimiçi video ve demolar görüntülenebilir [47]. Menüye ait ekran görüntüsü Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Help (Yardım) Menüsü

### 3.4. GUI Bileşenlerini Oluşturma ve Düzenleme

Guide editörü, GUI oluşturmak için kullanılan nesnelere pencerenin sol kısmında bir araç kutusu şeklinde hazır bulundurur. Araç kutusunda bulunan nesnelere, fare yardımıyla çalışma alanına sürüklenerek GUI'ye eklenebilir. Nesnenin boyutu ve konumu da fare kullanılarak değiştirilebilir.

### 3.5. GUI Araç Kutusu Nesnelere ve Özellikleri

Bu araç kutusunda, oluşturulmak istenen ara yüze eklenecek olan buton, kaydırma çubuğu, tablo, grafik gibi görsel nesnelere yer almaktadır. Oluşturulacak ara yüzlerde, bahsi geçen nesnelere birinin veya birkaçının kullanılması kaçınılmazdır. Ara yüzlere bu nesnelere eklenerek, kullanıcı ile etkileşime geçilmektedir. Bu sayede basit ve kullanışlı ara yüzler oluşturulabilmektedir. Araç kutusuna ait ekran görüntüsü Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.

 Select	İMLEÇ
 Push Button	ONAY BUTONU
 Slider	KAYDIRMA ÇUBUĞU
 Radio Button	TEKLİ SEÇİM
 Check Box	ÇOKLU SEÇİM
 Edit Text	DEĞİŞTİRİLEBİLİR METİN
 Static Text	SABİT METİN
 Pop-up Menu	AÇILIR MENÜ
 Listbox	LİSTE KUTUSU
 Toggle Button	İKİ YÖNLÜ ONAY
 Table	TABLO
 Axes	GRAFİK
 Panel	PANEL
 Button Group	BUTON PANELİ
 ActiveX Control	ACTİVEX KONTROLÜ

Şekil 3.8. MATLAB GUI araç kutusu

Araç kutusunda yer alan nesnelerin özellik ve görevleri aşağıda sıralanmıştır:

- I. **Select:** Herhangi bir nesne seçmek için imleci gösterir.
- II. **Push Button:** Çalışması istenen komut satırlarının işleme alınması için kullanılan butondur. Basıldığı anda “CallBack” adı verilen fonksiyonu çalışmaya başlar.
- III. **Slider:** Kaydırma çubuğudur. Oklara veya çubuğa tıklanarak yukarı – aşağı veya sağa – sola hareket etmeyi sağlar.
- IV. **Radio Button:** Kullanıcıya birçok seçenek sunan ve kullanıcıdan sadece bir seçeneği seçmesini isterken kullanılan butondur. Seçilen duruma göre gerekli kod satırları çalıştırılır.
- V. **Check Box:** Kullanıcıya birçok seçeneğin sunulduğu ve kullanıcının istediğini seçtiği butondur. İşaretleme butonlarına atanan komutlar işaretli olduğunda çalıştırılır, işaretli olmadığında ise işleme alınmaz.
- VI. **Edit Text:** Kullanıcının karakter dizisi girmesini sağlar. Metin veya sayı girişi yapılabilir.
- VII. **Static Text:** Uygulamaya açıklama eklerken ve uygulama çıktılarını gösterirken kullanılır. Kullanıcı sabit metin üzerinde herhangi bir değişiklik yapamaz.

**VIII. Pop-up Menu:** Ok bölümüne tıkladığında birçok seçeneğin görüntülediği, menü biçimindeki nesnedir. Birbiriyle bağlantılı olan seçeneklerin, yer tasarrufu yaparak görüntülenmesini sağlar.

**IX. Listbox:** Kullanıcı için birçok seçeneği kutucuk içinde görüntülemeyi sağlayan nesnedir.

**X. Toggle Button:** Fare ile üzerine tıkladığında basılı kalır, tekrar tıkladığında ise eski haline geri döner. Basılı kaldığında ya eski haline döndüğünde ayrı fonksiyonları çalıştırır.

**XI. Table:** Gui' ye tablo eklemek için veya herhangi bir veri tabanından gelen verileri tablo şeklinde göstermek için kullanılır.

**XII. Axes:** Gui penceresinde grafik, resim veya hareketli resim görüntülemek için kullanılır.

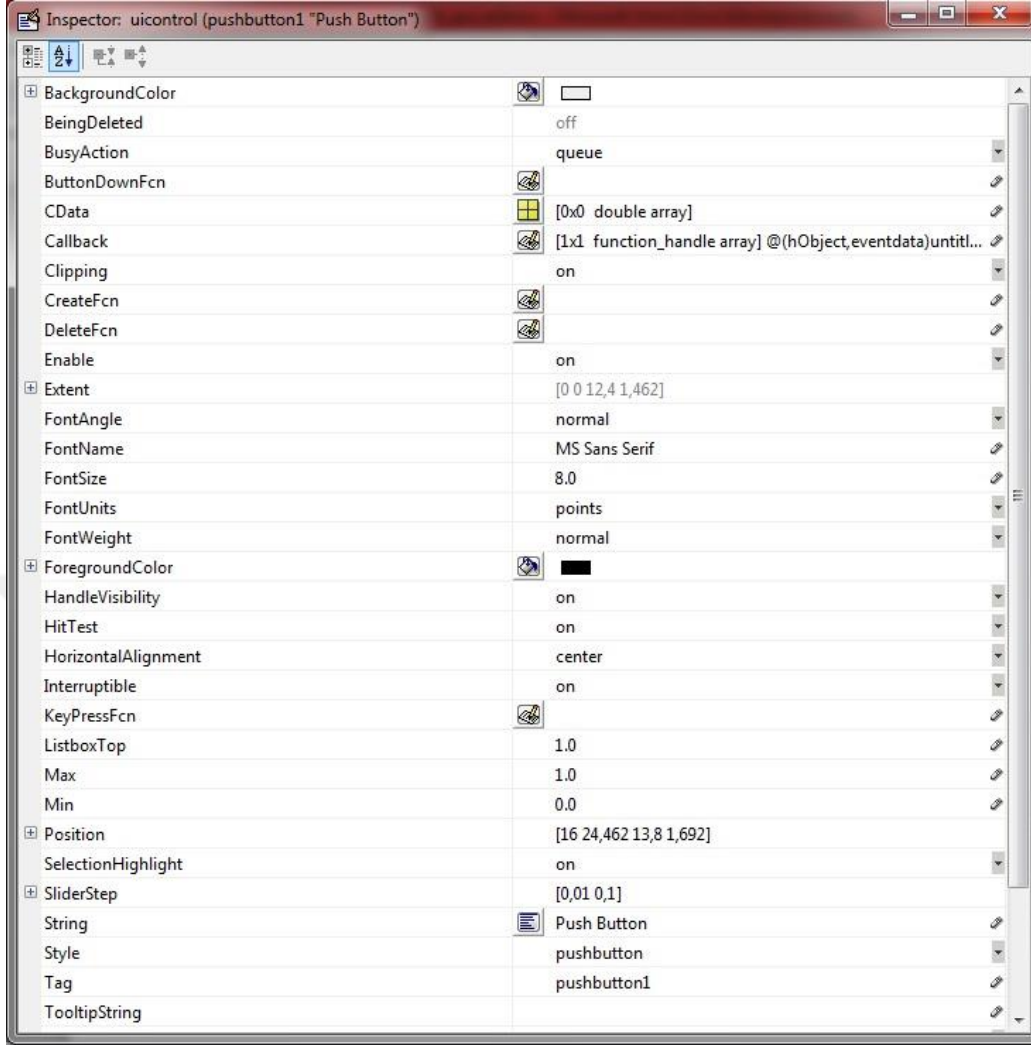
**XIII. Panel:** Birbiriyle bağlantılı nesnelere toplu halde göstermek için kullanılır.

**XIV. Button Group:** Birbiriyle bağlantılı butonları toplu halde göstermek için kullanılır.

**XV. ActiveX Control:** Gui' ye başka bir program kullanılarak hazırlanmış dosyalar eklemek için kullanılır. Örneğin bir excel tablosu veya bir video bu şekilde eklenebilir.

### 3.6. Nesnelerin Programlanması

Guide editöründe oluşturulan nesnelere programlamak ve özelliklerini düzenlemek için nesne üzerine çift tıklanarak veya sağ tıklanıp "*Property Inspector*" seçilerek araç kutusuna ulaşılır. Açılan pencerede seçilen nesnenin arka plan rengi, üzerinde görüntülenecek metni, etiketi, üzerindeki metnin yazı tipi ve puntosu, kullanılabilirliği, görünürlüğü, konumu, çalıştıracağı kodlar vb. gibi özellikleri belirlenebilir [50]. Bu araç kutusu sayesinde, daha kullanışlı ve dikkat çekici ara yüzler oluşturulabilir. Ayrıca, oluşturulan ara yüzler daha nizami şekilde düzenlenebilir ve görsellik değeri artırılabilir. *Property Inspector* penceresinin ekran görünümü Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Property Inspector penceresinin görünümü

### 3.7. Kodlama Düzeni

Guide editöründe oluşturulan her nesnenin arka planda çalışan kodlarını içeren bir “Callback” i vardır. Bu öge sayesinde GUI formunda bulunan nesnelere içerdikleri kodu çalıştırabilmektedirler. Nesne, forma ilk eklendiği andan itibaren Callback kodları da kod dosyasına otomatik olarak eklenir. Ayrıca her GUI formunun da kendine özgü kod dosyası otomatik olarak oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu kodlar sayesinde nesnelere işlem yaptırılabilir.

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi GUI formunun “Callback” i fonksiyon olarak otomatik oluşturulmuş ve varsayılan form kodları da otomatik olarak eklenmiştir.

```

function varargout = anaekran(varargin)
% ANAEKRAN MATLAB code for anaekran.fig

% Edit the above text to modify the response to help anaekran

% Last Modified by GUIDE v2.5 23-Mar-2017 15:40:34

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @anaekran_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @anaekran_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

Şekil 3.10. GUI Formu Kodları

Şekil 3.11’de GUI formuna eklenen bir butonun fonksiyon olarak oluşmuş kodları gösterilmiştir. “%” ile başlayan kod satırları açıklama satırları olup, programlama dili tarafından otomatik olarak eklenmiştir. Bu kodların altında ise çeşitli atama işlemlerinin gerçekleşmesini sağlayan kod satırları bulunmaktadır.

Şekil 3.11’de gösterilen kod satırları, uygulamanın benzetim değer ekranındaki değerleri almakla görevli bir butona aittir. İlgili benzetim formundan MATLAB Workspace’e gelen parametreleri, benzetim değer ekranında ilgili satır ve sütunda göstermektedir. Aynı formda bu işlevi yerine getiren 15 adet buton bulunmaktadır. Benzetim değer ekranı üzerindeki her metin nesnesine bu şekilde değer ataması yapılmaktadır.

Metin nesnelerinin Benzetim Değer Ekranı form açılış kodunda görünürlüğü gizlenmiştir. İlgili satırdaki butona tıkladığında önce metin nesnesine göstermesi gereken değer atanmakta, sonrasında da metin nesnesinin görünürlüğü aktif hale getirilmektedir.



```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% load_system('sinuspwm_7Subat2016.slx');
VDC = evalin('base', 'Vdc');
set(handles.text37,'String',VDC); %VDC
set(handles.text37,'Visible','on')

MA = evalin('base', 'Ma');
set(handles.text40,'String',MA); %MA
set(handles.text40,'Visible','on')

f = evalin('base', 'f');
set(handles.text42,'String',f); %f
set(handles.text42,'Visible','on')

vars4 = evalin('base','max(Vab_thd)');
set(handles.text44,'String',vars4); %THD1
set(handles.text44,'Visible','on')

vars3 = evalin('base','max(Ia_thd1)');
set(handles.text45,'String',vars3); %THD2
set(handles.text45,'Visible','on')

vars2 = evalin('base','max(Vab2)');
set(handles.text35,'String',vars2); %RMS1
set(handles.text35,'Visible','on')

```

Şekil 3.11. GUI Nesnesi (Buton) Kodları

Benzetim ortamı için oluşturulan 6 adet formda ise benzetim değer ekranından farklı olarak kullanıcı tarafından parametre atamasında kullanılacak olan metin kutuları bulunmaktadır. Bu metin kutularına girilen parametreler bir buton ve kaynak kodlar yardımıyla MATLAB Workspace'e gönderilmektedir. Simulink'te kullanılan bloklar ve diğer öğeler, gereksinim duydukları parametreleri Workspace'ten alarak çalışmaya başlamaktadırlar. Simulink ortamında benzetim gerçekleştikten sonra çıkış değerleri tekrar MATLAB Workspace'e gönderilmektedir. Buradan da grafiklere ve metin nesnelere değer gönderimi sağlanmaktadır. İlgili kod satırları Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

assignin ('base', 'Ts', str2double(get(handles.edit8, 'String')));
assignin ('base', 'Ron', str2double(get(handles.edit5, 'String')));
assignin ('base', 'Rs', str2double(get(handles.edit6, 'String')));
assignin ('base', 'Cs', str2double(get(handles.edit7, 'String')));
assignin ('base', 'R', str2double(get(handles.edit3, 'String')));
assignin ('base', 'L', str2double(get(handles.edit4, 'String')));
assignin ('base', 'Ma', str2double(get(handles.edit1, 'String')));
assignin ('base', 'f', str2double(get(handles.edit10, 'String')));
assignin ('base', 'fs', str2double(get(handles.edit2, 'String')));
assignin ('base', 'Vref', str2double(get(handles.edit9, 'String')));
assignin ('base', 'st', str2double(get(handles.edit11, 'String')));

fs1 = str2double(get(handles.edit2, 'String'));|
Ta = 1/fs1;
assignin ('base', 'Ta', Ta);

```

Şekil 3.12. Parametre Atama Kodları

Grafiklere de metin nesneleriyle benzer olarak atama işlemi yapılmaktadır. Fakat grafik çizimi için hem Simulink'ten gelen parametre hem de zaman değeri gönderen bir "Clock" nesnesi kullanılmaktadır. Uygulama, gelen parametreyi zamana göre grafik nesnesine çizdirmektedir. İlgili kod satırları Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.

```

guidata(hObject, handles);
axes(handles.axes1);
plot(t, ia, 'r')
hold on
grid on
plot(t, ib, 'g')
plot(t, ic)
guidata(hObject, handles);
axes(handles.axes2);
grid on
plot(t, Vab)
guidata(hObject, handles);
axes(handles.axes3);
plot(t, Va)
zoom on
grid on
guidata(hObject, handles);|
axes(handles.axes4);

```

Şekil 3.13. Grafik Çizim Kodları

Her benzetim uygulama formunda FFT analizi yapmayı sağlayan bir buton bulunmaktadır. Bu buton sayesinde Simulink'ten gelen parametrelere göre FFT analizi yapılabilmektedir.

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
bekleme = waitbar(0, 'Lütfen Bekleyiniz...');
for i=1:1:1000
    waitbar(i/1000,| bekleme);
end
close(bekleme)
power_fftscope ;

```

Şekil 3.14. FFT Analiz Aracı Açılması için Kullanılan Butona Ait Kodlar

FFT Analiz Aracı MATLAB Simulink'in hazır bir aracı olduğundan dolayı Şekil 3.14.'te gösterildiği gibi “power\_fftscope” kodu kullanılarak çalıştırılmaktadır. Ayrıca, bu aracın açılması biraz zaman aldığından dolayı bekleme çubuğu eklenerek, görsel bir şekilde kullanıcının aracın açılmasını beklemesi sağlanmıştır [51].

Benzetim formlarının her birinde, parametre girişini kolaylaştırmak amacıyla “Varsayılan Değerler” isimli birer onay kutusu oluşturulmuştur. Bu sayede formlarda bulunan parametre değer kutularına önceden belirlenmiş olan değerler atanmakta ve kullanıcının teker teker parametre girerek zaman kaybetmesi önlenmektedir. İlgili kod satırları Şekil 3.15’de gösterilmiştir.

