T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ SİNÜZOİDAL DARBE GENİŞLİK İLE UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim ARSLANOĞLU

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Bilgin ZENGİN

TUNCELİ – 2019

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ SİNÜZOİDAL DARBE GENİŞLİK İLE UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İbrahim ARSLANOĞLU
(142103104)

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Bilgin ZENGİN

TUNCELİ – 2019

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ SİNÜZOİDAL DARBE GENİŞLİK İLE UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

İbrahim ARSLANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 25 / 01 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....	**İmza:.....**	**İmza:.....**
Dr. Öğr. Üyesi Bilgin ZENGİN (Munzur Üniversitesi)	Prof. Dr. Sinan AKPINAR (Fırat Üniversitesi)	Dr. Öğr. Üyesi Düzgün AKMAZ (Munzur Üniversitesi)
DANIŞMAN	**ÜYE**	**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"'ndaki hükümlere tabid

ÖZET

Alternatif akım, günümüzde birçok sistemde ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden doğru akım giriş gerilimin istenilen genlikte ve frekansta simetrik bir alternatif akım çıkış gerilimine dönüştürülmesi istenmektedir. Bu dönüşümü gerçekleştiren devrelere eviriciler denir. Eviricilerin yüksek güç uygulamalarında anahtarlama kayıplarının artmasından dolayı çok seviyeli evirici olarak adlandırılan devre yapıları ortaya çıkmıştır. Çok seviyeli evirici devreleri, çıkış gerilimi daha az bozunuma uğramış, düşük anahtarlama frekanslı ve yüksek verimli olarak karşımıza çıkmaktadır. Evirici devre yapılarında meydana gelen bu gelişimlerle beraber evirici çıkışındaki gerilim ve frekansın kontrolüne ilişkin de birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde çeşitli darbe genişlik modülasyon teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler içerisinde en çok kullanılan tekniklerin başında Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon tekniği ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon tekniği gelmektedir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak eviriciler ve çok seviyeli eviriciler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ardından darbe genişlik modülasyon teknikleri hakkında genel bilgiler verilerek Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon tekniği ile Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon tekniği ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Son olarak da şebekeden bağımsız iki seviyeli Sinüzoidal Darbe Genişlik ile üç seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon yöntemlerinin R ve R-L yüklü bir evirici devresi üzerindeki benzetimlerinin kıyası yapılarak darbe genişlik modülasyon yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eviriciler, Çok Seviyeli Eviriciler, Harmonikler, Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu, Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

ABSTRACT

Comparative Performance Analysis of Network Independent Sinusoidal Pulse Width and Space Vector Pulse Width Modulation

Alternating current is widely used in many systems and industrial applications. It is therefore desirable to convert the direct current input voltage to a symmetrical alternating current output voltage at the desired amplitude and frequency. The circuits that perform this transformation are called inverters. Due to the increase of switching losses in high power applications of inverters, circuit structures called multi-level inverters have emerged. Multi-level inverter circuits, low output voltage is less degraded, low switching frequency and high-efficiency emerges. In addition to these developments occurring in inverter circuit structures, many studies have been done regarding the control of voltage and frequency at the inverter output. As a result of these studies, various pulse width modulation techniques have been developed. Sinusoidal Pulse Width Modulation technique and Space Vector Pulse Width Modulation technique are among the most commonly used techniques in these techniques.

In this thesis, firstly general information about inverters and multi-level inverters is given. Then, general information about pulse width modulation techniques is given and the Space Vector Pulse Width Modulation technique is explained in detail with Sinusoidal Pulse Width Modulation technique. Finally, two-level sinusoidal pulse width independent of the network and three-level Space Vector Pulse Width Modulation methods on an inverter circuit with R and R-L are applied to simulate the advantages and disadvantages of pulse width modulation methods.

Key Words: Inverters, Multi-Level Inverters, Harmonics, Sinusoidal Pulse Width Modulation, Space Vector Pulse Width Modulation

TEŞEKKÜRLER

Yüksek Lisans eğitimimi tamamlamamda engin anlayış ve babacan yaklaşımı sayesinde çalışma aşkımı körükleyen, tavsiyeleri ve yönlendirmeleri ile çalışmamı kolaylaştırmada kilit vazifesi gören, kendisini tanıma bahtiyarlığına erdiğim için çok mutlu olduğum ve kendisini bir ömür hayırla yad edeceğim Saygıdeğer Tez Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Bilgin ZENGİN Hocama sonsuz şükranlarımı arz ediyorum.

Tecrübeleri ve yol göstericiliği ile bana yön veren, rehberliği sayesinde çalışmamın oluşturulmasında büyük pay sahibi olan ve çalışmamın her aşamasında yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen Saygıdeğer Dr. Öğr. Üyesi Düzgün AKMAZ Hocama da sonsuz şükranlarımı arz ediyorum.

Bu süreçte bir Arkadaş, bir Dost ve bir Kardeş olma seviyesine gelen ilişkimizle bir ömür bu muhabbettimizin sürmesini dilediğim Sevgili Kardeşim Fırat Üniversitesi Arş. Gör. Ufuk KAYA'ya ve Munzur Üniversitesinde görevli Uzm. Uğur YILDIZ'a da Teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, Nevşehir Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Kocalmış Bilhan Hocama da desteklerinden ötürü Teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatım ve eğitim sürecim boyunca bana olan desteklerini esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan, ilgileri ve dualarıyla her zaman arkamda duran Annem-Babam'a da sonsuz minnettarlığımı sunuyorum.

Bununla beraber beni karşılıksız seven ve desteklerini her zaman hissettiğim tüm Aileme efradıma ve Sevgili Eşime de sonsuz Teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmasını sevgili oğlum *Muhammed Taha*'ya ithaf ediyorum.

İbrahim ARSLANOĞLU

TUNCELİ - 2019

İÇİNDEKİLER **Sayfa No**

ÖZET…….. II
ABSTRACT..……. III
TEŞEKKÜRLER…..…….. IV
İÇİNDEKİLER…….. V
ŞEKİLLER LİSTESİ..…….. VII
TABLOLAR LİSTESİ…….. X
SEMBOLLER LİSTESİ…..…….. XI
KISALTMALAR LİSTESİ……... XII
1.GİRİŞ……... 1
1.1. Tezin Amacı……..... 1
1.2. Tezin İçeriği……..... 2
2. MATERYAL ve METOT…..……... 3
2.1. Giriş……..... 3
2.2. Eviriciler……. 3
2.3. Gerilim Kaynaklı Eviriciler……..……..... 4
2.3.1. Tek Fazlı İki Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici ……..……..... 5
2.3.2. Tek Fazlı Üç Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici ……..……..... 6
2.4. Akım Kaynaklı Eviriciler ……..…….. 8
2.5. Çok Seviyeli Eviriciler……..... 9
2.5.1. Diyot Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler ……..... 10
2.5.2. Kapasite Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler ……..... 12
2.5.3. Kaskat Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler ……..... 13
2.5.4. Çok Seviyeli Evirici Yapılarının Kıyaslanması..……..... 16
2.6. Harmonikler ve Standartları……..... 17
2.6.1. Harmonik Tanımı ……..... 17
2.6.2. Toplam Harmonik Bozulum ……..... 18
2.6.3. Harmonik Standartlar ……..... 19
2.6.4. Türkiye'de ve Dünyada Kullanılan Harmonik Standartlar 19
2.7. Darbe Genişlik Modülasyon Teknikleri……..…..…..... 20
2.7.1. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu……... 21
2.7.2. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu…...…...…… 24
2.7.2.1. İki Seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği……..… 26
2.7.2.2. Üç Seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği …..….. 35
2.7.3. Üç Seviyeli SDGM ile UVDGM'nin Karşılaştırılması 44
2.7.4. Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyonu……... 45
2.7.5. Minimum Akım Dalgalanmalı Darbe Genişlik Modülasyonu……... 47
2.7.6. Üçüncü Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu ……..… 49
2.7.7. Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu……..... 50
2.7.8. Değiştirilmiş Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu……. 51
2.7.9. Sigma Delta Darbe Genişlik Modülasyonu……... 51
3. BULGULAR ve TARTIŞMA……...……..…….. 53
3.1. SDGM ve UVDGM Eviricilerinin Benzetimleri……..……. 53
3.2. R / R-L Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricinin Benzetimi……...… 54
3.3. R / R-L Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricinin Benzetimi……..…. 58

3.4. M_i aynı V_{da} Hat Gerilimleri Farklı Olan R Yüklü SDGM ile UVDGM Eviricilerinin Benzetim Sonuçları……. 68
3.4.1. R Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricisinin Benzetim Sonucu ..……...…. 68
3.4.2. R Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricisinin Benzetim Sonucu……...… 71
3.5. M_i aynı V_{da} Hat Gerilimleri Farklı Olan R-L Yüklü SDGM ile UVDGM Eviricilerinin Benzetim Sonuçları ..……..... 74
3.5.1. R-L Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricisinin Benzetim Sonucu..……..... 74
3.5.2. R-L Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricisinin Benzetim Sonucu……..…. 77
4. SONUÇ ve ÖNERİLER……..… 81
5. KAYNAKLAR…….……...…… 84
6. ÖZGEÇMİŞ…….……...…… 89

ŞEKİLLER LİSTESİ Sayfa No

Şekil 2.1: Evirici sistemin temel blok şeması. 3
Şekil 2.2: Gerilim kaynaklı evirici.. 4
Şekil 2.3: Yarım köprü evirici devresi. 5
Şekil 2.4: Yarım köprü evirici devresine ait çıkış dalga şekli. 6
Şekil 2.5: Tam köprü evirici devresi 7
Şekil 2.6: Tam köprü evirici devresine ait çıkış dalga şekli. 7
Şekil 2.7: Üç fazlı akım kaynaklı evirici devresi.. 9
Şekil 2.8: Tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici 11
Şekil 2.9: Tek fazlı 3 seviyeli kapasite kenetlemeli evirici 12
Şekil 2.10: (a), (b), (c) H köprü evirici yapısı ve anahtarlama durumları 14
Şekil 2.11: Üç fazlı üç seviyeli kaskat bağlı evirici. 15
Şekil 2.12: Temel bileşen ve 3., 5., 7., 11. harmonik bileşenler. 18
Şekil 2.13: Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon yönteminin temel prensibi 22
Şekil 2.14: SDGM'de modülasyon indeksine karşılık gelen gerilimin değişimi.. 23
Şekil 2.15: SDGM tekniği ile UVDGM tekniğinin karşılaştırılması 25
Şekil 2.16: Üç fazlı iki seviyeli evirici yapısı. 27
Şekil 2.17: UVDGM'e ait 8 adet çalışma durumu 28
Şekil 2.18: abc ve d-q referans düzlemleri. 29
Şekil 2.19: Anahtarlama vektörleri ve anahtarlama bölgeleri 31
Şekil 2.20: Gerilim uzay vektörü ve bileşenleri 32
Şekil 2.21: İki seviyeli eviricinin anahtarlama bölgeleri 33
Şekil 2.22: Sektör A için anahtarlama durumları ve konum süreleri. 35
Şekil 2.23: Üç fazlı üç seviyeli eviricinin uzay vektör diyagramı 37
Şekil 2.24: Sektör A'ya ait uzay vektör diyagramı 38
Şekil 2.25: Sektör A içindeki bölgelerin tespiti 39
Şekil 2.26: (a), (b), (c) Sektör A'ya ait anahtarlama durumları 42
Şekil 2.27: Üç seviyeli UVDGM eviricinin anahtarlama sırası. 42
Şekil 2.28: SDGM ve UVDGM için maksimum referans gerilimin yörüngeleri 44
Şekil 2.29: HEDGM için faz gerilim dalga şekli 46
Şekil 2.30: 5. ve 7. harmoniklerin eliminasyonunun harmonik analizi 48
Şekil 2.31: Minimum akım dalgalık metodunda çıkış gerilimin spektrum analizi 49
Şekil 2.32: Üçüncü harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyonu. 50
Şekil 2.33: 3. ve 9. harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyon işareti.. 50
Şekil 2.34: DSDGM'in dalga şekilleri 51
Şekil 2.35: İki seviyeli sigma delta modülasyonun blok şeması 52
Şekil 2.36: Çok seviyeli sigma delta modülasyonun blok şeması. 52
Şekil 3.1: R/R-L yüklü iki seviyeli SDGM eviricinin benzetimi 55
Şekil 3.2: Her faz değeri için sinüs gerilimlerinin hesaplandığı bloklar 56
Şekil 3.3: Sinwt değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı 56
Şekil 3.4: Sin(wt-120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı 57
Şekil 3.5: Sin(wt+120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı 57

Şekil 3.6: R/R-L yüklü üç seviyeli UVDGM eviricisinin giriş sinyallerinin üretildiği MATLAB/Simulink benzetim modeli 59
Şekil 3.7: R/R-L yüklü üç seviyeli evirici ve evirici çıkış sinyallerinin MATLAB/Simulink benzetim modeli 60
Şekil 3.8: Üç seviyeli eviricinin sektör tespiti 61
Şekil 3.9: Modülasyon indeksinin bileşenlerine ayrılması 62
Şekil 3.10: Bölge tespit bloğu 62
Şekil 3.11: UVDGM anahtarlama bloğu 63
Şekil 3.12: UVDGM 1.sektör anahtarlama bloğu 64
Şekil 3.13: UVDGM 1.sektör 1.bölge anahtarlama bloğu 64
Şekil 3.14: UVDGM 1.sektör 2.bölge anahtarlama bloğu 65
Şekil 3.15: UVDGM 1.sektör 3.bölge anahtarlama bloğu 65
Şekil 3.16: UVDGM 1.sektör 4.bölge anahtarlama bloğu 66
Şekil 3.17: Üç fazlı üç seviyeli evirici bloğu 67
Şekil 3.18: Üç seviyeli üç fazlı evirici ve R/R-L yükü 68
Şekil 3.19: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri 69
Şekil 3.20: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu 69
Şekil 3.21: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri 70
Şekil 3.22: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları 70
Şekil 3.23: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli 71
Şekil 3.24: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri 72
Şekil 3.25: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu 72
Şekil 3.26: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri 73
Şekil 3.27: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları 73
Şekil 3.28: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli 74
Şekil 3.29: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri 75
Şekil 3.30: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu 75
Şekil 3.31: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri 76
Şekil 3.32: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları 76
Şekil 3.33: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli 77

Şekil 3.34: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri 78
Şekil 3.35: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu 78
Şekil 3.36: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri 79
Şekil 3.37: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları 79
Şekil 3.38: M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli 80

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Tam Köprü Evirici için anahtar durumları. 8
Tablo 2.2: Tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici anahtarlama durumları 11
Tablo 2.3: Üç fazlı üç seviyeli kaskat bağlı evirici için anahtarlama durumları 15
Tablo 2.4: Çok seviyeli eviricilerde kullanılan elemanların kıyaslanması 17
Tablo 2.5: UVDGM'nin 8 anahtarlama durumu ve faz-nötr, faz-faz gerilimleri 29
Tablo 2.6: Açı değerlerine göre sektör belirlenmesi 33
Tablo 2.7: İki seviyeli uzay vektör için anahtarlama sırası 35
Tablo 2.8: m_1 ve m_2 değerlerine göre bölge tespiti. 39
Tablo 2.9: Sektör A-F'ye ait anahtarlama süreleri 40
Tablo 2.10: Sektörlerin tümüne ait anahtarlama sıralamaları 43
Tablo 3.1: M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R/R-L yüklü SDGM ve UVDGM için benzetim parametreleri 53
Tablo 4.1: M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R yüklü SDGM ve UVDGM'nin benzetim sonuçları 82
Tablo 4.2: M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R-L yüklü SDGM ve UVDGM'nin benzetim sonuçları 82

SEMBOLLER LİSTESİ

f_o	: Çıkış frekansı
f_s	: Anahtarlama frekansı
n	: Çok seviyeli eviricilerde seviye sayısı
V_{ref}	: Referans gerilimi
ω	: Açısal hız
I_s	: DA giriş akımı
V_s	: DA giriş gerilimi
I_o	: AA çıkış akımı
V_o	: AA çıkış gerilimi
$N_{anahtarlama}$	: Çok seviyeli eviricilerde kullanılan anahtarlama sayısı
$N_{bölge}$	: Çok seviyeli eviricilerde uzay vektör diyagramında bölge sayısı
M_i	: Modülasyon indeksi
M_f	: Frekans indeksi
V_p	: Taşıyıcı işaret genliği
f_t	: Taşıyıcı işaret frekansı
f_r	: Referans işaretin frekansı
K_s	: Dönüştürme katsayısı
L	: Makinenin faz başına kaçak indüktansı
N	: Harmonik derece
V_n	: n. harmoniğin tepe değeri
ω_s	: Ana frekans
t	: Zaman
s	: Saniye

KISALTMALAR LİSTESİ

AA : Alternatif Akım

DA : Doğru Akım

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

IEEE : Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri

EMU : Elektro Manyetik Uyumluluk

KGK : Kesintisiz Güç Kaynağı

SVG : Statik Var Generatörü

SVK : Statik Var Kompanzatörü

AHF : Aktif Harmonik Filtre

AKE : Akım Kaynaklı Evirici

SDGM : Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

UVDGM : Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

DSDGM : Değiştirilmiş Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

GKE : Gerilim Kaynaklı Evirici

HIDGM : Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu

SHEDGM : Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyonu

THB : Toplam Harmonik Bozulma

UHIDGM : Üçüncü Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok sistemde ve endüstriyel uygulamalarda genel olarak alternatif akım (AA) kullanılmaktadır. Bu yüzden doğru akım giriş gerilimin alternatif akım çıkış gerilimine dönüşümünün yapılması gerekmektedir. Bu dönüşüm yapılırken giriş gerilimi istenilen genlikte ve frekansta simetrik bir alternatif akım çıkış gerilimine dönüştürülmesi istenmektedir. Dolayısıyla, doğru akımın (DA) alternatif akıma dönüşümünde meydana gelecek kayıpların en az olması hem enerji kaybını önleme açısından hem de sistem performansı açısından önem arz etmedir.

Eviriciler, doğru akımı alternatif akıma dönüştürürken çıkışta düşük harmonik elde etmeyi sağlayan güç elektroniği devresidir. Bu yüzden endüstriyel uygulamanın vazgeçilmezleri arasındadır. Çünkü çeşitli motorların denetimi, güç sistemleri, güneş pilleri, rüzgâr türbinleri, akü sistemleri, yakıt hücreleri, güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma, AA gerilim kaynakları ve regülatörler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yaygın kullanım alanına sahip olan eviricilerden beklenen en temel özellik DA giriş geriliminin istenilen genlikte ve frekansta AA çıkış gerilimine dönüştürülmesidir (Beşer, 2009).

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasındaki amaç evirici ve çok seviyeli evirici yapılarını tanıtmak, darbe genişlik modülasyon teknikleri hakkında bilgi vermek, üretilen gerilim dalga şeklinin genliğini kontrol edip çıkış dalga şeklinin sinüzoidal şekle yakın olmasını sağlamak yani; kayıpları azaltıp evirici kapasitesinin tamamına yakınını kullanarak yüksek performans elde etmektir. Bu yüzden Şebekeden bağımsız iki seviyeli Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) ile üç seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) yöntemlerinin lineer bölgede R ve R-L yükünü besleyen üç fazlı gerilim kaynaklı bir evirici devresi üzerindeki benzetimlerinin kıyası yapılarak güç kalitesi adına en iyi performans gösteren darbe genişlik modülasyon yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır.

1.2. Tezin İçeriği

Birinci bölümde konuya genel bir giriş yapılarak tezin amacı ve içeriği hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde eviriciler hakkında genel bilgiler verilmiş, kaynaklarına göre sınıflandırmalar yapılmış ve bu sınıflandırmaların detayları açıklanmıştır. Çok seviyeli evirici çeşitleri olan diyot kenetlemeli, kapasite kenetlemeli ve izoleli DA kaynaklı kaskat bağlı çok seviyeli eviriciler anlatılarak bu evirici çeşitlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Harmonikler ve standartları hakkında bilgilerle beraber Türkiye ve Dünyadaki harmonik standartlar verilmiştir.

Üçüncü bölümde çok seviyeli eviricilerde kullanılan darbe genişlik modülasyon teknikleri hakkında bilgi verilmiş; SDGM ile UVDGM yöntemlerinin lineer bölgede R ve R-L yüklü bir evirici devresi üzerindeki benzetimlerinin kıyası yapılarak darbe genişlik modülasyon yöntemlerinin performans analizi gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde ise SDGM ile UVDGM yöntemlerinin kıyaslarından çıkan sonuçlar değerlendirilmiş ve gerekli öneriler verilerek tez çalışması sonuçlandırılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

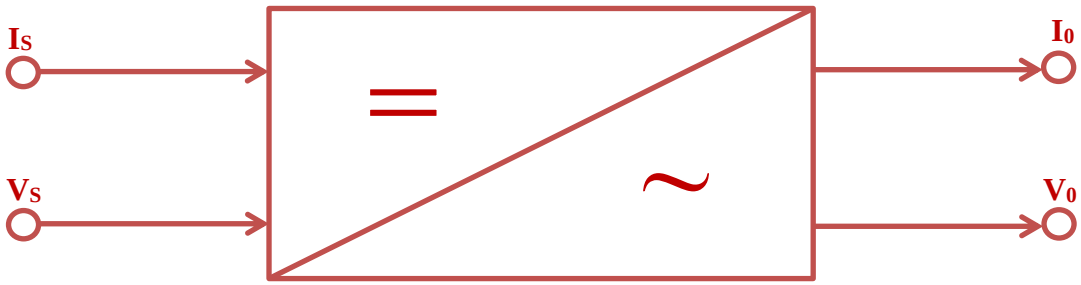
2.1. Giriş

Bu bölümde eviriciler, çok seviyeli eviriciler, harmonikler ve darbe genişlik modülasyon teknikleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

2.2. Eviriciler

Eviriciler: DA giriş kaynağı enerjisini istenilen genlik ve frekansta yüke uygulanan AA çıkış enerjisine dönüştüren güç elektroniği devresidir (Önder, 2010). Bu dönüştürülen evirici çıkış enerjisinin, geriliminin, istenilen seviyede ayarlanması çeşitli yöntemlerle sağlanmaktadır. Birinci yöntem; evirici kazancını sabit tutarak DA giriş gerilimini ayarlamakla yapılır. İkinci yöntem ise DA giriş geriliminin sabit ve kontrol edilemediği durumlarda, eviriciye genellikle darbe genişlik modülasyonu uygulanarak değişken çıkış gerilim seviyesinin elde edilmesi ile yapılır (Yumurtacı, 2007).

DA giriş akımı: I_s, DA giriş gerilimi: V_s ve AA çıkış akımı: I_o, AA çıkış gerilimi: V_o olan basit bir evirici sitemine ait temel blok şeması Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir. Bununla beraber yapılan araştırmalar ve gelişen teknolojiyle tasarlanan eviricilerde; Transistör, Tristör, MOSFET, IGBT gibi anahtarlama elemanları kullanılır. Bu anahtarlama elemanları içerisinden MOSFET ve IGBT yüksek hızda çalışmaları hasebiyle en çok tercih edilenlerdir. Transistörlerin iletimde kalması için büyük baz akımına gerek duyması; tristörlerin ise yarı periyotta darbe sayısının yeterli olmaması ve kesime gitmesi için komütasyon devresine ihtiyaç duyması hasebiyle pek tercih edilip kullanılmamaktadır (Bilhan, 2012).



Şekil 2.1. Evirici sistemin temel blok şeması

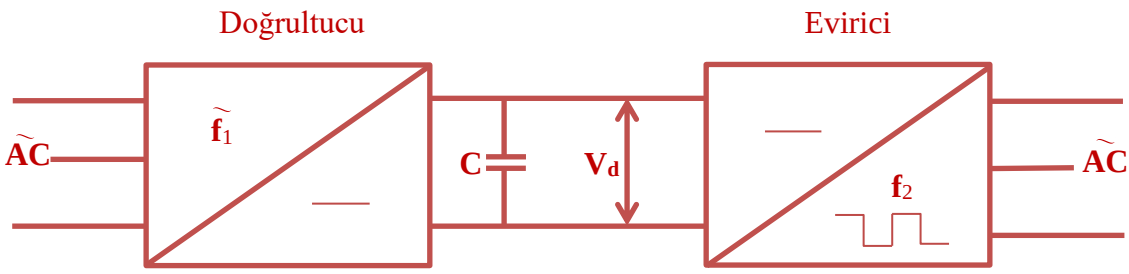
Eviriciler, doğru akımı alternatif akıma dönüştürürken çıkışta daha düşük harmonik elde etmeyi sağlayan devrelerdir. Bu yüzden endüstriyel uygulamanın vazgeçilmezleri arasındadır. Çünkü çeşitli motorların denetimi, güç sistemleri, güneş pilleri, rüzgâr türbinleri, akü sistemleri, yakıt hücreleri, güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma, AA gerilim kaynakları ve regülatörler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yaygın kullanım alanına sahip olan eviricilerden beklenen en temel özellik DA giriş gerilimin istenilen genlikte ve frekansta simetrik bir AA çıkış gerilimine dönüştürmek, diğer bir deyişle; çıkış gerilim dalga şeklinin olabildiğince sinüs formuna yaklaşmış olmasıdır.

Eviriciler, girişinde kullanılan besleme kaynağına göre Gerilim Kaynaklı Eviriciler (GKE) ve Akım Kaynaklı Eviriciler (AKE) olmak üzere ikiye ayrılır (Tuncer, 2004).

2.3. Gerilim Kaynaklı Eviriciler

Evirici girişinde kullanılan besleme kaynağı sabit bir gerilim kaynağından meydana geliyor ise bu tür eviricilere GKE denir. Evirici türlerinden hangisinin kullanılması gerektiğini yük tayin eder. Eğer yük harmonik akımlara yüksek empedans gösteren bir yapıda ise bu yükün sürülebilmesi için gerilim kaynaklı eviricilerin kullanılması daha uygun olmaktadır (Kabalcı, 2010).

Gerilim kaynaklı eviriciler: Batarya, güneş panelleri gibi sabit kaynaklı bir yapıdan elde edilen doğru akım giriş gerilimini çıkışta alternatif akım gerilimine dönüştürürler. Eğer evirici girişindeki kaynak sabit değil ise evirici girişine veya doğrultucu bir devrenin çıkışına paralel bir kapasitenin bağlanmasıyla istenilen yapı elde edilmiş olur. Şekil 2.2'de gerilim kaynaklı eviricinin yapısı görülmektedir (Güzel, 2014).



