

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ÜÇ FAZLI EVİRİCİ DEVRELERİNİN EŞ  
ZAMANLI BENZETİMİ VE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin TÜRE**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**OCAK 2024**



**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ÜÇ FAZLI EVİRİCİ DEVRELERİNİN EŞ  
ZAMANLI BENZETİMİ VE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin TÜRE  
(200801103)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selami BALCI**

**OCAK 2024**



## TEZ ONAYI

Hüseyin TÜRE tarafından hazırlanan Elektrikli Taşıtlar İçin Üç Fazlı Evirici Devrelerinin Eş Zamanlı Benzetimi ve Modellenmesi adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:

*(Doç. Dr. Selami BALCI)*

Jüri Üyeleri

İmza:

*Prof. Dr. Yunus UZUN*

*Doç. Dr. Selami BALCI*

*Doç. Dr. Kadir SABANCI*

Tez Savunma Tarihi: 08/01/2024

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Doç. Dr. Murat MAYDA**  
**Enstitü Müdürü**



## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

**(İmza)**  
**Hüseyin TÜRE**





*Sevgili aileme,*



## ÖNSÖZ

Bu tez, elektrikli taşıtların enerji verimliliğini artırmak amacıyla üç fazlı evirici devresinin eş zamanlı benzetimini ve modellemesini ele almaktadır. Elektrikli taşıtların hızla gelişen teknolojisi, enerji dönüşüm sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmış ve bu alanda yeni çözümlerin araştırılmasını gerektirmiştir

Tez kapsamında, farklı anahtarlama tekniklerinin üç fazlı evirici devrelerinin performansına olan etkilerini değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, elektrikli taşıtların enerji verimliliğini artırmak ve güç elektroniği sistemlerini daha etkili hale getirmek adına değerli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Çalışmamın başarıyla tamamlanabilmesi için tez danışmanım Doç. Dr. Selami BALCI'ya ve bu süreçteki desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Kadir SABANCI hocama ve Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI hocama ve aileme teşekkür ederim. Bu tez, elektrikli taşıtların enerji dönüşüm sistemleri üzerindeki bilgi birikimini artırmayı ve bu alandaki araştırmalara yeni bir perspektif kazandırmayı hedeflemektedir. Umarım bu çalışma, elektrikli taşıtların gelecekteki enerji ihtiyaçlarına sürdürülebilir ve etkili çözümler sunmada bir adım olacaktır.

Ocak 2024

Hüseyin Türe  
Elektrik-Elektronik Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	5
1.2 Tezin Amacı.....	11
1.3 Hipotez.....	11
<b>2. EVİRİCİLER .....</b>	<b>13</b>
2.1 Faz Sayısına Göre Sınıflandırma.....	14
2.1.1 Tek fazlı evirici .....	14
2.1.2 Üç fazlı evirici.....	16
2.1.3 Çok fazlı evirici.....	18
2.2 Seviye Sayısına Göre Eviriciler .....	19
2.2.1 İki seviyeli evirici.....	19
2.2.2 Çok seviyeli evirici.....	20
2.2.2.1 Diyot kenetlemeli çok seviye evirici .....	20
2.2.2.2 Kondansatör kenetlemeli çok seviye evirici.....	22
2.2.2.3 Kaskat bağlı çok seviye evirici.....	23
<b>3. EŞ ZAMANLI BENZETİM .....</b>	<b>25</b>
<b>4. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>33</b>
4.1 Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği .....	34
4.2 Sinuzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği.....	39
4.3 Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği.....	44
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>57</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>61</b>



## KISALTMALAR

<b>ET</b>	: Elektrikli Taşıt
<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>THB</b>	: Toplam Harmonik Bozulması
<b>KMSM</b>	: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
<b>FDAM</b>	: Fırçasız Doğru Akım Motor
<b>EM</b>	: Endüksiyon Motor
<b>ARM</b>	: Anahtarlama Relüktans Motor
<b>DGM</b>	: Darbe Genişliği Modülasyonu
<b>SDGM</b>	: Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu
<b>UVDGM</b>	: Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu
<b>SHI-DGM</b>	: Seçici Harmonik Eliminasyon Darbe Genişliği Modülasyonu
<b>EMI</b>	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
<b>IGBT</b>	: Insulated-Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör)
<b>MOSFET</b>	: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)
<b>RMS</b>	: Root Mean Square (Karekök Ortalaması)



## SEMBOLLER

<b>R</b>	: Yük Direnci
<b>L</b>	: Yük İndüktansı
<b><i>f<sub>c</sub></i></b>	: Taşıyıcı Sinyal Frekansı
<b><i>f<sub>r</sub></i></b>	: Referans Sinyal Frekansı
<b><i>f<sub>s</sub></i></b>	: Çıkış Frekansı
<b><i>V<sub>ref</sub></i></b>	: Referans Voltajı
<b><i>V<sub>dc</sub></i></b>	: Doğru Akım Voltajı
<b><i>V<sub>a</sub>, V<sub>b</sub>, V<sub>c</sub></i></b>	: Çıkış Gerilimleri
<b><i>V<sub>ab</sub>, V<sub>bc</sub>, V<sub>ac</sub></i></b>	: Faz-Faz Çıkış Gerilimleri
<b><i>V<sub>an</sub>, V<sub>bn</sub>, V<sub>cn</sub></i></b>	: Faz-Nötr Gerilimler
<b><i>V<sub>ra</sub>, V<sub>rb</sub>, V<sub>rc</sub></i></b>	: Anahtarlama Referans Gerilimleri
<b><math>\alpha</math></b>	: Clarke Dönüşüm Açısı
<b>S1,S3,S5</b>	: Üst Taraf Anahtarları
<b>AM1,AM2,AM3</b>	: Çıkış Akımları



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 4.1</b> : Üç fazlı evirici devresi parametreleri.....	<b>33</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : 180 derece DGM tekniği anahtar durumları (Rashid, 2004).....	<b>35</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : İki seviye evirici anahtarlama vektörü ve voltaj vektörleri.....	<b>45</b>
<b>Çizelge 4.4</b> : Açık-Sektör dönüşüm çizelgesi.....	<b>49</b>
<b>Çizelge 4.5</b> : Herhangi bir sektörde anahtarlama zamanları (Baqheetha ve diğerleri, 2017) .....	<b>52</b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Kontrol tekniklerine göre THB değerlerinin karşılaştırılması.....	<b>57</b>
<b>Çizelge 5.2</b> : Anahtarlama tekniklerine göre RMS akım değerleri.....	<b>58</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Temel evirici blok şeması. ....	13
Şekil 2.2 : Genel evirici diyagramı.....	13
Şekil 2.3 : Tek fazlı evirici devresi.....	14
Şekil 2.5 : Tek fazlı evirici çıkış grafiği. ....	15
Şekil 2.4 : Tek fazlı evirici tetikleme sinyali. ....	15
Şekil 2.6 : Tek fazlı evirici hormik grafiği. ....	16
Şekil 2.7 : Genel üç fazlı iki seviye evirici devresi. ....	16
Şekil 2.8 : Üç fazlı evirici tetikleme sinyali.....	17
Şekil 2.9 : Üç fazlı evirici çıkış voltajı. ....	17
Şekil 2.10 : Üç fazlı evirici hormik grafiği.....	18
Şekil 2.11 : Çok fazlı evirici devresi. ....	18
Şekil 2.12 : Beş seviyeli diyot kenetlemeli evirici. ....	21
Şekil 2.13 : Beş seviyeli kondansatör kenetlemeli evirici devresi. ....	22
Şekil 2.14 : Beş seviyeli kaskat H-köprü evirici devresi. ....	23
Şekil 3.1 : Çevrimdışı eş zamanlı benzetim uygulama adımları (Onambele ve diğerleri, 2017). ....	27
Şekil 3.2 : Simplorer ve Advisor arasında eş zamanlı benzetim yapısı (Knorr ve Juchem, 2003). ....	28
Şekil 3.3 : Yazılımlar arası veri akış diyagramı (Schulte ve Bocker, 2013).....	29
Şekil 3.4 : Gömülü S-Fonksiyon bloğu (Schulte ve Bocker, 2013).....	30
Şekil 3.5 : Eş zamanlı benzetim yapısı (Quintal, 2019). ....	31
Şekil 4.1 : Simplorer eş zamanlı benzetim için genel evirici devresi ve Simulink bağlantısı. ....	33
Şekil 4.2 : Evirici devresi (Rashid, 2004).....	34
Şekil 4.3 : 180 derece DGM anahtarlama sinyali (Rashid, 2004).....	35
Şekil 4.4 : 180 derece DGM Simulink tasarımı. ....	36
Şekil 4.5 : Üç fazlı DGM tetikleme sinyali. ....	37
Şekil 4.6 : DGM tetiklemeli evirici çıkış akımı. ....	37
Şekil 4.7 : DGM tetiklemeli evirici çıkış voltajı. ....	38
Şekil 4.8 : DGM tetiklemeli evirici $V_a$ harmonik grafiği. ....	38
Şekil 4.9 : Referans ve Taşıyıcı sinyallerinin grafiği. ....	39
Şekil 4.10 : Karşılaştırma sonucu oluşan tetikleme sinyali. ....	39
Şekil 4.11 : SDGM Simulink tasarımı.....	41
Şekil 4.12 : Taşıyıcı sinyali ve Referans sinyalleri grafiği.....	41
Şekil 4.13 : SDGM tetikleme sinyalleri.....	41
Şekil 4.14 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış akım grafiği.....	42
Şekil 4.15 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış voltaj grafiği.....	42
Şekil 4.16 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış harmonik grafiği.....	43
Şekil 4.17 : Evirici gerilim vektörleri ( $V_0$ - $V_7$ ).....	45
Şekil 4.18 : İki seviye evirici için uzay vektör vektörleri.....	46
Şekil 4.19 : Clarke dönüşümü.....	47

Şekil 4.20 : Simulink clarke dönüşümü bloğu.....	48
Şekil 4.21 : Açı-Sektör dönüşüm bloğu. ....	49
Şekil 4.22 : Sektör 1 için uzay vektörü .....	50
Şekil 4.23 : T0,T1 ve T2 hesaplaması.....	51
Şekil 4.24 : Tüm sektörler için anahtarlama grafiği (Baqheetha ve diğerleri, 2017).	52
Şekil 4.25 : UVDGM anahtarlama bloğu.....	53
Şekil 4.26 : Simulink ortamında Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu üretimi.....	53
Şekil 4.27 : UVDGM tetiklemeli evirici çıkış akım grafiği. ....	54
Şekil 4.28 : UVDGM tetiklemeli evirici çıkış voltaj grafiği. ....	54
Şekil 4.29 : UVDGM tetiklemeli evirici devresi harmonik grafiği. ....	55



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN ÜÇ FAZLI EVİRİCİ DEVRELERİNİN EŞ ZAMANLI BENZETİMİ VE MODELLENMESİ

Hüseyin Türe

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Selami BALCI

Ocak, 2024, 64 sayfa

Çevre kirliliği kaygıları ve yenilenebilir enerji talebindeki artış, elektrikli taşıtların yaygın kullanımını teşvik etmektedir. Bu durum, geleneksel içten yanmalı motorların çevresel etkilerine karşı bir çözüm olarak, elektrikli taşıtları ön plana çıkarmaktadır. Ancak, elektrikli taşıtların daha yaygın bir kullanımı için, mesafe kısıtlamaları ve uzun şarj süreleri gibi zorluklar bulunmaktadır. Elektrikli taşıtların temel bileşenlerinden biri olan evirici devrelerinin ve evirici anahtarlama tekniklerinin verimliliği tümüyle sistemin enerji verimliliği ve performansını etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli taşıtlarda elektrik motor sürücüsü olarak kullanılmak üzere bir üç fazlı iki seviyeli evirici devresinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devre tasarımı eş zamanlı benzetim yöntemi ile evirici anahtarlama sinyalleri olan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ve Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) sinyallerinin Toplam Harmonik Bozulma (THB) veya çıkış akım grafiği gibi performans parametreleri karşılaştırılmıştır. Eviricinin güç devresi ANSYS-Simplorer yazılımında modellenmiştir ve anahtarlama sinyalleri ise MATLAB-Simulink yazılımında tasarlanmıştır. Böylece, gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında DGM'nin, SDGM'nin ve UVDGM'nin yüzde THB değerleri sırasıyla %8,6, %6,11 ve %5,82 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, evirici devresi ve anahtarlama sinyali arasındaki etkileşimlerin anlaşılabilirliği, eviricinin verimliliğinin artırılması ve elektrik motorlarının performansına katkı sağlanması açısından önemlidir. Bu tez, ANSYS-Simplorer ve MATLAB-Simulink yazılımları ile eş zamanlı koşutlanan üç fazlı iki seviye evirici devresi ve anahtarlama tekniklerinin tasarım yöntemini önermektedir.

**AnahtarKelimeler:** Üç fazlı evirici, Eş zamanlı benzetim, , Simplorer, Simulink, UVDGM, SDGM.



## **ABSTRACT**

**MsThesis**

### **CO-SIMULATION AND MODELING OF THREE-PHASE INVERTER CIRCUITS FOR ELECTRIC VEHICLES**

**Hüseyin Türe**

**Karamanoğlu Mehmetbey University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selami BALCI**

**January, 2024, 64 pages**

Enterprises are increasingly concerned about environmental pollution and are thus encouraging the widespread use of electric vehicles. This is due to the negative environmental impact of traditional internal combustion engines. However, there are still challenges to the wider use of electric vehicles, such as distance limitations and long charging times. The effectiveness of the inverter circuits and inverter switching methods, which are fundamental factors of electric vehicles, significantly affect the overall system's energy efficiency and performance.

This thesis presents the design of a three-phase two-level inverter circuit for use as an electric motor drive in electric vehicles. The circuit design is compared in terms of performance parameters, such as Total Harmonic Distortion (THD) or output current waveform, using co-simulation methods with inverter switching signals, including Pulse Width Modulation (PWM), Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), and Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). The power circuit of the inverter is modeled using ANSYS-Simplorer software, and the switching signals are designed using MATLAB-Simulink software. During the simulation studies, the chance THD values for PWM, SPWM, and SVPWM are achieved as 8.6%, 6.11%, and 5.82%, respectively. The results obtained are crucial for understanding the relationship between the inverter circuit and the switching signals, improving the inverter's efficiency, and contributing to the performance of electric motors. This thesis proposes a design methodology for a three-phase two-level inverter circuit and switching techniques which are co-simulated with ANSYS-Simplorer and MATLAB-Simulink software.

**Keywords:** Three Phase Inverter, Co-Simulation, Simplorer, Simulink, SVPWM, SPWM



## 1. GİRİŞ

Çevre kirliliği ve artan ekonomik gerilim, elektrikli taşıtların (ET) yükselişini hızlandırmaktadır. Geleneksel içten patlamalı motorların çevreye yaydığı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve benzer sera etkisi yapan gazların çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi konularda büyük rol sahibidir. Elektrikli taşıtların çevresel olaylar üzerindeki etkisi, dolaylı yoldan bile %50 daha az olmakla birlikte, eğer elektrikli taşıtları şarj etmek için yenilenebilir teknolojiler kullanılırsa bu etki %70 azalmaktadır. Bu durum özellikle 2008'den bu yana elektrikli taşıtları çok popüler hale getirmektedir. Elektrikli taşıtları kısıtlayan tek unsur, tam şarj ile yol alabileceği mesafe (menzil) olarak görülmektedir. Yaygınlaşan yenilenebilir teknolojiler ve şarj istasyon merkezleri mesafe sorununun çözülmesine yardım etse bile, elektrikli taşıtların uzun şarj süresi engel teşkil etmektedir. Bundan dolayı kullanılan güç elektroniği bileşenlerinin enerjii en verimli şekilde kullanmaları gerekmektedir (Kopfer ve diğerleri, 2014; Bahrami ve diğerleri, 2019).

Bu verimliliği doğrudan etkileyen iki temel bileşenden birisi elektrikli taşıtların kalbi olarak kabul edilen elektrik motorları; elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren karmaşık aygıtlardır. Endüstriyel ve bilimsel alanlardaki temel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tarihsel olarak, bu aygıtların kökeni, 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve Michael Faraday'ın 1831'deki icadı, manyetik alanların etkileşimi ile mekanik dönme hareketini üretebilen temel bir mekanizmanın temelini atmıştır. Elektrik motorlarının çalışma prensibi, elektromanyetizma ilkesine dayanmaktadır. Bir elektrik akımı, stator adı verilen sabit bir çerçeve içinde elektromanyetik alanlar oluşturur ve manyetik endüksiyon prensibi ile rotor olarak adlandırılan hareketli kısmı etkileyerek dönme hareketini başlatmaktadır. Bu sayede elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürebilmektedir (Fitzgerald ve diğerleri, 2003).

Elektrik motorları, geniş bir kullanım yelpazesi sunar ve endüstriyel sektörlerden ev aletlerine kadar birçok alanda bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, konveyör bantları, pompa sistemleri, üretim hatları ve fabrika makineleri gibi bir dizi cihazın çalışmasını sağlayarak üretim süreçlerini optimize etmektedirler. Ev aletleri arasında

Çamaşır makineleri, buzdolapları, vantilatörler ve mikrodalgalar gibi günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası olmaktadır. Ayrıca, taşıtlarda içten yanmalı motorların yerini alarak elektrik ve hibrit taşıtların temelini oluştururlar; bu da elbette ki enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır (Saidur, 2010).

Elektrik motorlarının iç yapısı, rotor ve stator bileşenlerinin tasarımına dayanmaktadır. Rotor, genellikle mıknatıslarla kaplı bir mil veya şaft olarak tasarlanmıştır ve manyetik materyalin etkisi altında dönme hareketini gerçekleştirmektedir. Stator, elektromıknatıslar veya daimi mıknatıslar kullanarak manyetik alanı oluşturmaktadır. Bu manyetik alan, rotor üzerindeki manyetik materyali etkileyerek dönme hareketini başlatmaktadır. Elektrik motorlarının tasarımı, rotor ve statorun boyutları, malzeme özellikleri ve manyetik alanın gücü gibi faktörlere bağlı olarak değişir ve motorun performansını belirler. Geçmişten günümüze çeşitli tasarımsal iyileştirmeler ve gelişen mıknatıs teknolojisi ile motor teknolojisi geliştirilmiştir. Elektrikli taşıtların yaygınlaşması ile bu gelişim hız kazanmaktadır (Hughes ve Drury, 2019).

Bu motorlar, farklı tiplerde olabilirler ve taşıt tasarımına ve kullanım amacına bağlı olarak değişiklik gösterebilirler. Bunların en başında yüksek verimliliği, tork yoğunluğu ve geniş hız kapasitesi nedeniyle Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) gelmektedir. Gelişen teknolojilerle birlikte elektrikli taşıtlarda kullanılan motor tür sayısı da artmaktadır. Bunlardan bazıları ise Fırçasız Doğru Akımı Motoru (FDCM), Endüksiyon Motoru (EM) ve Anahtarlamalı Relüktans Motor'dur (ARM) (Sun ve diğerleri, 2019; De Santiago ve diğerleri, 2012).

Elektrikli taşıtların performansını etkileyen önemli bir diğer faktör de motor sürücüleri veya eviricidir. Elektrikli taşıtlardaki eviriciler, bu taşıtların enerji dönüşüm süreçlerindeki temel birinci kademe sürücüleri olarak kritik bir rol oynamaktadır. Bu eviriciler, elektrik enerjisinin kaynağı olan bataryalardan veya diğer enerji depolama sistemlerinden alınan elektrik enerjisini, belirli bir gerilim, akım ve frekansta istenilen çıkışa dönüştürerek, elektrik motorlarına iletmekle sorumludur. Bu işlem, elektrik motorlarının mekanik enerjiye dönüştürerek aracın hareketini sağlaması amacıyla gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda eviriciler, elektrik motorlarının hızını, torkunu ve yönünü hassas bir şekilde kontrol ederek, sürüş performansını ve enerji verimliliğini optimize etmek için önemli bir araç olarak işlev görmektedirler. Verimli bir evirici tasarımı, elektrikli taşıtın enerji tüketimini optimize ederken, batarya ömrünü arttırarak

kullanım sürekliliğine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, eviricilerin termal yönetimi, yüksek enerji yoğunluğu ve güç seviyeleriyle çalıştıkları için önemlidir. Bu nedenle, etkin bir soğutma ve termal kontrol, eviricilerin güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Elektrikli taşıtlardaki eviricilerin tasarımı ve geliştirilmesi, teknolojilerin sürdürülebilirlik, verimlilik ve güvenilirlik açılarından ilerlemesine önemli katkılarda bulunmaktadır (Macahig, 2020).

Sistemin verimliliği, maliyeti, kontrol algoritması veya evirici kontrol sinyaline göre birçok farklı topolojide evirici devresi bulunmaktadır. Yüksek güçlü uygulama alanlarında evirici çıkışından elde edilen alternatif akım, kullanılacak olduğu cihazda veya iletim hattında çeşitli bozulmalara sebep olabilmektedir. Bunların önüne geçebilmek için çok seviyeli olarak diyot kenetlemeli veya kondansatör kenetlemeli gibi maliyeti artıran ve kontrol algoritmasını zorlaştıran evirici topolojileri uygulanabilmektedir (Choi ve diğerleri, 1991; Zheng Peng ve Member, 2001).

Tüm unsurların (evirici ve motor) uygun verimlilik, tork, hız, termal performans ve güç tüketimi üzerinde en büyük etkiye sahip olan ise evirici kontrol sinyalleridir. Evirici kontrol (anahtarlama) sinyalleri, elektrik enerjisinin bir formdan diğerine dönüştürüldüğü güç elektroniği devrelerinde kullanılan temel kontrol sinyalleridir. Bu sinyaller, genellikle doğru akım (DA) kaynağından gelen enerjiyi alternatif akım sinyallerine veya tersi şekilde dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) gibi teknikler, evirici anahtarlama sinyallerinin üretilmesi ve AA çıkışının kontrolü için yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), elektrik sinyalinin darbe genişliği modülasyonu anlamına gelmektedir ve özellikle güç elektroniği uygulamalarında çok sık kullanılan bir kontrol tekniğidir. DGM tekniği, bir analog sinyali (genellikle sinüzoidal veya üçgen dalga gibi) belirli bir frekansta ve belirli bir genlikle modüle ederek, istenen çıkış sinyalini elde etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, özellikle DA-DA güç dönüştürücü devreleri, DA-AA eviriciler ve motor hız kontrolü gibi uygulamalarda etkilidir. DGM, bir elektrik sinyalinin açık ve kapalı dönemlerini düzenleyerek, ortalama gerilimi kontrol eder ve çıkış gücünü veya hızını ayarlamaktadır. Böylece, güç kaynaklarının ve motorların hassas kontrolünü sağlarken enerji verimliliğini artırmaktadır. DGM tekniği, hızlı anahtarlama teknolojisi ile birleştirildiğinde, yüksek

frekansta çalışan eviricilerin ve diğer güç elektroniği cihazlarının verimliliğini artırırken aynı zamanda istenmeyen elektromanyetik gürültüyü (EMI) azaltmaya da yardımcı olmaktadır. DGM tekniği, elektrikli taşıtlar, rüzgar türbinleri, güneş eviricilerinin ve daha birçok enerji dönüşüm uygulamasında önemli bir rol oynamaktadır (Taniguchi, 1988).