```

% --- Executes on button press in checkbox5.
function checkbox5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to checkbox5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox5

set(handles.edit_ts, 'string', 5e-6);
set(handles.edit_ron, 'string', 1e-3);
set(handles.edit_rs, 'string', 1e5);
set(handles.edit_cs, 'string', inf);
set(handles.edit16, 'string', 20);
set(handles.edit17, 'string', 15e-3);
set(handles.edit_ma, 'string', 0.85);
set(handles.edit_fs, 'string', 5000);
set(handles.edit_vref, 'string', 220);
set(handles.edit_f, 'string', 50);
set(handles.edit24, 'string', 0.5);

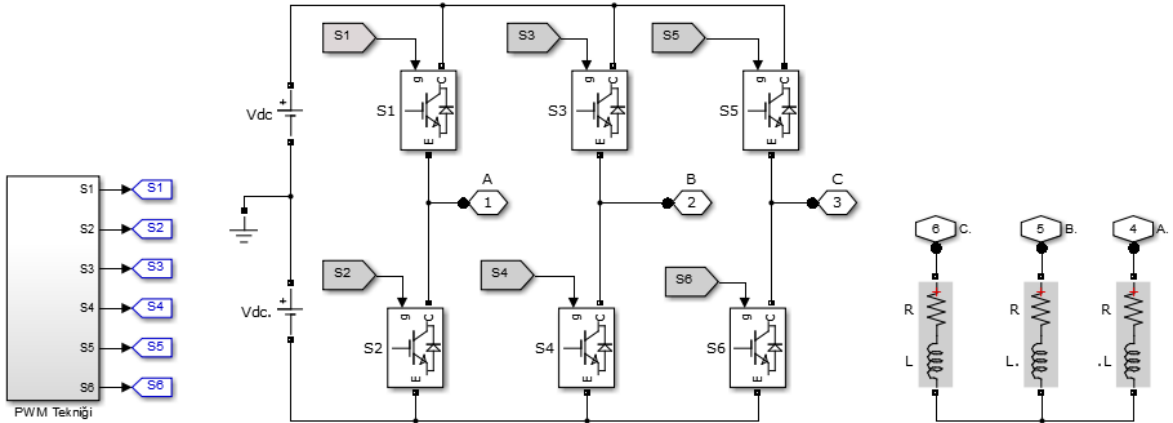
```

Şekil 3.15. Varsayılan Değerler Onay Kutusuna Ait Kodlar

#### 4. İKİ SEVİYELİ İNVERTERİN FARKLI ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ İÇİN MATLAB GUI TABANLI BENZETİM ORTAMI

Bu tez çalışmasında, RL yükünü besleyen üç-fazlı iki-seviyeli gerilim kaynaklı inverterin farklı anahtarlama teknikleri ile anahtarlama durumunda analizi için MATLAB GUI tabanlı bir benzetim ortamı geliştirilmiştir. Benzetim ortamının hedef kullanıcıları ulusal ve uluslararası lisans ve özellikle lisansüstü öğrencileridir. Bundan dolayı benzetim ortamının kullanıcı ara yüzü İngilizce olarak tasarlanmış olup kullanımı ise çok basite indirgenmiştir. İki seviyeli inverter, RL yükü ve anahtarlama teknikleri için gerekli parametreler bu ara yüzdeki ilgili kısımlara girilerek, benzetim ortamının arka planında çalışan MATLAB/SimPower Systems ve Simulink blokları yardımıyla oluşturulan modeller çalıştırılmaktadır. Ara yüzün tasarımı, programlanması ve düzenlenmesi ise MATLAB içerisinde bulunan ve grafiksel ortamda program yazmayı ve düzenlemeyi sağlayan GUIDE editöründe yapılmıştır.

Çalışmaya ilk olarak SimPower Systems blokları kullanılarak inverter ve RL yükünün modelleri oluşturularak başlanmıştır. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi üç-fazlı inverter devresi 6 adet IGBT yarı iletken anahtarlar kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra Simulink blokları kullanılarak 2.bölümde anlatılan tüm PWM teknikleri için modeller oluşturulmuştur. Anahtarlama teknikleri için oluşturulan modeller kullanılarak inverterin doğru olarak çalıştığını kontrol edildikten sonra ara yüz tasarımına geçilmiştir.

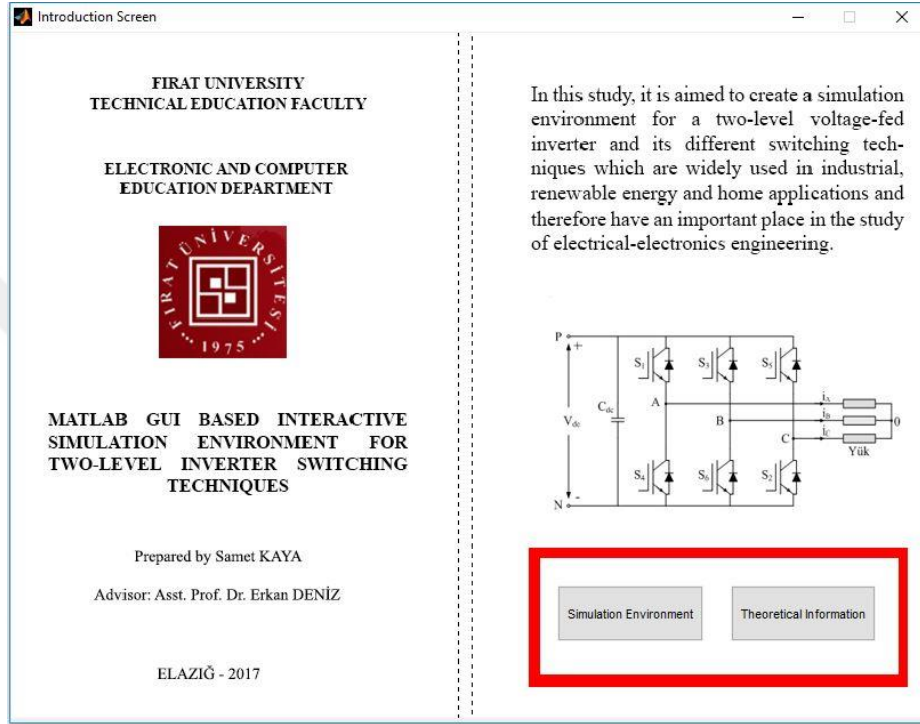


Şekil 4.1. Üç-fazlı iki seviyeli inverter ve 3-fazlı RL yükün MATLAB modelleri

##### 4.1. MATLAB GUI Tabanlı Benzetim Ortamı

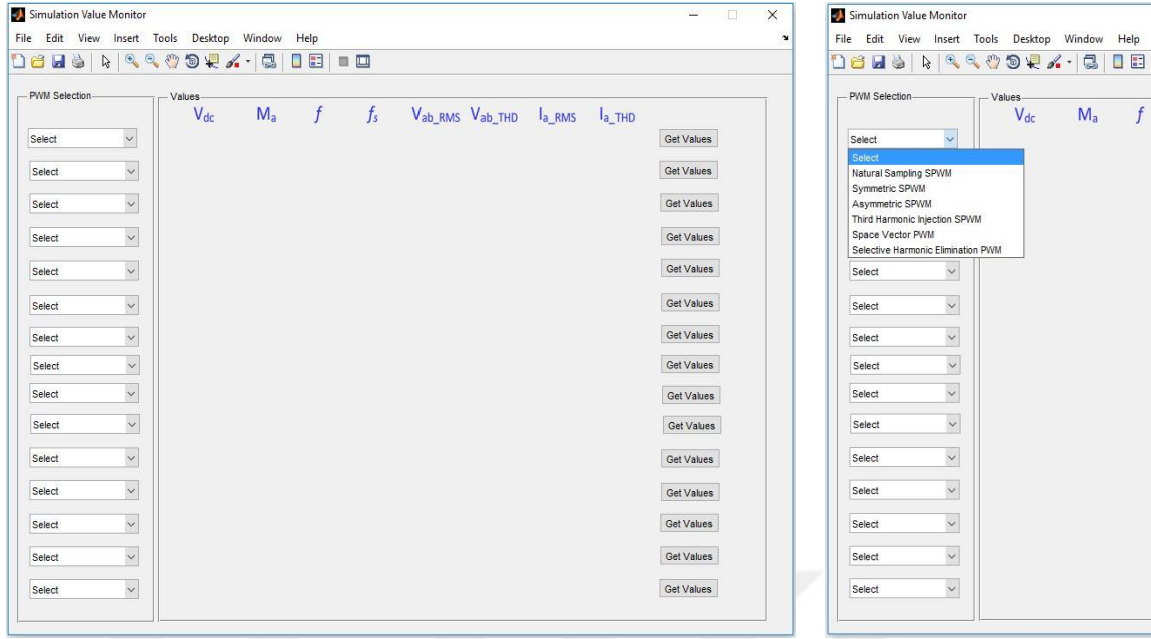
MATLAB GUI tabanlı benzetim ortamına erişim için, ilk etapta giriş olarak kullanılan bir ara yüz geliştirilmiştir. MATLAB ortamında oluşturulan “InverterGUI.m” isimli m-file

dosyası çalıştırıldığında Şekil 4.2’de gösterilen *Giriş Ekranı* kullanıcının karşısına çıkacaktır. Şekil 4.2’den görüldüğü gibi bu ekranda program hakkında kısaca bilgiler, PWM yöntemleri hakkında teorik bilgiler erişmek için “*Theoretical Information*” ve PWM teknikleri benzetim ortamına erişmek için “*Simulation Environment*” isimli iki adet buton bulunmaktadır. İstenilen ara yüze ulaşmak için gerekli butonun tıklanması yeterli olacaktır.

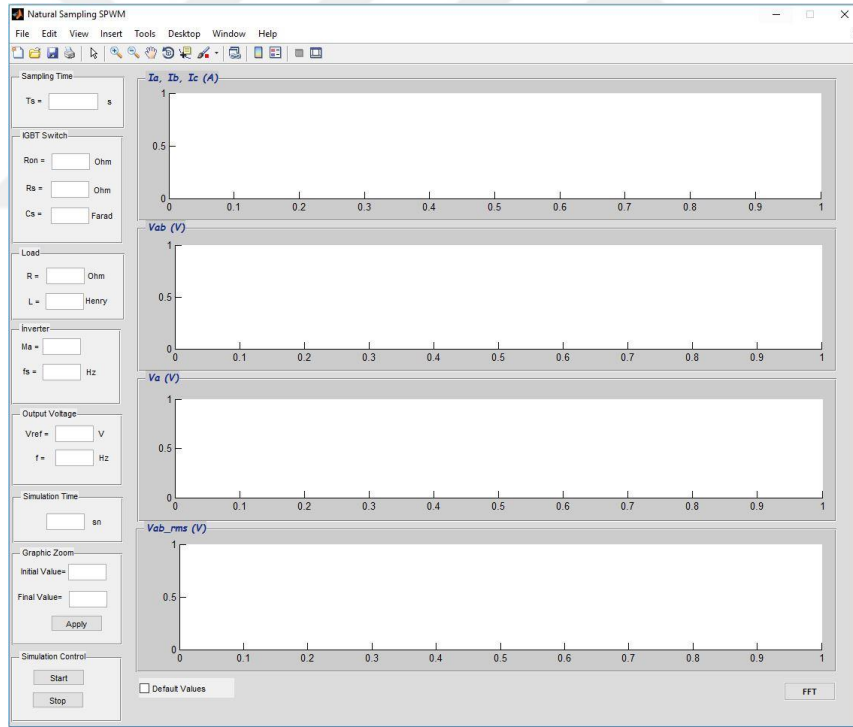


Şekil 4.2. Kullanıcı ara yüzünün giriş ekranı

Şekil 4.2’de verilen giriş ekranında benzetim ortamına ulaşmak için “*Simulation Environment*” isimli butona tıklandığında Şekil 4.3’te gösterilen “*Simulation Value Monitor*” isimli benzetim değer ekranı açılmaktadır. Bu ara yüzün tasarımı Şekil 4.3’ten den görüldüğü gibi kullanıcının 6 tane PWM tekniğiyle ilgili 15 adet benzetim yapmasına imkân verecek şekilde yapılmıştır. Daha fazla benzetim için kullanıcının, bu 15 adet benzetimle ilgili sonuçlar kaydedildikten sonra ara yüzü kapatarak yeniden açması gerekmektedir. Şekil 4.3’te ekranın sol tarafından herhangi bir PWM yöntemi için seçim yaptığında, seçilen PWM yöntemine ait benzetim ekranı ilave olarak açılacaktır. Örnek olarak, Şekil 4.3’te *Doğal Örneklemeli SPWM* tekniği ile ilgili benzetim yapmak amacıyla “*Natural Sampling SPWM*” seçildiğinde açılan benzetim ortamı ekranı Şekil 4.4’te verilmiştir. Bu ekran diğer PWM yöntemleri içinde standart görünümde dir.



Şekil 4.3. Benzetim Değer Ekranı



Şekil 4.4. Herhangi bir PWM yöntemi için standart benzetim ekranı

Şekil 4.4'te kullanıcının ilk olarak açılan benzetim ortamı ekranının sol tarafında bulunan parametreleri belirlemesi gerekmektedir. Benzetim örnekleme süresini belirlemek için “*Sampling Time*”, IGBT anahtarın iletim direnci ve snubber eleman değerleri için “*IGBT Switch*”, kullanılan üç-fazlı yükün direnç ve indüktans değerleri için “*Load*”,



inverter PWM teknikleri için modülasyon indeksini ve anahtarlama frekansını belirlemek için “*Inverter*”, çıkış gerilimin genliğini ve frekansı için “*Output Voltage*”, benzetim süresini belirlemek için “*Simulation Time*” panellerine kullanıcı tarafından gerekli parametreler girilmelidir. Ekranda sistemin her bir elemanının parametreleri için ayrı ayrı panellerde metin kutuları oluşturulmuştur. Metin kutularının sol taraflarında hangi parametreleri göndermeye yaradıkları, sağ taraflarında ise birimleri belirtilmiştir. Kullanıcı bu parametreleri girerek, aynı anda parametreyi Simulink’te çalışan modele göndermiş olacaktır. Bu aşamada kolaylık olması amacıyla, ekranın alt tarafında “*Default Values*” seçme kutusu tıklandığında varsayılan parametreler panellere otomatik olarak yazılmaktadır. Kullanıcı istediği parametreyi değiştirme özgürlüğüne de sahiptir. Şekil 4.4’te benzetim ekranındaki parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

**Tablo 1.** Benzetim ekranı parametreleri

$T_s$ : Örnekleme periyodu	$R$ : Yük direnci
$R_{on}$ : IGBT anahtar iletim direnci	$L$ : Yük indüktansı
$R_s$ : Snubber direnci	$M_a$ : İnverter modülasyon indeksi
$C_s$ : Snubber kondansatörü	$f_s$ : İnverter anahtarlama frekansı
$V_{ref}$ : İnverter çıkış efektif faz gerilimi	$f$ : İnverter çıkış frekansı