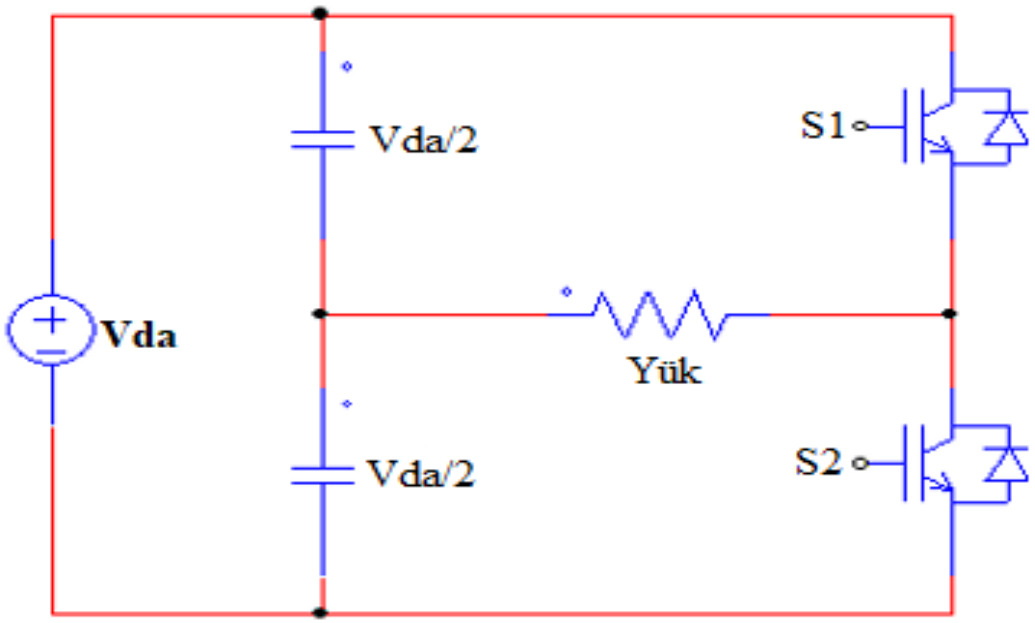
Şekil 2.2. Gerilim kaynaklı evirici

Gerilim Kaynaklı Eviricilerin çıkışı tek fazlı ya da çok fazlı olabildiği gibi kare dalga, sinüzoidal dalga veya yarım kare dalga, tam kare dalga da olabilir. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşırız. Gerilim Kaynaklı Eviricilerin kullanıldığı bazı alanlar şunlardır (Sarıkurt, 2010):

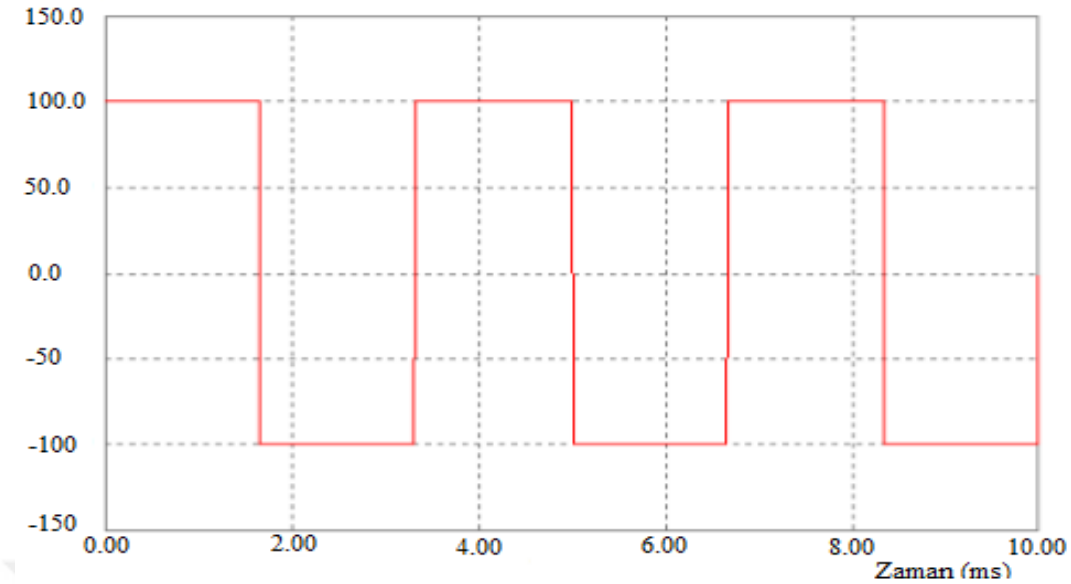
- KGK (Kesintisiz Güç Kaynağı)
- Endüksiyon ısıtma
- SVG (Statik Var Genaratörü) veya SVK (Statik Var Kompanzatörü)
- AHF (Aktif Harmonik Filtre)
- Yakıt pili, batarya veya fotovoltaiklerden elde edilen AA Güç Kaynağı

2.3.1. Tek Fazlı İki Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici

Evirici türünün en basit yapıdaki formu yarım köprü eviricidir. Bu türdeki evirici çıkışında kare dalga üretilir. Ayrıca orta uçlu gerilim kaynağı beslemesi de gereklidir. Bu orta uçlu gerilim besleme kaynağını oluşturmak için seri yerleştirilmiş iki kapasite ve DA kaynak kullanılır (Güzel, 2014). Yarım köprü eviriciye ait devre şeması Şekil 2.3'te; çıkış gerilimine ait dalga şekli ise Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Yarım köprü evirici devresi

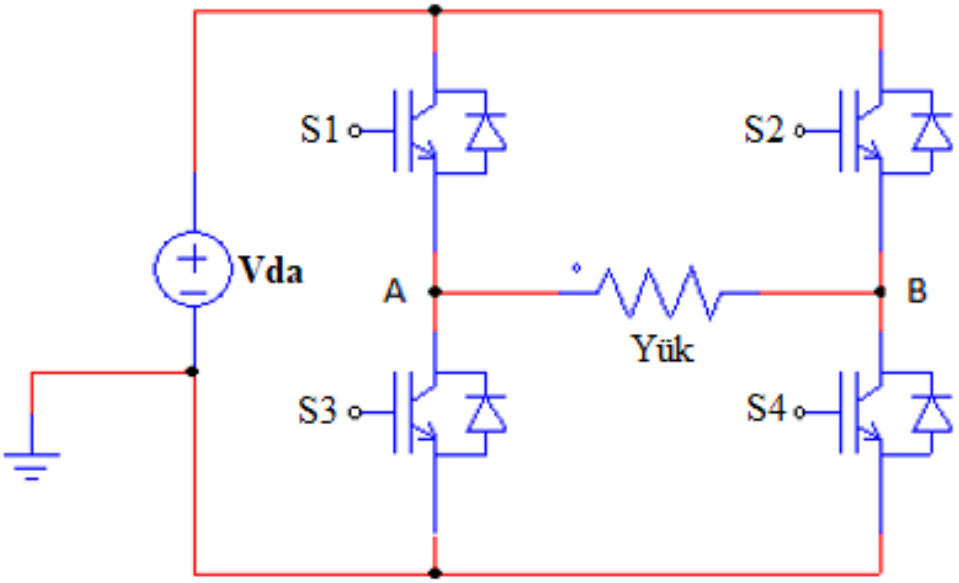


Şekil 2.4. Yarım köprü evirici devresine ait çıkış dalga şekli

Tek fazlı yarım köprü eviricide, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi S_1 ve S_2 den oluşan iki anahtarlama elemanı vardır. Bu iki anahtar mutlaka ters çalıştırılmalı. Yani bu anahtarlama elemanlarından biri, S_1, iletimdeyken diğeri, S_2, mutlaka kesimde olmalıdır. İki anahtar da iletimdeyse kaynak kısa devre olur ve evirici zarar görür. Anahtarlar kesimde ise herhangi bir olumsuzluk oluşmaz. Anahtarlardan S_1 iletimde olunca çıkış gerilimi $+V_{da}/2$ olur. S_2 iletimde olunca ise $-V_{da}/2$ olur (Sarıkurt, 2010).

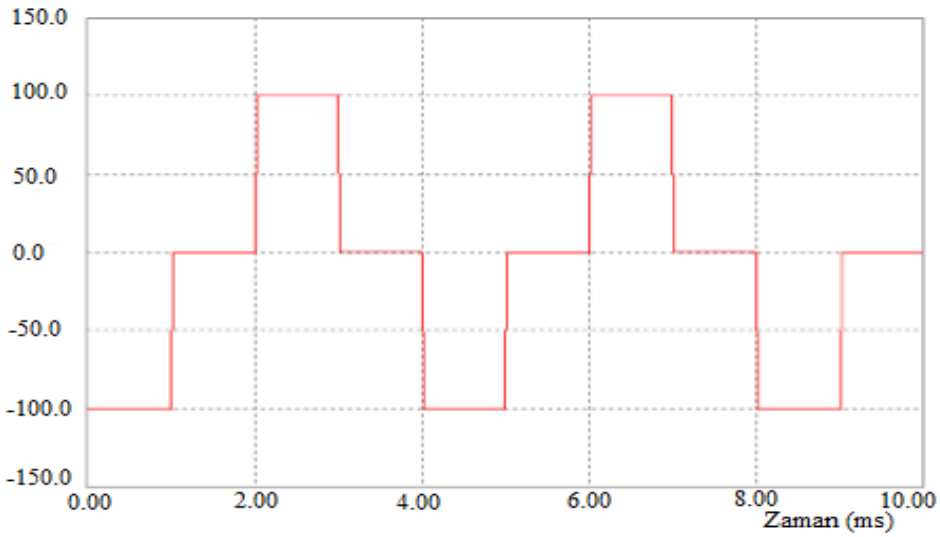
2.3.2. Tek Fazlı Üç Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici

Tam köprü evirici türü üç seviyeli çıkış gerilimi elde etmek amacıyla kullanılan evirici türüdür. Bu tür eviricilerdeki çıkış formu üç seviyeli kare dalga halindedir. Basit olarak ifade etmek gerekirse yarım köprü evirici modeline bir devre bacağı daha eklenmesi ve bu bacaklar arasına da yükün yerleştirilmesiyle oluşturulur. Tek fazlı üç seviyeli tam köprü evirici devresi Şekil 2.5'te çıkış gerilimine ait dalga ise Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.5. Tam köprü evirici devresi

Tam köprü evirici devresi Şekil 2.5'te görüldüğü üzere dört adet anahtarlama elemanı ve dört adet diyottan oluşmaktadır. A-B arasındaki yük üzerinde meydana gelen gerilimi yani V_{AB}'yi bulmak için anahtarların çapraz çiftler şeklinde iletime ve kesime gitmesi gerekmektedir. Eğer A-B noktaları arasındaki gerilim $V_{AB} = V_{da}$ ise S_1 ve S_4 anahtarları iletimde, S_2 ve S_3 anahtarı ise kesimde olur. Eğer A-B noktaları arasındaki gerilim $V_{AB} = -V_{da}$ ise S_1 ve S_4 anahtarları kesimde, S_2 ve S_3 anahtarları ise iletimde olur (Tadros ve ark., 1992).



Şekil 2.6. Tam köprü evirici devresine ait çıkış dalga şekli

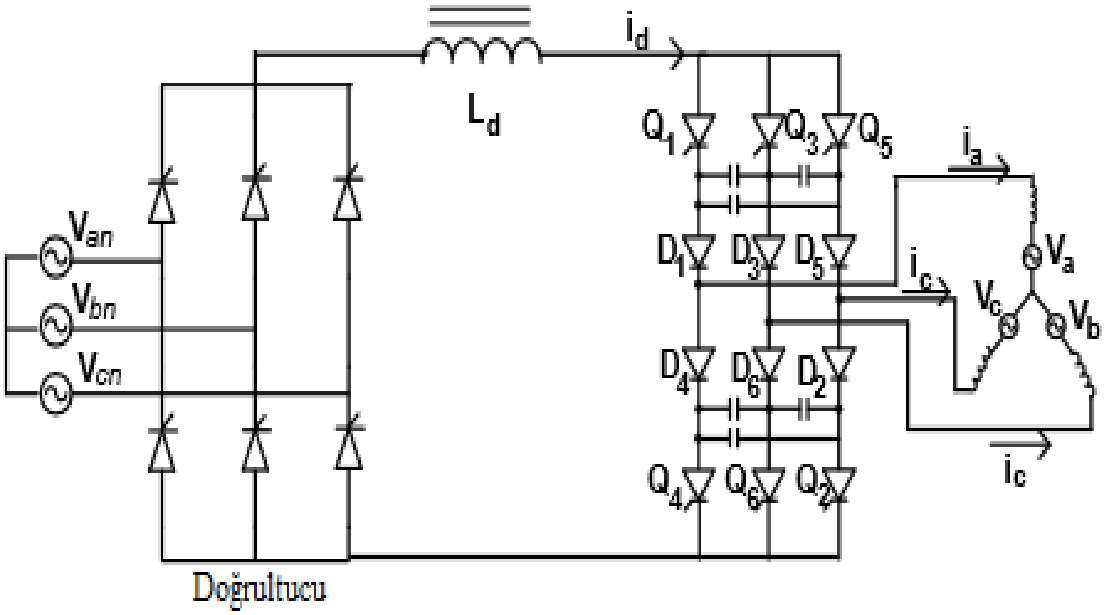
Tam köprü eviricilerde 0 seviyesinin oluşması için S_1 ve S_2 anahtarları iletimde iken S_3 ve S_4 anahtarları kesime götürülür veya S_3 ve S_4 anahtarları iletimde iken S_1 ve S_2 anahtarları kesime götürülür. Tam köprü eviricilerde elde edilen çıkış seviyeleri için gerekli olan anahtar durumları Tablo 2.1'de verilmiştir (Sarıkurt, 2010).

Tablo 2.1. Tam köprü evirici için anahtar durumları

Yük üzerindeki Gerilim	**Anahtar Durumları**			
VAB	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
$V_{da}/2$	1	0	0	1
$-V_{da}/2$	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	1

2.4. Akım Kaynaklı Eviriciler

Besleme kaynağı akım kaynağından oluşuyorsa bu tür eviriciler AKE olarak adlandırılır (Köseoğlu, 2014). Çok büyük güçler için kullanılan akım kaynaklı eviricilerin giriş empedansı büyük ve çıkış gerilimin dalga şekli ise yüke bağlıdır. Yükün harmonik akımlara düşük empedans gösteren bir yapısı varsa akım kaynaklı bir evirici kullanılarak bu yükün sürülmesi daha uygun olacaktır. Şekil 2.7'de akım kaynaklı bir evirici yapısı verilmiştir. Bu yapıda görüldüğü üzere giriş gerilimi doğrultulduktan sonra seri bağlı bir L indüktansı üzerinde sabit bir akım kaynağı oluşturulup DA beslemesi yapılmaktadır. Eviricinin kaynaktan çektiği akımın sabit kalması için indüktans değeri oldukça büyük bir değerde seçilmelidir (Kocalmış Bilhan, 2012).



Şekil 2.7. Üç fazlı akım kaynaklı evirici devresi

2.5. Çok Seviyeli Eviriciler

Yarı iletken teknolojisinde kaydedilen gelişmelerle beraber farklı darbe genişlik modülasyon tekniklerinin de geliştirilmesi güç dönüştürücülerinin ortaya çıkmasına ve birçok alanda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu gelişmelerden biri de çok seviyeli eviricilerdir. Özellikle kesintisiz güç kaynakları ve sürücü sitemleri gibi endüstriyel uygulamaların birçoğunda yaygın olarak kullanılan bu eviriciler, girişlerine uygulanan DA gerilim seviyelerini çıkışlarında daha sinüzoidal şekle dönüştürürler (Sünter, 2013)

Çok seviyeli eviricinin en büyük faydası, anahtarlama frekansını arttırmadan ya da evirici çıkış gerilimini azaltmadan evirici çıkışındaki dalga formunda meydana gelen harmonik bozulmaları minimize etmesidir (Kocatepe ve ark., 2003).

Çok seviyeli eviricilerin çıkışındaki dalga şekli sinüs sinyalinin merdiven basamaklı hali gibidir. Girişine uygulanan gerilim seviye sayısı arttıkça çıkışındaki dalgada oluşan basamak sayısı da artacağı için dalga formu sinüs sinyal şekline daha çok benzeyecek ve kalitesi de o oranda artacaktır. Fakat seviye sayısını arttırdıkça anahtarlama eleman sayısı da artacağı için evirici kontrol algoritmasındaki karmaşa da artacaktır. Bu da çok seviyeli eviricilerin istenmeyen durumudur (Kerem, 2012).

Orta ve yüksek güç uygulamalarında kullanılan klasik eviricilerin verimlerinin düşük olması, büyük transformatörlerin kullanılmasıyla ortaya çıkan yüksek maliyet, dV/dt ve dI/dt sonucu anahtarlama elemanlarında oluşan akım-gerilim darbeleri gibi istenmeyen durumlar çok seviyeli eviriciler geliştirilerek önüne geçilmeye çalışılmıştır. Böylece yüksek güç uygulamaları için yeni bir güç dönüşüm sistemi ortaya çıkmıştır.

Çok seviyeli eviricilerde gerilim seviyesi en az üç ile başlar ve sonsuz seviyeye kadar gidebilir. Arttırılan her seviye sonucunda çıkış gerilim dalga formunda; daha az distorsiyon, daha düşük anahtarlama frekansı, yüksek verim gibi durumlar meydana gelir. Çok seviyeli evirici gelişimini kronolojik olarak ifade edersek, ilk olarak diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici üretilmiştir. Ardından kapasite kenetlemeli çok seviyeli evirici üretilmiştir. Son olarak da ayrı DA kaynaklı tam köprü yapılar seri bağlanarak kaskat bağlı çok seviyeli evirici üretilmiştir. Böylece, literatürdeki çok seviyeli eviriciler üretim zamanlarına ve türlerine göre temel olarak üç grupta sınıflandırılabilir (Kocalmış Bilhan, 2012).

- Diyot Kenetlemeli Çok Seviyeli Evirici
- Kapasite Kenetlemeli Çok Seviyeli Evirici
- İzoleli DA Kaynaklı Kaskat Bağlı Çok Seviyeli Evirici

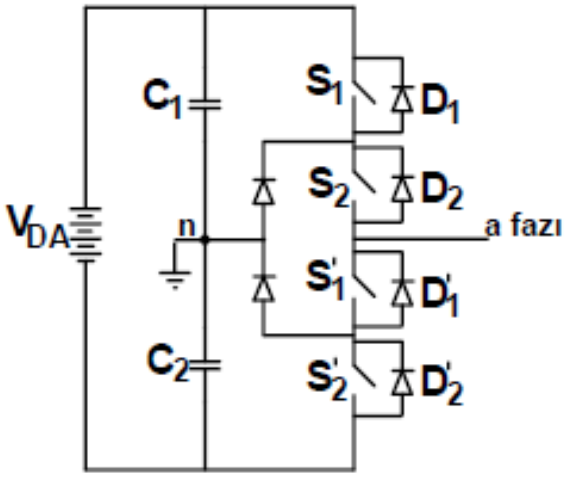
Bu üç çeşit çok seviyeli eviricilerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Her birinin devre yapıları ve farklı olmakla beraber temelde kullanılan anahtarlama sayıları birbirine eşittir.

2.5.1. Diyot Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler

Diyot kenetlemeli çok seviyeli eviriciler Nabae ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen, günümüzde çok seviyeli evirici topolojileri arasında en yaygın olarak kullanılan evirici türüdür (Canbaz, 2014). Bu evirici devre yapısıyla çok seviyeli gerilimler elde edebilirken genellikle nötr nokta kenetlemeli yapı olarak bilinen üç seviyeli evirici devre yapısı olarak kullanılmaktadır. Bu topolojinin avantajı ise yüksek güçlerde kullanılabilmesi ve kontrol yönteminin basit olmasıdır (Betanzos ve ark., 2011).

Şekil 2.8'de tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin devre şeması verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici devresinde çıkış gerilimi, C_1 ve C_2 giriş hat kondansatörlerinden elde edilen farklı DA gerilimlerin birleşiminden

oluşmaktadır. Tablo 2.2'de tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli eviricisine ait anahtarlama durumları verilmiştir (Budak, 2011).



Şekil 2.8. Tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici

Tablo 2.2. Tek fazlı 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici anahtarlama durumları

Anahtarlama Gerilimi Vao	**Anahtarlama Durumları**			
	S_1	S_2	S_1'	S_2'
$V_{da}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{da}/2$	0	0	1	1

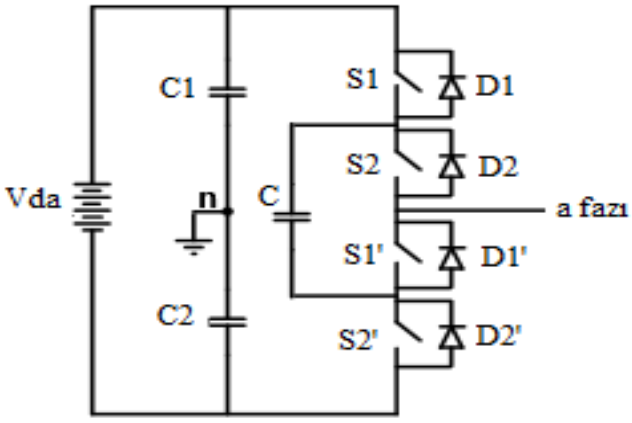
Diyot kenetlemeli evirici devresinde DA bara gerilimi devrede kullanılan kapasitelerle bölünerek gerilim kaynakları elde edilmektedir. Elde dilen bu gerilim kaynakları devredeki diyotlar ve yarı iletken elemanlarla uygun şekilde kullanılarak evirici çıkışında çok seviyeli gerilim seviyeleri oluşturulur. Çıkış gerilim seviye sayısı m olarak kabul edilirse DA barası üzerinde (m-1) tane seri bağlı kondansatör bulunmalıdır. Ayrıca her faz için çıkış gerilimi elde etmede kullanılan diyotların sayısı da (m-1).(m-2) olarak hesaplanır. Şekil 8.2 devresi için tablo 2.2'de gösterilen anahtarlama kombinasyonları uygulanarak evirici çıkışında + $V_{da}/2$, 0, ve – $V_{da}/2$ olmak üzere üç seviyeli faz-nötr gerilimi elde edilir (Eskin, 2012).

2.5.2. Kapasite Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler

Kapasite kenetlemeli çok seviyeli eviriciler 1992 yılında Meynard tarafından diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici yapısına alternatif olarak önerdiği evirici türüdür. Bu eviricin temel yapısı diyot kenetlemeli evirici yapısıyla benzerlik göstermekle beraber birçok özgün özeliklere de sahiptir. Bu özelliklerin başında, diyot kenetlemeli evirici yapısında kullanılan kenetleme diyotlarının kapasite kenetlemeli evirici yapısında olmaması gelmektedir. Bunun yerine seri bağlanmış kapasitör kenetlenmiş anahtarlama hücreleri vardır (Elmas ve ark., 2008).

Kapasite kenetlemeli evirici yapısında kullanılan seri bağlı kapasitörler daha fazla anahtarlama serbestliği sağlamaktadır. Böylece gerilim dengelenmesini sağlamak kolaylaşmış olacaktır. Bu evirici yapısında kullanılan DA hat kapasitör sayısı çıkış dalgasındaki basamak seviyesini gösterir. Bu eviricilerin "flying capacitor" evirici olarak da adlandırılmaları yapısındaki kapasitörlerin anahtarlama gerilimlerini bir kapasitör gerilimine kenetlemesinden kaynaklanmaktadır (Sarıkurt, 2010).

Şekil 2.9'da tek fazlı üç seviyeli kapasite kenetlemeli eviricinin yapısı verilmiştir. Bu yapı da uygulanan anahtarlama durumlarına göre + $V_{da}/2$, 0, ve – $V_{da}/2$ olmak üzere üç seviyeli bir çıkış gerilimi elde edilir. S_1 ve S_2 anahtarları iletimdeyken V_{an} = + $V_{da}/2$ olur. S_1' ve S_2' iletimdeyken V_{an} = - $V_{da}/2$ olur. S_1, S_1' veya S_2, S_2' iletimdeyken V_{an} = 0 olur. (Stynski, 2010).



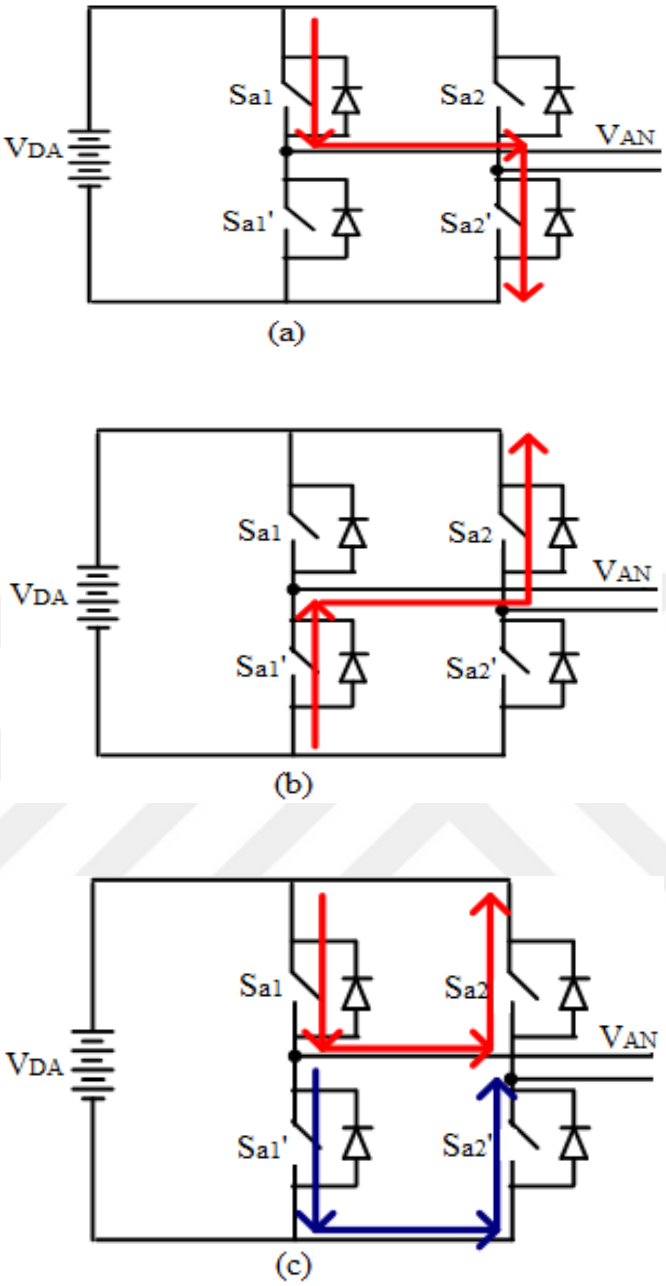
Şekil 2.9. Tek fazlı 3 seviyeli kapasite kenetlemeli evirici

Kapasite kenetlemeli evirici yapısının diyot kenetlemeli evirici yapısına göre çeşitli üstünlükleri ve dezavantajları vardır. Kondansatörlerin uzun şarj süresi nedeniyle yüksek seviyeli enerji miktarına sahip olması, gerilim seviyelerini dengelemek için anahtarlama kombinasyon sayısının fazla olması, yüksek seviye miktarında harmonik bozulumunun azalması ve aktif – reaktif güç akışının kontrol edilebilmesi üstünlükleri olarak sayılabilir. Dezavantaj olarak da; kondansatör sayılarının fazla olmasıyla artan masraflar ve kapasitörlerin kapladığı hacmin büyük olması, devre kontrolünün karmaşık olması, kenetleme kapasiteleri arasındaki parazitik rezonans risklerinin olması gibi durumlar sayılabilir (Canbaz, 2014).