SDGM, özellikle eviricilerde çıkış gürültülerinin azaltılmasını için kullanılan bir diğer kontrol sinyalinden birisi olmaktadır. SDGM, temel olarak bir sinüs ve üçgen sinyalinin karşılaştırılması ile elde edilmektedir. SDGM darbelerin genişliklerini sinüzoidal bir şekilde değiştirerek üç fazlı AA çıkışını elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu teknik, daha düşük harmonik içeriğe sahip ve daha az radyo frekansı paraziti üreten temiz bir AA çıkışı sağlama avantajına sahip olmaktadır (Jain ve Chaturvedi, 2012).

Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM), elektrik enerjisinin doğru ve hassas bir şekilde yönetilmesi gereken güç elektroniği uygulamalarında kullanılan gelişmiş bir kontrol tekniğidir. Bu yöntem, üç fazlı AA sinyallerin modülasyonunu gerçekleştirerek, özellikle eviricilerde ve motor hız kontrolünde istenen çıkış dalga formunu üretmek için kullanılmaktadır. UVDGM, SDGM gibi referans dalga formları ile çalışır, ancak daha karmaşık bir matematiksel hesaplama süreci kullanılmaktadır. Bu süreçte, üç fazlı sistemdeki voltaj vektörleri karmaşık bir matematiksel alan içinde temsil edilir ve ardından istenen çıkış voltajı vektörü bu alandaki bir konuma göre belirlenmektedir. UVDGM, genellikle daha yüksek verimlilik, daha düşük harmonik bozulma ve daha az dalga formu bozulması elde etmek için tercih edilmektedir. Ayrıca, bu yöntem harmonik filtrelerin ihtiyacını azaltarak maliyet tasarrufu sağlamaktadır ve enerji dönüşüm sistemlerini daha verimli ve daha kompakt hale getirmeye katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, UVDGM elektrikli taşıtlar, rüzgar enerjisi santralleri, endüstriyel eviriciler ve daha birçok uygulamada başarılı bir şekilde kullanılan bir kontrol tekniği olmaktadır (YingYing ve diğerleri, 2011).

Sonuç olarak, evirici kontrol sinyalleri, elektrik enerjisinin farklı formlar arasında dönüştürülmesini sağlayan kritik kontrol sinyalleridir. DGM, SDGM ve UVDGM gibi teknikler, evirici devrelerinde kullanılan bu sinyallerin üretilmesi ve AA çıkışının hassas bir şekilde kontrol edilmesi, enerji tasarrufu, verimliliği ve sistemin maliyeti gibi konularda önemli rol oynayan araçlardır. Bu teknikler, endüstriyel uygulamalardan yenilenebilir enerji sistemlerine kadar geniş bir alanda kullanılır ve elektrik güç dönüşümünün verimli ve istikrarlı bir şekilde gerçekleştirilmesine katkıda

bulunurlar. Bu tezde, elektrikli taşıtlar için iki seviyeli üç fazlı bir evirici üzerinden evirici kontrol sinyalleri eş zamanlı benzetimi yapılarak karşılaştırılması sunulmaktadır.

## 1.1 Literatür Özeti

Doğru Akım (DA) - Alternatif Akım (AA) güç dönüştürücüler, evirici olarak da bilinirler ve genellikle AA yükleri kullanmak için çıkışlarına göre bir fazlı, üç fazlı veya çok fazlı tasarlanan güç devreleridir. Alternatif Akım sistemlerinde gerilim ve frekansın ayarlanması çok maliyetli ve karmaşık olduğu için, rüzgar generatörleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklı güç sistemlerinde ve asenkron motor sürücülerinde AA elektrik enerjisi öncelikle DA elektrik enerjisine çevrilip kontrol edilebilir AA elektrik enerjisi haline gelmektedir (Rashid, 2004). Bu sayede evirici vasıtasıyla gerilimini, akımını ve frekansını ayarlamak mümkündür ve bundan dolayı endüstriyel uygulamalarda çok sık kullanılmaktadır. Ayrıca, endüstride kullanılan çeşitli motor tiplerinin denetiminde ve güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Rahim ve diğerleri, 2011).

Güç sistemlerinin kalitesini ölçmek ve değerlendirmek için Toplam Harmonik Bozunum (THB) değeri kullanılmaktadır. THB, bir dalga formunun temel frekansta bulunmayan harmonik bileşenlerinin toplamının, temel frekanstaki bileşenlere oranını ifade etmektedir. Genellikle yüzde (%) ile ifade edilen bu oran, bir dalga formunun istenmeyen harmonik bozunumunun ne kadar olduğunu göstermektedir. THB, özellikle alternatif akım güç sistemlerinde ve elektronik cihazlarda harmonik bozunumun kontrolü ve izlenmesi için kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. THB'nin düşük olması, bir güç sisteminin veya elektronik cihazın daha temiz ve istikrarlı bir güç sağladığını göstermektedir. Yüksek THB değerleri, cihazların çalışma verimliliğini düşürebilir, elektromanyetik parazitlere neden olabilir ve cihazların ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle evirici performansını değerlendirmede kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir (Arranz-Gimon ve diğerleri, 2021).

Bu bağlamda, elektrik güç sistemlerinde kullanılacak elektrik yüküne göre eviriciler tasarlanmaktadır. Demir (2020) çalışmasında fotovoltaik sistemler için tek fazlı eviriciyi MATLAB-Simulink yazılımında, sinüzoidal darbe genişliği modülasyonu (SDGM) kontrol sinyali ile benzetimini gerçekleştirmiştir. Benzetim sonuçlarında ise

evirici sisteminin çıkış akım harmoniğinin daha az olduğu ve sistem veriminin daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Eviricilerin anahtarlama elemanlarının sinyallerini kontrol etmek için kullanılan temel Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM), tasarımı ve uygulaması basit olduğundan çok sık olarak kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bu modülasyonun çok fazla varyasyonu yıllar içerisinde geliştirilmiştir (Ismail ve diğerleri,2006). Böylece, her kontrol sinyalini birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları ortaya çıkmıştır. Neticede düşük toplam harmonik bozulma (THB), düşük akım dalgalanması ve değişken çıkış voltajı geleneksel DGM yerine SDGM ve Uzay Vektör DGM metotları daha yaygın hale gelmiştir (Bhattacharjee ve diğerleri, 2018).

Son yıllarda, yüksek güç gereksinimi olan uygulamalarda eviricilerin çıkış parametreleri saf sinüzoidal çıkışa yakınsamaya çalışılmaktadır. Bu tip eviricilere sinus dalga evirici denilmektedir. Saf Sinüs Dalgalı eviriciler, geleneksel eviricilere göre temiz güç, elektriksel ve duyulabilir gürültünün azaltılması, düşük harmonik bozulma, endüktif yüklerin daha serin ve daha hızlı çalışması gibi birçok avantaja sahiptir. Saf sinüs çıkışı elde etmenin birçok yolu bulunmaktadır. Bunların en başında Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (SDGM) gelmektedir. SDGM, güç elektroniği alanında yaygın olarak kullanılan bir teknik olup, alternatif akım voltajını veya akımını düzenli bir şekilde kontrol eden bir yöntemdir. Bu modülasyon tekniği, bir eviricinin çıkışını düzenlemek için özellikle tercih edilmektedir. SDGM, bir referans sinyali ve bir taşıyıcı sinyal arasındaki farkı kullanarak darbe genişliği değerlerini belirler. Bu sayede, evirici çıkışı istenen değerlere yakın bir sinüzoidal dalga formu oluşturur. Ruman ve diğerleri (2019) bir SDGM sinyalinin tasarımına yönelik olarak yaptıkları çalışmada evirici çıkış parametrelerini analiz etmişlerdir.

Majhi (2012) tez çalışmasında ise tek fazlı bir tam köprü eviricide MATLAB-Simulink kullanılarak bir indüktif yük üzerinde SDGM benzetimi ve LC filtre tasarımı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise; eviricinin hem akım hem de voltaj çıkışı sinyalleri saf sinüzoidal sinyale yakınsamaktadır.

Polat (2022) tez çalışmasında ise SDGM tekniği ile tek fazlı tam köprü eviricilerde çıkış geriliminde bozulmalara neden olan ölü zaman kompanzasyonu gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise evirici çıkış parametrelerinin belirgin bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.

Türe ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, bir fazlı evirici devresinin ANSYS-Simplorer yazılımında parametrik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, SDGM sinyalinin DGM anahtarlama sinyaline göre daha verimli olduğu tespit edilmiş olup elde edilen veriler ise makine öğrenmesi yöntemleri ile ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

Çok seviyeli eviriciler basamaklı, AA sinyalleri üretir ve bu nedenle klasik evirici devresinin birçok kısıtlamasını aşmaktadır. Çok seviyeli eviriciler, birçok anahtarı kullanmakta ve farklı anahtarların kontrol edilmiş anahtarlama ile basamaklı tip çıkış üretmektedir. Anahtarlama sırası ve her adımın süresi, THB'yi en aza indirmek için çok önemlidir. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM), güç elektroniği evirici devrelerinde yaygın olarak kullanılan popüler bir kontrol yöntemidir. Düşük anahtar kayıpları, daha az harmonik içeren bir çıkış ve yöntemin kolay uygulanabilir olması gibi avantajları bulunmaktadır. Vadhiraj ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli çok seviyeli eviriciler için birçok kontrol tekniği tartışılmış ve yeni bir genel tip DGM kontrolü ile karşılaştırılmıştır. Yeni yöntem doğası gereği çok genel bir yöntemdir ve evirici seviyesine bakılmaksızın her türlü çok seviyeli eviriciye uygulanabilmektedir. Önerilen kontrolün başlıca avantajı, geçmiş literatürde önerilen diğer kontrol yöntemlerinin aksine, sadece bir sinüs ve taşıyıcı dalga kullanılmasıdır. Ayrıca, bu kontrol yöntemi diğer yöntemlere göre daha düşük THB sonuçlarına yol açmaktadır.

Temelde uzay vektör teorisine dayanan uzay vektör darbe genişliği modülasyonu, önemli gelişmelere sebep olmaktadır. Daha önce pek çok darbe genişlik modülasyonu yöntemi oluşturulmuş olmasına rağmen, vektör modülasyon tekniği, üç fazlı anahtarlama bir evirici için en iyi alternatif yöntem olmaktadır. Eviricilerde akım ve hız kontrolü imkanı, dijital uygulamalara uygulanabilirliği yüksek olması bu yöntemi popüler hale getirmektedir. Chatterjee (2013) yaptığı çalışmada, Fotovoltaik uygulamalarda iki seviye üç fazlı evirici ile üç seviyeli üç fazlı bir eviriciyi uzay vektör darbe genişliği modülasyonu ile kontrolünü çalışmıştır. Toplam harmonik bozulma değeri üç seviyeli evirici devresinde daha küçük değerdedir. Ancak anahtarlama elemanlarının artması ile kontrol sinyali çok daha zorlaşmakta ve karmaşıklaşmaktadır.

Çeşitli darbe genişlik modülasyonu teknikleri, değişken gerilim ve frekans kaynağı elde etmek için kullanılır. Pradeep ve Devanathan (2012) yaptığı çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron motorda sürücü tekniklerini karşılaştırmaktadır. Uzay vektörü

DGM, kolay sayısal gerçekleştirme ve daha iyi DA hat kullanımı sunmaktadır. Üç seviyeli bir eviricinin Uzay Vektörü Darbe Genişlikği Modülasyonu, üstün harmonik azaltma kalitesi ve konvansiyonel Sinüzoidal Darbe Genişlikği Modülasyonu'nun %78,5 olan modülasyon faktörünü %90,7 kadar artıran daha yüksek bir alt modülasyon aralığı sağlama avantajı sağladığını göstermektedir.

Kumar ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, öncelikle iki seviyeli bir evirici için Uzay Vektör DGM ile geleneksel SDGM arasında karşılaştırmalı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması, UVDGM'nun SDGM'na göre daha az THB ile %15 artmış temel çıkış parametreleri verdiğini göstermektedir. SDGM ve UVDGM gibi DGM teknikleri MATLAB-Simulink yazılımında uygulanmış ve performansları geleneksel DGM teknikleri ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel DGM stratejilerinde sabit taşıyıcı frekansları ( $f_c$ ) olduğu için taşıyıcı frekansın katlarında gruplanmış harmonikler bulunmaktadır. SDGM ve UVDGM gibi DGM teknikleri, harmonikleri sürekli olarak geniş bir bant alanına yaymak için değişen bir taşıyıcı frekansı kullanır, böylece tepe harmonikleri büyük ölçüde azaltılmaktadır.

Ahmed ve Ali (2013) yapmış olduğu çalışmada, SDGM ve UVDGM teknikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sırasında her iki tekniğin harmonik yoğunluğu, güç faktörü ve anahtarlama kayıplarının gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu amaçla, bu tekniklerin ayrıntılı benzetim çalışmalarını MATLAB araçları kullanarak gerçekleştirilmiştir. UVDGM'nun daha düşük THB, daha büyük Güç Faktörü (GF) ve daha az anahtarlama kayıpları gösterdiği gözlemlenmiştir, çünkü UVDGM, THB'yi azaltmak için gelişmiş hesaplamalı anahtarlama tekniği kullanılmaktadır. Aynı zamanda her seferinde tek bir faz gerilim değişikliği sonucu bir tek anahtar durumunun değiştirilmesi nedeniyle anahtarlama kayıplarını da azaltmaktadır. Ayrıca, yüksek anahtarlama frekanslarda UVDGM, SDGM'na göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

UVDGM tekniği, akım kontrollü üç fazlı voltaj kaynaklı eviricilerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Sadece elektrikli taşıtlar için değil, aynı zamanda dağıtım şebekelerine bağlanan şebeke arayüzü sistemlerinde de kullanılmaktadır. Ancak, şebekeye bağlı sistemlerde UVDGM'na dayalı akım kontrolörlerinin performansı, şebeke harmonikleri ve örneklemeden kaynaklanan kontrol gecikmesi nedeniyle çok etkilenmektedir. Zeng ve Chang (2008) tarafından yapılan çalışmada, şebekeye bağlı

bir akım kontrolcüye sahip üç fazlı eviricinin UVDGM bağılı performans iyileştirmesi çalışması yapılmaktadır.

Elektrikli taşıtlarda, batarya tüketim süresi en önemli tercih sebeplerinden birisidir. Depolanmış enerjiyi en çok tüketen ise doğal olarak elektrikli taşıt hareketi için mekanik enerji sağlayan elektrik motorlarıdır. Bu bağlamda, bataryadan elektrik motoruna enerji aktarım veriminin yüksek olması hem bataryanın ömrünü hem de elektrik motorunun ömrünü uzatmaktadır. Genellikle üç fazlı olan elektrikli taşıt motorları için uygun bir sürücü devre seçilmesi, verimlilik için gereklidir. Bunun için batarya çıkışında oluşturulan DA hat gerilimi elektrik motorlarını kontrol edebilmek için AA güç sistemine evrilmesi amacıyla üç fazlı elektrik motoruna üç fazlı sürücü devresi tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca, sürücünün performansını donanımsal olarak arttırmak için eviriciler çok seviyeli olarak tasarlanmaktadır. Choudhury ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorda iki seviyeli ve üç seviyeli üç fazlı eviricinin performansı karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, evirici çıkış voltaj dalgalanması veya yüzde toplam harmonik bozunum (THB) gibi parametrelerde üç seviyeli eviricinin daha yüksek performansta sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Tolbert ve diğerleri (1998) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada, on bir seviyeli bir eviricinin performansı incelenmiş ve sonuçlar daha düşük seviyelere göre daha yüksek performansta olduğu görülmüştür. Böylece, evirici devresinin seviyesi arttıkça performansının doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Çok seviyeli gerilim kaynaklı eviriciler, düşük harmonik içeriğe ve yük üzerinde düşük gerilim stresine sahip yüksek gerilim ve yüksek güç uygulamaları için artan taleple karşı karşıya kalmaktadır. Eviriciler, genellikle çok seviyeli eviriciler ve iki seviyeli eviriciler olarak sınıflandırılır. Çok seviyeli eviricilerin, iki seviyeli eviricilere göre avantajlarından biri düşük harmonik bozulma içermeleridir. Çok seviyeli eviriciler için kontrol ve modülasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu teknikler anahtarlama frekansına göre sınıflandırılmaktadır. Darbe genişliği modülasyon teknikleri, DA hat kondansatörlerinde gerilim dengelemesini, dalgalanma akım derecesini ve kapasite değerini etkilemektedir. Kullanılacak modülasyon şemasını, eldeki kontrol ihtiyacına göre seçmek, çıkış voltaj dalga formunun harmonik içeriğini belirlemektedir. Sabarad ve Kulkarni (2015) tarafından her iki tekniğin performansı karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları aracılığıyla gösterilmiştir ki UVDGM, SDGM tekniği ile

karşılaştırıldığında DA hat voltajını daha etkili bir şekilde kullanır, çünkü aynı RL yükü için değerlendirildiğinde UVDGM çıkışı SDGM'den daha yüksek olmaktadır. Temel çıkış voltajı üzerinden değerlendirildiğinde Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu, farklı anahtarlama frekansta Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu tekniğine göre mükemmel çıkış sonuçları artırılmış verimlilik ve azaltılmış THB sağlamaktadır.

Darbe genişliği modülasyonu (DGM) teknikleri temel olarak eviricinin çıkış voltajını üzerinde kontrol etmek için uygulanmaktadır. Bu teknikler çok verimli ve etkilidir ve esas olarak çıkış voltajını kontrol etmek için anahtarlama elemanlarının tetiklemesini kontrol eder. DGM teknikleri, bu süreçte kullanılacak modülasyon çıktısı ve şemasına göre bir yarım döngüde yalnızca bir darbe modüle edildiğinde tek darbe genişliği modülasyonu, bir yarım döngüde birden fazla darbe modüle edildiğinde çoklu darbe genişliği modülasyonu olmaktadır. Güç elektroniği devrelerindeki gelişmeler, çok seviyeli eviricilerin çıkış voltajı ve akımının THB değerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bir diğer yandan, gelişen kontrol sinyalleri, çok seviyeli evirici kullanmadan çıkış değerlerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir (Singh ve Tiwari, 2017).

Dahidah ve Agelidis (2008) tarafından yapılan bir çalışmada ise, sabit frekanslı uygulamalarında kullanılan yüksek güçlü beş seviyeli bir dönüştürücü için uygun olan seçici harmonik eliminasyon darbe genişlikli modülasyonu tekniğinin (SHE-DGM) yeni bir varyasyonunu sunmaktadır. Belirli harmoniklerin eliminasyonu ile ilişkilendirilen denklem sistemi, tek taşıyıcı sinüzoidal DGM tekniği ile karşılaştırıldığında eşit sayıda anahtar geçişine dayalı olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle her çeyrek dönem için anahtar geçişleri, SDGM'nun modülasyon endeksine göre dönüştürücü seviyeleri arasında dağıtılmıştır. Önerilen teknik, aynı anahtar geçişleri için önemli ölçüde daha yüksek bir dönüştürücü bant genişliği ve daha yüksek DA hat kullanımını sunduğu gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen SHE-DGM, SDGM muadili ile karşılaştırıldığında daha iyi harmonik performans sunmaktadır.

Evirici tasarımında, çok seviyeli evirici tasarlama işleminde doğrudan kullanılan anahtarlama elemanının sayısını arttırdığından, eviricinin maliyetinde doğru oranda bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca, çok seviyeli evirici devrelerinde anahtarlama elemanlarının kontrol işlemleri de daha karmaşık hale gelmektedir. Böylece, eviricinin kullanılacağı sisteme göre düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir şekilde

tasarlanması önem kazanmaktadır. Bu durum, evirici devrelerinde kullanılan kontrol sinyallerinin verimli olanını seçmekten geçmektedir. Mersha ve Du (2021) tarafından yapılan çalışmada, elektrikli taşıtlarda ucuz ve verimli olması için ANSYS ve MATLAB yazılımlarında eş zamanlı benzetim yaparak yüksek performanslı kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM) tasarımı önerilmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Çevre kirliliği ve artan elektrik enerjisi ihtiyacı, elektrikli taşıtlar başta olmak üzere bir çok alanda değişime neden olmuştur. Bu değişim, daha çevreci ve elektrik enerjisini en verimli şekilde kullanmayı amaçlamaktadır. Tüm elektrik enerjisi dönüşüm yöntemlerinde bulunan eviricilerin verimliliği temel bir rol oynamaktadır. Literatür incelendiğinde, bu alanda birçok çalışma ve farklı yöntemlerle geliştirilmiş birçok uygulama bulunduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli taşıtlarda motor sürücüsü olarak kullanılmak üzere bir üç fazlı evirici devresinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devre tasarımı, eş zamanlı benzetim ile eviricinin güç devresi ANSYS Simplerer yazılımında modellenmiş, evirici güç anahtarlama elemanlarının kontrol sinyalleri ise MATLAB-Simulink yazılımında tasarlanmıştır. Bu iki farklı yazılım eş zamanlı olarak koşturularak ayarlanabilen kontrol sinyalleri ve değerleri için analiz edilmiştir. Böylece, eş zamanlı benzetim çalışmaları sonucunda elde edilecek akım, gerilim, THB gibi veriler, evirici devrelerinin performans karşılaştırmalarında kullanılmıştır.

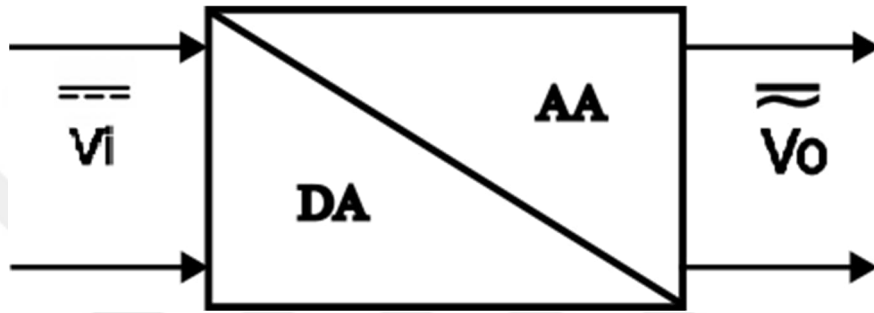
## **1.3 Hipotez**

Eviriciler, birçok elektrik enerjisi dönüşüm uygulamasında kullanılmaktadır. Eviricilerin verimliliği ve performansı, kullanıldığı sistemin verimliliğini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Evirici kontrolü, elektrikli taşıtların yanı sıra rüzgar enerjisi sistemleri, endüstriyel motorlar ve diğer enerji dönüşüm uygulamaları gibi birçok alanda önemlidir. Bu çalışma, üç fazlı bir eviricinin kontrol sinyallerini eş zamanlı benzetim yöntemi ile karşılaştırmasını sunmaktadır.