Şekil 4.4’te parametreler yazıldıktan sonra benzetimi başlatmak için ekranın sol alt köşesindeki “*Start*” butonuna tıklanması gerekir. Bu aşamada inverterin seçilen PWM yöntemi ile anahtarlanması durumu için benzetim arka planda kısa sürede tamamlanıp, inverterin çıkış faz akımları ( $I_a, I_b, I_c$ ), faz gerilimi ( $V_a$ ), hat gerilimi ( $V_{ab}$ ) ve hat geriliminin efektif (rms) değerlerine ilişkin dalga şekilleri otomatik olarak çizilmektedir. Grafiklerin üzerindeki panel isimleri, o grafiğin hangi akımı veya gerilimi gösterdiğini belirtmektedir. “*Start*” butonuna basıldıktan sonra benzetim süresi bitmeden “*Stop*” butonuna basılırsa, benzetim durdurularak benzetimin o ana kadar çalışan değerleri görülebilecektir. Seçilen PWM yöntemine ilişkin grafikler çizdirildikten sonra benzetim süresi aralığında grafiklere belirlenen aralıkta yakınlaştırma yapmak için, ekranın sol alt tarafındaki “*Graphic Zoom*” panelindeki başlangıç (*Initial Value*) ve bitiş (*Final Value*) değerleri girilmelidir.

Kullanıcı seçtiği PWM yöntemine ilişkin dalga şekillerini gördükten sonra, Şekil 4.3’teki benzetim ekranının sağ tarafında aynı hizada bulunan “*Get Values*” butonuna tıklayarak benzetime ilişkin bazı değerleri bu ekrana sayısal olarak kayıt edebilmektedir.

Bu değerler; dc-hat gerilimi ( $V_{dc}$ ), modülasyon indeksi ( $M_a$ ), çıkış frekansı ( $f$ ), hat geriliminin efektif ( $V_{ab\_RMS}$ ) ve THD değeri ( $V_{ab\_THD}$ ), ve faz akımının efektif ( $V_{ab\_RMS}$ ) ve THD değeri ( $V_{ab\_THD}$ ) dir. Farklı parametreler için aynı veya farklı bir PWM yöntemi için benzetim yapmak için yukarıda yazılanları tekrarladığında dalga şekilleri sonuçlarını ilave olarak Şekil 4.5'te gösterildiği gibi bir sayısal değerler tablosu da elde edecektir.

PWM Selection	$V_{dc}$	$M_a$	$f$	$f_s$	$V_{ab\_RMS}$	$V_{ab\_THD}$	$I_a\_RMS$	$I_a\_THD$
Natural Sampling S...	691.393	0.9	50	2250	382.325	79.3821	9.97513	2.53289
Symmetric SPWM	691.393	0.9	50	2250	381.083	79.5857	9.90838	2.55089
Asymmetric SPWM	691.393	0.9	50	2250	380.521	79.7332	9.96238	2.55293
Third Harmonic Inje...	598.764	0.9	50	2250	380.85	64.4679	9.94389	2.09381
Space Vector PWM	598.764	0.9	50	2250	380.946	64.7493	9.96858	2.04647
Selective Harmonic...	691.393	0.9	50	1150	380.04	95.2875	9.96182	5.31666
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								

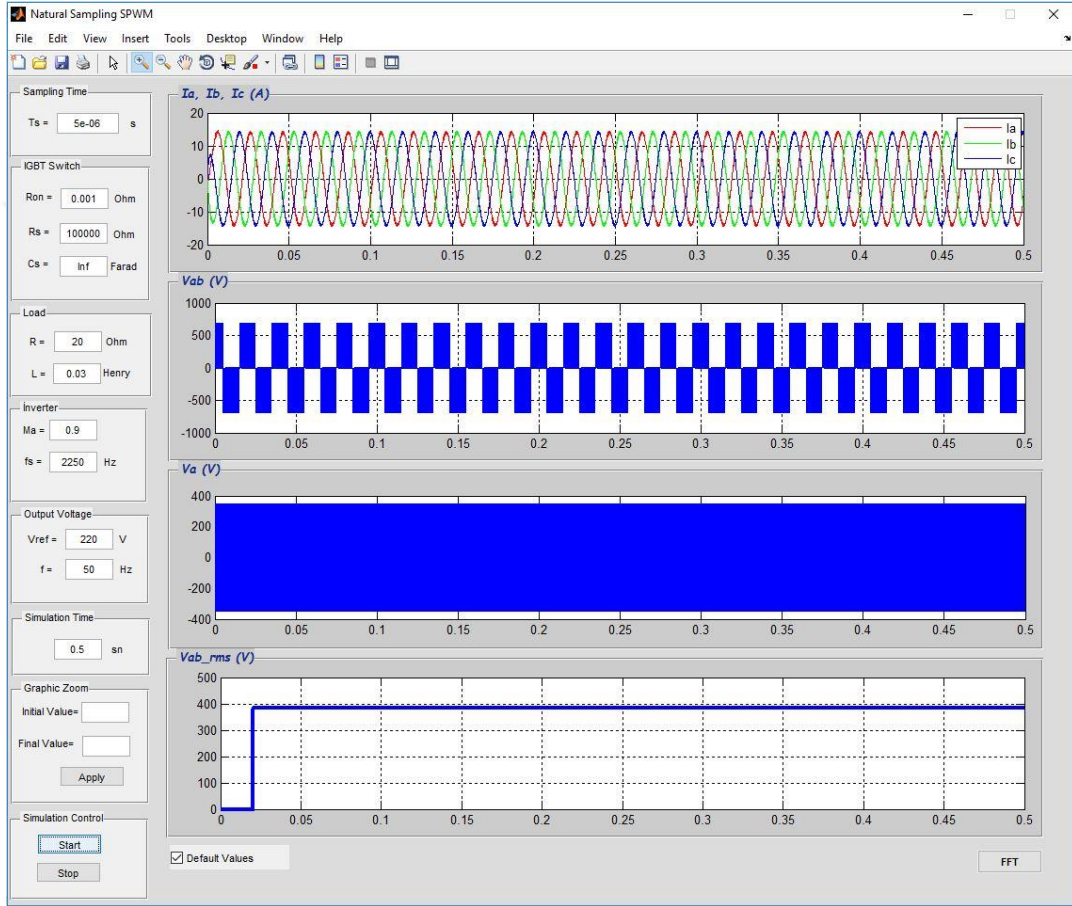
Şekil 4.5. Birden çok benzetimden sonra Benzetim Değer Ekranı

## 4.2. Aynı Parametreler İçin Benzetim Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde inverter, yük ve her bir PWM tekniği için aynı parametreler kullanılması durumunda benzetim sonuçları verilmiştir. Bu parametreler;  $V_{ref}=220V$ ,  $f=50Hz$ ,  $R=20\Omega$ ,  $L=30mH$ ,  $M_a=0.9$ ,  $f_s=2250Hz$  dir. Bu benzetimlerde inverterin aynı ac çıkış gerilimini üretmesi durumunda, kullanıcının altı farklı PWM yöntemi için aşağıda verilen konularda değerlendirme yapabilmesi amaçlanmıştır;

- İnverter girişindeki dc-hat gerilim değeri ve buna bağlı olarak dc-hat kondansatör gerilim değerleri hakkında,
- Çıkış gerilim ve yük akımının THD değeri ve buna bağlı olarak inverter çıkışından filtre kullanıp kullanılmayacağına hakkında

Kullanıcının Şekil 4.3'teki “*Simulation Value Monitor*” isimli benzetim değer ekranında ilk olarak “*Natural Sampling SPWM*” tekniğini seçmesi durumunda, karşısına Şekil 4.6'da görüldüğü gibi seçtiği PWM tekniğinin ismini taşıyan yeni bir benzetim ekranı açılacaktır. Bu benzetim ekranındaki parametrelere yukarıda verilen değerleri yazdıktan sonra “*Start*” butonuna tıkladığında arka plandaki benzetim çalışacak ve benzetim süresi sonunda Şekil 4.6'da gösterilen grafikler otomatik olarak çizdirilecektir.



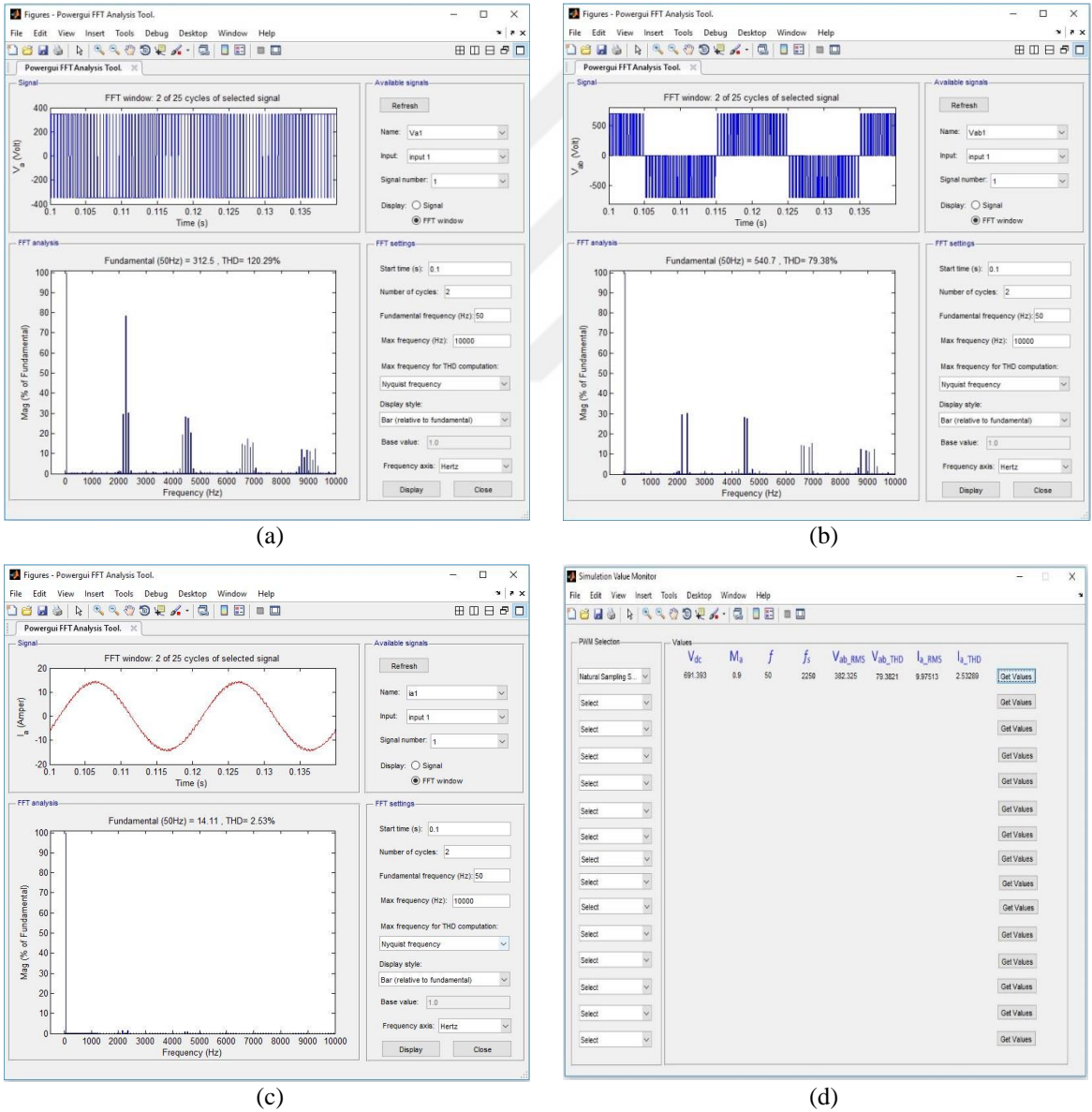
Şekil 4.6. Doğal Örneklemeli SPWM için benzetim ekranı

Şekil 4.6'da ki ve diğer bütün benzetim ekranlarında grafiklere istenildiği takdirde *zoom* özelliği kullanılarak yakınlaştırma yapılabilir. Özellikle  $V_a$  ve  $V_{ab\_rms}$  grafiklerinin net değerleri görülmek istendiğinde bu özellik kullanılabilir. Bunun için iki alternatif vardır. Birincisi; ekranın solundaki “*Graphic Zoom*” panelinde grafik zaman eksenini için bırakılan *ilk değer (Initial Value)* ve *son değer (Final Value)* parametrelerine değer girilerek bütün grafiklere aynı anda yakınlaştırma yapılabilir. İkinci yöntem ise herhangi bir grafiğin üzerinde detayı görülmek istenen alan fare ile tıklanarak seçilir ve istenilen alana



yakınlaştırma yapılabilir. Grafik tekrar eski haline getirilmek istenildiğinde de grafiğin üzerine sağ tıklanarak “Reset to Original View” seçilerek grafik eski haline getirilmiş olur.

Benzetim ekranlarının sağ alt köşesinde bulunan “FFT” butonu tıklandığında, benzetim sonucunda inverter çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat gerilimi için *MATLAB Workspace*’ e gönderilen değerleri kullanarak Harmonik Analizi (FFT) yapılabilmektedir. Bunun için benzetimler de *MATLAB/SimPowerSystems* araç çubuğunda bulunan “*powergui*” nesnesi kullanılmıştır. Şekil 4.7(a)-(c)’de *Doğal Örneklemeli SPWM* tekniği tercih edilmesi durumunda inverter faz akımı, faz gerilimi ve hat gerilimi için “*Powergui FFT Analysis Tool*” analiz aracı gösterilmiştir.

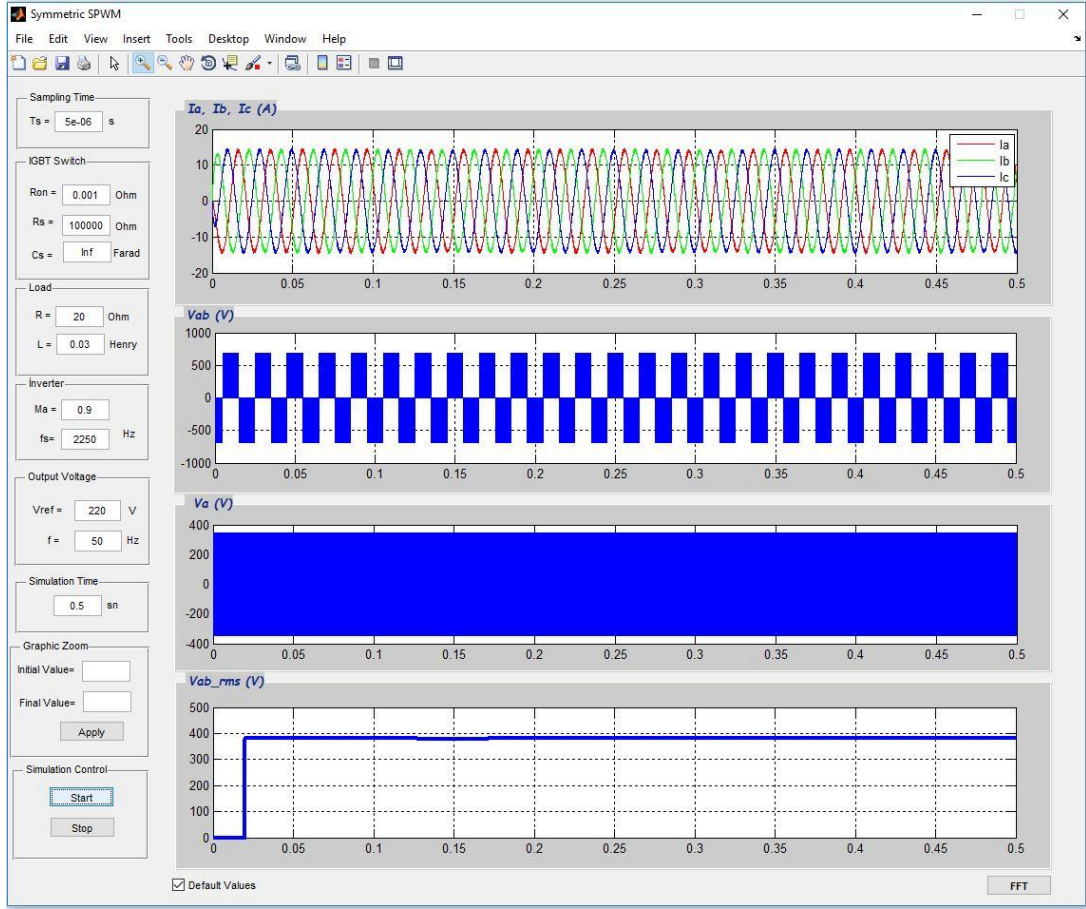


Şekil 4.7. Doğal Örneklemeli SPWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları

Şekil 4.7(a)-(c)' de gösterilen “*Powergui FFT Analysis Tool* ” analiz aracında istenilen parametreleri girmek gerekmektedir. Öncelikle ekranın sağ tarafında bulunan başlangıç zamanı (*Start time*) ve periyot sayısı (*Number of cycles*) ve temel frekans (*Fundamental frequency*) parametreleri girilmelidir. Bu işlemler yapıldıktan sonra “*FFT settings*” panelinde bulunan maksimum frekans değeri (*Max Frequecny*)  $f_s$ 'nin katlarında oluşan harmoniklerinin daha iyi görülebilmesi için  $f_s$ 'nin en az üç katı daha büyük olacak şekilde girilmelidir. Daha sonra “*Display*” butonuna tıkladığı zaman, “*Natural Sampling SPWM*” tekniğini seçilmesi durumu için Şekil 4.7(a)-(c)'da gösterildiği inverter çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat gerilimi ve FFT sonuçları elde edilecektir.

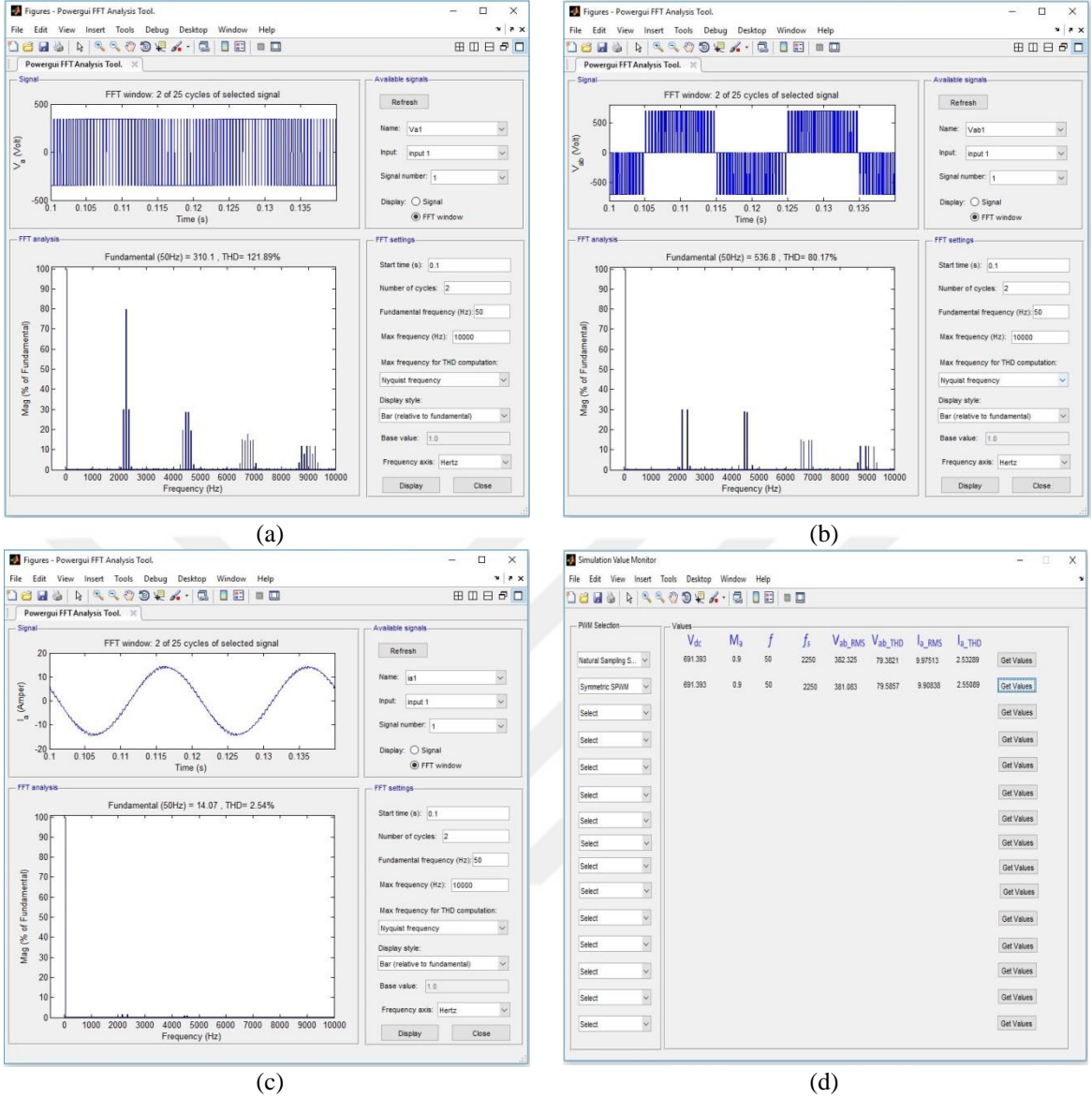
Şekil 4.6'daki benzetim ekranında çizdirilen dalga şekilleri ve Şekil 4.7(a)-(c)' de çizdirilen FFT analiz sonuçları kullanıcı tarafından menüdeki “*Save*” simgesine tıklanarak kaydedilebilir. Bundan sonra, kullanıcının Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranında benzetimin en başında seçtiği “*Natural Sampling SPWM* ” yönteminin karşısındaki “*Get Values*” butonuna tıklayarak bu benzetime ilişkin bazı parametrelerin sayısal değerlerini bu ekrana kaydedecektir. Bu durum Şekil 4.7(d)' de gösterilmiştir.