2.5.3. Kaskat Kenetlemeli Çok Seviyeli Eviriciler

Kaskat kenetlemeli çok seviyeli eviriciler 1996 yılında tek fazlı H köprü eviricilerin seri olarak bağlanması sonucu elde edilmiştir. Bu evirici türünün özellikleri diyot kenetli ve kondansatör kenetli çok seviyeli evirici türleriyle genel olarak aynı olmasına rağmen bu eviricilerde daha az sayıda anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Bunların yerine gerilim seviyesine göre birbirinden bağımsız DA kaynaklar kullanılır. Bu kaynaklar güneş pillerinden, yakıt hücrelerinden ya da akülerden elde edilir. Ayrıca basit yapıda olması, paket devre haline getirilmesinin daha kolay olması diğer iki çok seviyeli eviricilerle kıyaslandığında bu eviricinin avantajları olarak görülmektedir (Budak, 2011).

Tek fazlı H köprü yapısıyla üç seviyeli çıkış gerilimi elde edilmektedir. Bu yapıya H köprü eviricilerin eklenip çıkarılmasıyla çıkışta elde etmek istenilen gerilim seviyesi de ayarlanabilmektedir. Şekil 2.10'da bir fazlı kaskat bağlı çok seviyeli evirici yapısı ve anahtarlama durumları görülmektedir. Bu devre incelendiği zaman; S_{a1} ve S'_{a2} iletimde olduğu zaman çıkış geriliminin $+V_{DA}/2$, S_{a2} ve S'_{a1} iletimde olduğu zaman çıkış geriliminin $-V_{DA}/2$ ve (S_{a1} ve S_{a2}) ya da, (S'_{a1} ve S'_{a2}) iletimde olduğu zamanda çıkış geriliminin 0 V olarak elde edildiği görülür (Kocalmış ve ark., 2006).



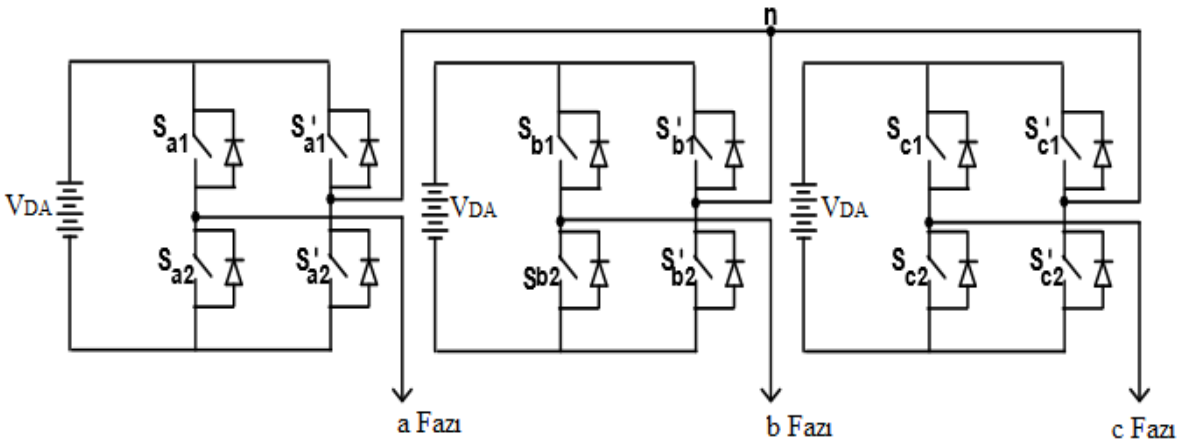
Şekil 2.10. (a), (b), (c) H köprü evirici yapısı ve anahtarlama durumları

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici devrelerinde seviye sayısı arttıkça aynı faz için kullanılan H köprü eviricilerin sayısı da artmaktadır. Seviye sayısı ile H köprü arasındaki bağıntı aşağıdaki denklem ile verilmektedir;

$$H_K = \frac{n-1}{2} \qquad (2.1)$$

Bu bağıntıya göre H_K her bir faz için kullanılacak H köprü evirici sayısını, n ise seviye sayısını göstermektedir. Örneğin üç seviyeli bir evirici için her bir fazda birbirine seri

bağlanacak H köprülerin sayısı 1'dir. Bu duruma uygun olarak Şekil 2.11 ile üç fazlı üç seviyeli kaskat bağlı evirici yapısı gösterilmektedir. Her bir faz için kullanılacak olan anahtarlama durumları Tablo 2.3 ile verilmektedir (Kocalmış, 2005). Bu devre için dikkat edilmesi gereken önemli bir husus; her bir köprü devresi için kullanılan kaynağın birbirinden izoleli olması gerekliliğidir. Ayrıca anahtarlama durumlarına dikkat edilirse "0" V gerilim için iki anahtarlama durumu mevcuttur. Bu yüzden yalnızca birinin seçilmesi yeterli olacaktır.



Şekil 2.11. Üç fazlı üç seviyeli kaskat bağlı evirici

Tablo 2.3. Üç fazlı üç seviyeli kaskat bağlı evirici için anahtarlama durumları

Çıkış Gerilimi V_{a0}	**Anahtarlama Durumları**			
	S_{x1}	S'_{x1}	S_{x2}	S'_{x1}
$V_{DA}/2$	1	0	0	1
0	1	1	0	0
0	0	0	1	1
$-V_{DA}/2$	0	1	1	0

Bu teknikte kenetleme diyot ve kapasitörlerine ihtiyaç duyulmaması bu tekniğin diğer tekniklere kıyasla daha az sayıda eleman bulundurduğu anlamına gelir. Bunun yanında her bir tam köprü yapısı birbiriyle aynı olduğundan bu seri yapının tasarımı kolaydır ve kolayca paketlenip bir modül haline getirilebilir. Kaskat çok seviyeli eviricilerde çok seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için tam köprü eviricilerin AA çıkışlarının seri bağlanması sonucunda sentezlenen çıkış gerilim dalga şekli evirici çıkışlarının toplamı olur. Her bir köprü devrenin çıkışında üç farklı gerilim seviyesi meydana getirebilmesi çıkışları seri bağlanmış iki tane üç seviyeli kaskat eviricinin toplam beş seviyeli bir AA çıkış geriliminin elde edilmesine neden olur. Formüle edecek olursak "s" DA kaynak sayısı olmak üzere bir kaskat çok seviyeli eviricinin çıkış gerilimlerinin seviyesinin sayısı m=2s+1 olur.

Bu çok seviyeli evirici konfigürasyonu günümüzde yakıt hücrelerinde, AA güç kaynaklarında ve hız kontrol sürücü uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.5.4. Çok Seviyeli Evirici Yapılarının Kıyaslanması

Diyot kenetlemeli, kapasite kenetlemeli ve kaskat kenetlemeli çok seviyeli evirici yapılarının faz başına kullanılan güç elemanları kıyaslandığında ana anahtarlama elaman sayıları aynıdır. Tablo 2.4'te diyot kenetlemeli, kondansatör kenetlemeli ve kaskat kenetlemeli çok seviyeli eviricilerin bir faz devresinden aynı gerilim seviyelerini elde etmek için ihtiyaç duyulan güç elemanlarının kıyası verilmiştir (Deniz, 2005).

Diyot kenetlemeli eviricilerde dengeleme kapasitörleri, kandansatör kenetlemeli eviricilerde kenetleme diyotları, kaskat bağlı eviricilerde ise hem dengeleme kapasitörleri hem de kenetleme diyotları yoktur. Kaskat bağlı evirici yapısında diğer evirici türlerine nazaran daha az yapıda eleman kullanılır. Bu yüzden paketlenip modül haline getirilmesi daha kolaydır. Ayrıca çıkış gerilim sayısı H köprülerin eklenip çıkarılmasıyla kolayca ayarlanabilir. Ancak bu devrelerde izolasyonlu DA kaynak kullanılmaktadır (Deniz, 2010).

Tablo 2.4. Çok seviyeli eviricilerde kullanılan elemanların kıyaslanması

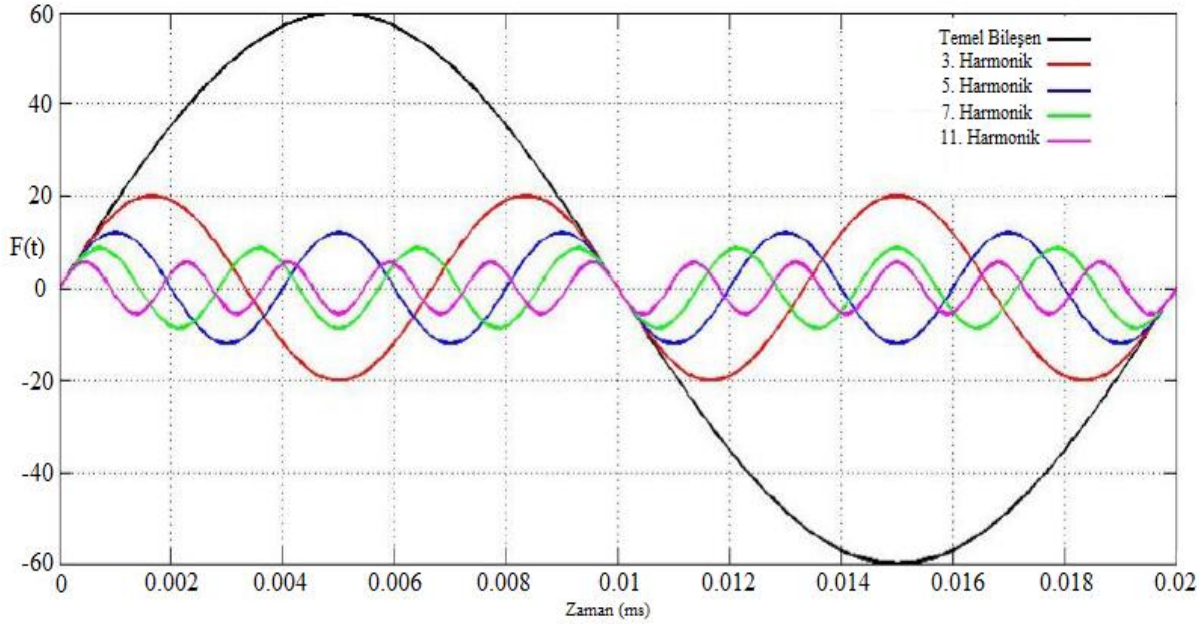
	Evirici Türleri		
	Diyot Kenetlemeli Evirici	**Kapasitör Kenetlemeli Evirici**	**Kaskat Kenetlemeli Evirici**
Temel anahtarlar	2(n-1)	2(n-1)	2(n-1)
Temel diyotlar	2(n-1)	2(n-1)	2(n-1)
Kenetleme diyotları	(n-1).(n-2)	0	0
Dengeleme kapasiteleri	0	(n-1).(n-2)/2	0
DA baradaki kapasiteler	(n-1)	(n-1)	(n-1)/2
Faz başına kullanılacak izolasyonlu DA kaynak sayısı	0	0	(n-1)/2

2.6. Harmonikler ve Standartları

2.6.1. Harmonik Tanımı

Elektrik enerji sistemlerinin kalitesini, 50 Hz frekansta salınan akım ve gerilime ait dalga şeklinin sinüzoidal dalga formuna yakın olması belirler. Ancak gerek enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımından gerek de cihazların elektrik ve manyetik devrelerinde bulunan lineer olmayan elemanlardan (konvertörler, güç elektroniği elemanları, ark fırınları, kesintisiz güç kaynakları) gelen etkilerle akım ve gerilim dalga formu sinüs formundan uzaklaşır yani bozunuma uğrar. Bundan dolayı güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga formunda meydana gelen bozukluklara harmonikler denir (Bilge, 2008).

Harmonikler, uygulamalarda en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmonikler olarak karşılaşılmaktadır. Buradaki 11. ve 13. harmoniklere ait genlikler ana bileşene göre çok küçük olduğu için genellikle değerlendirmeye alınmazlar. Şekil 2.12'de bir tam periyot boyunca temel bileşen ve 3., 5., 7., 11. harmonik bileşenlerin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.12. Temel bileşen ve 3., 5., 7., 11. harmonik bileşenler

2.6.2. Toplam Harmonik Bozulum

Toplam harmonik bozulum (THB), harmonik analizle alakalı tanımlar içerisinde en yaygın kullanılan kavramlardandır. Gerilim ve akım dalga formundaki distorsiyonu ifade eden bir göstergedir. Toplam harmonik distorsiyon, harmonik bileşenlerin efektif değerleri toplamının temel bileşenlerin efektif değerine oranı olarak tanımlanır (Akmaz, 2012). Gerilim ve akımdaki toplam harmonik distorsiyon 2.2 ve 2.3'te verilen denklemlerle hesaplanır (Bozabalı, 2009).

Gerilim için;

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Vn^2}}{V1} \tag{2.2}$$

Akım için;

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} In^2}}{I1} \tag{2.3}$$

2.6.3. Harmonik Standartlar

Harmoniklerin şebeke ve sistemdeki yüklerde meydana getirdiği zarları minimize etmek ve enerji kalitesini arttırmak amacıyla çeşitli standartlar geliştirilmiştir (Koyuncu, 2012).

İlk harmonik standartları Avrupa'da oluşturulmuştur. 1969 Europen Committee For Electrotechnical Standardization (CENELEC) ve International Electrotechnical Commission (IEC), ev aletlerinde kullanılan yarı iletken devrelerin oluşturduğu harmoniklerin etkilerini araştırmak için bir araya gelmiştir. İlk standart (EN 50006) 1975 yılında CENELEC tarafından yayınlanmış ve 14 avrupa ülkesi bu standartları uygulamıştır. Daha sonra 1982'de Almanya daha geniş kapsamlı olan IEC 555 dokümantasyonunu oluşturulmuştur. 1991 yılında CENELEC, IEC-555-2 standartlarını ortaya çıkarmıştır (EN 60555-2). Günümüzde, IEC standartları 555 revizyon altında olup ev yüklerinden, bütün yüklere doğru araştırma geliştirilmektedir (Key ve diğ., 1993).

Bir diğer harmonik standart ise IEEE standartlarıdır. Amerika Birleşik Devletlerinde IEEE sanayi uygulamaları derneği 1973'de harmonik standartları belirlenmesi için çalışma başlatmış ve ilk IEEE 519 kılavuzu 1981'de yayınlanmıştır. 1986'da IEEE 519 standartlarını geliştirmek için güç mühendisliği, endüstriyel uygulama topluluğuyla birleşmiştir. Bunun sonucu olarak standartların görünüş ve içeriği oldukça artmıştır. 1992 yılında IEEE 519 güç sistemindeki harmoniklerin tavsiye edilen uygulamalarını, nedenlerini, etkilerini ve kontrollerini sağlamak için onaylanmıştır. Bu standartlar IEEE 519-1992 standartları başlığı altında yayınlanmış ve bu standartlar hem gerilim hem de kullanıcı akımlarının bozulumlarını sınırlamaktadır (Akmaz, 2012).

International Electrotechnical Commission (IEC) 519-1992 standardına göre kabul edilebilir harmonik bozunum sınır değeri gerilim için %3 ve akım için ise %5'tir. Bu sınır değerlerin üstünde meydana gelen harmonik bozulma elektrik sistemleri için tehlikeli ve çeşitli zararlar oluşturabilecek problemler içermektedir (Gezegin, 2006).

2.6.4. Türkiye'de ve Dünya'da Kullanılan Harmonik Standartlar

Elektik enerji sistemlerindeki harmonik bozulmaları sınırlandırmak için IEC (International Electrotechnic Commission) ve IEEE (International Electrical and Electronics Engineers) tarafından belirlenen iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden IEC, her bir

yükün sebep olduğu harmonikleri sınırlandırarak toplam harmonik etkiyi azaltmayı amaçlar. IEEE yönteminde ise akım ve gerilime sınırlar getirerek harmonik bozulmayı belirli sınırda tutmayı hedefler. Bu iki yöntemlerden IEC teoride daha etkin sonuç verirken pratikte getirilen farklı sınır kabullerinden dolayı uygulanışı IEEE yöntemine göre daha azdır.

Ülkemiz ve çeşitli ülkelerce benimsenen güç kalitesinin sağlanması için getirilen belli başlı standartlar şunlardır:

- EN 50 006 (The Limitations of Disturbances in Electricity Supply Networks caused by Domestic and Similar Appliances Equipped with Electronic Devices)
- CENELEC (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique)
- IEC Norm 555-2 555-3 (Ineternational Energy Commission)
- IEC 1000-3-2,1995,(EN 6100-3-3) 1995 Alçak gerilimde gerilim dalgalanması ve fliker sınırlarını belirlemek için kullanılır.
- VDE 0838 Beyaz Eşya, VDE 0160 Çeviriciler, VDE 0712 Fluoresant
- IEEE 519-1992, ANSI/IEEE Std.519
- TS 9882: Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde meydana getirdiği bozulmalar.
- EN 6100-3-2: Elektromanyetik uyumluluk
- Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A'den küçük cihazlar).
- IEC 1000-3-4: Elektromanyetik uyumluluk
- Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A'den büyük cihazlar)
- IEC 1000-2-2: Elektromanyetik uyumluluk, düşük frekanslı iletken dağıtımları ve düşük gerilim sistemleri işaretleşmede uyumluluk seviyeleri

2.7. Darbe Genişlik Modülasyon Teknikleri

Evirici çıkışındaki dalganın kalitesini harmonik bozulmalar belirler. Harmonik bozulmaları minimize etmek amacıyla çok seviyeli eviricilerde seviye sayısını arttırarak çıkış dalga şeklinin sinüzoidal biçime yaklaşması sağlanmıştır. Çıkış gerilimdeki harmonik bozulmayı seviye sayısını arttırmakla azaltılabileceği gibi farklı modülasyon teknikleri kullanılarak da yapılabilmektedir.

Evirici çıkışındaki gerilim ve frekansın kontrolüne ilişkin son zamanlarda birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar neticesinde birçok teknik geliştirilmiştir. Bu tekniklerle evirici çıkışındaki dalganın sinüzoidal şekile yaklaşması amaçlanmıştır. Böylece harmonik bozulma azaltılarak çıkış dalga kalitesi arttırılmıştır. Bu teknikler genel olarak darbe genişlik modülasyonu olarak ifade edilmesine rağmen geniş bir lineer modülasyon aralığı, daha az anahtarlama kaybı, kolay uygulama ve daha az toplam harmonik distorsiyon elde etmek amacıyla birçok farklı adla anılan darbe genişlik modülasyon tekniği mevcuttur. Bu teknikler literatürde şekiz adet olarak tanımlanmıştır. Her tekniğin kendince çeşitli avantajı, dezavantajı ve her birinin farklı türde uygulama alanları vardır. Bu teknikler şunlardır;

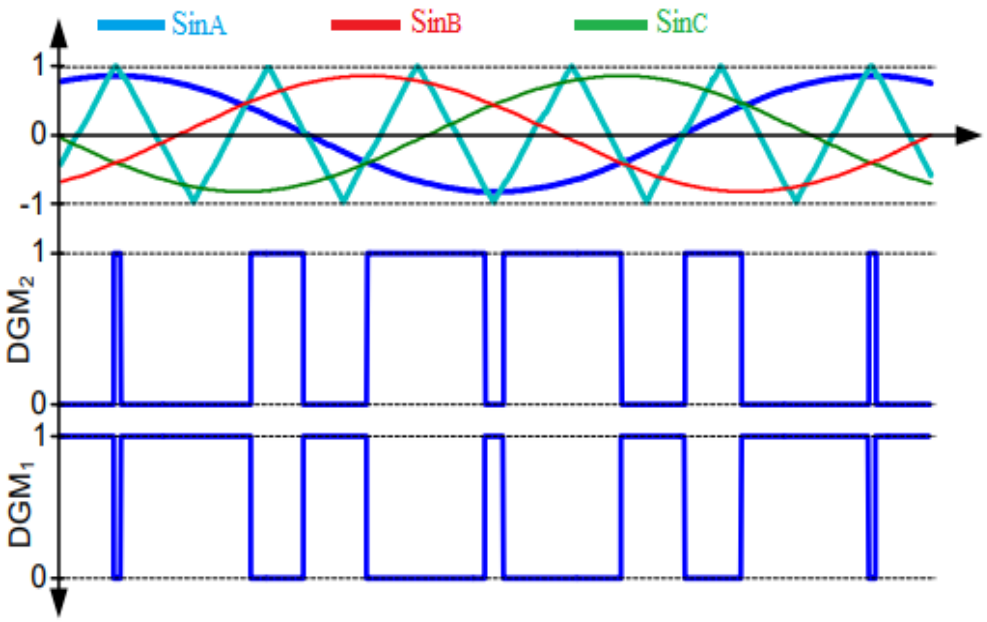
1. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM)
2. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM)
3. Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyonu (HEDGM)
4. Minimum Akım Dalgalanmalı Darbe Genişlik Modülasyonu (MADDGM)
5. Üçüncü Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu (UHIDGM)
6. Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu (HIDGM)
7. Değiştirilmiş Sinüsodial Darbe Genişlik Modülasyonu (DSDGM)
8. Sigma Delta Darbe Genişlik Modülasyonu (SDDGM)

2.7.1. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

Bu teknik endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen tekniklerden biridir. İki seviyeli SDGM tekniğinin geliştirilmesiyle çok seviyeli eviricilerde kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı tepe genliği $V_{üçgen}$, frekansı f_t olan taşıyıcı üçgen dalga ile daha düşük frekanslı tepe genliği V_p ve frekansı f_r olan bir sinüs işareti karşılaştırılarak tetikleme sinyallerinin üretimine dayalı olan yönteme SDGM denir. Şekil 2.13'te SDGM yönteminin temel prensibi gösteren, aralarında 120 derece faz farkı olan Sin_A, Sin_B, Sin_C referans sinyalleri ile üçgen sinyal görülmektedir. Ayrıca eviricinin bir kolu için gerekli olan DGM_1 ve DGM_2 sinyalleri verilmiştir. Bu sinyaller referans işaret olan Sin_A sinyali ile taşıyıcı üçgen sinyalinin karşılaştırılması sonucu elde edilmiştir (Fidanboy, 2011).

SDGM tekniği kare dalgadaki harmonikleri azaltmak için kullanılan en eski yöntemlerden biridir (Kang ve ark., 2000). Ayrıca sinüs biçimde bir gerilim elde etmek için

kullanılan en ekonomik ve en kolay uygulanabilen yaygın yöntemlerdendir (Asker ve ark., 2009).



Şekil 2.13. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon yönteminin temel prensibi

SDGM tekniğinde, modülasyon dalga genliğinin taşıyıcı dalga genliğine oranına modülasyon indeksi denir. Bu oranın lineer olabilmesi için modülasyon indeksinin 0 ile 1 arasında değişen bir değerde olması gerekmektedir. Modülasyon indeksi 'Mi' ile frekans indeksi ise 'M_f' şeklinde gösterilir. Buna göre modülasyon indeksi ve frekans indeksi şu şekilde hesaplanır (Tuncer, 2004);

$$M_i = \frac{Vp}{Vüçgen} \tag{2.4}$$

$$M_f = \frac{ft}{fr} \tag{2.5}$$

Yukarıdaki formüllerde;

M_i: Modülasyon indeksini, V_p Taşıyıcı işaretin genliği, M_f : Frekans indeksini, f_t : Taşıyıcı işaretin frekansını ve f_r : Referans işaretin frekansı göstermektedir.

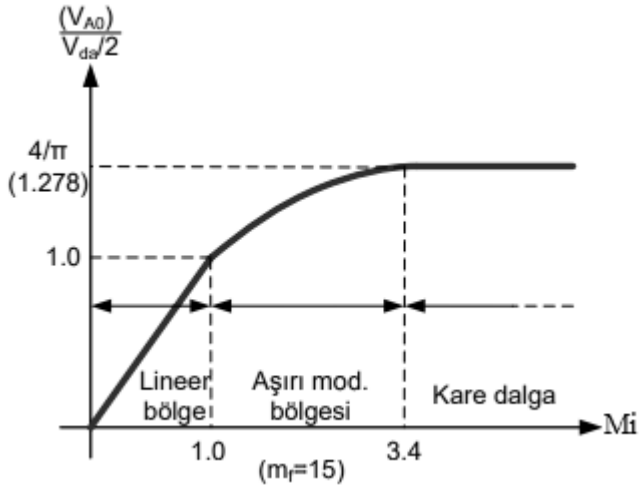
Modülasyon indeksine ait dört durum söz konusudur. Bunlar:

1. $M_i = 0$ olduğunda çıkışta anahtarlama frekansında kare dalga meydana gelir.
2. $0 \leq M_i \leq 1$ ise temel bileşen tepe değeri (V_0) ile M_i lineer değişmektedir.

$$V_0 = M_i \cdot \frac{Vda}{2} \tag{2.6}$$

3. $M_i = 1$ ise temel bileşen 0.5V değeri alır. Lineer bölge için maksimum değer olan bu değer, eviricinin oluşturabileceği maksimum değer olan ($4V_{da} / 2\pi$) kare dalga durumunun %78,55'ine tekabül eder.
4. $M_i > 1$ ise aşırı modülasyon bölgesidir. Bu bölgede lineerlik bozulur. M_i belli bir değerinden sonra kare dalga oluşur (Fidanboy, 2011).