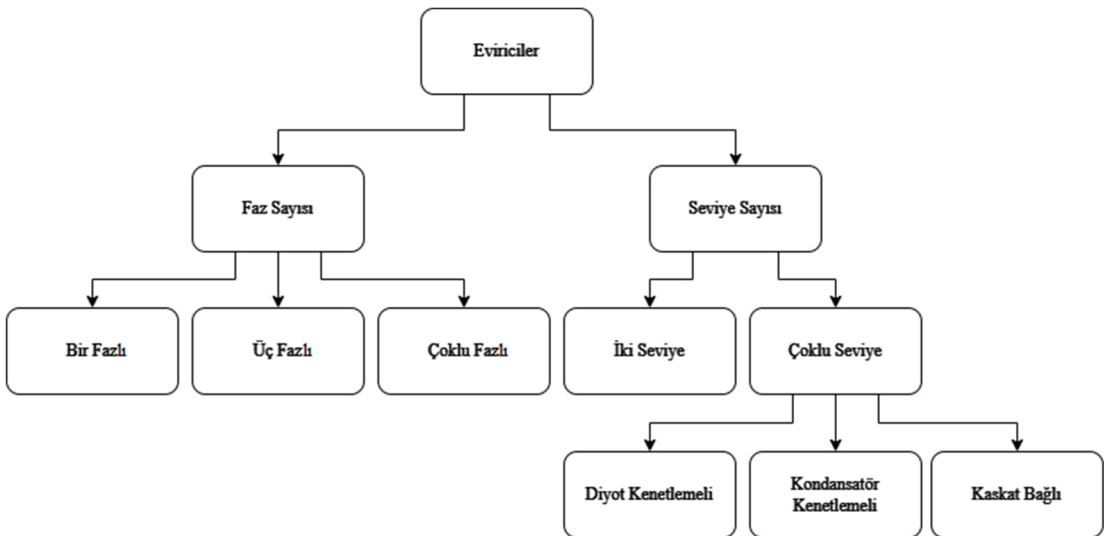
## 2. EVİRİCİLER

Eviriciler, yenilenebilir enerji kaynakları şebeke arayüzleri, motor sürücü devreleri, kesintisiz güç kaynakları ve elektrikli taşıt uygulamalarında kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, eviriciler temelde doğru akım’ı alternatif akım’a çevirmek için kullanılan bir güç elektroniği devresidir.



Şekil 2.1 : Temel evirici blok şeması.

Evirici devre topolojileri, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi genellikle faz sayısına ve seviyesine göre iki grup halinde sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, faz sayısı tek fazlı, üç fazlı ve çoklu fazlı olarak üç gruba ayrılmaktadır. Seviyeli eviriciler ise iki seviyeli ve çok seviyeli evirici olmak üzere ayrılmaktadırlar. Diğer taraftan, çok seviyeli eviriciler ise diyot kenetlemeli, kondansatör kenetlemeli ve kaskat bağlı olmak üzere farklı topolojiler ile sunulmuştur.



Şekil 2.2 : Genel evirici diyagramı.

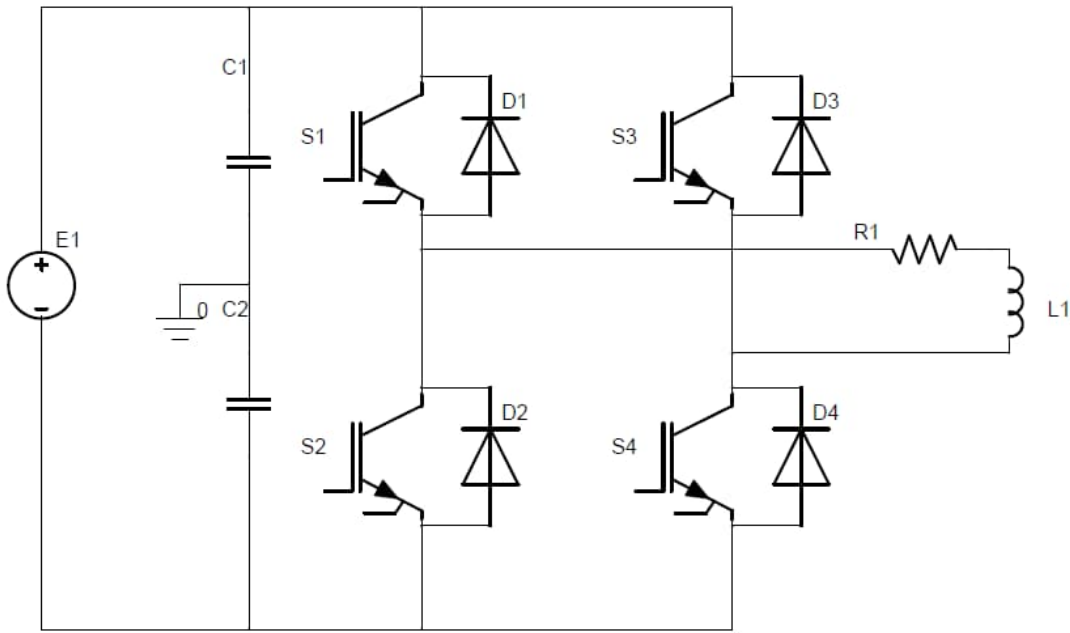
Temel prensip olarak, MOSFET veya IGBT gibi anahtarlama elemanlarını kullanarak girişinde DA uygun anahtarlama tekniği ile AA dönüştürmesidir.

## 2.1 Faz Sayısına Göre Sınıflandırma

Kullanım yapılacağı sisteme bağlı olarak eviricilerin faz sayısı değişkenlik gösterebilmektedir. Evirici tasarımı, kontrol edilecek yükün gereksinimine göre evirici yapılmalıdır. Eviriciler tek fazlı, üç fazlı ve üçten fazla faz ihtiyacı olan sistemlerde çoklu fazlı eviriciler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

### 2.1.1 Tek fazlı evirici

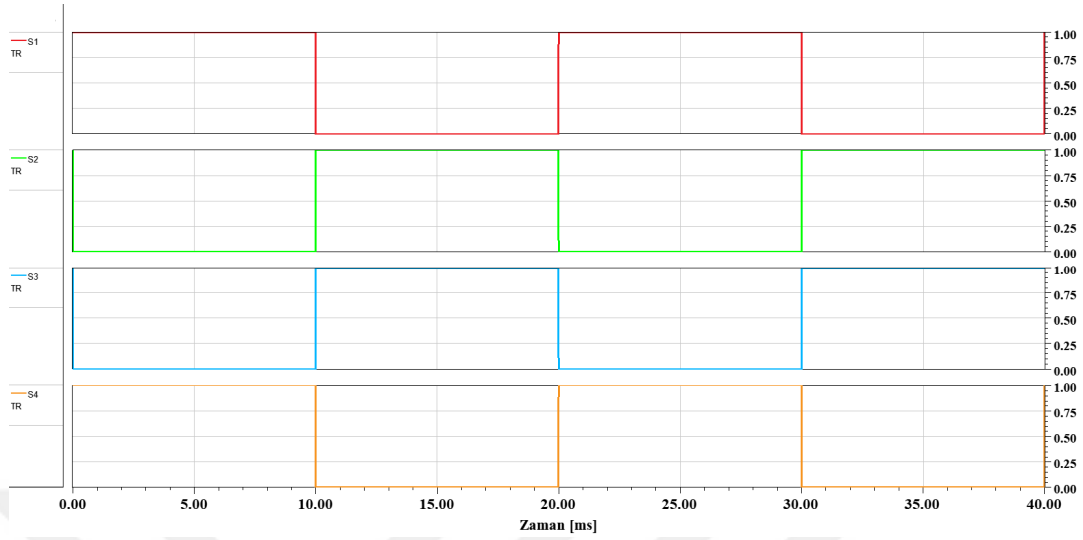
Tek fazlı eviriciler Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu devrede dört güç anahtarı bulunmaktadır: S1-S4. Güç anahtarlarının tersine ve paralel olarak bağlı dört serbest dönüş diyotu bulunmaktadır. Güç anahtar çiftleri (S1, S4) ve (S2, S3) sırayla iletme geçmeleri halinde AA R1 ve L1 üzerinden iletme geçmektedir. Yükün iki ucu, bu devrenin sağ kolunun ve sol kolunun merkezi noktalarına bağlıdır.



Şekil 2.3 : Tek fazlı evirici devresi.

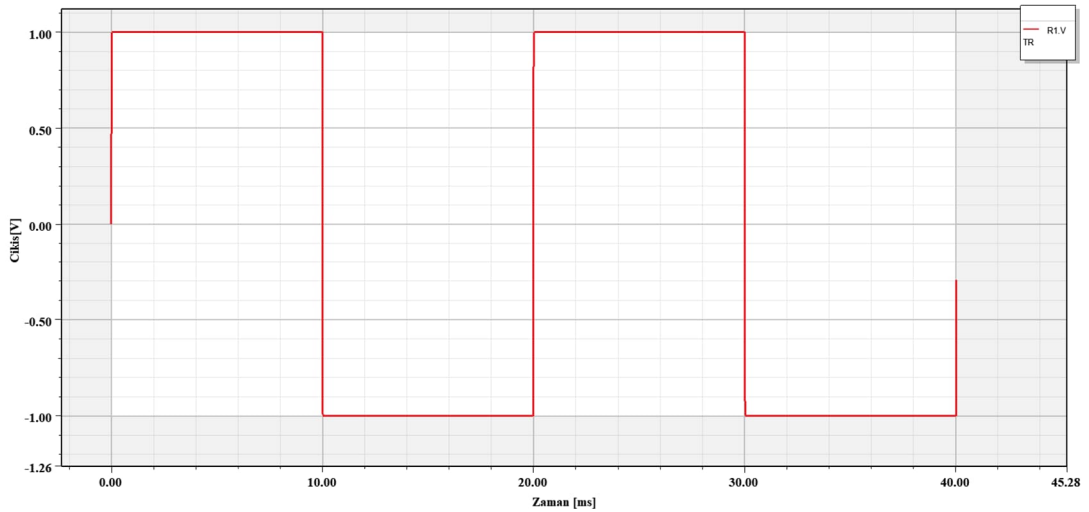
Eğer yük tamamen dirençli ise ve anahtarlar S1 ve S4 tetikleme sinyali ile açılırsa ve S2 ve S3 anahtarları kapanırsa, çıkış voltajı pozitif giriş voltajına eşittir ve akım yönü pozitiftir. Belirli bir süre sonra, tetikleme sinyalleri S1 ve S4'ü kapatmak ve S2 ve

S3'ü açmak için sinyal gönderilir. Şekil 2.4'te tetikleme sinyallerinin grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Tek fazlı evirici tetikleme sinyali.

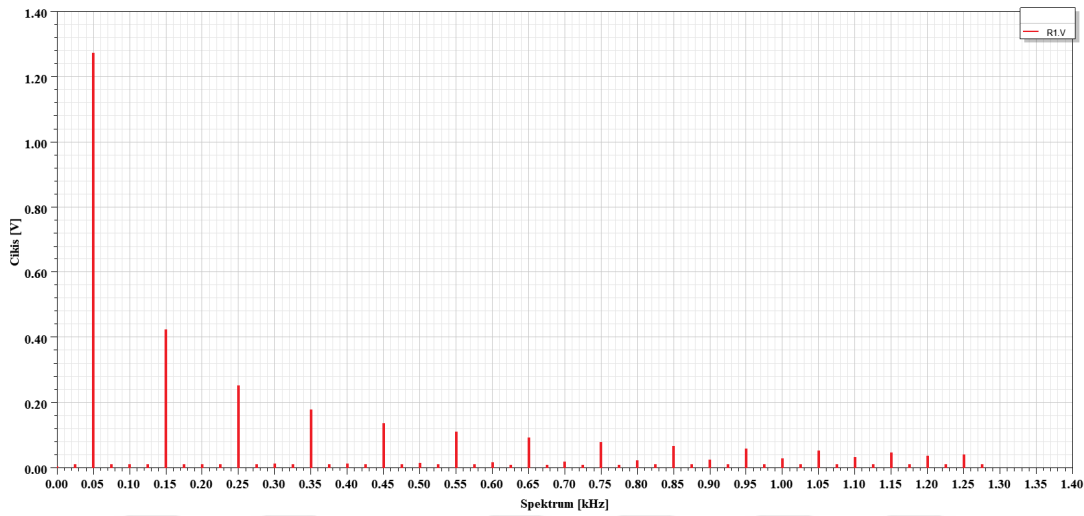
Bu durumda çıkış voltajı negatif giriş voltajına eşittir ve akım yönü negatiftir. Yani, Şekil 2.5'te görülebileceği üzere S1 ve S4 pozitif yarı devre için açık, S2 ve S3 ise negatif yarı devre için açıktır. S1 ve S3 veya S2 ve S4 açıkken, çıkış voltajı sıfırdır. S1 ve S3 aynı anda açılmamalıdır.



Şekil 2.4 : Tek fazlı evirici çıkış grafiği.

Eğer bu durum gerçekleşecek olursa, DA kaynağı üzerinde gerçekleşecek olan bir kısa devre, sistemini hataya düşürebilmektedir.

Pratikte ise eviricilerin çıkış geriliminde harmonikler ve dalgalanmalar vardır. Bu harmonikler çıkış parametrelerini ve dalga formunu doğrudan etkilemektedir.

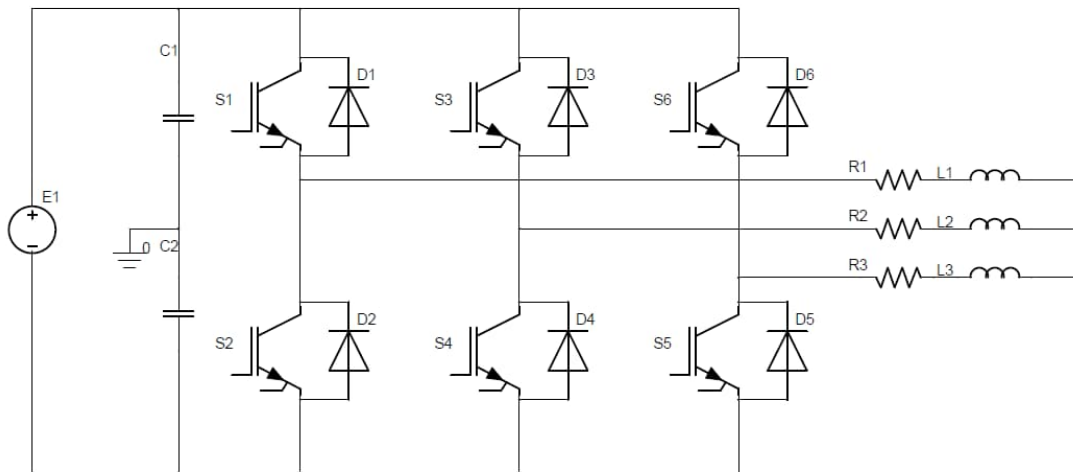


Şekil 2.6 : Tek fazlı evirici harmonik grafiği.

Şekil 2.6'da bir fazlı evirici için harmonik grafiği gösterilmiştir. Temel frekansta olan 50 Hz'de yüksek çıkış değeri elde edildiği görülmektedir.

### 2.1.2 Üç fazlı evirici

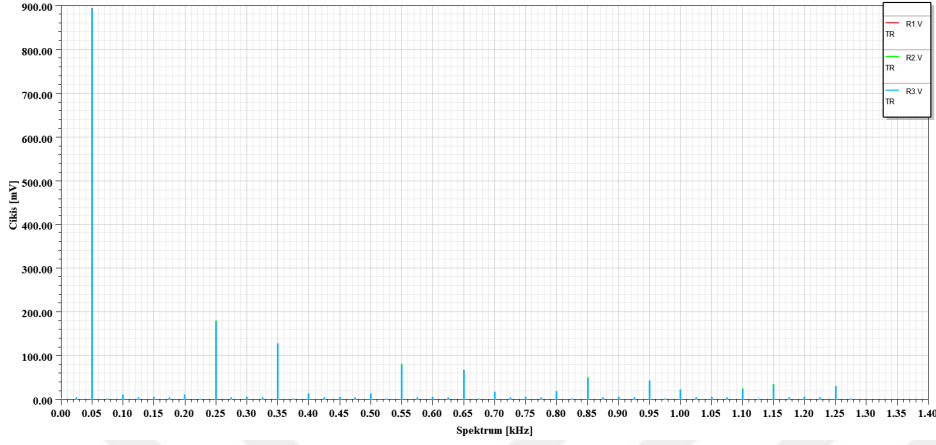
Üç fazlı eviriciler genellikle enerji hatlarında ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de, tipik üç fazlı bir gerilim kaynağı evirici devresi gösterilmektedir. Bu yapı 6 adet MOSFET veya IGBT gibi güç anahtarı içermektedir. Bu anahtarlara paralel olarak ters diyotlar bağlanmaktadır. Bu diyotlar, anahtarlar üzerinden negatif bir akım yolunu sağlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 : Genel üç fazlı iki seviye evirici devresi.



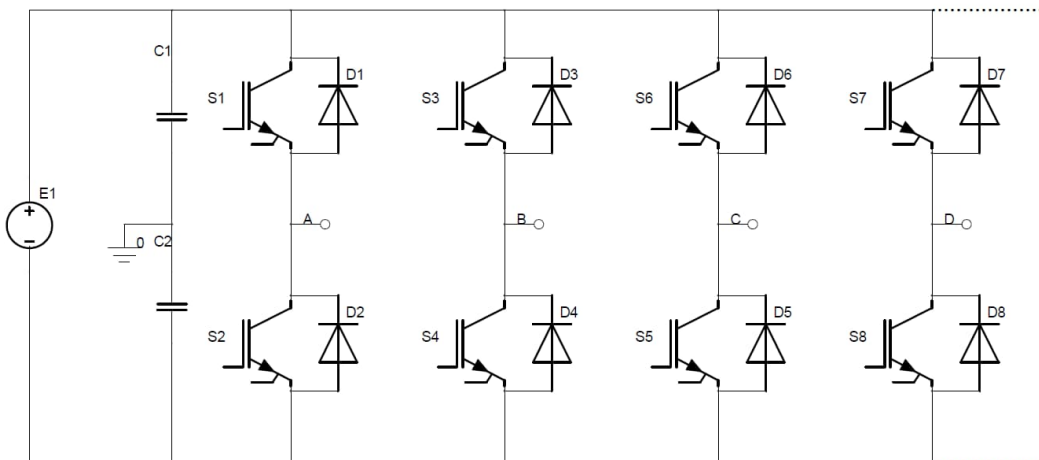
Şekil 2.10’da ise üç fazlı evirici devresinin harmonik çıkış grafiği gösterilmiştir. Bu spektrum grafiğinde görüldüğü üzere, temel dalga bileşeninin frekans değeri olan 50 Hz ve sıralı harmonik bileşenlerin katlarında tüm fazlar için harmonikler oluşmaktadır.



Şekil 2.10 : Üç fazlı evirici harmonik grafiği.

### 2.1.3 Çok fazlı evirici

Faz sayısı üçten büyük olan eviricilere çok fazlı eviricisi denilmektedir. Çok fazlı eviricileri endüstride özel tasarlanan çok fazlı elektrik makinelerini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Özellikle geniş hız-tork aralığı, bir çok otomotiv endüksiyon motoru uygulamasında arzu edilen bir özelliktir. Örneğin, dokuz fazlı simetrik sarımlı bir endüksiyon makinesi, dört veya on iki kutuplu bir makine olarak çalışabilmektedir. Bu, dokuz bacaklı eviriciyi dokuz fazlı veya üç fazlı bir gerilim kaynağı olarak yeniden yapılandırarak gerçekleştirilebilmektedir (Kelly ve diğerleri, 2001). Bu eviriciler Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Çok fazlı evirici devresi.

## **2.2 Seviye Sayısına Göre Eviriciler**

Eviriciler, seviye sayısına göre çeşitlendirilir ve bu seviye sayısı, eviricinin çalışma prensibi, verimliliği ve uygulama alanları üzerinde büyük etkilere sahiptir. İki seviyeli ve çok seviyeli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki seviyeli eviriciler, temel bir anahtarlama düzenine sahiptir, yani anahtarlama elemanları tamamen açık veya tamamen kapalıdır. Bu basit yapıları, düşük maliyetleri ve kolay kontrol edilebilirlikleri nedeniyle birçok uygulama için tercih edilmektedir. Çok seviyeli eviriciler ise daha fazla çalışma seviyesi ve daha karmaşık kontrol gereksinimleri sunmaktadır. Bunlar, yüksek güç uygulamaları ve alternatif enerji kaynakları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Her bir seviye sayısı, eviricilerin avantajları ve dezavantajları üzerinde etkilidir ve doğru seviye sayısı seçimi, belirli bir uygulama için en uygun çözümü sağlamak için kritik bir faktör olmaktadır.

### **2.2.1 İki seviyeli evirici**

Bu eviriciler, her bir anahtarlama elemanının tamamen açık veya tamamen kapalı olduğu iki temel çalışma düzeyine sahiptir. Bu nedenle "iki seviyeli" olarak adlandırılmaktadır. İki seviyeli eviriciler, basit bir yapısının yanı sıra yüksek verimlilikleri, düşük harmonik bozulma düzeyleri ve geniş uygulama yelpazeleri nedeniyle endüstriyel sektörde sıklıkla kullanılan önemli bir güç dönüştürme devresidir. Bu tür eviriciler, endüstriyel motor sürücülerinden güneş enerjisi eviricilerine kadar birçok farklı uygulama alanında kendilerine yer bulurlar. Bölüm 2.1.1 ve 2.1.2 tek fazlı ve üç fazlı iki seviyeli evirici devreleri gösterilmiştir.

### 2.2.2 Çok seviyeli evirici

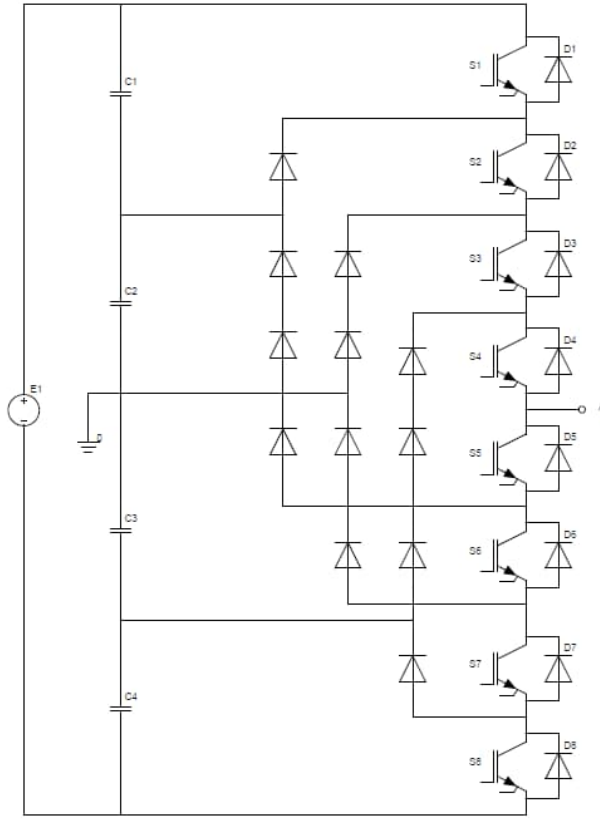
İki seviyeli voltaj kaynağı eviricilerde, anahtarların anahtarlama frekansını arttırmak, düşük bozulmalı bir dalga formu elde etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, geleneksel eviriciler genellikle düşük bozulmalı bir çıkış dalga formu elde etmek için yüksek anahtarlama frekansları ve çeşitli Darbe Genişliği Modülasyonu (DGM) tekniklerini kullanır. Ancak, orta ve yüksek gerilimli uygulamalarda, eviricinin anahtarlarının nominal değerlerinin sınırlamaları ve yüksek anahtar kayıpları nedeniyle bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Ayrıca, orta ve yüksek güç uygulamalarında geleneksel eviricilerin verimliliği düşüktür ve büyük transformatörlerin kullanımı nedeniyle yüksek maliyet gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, orta ve yüksek gerilimli uygulamalarda çok seviyeli eviriciler tercih edilmektedir. Çok seviyeli eviriciler, geleneksel iki seviyeli eviricilere göre bazı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bu tür eviriciler, genellikle üç veya daha fazla çalışma seviyesine sahiptir, bu sayede daha yüksek voltaj çözünürlüğü ve daha düşük harmonik bozulma düzeyleri elde edebilmektedir. Modüler ve basit yapısı sayesinde çok seviyeli eviriciler yüksek seviyeli çıkışlara ulaşabilmektedir. Kaynak sayısı gereksizse, temel anahtarlama frekansı ile sinüzoidal çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Ancak seviye sayısının artırılması daha fazla anahtar gerektirir. Bu nedenle seviye sayısı arttıkça kontrol daha zor hale gelmektedir.