Kullanıcının Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranında ikinci olarak “*Symmetric SPWM*” tekniğini seçmesi durumunda, karşısına tamamen yeni bir benzetim ekranı çıkacaktır. Bu ekranda bulunan parametrelere yukarıda verilen değerleri yazdıktan sonra “*Start*” butonuna tıkladığında *Simetrik SPWM* için inverter çıkış dalga şekilleri Şekil 4.8'deki ekranda otomatik olarak çizdirilecektir.



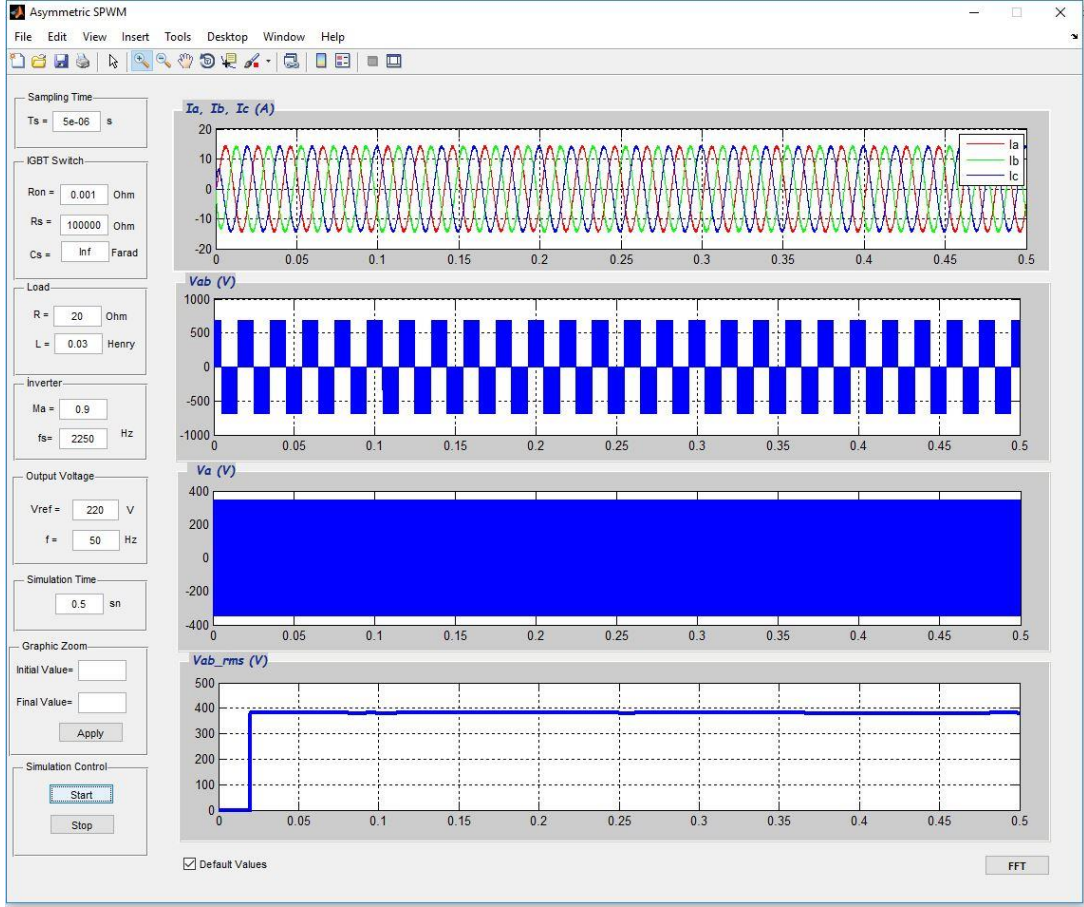
Şekil 4.8. Simetrik SPWM için benzetim ekranı

“Symmetric SPWM” tekniği için inverter çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat gerilimi ve FFT sonuçları Şekil 4.9(a)-(c)’de verilmiştir. Şekil 4.3’teki benzetim değer ekranında “Symmetric SPWM” yönteminin karşısındaki “Get Values” butonuna tıklayarak Şekil 4.9(d)’ de gösterildiği gibi bu benzetime ilişkin bazı sayısal değerler bu ekrana kaydedilir.



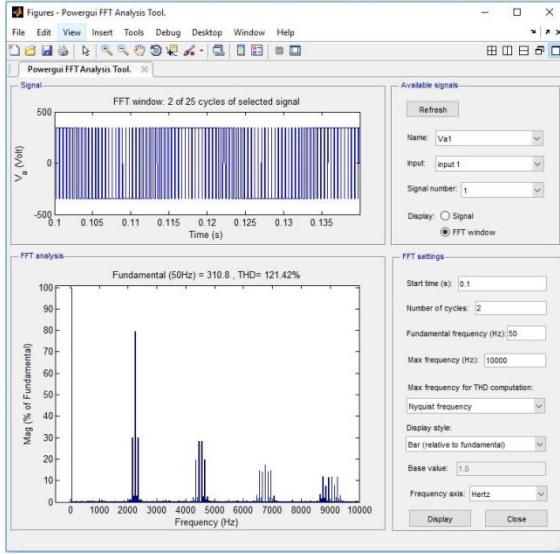
Şekil 4.9. Simetrik SPWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları

Kullanıcının Şekil 4.3'teki "Simulation Value Monitor" isimli ekranda üçüncü olarak "Asymmetric SPWM" tekniğini seçmesi durumunda karşısına çıkacak yeni ekran ve "Start" butonuna tıkladığında çizdirilecek inverter çıkış dalga şekilleri Şekil 4.10'de gösterilmiştir.

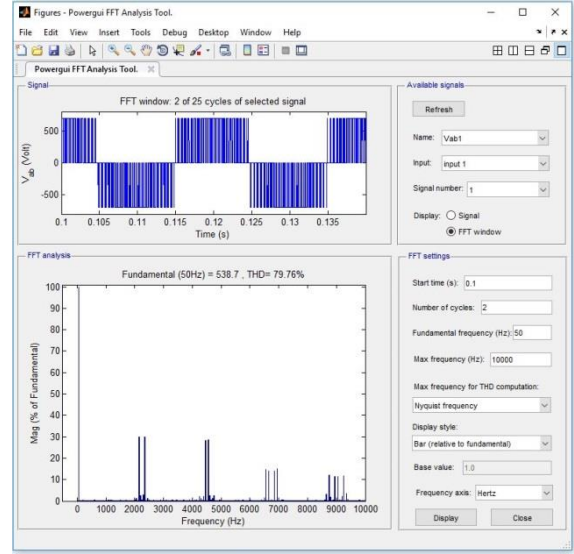


Şekil 4.10. Asimetrik SPWM için benzetim ekranı

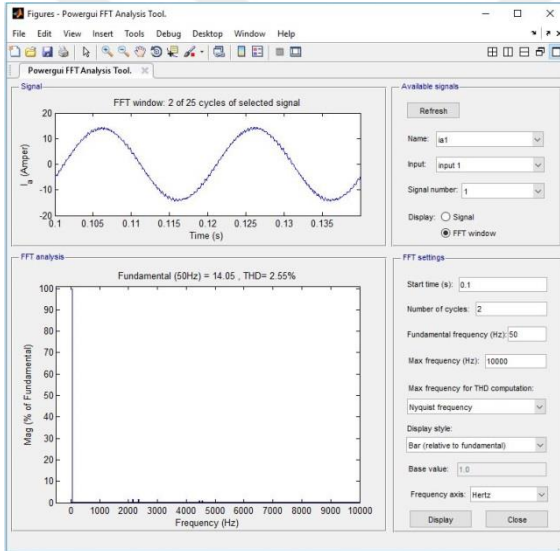
“Asymmetric SPWM” tekniğinin seçilmesi durumu için inverter çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat geriliminin FFT sonuçları Şekil 4.11(a)-(c)’de gösterilmiştir. Bu teknikle ilgili deney bittikten sonra kullanıcının Şekil 4.3’teki Benzetim Değer Ekranında benzetimin en başında seçtiği “Symmetric SPWM” yönteminin karşısındaki “Get Values” butonuna tıklayarak Şekil 4.11(d)’ de gösterildiği gibi diğer iki benzetim sonucuna ilave olarak bu benzetime ilişkin sayısal değerleri de bu ekrana kaydetmektedir.



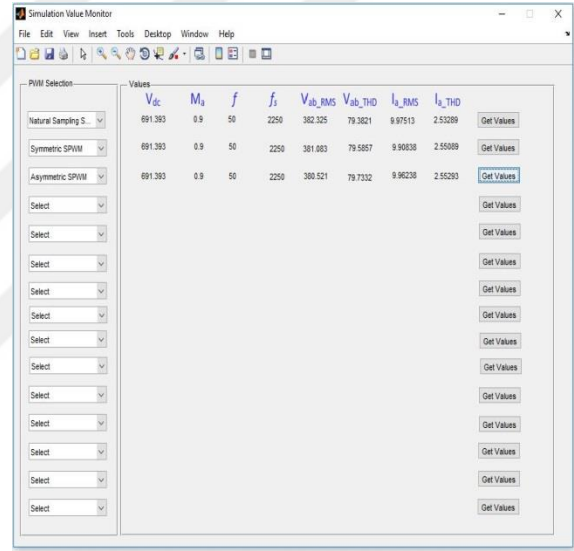
(a)



(b)



(c)

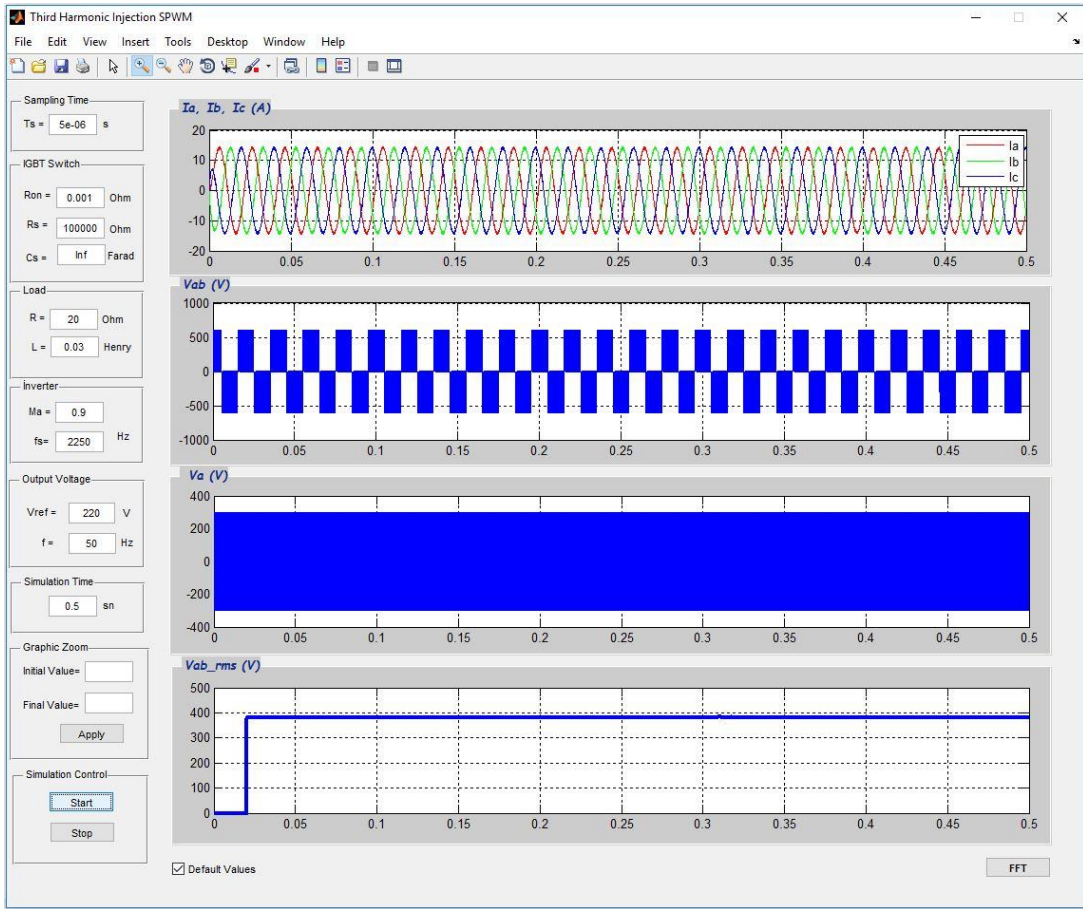


(d)

Şekil 4.11. Asimetrik SPWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları



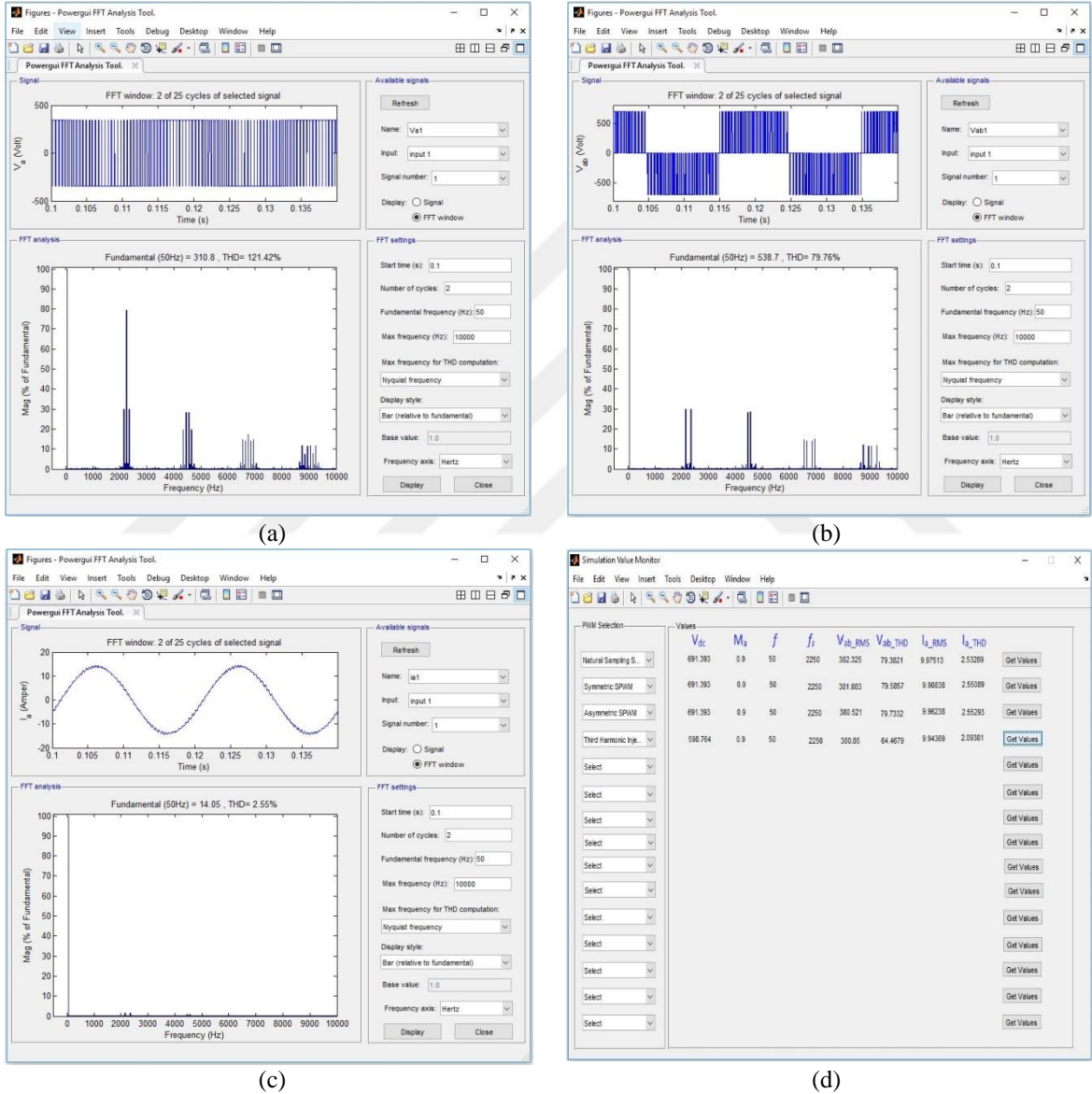
Kullanıcının Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranında dördüncü deney için “*Third Harmonic Injection SPWM*” tekniğini seçmesi durumunda karşısına Şekil 4.12’de gösterilen *Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM* benzetim ekranı çıkacaktır. Bu ekranda parametre değer girişlerinden sonra “*Start*” butonuna tıkladığında inverter çıkış dalga şekillerine ilişkin grafikler benzetim süresi sonunda Şekil 4.12’de otomatik olarak çizdirilmiştir.



Şekil 4.12. 3.Harmonik İlaveli SPWM için benzetim ekranı

Şekil 4.12’de ki benzetim ekranlarının da bulunan “*FFT*” butonu tıkladığında açılacak *Powergui FFT* analiz aracında parametre ayarı yapıldıktan sonra “*Display*” butonuna tıkladığı zaman, *Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM* inverter için çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat geriliminin FFT sonuçları Şekil 4.13(a)-(c)’de elde edilecektir.

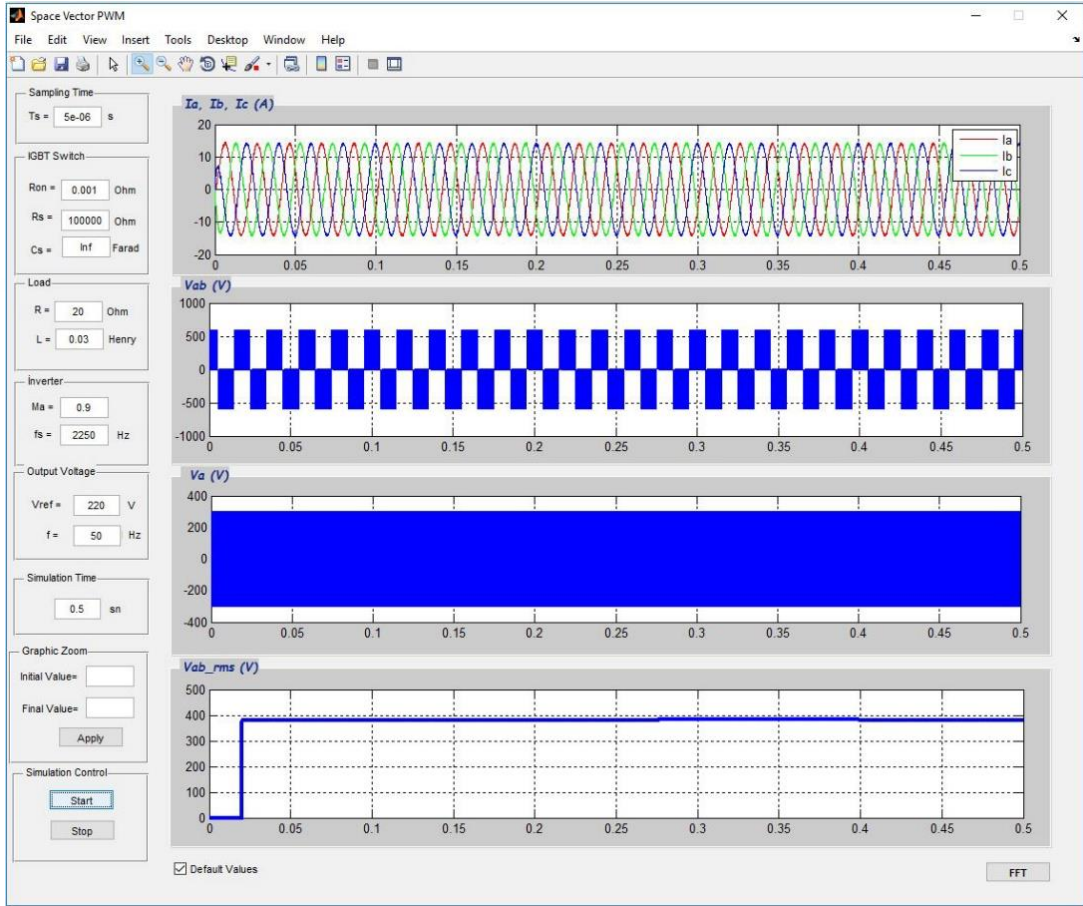
Şekil 4.12’de çizdirilen dalga şekilleri ve Şekil 4.13(a)-(c)’ de çizdirilen FFT analiz sonuçları kullanıcı tarafından istenilen şekillerde kaydedilebilir. Daha sonra, kullanıcının Şekil 4.3’teki değer ekranında benzetimin en başında seçtiği “*Third Harmonic Injection SPWM*” yönteminin karşısındaki “*Get Values*” butonuna tıklayarak Şekil 4.13(d)’ de gösterildiği gibi daha önceki üç deneye ilave olarak bu benzetime ilişkin bazı parametrelerin sayısal değerleri de bu ekrana kaydedilmiştir.



Şekil 4.13. 3. Harmonik İvelveli SPWM için FFT Analizleri ve Benzetim Değer Ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) Benzetim sayısal sonuçları

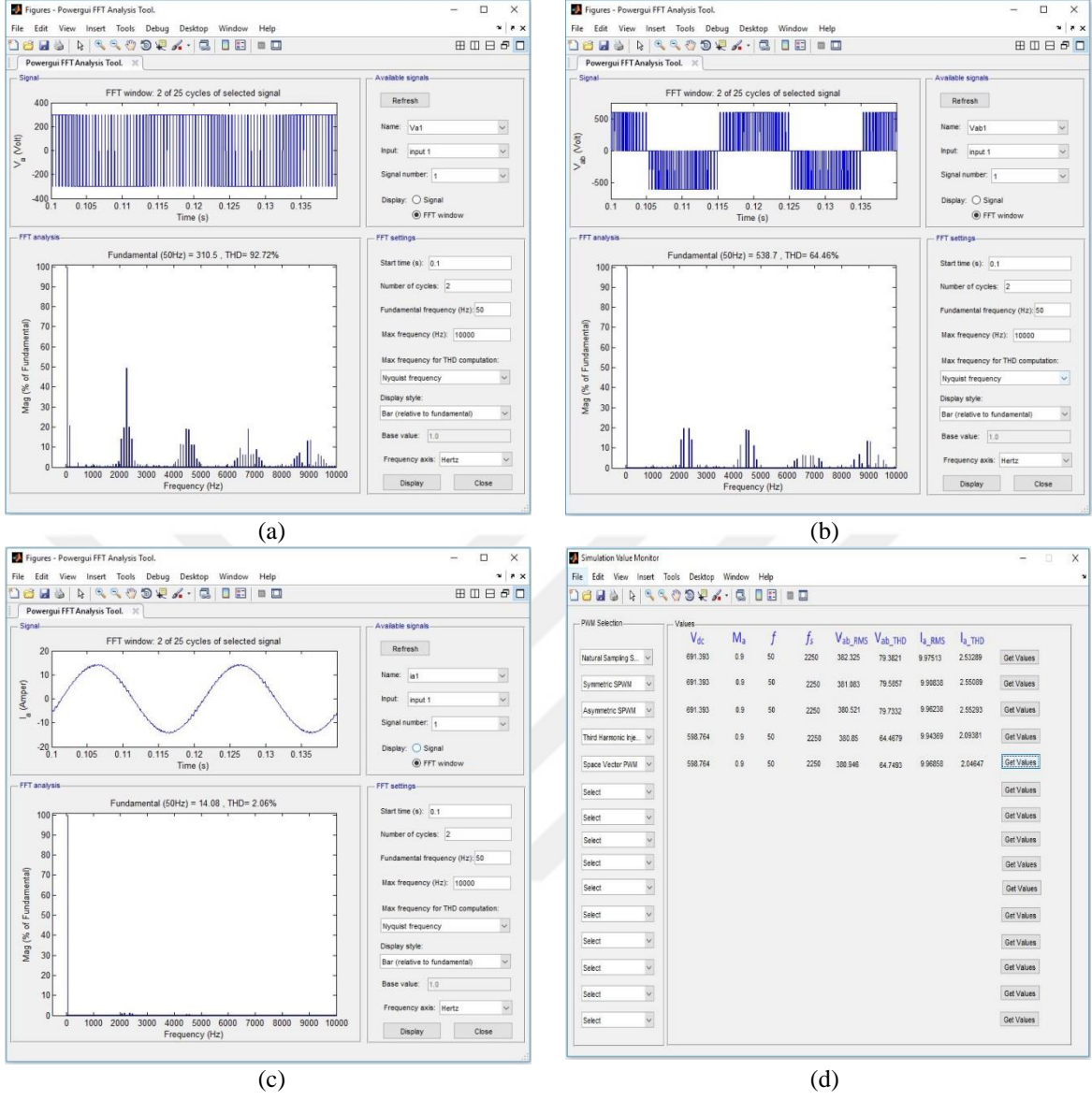


Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranında beşinci deney için “*Space Vector PWM*” tekniğinin seçilmesi durumunda, açılacak yeni benzetim ekranı ve bu ekrandaki parametre girişinden sonra benzetim süresi sonunda elde edilen inverter çıkış dalga şekilleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



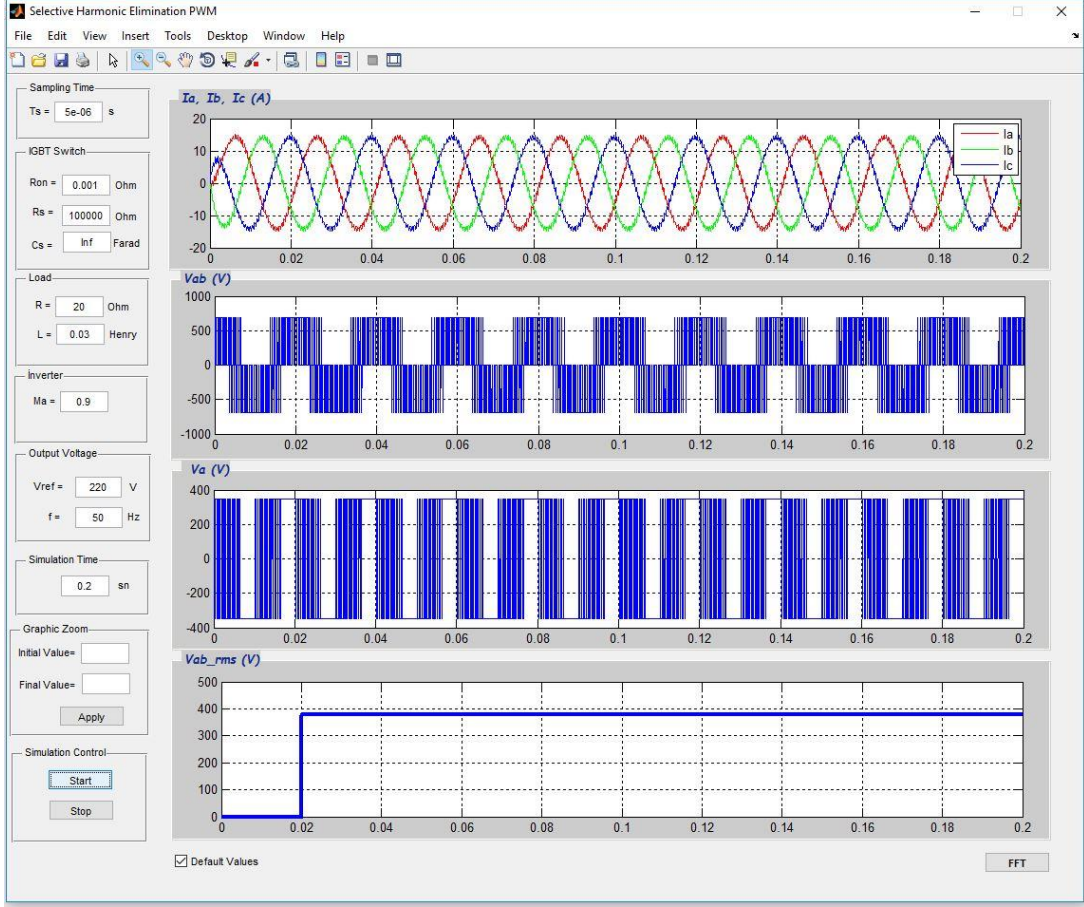
Şekil 4.14. Uzak Vektör PWM için benzetim ekranı

Şekil 4.14'de ki ekranda bulunan “*FFT*” butonu tıklandığında açılacak *Powergui FFT* analiz aracında parametre ayarı yapıldıktan sonra “*Display*” butonuna tıklandığında elde edilen çıkış faz akımı, gerilimi ve hat geriliminin FFT sonuçları Şekil 4.15(a)-(c)'de verilmiştir. Bu tekniğe ilişkin benzetim bittikten sonra, Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranındaki “*Space Vector PWM*” tekniği karşısındaki “*Get Values*” butonuna tıklayarak Şekil 4.15(d)' de gösterildiği gibi bu benzetime ilişkin bazı önemli parametreler ilave olarak bu ekrana kaydedebilecektir.



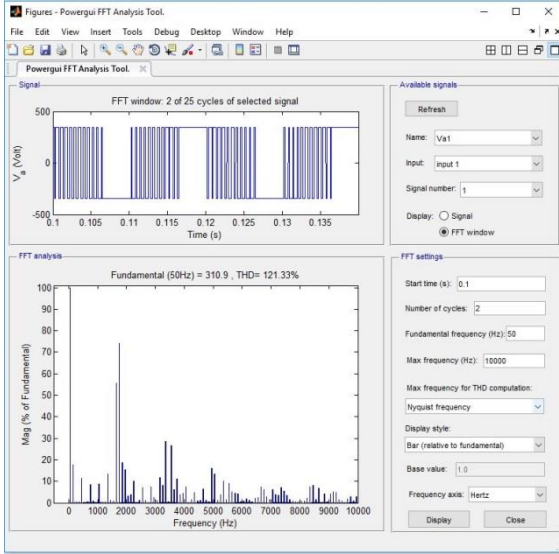
Şekil 4.15. Uzak Vektör PWM için FFT analizleri ve benzetim değer ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) benzetim sayısal sonuçları

Şekil 4.3'teki benzetim değer ekranında altıncı ve son olarak “*Selective Harmonic Elimination PWM*” tekniğinin seçilmesi durumunda açılacak benzetim ekranı ve buradaki parametrelere yukarıda verilen sabit değerler yazılarak “*Start*” butonuna tıkladığında çizdirilen inverter çıkış dalga şekillerine ilişkin grafikler ise Şekil 4.16’da gösterilmiştir.

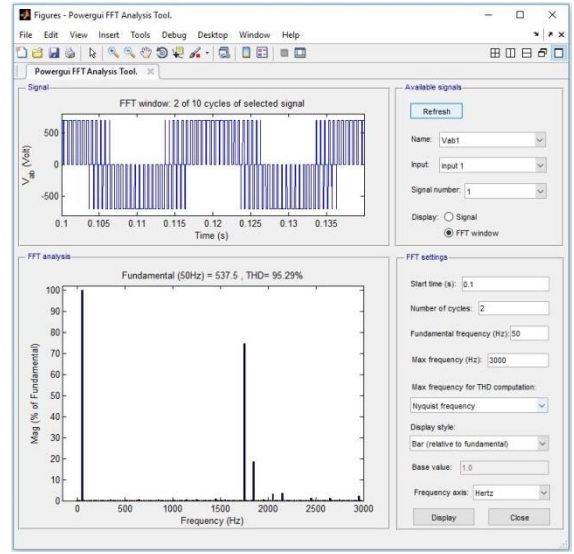


Şekil 4.16. SHE PWM için benzetim ekranı

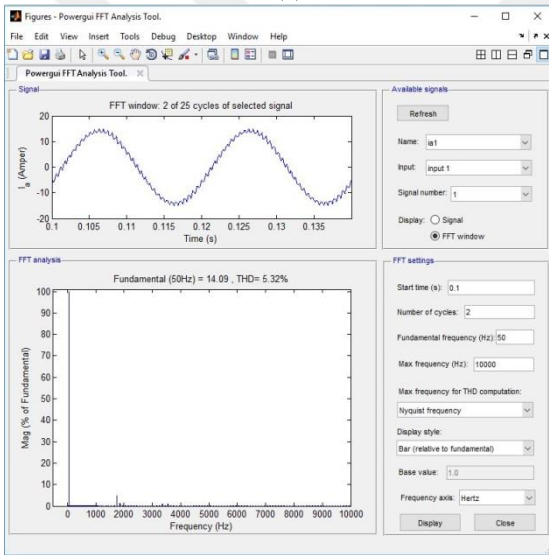
Şekil 4.16’da “*FFT*” butonu tıklandığında açılacak *FFT* analiz aracında gerekli parametreler girildikten sonra “*Display*” butonuna tıklandığı zaman elde edilen inverter çıkış faz akımı, faz gerilimi ve hat gerilimi ve *FFT* sonuçları Şekil 4.17(a)-(c)’de gösterilmiştir. Benzetim bittikten sonra, Şekil 4.3’teki benzetim değer ekranında “*Selective Harmonic Elimination PWM*” yönteminin karşısındaki “*Get Values*” butonuna tıklandığında Şekil 4.17(d)’de gösterildiği gibi bu benzetime ilişkin sayısal değerler önceliklere ilave olarak bu ekrana kaydedilir.



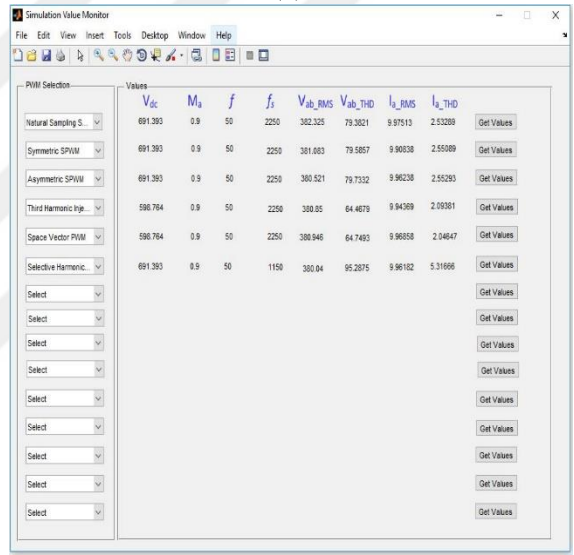
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.17. SHE-PWM için FFT Analizleri ve Benzetim Değer Ekranı; a) faz gerilimi FFT, b) hat gerilimi FFT, c) faz akımı FFT, d) Benzetim sayısal sonuçları