Şekil 2.14'te SDGM'de modülasyon indeksine karşılık gelen gerilimin değişimi verilmiştir.



Şekil 2.14. SDGM'de modülasyon indeksine karşılık gelen gerilimin değişimi

Eviricilerde çıkış gerilimiyle kontrol sağlandığı gibi çıkış frekansıyla da kontrol sağlanabilir. Bu kontrol (2.5)'te verilen formülle hesaplanır. Yüksek frekanslı harmoniklerin daha kolay filtrelenebildiği göz önünde bulundurulunca, anahtarlama frekansının da o oranda yüksek olması tercih edilir. Fakat bu durum eviricilerde yüksek anahtarlama kayıplarına neden olur. Bu anahtarlama kayıplarını belirli bir seviyede tutmak için çıkış

frekansında taşıyıcı oranı küçültülür. Böylece $M_o \leq 1$ ve $M_f = 21$ olduğu denge noktası sınır değeri elde edilir (Kocalmış Bilhan, 2012).

Çok seviyeli eviricilerde kullanılan darbe genişlik modülasyon yöntemi iki seviyeli SDGM yönteminin geliştirilmiş halidir. Çok seviyeli eviricilerde referans işaretler aynı kalmak koşuluyla taşıyıcı işaretin sayısı evirici seviyesine göre artmaktadır. Eviricinin seviye sayısına 'm' denilirse, genlik ve frekansı birbirine eşit 'm-1' adet üçgen taşıyıcı işaret gerekir (Wei, 2003). Örneğin, üç seviyeli bir evirici için taşıyıcı üçgen işaret sayısı iki olacaktır. Bu taşıyıcı sinyaller sinüs dalgalar için referans sinyali olan dalgalarla karşılaştırılarak, evirici güç devresindeki H-köprü anahtarları için tetikleme sinyali elde edilmektedir. Bu yüzden modülasyon indeksi şu şekilde hesaplanır (Tolbert ve ark., 1998);

$$M_i = \frac{Vp}{(n-1)Vüçgen} \tag{2.7}$$

Sonuç olarak, SDGM tekniğinin uygulamalarda basit oluşu ve düşük harmonik içeriğe sahip oluşundan dolayı hem iki seviyeli eviricilerde hem de çok seviyeli eviricilerde yaygın olarak kullanılırlar.

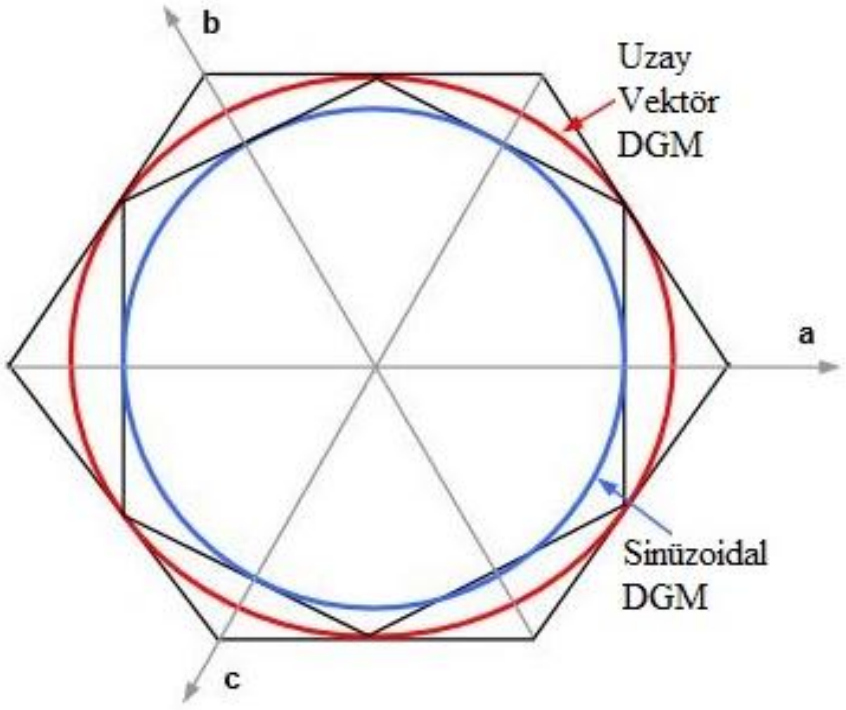
2.7.2. Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

Yirminci yüzyılın son çeyreğinden itibaren darbe genişlik modülasyonu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde UVDGM birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. UVDGM metodu, mikroişlemcilerde yaşanan gelişmelerle beraber darbe genişlik modülasyon teknikleri arasında en önemlilerden birisi haline gelmiştir. Bu tekniği önemli kılan unsurlar şunlardır (Rathnakumar, 2005);

- Dijital işlemcilerle kolayca uygulanabilir olması,
- Anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltması,
- Çıkış gerilimindeki harmonik bileşenleri minimize etmesi,
- Diğer modülasyon yöntemleri ile kıyaslandığında daha yüksek genlik modülasyon faktörleri elde edilmesidir.

İki seviyeli ve çok seviyeli eviricilerde yaygın olarak kullanılan UVDGM yöntemi, genlik ve frekansı kontrol ederek çıkış dalga formunun istenilen seviyede olmasını sağlarlar.

UVDGM yönteminin amacı, toplam harmonik bozunumu ve anahtarlama kayıplarını en düşük seviye indirgeyerek çıkış dalga formunu sinüzoidal hale getirmektir. Bu yüzden eviricideki anahtarların olası tüm durumları birer anahtarlama vektörüyle ifade edilir. Bu vektörlere ait anahtarlamaların tüm kombinasyonları matematiksel ifadeler yardımıyla belirlenerek en uygun anahtarlama durumu seçilir. UVDGM yöntemi SDGM yönteminde olduğu gibi herhangi bir kıyas söz konusu değildir. Anahtarlara ait iletim ve kesim süreleri matematiksel olarak hesaplanarak tablolar oluşturulur. Dolayısıyla, UVDGM yönteminde SDGM yöntemindeki gibi taşıyıcı bir üçgen sinyale ve referans dalga şekline gerek yoktur (Canbaz, 2014). Ayrıca, SDGM tekniğinde anahtarlama sayısı yüksek ve elde edilen maksimum çıkış dalga gerilimi düşüktür. Oysa UVDGM tekniğinde ise SDGM tekniğine kıyasla daha düşük harmonikli çıkış akımı ve daha yüksek çıkış dalga gerilimi elde edilmektedir. Şekil 2.15'te SDGM tekniğiyle UVDGM tekniğinin grafiksel olarak karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.15. SDGM tekniği ile UVDGM tekniğinin karşılaştırılması

UVDGM tekniği kullanılarak ulaşılabilen maksimum çıkış gerilim değeri, evirici kapasitesinin %90,6'sının kullanılmasıyla elde edilir. Bu yüzden, çıkış gerilim değerini yükseltmek ve evirici kapasitesinin tamamına yakınını kullanabilmek için bu modülasyon yönteminin geliştirilmesi gerekmektedir (Kocalmış Bilhan, 2012).

UVDGM tekniğinin temelinde, durağan referans çatıdaki gerilimin uzay vektör olarak ifade edilmesi vardır (Liu ve ark., 1991).

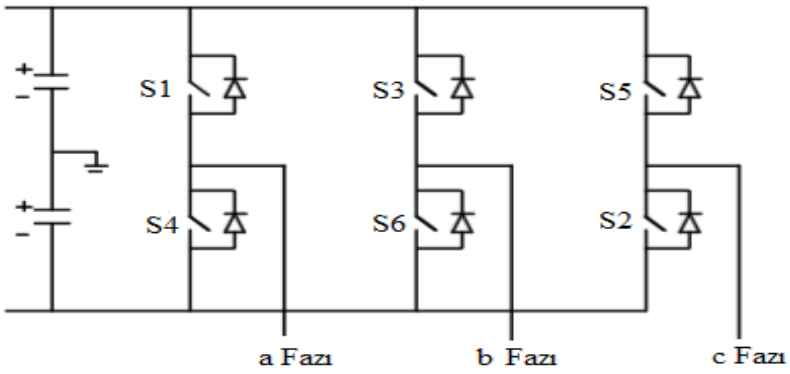
Çok seviyeli eviricilerde kullanılan darbe genişlik modülasyon tekniği aslında iki seviyeli eviricilerde kullanılan tekniğinin geliştirilmiş halidir. Bu yüzden çok seviyeli eviricilerde kullanılan UVDGM tekniğini anlamak için ilk olarak iki seviyeli UVDGM tekniğini anlamak gerekmektedir (Suh ve ark., 1999).

2.7.2.1. İki Seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği

İki seviyeli eviriciler için uzay vektör darbe genişlik modülasyon yöntemindeki üç fazlı referans gerilimler, clarke dönüşümü kullanılarak α-β uzayında anahtarlama vektörlerine dönüştürülmektedir. Dönüştürülen bu vektörün genliği ve faz açısı, üç fazlı büyüklüklerin anlık değerleriyle belirlenir. Eğer üç fazlı büyüklükler sinüzoidal ve dengeli ise vektör sabit bir açısal hızla dönecek ve sabit bir genliğe sahip olacaktır. Diğer bir deyişle dönen bir gerilim vektörü oluşacaktır. Üç fazlı gerilimlerin kartezyen koordinat sisteminde ifade şekli olan V_{ref} referans gerilim vektörünün clarke dönüşüm eşitliği şu şekilde tanımlanmıştır (Tuncer, 2004).

$$V_{ref} = V_d + j * V_q = \frac{2}{3}\left(V_{an} + V_{bn}\, e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{cn}\, e^{-j\frac{2\pi}{3}}\right) \tag{2.8}$$

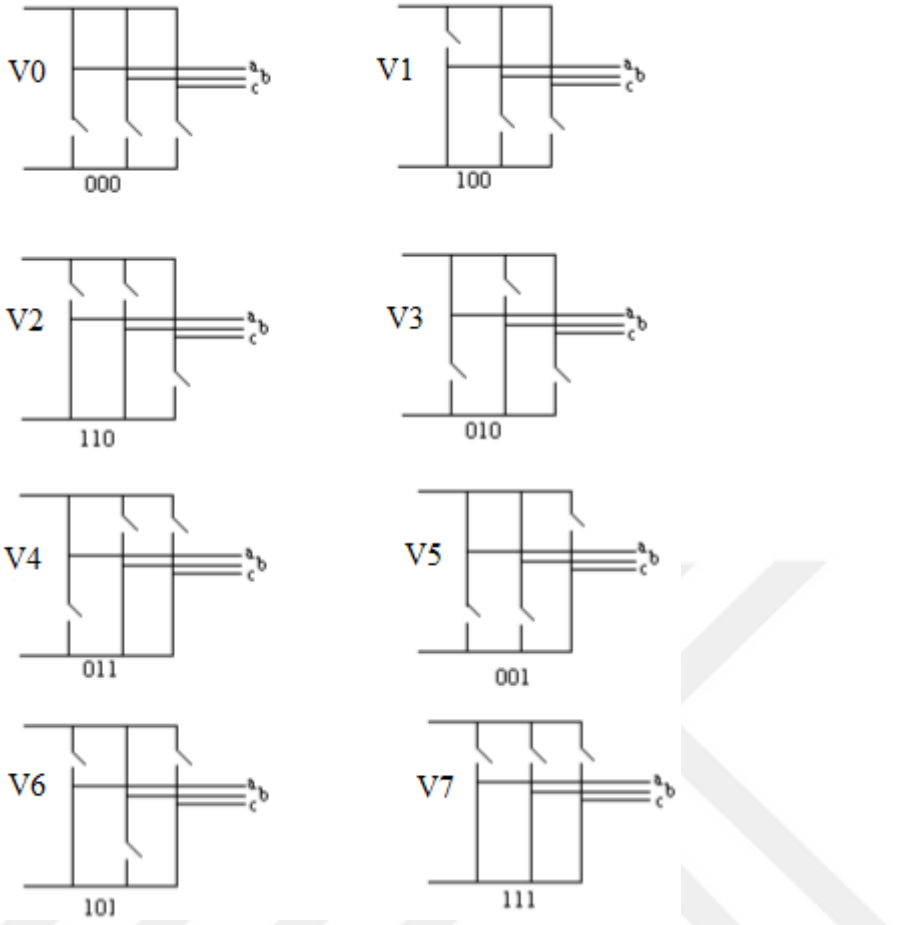
Bu denklemde V_{an}, V_{bn} ve V_{cn} üç fazlı sistemin nötr noktasına göre olan faz gerilimlerini ifade eder. Bu denklem aracılığıyla iki boyutlu olan bir düzlem üç boyutlu bir düzleme dönüştürülür. Şekil 5.4'te üç fazlı iki seviyeli evirici yapısı verilmiştir. Görüldüğü üzere bu eviricide 6 anahtar bulunmaktadır. Fakat bu devre için toplam 8 anahtarlama durumu söz konusudur. Evirici çıkış gerilimi bu 8 anahtarlama durumunun birleşmesinden oluşur. Bu anahtarlardan ikisi (0 ve 7) sıfır durum vektörünü; diğer altı anahtar ise (1,2,3,4,5,6) aktif durum vektörünü oluşturur. Bu yüzden, gerilim uzay vektörü 6 bölgeye ayrılmış altıgen bir yapıda olur.



Şekil 2.16. Üç fazlı iki seviyeli evirici yapısı

Şekil 2.16 devresinde S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ve S_6'dan oluşan altı adet güç anahtarı bulunmaktadır. Bu güç anahtarlarını a, b, c anahtarlama değişkenleri kontrol ederek çıkış dalga gerilimini şekillendirirler. Anahtarların üst baraya bağlı olanlardan biri iletime geçmesi durumunda a, b veya c '1' olduğunda; alt baraya bağlı ilgili anahtarlar ise kesime giderek '0' olmaktadır (Cordero ve ark., 2010).

Şekil 2.17'de hangi bölgede hangi anahtarın iletimde olduğu gösterilmiştir. Örneğin '100' anahtarlama durumu için a fazında S_1 anahtarı, b fazında S_6 anahtarı ve c fazında S_2 anahtarları iletimdedir. Buna göre 1 numaralı anahtar üzerindeki gerilim $+V_d/2$; 6 numaralı anahtar üzerindeki gerilim $-V_d/2$ ve 2 numaralı anahtarlar üzerindeki gerilim ise $-V_d/2$ olur.



Şekil 2.17. UVDGM'e ait 8 adet çalışma durumu

Eviricinin anahtarlama değişkenleri $[a\ b\ c]^t$ ve faz-faz gerilimleri $[V_{ab}\ V_{bc}\ V_{ca}]^t$ arasındaki bağıntı aşağıdaki şekildedir;

$$\begin{bmatrix} Vab \\ Vbc \\ Vca \end{bmatrix} = V_{da} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Ayrıca, anahtarlama değişkenleri $[a\ b\ c]^t$ ve faz-nötr gerilimleri $[V_{an}\ V_{bn}\ V_{cn}]^t$ arasındaki bağıntı da aşağıdaki şekildedir;

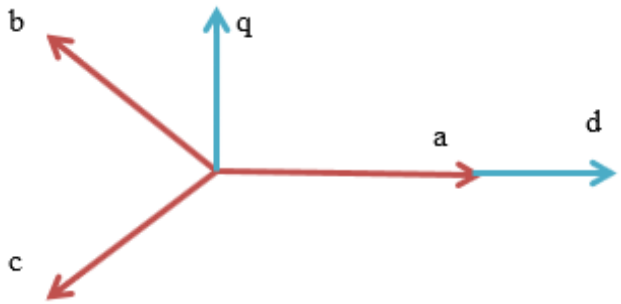
$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{Vda}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

Şekil 2.16'daki devrede üst baradaki üç güç anahtarının sekiz değişik anahtarlama durumu bulunmaktadır. Alt baradaki anahtarların anahtarlama kombinasyonları ise üsttekilerin tam tersidir. Yukardaki matris eşitliklerinden elde edilen UVDGM'ye ait 8 anahtarlama durumu, çıkış faz-nötr ve faz-faz gerilimleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. UVDGM'nin 8 anahtarlama durumu ve faz-nötr, faz-faz gerilimleri

Gerilim Vektörü	**Anahtarlama Vektörleri**			**Faz – Nötr Gerilimleri**			**Faz – Faz Gerilimleri**		
	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	0	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

UVDGM tekniğini gerçekleştirmek için abc referans düzlemindeki gerilim denklemleri Şekil 2.18'de görüldüğü gibi yatay 'd' ve düşey 'q' eksenlerinden oluşan d-q referans çatısına dönüştürülmesi gerekmektedir.



Şekil 2.18. abc ve d-q referans düzlemleri

İki referans düzlem arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$f_{dq0} = K_s * f_{abc} \tag{2.11}$$

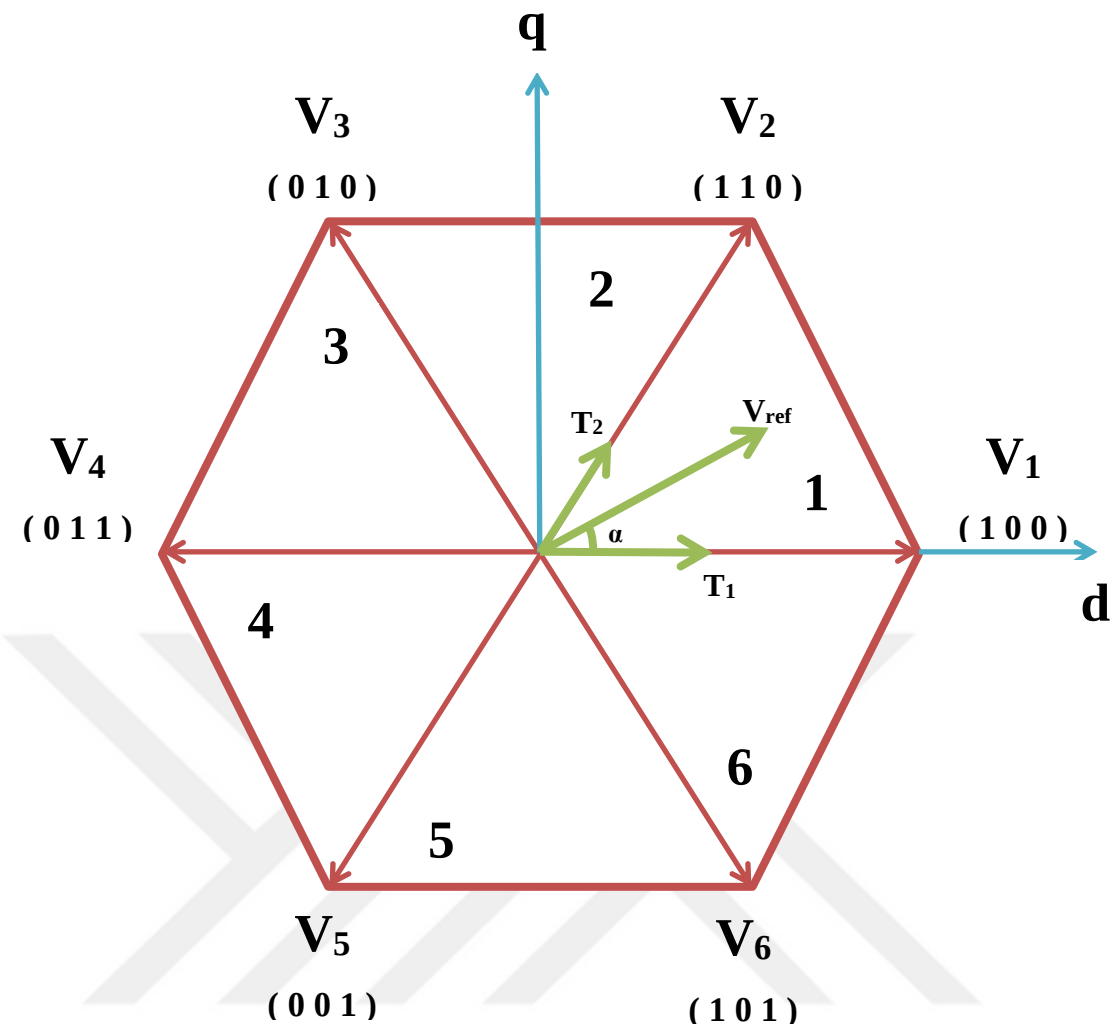
Burada K_S dönüştürme katsayısını; f ise akım veya gerilim değişkenini ifade eder ve aşağıdaki şekilde tanımlanırlar;

$$K_S = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

$$f_{dq0} = [fd \quad fq \quad fo]^T \tag{2.13}$$

$$f_{abc} = [fa \quad fb \quad fc]^T \tag{2.14}$$

Bu dönüştürme işlemleri neticesinde, Şekil 2.19'daki altıgenin köşe noktalarını oluşturan ve yükün güç ihtiyacını karşılayan altı adet aktif gerilim vektörü (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6) elde edilir. Ayrıca iki adet de merkezde yer alan ve yüke sıfır gerilim uygulayan sıfır gerilim vektörü (V_7,V_0) elde edilir. Komşu iki aktif gerilim vektörleri arasındaki açı 60 derecedir. UVDGM yönteminin temel amacı, sekiz anahtarlama kombinasyonunu kullanarak referans gerilim vektörünü (V_{ref}) yaklaşık olarak elde etmektir (Eskin, 2012).



Şekil 2.19. Anahtarlama vektörleri ve anahtarlama bölgeleri

İki seviyeli eviricilerde UVDGM'nin çıkış gerilimi aşağıdaki birkaç adım neticesinde elde edilir;

1. Adım: V_d, V_q, V_{ref} gerilimleri ve θ açısı hesaplanır,
2. Adım: V_{ref} 'in hangi sektörde olduğu belirlenir,
3. Adım: Her bir sektör için T_a, T_b ve T_o anahtarlama konum süreleri hesaplanır,
4. Adım: Hesaplanan sürelere uygun olarak anahtarlama sinyalleri üretilir.

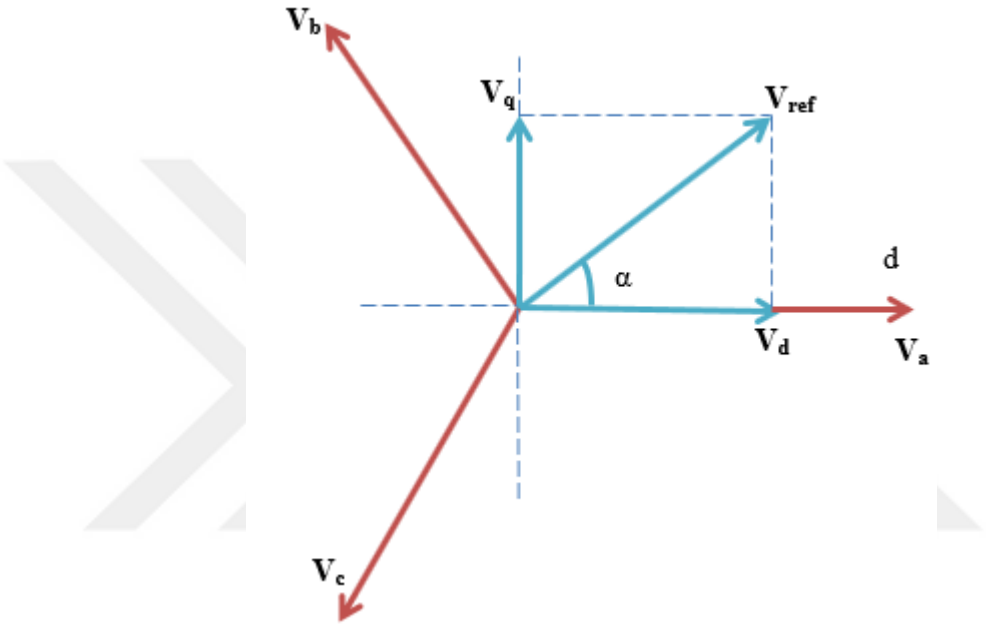
1. Adım: Eviricinin üretmesi gereken V_{an}, V_{bn}, V_{cn} gerilimleri Şekil 2.20'de gerilim uzay vektörü ve bileşenleri kullanılarak V_d ve V_q gerilimleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır.

$$V_{an}=V_m.\sin(\omega t) \quad (2.15)$$

$$V_{bn}=V_m.\sin(\omega t+2.\pi/3) \quad (2.16)$$

$$V_{cn}= V_m.\sin(\omega t-2.\pi/3) \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} \quad (2.18)$$



Şekil 2.20. Gerilim uzay vektörü ve bileşenleri

$$V_d = V_{an} - V_{bn}.\cos60 - V_{cn}.\cos60 = V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn} \quad (2.19)$$

$$V_q = 0 + Vbn.\cos30 - V_{cn}.\cos30 = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{cn} \quad (2.20)$$