Literatürde üç farklı çok seviyeli evirici topolojisi bulunmaktadır:

- Diyot kenetlemeli çok seviye evirici
- Kondansatör kenetlemeli çok seviye evirici
- Kaskat bağlı çok seviye evirici

#### 2.2.2.1 Diyot kenetlemeli çok seviye evirici

Diyot kenetlemeli çok seviyeli eviriciler, kenetleme diyotları kullanır ve güç elektroniği cihazlarının voltaj stresini sınırlamaya yardımcı olmaktadır. Bu topoloji ilk kez 1981 yılında Nabae, Takashi ve Akagi tarafından önerilmiştir. Ayrıca nötr nokta çevirici olarak da bilinmektedir. Bir M seviyeli diyot kenetlemeli evirici için, anahtar sayısı  $(2M - 2)$  olur. Diyot sayısı ise  $(m - 1) \times (m - 2)$  olarak hesaplanır. Her bir diyot ve anahtar üzerinde bulunan voltaj  $V_{da}$ 'dir (Krishna R ve Suresh, 2016; Pharne ve Bhosale, 2013). Beş seviyeli bir diyot kenetli evirici Şekil 2.12'de gösterilmektedir.



Şekil 2.12 : Beş seviyeli diyot kenetlemeli evirici.

#### Avantajlar:

- Anahtar üzerindeki voltaj, DA-hat voltajının yalnızca yarısıdır.
- Voltaj harmonikleri, anahtar frekansının iki katı etrafında merkezlenir.
- Kapasitörlerin kapasitesi düşüktür ve ön yüklü durumdadırlar.
- İki evirici arka arkaya kullanılır.
- Temel frekansta verimlilik yüksektir.

#### Dezavantajlar:

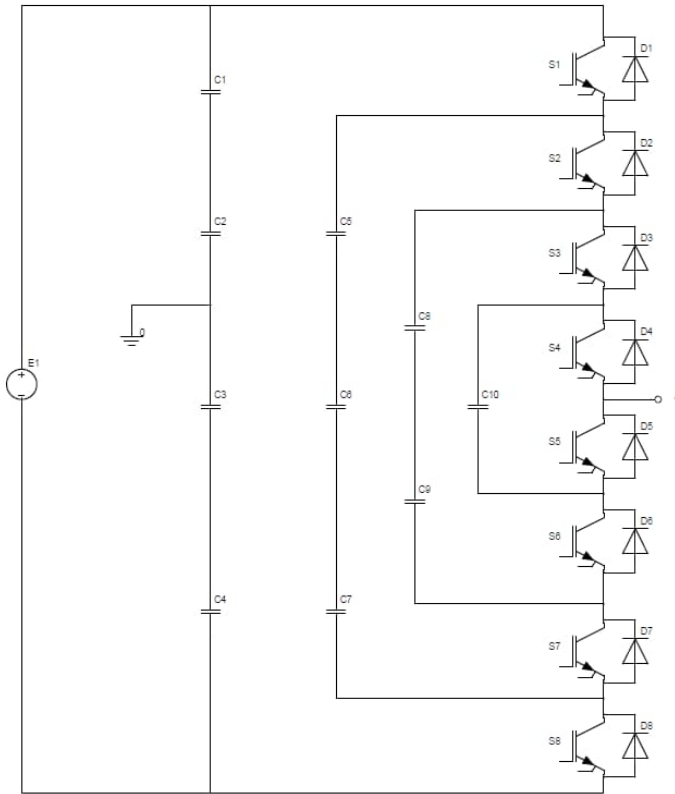
- Her seviye artışıyla birlikte kenetleme diyotları artar.
- Kontrol ve izleme hassas değilse, DA seviyesi deşarj olabilir.

Ancak, bu topoloji yüksek güç dönüştürücüler için teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Ters geri kazanım gerilimine maruz kalacak yüksek hızlı kelepçe diyotları gerektirir. Diyotların seri bağlantısı nedeniyle tasarım karmaşıklığı önemli bir endişedir.

### 2.2.2.2 Kondansatör kenetlemeli çok seviye evirici

Bu tür devre topolojileri, diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici topolojisinin bir alternatifidir ve voltajı sınırlamak için kondansatör kullanılır. Kondansatörlerin bulunması, diyot kenetlemeli çok seviyeli eviricisinden farklı kılar, çünkü diyotlar kullanılmamaktadır. Kondansatörler, giriş DA voltajlarını bölmektedir. Her kondansatör ve anahtarın üzerindeki voltaj  $V_{da}$ 'dir.

Bir M seviyeli kondansatör kenetlemeli evirici için şunları gerektirir: Anahtarlar:  $(2M - 2)$ , Kapasitör sayısı:  $(M - 1)$ . Kondansatör kenetlemeli anahtar hücreleri seri olarak bağlanmıştır. Anahtarlama durumları, diyot kenetlemeli evirici ile aynıdır. Bu eviricilerde kenetleme diyotları gerekmemektedir. Çıkış voltajı, giriş DA voltajının yarısıdır (Krishna R ve Suresh, 2016; Pharne ve Bhosale, 2013). Beş seviyeli bir topoloji aşağıda Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13 : Beş seviyeli kondansatör kenetlemeli evirici devresi.

Avantajlar:

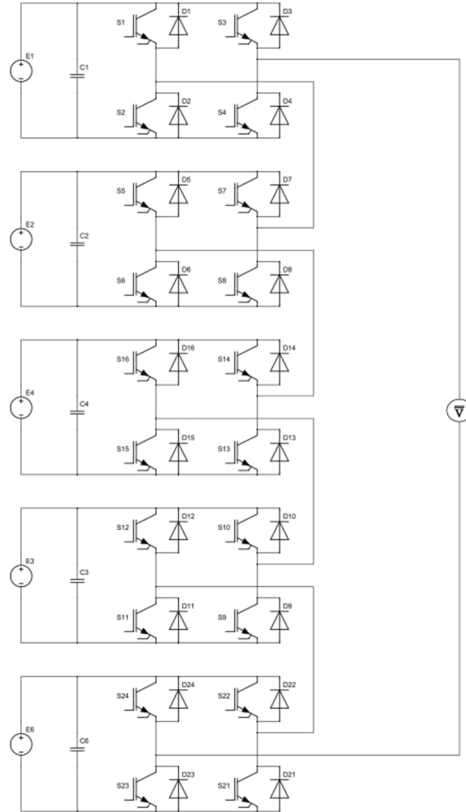
- Kenetleme diyot sorunlarını ortadan kaldırır.
- Cihaz üzerindeki  $dV/dt$  gerilim stresini azaltır.
- Ek anahtar durumları kapasitörlerdeki yük dengelemesini korumaya yardımcı olur.

Dezavantajlar:

- Karmaşık başlatma işlemi.
- Düşük anahtar verimliliği.
- Kondansatör, diyotlardan daha pahalıdır.
- Tüm kapasitörler üzerinde gerilim kontrolü zordur.

### 2.2.2.3 Kaskat bağlı çok seviye evirici

Kaskat H-köprü evirici, ayrı DA kaynakları veya kapasitörler kullanmaktadır. Her seviyede daha az sayıda bileşen gerektirir. Güç dönüşüm hücrelerinin seri bağlantısı vardır. H-köprü, kapasitörler ve anahtar çifti kombinasyonundan oluşmaktadır. Her H-köprü için ayrı bir giriş DA voltajı elde edilir. Sinüzoidal bir çıkış voltajı üretmektedir.



Şekil 2.14 : Beş seviyeli kaskat H-köprü evirici devresi.

Evirici, seri bağı H-köprü hücrelerini kullanır, her biri üç farklı seviyede DA voltajı (sıfır, pozitif DA ve negatif DA voltajları) sağlar. Çıkış voltajı, her H-köprü hücresinden üretilen tüm voltajların toplamıdır. Eğer M adet hücre bulunuyorsa, çıkış voltaj seviyelerinin sayısı  $2M+1$  olacaktır (Krishna R ve Suresh, 2016; Pharne ve Bhosale, 2013). Beş seviyeli bir H-köprü evirici Şekil 2.13'te gösterilmektedir.

Avantajlar:

- Ortak mod voltajı üretir, stres azalır.
- Giriş akımında düşük bozulma.
- Temel anahtar frekanslarında çalışır.
- Filtre devresi olmadan çıkış dalga formunda toplam harmonik bozulma çok düşüktür.

Dezavantajlar:

- Her bir modül için ayrı DA kaynakları veya kapasitörler gereklidir.
- Kapasitörlerin miktarı nedeniyle daha karmaşık bir denetleyici gereklidir.

### 3. EŞ ZAMANLI BENZETİM

Eş zamanlı benzetim, karmaşık ve büyük ölçekli sistemlerin analizi ve tasarımı için oldukça sofistike bir modelleme ve benzetim yöntemidir. Bu yaklaşım, bir sistemin tüm bileşenlerinin etkileşimlerini ayrıntılı bir şekilde incelemek ve değerlendirmek için kullanılmaktadır. Eş zamanlı benzetim, genellikle birkaç bilgisayar tabanlı benzetim platformunu kullanarak gerçek dünya olaylarını hassas bir şekilde yansıtarak farklı sistem bileşenlerini aynı anda çalıştırmayı ve analiz etmeyi temel almaktadır. Bu, hem mühendislik tasarımı hem de analiz süreçlerinin çeşitli yönlerini ele almak için oldukça faydalı bir benzetim yöntemidir.

Eş zamanlı benzetim, özellikle büyük ve karmaşık sistemlerde, farklı alt sistemlerin etkileşimlerini anlamak ve optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, birçok endüstri alanında önemli bir rol oynar, özellikle havacılık, otomotiv, telekomünikasyon, enerji sistemleri ve savunma gibi alanlarda. Bu benzetim yöntemi, karmaşık sistemin tüm yönlerini inceleme ve analiz etme yeteneği sunar, bu da tasarım hatalarını teşhis etme, performans iyileştirmeleri yapma ve daha iyi bir sistem tasarımı oluşturma konularında büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Eş zamanlı benzetim ayrıca, farklı algoritma ve modelleme dillerinin birleştirilmesini gerektirmekte ve genellikle yüksek hesaplama gücü ve özel yazılım araçları gerektirmektedir. Bu yaklaşım, genellikle çoklu disiplinler arası ekip çalışması gereksinimi ve mühendislerin karmaşık problemleri ele almasına ve sistemlerin karmaşıklıklarını anlamasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, eş zamanlı benzetim, büyük ve karmaşık teknik sistemlerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için vazgeçilmez bir araç olarak kabul edilmektedir.

Yüksek kaliteli elektromekanik ürünlerin (elektrikli taşıtlar, elektrikli tahrikler vb.) montajları ve üretimi, doğru benzetim araçları olmadan düşünülemez. Benzetimler genellikle yeni konseptlerin işletme testi, hızlı prototipleme, sistem karakteristiklerinin optimize edilmesi ve sistem hatalarının erken tanımlanması amacıyla ürün geliştirme sürecine dahil edilmektedir. Ürün geliştirme sürecinde bunlar, zaman ve maliyet

açısından son derece önemli oldukları açık bir gerçektir. Benzetimler, optimal maliyet-performans oranına ulaşmaya çalışırken prototip iterasyonlarının sayısının azaltılmasına ve geliştirme sürecinin malzeme maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkılarda bulunabilmektedir. Gerçekleştirilen benzetimlerin sonuçları, doğru ve güvenilir uygulanan fiziksel modellere sahip olduklarından genellikle gerçek sistem özelliklerine yeterince benzerdir. Muhtemelen en yaygın uygulanan benzetim aracı, sadece akademik araştırmalar için değil, aynı zamanda lisansüstü öğrenciler tarafından da kullanılan Mathworks'ten MATLAB-Simulink yazılımıdır. Bu yazılım, önceden tanımlanmış bileşenlerin kullanılmasına olanak tanırken, kendi özel eleman kütüphanelerini ve gelişmiş program paketlerini geliştirmeye imkan tanımaktadır.

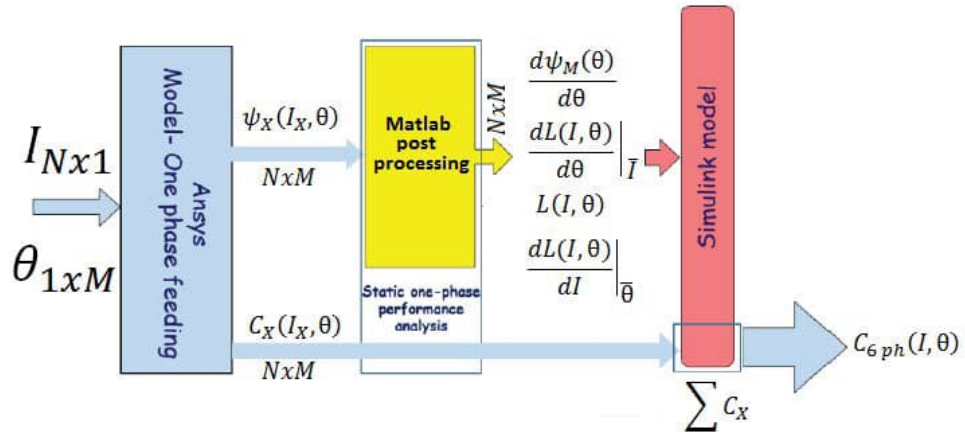
Endüstrideki araştırma süreci daha yaygın olarak ANSYS-Multiphysics gibi paketlere dayanmaktadır, bu da çeşitli alt program platformlarını içermektedir. Maxwell, elektromanyetik bileşenlerin analizi için özel bir çözümdür, mekanik, termik ve yük stres analizi için tasarlanmıştır. Icepak elektronik cihazlar için soğutma cihazlarının benzetimleri için kullanılabilirken, Q3D parazit etkilerin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Simplorer, elektrik devre tasarımı için tasarlanmış bir program paketinin bir parçasıdır ve düğüm voltaj ve dalga akımı analizi yapmak için kullanılır. Bazı programlar diğerlerine göre belirli analiz alanları için daha uygun olduğundan, araştırmalar genellikle birkaç program paketinin eş zamanlı benzetimini entegre ederek yürütülür. ANSYS program paketinin diğer bölümleriyle eş zamanlı benzetimi, Simplorer ile de gerçekleştirilebilir. Bu, özellikle elektromanyetik özelliklerin daha doğru entegrasyonunu içeren bir elektromekanik ürünün kapsamlı benzetim çalışmasını değerlendirmesi sağlayabilmektedir (Rihar ve diğerleri, 2017).

Farklı disiplinlerle birlikte tasarlanmakta olan ürünler, hedeflenen tasarım parametrelerine ve hedeflenen güvenilirlik hedeflerine ulaşmak için bir hataya dayanıklı tasarım yaklaşımına ihtiyaç duymaktadır. Güç dönüştürücülerin modellenmesi, Pspice, SABER, Simplorer ve Psim gibi çeşitli yazılım paketleri kullanılarak tasarlanabilmektedir. Ancak, bu paketler özellikle motor sürücü uygulamaları için karmaşık kontrol denetleyicilerin modellenmesi için uygun değildir. MATLAB-Simulink yazılımı, sofistike kontrol denetleyicilerin tasarımı için iyi bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Ancak, güç elektroniği devre özelliklerini modelleme konusunda düşük doğruluğa sahiptir. Bu nedenle, her yazılım paketinin avantajlarından yararlanmak ve istenilen sistemin daha gerçekçi modellerini sunmak

için bir eş zamanlı benzetim modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu model, tasarımcılara elektronik devre ile kontrol sistemi arasındaki istenmeyen etkileşimleri hızla tanımlama ve düzeltme olanağı sağlayacak, bu da üretim süresini kısaltmasında önemli etken olmaktadır. Birçok eş zamanlı benzetim yazılım ortamı, MATLAB-Simulink yazılımını güç elektroniği benzetim yazılımı ile arayüz oluşturmak için literatürde kullanılmıştır (Ed-dahmani ve diğerleri, 2016; Zhigang Sun ve diğerleri, 2010).

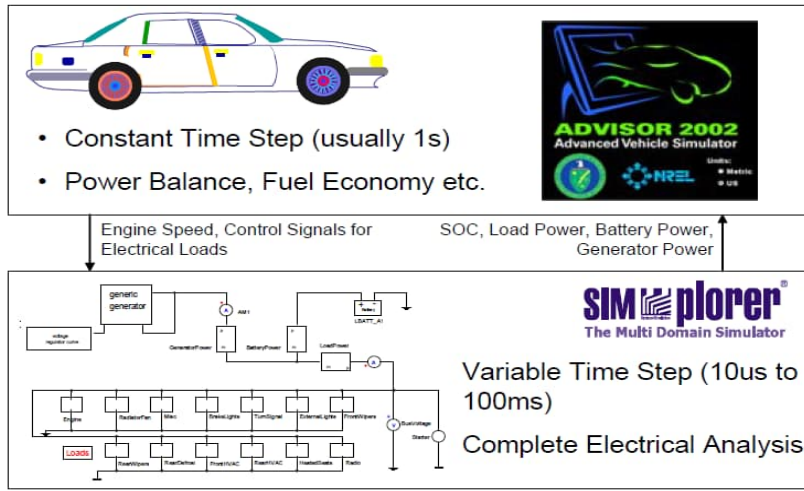
Hang ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada, bir endüksiyon motorunun alan yönlü kontrol sistemi modelini sunmaktadır. Bu modelleme ilk olarak, ANSYS-Rmxprt kullanarak motorun başlangıç değerlerini hesaplayıp optimize etmekte ve ardından motor modelini sonlu elemanlar yöntemi ile Maxwell 2D ortamında statik ve geçici analizler yapmaktadır. İkinci aşama olarak motor evirici ve kontrol devresini ANSYS-Simplorer yazılımında tasarlanmakta ve son olarak MATLAB-Simulink ortamında motoru ve evirici devresini kontrol edecek olan alan yönlü kontrol sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Eş zamanlı benzetimle üç fazlı tasarımı tek bir sistem gibi analiz edip değerlendirme yapılmıştır. Aynı anda hem endüksiyon motorunun performansını 2B/3B görsel ve grafiksel olarak, hem evirici parametrelerini hem de kontrol yazılımının parametrelerini gösterilmektedir. Bu makalede üç farklı sistemin analizi gerçekleştirilmektedir.

Onambele ve diğerleri (2017) bu makalede, havacılık uygulamaları için Silikon Karbür (SiC) tabanlı bir sürücünün performansını değerlendirmek amacıyla bir MATLAB-Simulink ve ANSYS-Simplorer ile eş zamanlı benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için, güç dönüştürücü devresi Simplorer yazılımında modellenirken motor ve kontrol ünitesi MATLAB-Simulink yazılımında modellenmiştir. Benzetimin uygulama adımları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Çevrimdışı eş zamanlı benzetim uygulama adımları (Onambele ve diğerleri, 2017).

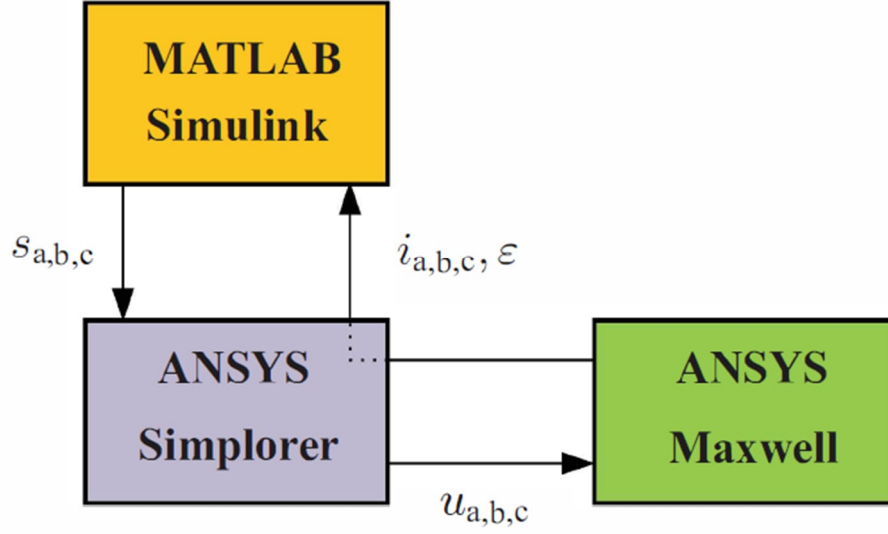
Elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtların geliştirilmesine artan ilgi ile, geliştirme sürecine yardımcı olacak kapsamlı sistem tasarımı ve analiz talebi artmaktadır. Yakıt pilleri, piller ve diğer enerji depolama cihazlarının kombinasyonu ve bu cihazların aracın diğer elektrik bileşenleri ile karmaşık etkileşimleri, sofistike bir tasarım yaklaşımını gerektirmektedir. Knorr ve Juchem (2003) makalesinde, ayrıntılı bir elektriksel modelle bağlantılı olarak genel sistem davranışını simüle edebilen bir eş zamanlı benzetim tabanlı tasarım ortamını sunmaktadır. Tasarım ortamı, NREL (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) tarafından geliştirilen bir sistem düzeyi taşıt tasarım aracı olan ADVISOR ile Ansoft'un elektriksel, elektromekanik ve kontrol benzetim yetenekleri sunan sofistike bir tasarım aracı olan Simplorer'ı birleştirmektedir. Şekil 3.2'de sistem tasarım yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Simplorer ve Advisor arasında eş zamanlı benzetim yapısı (Knorr ve Juchem, 2003).

Schulte ve Bocker (2013) yapılan çalışmada ise kalıcı mıknatıslı senkron motoru, evirici devresi ve kontrol algoritması benzetimi eş zamanlı benzetim yöntemi ile yapılmaktadır. Sistemin motor tasarımını ANSYS-Maxwell, evirici tasarımını ANSYS-Simplorer ve kontrol algoritması tasarımını ise MATLAB-Simulink ortamında yapılmaktadır. Bu tür bir eş zamanlı benzetim konseptini seçmenin avantajı, örneğin eviricinin anahtarlamasından büyük ölçüde etkilenen, alan nicelikleri veya oluşan demir kayıplarının detaylı bir şekilde incelenebilmesidir. Ayrıca, arayüzün giriş ve çıkışları aynı kaldığı sürece eş zamanlı benzetiminin her parçası yeni bir modelle değiştirilebilmektedir. Bu nedenle, motorlar, kontrol ve güç elektroniği devresi

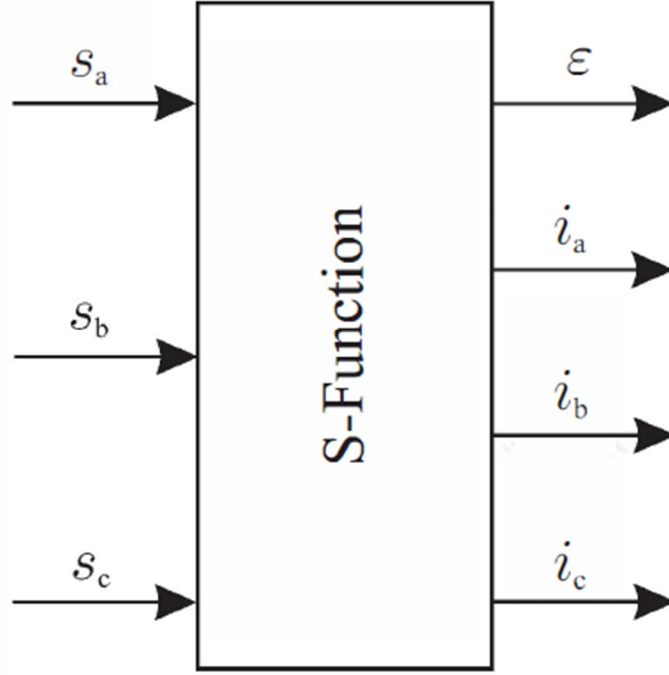
modellerinin çeşitli kombinasyonları arasında performans karşılaştırmaları kolayca oluşturulabilmektedir. Sistemin genel yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Yazılımlar arası veri akış diyagramı (Schulte ve Bocker, 2013).