#### 4.2.1. Aynı Parametreler İçin Alınan Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Aynı parametreler için yukarıda elde edilen benzetim sonuçları aşağıda farklı açılardan değerlendirilmiştir.

##### ➤ Dalga Şekilleri Açısından Değerlendirilmesi

Bu benzetimlerde altı farklı PWM tekniği için Şekil 4.6 – Şekil 4.17 ‘de çizdirilen bütün V<sub>a</sub> faz gerilimleri iki-seviyeli ( $-V_{dc}/2$ ,  $+V_{dc}/2$ ), V<sub>ab</sub> hat gerilimleri üç-seviyeli ( $-V_{dc}$ ,  $0$ ,  $+V_{dc}$ ) olarak beklenildiği gibi elde edilmiştir. Üstelik bu gerilimler inverterin gerilim kaynaklı olmasından dolayı yükten tamamen bağımsızdır. I<sub>a</sub>, I<sub>b</sub> ve I<sub>c</sub> faz akım değerleri ise

yükün türüne bağlı olarak indüktansında etkisi ile beklenildiği gibi sinüzoidal olarak elde edilmiştir.

#### ➤ DC-Hat Gerilimleri Açısından Değerlendirilmesi

Gerilim kaynaklı inverterler için çıkış gerilimi yükten bağımsız olup, Doğal Örneklemeli SPWM, Simetrik SPWM, Asimetrik SPWM ve SHE-PWM için iki seviyeli inverter çıkış faz geriliminin ana harmoniği denklem (4.1) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$V_{1\_max} = \frac{V_{dc}}{2} M_a \quad (4.1)$$

Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM ve Uzay Vektör PWM için ise çıkış faz geriliminin ana harmoniği denklem (4.2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$V_{1\_max} = \frac{V_{dc}}{2} M_a \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan benzetimlerde bütün PWM teknikleri için aynı  $M_a=0.9$  modülasyon indeksinde inverter çıkışından sabit 220V rms faz gerilimi veya 381V rms hat gerilimi elde edilmek istenmiştir. Bu durumda gerekli olacak dc-hat gerilim değerleri denklem (4.1) ve (4.2)'den hesaplanarak Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM ve Uzay Vektör PWM teknikleri kullanıldığında diğer tekniklere kıyasla %15 daha küçük bir dc-hat gerilim değeri ile aynı ac çıkış gerilimi elde edilmiştir. Daha düşük bir dc-hat gerilimi; gerçek uygulamalarda şebekeye bağlı inverter girişindeki ac/dc doğrultucu ve dc/dc kıyıcı devrelerinin güç devresinin, yenilenebilir kaynaklara bağlı inverter girişinde ise dc kaynak ve akü grubunun daha küçük olmasını sağlayacaktır. Dolayısı ile fiyatta da azalma olacaktır. Bununla birlikte %15 daha küçük bir dc-hat gerilim değeri; dc gerilimin en az %10 fazlası bir anma gerilim değerine sahip olması gereken dc-hatta kondansatörlerinde boyut ve fiyatının düşmesine neden olacaktır.

#### ➤ Çıkış Gerilim ve Akımlarının Harmonik İçeriği Açısından Değerlendirilmesi

İki-seviyeli gerilim kaynaklı bir inverterden istenilen önemli özelliklerden biri çıkış geriliminin ve yük akımının %THD değerinin düşük olmasıdır. Gerilim için düşük %THD değerleri; kullanılan PWM tekniğinde  $f_s$  anahtarlama frekansı artırılarak elde edilebilir. 10kHz gibi yüksek anahtarlama frekanslarında iki-seviyeli inverterlerde THD değeri %40-60 arasına düşürülebilirse de, *IEEE 519-1992 Harmonik Standartları*'na göre kaliteli bir çıkış gerilimi için bu değer %5'in altında olması gerekir. Günümüzde bazı uygulamalar

için inverter çıkışında filtreler kullanılarak THD değeri %3'e düşürülüp ticari olarak *Sinüs Inverter* adı ile satılmaktadır [37].

Yük akımı için ise *IEEE 519-1992 Harmonik Standartları*'na göre mutlaka THD'nin %5'in altına düşürülmesi istenmektedir. Yük akımı;

$$I = \frac{V_{out}}{Z} = \frac{V_{out}}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}} \quad (4.3)$$

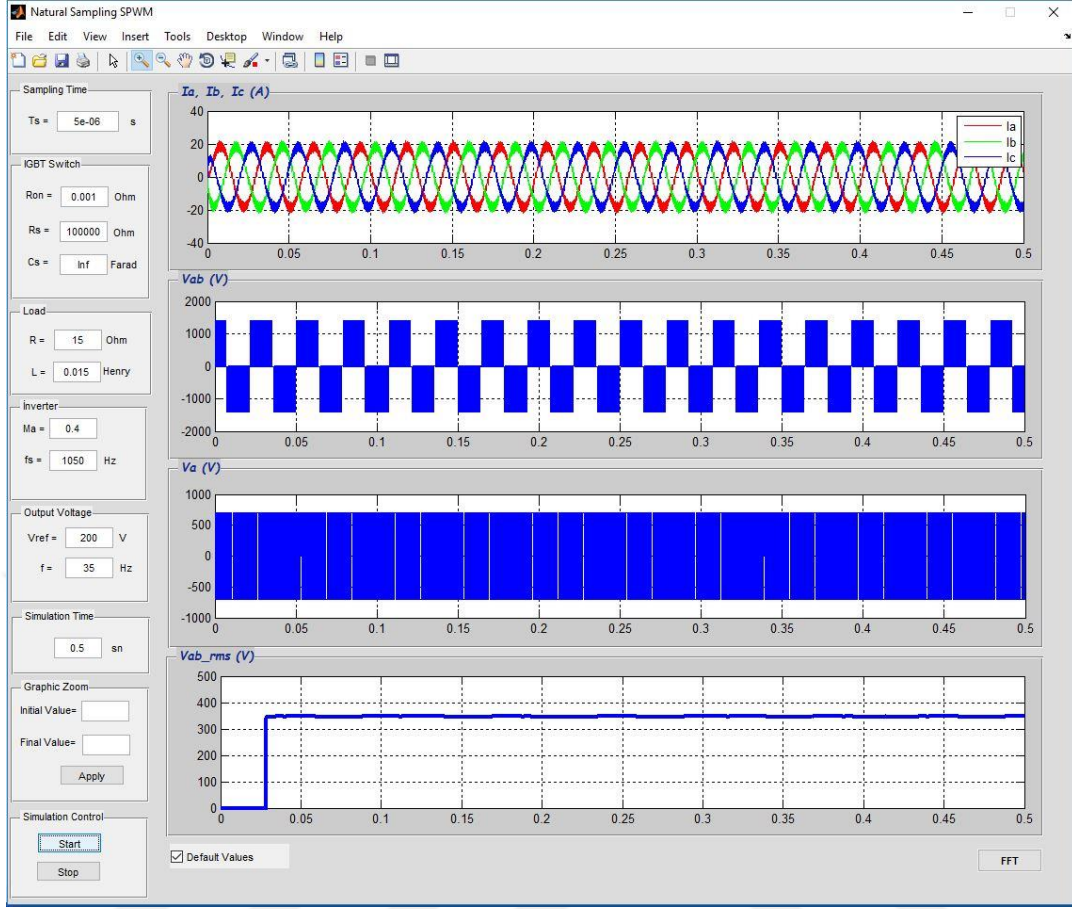
formülü ile hesaplanmaktadır. Denklem (4.3)'ten görüldüğü gibi eğer çıkış geriliminin THD oranı düşük ise akımın THD değeri de düşük olacaktır. Bununla birlikte yükün L indüktans değeri bir alçak geçiren filtre gibi davranarak THD değerinin daha küçük olmasını sağlamaktadır.

Şekil 4.17(d)'de bütün PWM teknikleri için alınan sayısal değerler dikkate alındığında aynı  $M_a$  modülasyon indeksi ve  $f_s$  anahtarlama frekansında gerilim ve akım için en düşük %THD değerleri "*Space Vector PWM*" ve "*Third Harmonic Injection PWM*" teknikleri kullanıldığında elde edilmiştir. Ancak "*Selective Harmonic Elimination PWM*" tekniği düşük anahtarlama frekanslarında çalışmak için geliştirilen bir teknik olup,  $f=50\text{Hz}$  çıkış frekanslı bu benzetimde sabit  $N=11$  açılı SHE-PWM  $f_s=(2N+1).f=23 \times 50=1150\text{Hz}$  anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Anahtarlama frekansı diğerlerine göre düşük olduğu için akım ve gerilim THD değerleri yüksek çıkmıştır. Şekil 4.17(d)'de bütün PWM teknikleri için akım THD değerleri %5'in altında ve civarında olduğu için inverter çıkışında filtre kullanılmayabilir. Anahtarlama frekansı biraz daha artırılırsa bu oranlar çok daha düşecektir. Bununla birlikte maliyet ve boyut artışı da göz önünde bulundurularak eğer uygulama için çok gerekli ise gerilimin THD değerlerini düşürmek için filtre kullanılabilir. Bu durumda akımın THD değeri çok daha düşük olacaktır.

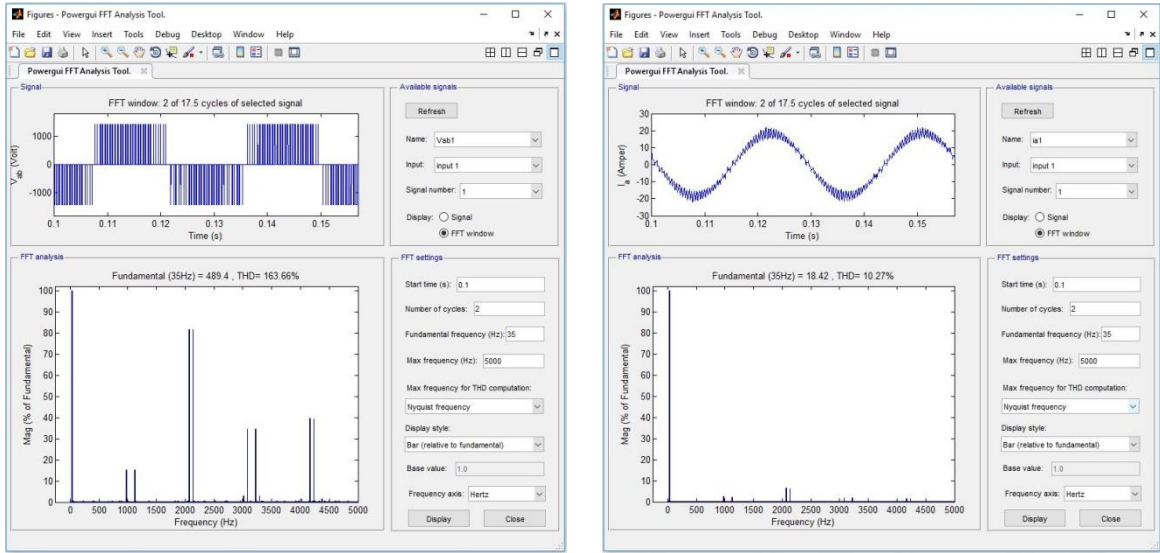
### 4.3. Farklı Parametreler için Benzetim Sonuçları

MATLAB GUI tabanlı benzetim ortamında, inverter, yük ve PWM teknikleri için aynı parametreler kullanılması durumunda farklı PWM yöntemleri ile çalıştırılan inverterin çıkış dalga şekillerinin analizleri Bölüm 4.2'de verilmiştir. Ancak farklı parametreler kullanılması durumunda PWM teknikleri ile ilgili benzetim ortamının tutarlılığını analiz etmek gerekmektedir. Bununla birlikte yükün bir motor olması durumunda,  $V/f$  veya *Vektör Kontrol* için inverter her an farklı genlik ve frekansta gerilim üretmesi gerekmektedir. Bu nedenle, tez çalışmasının bu bölümünde her bir PWM tekniği için farklı parametreler kullanılması durumunda benzetim sonuçları verilmiştir.





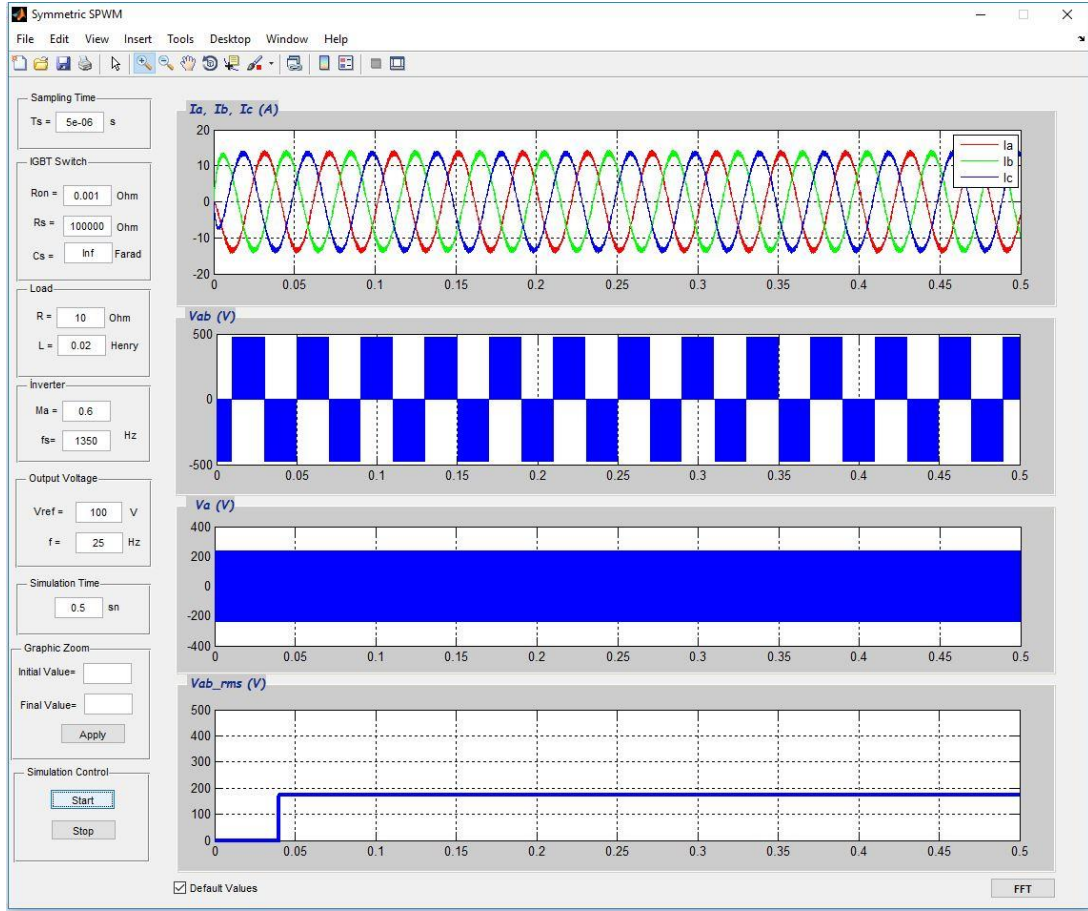
Şekil 4.18.  $R=15\Omega$ ,  $L=15\text{mH}$ ,  $M_a=0.4$ ,  $f_s=1050\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=200\text{V}$ ,  $f=35\text{Hz}$  için Doğal Örnekleme SPWM benzetim sonuçları



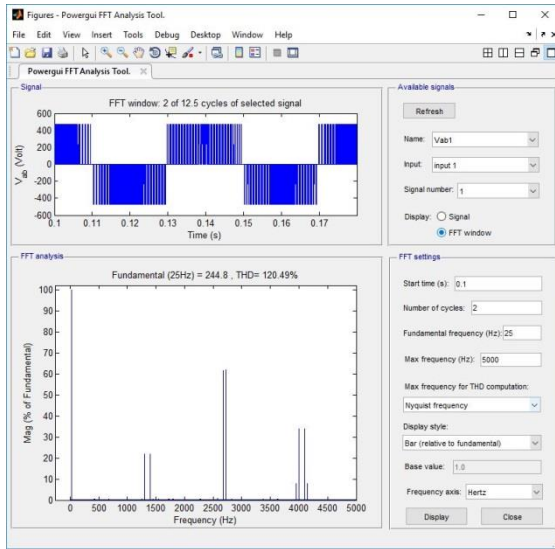
(a)

(b)

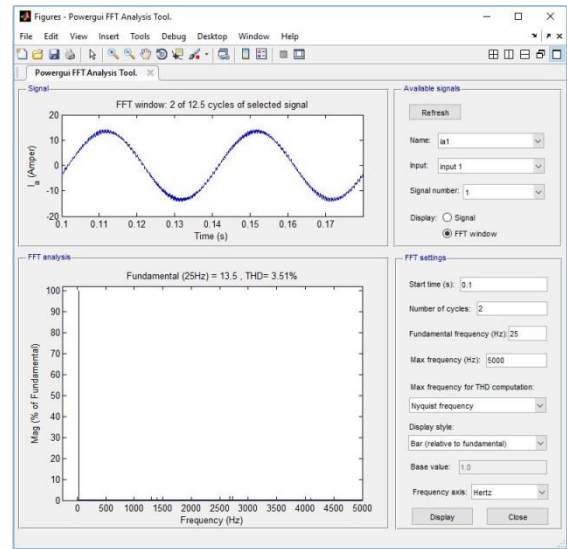
Şekil 4.19. Doğal Örnekleme SPWM için FFT analizleri, a) hat gerilimi, b) faz akımı



Şekil 4.20.  $R=10\Omega$ ,  $L=20\text{mH}$ ,  $M_a=0.6$ ,  $f_s=1350\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=100\text{V}$ ,  $f=25\text{Hz}$  için Simetrik SPWM benzetim sonuçları



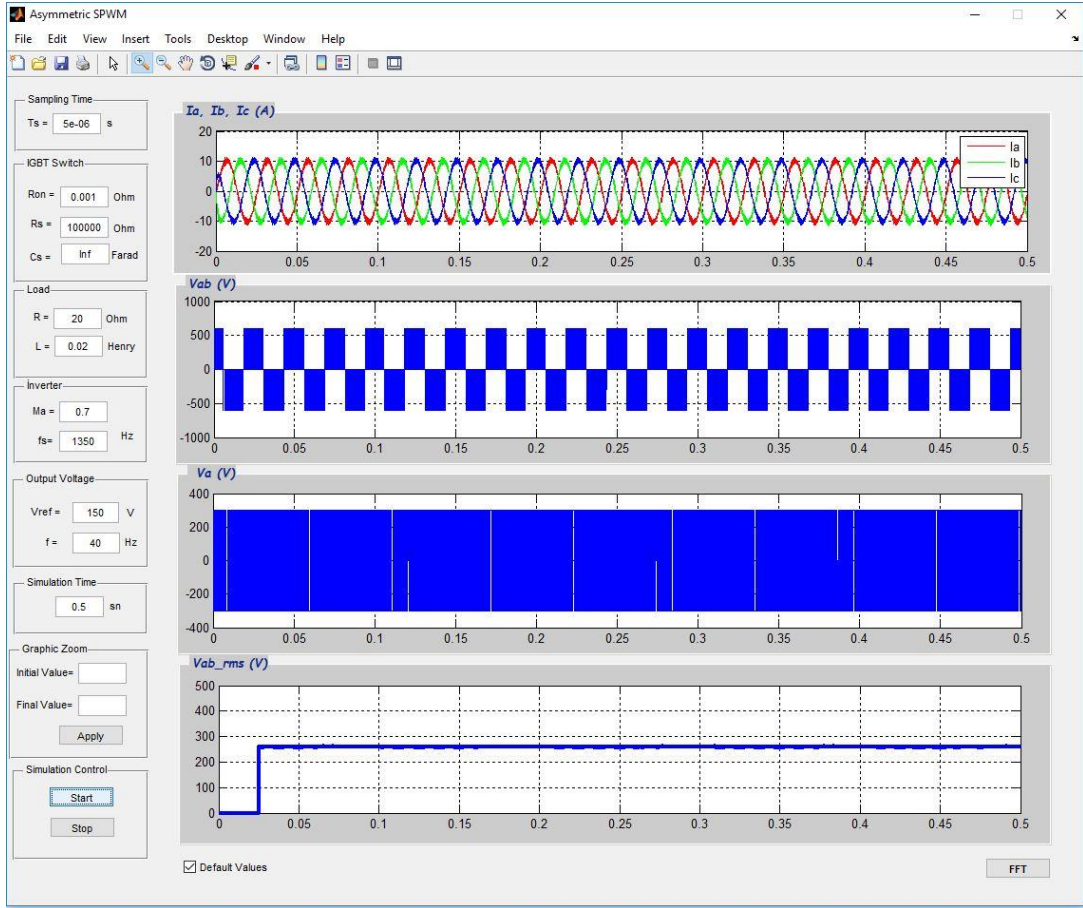
(a)



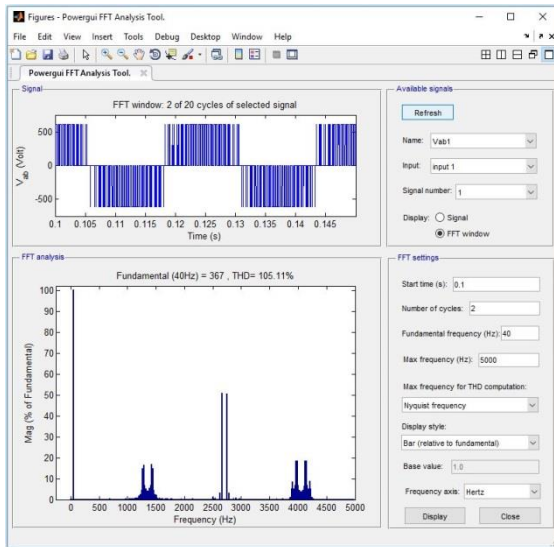
(b)

Şekil 4.21. Simetrik SPWM için FFT analizleri, a) hat gerilimi ve b) faz akımı