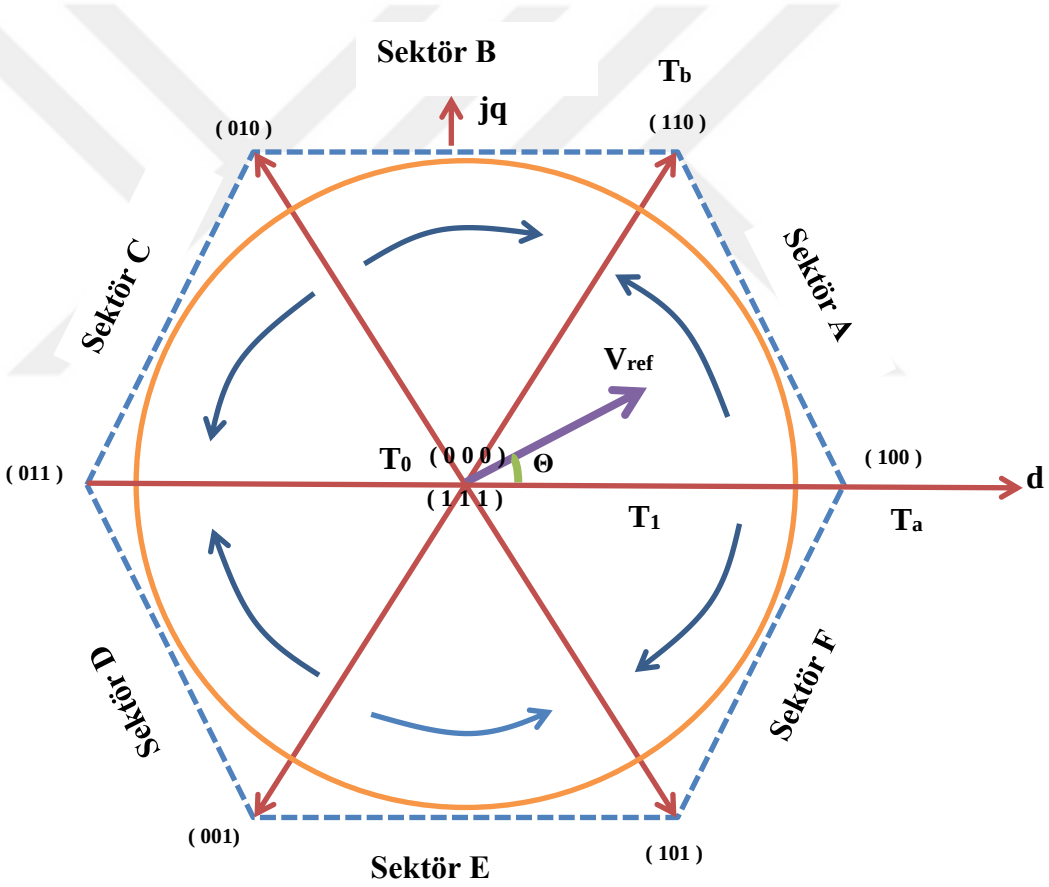
$$V_{ref} = \sqrt{Vd^2 + Vq^2} \quad (2.21)$$

$$\theta = \arctan V_q / V_d \quad (2.22)$$

2. Adım: Referans gerilim vektörünün (V_{ref}) hangi sektörde yer aldığını θ açısına bakarak tespit edilir. Açı değerine göre referans gerilim vektörünün hangi sektörde yer aldığı Tablo 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.21'de ise iki seviyeli eviricinin anahtarlama bölgeleri verilmiştir

Tablo 2.6. Açı değerlerine göre sektör belirlenmesi

AÇI (θ)	V_{ref}'in Bulunduğu Sektör
$0^\circ \leq \theta < 60^\circ$	Sektör A
$60^\circ \leq \theta < 120^\circ$	Sektör B
$120^\circ \leq \theta < 180^\circ$	Sektör C
$180^\circ \leq \theta < 240^\circ$	Sektör D
$240^\circ \leq \theta < 300^\circ$	Sektör E
$300^\circ \leq \theta < 360^\circ$	Sektör F



Şekil 2.21. İki seviyeli eviricinin anahtarlama bölgeleri

3. Adım: T_a, T_b ve T_o anahtarlama konum süreleri hesaplanır.

Sektör A için anahtarlama konum süreleri şu şekilde hesaplanır:

$$V_{ref} .T_s = V_a.T_a + V_b.T_b + V_o.T_o \quad (2.23)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_o \quad (2.24)$$

$$\int_0^{Ts} Vref\, dt = \int_0^{Ta} Va\, dt + \int_{Ta}^{Ta+Tb} Vb\, dt + \int_{Ta+Tb}^{Ts} Vo\, dt \quad (2.25)$$

$$T_a = \frac{\sqrt{3}.\ Vref}{Vda} . Ts . \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \quad (2.26)$$

$$T_b = \frac{\sqrt{3}.\ Vref}{Vda} . Ts . \sin(\theta) \quad (2.27)$$

$$T_0 = Ts - T_a - T_b \quad (2.28)$$

Bu denklemler z = 1-…- 6 sektör (A-…-F) için genelleştirilir ise;

$$T_a = \frac{\sqrt{3}.\ Vref}{Vda} . Ts . \sin(\frac{\pi}{3} - \theta + \frac{z-1}{3}\pi) = \frac{\sqrt{3}.\ Vref}{Vda} . Ts . \sin(\frac{z\pi}{3} - \theta) \quad (2.29)$$

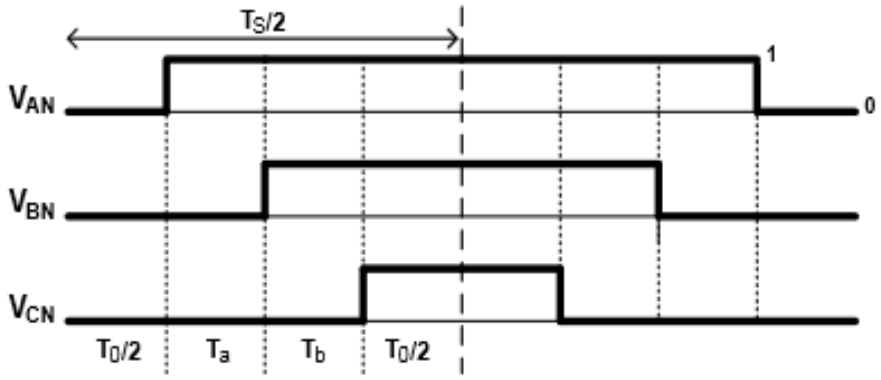
$$T_b = \frac{\sqrt{3}.\ Vref}{Vda} . Ts . \sin(\theta - \frac{z-1}{3}\pi) \quad (2.30)$$

$$T_0 = Ts - T_a - T_b \quad (2.31)$$

4. Adım: Her bir sektörün anahtarlama sıraları belirlenir ve anahtarlara uygulanır. Şekil 2.21'deki anahtarlama yönleri takip edilerek bütün anahtarlama durumları kullanılarak Tablo 2.7'deki anahtarlama sırası oluşturulur. Tablo 2.7 dikkatle incelenirse her bir sektör için gerçekleştirilen anahtarlamalar komşu anahtarlama sinyallerinin kullanılmasıyla gerçekleştirildiği görülür. Ayrıca, bir anahtarlama durumdan diğer bir anahtarlama duruma geçilirken sadece bir anahtarın konum değiştirmesi tercih edilir. Bununla beraber bütün anahtarlama durumlarının hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekir. Şekil 2.22'de sektör A için anahtarlama durumları ve konum süreleri verilmektedir. Diğer sektörler için de anahtarlama durumları ve konum sürelerine ait dalga şekilleri çizilebilir.

Tablo 2.7. İki seviyeli uzay vektör için anahtarlama sırası

Sektör Numarası	Anahtarlama Durumu
1. Sektör	000 – 100 – 110 – 111 – 111– 110– 100 – 000
2. Sektör	000 – 010 – 110 – 111 – 111– 110– 010 – 000
3. Sektör	000 – 010 – 011 – 111 – 111– 011– 010 – 000
4. Sektör	000 – 001 – 011 – 111 – 111– 011– 001 – 000
5. Sektör	000 – 001 – 101 – 111 – 111– 101– 001 – 000
6. Sektör	000 – 100 – 101 – 111 – 111– 101– 100 – 000



Şekil 2.22. Sektör A için anahtarlama durumları ve konum süreleri

2.7.2.2. Üç Seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği

Çok seviyeli eviricilerin yüksek güç uygulamalarında kullanımı mikroişlemcilerde meydana gelen gelişime paralel olarak artmıştır. Güç seviyesinin artışıyla beraber AA sürücü sistemlerinin yüksek kalitede evirici çıkışına sahip olması beklenir. Yani daha az harmonik ve tork darbelerinin olması beklenir.

İki seviyeli klasik evirici sistemlerinde, evirici çıkış akımının harmonik içeriklerinin minimize edilmesi anahtarlama frekansının artırılması ile yapılır. Bununla beraber, yüksek gerilim alanlarında, güç elemanlarının anahtarlama frekansı, anahtarlama kayıplarının artmasıyla birlikte 1 kHz' in altına sınırlanır. Bu durum iki seviyeli klasik eviricilerde artan anahtarlama frekansıyla birlikte harmoniklerin azalması yüksek güç uygulamalarında oldukça zor bir hale gelir (Eskin, 2012).

Harmonik azalımı ve yüksek gerilim seviyesinden dolayı çok seviyeli yaklaşım oldukça popüler bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, üç seviyeli eviricilerin harmonik içeriği aynı anahtarlama frekansındaki iki seviyeli eviricilerle kıyaslandığında iki seviyeli eviricilere göre oldukça az olduğu görülmektedir. Bununla beraber, anahtarlama elemanının kesme gerilimi, DA bara geriliminin yarısı kadardır. Bundan dolayı, üç seviyeli topoloji sistemi genellikle yüksek performanslı ve yüksek gerilim AA sürücü sistemlerinde tercih edilir.

İki seviyeli eviricilerin UVDGM yönteminin geliştirilmesiyle çok seviyeli evirici modeli ortaya çıkmıştır. Bu yüzden genel olarak aynı adımlar takip edilerek gerilim vektörü elde edilir. Ayrıca iki seviyeli eviricilerde olduğu gibi çok seviyeli eviricilerde de $V_d - V_q$ dönüşümü yapılarak V_{ref} gerilimi ve θ açısı hesaplanır. Bununla beraber 'n' seviye sayısı olmak üzere, çok seviyeli eviricilerde anahtarlama sayısı;

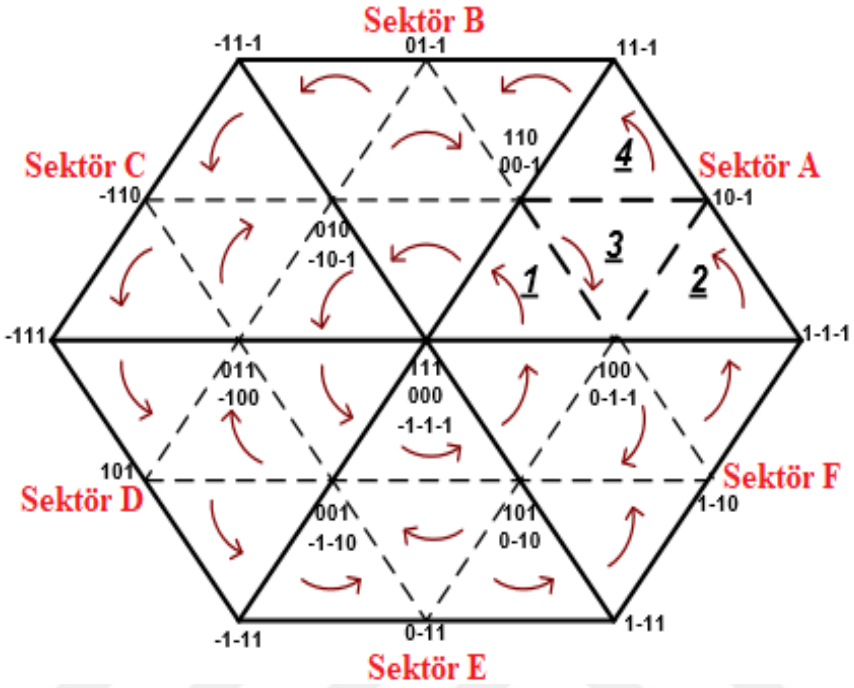
$$N_{anah.} = n^3 \tag{2.32}$$

olarak hesaplanır (Deniz, 2010). Böylece üç fazlı üç seviyeli bir eviricide UVDGM algoritması kullanıldığında toplamda 27 anahtarlama durumu söz konusudur (Mondal ve ark., 2001). Bu anahtarlama durumları daha önce çizilen iki seviyeli UVDGM diyagramına yerleştirildiğinde bazı anahtarlama durumlarının açıkta kaldığı görülür (Das ve ark., 2012). Bundan dolayı her sektör kendi içerisinde bölgelere ayrılır. Bu bölge sayısı n seviyeli bir evirici için şu şekilde hesaplanır;

$$N_{bölge} = (n-1)^2 \tag{2.33}$$

olarak hesaplanır. Böylece, üç seviyeli bir evirici için her bir sektör içerisinde 4 bölge bulunmaktadır. 27 anahtarlama durumundan 3 tanesi merkezde bulunan sıfır gerilim vektörüdür (000, 111, -1-1-1). Bu vektörler eviricinin bütün çıkışlarını aynı DA-link gerilim seviyesine bağlarlar ve bu yüzden de DA tarafında hiçbir akım üretilmez. Diğer 24 anahtarlama durumu ise aktif gerilim vektörleridir (Dordevic ve ark., 2011). Bu vektörler de kendi aralarında bulundukları yerlere göre 12 adet küçük vektör (110, 001,010,-10-1,011,-100,001,-1-10, 101,0-10,100,0-1-1), 6 adet orta vektör (10-1,01-1, -110,-101,011,1-10) ve 6 adet büyük vektör (1-1-1,11-1,-11-1,-111,-1-11,1-11) olarak kategorize edilirler. Şekil 2.23'te üç seviyeli bir eviricinin UVDGM diyagramı verilmiştir. UVDGM

incelendiğinde sıfır ve aktif gerilim vektörlerinin sabit genlikli oldukları görülmektedir. Bununla beraber referans gerilim vektörü ise değişken değerdedir (Kocalmış Bilhan, 2012).



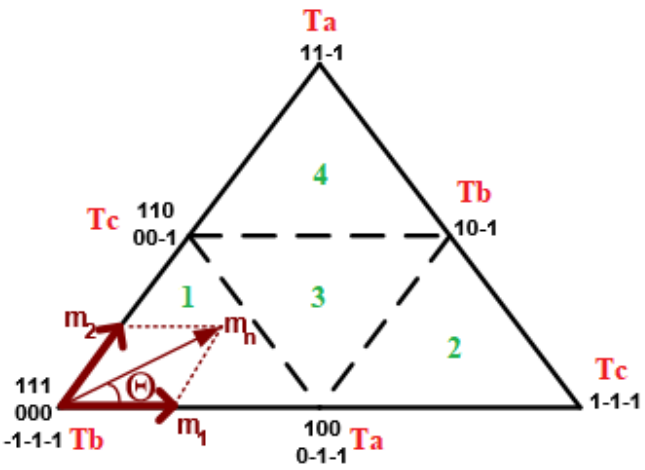
Şekil 2.23. Üç fazlı üç seviyeli eviricinin uzay vektör diyagramı

Ayrıca nötr noktasına bağlantıları olmadığı için kapasitelerin gerilim dengesine etki etmezler. En büyük genliğe sahip oldukları için de en yüksek AA gerilimi üretirler. Orta vektörler çıkışı farklı DA bara gerilim seviyelerine bağlarlar. Orta vektörlerin uzunluğu lineer modülasyon ve sabit durum şartları için referans vektörün maksimum genliğini verir. Bu genliğin uzunluğu da maksimum $\sqrt{3}/2$'dir. Bununla birlikte, orta vektörlerin bir çıkışı nötr noktasına bağlandığı için kapasitelerde dengesizliğe sebep olurlar. Küçük vektörler ise AA çıkış gerilimini iki ardışık DA bara gerilim seviyelerine bağlarlar. Uzunlukları büyük vektörlerin uzunluklarının yarısıdır ve çift vektörlerdir. Yani iki durumda da aynı çıkış gerilimi üretilir. Sıfır vektörler merkezdedir. Bu vektörler eviricinin bütün çıkışlarını aynı DA bara gerilim seviyesine bağladığı için DA tarafında hiçbir akım üretilmez.

Üç seviyeli eviricide çıkış geriliminin elde edilmesi için takip edilen adımlar şunlardır;

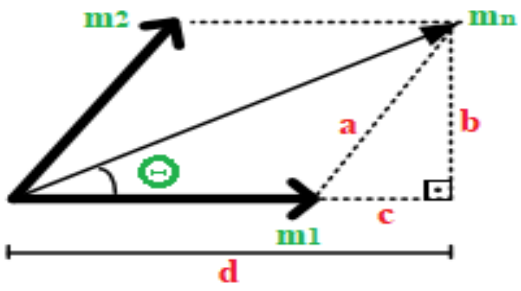
1. Adım: V_d, V_q, V_{ref} gerilimleri ve θ açısı hesaplanarak gerilim vektörünün hangi sektörde ve hangi bölgede olduğu tespit edilir,
2. Adım: Her bir sektör için T_a, T_b ve T_o anahtarlama konum süreleri hesaplanır,
3. Adım: Hesaplanan sürelere uygun olarak anahtarlama sinyalleri üretilir.

1. Adım: Denklem (2.23)'ten (2.28)'e kadar olan matematiksel denklemler kullanılarak V_{ref} gerilimleri ve θ açısı hesaplanır. Hesaplanan θ'nın değerine göre Tablo 2.6'dan yararlanarak gerilim vektörünün hangi sektörde olduğu tespit edilir. Eğer vektör, Sektör A içerisinde bulunuyorsa, artık hangi bölgenin içerisinde bulunduğu belirlenir. Sektör A'ya ait uzay vektör diyagramı Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.24. Sektör A'ya ait uzay vektör diyagramı

Şekil 2.24'te görüldüğü üzere gerilim vektörünün dört bölgeden hangisinde olduğunun tespit edilmesi gerekir. Bunun için de gerilim vektörü matematiksel denklemler yardımıyla m_1 ve m_2 şeklinde bileşenlerine ayrılır. Şekil 2.25'te m_1 ve m_2'nin hesabı için gereken çizim verilmiştir. Burada, abc kenarlarından oluşan dik üçgen ile uzunluklar matematiksel denklemler aracılığıyla hesaplanır.



Şekil 2.25. Sektör A içindeki bölgelerin tespiti

$b= m_n.\sin\theta$ ve $b= a.\sin 60$, buradan a değeri çekilirse m_2 bulunur.

$$A = m_2 = \frac{b}{\sin 60} = \frac{2}{\sqrt{3}} b = \frac{2}{\sqrt{3}} .m_n . \sin\theta \quad (2.34)$$

$$m_1 = d - c \quad (2.35)$$

$$m_1 = m_n \cos\theta - (\frac{2}{\sqrt{3}} .m_n . \sin\theta) . \cos 60 \quad (2.36)$$

$$m_1 = m_n (\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\sqrt{3}}) \quad (2.37)$$

Buradan m_1 ve m_2'nin değerlerine bakarak Sektör A için gerilim vektörünün hangi bölgede olduğu tespiti Tablo 2.8 yardımıyla bulunur. Diğer sektörler için de m_1 ve m_2 hesapları yapılarak bölge tespiti gerçekleştirilir.

Tablo 2.8. m_1 ve m_2 değerlerine göre bölge tespiti

Bölge Numarası	**m_1**	**m_2**	**$m_1 + m_2$**
1. Bölge	< 0.5	< 0.5	< 0.5
2. Bölge	> 0.5	–	–
3. Bölge	< 0.5	< 0.5	> 0.5
4. Bölge	–	> 0.5	–

2. Adım: Her bir sektördeki her bir bölgede farklı anahtarlama sayıları ve sıraları olacağı için her bölge için ayrı ayrı anahtarlama sürelerinin hesaplanması gerekir. Örneğin

Sektör A için 1. Bölge ele alınırsa toplamda 7 anahtarlama durumu söz konusudur ve bu anahtarlama sırası T_b, T_c ve T_a şeklinde olacaktır. Eğer anahtarlama konum süreleri hesaplanmak istenirse iki seviyeli uzay vektördekine benzer olarak süre hesabı yapılır.

$$V_{ref} . T_s = V_a . T_a + V_b . T_b + V_c . T_c \quad (2.38)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_c \quad (2.39)$$

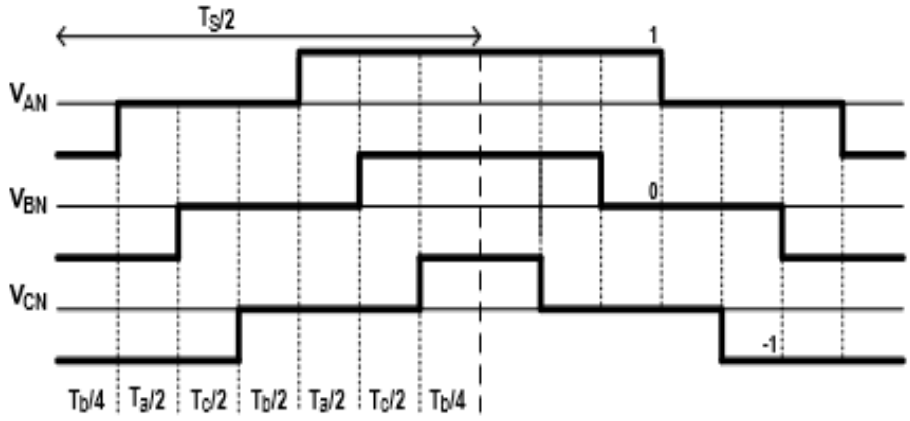
Denklem (2.39)'un ve V_a, V_b ve V_c gerilimlerinin yardımıyla her sektörün her bölgesine ait anahtarlama süreleri hesaplanır. Tablo 2.9'da Sektör A'dan Sektör F'ye kadar tüm sektörlere ait anahtarlama konum süreleri verilmiştir (Kocalmış, 2005).

Tablo 2.9. Sektör A-F'ye ait anahtarlama süreleri

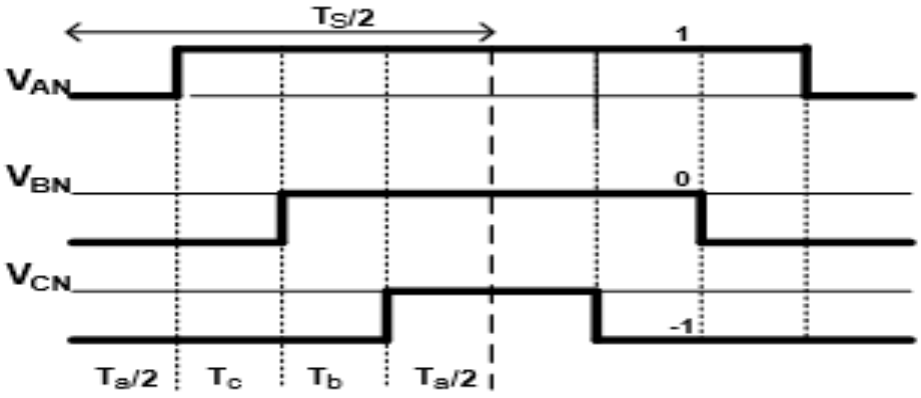
		1. Bölge	**2. Bölge**	**3. Bölge**	**4. Bölge**
SEKTÖR A	a	$T_s.k.\sin((\pi/3)-\Theta)$	$T_s(1-k.\sin((\pi/3)+\Theta))$	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta)-1)$
	b	$T_s/2(1-2.k.\sin((\pi/3)+\Theta))$	$T_s.k.\sin(\Theta)$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)+\Theta)-1)$	$T_s.k.\sin((\pi/3)-\Theta))$
	c	$T_s.k.\sin(\Theta)$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s(1-k.\sin((\pi/3)+\Theta))$
SEKTÖR B	a	$T_s.k.\sin(\Theta-(\pi/3))$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$
	b	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta))$	$T_s.k.\sin(\Theta-(\pi/3))$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$	$T_s.k.\sin(\Theta)$
	c	$T_s.k.\sin((\pi/3)+\Theta)$	$T_s(1-k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$
SEKTÖR C	a	$T_s.k.\sin(\Theta)$	$T_s(1-k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$
	b	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$-T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta-(\pi/3))-1)$	$T_s.k.\sin(\Theta)$
	c	$-T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta)-1)$	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$
SEKTÖR D	a	$-T_s.k.\sin(\Theta)$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta+(\pi/3))-1)$	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s(1+k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$
	b	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$-T_s.k.\sin(\Theta)$	$-T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s.k.\sin(\Theta-(\pi/3))$
	c	$T_s.k.\sin(\Theta-(\pi/3))$	$T_s(1+k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$	$-T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$

SEKTÖR E	a	$-T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$	$T_s(1+k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$-T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$
	b	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$	$T_s.k.\sin((\pi/3)-\Theta)$	$-T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$	$-T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$
	c	$T_s.k.\sin((\pi/3)-\Theta)$	$T_s/2(1+2.k.\sin((\pi/3)+))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s(1+k.\sin(\Theta))$
SEKTÖR F	a	$T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3))$	$-T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta))$	$T_s(1+k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$
	b	$T_s/2(1+2.k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s/2(2.k.\sin((\pi/3)-\Theta)-1)$	$-T_s.k.\sin(\Theta)$
	c	$-T_s.k.\sin(\Theta)$	$T_s(1+k.\sin(\Theta-(\pi/3)))$	$T_s/2(1-2.k.\sin(\Theta+(\pi/3)))$	$T_s/2(2.k.\sin(\Theta+(\pi/3))-1)$

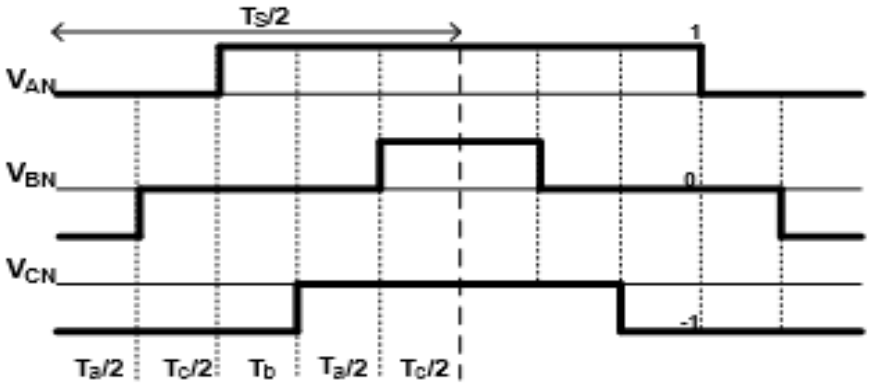
3. Adım: Gerilim vektörünün hangi sektörde ve hangi bölgede olduğunun tespitinden sonra T_a, T_b ve T_o anahtarlama konum süreleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerlere göre uygun anahtarlama sıraları seçilir ve uygulanır. Sektör A için uygulanacak anahtarlama sinyallerine ait dalga şekilleri Şekil 2.26'da Sektör A'ya ait anahtarlama durumlarını; Şekil 2.27'de de üç seviye UVDGM eviricinin anahtarlama sıraları verilmiştir (Mondal ve ark., 2002).