Eş zamanlı benzetimi gerçekleştirmek için, tüm bireysel bileşenler arasında sürekli veri değişimi gerçekleşmelidir. Simulink ve Simplorer arasındaki arayüz, yazılım üreticisi ANSYS tarafından sağlanan bir S-fonksiyonu (S-Function) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve uygulanmıştır. Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

Bu S-fonksiyonun amacı, Simplorer'a Simulink'e veri aktarımını sağlamaktır. S-fonksiyonu evirici modeline geçiş sinyalleri  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ 'yi aktarmak ve Maxwell'daki motor modelinden motor akımları  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  ve rotor pozisyonu  $E$ 'yi almak için kullanılır. Gerektiğinde diğer değişkenler (akı bağlantıları, kayıplar vb.) de değiştirilebilmektedir. Maxwell ve MATLAB arasında doğrudan veri değişimi olmadığı için, bu, MATLAB ve Simplorer arasındaki veri arabirimi olarak hareket etmektedir. Maxwell ve MATLAB modelleri arasındaki bilgi alışverişi (hız ve tork bilgileri gibi) bu nedenle Simplorer aracılığıyla gerçekleştirilmelidir. Bu durum, Maxwell ve Simplorer arasında, yazılım üreticisi ANSYS tarafından sağlanan yapılandırılabilir bir veri arabirimi modülü dışında doğru düzeltilebilecek veri arabirimi modülü olmadığından kaynaklanmaktadır.



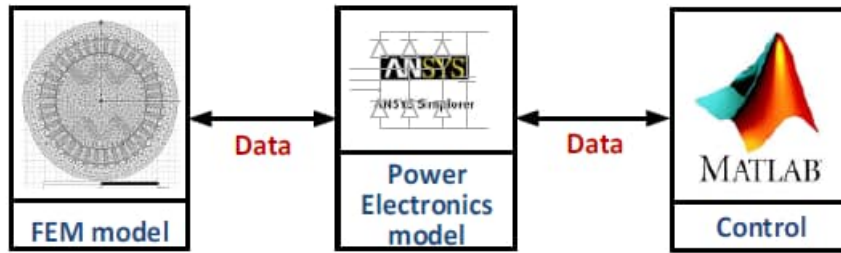
Şekil 3.4 : Gömülü S-Fonksiyon bloğu (Schulte ve Bocker, 2013).

Apostoaia (2012) , AA tahrik kontrol sistemleri bileşenlerinin eş zamanlı benzetimi ve ortak bir benzetim platformuna entegrasyonunu önermektedir. Yüksek dinamik performanslı elektrik tahrik sistemlerinin kontrol algoritmalarını analiz etmek için basit doğrusal modeller yeterli olmamaktadır. Motor davranışı, tahrik koşullarının değişmesine bağlı olarak daha fazla doğrusal olmayan hale gelmekte ve manyetik doygunluğun ve uzamsal harmoniklerin kontrol algoritmaları üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Motor tasarımcıları ve sistem devresi (kontrol) tasarımcıları, tasarım sürecinde en yüksek doğruluk düzeyine sahip farklı türde modelleri aynı anda analiz edebilen gelişmiş araçlara ihtiyaç duymaktadırlar. Bu ihtiyaçlara yanıt vermek için kullanılan çözüm, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) teknolojisini kullanarak ANSYS-Maxwell gibi sonlu elemanlar yöntemi tabanlı yazılımlarla gelişmiş makine modelleri oluşturmaktır. Tahrikin, elektrik ve elektromekanik parçaları modellerinin geliştirilmesi için bu çalışmada çok alanlı bir benzetim programı olan ANSYS-Simplorer tercih edilmiştir. Son olarak, elektrik tahrik kontrol algoritması MATLAB-Simulink kullanılarak uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, üç fazlı bir endüksiyon motor tahrik kontrol sistemi benzetim platformunun geliştirilmesini sunmaktadır. Makine modelleri önce ANSYS-RMxprt yazılımında oluşturulur ve tamamen Maxwell yazılımına entegre edilmiş bir şablon tabanlı elektrik makinesi tasarım aracıdır, ardından sürücünün elektromekanik parçalarının uygulanmasını mümkün kılan bir eş

zamanlı benzetim için Simplorer'a aktarılır. Son olarak, Simplorer ve Simulink arasında iki yönlü bir arabirim oluşturulur. Eş zamanlı benzetim, önce Simplorer devresine Simulink bileşeni eklenerek başlar, ardından Sim2Sim Link arabirimi kullanılarak Simulink'ta bir Şekil 3.4'te verildiği gibi S-Fonksiyonu oluşturulur. Böylece, tüm sistemin benzetim çalışması yapılmış olmaktadır.

Leonardo ve diğerleri (2019) ileri çekiş uygulamaları için tasarlanmış 200 kW endüksiyon motor tahrikinin geçici analizinde uygulanan sonlu elemanlar modeli eş zamanlı benzetim tekniği ile elde edilen sonuçları sunmaktadır. Eş zamanlı benzetim, ANSYS-Simplorer ve MATLAB-Simulink yazılımlarını içermektedir. ANSYS'de geliştirilen sonlu elemanlar motor modeli, Simulink içinde yerleşik olan rotor akı odaklı denetleyici ile kontrol edilmektedir. Ayrıca, denetim parametrelerini tasarlamak için kullanılan veri tabanlı parametreler motor modeli, karşılaştırma yapmak amacıyla Simulink'e uygulanmıştır ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Quintal (2019) yaptığı çalışmada ise kalıcı mıknatıslı senkron generatör kullanan bir küçük rüzgar türbini analizi eş zamanlı benzetim kullanarak yapmaktadır. Bu küçük rüzgar türbinleri (200 kW'dan az güç) genellikle başlangıçta ve düşük hızlarda dışsal uyarımın veya ek enerji girişinin eksikliğinden kaynaklanan kalıcı mıknatıs senkron generatörlerin kullanımıyla sektörde yer edinmiştir. Motorun tasarımı ANSYS-Maxwell yazılımında, ANSYS-Simplorer yazılımında ise gerekli güç devresi tasarlanmış ve MATLAB-Simulink üzerinden maksimum güç noktası izleme kontrol algoritması çalıştırılacak tüm sistem kontrol edilmektedir. Sistemin blok diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

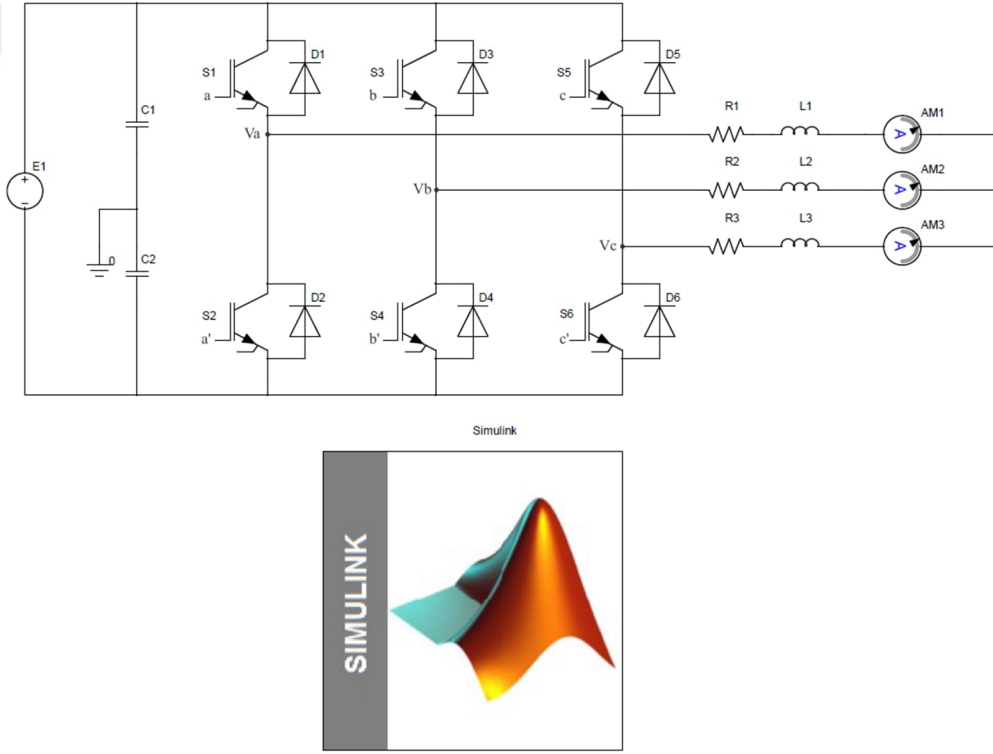


Şekil 3.5 : Eş zamanlı benzetim yapısı (Quintal, 2019).



#### 4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu tezde, elektrikli taşıtlarda kullanılmak üzere, iki seviyeli üç fazlı evirici devresi üzerinde, tetikleme sinyali karşılaştırması eş zamanlı benzetim yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada sistemin tetikleme sinyalleri MATLAB-Simulink yazılımı üzerinde, evirici devresi ise ANSYS-Simplorer üzerinde tasarlanmış ve eş zamanlı benzetim ile çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.1’de, Simplorer’de tasarlanmış genel evirici devresi ve Simulink bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Simplorer eş zamanlı benzetim için genel evirici devresi ve Simulink bağlantısı.

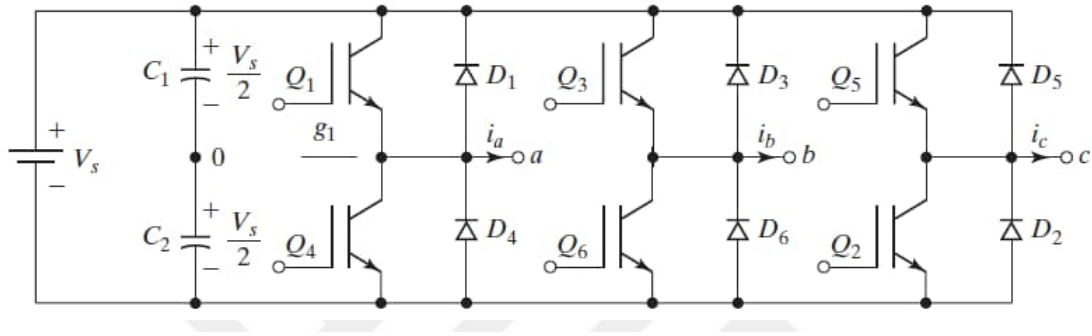
Çizelge 4.1’de ise sistemin genel parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Üç fazlı evirici devresi parametreleri

Parametler	Değer
$V_{dc}(E1)$	400V
$f_s$	50Hz
$L_{1,2,3}$	5mH
$R_{1,2,3}$	5 $\Omega$

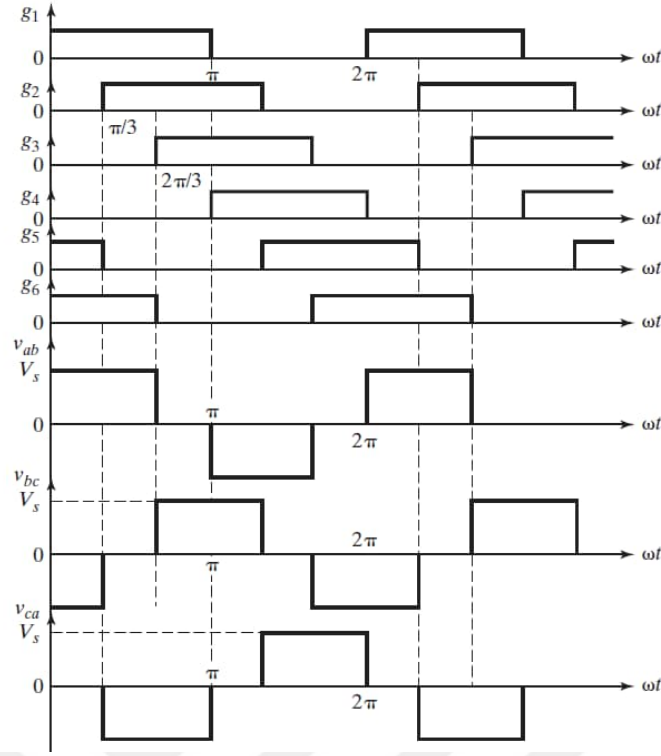
#### 4.1 Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği

Darbe genişliği modülasyonu (DGM) tekniği, yüksek güçlü evirici uygulamalarında kullanılan temel bir sinyal tekniğidir. Bu teknik, 120 derece iletim tekniği ve 180 derece iletim tekniği olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu eş zamanlı benzetim çalışmasında, THB değerinin daha iyi olması durumundan dolayı 180 derece iletim tekniği ile benzetim yapılmıştır. 180 derece iletim tekniğinin temel evirici devresi Şekil 4.2’de ve dalga şekilleri Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Evirici devresi (Rashid, 2004).

Şekil 4.3’teki dalga formuna göre, Şekil 4.1’deki evirici devresinde ki anahtarlama durumları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

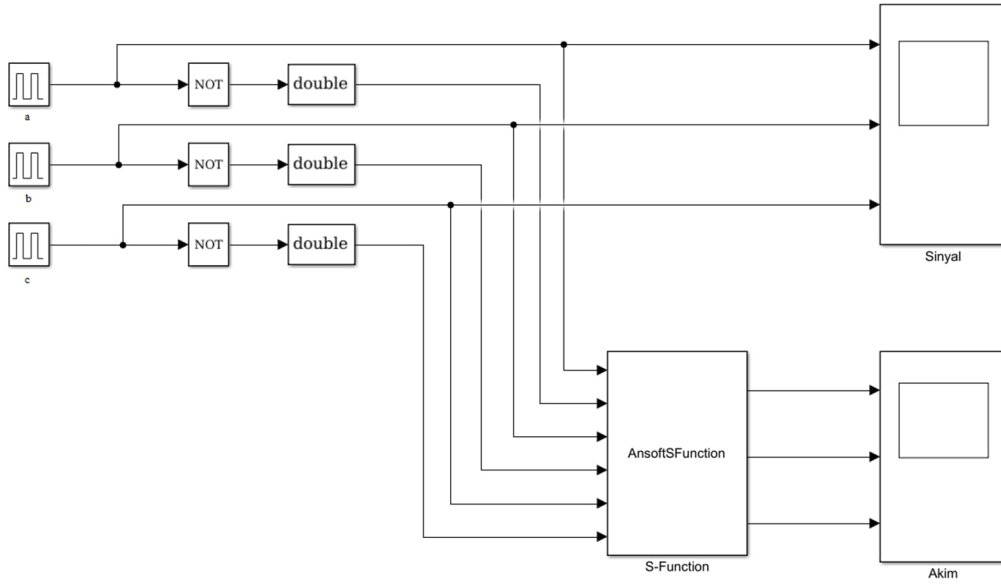


Şekil 4.3 : 180 derece DGM anahtarlama sinyali (Rashid, 2004).

Çizelge 4.2 : 180 derece DGM tekniği anahtar durumları (Rashid, 2004).

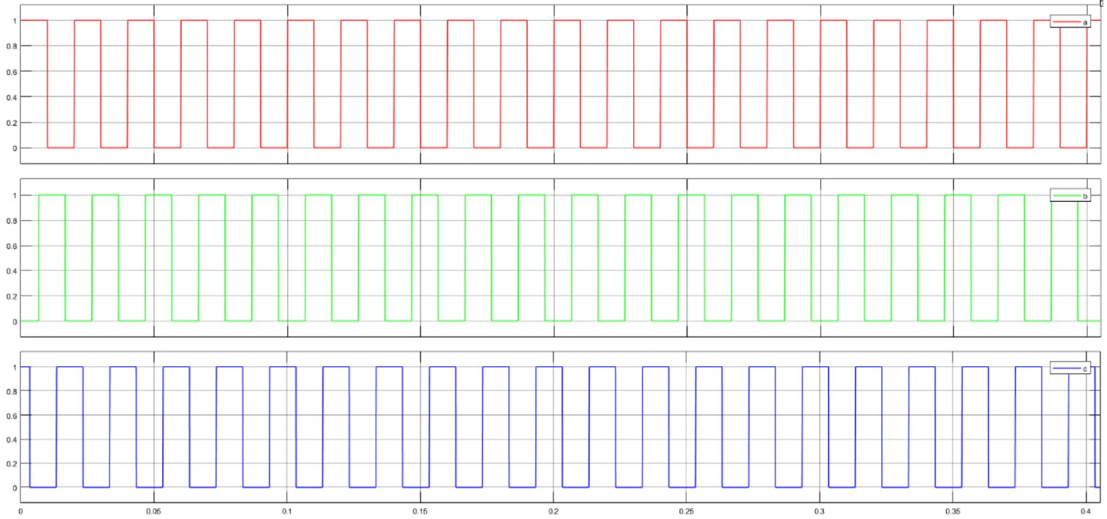
Çıkış Gerilimleri			Anahtarlama Durumları					
$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ac}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
E	0	-E	İ	K	K	İ	K	İ
0	E	-E	İ	K	İ	K	K	İ
-E	E	0	K	İ	İ	K	K	İ
-E	0	E	K	İ	İ	K	İ	K
0	-E	E	K	İ	K	İ	İ	K
E	-E	0	İ	K	K	İ	İ	K
0	0	0	İ	K	İ	K	İ	K
0	0	0	K	İ	K	İ	K	İ

Çizelge 4.2’de, “İ” anahtarın iletimde olduğunu, “K” ise kesimde olduğunu göstermektedir.



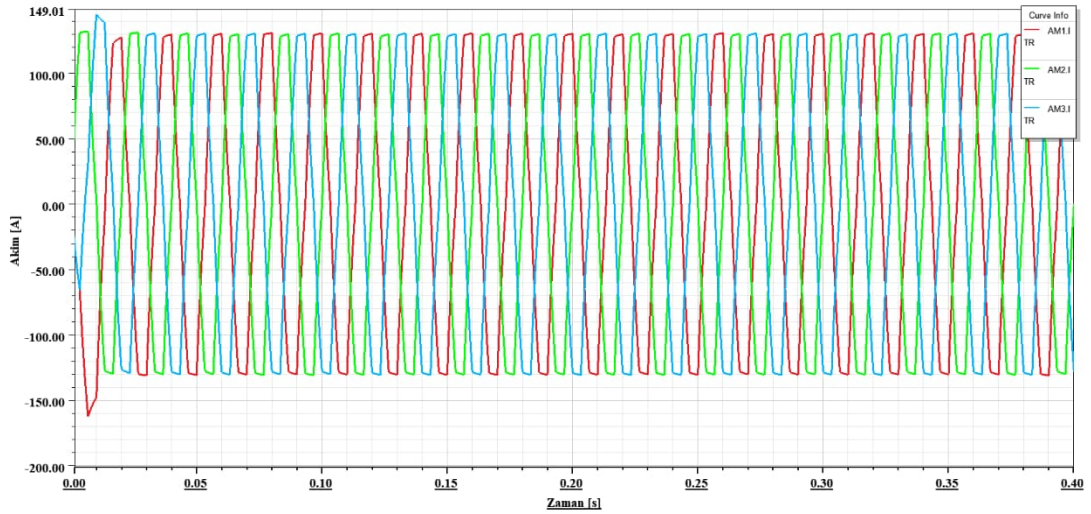
Şekil 4.4 : 180 derece DGM Simulink tasarımı.

Şekil 4.4’te ise MATLAB-Simulink tasarımı gösterilmektedir. Benzetimin eş zamanlı olabilmesi için bir S-Fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu S-Fonksiyonu Şekil 4.1’de bulunan 6 adet anahtarlama elemanlarının tetiklemesi ve ampermetrelerin (AM1, AM2, AM3) Simulink ve Simplorer arasında bir bağlantı köprüsü oluşturmasını sağlamaktadır. Bu sayede Simulink’te üretilen 180 derece üç fazlı DGM sinyalleri evirici devresini tetikleyebilmektedir. Oluşturulan faz sinyalleri ise Simulink içerisinde Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



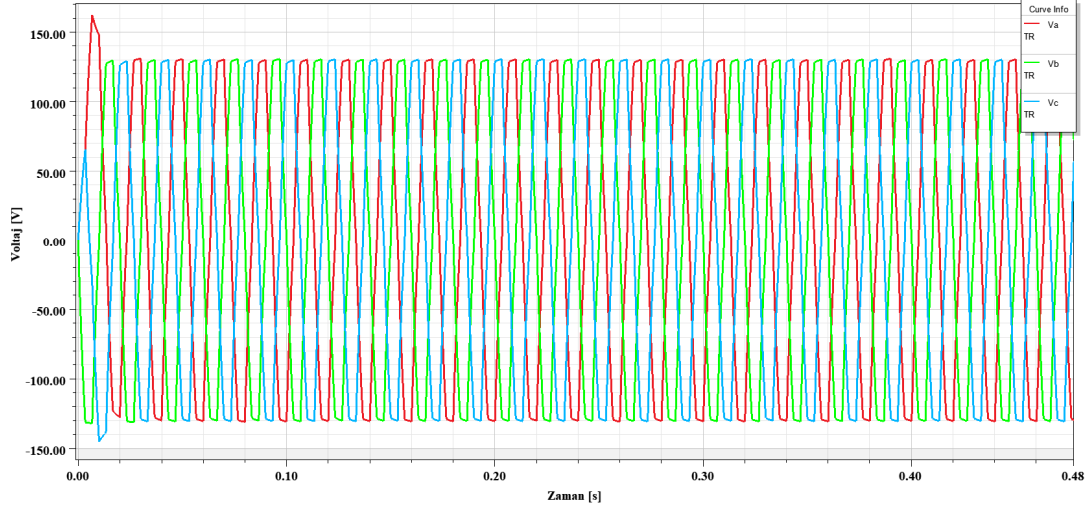
Şekil 4.6 : Üç fazlı DGM tetikleme sinyali.

Şekil 4.5'te görüleceği üzere her faz arasında 120 derece faz farkı bulunmaktadır. DGM'nin görev süresi ise %50 olarak ayarlanmıştır. Evirici devresinde üst taraf IGBT'lerinin tetiklenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 4.6'da ise 0-0,4 sn aralığı gösterilmiştir.