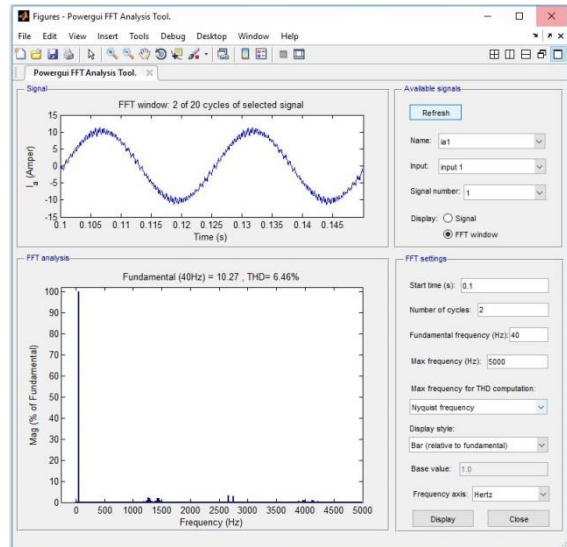




Şekil 4.22.  $R=20\Omega$ ,  $L=20\text{mH}$ ,  $M_a=0.7$ ,  $f_s=1350\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=150\text{V}$ ,  $f=40\text{Hz}$  için Asimetrik SPWM benzetim sonuçları

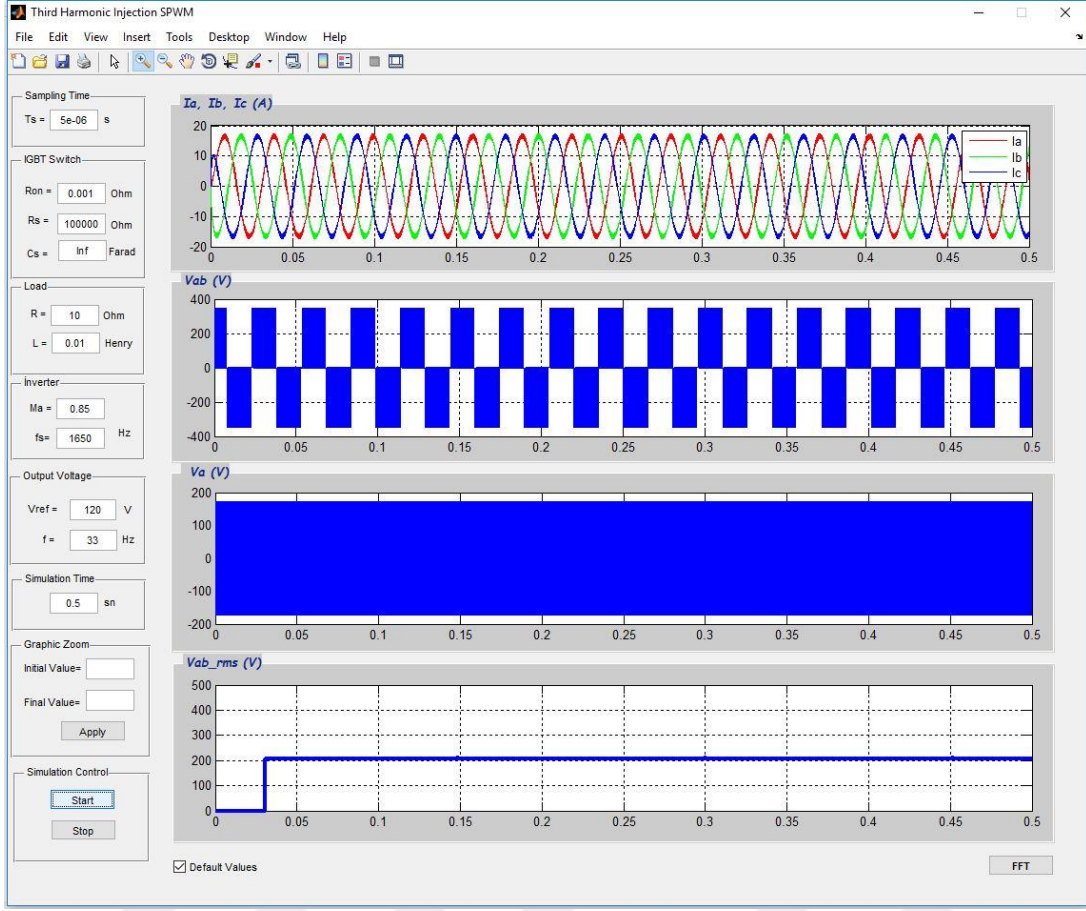


(a)

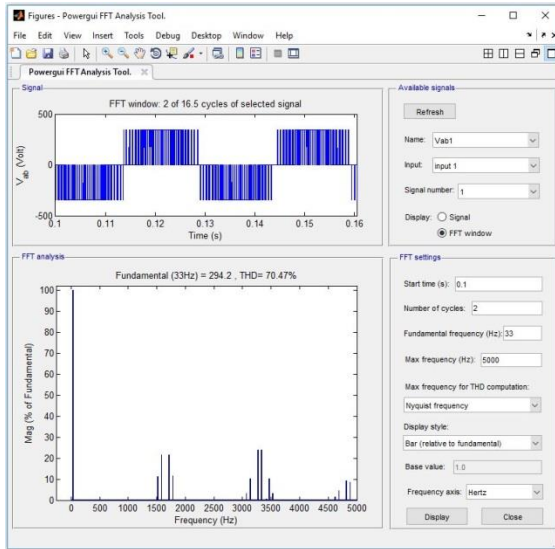


(b)

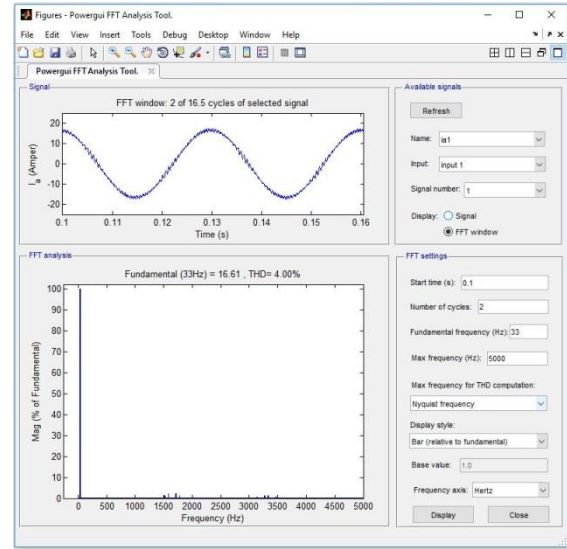
Şekil 4.23. Asimetrik SPWM için FFT analizleri, a) hat gerilimi ve b) faz akımı



Şekil 4.24.  $R=10\Omega$ ,  $L=10\text{mH}$ ,  $M_a=0.85$ ,  $f_s=1650\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=120\text{V}$ ,  $f=33\text{Hz}$  için 3.Harmonik İlaveli SPWM benzetim sonuçları

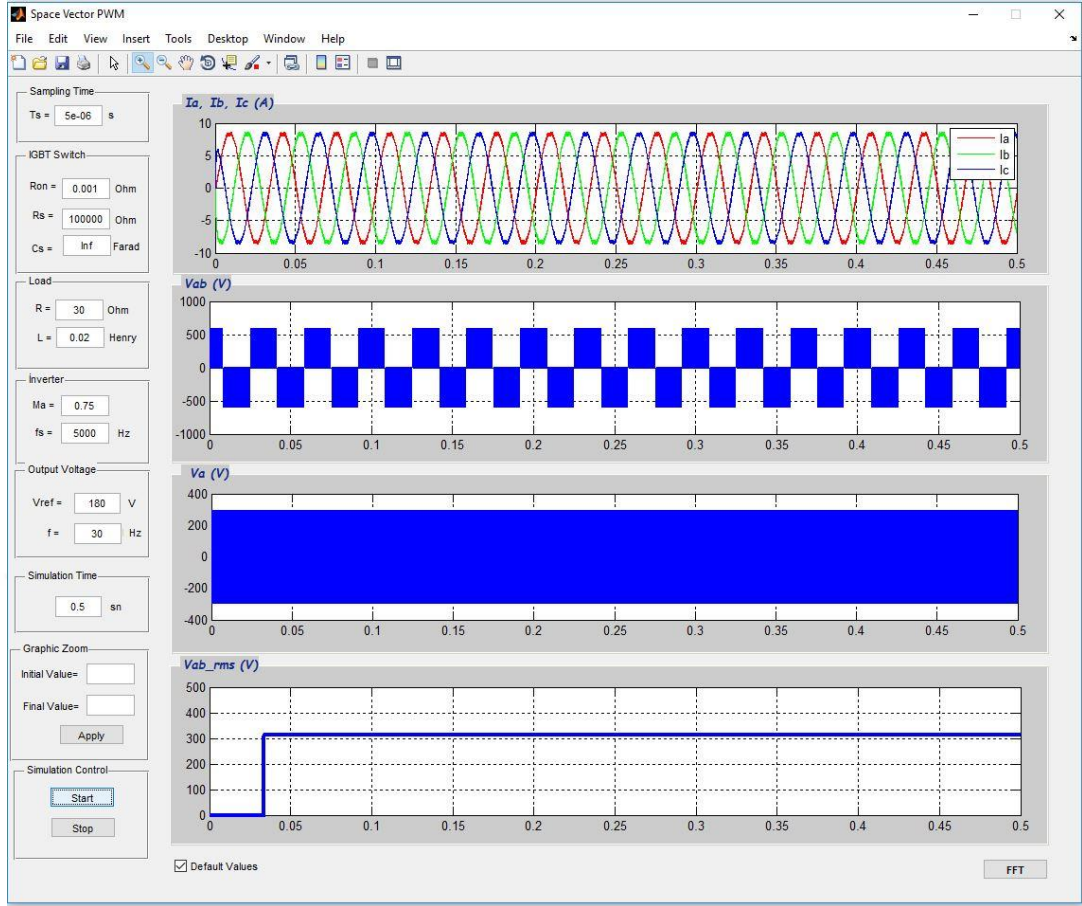


(a)

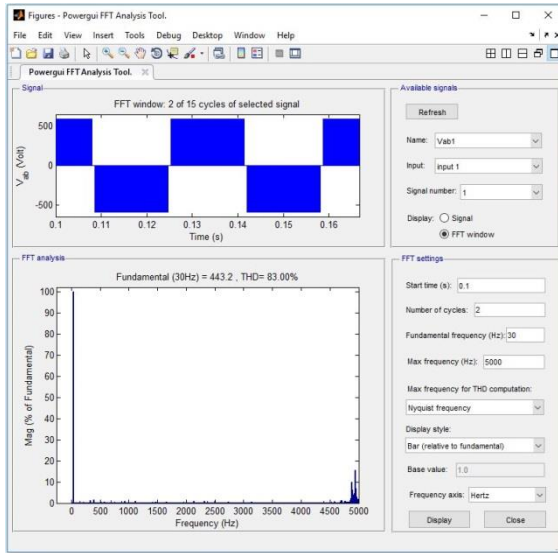


(b)

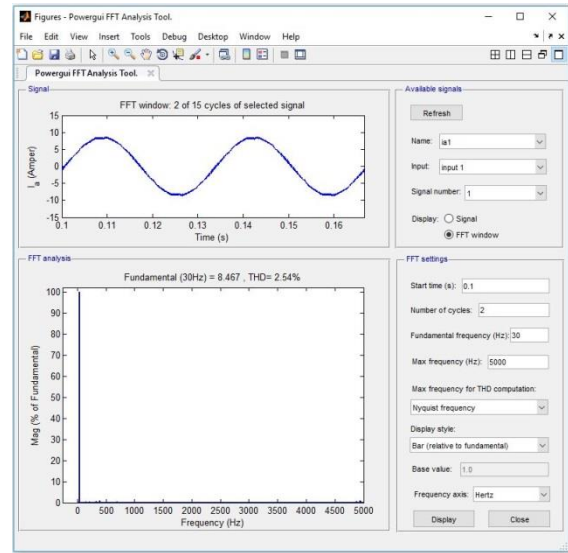
Şekil 4.25. 3. Harmonik İlaveli SPWM için FFT analizleri, a) hat gerilimi ve b) faz akımı



Şekil 4.26.  $R=30\Omega$ ,  $L=20\text{mH}$ ,  $M_a=0.75$ ,  $f_s=1950\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=180\text{V}$ ,  $f=30\text{Hz}$  için *Uzay Vektör PWM* benzetim sonuçları

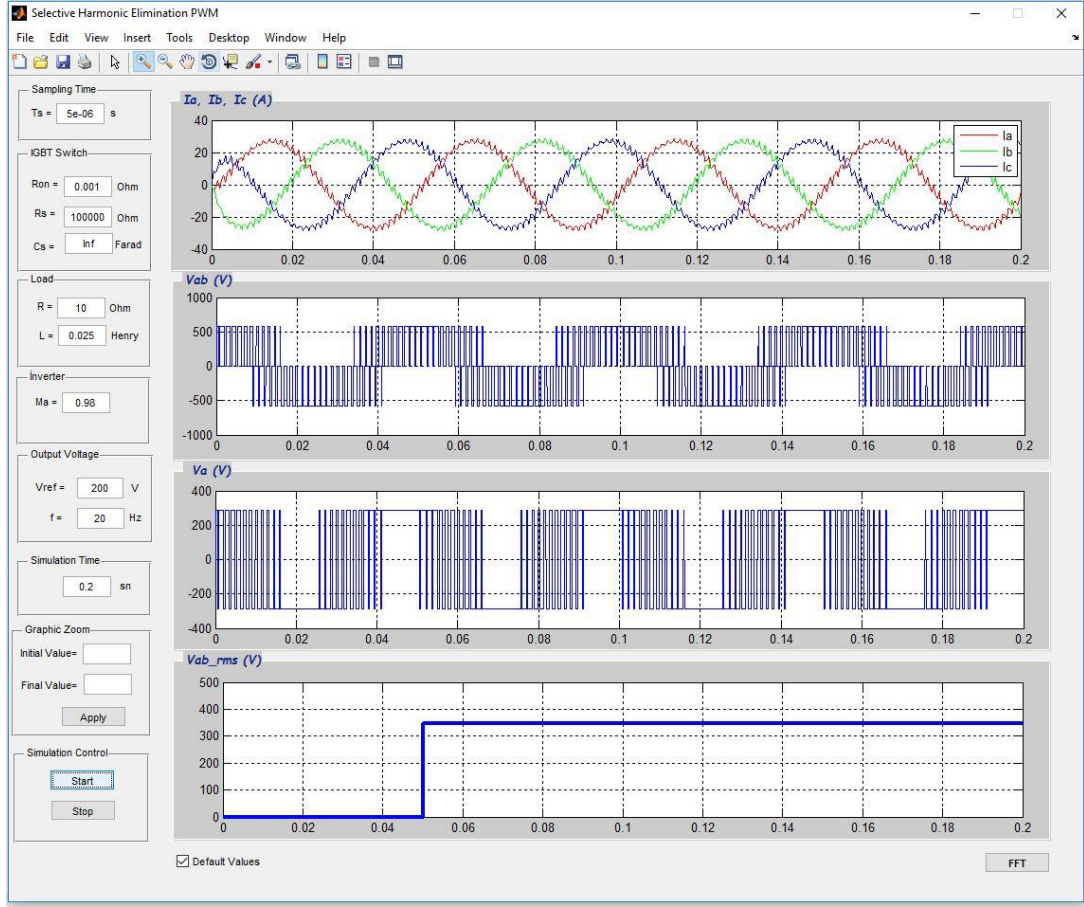


(a)

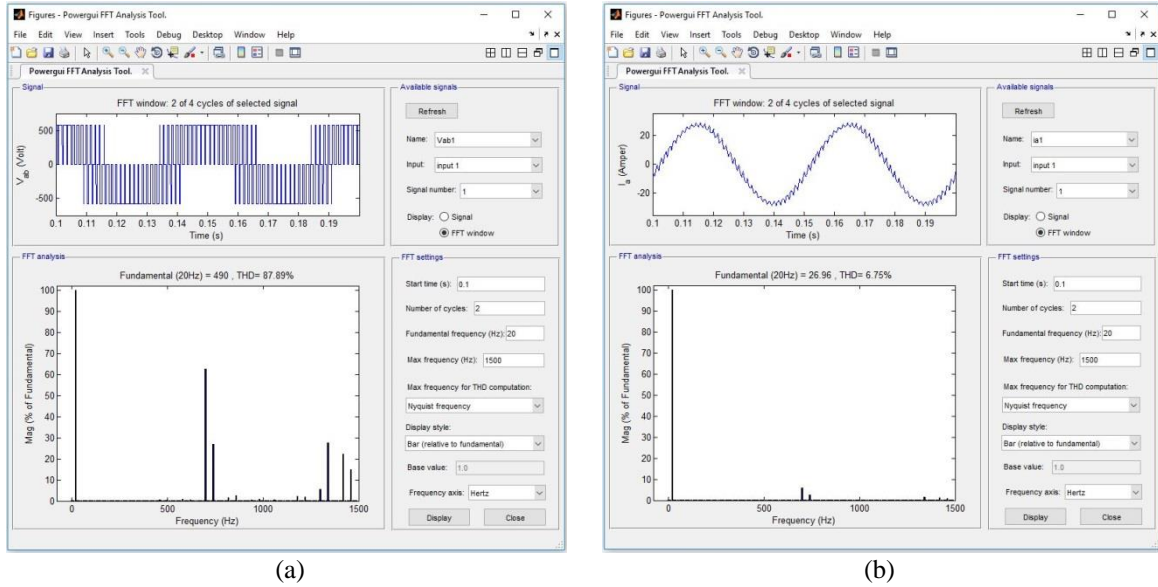


(b)

Şekil 4.27. *Uzay Vektör PWM* için FFT analizleri, a) hat gerilimi ve b) faz akımı



Şekil 4.28.  $R=10\Omega$ ,  $L=25\text{mH}$ ,  $M_a=0.98$ ,  $f_s=460\text{Hz}$ ,  $V_{\text{ref}}=200\text{V}$ ,  $f=20\text{Hz}$  için Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM benzetim sonuçları



Şekil 4.29. Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM için FFT analizleri, a) hat gerilimi ve b) faz akımı



Tez çalışmasının bu bölümünde altı farklı PWM tekniği için birbirinden farklı parametreler kullanılarak yapılan her bir benzetime ilişkin dalga şekilleri kaydedildikten sonra, o PWM tekniğinin karşısındaki “Get Values” butonuna tıkladığında Şekil 4.30’da gösterildiği gibi her bir benzetime ilişkin sayısal değerler benzetim değer ekranına kaydedilmiştir

PWM Selection	V <sub>dc</sub>	M <sub>a</sub>	f	f <sub>s</sub>	V <sub>ab_RMS</sub>	V <sub>ab_THD</sub>	I <sub>a_RMS</sub>	I <sub>a_THD</sub>
Natural Sampling S...	1414.21	0.4	35	1050	347.526	163.209	13.0009	10.2799
Symmetric SPWM	471.405	0.6	25	1350	172.856	120.685	9.54244	3.50747
Asymmetric SPWM	606.092	0.7	40	1350	260.949	104.522	7.25378	6.46269
Third Harmonic Inje...	345.81	0.85	33	1650	207.467	70.7583	11.7514	4.00942
Space Vector PWM	587.878	0.75	30	5000	313.466	82.8769	3.90448	2.45802
Selective Harmonic...	577.23	0.98	20	460	346.464	87.8873	19.0622	6.75222
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								
Select								

Şekil 4.30. Benzetim Sayısal Sonuçları

#### 4.3.1. Farklı Parametreler İçin Alınan Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı parametreler için Şekil 4.18-Şekil 4.30’da elde edilen benzetim sonuçları; genel olarak benzetim ortamının altı PWM tekniği için; farklı modülasyon indeksi, çıkış gerilimi, anahtarlama frekansında başarılı bir şekilde çalıştığını/çalışabileceğini göstermektedir.

PWM tekniğinde kullanılan modülasyon indeksi arttıkça çıkış geriliminin genliği artmakta ve THD oranı azalmaktadır. Bu durum Şekil 4.30’daki ilk üç benzetim *Doğal Örneklemeli*, *Simetrik* ve *Asimetrik* Sinüs PWM sayısal sonuçlarından görülmektedir. İlave olarak uzay Vektör PWM için elde edilen sayısal değerlerden görüldüğü gibi, modülasyon indeksinin  $M_a=0.7$  gibi orta bir değerinde anahtarlama frekansı artırılarak ( $f_s=5\text{kHz}$ ) gerilimin THD değeri azaltılabilir. Gerilimin THD sinin azalması, bu kaynaktan beslenen yükün çektiği akımın THD değerinin de her zaman azalmasına neden olmaktadır. Bu bölümde yapılan son benzetimde sabit  $N=11$  açılı SHE-PWM tekniği için  $f=20\text{Hz}$  kullanıldığı için inverter anahtarları  $f_s=(2N+1).f=23 \times 20=460\text{Hz}$  anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında elektrik-elektronik mühendisliği alanında endüstriyel, yenilebilir enerji ve ev cihazlarında çok yaygın olarak kullanılan iki-seviyelin inverter ve anahtarlama teknikleri ile ilgili bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Benzetim ortamının hedef kitlesi; ulusal ve uluslararası elektrik-elektronik, mekatronik, enerji mühendisliklerinin lisans ve özellikle yüksek lisans/doktora öğrencileridir. Gerçek laboratuvar ortamında öğrenciler tarafından yapılması zor, tehlikeli ve masraflı olan bazı deneylerin daha kolay yapılması ve konunun kolayca kavranması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen bu benzetim ortamı sayesinde, derste teorik kısmı verilen üç-fazlı iki-seviyelin inverterin çalışma mantığı ve farklı PWM teknikleri kullanılarak anahtarlanması ile ilgili benzetimleri daha kolay yapabileceklerdir. Ayrıca, grafiklerle görselleştirilen ve sayısal olarak da tablo halinde alınabilen benzetim sonuçları öğrenmede daha etkili olacaktır.

Benzetim ortamında inverter ve RL yükü ve PWM anahtarlama tekniği modelleri MATLAB/Simulink ve SimPower Systems blokları kullanılarak geliştirilmiştir. Benzetim ortamının kullanıcı ara yüzü ise MATLAB GUI editörü ile oluşturulup, düzenlenmiştir. Kullanımı gayet basit ve açık olacak şekilde, formlar üzerinde buton, metin kutusu ve grafik nesneleriyle oluşturulmuştur. Benzetim ekranına PWM tekniği seçilip gerekli parametreler ve benzetim süresi girildikten sonra, kullanıcı ara yüzündeki Başlat butonuna tıklanarak arka plandaki benzetim çalıştırılıp inverter çıkışına ait dalga şekilleri doğrudan çizilmektedir. Bununla birlikte seçilen PWM tekniğine bağlı olarak inverter hat gerilim ve faz akımının efektif değerleri THD değerleri ile birlikte sayısal olarak kullanıcı ekranına kolaylıkla kaydedilmektedir. Bu sayede farklı teknikler ve farklı parametreler arasındaki değişimler rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. İlave olarak kullanıcı dalga şekilleri ile ilgili harmonik analizlerini dalga şekilleri ile ayrıca analiz edebilmektedir.

Benzetim ortamındaki altı PWM tekniğinin hepsi için ilk olarak tamamen aynı parametreler ve ikinci olarak ta tamamen farklı parametreler girilerek benzetimler yapılmış ve benzetim sonuçları ayrıntıları ile verilmiştir. Benzetim sonuçları geliştirilen benzetim ortamının altı PWM tekniği için; farklı modülasyon indeki, çıkış gerilimi, anahtarlama frekansında başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Elde edilen dalga şekillerinde faz gerilimleri iki-seviyeli ( $-V_{dc}/2$ ,  $+V_{dc}/2$ ), hat gerilimleri ise üç-seviyeli ( $-V_{dc}$ ,  $0$ ,  $+V_{dc}$ ) olarak beklenildiği gibi elde edilmiştir. İnverterin gerilim kaynaklı olduğundan dolayı, faz ve hat gerilimleri yükten tamamen bağımsız olup yük değişiminden kesinlikle etkilenmemiştir. İnverterden beslenen yükün çektiği faz akım dalga şekilleri ise yükün türüne ve değerine

bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Bununla birlikte yük indüktansının alçak geçiren bir filtre özelliği göstermesinden dolayı beklenildiği gibi sinüzoidal olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar dc-hat gerilimini kullanımı açısından değerlendirildiğinde; bir inverter Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM veya Uzay Vektör PWM teknikleri ile anahtarlandığında, Doğal Örneklemeli SPWM, Simetrik SPWM, Asimetrik SPWM ve SHE-PWM tekniklerine kıyasla aynı ac gerilimi üretmek için (aynı  $M_a$  değerinde) %15 daha az bir dc-gerilim değerine ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Daha düşük bir dc-gerilim; pratikte şebekeye bağlı inverter girişindeki ac/dc doğrultucu ve dc/dc kıyıcı devrelerinin güç devresinin, yenilenebilir kaynaklara bağlı inverter girişinde ise dc kaynak ve akü grubunun daha küçük olmasını sağlayacaktır. Dolayısı ile fiyatta da azalma olacaktır. Bununla birlikte %15 daha küçük bir dc-hat gerilim değeri; dc gerilimin en az %10 fazlası bir anma gerilim değerine sahip olması gereken dc-hatta kondansatörlerinde boyut ve fiyatının düşmesine neden olacaktır. Eğer inverter girişindeki dc-hat gerilimi sabit olursa da yukarıdaki durumu benzer şekilde Üçüncü Harmonik İlaveli SPWM veya Uzay Vektör PWM teknikleri ile aynı  $M_a$  değerinde inverter çıkışında %15 daha fazla ac gerilim elde edilecektir.

Elde edilen sonuçlar çıkış gerilim ve yük akımının harmonik içeriği açısından değerlendirildiğinde; aynı  $M_a$  ve  $f_s$  değerlerinde, gerilim ve akım için en düşük %THD değerleri “*Space Vector PWM*” ve “*Third Harmonic Injection PWM*” teknikleri kullanıldığında elde edilmiştir. Ancak “*Selective Harmonic Elimination PWM*” tekniği düşük anahtarlama frekanslarında çalışmak için geliştirilen bir teknik olup,  $f=50\text{Hz}$  çıkış frekanslı benzetimde sabit  $N=11$  açılı SHE-PWM  $f_s=(2N+1).f=23 \times 50=1150\text{Hz}$  ve  $f=20\text{Hz}$  de  $f_s=23 \times 20=460\text{Hz}$  anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Anahtarlama frekansı diğerlerine göre düşük olduğu için akım ve gerilim THD değerleri yüksek çıkmıştır.

Gerilimin THD sinin azalması, bu kaynaktan beslenen yükün çektiği akımın THD değerinin de her zaman azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte yükün L indüktans değeri bir alçak geçiren filtre gibi davranarak THD değerinin daha küçük olmasını sağlamıştır. Eğer herhangi bir PWM tekniği için akım THD değerleri %5’in altında ve civarında olduğu ise inverter çıkışında filtre kullanılmayabilir. Anahtarlama frekansı biraz daha artırırsa bu oranlar çok daha düşecektir. Bununla birlikte maliyet ve boyut artışı da göz önünde bulundurularak eğer uygulama için çok gerekli ise gerilimin THD değerlerini düşürmek için filtre kullanılabilir. Bu durumda akımın THD değeri çok daha düşük olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Karaman, M., 2005. Bilgisayar Destekli Uzaktan Eğitim Modelinin Geliştirilmesi ve Otomotiv Elektrik Elektronik Dersine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü, Karabük.
- [2] Çobanoğlu, İ., 2005. Ege Üniversitesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi Eğitim Fakültesi Öğrencilerinin Bilgisayar Destekli Öğretime Yönelik Tutumları, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- [3] Barlas, Z. 2004., Bilgisayar Destekli Öğretim Tekniklerinin Metal İşleri Meslek Resmi Dersine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [4] Gündüz, Ş. 2002., İlköğretim 6. Sınıf Fen Bilgisi Dersinde Gagne'nin Öğretim Etkinlikleri Modeline Göre Hazırlanmış Bilgisayar Destekli Öğretim Uygulamasının Öğrenci Başarı Düzeylerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [5] Aşkar, P., "Bilgisayar Destekli Öğretim Ortamı," Eğitimde Nitelik Geliştirme: Eğitimde Arayışlar I. Sempozyumu Bildiri Metinleri. İstanbul: Kültür Koleji Yayınları, 1991. ss.174-177.
- [6] Tanyıldızı, E., 2007. Sanal Elektrik Makinaları Laboratuvarının Oluşturulması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elazığ.
- [7] Tanyıldızı E., Orhan A. (2009). A Virtual Electric Machine Laboratory for Effect of Saturation of the Asynchronous Machine Application, Computer Applications in Engineering Education 17(4):422 – 428.
- [8] Tanyıldızı E., Orhan A. (2009). A Virtual Electric Machine Laboratory for Synchronous Machine Application, Computer Applications in Engineering Education 17(2):187 – 195.
- [9] Tosun, İ., 2008. Güç Sistemleri Eğitimi İçin Matlab Gui Tabanlı Bir Yük Akış Simülatörü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [10] Gündoğdu, S., 2007. Web Tabanlı Elektronik Eğitimi Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Mitchell, R. J., 2014. A MATLAB GUI for Learning Controller Design In The Frewuency Domain, 2014 UKACC International Conference on Control 9th – 11th July 2014, Loughborough, U.K.



- [12] Ping, H., Weikun, H., Qingyan, S., Yan H., 2014. An Educational Tool Design for the Course of Signal Processing Based on MATLAB GUI, 2014 International Conference of Teaching, Assessment and Learning (TALE), Wellington, New Zealand.
- [13] Undre, P., Kaur, H., Talwar, R., 2015. GUI Based Performance Comparison of Noise Reduction Techniques based on Wavelet Transform, 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation.
- [14] Gaan, D. R., Kumar, M., Majumder, C. G., 2017. Variable Rate Based Microstepping of Stepper Motor Using MATLAB GUI, 2017 Indian Control Conference (ICC), January 4-6, 2017. Indian Institute of Technology, Guwahati, India.
- [15] Vural, B., 2007. Elektrik Enerji Kalitesi Ölçümleri İçin Bir Analizör Prototipi Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Višnić, R., Šunde, V., ve Mrćela, I., 2011. MATLAB/GUI Interface for Simulation of Power Electronic Converters, MIPRO 2011, May 23-27, 2011. Opatija, Croatia.
- [17] Xie, D. R., Yan, G., Song, Q., Liu, W., 2003. MATLAB-Based Simulation of Three-Level PWM Inverter-fed Motor Speed Control System, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'03.