(a) 1. Bölge

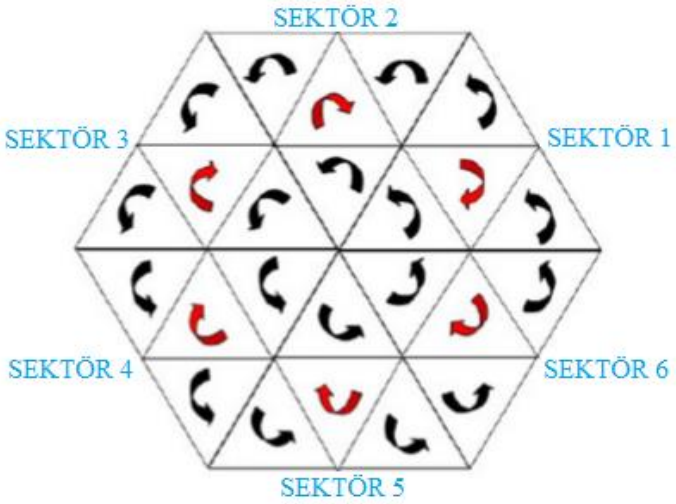


(b) 2. Bölge



(c) 3. Bölge

Şekil 2.26. (a), (b), (c) sektör A'ya ait anahtarlama durumları



Şekil 2.27. Üç seviyeli UVDGM eviricinin anahtarlama sırası

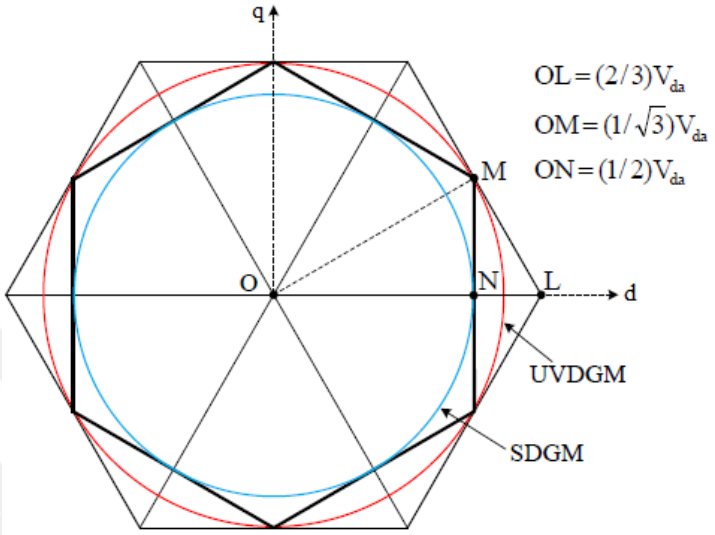
Sektör A için yapılan tüm bu işlemler diğer sektörler için de gerçekleştirilir. Tablo 2.10'da tüm sektörlere uygulanacak sinyallerin anahtarlama sırası verilmiştir (Bilhan, 2005).

Tablo 2.10. Sektörlerin tümüne ait anahtarlama sıralamaları

SEKTÖR	FAZLAR	1. BÖLGE	2. BÖLGE	3. BÖLGE	4. BÖLGE
SEKTÖR A	A	-1000111	0111	01111	0111
	B	-1-100011	-1-100	-11001	0011
	C	-1-1-10001	-1-1-10	-1-1-100	-1-1-10
SEKTÖR B	A	11000-1-1	1100	1000-1	00-1-1
	B	111000-1	1110	11100	1110
	C	1000-1-1-1	0-1-1-1	00-1-1-1	0-1-1-1
SEKTÖR C	A	-1-1-10001	-1-1-10	-1-1-100	-1-1-10
	B	-1000111	0111	-10111	0111
	C	-1-100011	-1-100	-10001	0011
SEKTÖR D	A	1000-1-1-1	0-1-1-1	0-1-1-1-1	0-1-1-1
	B	11000-1-1	1100	1-100-1	00-1-1
	C	111000-1	1110	11100	1110
SEKTÖR E	A	-1-100011	-1-100	-10001	0011
	B	-1-1-10001	-1-1-10	-1-1-100	-1-1-10
	C	-1000111	0111	00111	0111
SEKTÖR F	A	111000-1	1110	11100	1110
	B	1000-1-1-1	0-1-1-1	10-1-1-1	0-1-1-1
	C	11000-1-1	1100	1000-1	00-1-1

2.7.3. Üç Seviyeli SDGM ile UVDGM'nin Karşılaştırılması

SDGM ve UVDGM'ye ait lineer bölgedeki maksimum referans gerilim yörüngeleri Şekil 2.28'de verilmiştir (Michael, 2009).



Şekil 2.28. SDGM ve UVDGM için maksimum referans gerilimin yörüngeleri

UVDGM'na ait referans vektörünün maksimum genliği Şekil 2.28'de verilen altıgenin içine çizilen en büyük dairenin yarıçapına eşittir. Altıgenin aktif vektörü 2Vda/3 uzunluğundan oluştuğu için UVDGM'na ait maksimum referans vektörü şu şekilde elde edilir:

$$V_{ref_maks} = \frac{2}{3}Vda.\,Sin60 = \frac{2}{3}Vda.\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{Vda}{\sqrt{3}} \tag{2.40}$$

Elde edilen bu denklem UVDGM'nın modülasyon indeksinin hesaplanmasında kullanılan

$$M_i = \sqrt{3}\,\frac{Vref}{Vda} \tag{2.41}$$

(2.40)'daki denklemde yerine yazılırsa UVDGM'nın maksimum modülasyon indeksi $M_{i_maks} = 1$ olur. Bu değer SDGM'de olduğu gibi UVDGM'nın lineer modülasyon aralığında da $0 \leq M_i \leq 1$'dir. UVDGM tarafından üretilen faz-faz geriliminin ana harmonik değeri şu şekilde hesaplanır:

$$V_{ref_maks,UVDGM} = \sqrt{3}.V_{faz_eff} = \sqrt{3}.\left(\frac{Vref\ maks.}{\sqrt{2}}\right) = \sqrt{3}.\left(\frac{Vda}{\sqrt{3}\sqrt{2}}\right) = 0.707V_{da} \quad (2.42)$$

Eviricinin SDGM tekniği ile anahtarlanmasında faz-faz geriliminin ana harmonik değeri ise şu şekilde hesaplanır:

$$V_{ref_maks.,\ SDGM} = \sqrt{3}.V_{faz_eff} = \sqrt{3}.\left(\frac{Vref\ maks.}{\sqrt{2}}\right) = \sqrt{3}.\left(\frac{Vda}{2\sqrt{2}}\right) = 0.612V_{da} \quad (2.43)$$

Denklem (2.42) ile (2.43) birbirine oranlanırsa,

$\frac{Vref_maks.,UVDGM}{Vref_maks.,SDGM}$ = 1.155 elde edilir (Deniz, 2010).

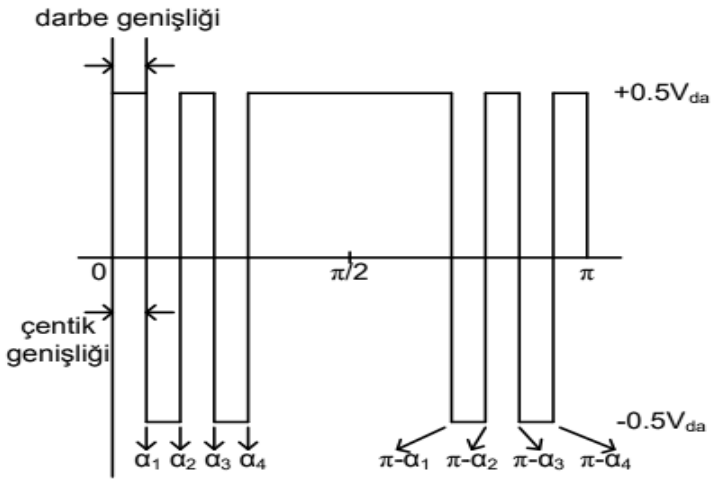
Elde edilen bu sonuç için şu yorumlar yapılabilir:

- Aynı modülasyon indeksi ve aynı V_{da} hat gerilimi için UVDGM tekniği kullanılarak SDGM tekniğine kıyasla evirici çıkışında %15 daha yüksek gerilim elde edilebilir.
- Aynı modülasyon indeksinde UVDGM için SDGM tekniğine kıyasla daha küçük V_{da} hat gerilimi kullanılarak her iki anahtarlama tekniği ile eviriciden aynı çıkış gerilimi elde edilebilir.

2.7.4. Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyonu

Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler evirici teknolojilerini de etkilemiştir. Anahtarlama elemanlarının kapanma süresi mikro saniyeler seviyesine düşmüştür. Dolayısıyla evirici devrelerindeki karmaşık anahtarlamalar yerini daha basit ve kolay uygulanabilir hale getirmiştir.

Harmonik eliminasyon tekniğinde, boşluklar (çentikler) ile darbeler kare dalganın önceden belirlenen açılarında oluşturulur. Bu kare dalganın istenmeyen harmonikleri açı sayısına bağlı olarak yok edilir ve ana dalgaya daha düzenli bir değişim verilir. Şekil 2.29'da HEDGM için faz gerilim dalga şeklinde gösterildiği gibi çıkış dalga şekli kare dalga simetrisine sahiptir (Önder, 2010).



Şekil 2.29. HEDGM için faz gerilim dalga şekli

Periyodik dalga şeklinin çeyrek dalga simetrisine sahip olduğu kabul edilen HEDGM metodunda genel fourier serisi şöyle ifade edilir (Önder, 2010);

$$V(t) = \sum_{n-1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.44)$$

Şeklindedir ve buradaki a_n ve b_n sabitleri;

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} V(t)\cos n\omega t d\omega t \quad (2.45)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} V(t)\sin n\omega t d\omega t \quad (2.46)$$

Bağıntılarıyla hesaplanır. Kosinüslü bileşenler sıfır olacağı için a_n=0 olacaktır. Bu yüzden;

$$V(t) = \sum_{n-1}^{\infty}(b_n \sin n\omega t) \text{ ise } bn = \frac{4}{\pi}\int_0^{\pi/2} V(t)\sin n\omega t d\omega t \quad (2.47)$$

olur. Genel bağıntılar kullanılırsa ;

$$\int_{a_1}^{a_2} \sin n\omega t d\omega t = \frac{1}{n}(1 - \cos n a_1) \quad (2.48)$$

$$\int_{a_k}^{n/2} 1 + \sin n\omega t d\omega t = \frac{1}{n}\cos n a_k \quad (2.49)$$

buradan;

$$b_n = \frac{4}{n\pi}[1 + 2(-\cos a_1 + \cos a_2 - \ldots\ldots + \cos a_k] \quad (2.50)$$

$$= \frac{4}{n\pi}[1 + 2\sum_{k-1}^{k}(-1)^k \cos a_k]$$

elde edilir. Buradaki k değişkenlerin sayısıdır ve α açısının k sayısıyla ana dalganın kontrolü sağlanır. Böylece k-1 tane harmonik ortadan kaldırılabilir. Bu bağıntılara göre 5. ve 7. harmonikleri yok etmek ve gerilimlerini kontrol etmek istendiğinde, yukardaki denklemler yardımıyla temel dalga, 5. ve 7. harmonikler için;

$$b_1 = \frac{4}{\pi}(1 - 2\cos a_1 + 2\cos a_2 - 2\cos a_3) \quad (2.51)$$

$$b_5 = \frac{4}{5\pi}(1 - 2\cos 5a_1 + 2\cos 5a_2 - 2\cos 5a_3) = 0 \quad (2.52)$$

$$b_7 = \frac{4}{7\pi}(1 - 2\cos 7a_1 + 2\cos 7a_2 - 2\cos 7a_3) = 0 \quad (2.53)$$

elde edilir. Çeşitli matematiksel yöntemler kullanılarak değeri bilinmeyen üç alfa açısı da tespit edilir.

HEDGM tekniğinde bilgisayar ve mikroişlemciler kullanılarak açı değerlerini ve harmonikleri gösteren çeşitli tablolar hazırlanır. Hazırlanan bu tablolar daha hızlı bir yakınsamayı sağlamak ve başlangıç değerleri gerçek sonuçlara yeterince yakın seçmek içindir. Bu da HEDGM tekniğinin en zor işidir (Önder, 2010).

2.7.5. Minimum Akım Dalgalanmalı Darbe Genişlik Modülasyonu

HEDGM tekniği, düşük mertebeli harmonikleri ortadan kaldırırken en yakın yüksek dereceli harmoniklerin sayısını arttırması bu tekniğin bir dezavantajıdır (Bilhan, 2005).

Bir makinenin harmonik kayıpları efektif akım dalgalanmasıyla belirlenebilir. Makineye ait kaçak indüktansı ile her harmonik gerilime tekabül eden harmonik akım değeri bulunur. Makine parametreleri bulunurken özellikle rotor sargılarında bir miktar hataya sebep olan deri etkisi ihmal edilir. Böylece, efektif akım dalgalanması (rms) şu şekilde bulunur (Önder, 2010);

$$I_{dalgalılık} = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \ldots}$$

$$= \sqrt{\frac{I_{3m}^2}{2} + \frac{I_{5m}^2}{2} + \frac{I_{7m}^2}{2} + \ldots} = \sqrt{\frac{1}{2}\sum\left(\frac{V_n}{n\omega_S L}\right)^2} \quad (2.54)$$

I_5, $I_{7\ldots}$: Efektif akım dalgalanması (rms) harmonik akımlarını

I_{3m}, I_{5m} ... : Harmonik akımlarının tepe değerlerini

L : Makinenin faz başına kaçak indüktansını

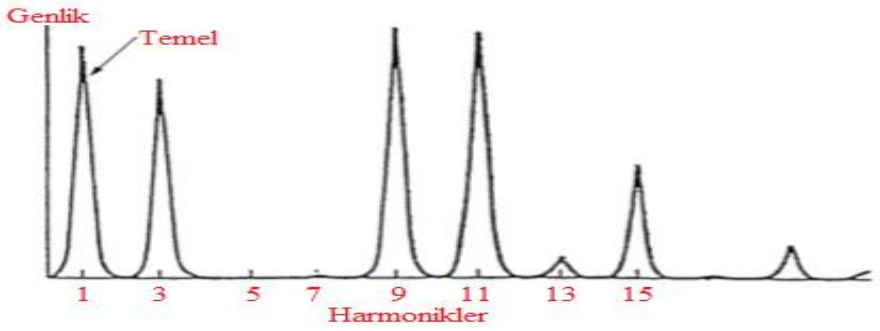
N : Harmonik derecesini

V_n : n. harmoniğin tepe değerini

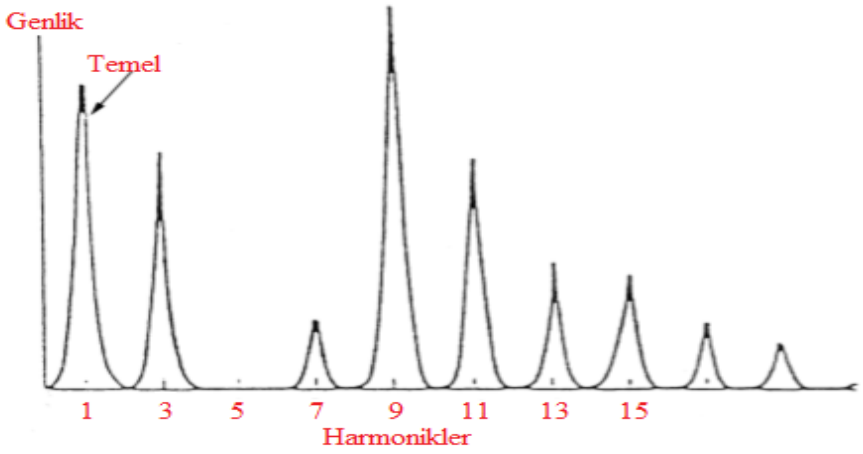
ω_S : Ana frekansı

göstermektedir.

Denklemlerden görüldüğü üzere $I_{dalgalılık}$ akımı α açı sayısının bir fonksiyonu olarak bulunur. Bu açılar bilgisayar programı yardımıyla hesaplanarak dalgalılık akım değeri bulunur. Harmonik kayıpların azaltılması yöntemine dayanan modifiye adilmiş açı tablosu HEDGM tekniğinde daha çok tercih edilir. Şekil 2.30'da 5. ve 7. harmoniklerin eliminasyonu sonucu oluşan sinyalin harmonik analizi ve Şekil 2.31'de minimum akım dalgalık metodunda çıkış gerilimin spektrum analizi görülmektedir.



Şekil 2.30. 5. ve 7. harmoniklerin eliminasyonunun harmonik analizi



Şekil 2.31. Minimum akım dalgalılık metodunda çıkış gerilimin spektrum analizi

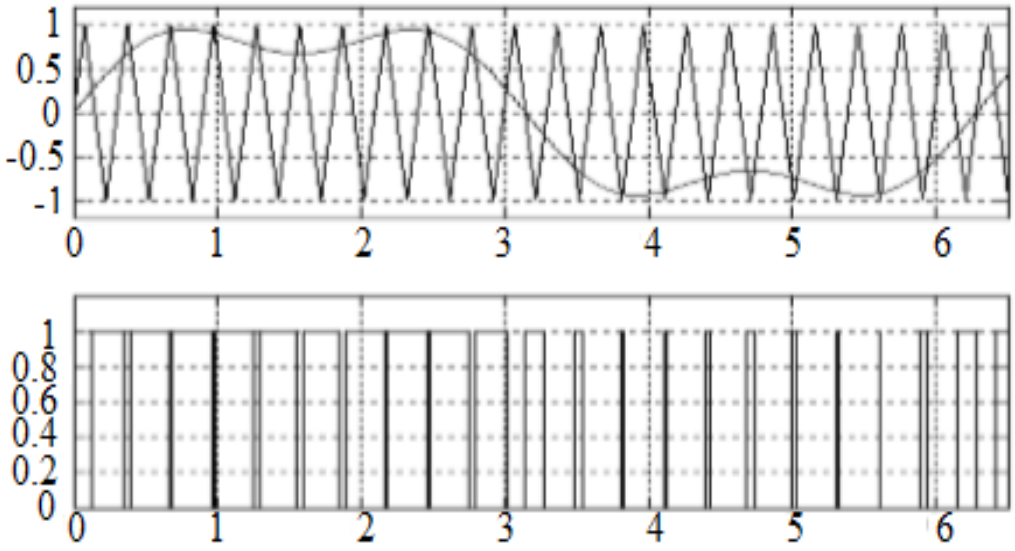
Şekillerden de görüldüğü gibi 7. harmonik yeniden belirtilmiş; ama ll. harmonik bu defa daha düşük genlikli hale gelmiştir. Ayrıca 3 ve 3' ün katları olan harmonikler de ihmal edilmiştir.

2.7.6. Üçüncü Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu

SDGM'den türetilmiş olan bu yöntem temel olarak SDGM ile aynıdır. Bununla beraber üçüncü harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyonu yönteminde, adından da anlaşıldığı üzere 3. harmonikler de bulunur. Bu yüzden modülasyon dalgası SDGM'den daha fazla modülasyona izin verir.

$$V^* = V.Sin\omega t + (1/6)sin3\omega t \qquad (2.55)$$

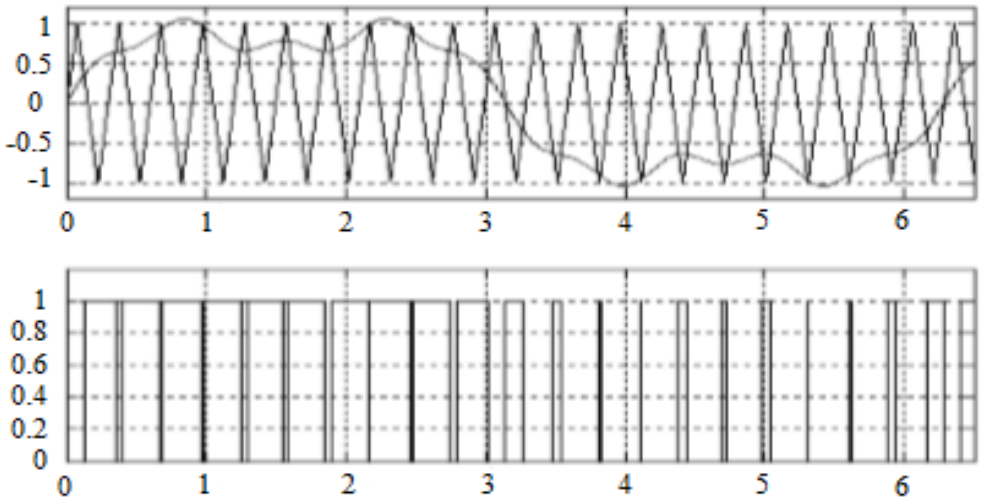
Böylece faz gerilimin temel bileşeni 3. harmonik bileşenine sahip olsa bile %15.5 kadar bir artış gösterir. Ayrıca 3 fazlı evirici çıkışının faz geriliminde bulunan 3 ve 3'ün katı harmonikler faz-faz gerilim dalga şeklinde görülmezler. Bu tekniğin en önemli avantajı yüksek çıkış geriliminin elde edilmesidir. Dezavantajı ise faz-nötr geriliminde yüksek dereceli 3. harmonik bileşenin bulunmasıdır. Bununla beraber eğer sistem üçgen bağlıysa 3 ve 3'ün katı harmonikler fazlar arası gerilimde elimine olacaktır. Şekil 2.32'de UHIDGM görülmektedir (Kocalmış ve ark., 2006).



Şekil 2.32. Üçüncü harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyonu

2.7.7. Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu

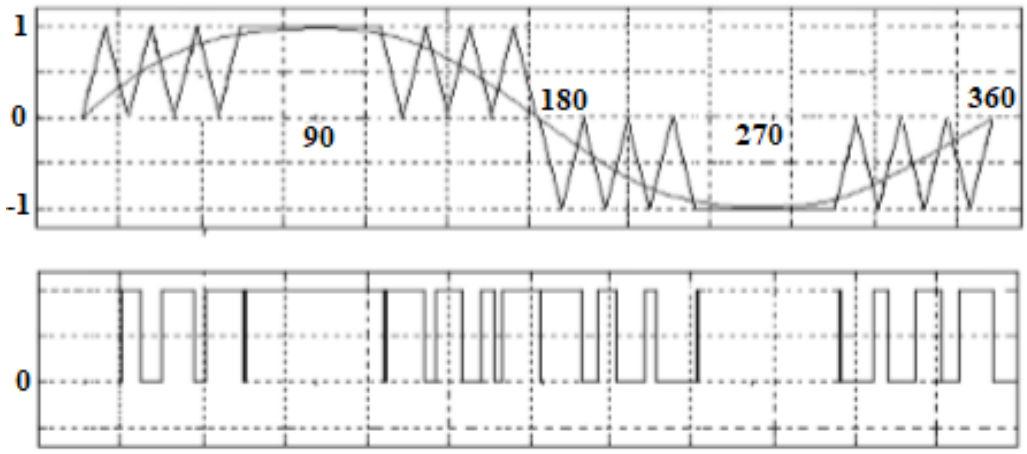
Bu yöntem üçüncü harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyonunun farklı bir versiyonudur. Bu teknikte frekans düzeltilerek modülasyon dalgasına bazı harmonikler eklenmek suretiyle aşırı modülasyona izin verilir. Ayrıca üçüncü harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyonu ile benzer olumsuzluklara sahiptir. Şekil 2.33'te 3. ve 9. harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyon işareti görülmektedir.



Şekil 2.33. 3. ve 9. harmonik ilaveli darbe genişlik modülasyon işareti

2.7.8. Değiştirilmiş Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

Bu yöntem SDGM'in bir benzeridir. Modülasyon indeksinin çok yüksek olduğu bir değerde SDGM kullanılırsa modülasyon dalgasının tepesine yakın çentikler çok büyük olur. Bu da anahtarlama kayıplarının gereksizce oluşmasına sebep olur. Bununla beraber, yüksek frekanslardaki anahtarlamalar sürücü anahtarlarında ekstra gerilimler oluşturacaktır. Bu sıkıntıyı ortadan kaldırmak adına değiştirilmiş sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu yöntemi kullanılır. Bu yöntemde taşıyıcı dalgaya ait tepe değeri 60° ile 120° arasında uzun bir darbe oluşturur. Böylece evirici kare dalgaya yakın bir çıkış verir. Bu yöntemin dezavantajı ise çok karmaşık bir yazılıma ihtiyaç duyması ve faz-nötr geriliminde yüksek bir üçüncü harmonik barındırmasıdır. Şekil 2.34'te DSDGM'a ait dalga şekilleri görülmektedir.

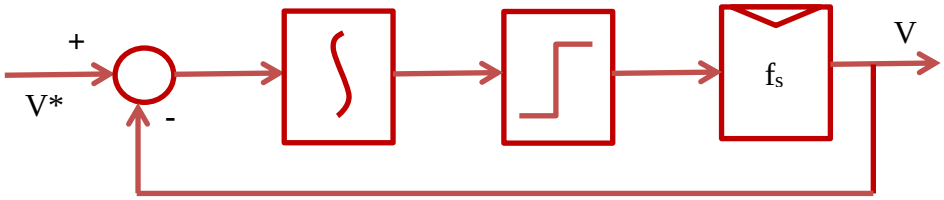


Şekil 2.34. DSDGM'in dalga şekilleri

2.7.9. Sigma Delta Darbe Genişlik Modülasyonu

Bu yöntem geliştirilmiş bir darbe genişlik modülasyon tekniğidir. Özellikle sabit akıma ihtiyacı olan motor sürücüleri için kullanılır. İntegratör ve bir schmitt trigger devresinden meydana gelir. Sigma delta modülasyonlu bir eviricinin performansı düşüktür. Ayrıca yüksek performanslı sürücülerde anahtarlama frekansı bağımsız kontrol edilemediğinden ve integratör zaman sabitinden dolayı bu tekniğin kullanımı imkânsızdır (Jacob ve ark., 2010).