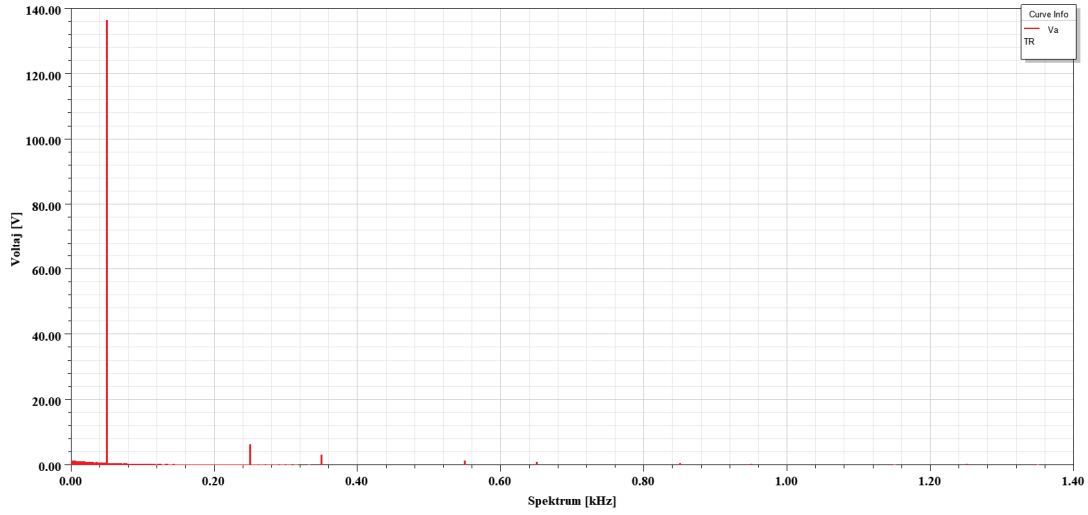
Şekil 4.5 : DGM tetiklemeli evirici çıkış akımı.

Ayrıca, Şekil 4.6'da görüldüğü üzere evirici çıkış oluşmakta olan akım kare sinyale benzemektedir. Şekil 4.7'de evirici devresinde  $V_a$ ,  $V_b$ , ve  $V_c$  gösterilmiştir, ve çıkış voltajının dalga formununun kare olduğu gözükmektedir.



Şekil 4.7 : DGM tetiklemeli evirici çıkış voltajı.

Toplam harmonik bozunum grafiği ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

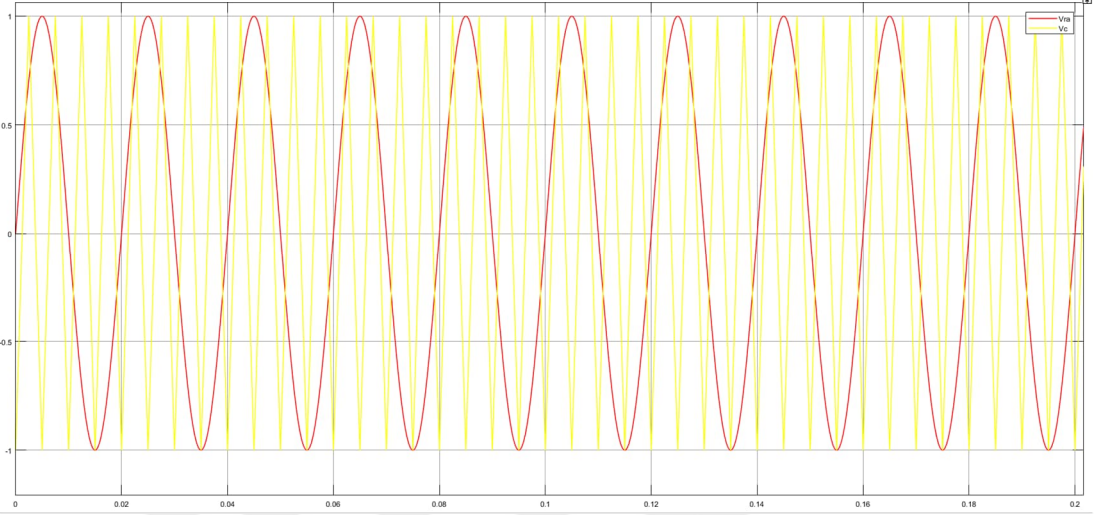


Şekil 4.8 : DGM tetiklemeli evirici  $V_a$  harmonik grafiği.

180 derece DGM tekniğinin toplam harmonik bozunumu (THB) ise %8,67 olarak hesaplanmıştır.

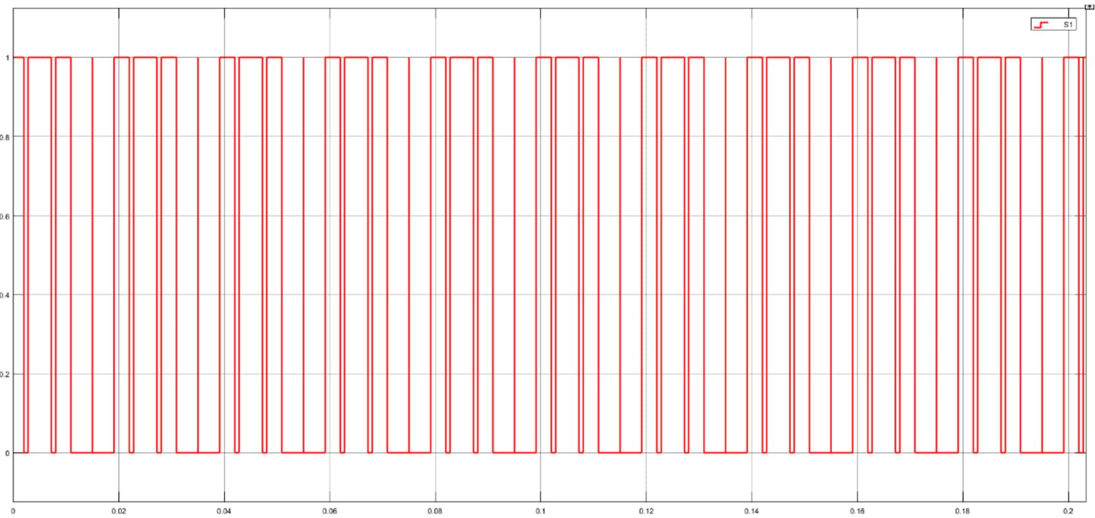
## 4.2 Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği

Sinüzoidal darbe genişliği modülasyon tekniği, bir referans sinüs sinyali ile bir taşıyıcı üçgen sinyalinin karşılaştırılmasından elde edilmektedir. Şekil 4.9’da bir sinüs sinyali ile üçgen sinyali gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Referans ve Taşıyıcı sinyallerinin grafiği.

Karşılaştırma işlemi sırasında referans sinüzoidal sinyalleri, üçgen taşıyıcı dalgasından daha büyük olduğunda çıkış sinyali lojik bir olmakta, küçük olduğu durumda ise lojik sıfır olmaktadır. Bu iki sinyalin karşılaştırılması ile elde edilen sinyal, Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 : Karşılaştırma sonucu oluşan tetikleme sinyali.

SDGM sinyal tekniğinde ise standart DGM gibi sabit bir görev süresi bulunmamaktadır. Karşılaştırma durumuna göre değişken bir görev süresi bulunmaktadır. Referans sinyali olan sinüs sinyalinin frekansı  $f_r$ , evirici çıkış frekansı

$f_0$  belirlemektedir. Taşıyıcı sinyali olan üçgen sinyaline ( $f_c$ ) olan oranı ise tetikleme sayısını belirlemektedir. Tetikleme sayısı Denklem 4.1’de gösterildiği gibi olmaktadır.

$$Pr = \frac{fc}{fr} \quad (4.1)$$

Tetikleme sayısı, eviricinin çıkış parametrelerindeki dalgalanmayı doğrudan azaltmaktadır (Türe ve diğerleri, 2021).

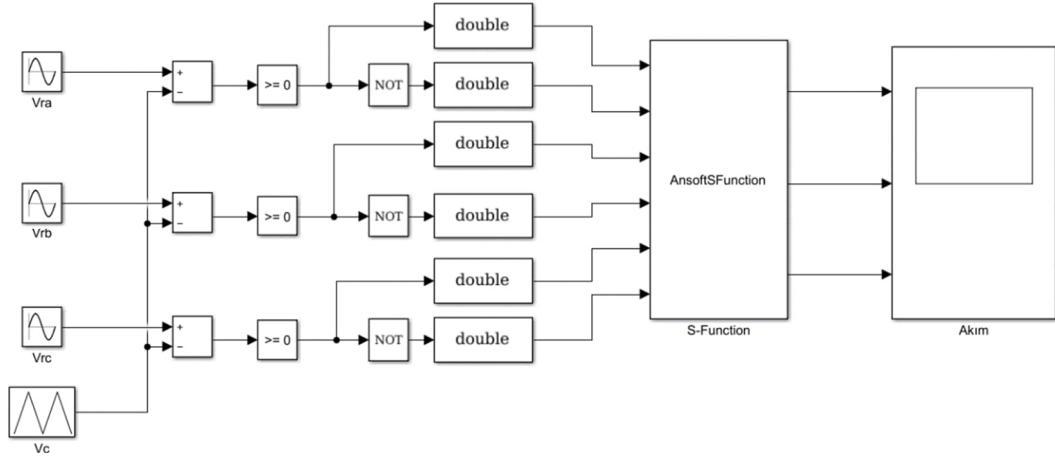
Referans sinyalinin tepe genliği  $A_r$  ve taşıyıcı sinyalinin tepe genliğine ( $A_c$ ) orasını ise modülasyon oranını vermektedir. Bu oran 0 ile 1 arasında olmak zorundadır ve 1’e yaklaştıkça çıkış gerilimi  $V_0$  artmaktadır. Modülasyon oranı Denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$M = \frac{Ar}{Ac} \quad (4.2)$$

Çıkış geriliminin etkin değerini modülasyon indeksini ayarlayarak değiştirilebilmek mümkündür. Eviricinin etkin çıkış gerilimi Denklem 4.3’te gösterilmiştir.

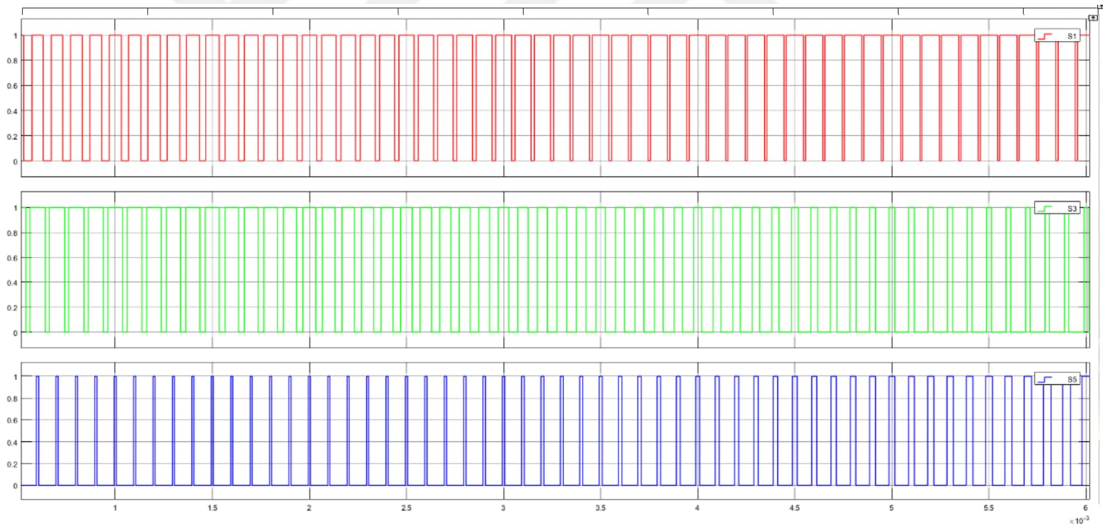
$$Vo = Vs \sqrt{\sum_{m=1}^{2Pr} \frac{\delta m}{\pi}} \quad (4.3)$$

MATLAB-Simulink ortamında tasarlanan üç fazlı SDGM’u Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Her biri 120 derece kaydırılmış ve 50 Hz üç tane sinüzoidal referans dalga ( $V_{ra}$ ,  $V_{rb}$ ,  $V_{rc}$ ) bulunmaktadır.



Şekil 4.11 : SDGM Simulink tasarımı.

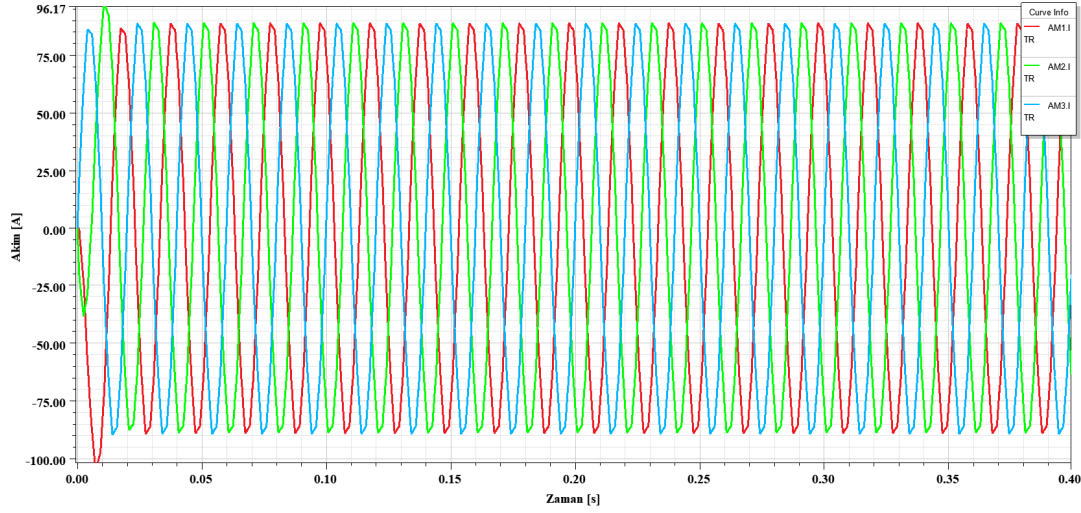
Taşıyıcı sinyal, 10 kHz frekansına sahip olan  $V_c$  sinyalini üretmektedir. Taşıyıcı üçgen sinyalin ve referans sinyalleri Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



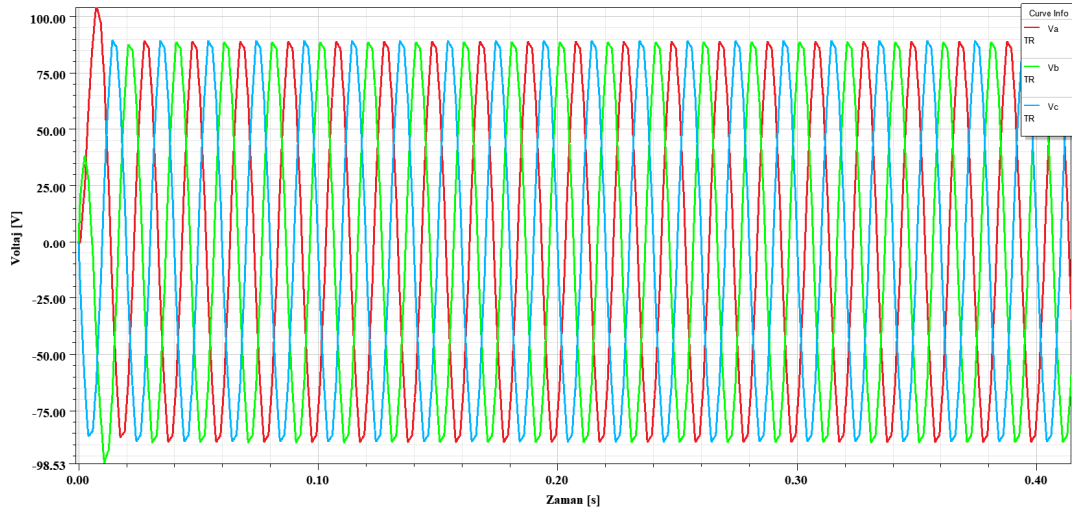
Şekil 4.13 : SDGM tetikleme sinyalleri.

Taşıyıcı ve referans sinyallerinin karşılaştırılması sonucunda S1, S3 ve S5 anahtarlarının sinyalleri üretilmektedir. Bu sinyaller Şekil 4.13’te gösterilmiştir.

Oluşturulan sinyaller, eş zamanlı benzetim yapabilmek için bir S-Fonksiyonu kullanılarak ANSYS-Simplorer’daki evirici devresine iletilmektedir. Modülasyon oranı 0,8’de yapılan benzetim çalışmasını sonucunda oluşan evirici grafikler sırasıyla Şekil 4.14’te çıkış akım grafiği, Şekil 4.15’te çıkış voltaj grafiği ve Şekil 4.16’da  $V_a$  fazının harmonik grafiği gösterilmiştir.

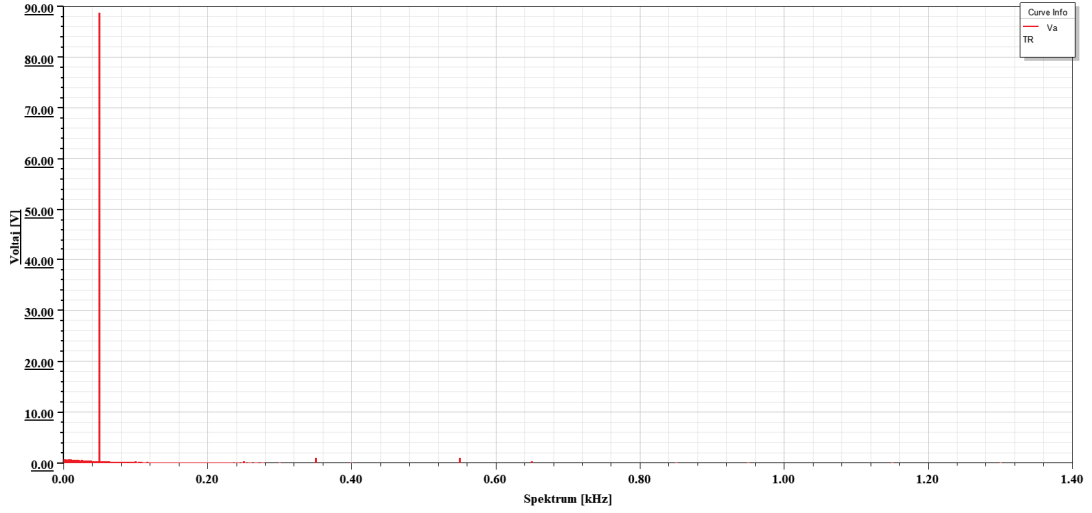


Şekil 4.15 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış akım grafiği.



Şekil 4.14 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış voltaj grafiği.

Evirici çıkış parametrelerinde görüldüğü üzere oluşan dalga şekilleri sinüzoidal forma daha çok benzemekte ve çok daha az dalgalanma olduğu gözükmemektedir. Çıkış dalga formu daha fazla sinüzoidal bir karakter taşıdığından harmonik içeriği daha düşüktür. Şekil 4.16'da gösterilen harmonik grafiğinde ise düşük frekanslı harmonik bozulmalarının azaldığı görülmektedir. Elde edilen grafikte hesaplanan THB ise %6,11'dir.



Şekil 4.16 : SDGM tetiklemeli evirici çıkış harmonik grafiği.

#### SDGM'nin Avantajları:

- Düşük güç tüketimi.
- %90'a kadar yüksek enerji verimliliği.
- Yüksek güç işleme yeteneği.
- Anahtarlama kayıpları daha düşüktür.
- Sıcaklık değişimi veya uzun kullanım nedeniyle çizgisellikte sapma veya bozulma olmaması.
- Uygulaması ve kontrolü kolay.
- Günümüz dijital mikrodenetleyicileri ile uyumlu.

#### SDGM'nin Dezavantajları:

- Dalga formunun istenilen temel bileşenin zayıflaması.
- İlgili anahtar cihazlarına daha büyük stres uygulayan ve bu nedenle bu cihazların güç kaybına neden olan büyük anahtarlama frekansta artış.
- Yüksek frekansta harmonik bileşenlerin üretilmesi.

### 4.3 Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu Tekniği

Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu tekniği, diğer DGM tekniklerinden oldukça farklı bir tekniktir. Sayısal işlemenin kolaylığı ve esnekliği nedeniyle, mikroişlemcilerin gelişmesiyle üç fazlı sistemlerde oldukça yaygınlaşmıştır. Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu tekniğinin temel fikri şöyledir: İdeal çıkışı referans olarak alarak, AA motoru veya herhangi üç fazlı sinüs dalga gerilimi ile beslendiğinde, her fazın dalga formunu birbirinden bağımsız olarak oluşturabilmektedir. Bu durumda evirici, Şekil 4.17’de verildiği gibi sekiz anahtarlı durumum modunda sürülebilmektedir. Tipik bir üç fazlı voltaj kaynaklı evirici devre modeli Şekil 4.1’de gösterilmiştir. S1’den S6’ya kadar olan altı güç anahtarı, çıkışı şekillendiren ve a, a’, b, b’, c ve c’ anahtarlama değişkenleri tarafından kontrol edilmektedir. Bir üst IGBT açık olduğunda, yani a, b veya c 1 olduğunda, karşılık gelen alt transistör kapanır, yani karşılık gelen a’, b’ veya c’ 0’dır. Bu nedenle, üst transistörlerin S1, S3 ve S5’in açık veya kapalı durumları, çıkış voltajını belirlemek için kullanılabilir (Baqheetha ve diğerleri, 2017). Denklem 4.4, anahtarlama vektörleri  $[a \ b \ c]^T$  ile faz-faz arası voltaj  $[V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ac}]^T$  vektörünün ilişkisini vermektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ac} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

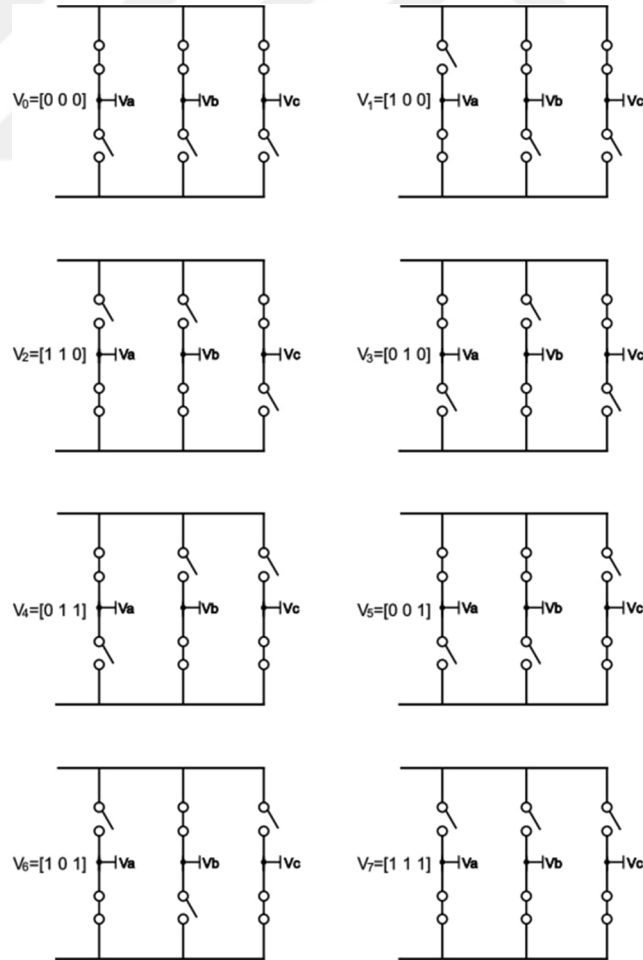
Denklem 4.5, anahtarlama vektörleri  $[a \ b \ c]^T$  ile faz-nötr voltajı  $[V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T$  vektörü arasındaki ilişkiyi vermektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, üç üst güç anahtarı için açık ve kapalı desenlerin sekiz olası kombinasyonu bulunmaktadır. Alt güç cihazlarının açık ve kapalı durumları, üst cihazların durumları belirlendikten sonra kolayca belirlenmektedir, çünkü üst güç anahtarlarının durumlarına zıttır. Denklemler 4.4 ve 4.5’e göre, sekiz anahtar vektörü, DA-hat  $V_{dc}$  açısından verilen Çizelge 4.3 ve Şekil 4.17’de sekiz evirici voltaj vektörünü ( $V_0$ ’dan  $V_7$ ’ye) ve çıkış hattından nötr voltajı (faz voltajı) ve DA-hat  $V_{dc}$  açısından çıkış hatlarını göstermektedir.