- [18] Jamehbozorg, A., Radman, G., 2013. A MATLAB GUI Package for Studying Small Signal Characteristics of Power Systems with Wind and Energy Storage Units as an Educational Tool, 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon.
- [19] Irmak, E., 2007. Uzaktan Eğitim Amaçlı İnternet Tabanlı Laboratuvar Uygulaması, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [20] Yalçın, N. A., Vatansever, F., 2015. A Web Based Virtual Power Electronics Laboratory, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 24:71–78.
- [21] Akcayol, M. A., Yiğit, T., 2004. A Computer Based Educational Tool for Pulse Width Modulator for Static Converters, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 12:215–223.
- [22] Elmas, Ç., Sönmez, Y., 2007. An Educational Tool for Power Electronics Circuits, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 18:157-165.
- [23] Hurley, W. G., Lee, C. K., 2005. Development, Implementation and Assessment of a Web-Based Power Electronics Laboratory, IEEE Transactions on Education, Vol. 48, No:4.

- [24] Kayışlı, K., Tuncer, S., Poyraz, M., 2010. An Educational Tool for Fundamental DC-DC Converter Circuits and Active Power Factor Correction Applications, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 21:113-134.
- [25] Martins, L. S., Fortunato, C., Pires, F., 2009. A Computer-Based Testing System to Evaluate Protective Relays as a Tool in Power System Protection Education, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 20:19-28.
- [26] Montero-Hernandez, O., Rugeiro De La Rosa, A., Baez-Lopez, D., Alejos, R., Enriquez E., 1999. Power Lab: A Tool to Learn Electrical Machines and Power Electronics, John Wiley & Sons, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 7: 213–220.
- [27] Canesin, C. A., Gonçalves, F.A.S., Sampaio, L.P., 2010. Simulation Tools for Power Electronics Courses Based on Java Technologies, IEEE Transactions on Education, Vol. 53, No: 4.
- [28] Pires, V. F., Silva, J.F.A., 2002. Teaching Nonlinear Modeling, Simulation and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, Vol. 45, No: 3.
- [29] Zamarron, A., Arjona, M.A., Briz, F., Guerrero, J. M., 2006. A Virtual Instrument for Detecting Spatial Saliencies: An Electric Machinery Laboratory Experience, Wiley Periodicals, Inc. Comput. Appl. Eng. Educ. 16: 62-71.
- [30] Deniz, E., “Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu kullanan üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un tasarımı ve gerçekleştirilmesi” Doktora tezi. 2010
- [31] Rashid, M.H, 1993. “Power Electronics Circuits Devices and Applications” Purdue Universty Fort Wayne.
- [32] Deniz, E., 2005. Beş Seviyeli İnverterlerin SPWM İle Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elazığ.
- [33] Deniz, E., Altun, H., 2007. Beş Seviyeli İzole DC Kaynaklı Kaskat İnverterin SPWM Tekniği İle Kontrolü, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(1), 1-9.,
- [34] Mohan, N., Undeland M., and Robbins, W., 1995. Power Electronic: Converters Applications and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc.,USA.
- [35] Deniz E., Altun H. (2006). Beş Seviyeli Kaskat İnverter İle Beslenen 3-Fazlı Asenkron Motorun V/f Kontrolü. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(1),69-80.
- [36] Bose, B.K , “ Modern Power Electronics ” , 1983.

- [37] Mohan R., Madhuri C., “Digitally Implemented Novel Technique to Approach Natural Sampling SPWM”, EPE Journal, Vol.20, pp. 13-20, March 2010
- [38] Chaudhari, B.N., Fernandes, B.G., “EPROM-Based Modulator for Synchronized Asymmetric Regular-Sampled SPWM Technique”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 19-22 Jan. 2000.
- [39] Deniz, E., “İnverterler için PWM Teknikleri Ders Notu”, Fırat Üniversitesi, 2013.
- [40] Williams, W.B., “Principles and Elements of Power Electronics Devices, Drivers, Applications, and Passive Components”, University of Strathclyde, Glasgow, 2006.
- [41] Tuncer, S., 2004. Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Beş Seviyeli İnverter Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elazığ.
- [42] Deniz E., Aydoğmuş Ö. (2011). SPWM ve SVPWM Kullanan Üç-Seviyeli H-Köprü İnverter ile Beslenen Asenkron Motor Sürücülerinin Karşılaştırılması. 2011 6th International Advanced Technologies Symposium(IATS'11), 4(1), 448-454.
- [43] Aydoğmuş Ö., Deniz E., Kayışlı K. (2014). PMSM Drive Fed by Sliding Mode Controlled PFC Boost Converter. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(6), 4765-4773., Doi: 10.1007/s13369-014-1087-6,
- [44] Deniz E., (2016). ANN-based MPPT algorithm for solar PMSM drive system fed by direct-connected PV array. Neural Computing and Applications, Doi: 10.1007/s00521-016-2326-4.
- [45] Wu, B., 2006. High-Power Converters and AC Drives, IEEE Press, Hoboken, New Jersey.
- [46] Deniz E. (2015). İki-Seviyeli SHEPWM İnverter için Genetik Algoritma Kullanılarak Anahtarlama Açılarının Belirlenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(1), 35-42.
- [47] Deniz E., Aydoğmuş Ö., Aydoğmuş Z. (2015). GA-based optimization and ANNbased SHEPWM generation for two-level inverter. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1, 738-744., Doi: 10.1109/ICIT.2015.7125186.
- [48] Deniz E., Aydogmus O., Aydogmus Z. (2016). Implementation of ANN-based selective harmonic elimination PWM using hybrid genetic algorithm-based optimization. Measurement, vol.85, pp.32-42, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.012>

[49] [http://tr.wikipedia.org/wiki/Grafiksel\\_kullanıcı\\_arayüzü](http://tr.wikipedia.org/wiki/Grafiksel_kullanıcı_arayüzü) (08.04.2017)

[50] Mathworks Inc., MATLAB 2009a, Licence ID: 585775.

[51] Kaya, S., 2013. İki Seviyeli İnverter Anahtarlama Teknikleri İçin MATLAB GUI Tabanlı Benzetim Ortamı, Yüksek Lisans Semineri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



## 7. ÖZGEÇMİŞ

### Samet KAYA

- 1989** Elazığ'da doğdu.
- 2003 – 2006** Elazığ Hıdır Sever Lisesi'nden mezun oldu.
- 2006 – 2011** Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi bölümünden mezun oldu.
- 2012 - ...** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Ana Bilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.
- 2013 - ...** Fırat Kalkınma Ajansı'nda Bilgi İşlem Birim Yöneticisi olarak göreve başladı ve halen devam etmektedir.