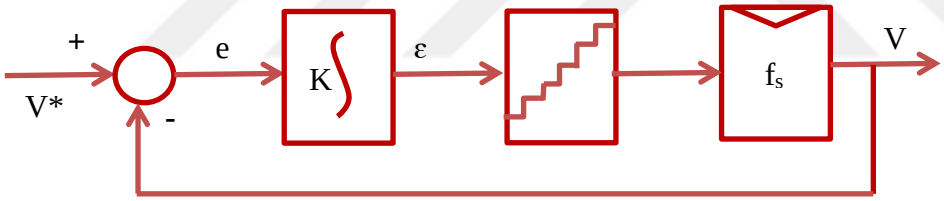
Sigma delta modülasyon yöntemi farklı darbe genişlik modülasyon sistemlerinde çıkış gerilim dalga şeklini oluşturmada başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Şekil 2.35'te iki seviyeli sigma delta modülasyonuna ait blok şeması görülmektedir.



Şekil 2.35. İki seviyeli sigma delta modülasyonun blok şeması

Burada; V^*: İstenilen çıkış gerilimini, V: Oluşturulan çıkış gerilimi, f_s: Örneklenme frekansını gösterir.

Sigma delta darbe genişlik modülasyon yöntemi iki seviyelilerde kullanıldığı gibi çok seviyeli dalga şeklinde de kullanılabilir. Bunu gerçekleştirmek için Şekil 2.36'da gösterilen blok şemadan yararlanılır.



Şekil 2.36. Çok seviyeli sigma delta modülasyonun blok şeması

Burada; K katsayısı: İntegratör kazancını ifade eder. Ayrıca f_s güç devresine göre seçilmelidir (Manjrekar, 1996).

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. SDGM ve UVDGM Eviricilerinin Benzetimleri

Şebekeden bağımsız iki seviyeli SDGM ile üç seviyeli UVDGM kontrol yöntemi kullanılarak Tablo 3.1'de verilen parametreler yardımıyla benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R/R-L yüklü SDGM ve UVDGM için benzetim parametreleri

Evirici Giriş Gerilimi (V_{da})	SDGM = 777.817 V , UVDGM = 550.082 V
Şebeke Frekansı	50 Hz
Transformatör	4.5 KVA
Filtre	200 W(aktif), 1.4 KVAR (Kapasitif), 380 Vtt (rms)
Modülasyon İndeksi (M_i)	0,8
Yük: R için	4 KW (aktif)
Yük: R-L için	4 KW (aktif), 1.5 KVAR (Endüktif), 380Vtt (rms)

Benzetimler neticesinde SDGM ve UVDGM için çıkış gerilimlerinin Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak hesaplanırsa teorik olarak aşağıdaki gibi bir değerde olması beklenir.

$V_{çıkış_SDGM} = Mi \,.\, \frac{Vda}{2} = 0{,}8 \,.\, \frac{777.817}{2}$ = 311.126 V (Akmaz ve ark., 2016).

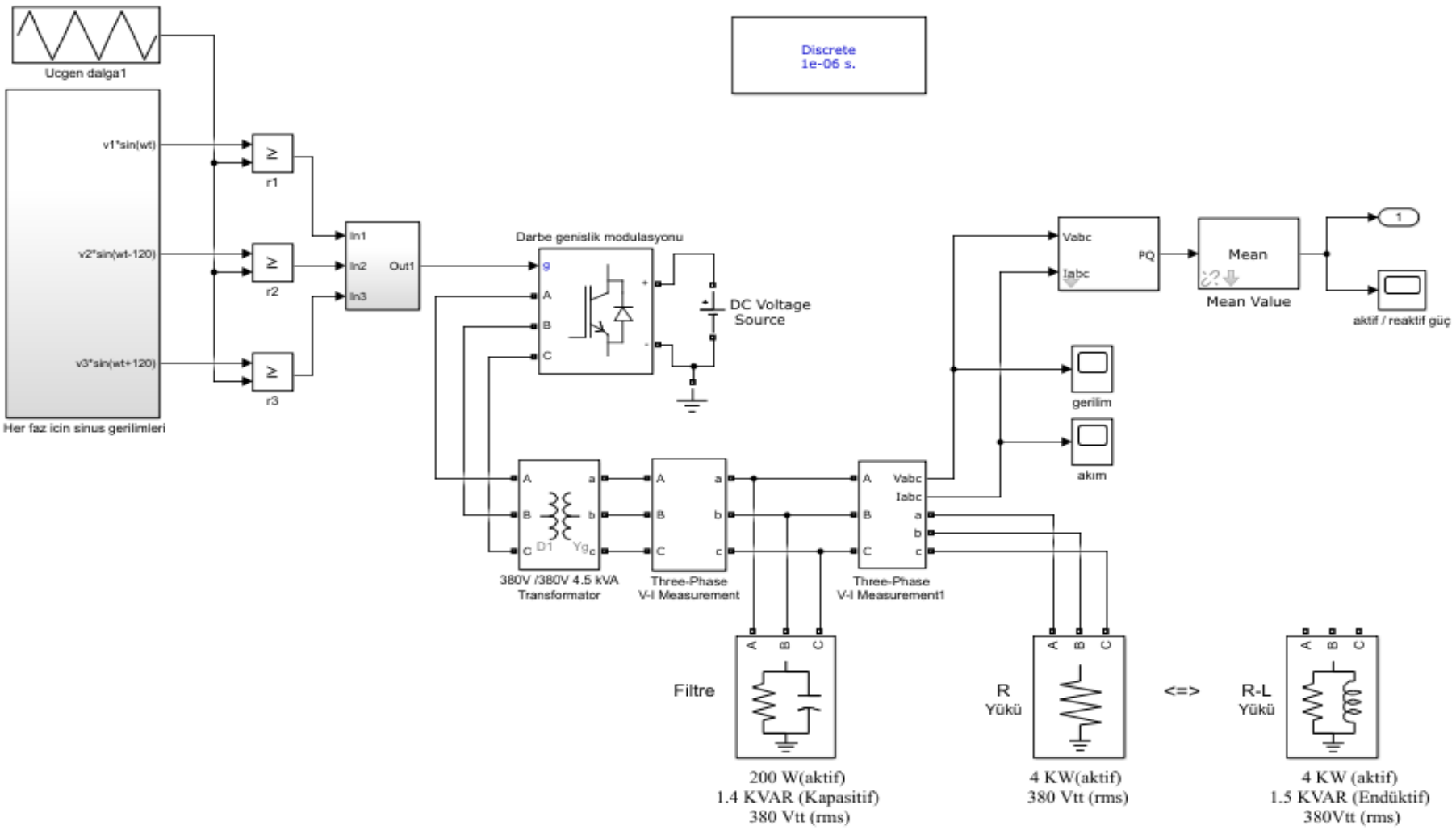
$V_{çıkış_UVDGM} = 0.707.\,Mi.\,Vda = 0.707.\,0{,}8\,.\,550.082$ = 311.126 V (Deniz, 2010).

3.2. R / R-L Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricinin Benzetimi

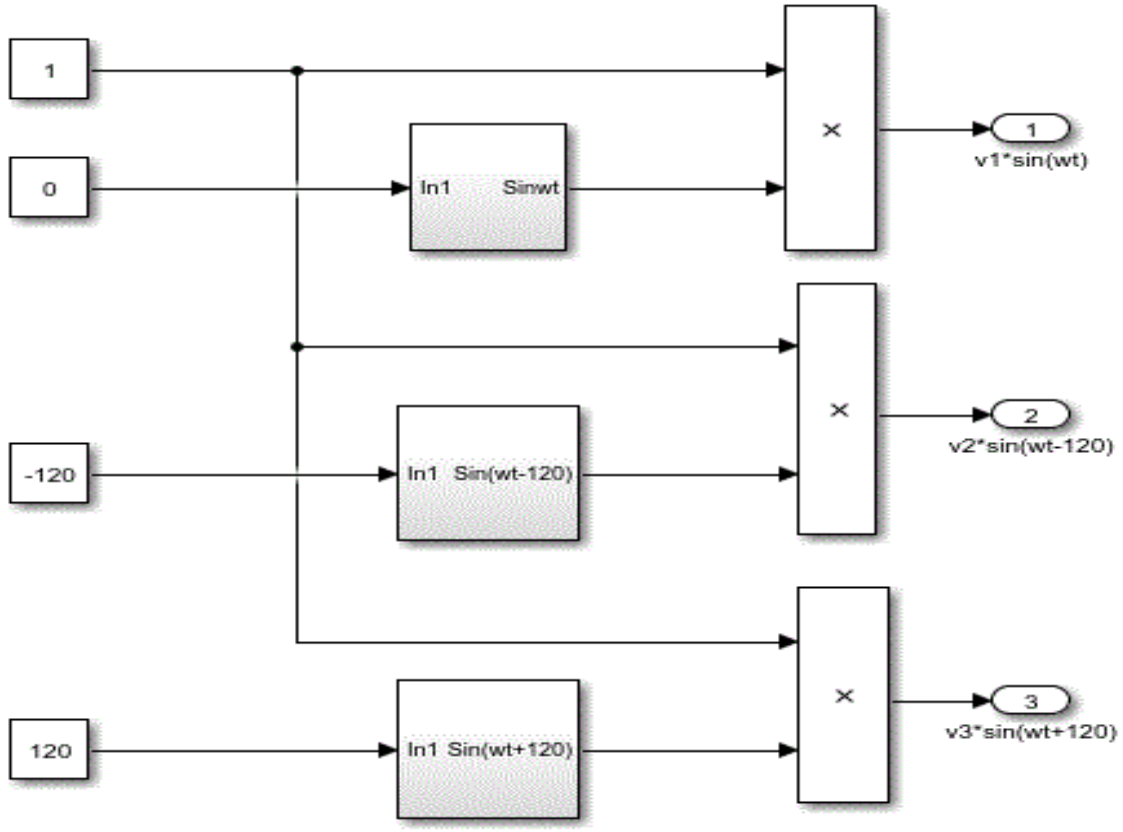
SDGM kontrol yöntemi kullanılarak R / R-L yüklü iki seviyeli bir eviricinin benzetimi yapılmıştır. Bu teknikte şu adımlar izlenmektedir:

1. Farklı genlik ve frekanstaki sinüzoidal referans işareti daha yüksek frekanslı üçgen dalga taşıyıcı işaretle karşılaştırılması yapılır.
2. Oluşan kesişim noktalarıyla anahtarlama elemanlarının anahtarlama süreleri ve güç anahtarları için gerekli olan tetikleme sinyali elde edilerek uygulanır.

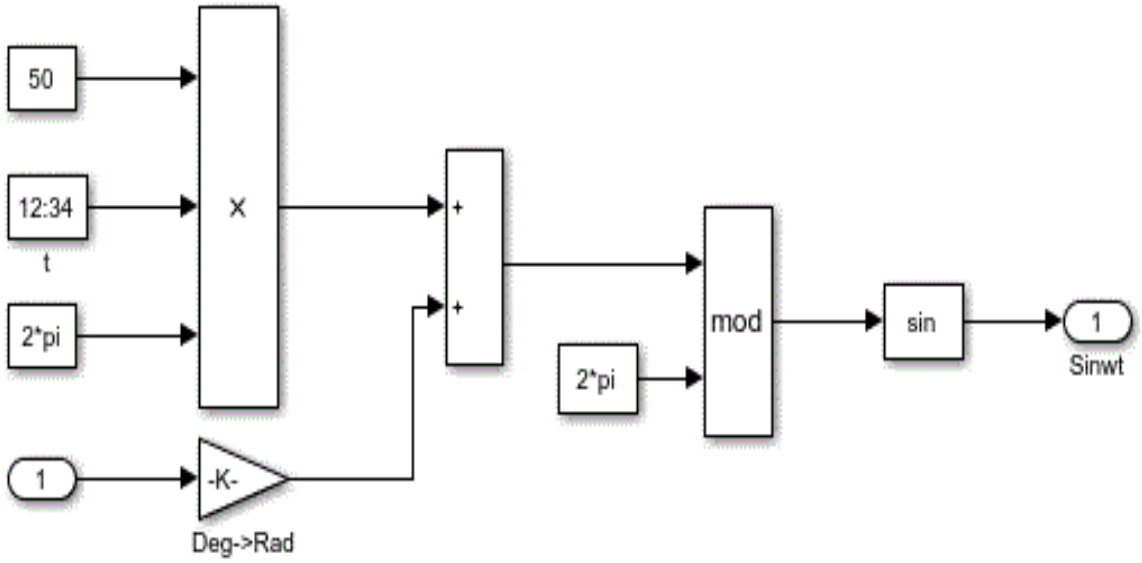
Şekil 3.1'de R / R-L yüklü iki seviyeli SDGM kontrollü eviricinin MATLAB/Simulink benzetim modeli verilmiştir. Şekil 3.2'de her faz değeri için sinüs gerilimlerinin hesaplandığı bloklar, Şekil 3.3'te sin(wt) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı, Şekil 3.4'te sin(wt-120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı ve Şekil 3.5'te ise sin(wt+120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı verilmiştir.



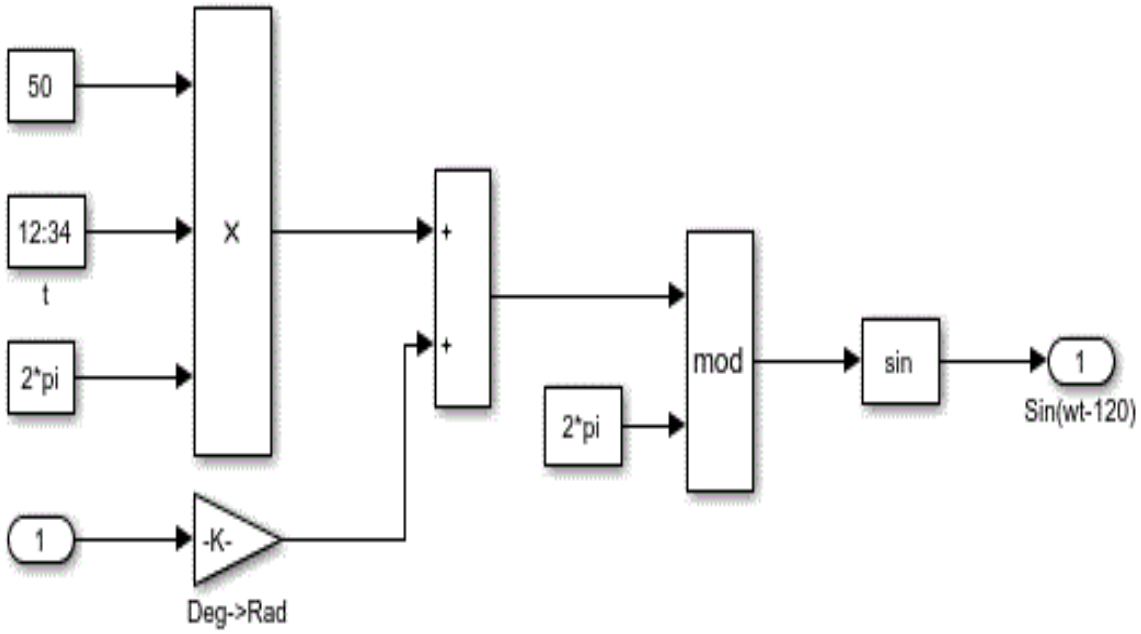
Şekil 3.1. R / R-L yüklü iki seviyeli SDGM eviricinin benzetimi



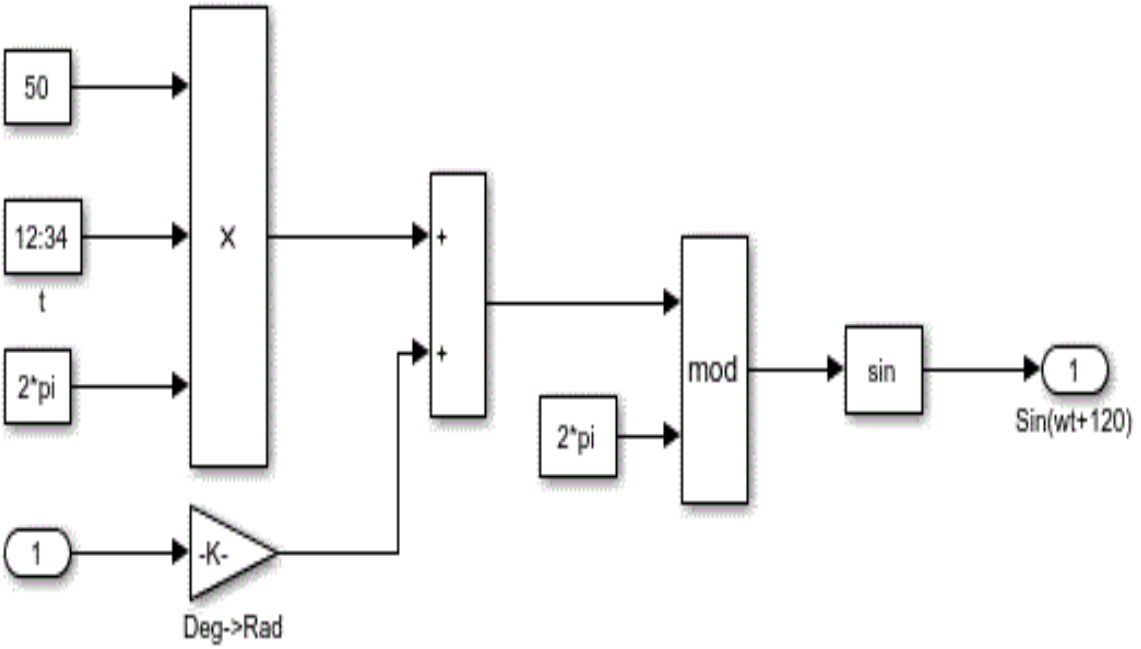
Şekil 3.2. Her faz değeri için sinüs gerilimlerinin hesaplandığı bloklar



Şekil 3.3. Sinwt değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı



Şekil 3.4. Sin(wt-120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı



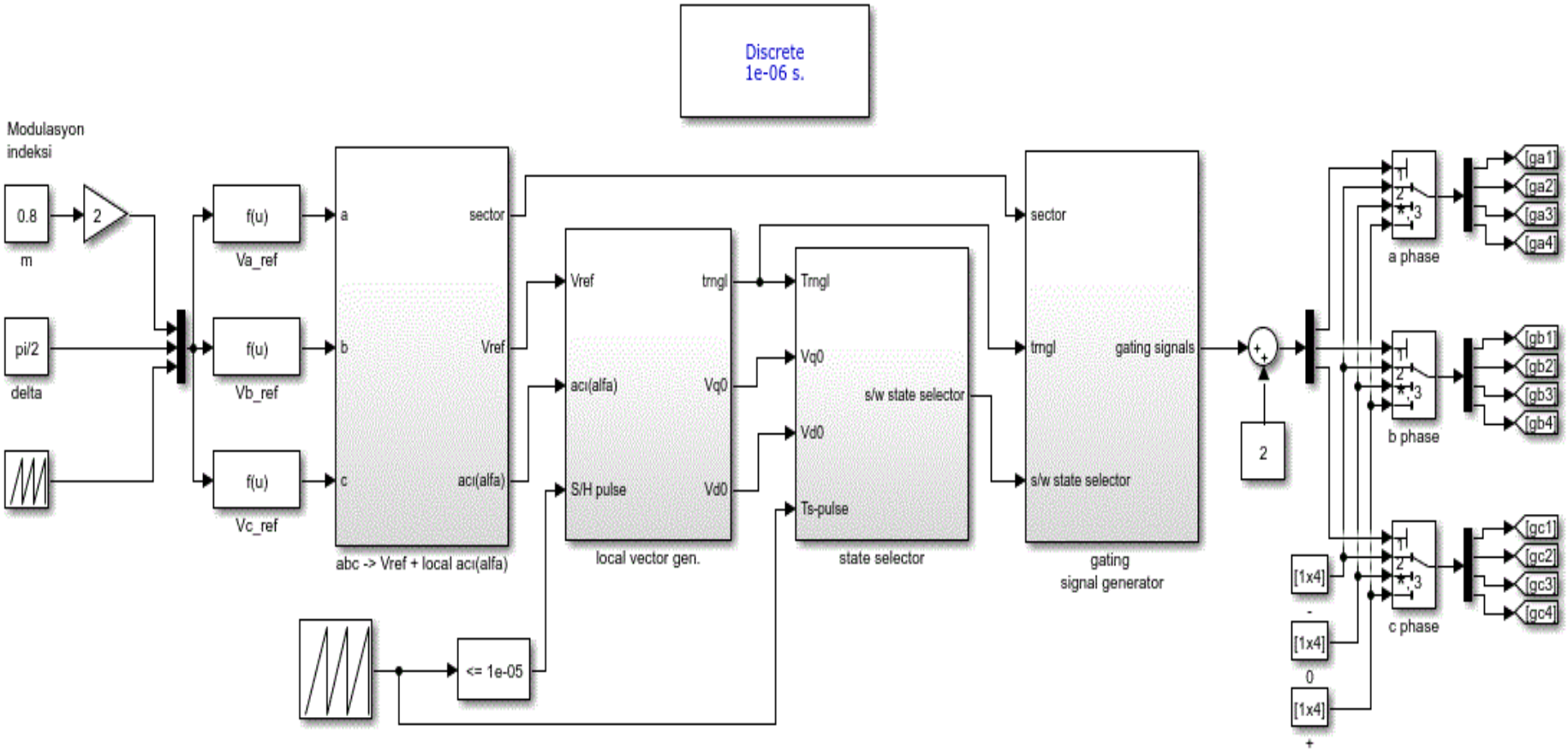
Şekil 3.5. Sin(wt+120) değerinin hesaplandığı bloğun iç yapısı

3.3. R / R-L Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricinin Benzetimi

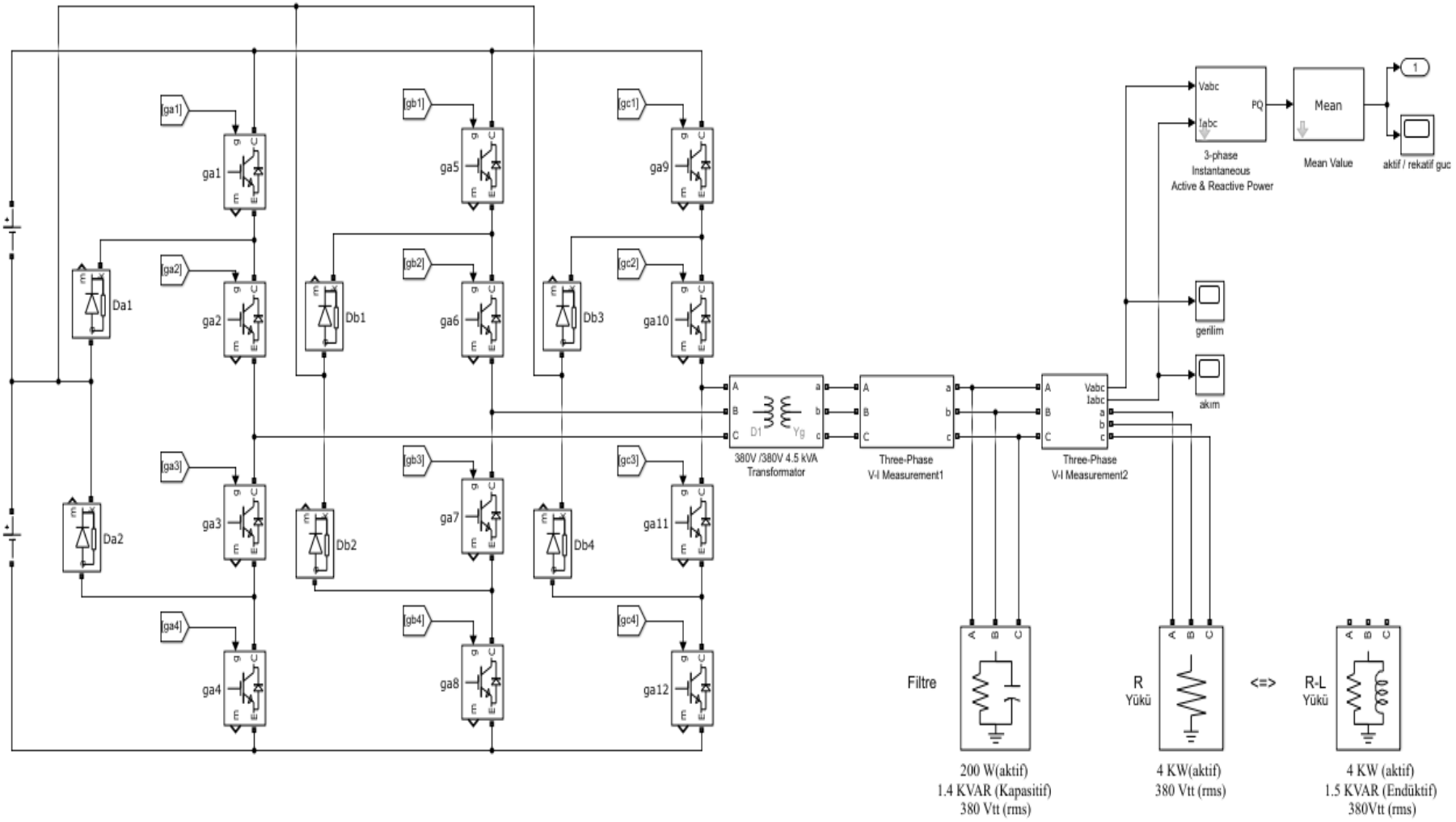
Bu bölümde üç seviyeli UVDGM kontrol yöntemi kullanılarak R / R-L yüklü bir eviricinin benzetimi yapılmıştır. Şekil 3.6'da R / R-L yüklü üç seviyeli eviricinin MATLAB/Simulink modeli görülmektedir. Şekil 3.7'de ise R / R-L yüklü üç seviyeli UVDGM eviricisi ve bu eviriciye ait çıkış sinyallerinin üretildiği MATLAB/Simulink benzetim modeli görülmektedir.