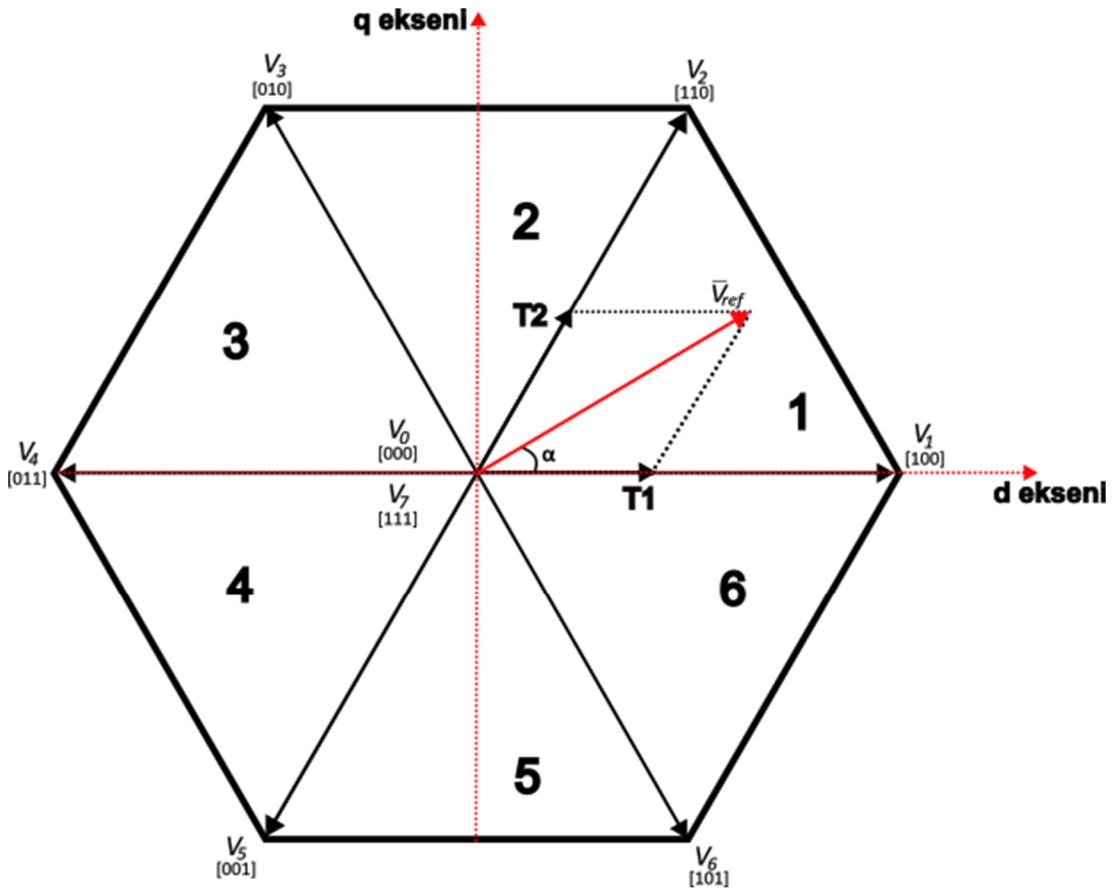
**Çizelge 4.3 :** İki seviye evirci anahtarlama vektörü ve voltaj vektörleri.

Voltaj Vektörü	Ahahtarlama Vektörü			Faz-Nötr Voltaj			Faz-Faz Voltaj		
	a	b	c	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ac}$
$V_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
$V_2$	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
$V_3$	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
$V_4$	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
$V_5$	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
$V_6$	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
$V_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0



**Şekil 4.17 :** Evirci gerilim vektörleri ( $V_0$ - $V_7$ )

Sekiz anahtarlama deseni, kombinasyonuna karşılık gelen çizgiye nötr gerilimleri veya üç fazlı gerilimler, d-q (Clarke) dönüşümü ile dönüştürülerek d-q düzlemine eşlenir. Bu, altı sıfır olmayan vektör ve iki sıfır'a eşit vektör vermektedir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, Altı sıfır olmayan vektör ( $V_1 - V_6$ ), altıgenin ekseni boyunca ve yüke elektriksel güç sağlamaktadır. Her iki ardışık iki sıfır vektör arasındaki açı 60 derecedir. Aynı zamanda, iki sıfır vektör ( $V_0$  ve  $V_7$ ) orijinde bulunur ve yüke sıfır gerilim uygular. Bu sekiz vektör temel uzay vektörleri olarak adlandırılır ve  $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$  ile gösterilir.



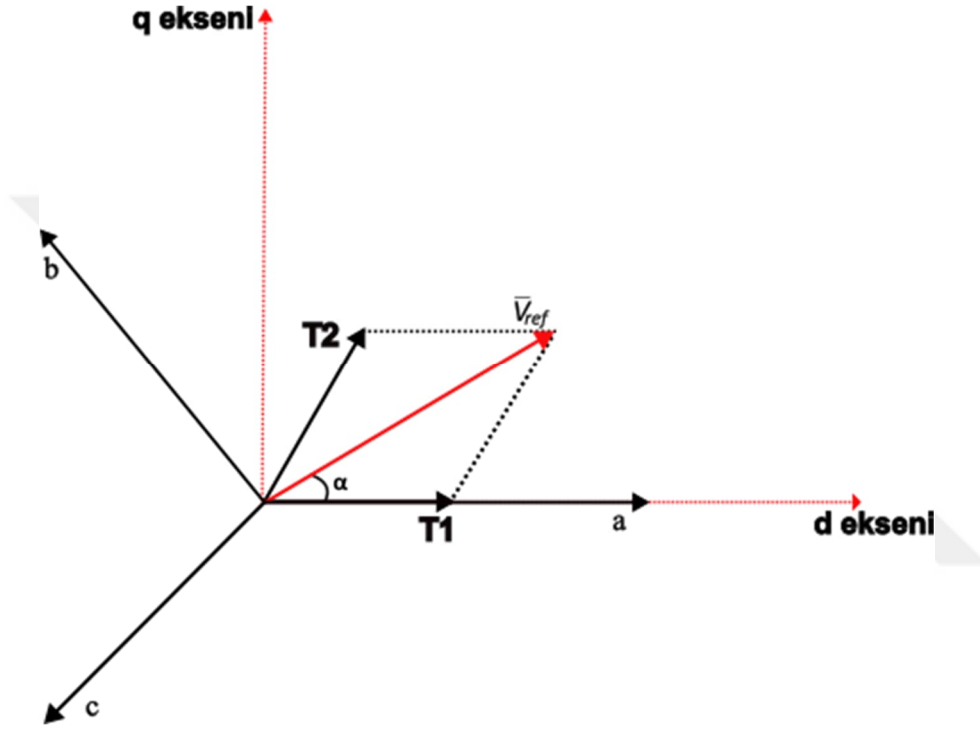
Şekil 4.18 : İki seviye evirici için uzay vektör vektörleri

Aynı dönüşüm, istenen çıkış gerilimine uygulanarak d-q düzleminde istenen referans gerilim vektörü  $V_{ref}$  elde edilebilir. Uzay vektör DGM tekniğinin amacı, sekiz anahtarlama desenini kullanarak referans gerilim vektörü  $V_{ref}$  e yaklaştırmaktır. Bir yaklaştırma yöntemi, eviricinin küçük bir periyot içindeki ortalama çıkışını, aynı periyotta  $V_{ref}$  uyumlu hale getirmektedir.

Uzay vektör DGM tekniği aşağıdaki adımlar kullanılarak uygulanmaktadır:

1. Adım: Clarke dönüşümü kullanılarak  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $V_{ref}$  ve  $\theta$  hesaplanır.
2. Adım:  $V_{ref}$ 'in sektör'ü belirlenir.
3. Adım:  $T_0, T_1, T_2$  anahtarlama süreleri hesaplanır.
4. Adım: Anahtarlama sinyalleri ve gerilim üretilir.

1.Adım:



Şekil 4.19 : Clarke dönüşümü.

Şekil 4.19'da d-q düzleminde  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  vektörlerini göstermektedir. Bu referans gerilimlerini d-q vektörlerini bulmak için kullanılabilir.  $V_d$  vektörü için Denklem 4.6 ve  $V_q$  için Denklem 4.7 i yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_d &= V_{an} - V_{bn} \cos 60 - V_{cn} \cos 60 \\ &= V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$V_q = 0 + V_{bn} \cos 30 - V_{cn} \cos 30 \quad (4.7)$$

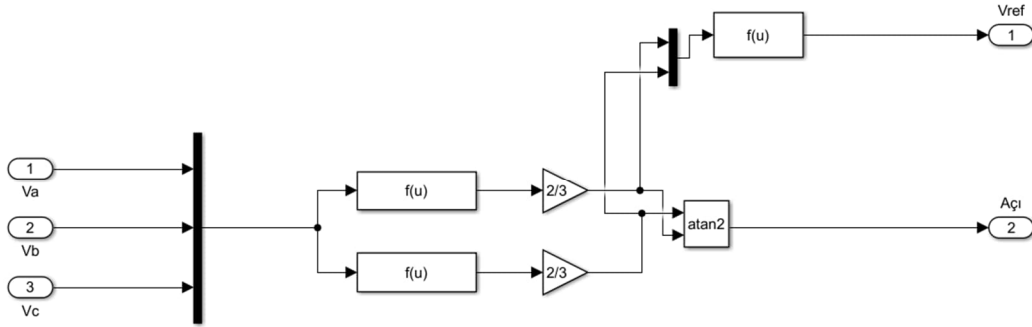
$$= Van + \frac{\sqrt{3}}{2}Vbn - \frac{\sqrt{3}}{2}Vcn$$

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$|V_{ref}| = \sqrt{Vd^2 + Vq^2} \quad (4.9)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{Vq}{Vd} \right) = \omega t = 2\pi ft \quad (4.10)$$

Bu denklemleri kullanarak Simulink ortamında tasarlanan Clarke dönüşüm bloğu Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



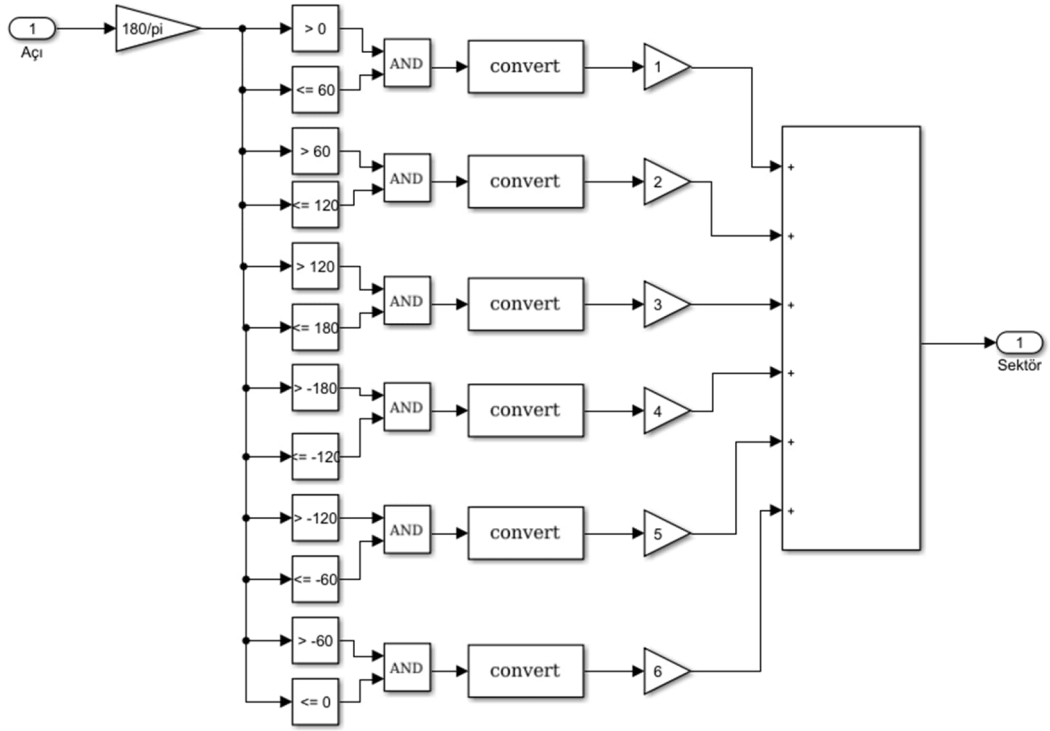
Şekil 4.20 : Simulink clarke dönüşümü bloğu.

2.Adım:

Referans gerilim vektörünün Şekil 4.18’de gösterilen hangi sektörde olduğunu bulmak için  $\alpha$  açısına bakılmaktadır. Açılı değerine göre  $V_{ref}$  referans vektörünün hangi sektörde yer aldığı Çizelge 4.4’te gösterilmiştir. Şekil 4.21’de ise Simulink blok diyagramı gösterilmiştir.

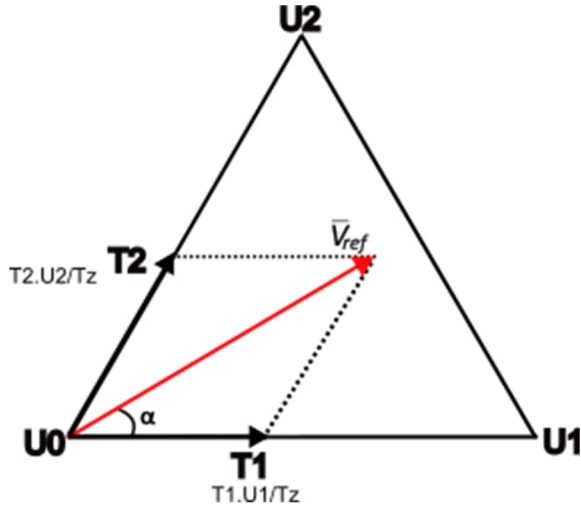
**Çizelge 4.4 :** Aç1-Sektör dönüşüm çizelgesi

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



**şekil 4.21 :** Aç1-Sektör dönüşüm bloğu.

3. Adım:



Şekil 4.22 : Sektör 1 için uzay vektörü

Şekil 4.22’de verilen uzay vektörde sektör 1 için  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  süreleri hesaplanmaktadır.

$$\int_0^{T_z} \overline{V_{ref}} dt = \int_0^{T_1} \overline{U_1} dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \overline{U_2} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \overline{U_0} dt \quad (4.11)$$

$$T_z \overline{V_{ref}} = (T_2 \overline{U_1} + T_2 \overline{U_2}) \quad (4.12)$$

$$T_z |V_{ref}| \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$  için

$$T_1 = T_z \cdot k \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)}$$

$$T_2 = T_z \cdot k \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)}$$

$$T_0 = T_z - T_1 + T_2 ; \quad T_z = \frac{1}{f_r} \quad \text{ve} \quad k = \frac{|V_{ref}|}{\frac{2}{3} V_{dc}}$$

T0, T1 ve T2 sürelerini herhangi sektörler için çözümü Denklem 4.14 ve 4.15'te gösterilmiştir.

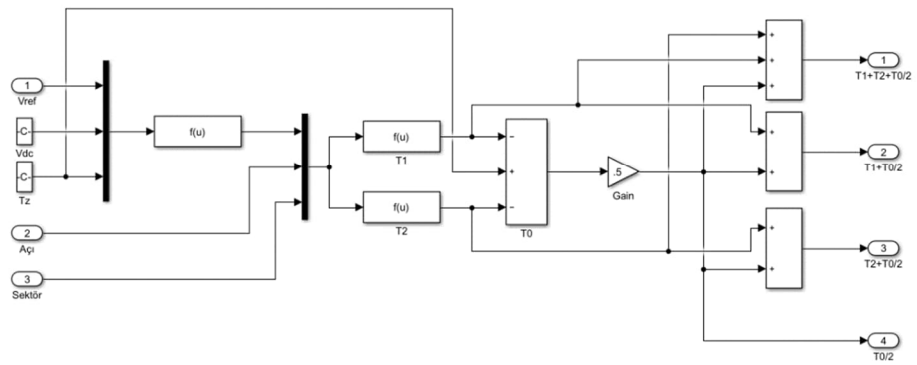
$$T1 = \frac{\sqrt{3}.Tz.|\overline{Vref}|}{Vdc} \left\{ \sin \left( \frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right\}$$

$$= \frac{\sqrt{3}.Tz.|\overline{Vref}|}{Vdc} \left\{ \sin \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \sin \alpha \right\} \quad (4.14)$$

$$T2 = \frac{\sqrt{3}.Tz.|\overline{Vref}|}{Vdc} \left\{ \sin \left( \alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right\}$$

$$= \frac{\sqrt{3}.Tz.|\overline{Vref}|}{Vdc} \left\{ -\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi + \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right\} \quad (4.15)$$

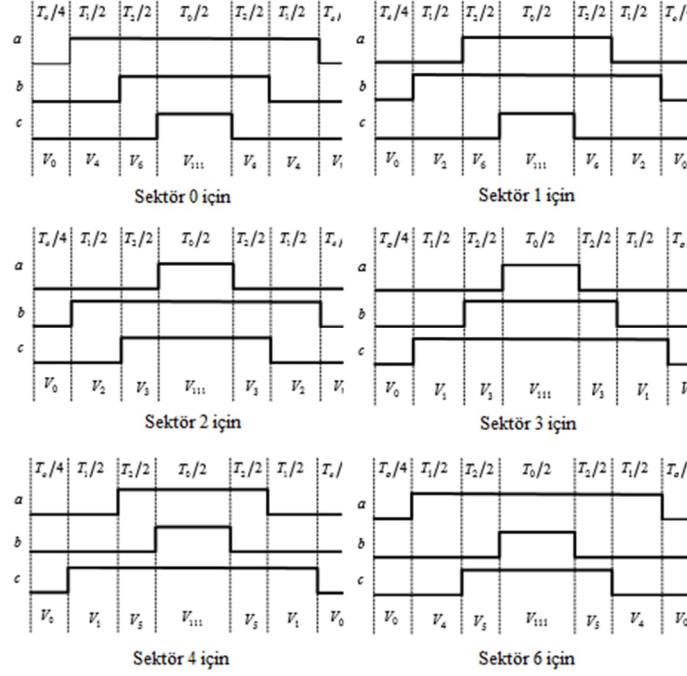
T0, T1 ve T2 sürelerinin Simulink ortamında hesaplanması Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : T0,T1 ve T2 hesaplaması.

4. Adım:

Anahtarlama sırasını (S1-S6) herhangi bir sektöre düşen gerilimin dizilimini Şekil 4.24'te göstermektedir. Bu şekilden çıkarılan anahtarlama çizelgesi ise Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

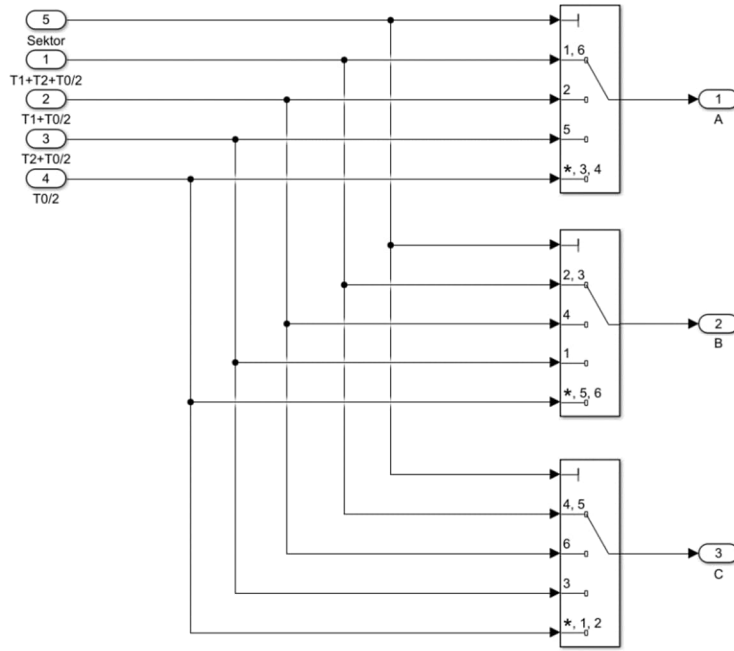


Şekil 4.24 : Tüm sektörler için anahtarlama grafiği (Baqheetha ve diğerleri, 2017).

Çizelge 4.5 : Herhangi bir sektörde anahtarlama zamanları (Baqheetha ve diğerleri, 2017).

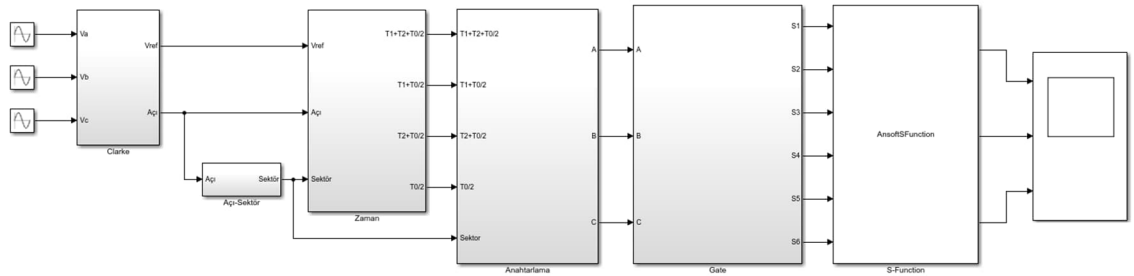
Sektör	Üst Anahtarlar (S1,S3,S5)	Alt Anahtarlar(S2,S4,S6)
1	$S1=T1+T2+T0/2$	$S4=T0/2$
	$S3=T2+T0/2$	$S6=T1+T0/2$
	$S5=T0/2$	$S2=T1+T2+T0/2$
	$S1=T1+T0/2$	$S4=T2+T0/2$
2	$S3=T1+T2+T0/2$	$S6=T0/2$
	$S5=T0/2$	$S2=T1+T2+T0/2$
	$S1=T0/2$	$S4=T1+T2+T0/2$
	$S3=T1+T2+T0/2$	$S6=T0/2$
3	$S5=T2+T0/2$	$S2=T1+T0/2$
	$S1=T0/2$	$S4=T1+T2+T0/2$
	$S3=T1+T2+T0/2$	$S6=T0/2$
	$S5=T2+T0/2$	$S2=T1+T0/2$
4	$S1=T0/2$	$S4=T1+T2+T0/2$
	$S3=T1+T0/2$	$S6=T2+T0/2$
	$S5=T1+T2+T0/2$	$S2=T0/2$
	$S1=T2+T0/2$	$S4=T0/2$
5	$S3=T0/2$	$S6=T1+T0/2$
	$S5=T1+T2+T0/2$	$S2=T1+T2+T0/2$
	$S1=T1+T2+T0/2$	$S4=T0/2$
	$S3=T0/2$	$S6=T1+T2+T0/2$
6	$S5=T1+T0/2$	$S2=T2+T0/2$

Şekil 4.25'te ise Simulink üzerindeki anahtarlama bloğu gösterilmiştir.



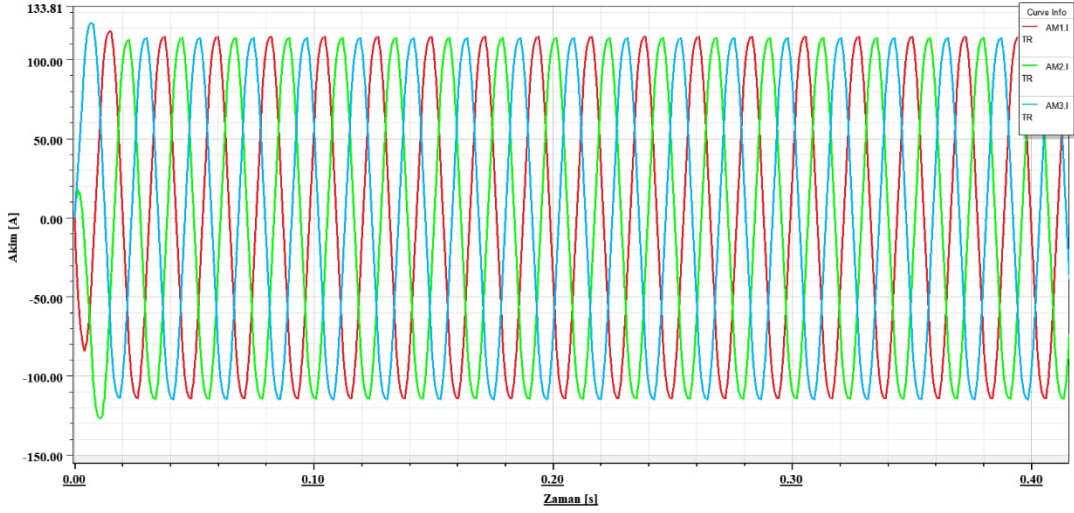
Şekil 4.25 : UVDGM anahtarlama bloğu.

Genel UVDGM sinyal üretici blok diyagramı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



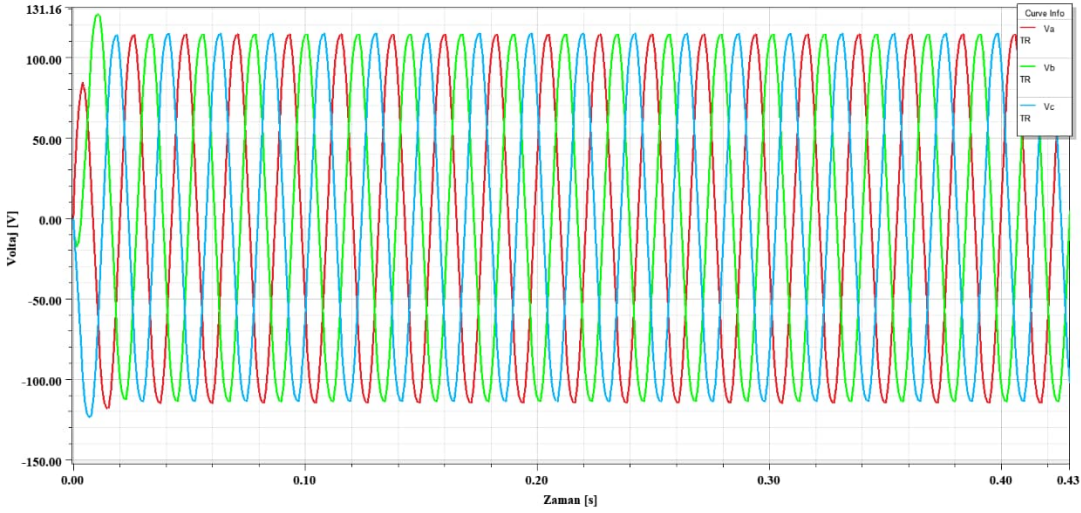
Şekil 4.26 : Simulink ortamında Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu üretimi.

Eş zamanlı benzetim yapılabilmesi için Simulink şemasına S-Fonksiyon bloğu da eklenmiştir. Bu S-Fonksiyon bloğu, Şekil 4.1'deki Simplorer'daki evirici devresini kontrol etmektedir. Modülasyon oranı 0,8'de yapılan benzetim çalışmasında ortaya çıkan akım grafiği Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : UVDGM tetiklemeli evirici çıkış akım grafiği.

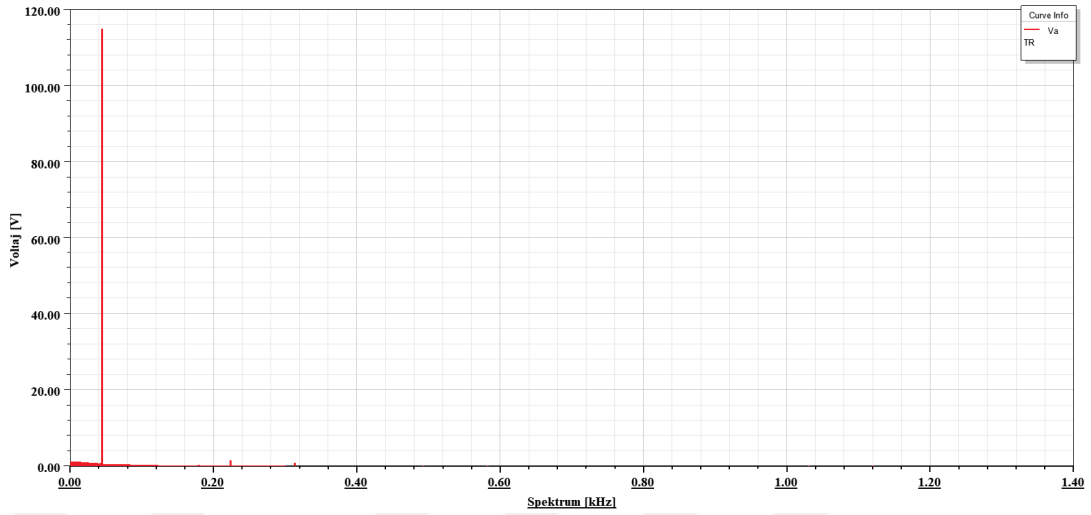
Şekil’de görüldüğü gibi, oluşan akım dalgası, referans sinüs dalgasına benzemektedir. Şekil 4.28’de ise çıkış voltaj grafiği verilmiştir.



Şekil 4.28 : UVDGM tetiklemeli evirici çıkış voltaj grafiği.

Şekil 4.28’de verilen voltaj grafiği de referans sinüs sinyallerine ve akım grafiğine benzemektedir. Diğer anahtarlama teknikleri ile karşılaştırıldığında ise aynı evirici devresinde  $V_{dc}$  gerilimini verimli bir şekilde kullandığı görülmektedir.

Şekil 4.29'da ise UVDGM tetiklemeli evirici devresinin  $V_a$  fazının harmonik grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.29 : UVDGM tetiklemeli evirici devresi harmonik grafiği.

Grafikte görüldüğü üzere düşük frekanslı harmoniklerin genliği azalmaktadır. Grafikten elde edilen verilerle UVDGM tetiklemeli evirici devresinin THB'si %5,82 olarak hesaplanmıştır.

UVDGM'nin Avantajları:

- UVDGM, daha yüksek verimlilik sağlamaktadır, çünkü ideal akış yolu referans alınarak sabit bir genlikte dairesel manyetik alan elde edilmektedir.
- Daha düşük harmonik bozulma.
- SDGM tekniğine göre daha yüksek DA gerilim kullanımı sağlar.
- Yüksek performans elde etmek için seçilen iki komşu etkili vektör ve sıfır vektörü kullanarak uzay vektörü oluşturmaktadır.
- Hızlı ve dinamik bir yanıt sağlamaktadır, bu sayede tork gerektiren uygulamalara uygunluk göstermektedir.

UVDGM'nin Dezavantajları:

- Diğer modülasyon tekniklerine kıyasla daha karmaşık bir algoritma ve matematiksel hesaplama gerekmektedir.
- Uygulama maliyeti genellikle daha yüksektir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında evirici tasarımı ve anahtarlama tekniklerinin eş zamanlı benzetim ile karşılaştırılması yapılmıştır. Literatür araştırması, birçok tipte evirici topolojisinin bulunduğunu ve bu eviricilerin üç farklı anahtarlama tekniği ile sürülmesinin daha çok çalışıldığını göstermektedir. Yapılan bu benzetim çalışmalarında, bilgisayar destekli farklı yazılımlar kullanılmıştır. Ancak, her yazılımın avantajı ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için çalışmalar eş zamanlı benzetim yöntemi ile benzetim yapılmaktadır. Bu tezde, benzetimi yapılmak üzere iki seviyeli üç fazlı evirici tasarımı ANSYS-Simplorer yazılımı üzerinde tasarlanmıştır. Karşılaştırmak için Darbe Genişliği Modülasyonu, Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu ve Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ise MATLAB-Simulink yazılımında tasarlanmış ve eş zamanlı benzetimi gerçekleştirilmiştir. MATLAB-Simulink ortamında daha detaylı kontrol algoritmaları tasarlanabilmektedir. Ancak, aynı oranda devre tasarımı ve detaylı devre analizi yapılamamaktadır. Eş zamanlı benzetim kullanarak devre analizi kısmını ANSYS-Simplorer yazılımına yaptırılabilir. Her iki yazılımın dezavantajları da ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Yapılan tüm benzetim çalışmaları, Şekil 4.1'de gösterilen Simplorer üzerinde tasarlanan evirici devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Referans frekansı ( $f_r$ ) 50 Hz, Taşıyıcı frekansı ( $f_c$ ) 10 kHz'de ve modülasyon oranı 0,8'de yapılan benzetimlerin THB karşılaştırması, Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Kontrol tekniklerine göre THB değerlerinin karşılaştırılması.

DGM	SDGM	UVDGM
%8,67	%6,11	%5,82

180 derece iletim tekniği ile anahtarlama yapılan darbe genişliği modülasyonunda çıkış frekansı 50 Hz olarak elde edilmektedir. Evirici ıkış akım grafiği ve voltaj grafiği kare sinyale benzemektedir, ve THB değeri en yüksek olan anahtarlama tekniğidir. Bu durum özellikle elektrik motorlarında çalışma durumunda ses oluşturmasına ve motorun kullanım ömrünü kısaltmasına neden olmaktadır.

SDGM tekniği ile anahtarlama yapılan evirici devresinde faz voltajı ve akımı değerlerinin daha dūřuk olduğu görülmektedir. ıkış voltajı ve akım grafikleri sinüzoidal referans sinyaline benzemektedir. THB değerleri daha dūřuktur. Bu durum motor üzerinde olumlu etki yapmaktadır ve kullanım ömrünü uzatmaktadır.

UVDGM tekniđi ise evirici devresinin parametreleri diđer tekniklerin arasında bir deđerlere sahiptir. ıkıř voltaj ve akım grafikleri sinüzoidaldir. Çizelge 5.1'de görüldüđü üzere THB deđerleri ise en dūřuk olan anahtarlama tekniđidir.

**Çizelge 5.2 :** Anahtarlama tekniklerine göre RMS akım değerleri.

DGM	SDGM	UVDGM
96A	62A	81A

Çizelge 5.2'de ise anahtarlama tekniklerine göre oluşan tek faz RMS akım değerleri gösterilmektedir. ıkış parametrelerine göre en çok güç transferi DGM anahtarlama tekniği üretmektedir. Fakat oluşan akım ve voltaj grafiği kare biçimindedir ve en yüksek THB oranına sahiptir. İkinci olarak en yüksek güç değerleri UVDGM anahtarlama tekniği üretmektedir. Hem akım hem de voltaj grafiklerinin referans sinyaline benzemesi, dūřuk THB değerleri, ve ayrıca kapalı döngü kullanarak motor çıkış parametrelerinden elde edilen değerleri matematiksel olarak işleme alma gibi avantajları nedeniyle UVDGM anahtarlama tekniğinin bir elektrikli taşıtın evirici devresinde kullanımı önerilmektedir. Matematiksel hesaplanması kolaylığı, günümüz mikroişlemcileri veya FPGA gibi tümleşik entegrelerde kolaylıkla uygulanabilmektedir. Farklı evirici topolojilerine kolaylık uyumluluk gösterebildiği için istenilen güç, tork ve dūřuk THB değerlerini UVDGM anahtarlama tekniği ile elde edilebilmektedir. UVDGM'nin dūřuk harmonik bozulma, yüksek DA gerilim kullanımı ve hızlı-dinamik yanıt gibi avantajlara sahip olduğu görülmüştür. Gelecekteki çalışmalarda, farklı evirici topolojilerinin benzetimi üzerinde daha fazla

odaklanmak, daha karmaşık kontrol stratejilerini incelemek ve benzetim sonuçlarını çeşitlendirmek önemli olacaktır. Ayrıca, tezin bulgularının deneysel doğrulamasıyla elde edilen sonuçların pratik uygulama açısından değeri artırılabilir. Bu çalışmalar, evirici tasarımı ve anahtarlama tekniklerine yönelik daha kapsamlı bir anlayışın geliştirilmesine katkıda bulunabilir.





## 6. KAYNAKLAR

- Ahmed, W. ve Ali, S. M. U. (2013). Comparative study of SVPWM (space vector pulse width modulation) & SPWM (sinusoidal pulse width modulation) based three phase voltage source inverters for variable speed drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 51, 012027. doi:10.1088/1757-899X/51/1/012027
- Apostoaia, C. (2012). Co-Simulation Platform for AC Drives Control Systems. <https://www.researchgate.net/publication/262974139> adresinden erişildi.
- Arranz-Gimon, A., Zorita-Lamadrid, A., Morinigo-Sotelo, D. ve Duque-Perez, O. (2021). A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems. *Energies*, 14(20), 6467. doi:10.3390/en14206467
- Bahrami, M., Mokhtari, H. ve Dindar, A. (2019). Energy regeneration technique for electric vehicles driven by a brushless DC motor. *IET Power Electronics*, 12(13), 3397-3402. doi:10.1049/iet-pel.2019.0024
- Baqheetha Fathima, M. R., P., M. J. P. ve Ram Prasath, S. (2017). Mathematical modeling of SVPWM inverter fed 3 phase induction motor vector control in MATLAB/Simulink environment. *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)* içinde (ss. 1-8). IEEE. doi:10.1109/ICCPCT.2017.8074205
- Bhattacharjee, T., Jamil, M. ve Jana, A. (2018). Design of SPWM based three phase inverter model. *International Conference on Technologies for Smart City Energy Security and Power: Smart Solutions for Smart Cities, ICSESP 2018 - Proceedings, 2018-Janua*, 1-6. doi:10.1109/ICSESP.2018.8376696
- Cai, B., Zhao, Y., Liu, H. ve Xie, M. (2017). A Data-Driven Fault Diagnosis Methodology in Three-Phase Inverters for PMSM Drive Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(7), 5590-5600. doi:10.1109/TPEL.2016.2608842
- Chatterjee, S. (2013). A Multilevel Inverter Based on SVPWM Technique for Photovoltaic Application. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 3(1), 62-73.
- Choi, N. S., Cho, J. G. ve Cho, G. H. (1991). A General Circuit Topology Of Multilevel Inverter.
- Choudhury, Abhijit., Pillay, Pragasen. ve Williamson, S. S. (2014). Comparative Analysis Between Two-Level and Three-Level DC/AC Electric Vehicle Traction Inverters Using a Novel DC-Link Voltage Balancing Algorithm. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), 529-540. doi:10.1109/jestpe.2014.2310140
- Dahidah, M. S. A. ve Agelidis, V. G. (2008). Single-carrier sinusoidal PWM-equivalent selective harmonic elimination for a five-level voltage source converter. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1826-1836. doi:10.1016/j.epsr.2008.01.021

- De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekegård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R. ve Leijon, M. (2012). Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(2), 475-484. doi:10.1109/TVT.2011.2177873
- Demir E.. (2020). Matlab/Simulink Kullanılarak Darbe Genişlik Modülasyonu Tekniği İle Tek Fazlı Evirici Kontrolü.
- Di Leonardo, L., Popescu, M., Tursini, M. ve Villani, M. (2019). Finite Elements Model Co-Simulation of an Induction Motor Drive for Traction Application. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* içinde (ss. 1059-1065). IEEE. doi:10.1109/IECON.2019.8926853
- Ed-dahmani, C., Mahmoudi, H. ve Elazzaoui, M. (2016). Direct torque control of permanent magnet synchronous motors in MATLAB/SIMULINK. *2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)* içinde (ss. 452-457). IEEE. doi:10.1109/EITech.2016.7519641
- Fitzgerald, A. E. (Arthur E., Kingsley, C. ve Umans, S. D. (2003). *Electric machinery*. McGraw-Hill.
- Hang, B., Wang, Q., Xie, F. ve Shi, L. (2016). Co-simulation of field oriented control in induction motor drive system. *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* içinde (ss. 1955-1958). IEEE. doi:10.1109/ICIEA.2016.7603908
- Hughes, A. ve Drury, B. (2019). *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications*.
- Ismail, B., Taib, S., Saad, A. R. M., Isa, M. ve Hadzer, C. M. (2006). Development of a single phase SPWM microcontroller-based inverter. *First International Power and Energy Conference, (PECon 2006) Proceedings, 00*, 437-440. doi:10.1109/PECON.2006.346691
- Jain, K. ve Chaturvedi, P. (2012). Matlab-based Simulation & Analysis of Three-level SPWM Inverter. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*.
- Kelly, J. W., Strangas, E. G. ve Miller, J. M. (2001). Multi-phase inverter analysis. *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485)* içinde (ss. 147-155). IEEE. doi:10.1109/IEMDC.2001.939290
- Knorr, U. ve Juchem, R. (2003). A Complete Co-Simulation-Based Design Environment for Electric and Hybrid-Electric Vehicles, Fuel-Cell Systems, and Drive Trains. doi:10.4271/2003-01-1140
- Kopfer, H. W., Schönberger, J. ve Kopfer, H. (2014). Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1-2), 221-248. doi:10.1007/s10696-013-9180-9
- Krishna R, A. ve Suresh, L. P. (2016). A brief review on multi level inverter topologies. *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)* içinde (ss. 1-6). IEEE. doi:10.1109/ICCPCT.2016.7530373
- Kumar, K. V., Michael, A., John, J. P. ve Suresh Kumar, S. (2010). Simulation and comparison of spwm and svpwm control for three phase inverter (C. 5). www.arpnjournals.com adresinden erişildi.
- Macahig, N. A. (2020). A 6-Wire 3-Phase Inverter Topology for Improved BLDC Performance and Harmonics.
- Majhi, B. (2012). Analysis of Single-Phase SPWM Inverter.

- Mersha, T. K. ve Du, C. (2021). Co-Simulation and Modeling of PMSM Based on Ansys Software and Simulink for EVs. *World Electric Vehicle Journal*, 13(1), 4. doi:10.3390/wevj13010004
- Onambele, C., Mpanda, A., Elsied, M. ve Giacchetti, F. (2017). Co-simulation modeling of high performance motor-drive systems for aerospace applications. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)* içinde (ss. 1-6). IEEE. doi:10.1109/IEMDC.2017.8002167
- Pharne, I. D. ve Bhosale, Y. N. (2013). A review on multilevel inverter topology. *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)* içinde (ss. 700-703). IEEE. doi:10.1109/ICPEC.2013.6527746
- Polat, U. (2022). Compensation Of Dead Time Caused Output Voltage Distortion In Spwm Full Bridge Inverter.
- Pradeep, J. ve Devanathan, R. (2012). Comparative analysis and simulation of PWM and SVPWM inverter fed permanent magnet synchronous motor. *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)* içinde (ss. 299-305). IEEE. doi:10.1109/ICETEEEM.2012.6494517
- Qingrong Zeng ve Liuchen Chang. (2008). An Advanced SVPWM-Based Predictive Current Controller for Three-Phase Inverters in Distributed Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3), 1235-1246. doi:10.1109/TIE.2007.907674
- Quntal, R. (2019). Modelling and Co-Simulation of Small Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(10), 210-215. doi:10.15199/48.2019.10.45
- Rahim, N. A., Chaniago, K. ve Selvaraj, J. (2011). Single-Phase Seven-Level Grid-Connected Inverter for Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(6), 2435-2443. doi:10.1109/TIE.2010.2064278
- Rashid, M. H. (2004). *Power Electronics Devices, Circuits, And Applications Fourth Edition* (4th Edition.). Pearson Education.
- Rihar, A., Zajec, P. ve Voncina, D. (2017). Cosimulation of ansys simplorer and MATLAB/Simulink. *2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)* içinde (ss. 313-317). IEEE. doi:10.1109/EDPE.2017.8123222
- Ruman, Md. R., Paul, D., Barua, A., Sarker, A. K., Iqbal, A. ve Barua, S. (2019). Design and Implementation of SPWM Inverter. *2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)* içinde (ss. 490-494). IEEE. doi:10.1109/ICCCIS48478.2019.8974542
- Sabarad, J. ve Kulkarni, G. H. (2015). Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter. *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)* içinde (ss. 232-237). IEEE. doi:10.1109/ICPACE.2015.7274949
- Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:10.1016/j.rser.2009.10.018
- Schulte, C. ve Bocker, J. (2013). Co-simulation of an electric traction drive. *2013 International Electric Machines & Drives Conference* içinde (ss. 974-978). IEEE. doi:10.1109/IEMDC.2013.6556215
- Singh, S. ve Tiwari, A. N. (2017). Analysis and simulation of vector controlled PMSM drive using SVPWM inverter. *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* içinde (ss. 709-714). IEEE. doi:10.1109/I2CT.2017.8226221

- Sun, X., Hu, C., Zhu, J., Wang, S., Zhou, W., Yang, Z., ... Guo, Y. (2019). MPTC for PMSMs of EVs with Multi-Motor Driven System Considering Optimal Energy Allocation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(7). doi:10.1109/TMAG.2019.2904289
- Taniguchi, K. (1988). PWM Technique for Power MOSFET Inverter. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS* (C. 3).
- Tolbert, L. M., Peng, F. Z. ve Habetler, T. G. (1998). Multilevel inverters for electric vehicle applications. *Power Electronics in Transportation (Cat. No.98TH8349)* içinde (ss. 79-84). IEEE. doi:10.1109/PET.1998.731062
- Türe, H., Balcı, S., Sabancı, K. Ve Aslan, M. F. (2021). Sensorless current prediction in single phase inverter circuits with machine learning algorithms. *Journal of Energy Systems*, 5(3), 221-230. doi:10.30521/jes.932581
- Vadhiraj, S., Swamy, K. N. ve Divakar, B. P. (2013). Generic SPWM technique for multilevel inverter. *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* içinde (ss. 1-5). IEEE. doi:10.1109/APPEEC.2013.6837117
- YingYing, J., XuDong, W., LiangLiang, M., ShuCai, Y. ve HaiXing, Z. (2011). *Application and Simulation of SVPWM in three phase inverter.*
- Zheng Peng, F. ve Member, S. (2001). *A Generalized Multilevel Inverter Topology with Self Voltage Balancing.* *IEEE Transactions On Industry Applications* (C. 37).
- Zhigang Sun, Jiabin Wang, Jewell, G. W. ve Howe, D. (2010). Enhanced Optimal Torque Control of Fault-Tolerant PM Machine Under Flux-Weakening Operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1), 344-353. doi:10.1109/TIE.2009.2029517