MATLAB/Simulink benzetimin yapılmasında şu adımlar izlenir;

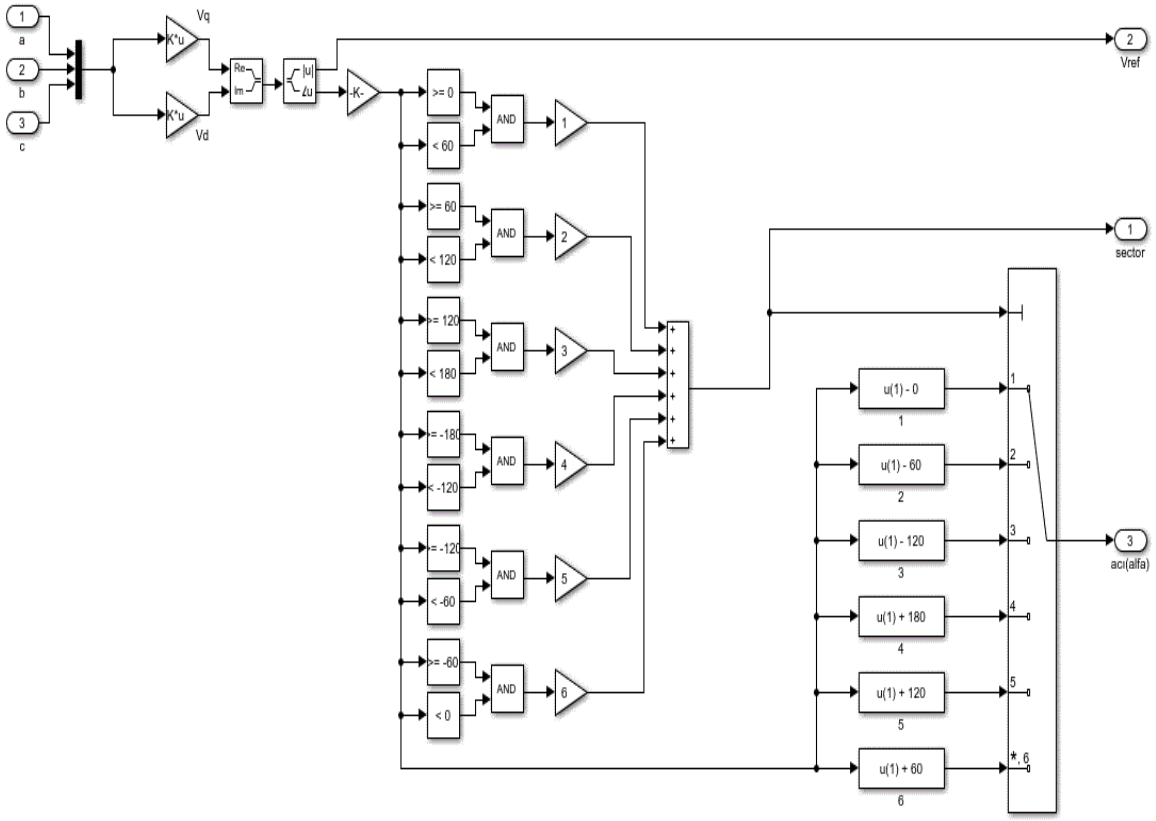
1. Gerilim vektörünün hangi sektöre düştüğü tespit edilir.
2. Vektörün sektör içinde hangi bölgeye düştüğü tespit edilir.
3. Anahtarlama süreleri hesaplanır.
4. Her bir sektörün her bir bölgesi için anahtarların anahtarlama sıraları belirlenir ve uygulanır.



Şekil 3.6. R / R-L yüklü üç seviyeli UVDGM eviricisinin giriş sinyallerinin üretildiği MATLAB/Simulink benzetim modeli

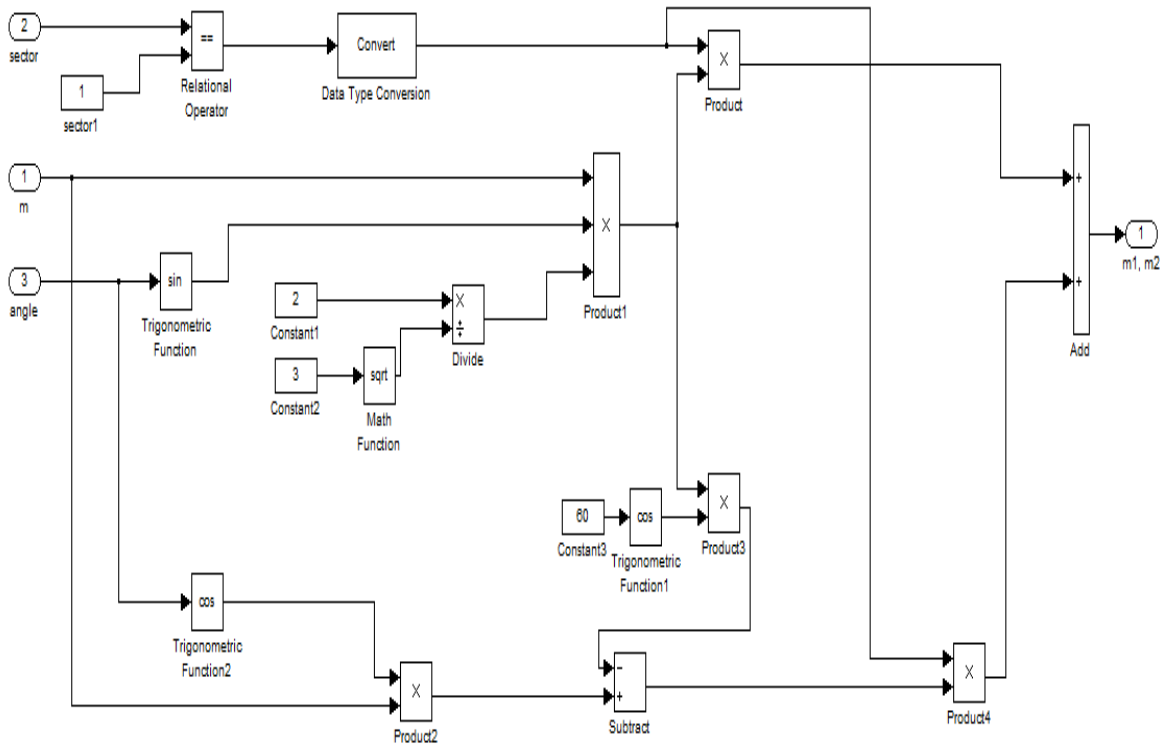


Şekil 3.7. R / R-L yüklü üç seviyeli evirici ve evirici çıkış sinyallerinin MATLAB/Simulink benzetim modeli

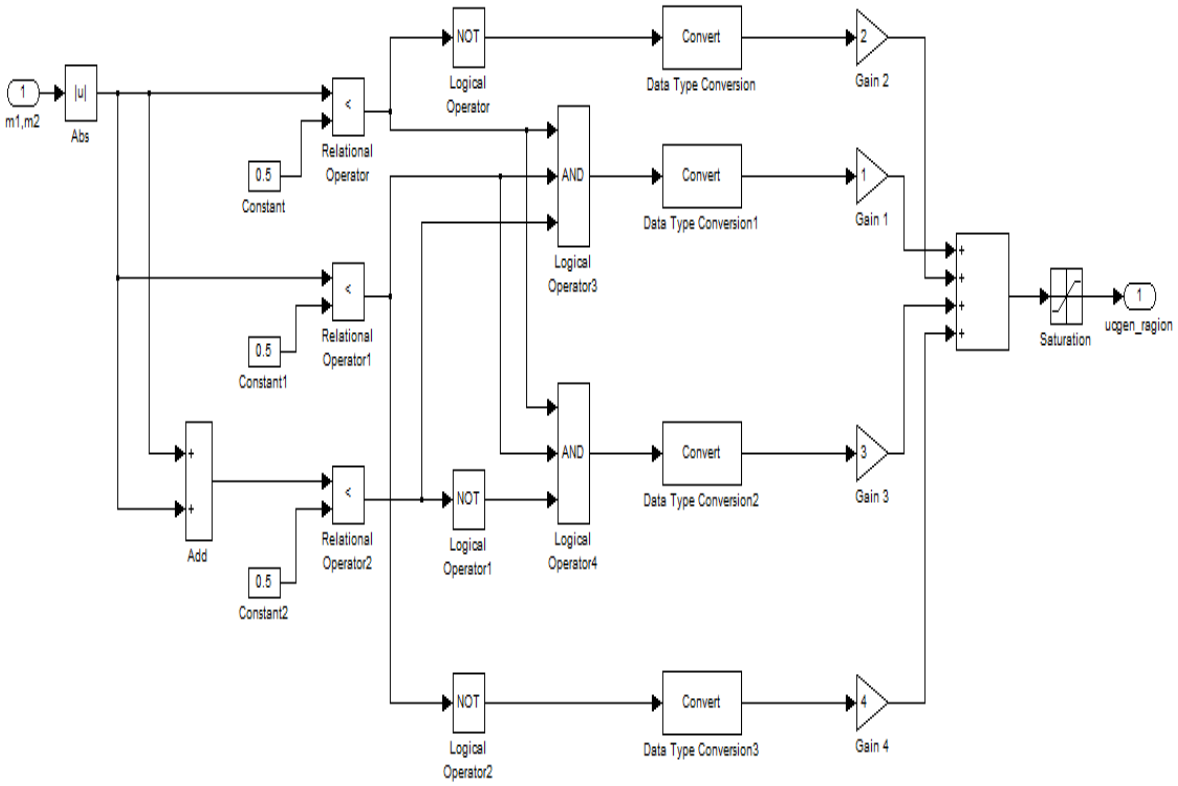


Şekil 3.8. Üç seviyeli eviricinin sektör tespiti

Şekil 3.8'de üç seviyeli eviricinin sektör tespitinin nasıl yapıldığı gösteren bloklar verilmiştir. Burada giriş kısmına uygulanan gerilim vektörünün açı bilgisinden yola çıkarak öncelikle sektör tespiti yapılır. Üç fazlı gerilimler abc-dq clark dönüşümü yapan bloğa bağlanarak gerekli dönüşüm faaliyeti gerçekleştirilir. Gerilim vektörleri d-q ekseni üzerinde tanımlı bir uzay vektöre dönüştükten sonra (V_{ref}), vektöre ait genlik ve açı değeri hesaplanır. Vektörün açı bilgisine bakarak sektör tespiti gerçekleştirilir. Sektör bloğunda açı değerine bakılarak gerekli kıyaslama yapılır. Eğer gerilim vektörü $0° \leq \alpha \leq 60°$ ise birinci sektörde, $60° \leq \alpha \leq 120°$ ise ikinci sektörde, $120° \leq \alpha \leq 180°$ ise üçüncü sektörde, $180° \leq \alpha \leq 240°$ ise dördüncü sektörde, $240° \leq \alpha \leq 300°$ ise beşinci sektörde, $300° \leq \alpha \leq 360°$ ise altıncı sektörde yer alır. Daha sonra vektörün ilgili sektörün hangi bölümüne düştüğü tespit edilir. Bu yüzden modülasyon indeksi (m), m_1 ve m_2 olarak bileşenlerine ayrılır ve bölge tespiti yapılır. Şekil 3.9'da modülasyon indeksinin bileşenlerine ayrılışının nasıl hesaplandığı verilmiştir. Önceki bölümlerde anlatılan hesaplamalara göre modülasyon indeksi (M_i), m_1 ve m_2 bileşenlerine ayrılır.

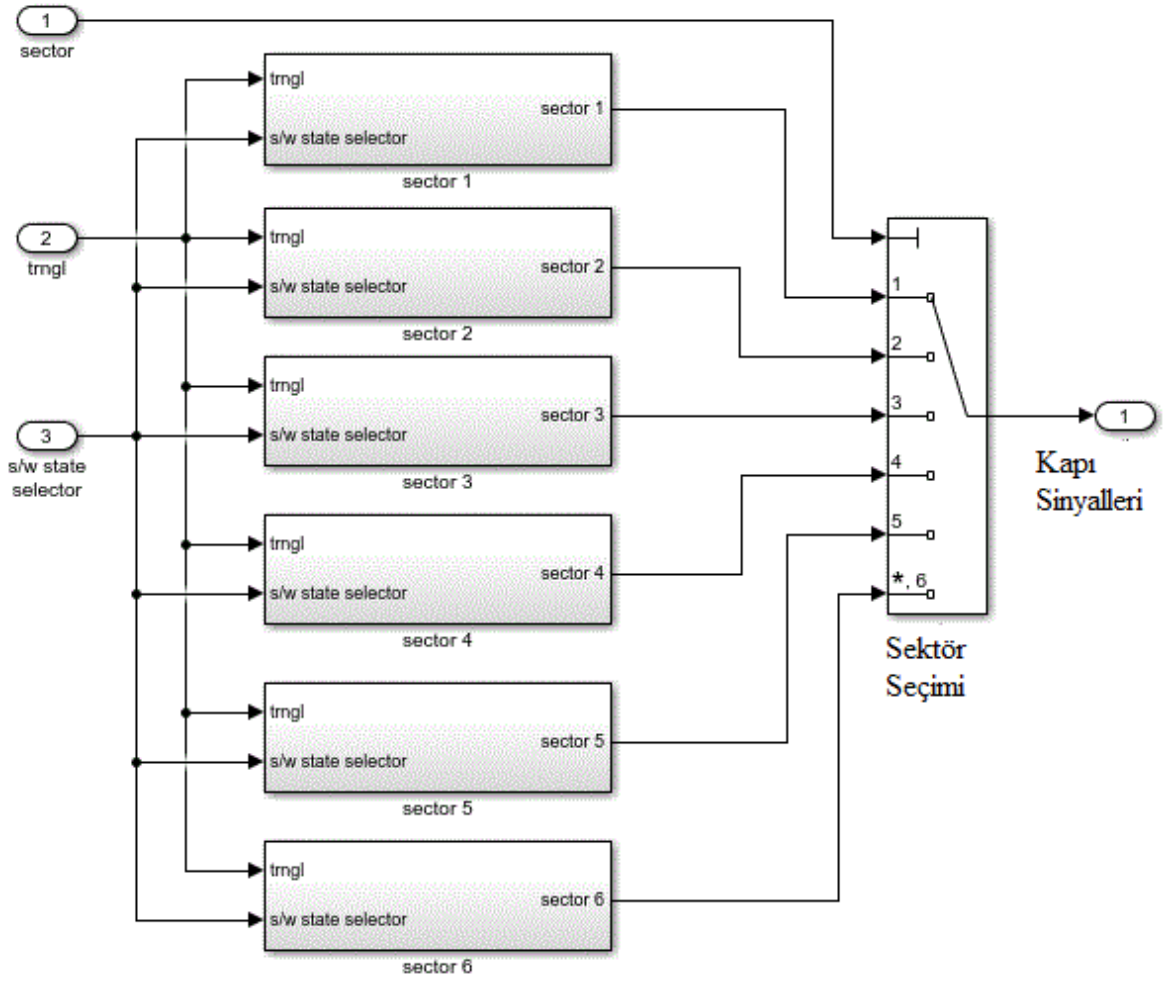


Şekil 3.9. Modülasyon indeksinin bileşenlerine ayrılması



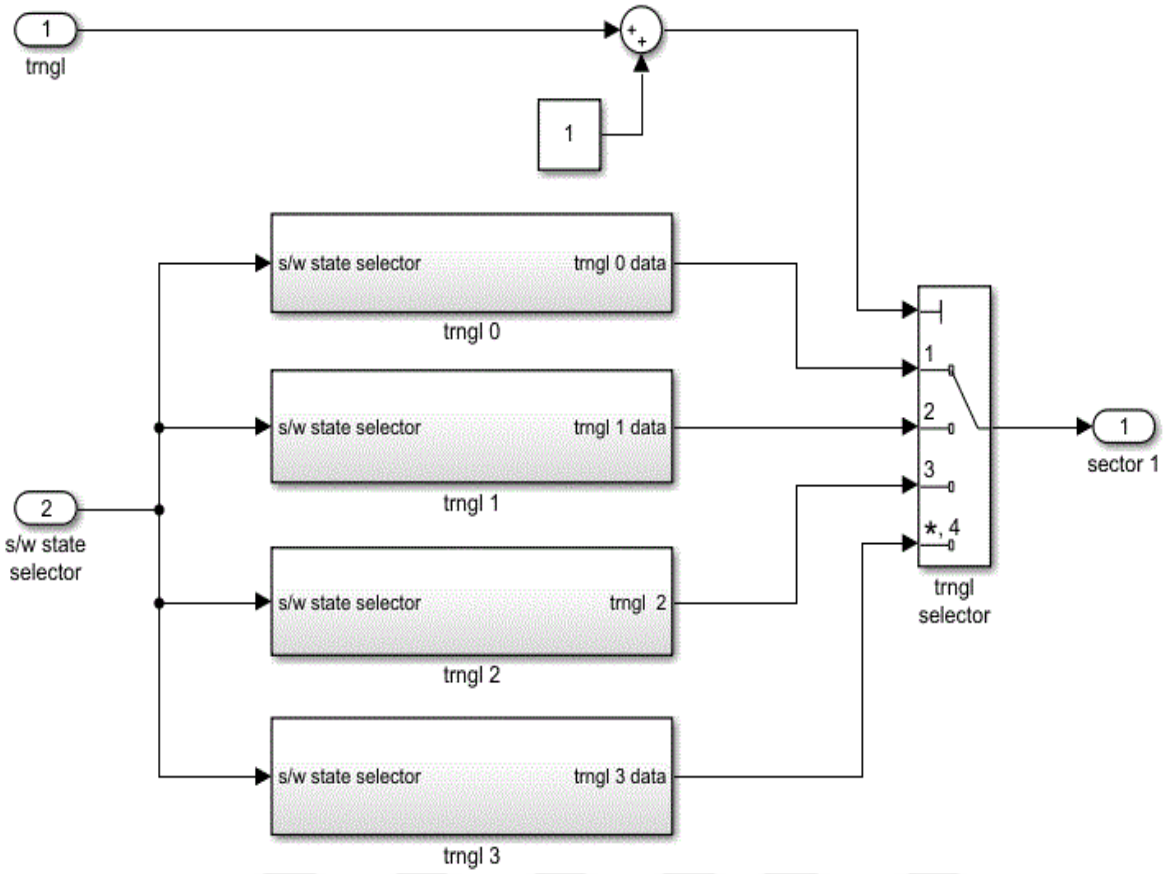
Şekil 3.10. Bölge tespit bloğu

Şekil 3.10'da bölge tespit bloğu verilmiştir. Vektörün konumu belirlendikten sonra gelen adım anahtarlama sinyallerinin belirlenmesidir. Şekil 3.11'de UVDGM anahtarlama bloğu görülmektedir.

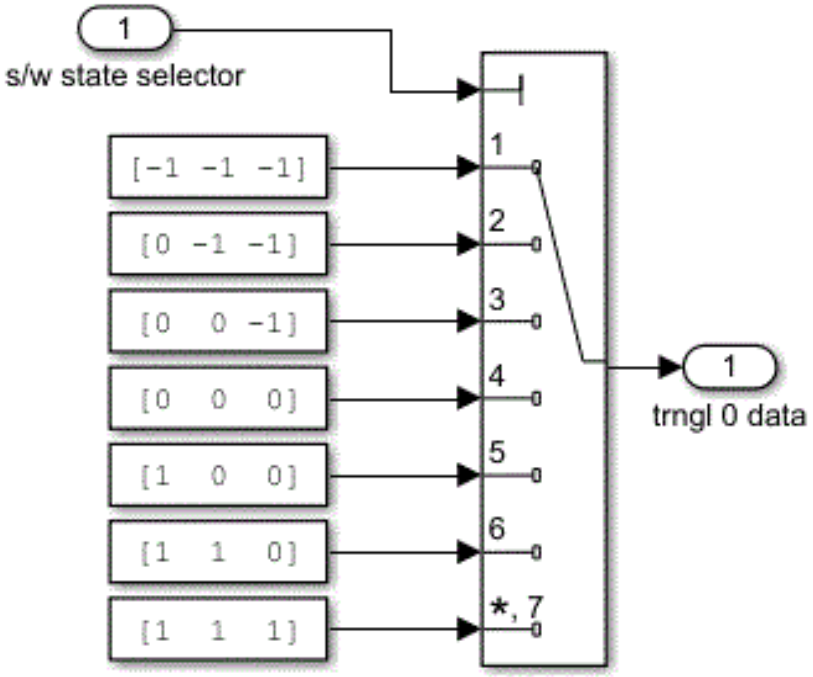


Şekil 3.11. UVDGM anahtarlama bloğu

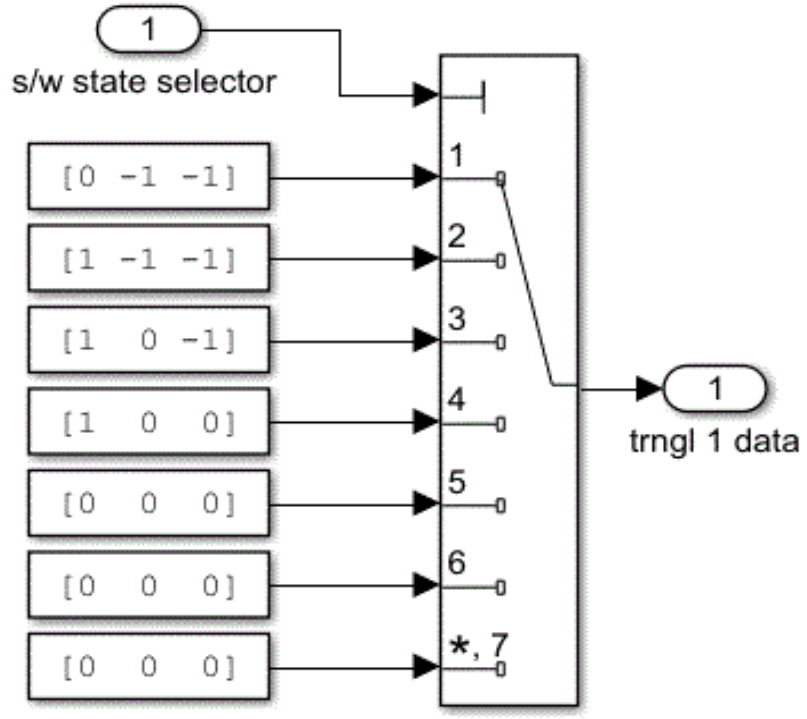
Burada verilen blokların her birinde her sektör için ayrı ayrı anahtarlama süreleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.12'de 1. Sektör için yapılan anahtarlamalara ait hesapların olduğu bloklar yer almaktadır. Burada sektördeki her üçgen için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır. Şekil 3.13'te UVDGM 1.sektör 1.bölge anahtarlama bloğu verilmiştir. Şekil 3.14'te UVDGM 1.sektör 2.bölge anahtarlama bloğu, Şekil 3.15'te UVDGM 1.sektör 3.bölge anahtarlama bloğu, Şekil 3.16'da UVDGM 1.sektör 4.bölge anahtarlama bloğu verilmiştir.



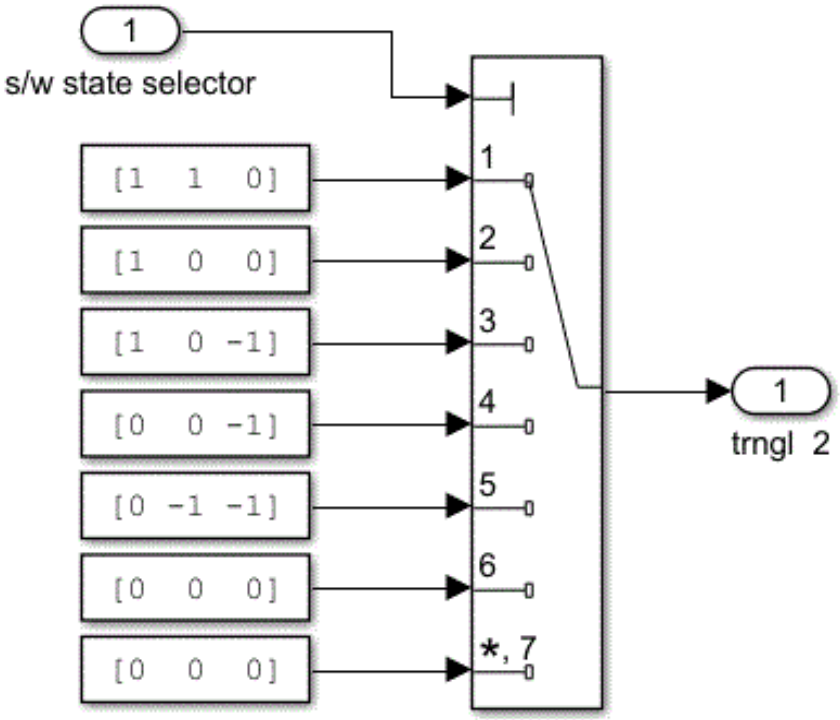
Şekil 3.12. UVDGM 1.sektör anahtarlama bloğu



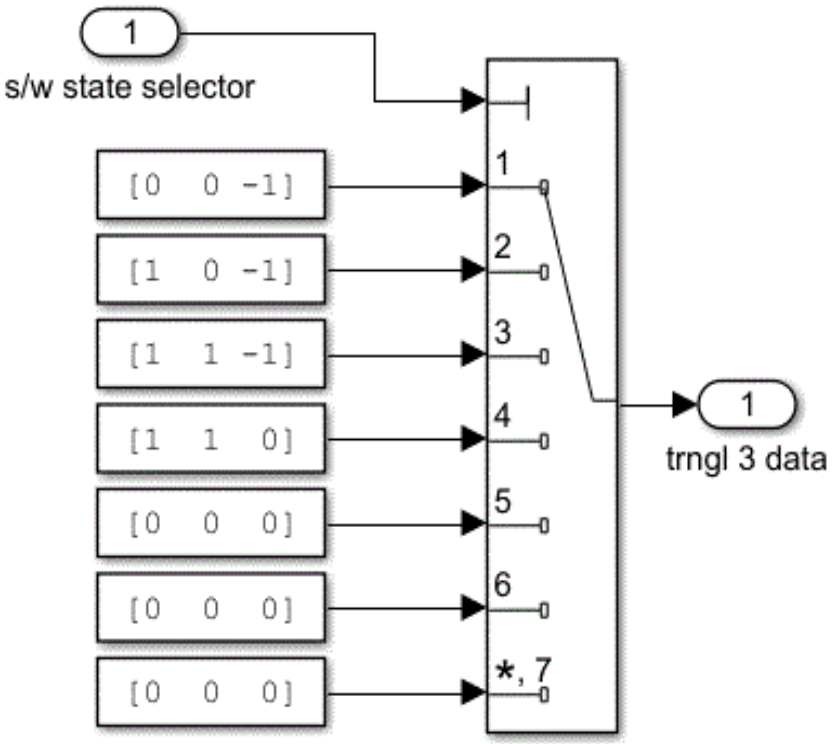
Şekil 3.13. UVDGM 1.sektör 1.bölge anahtarlama bloğu



Şekil 3.14. UVDGM 1.sektör 2.bölge anahtarlama bloğu

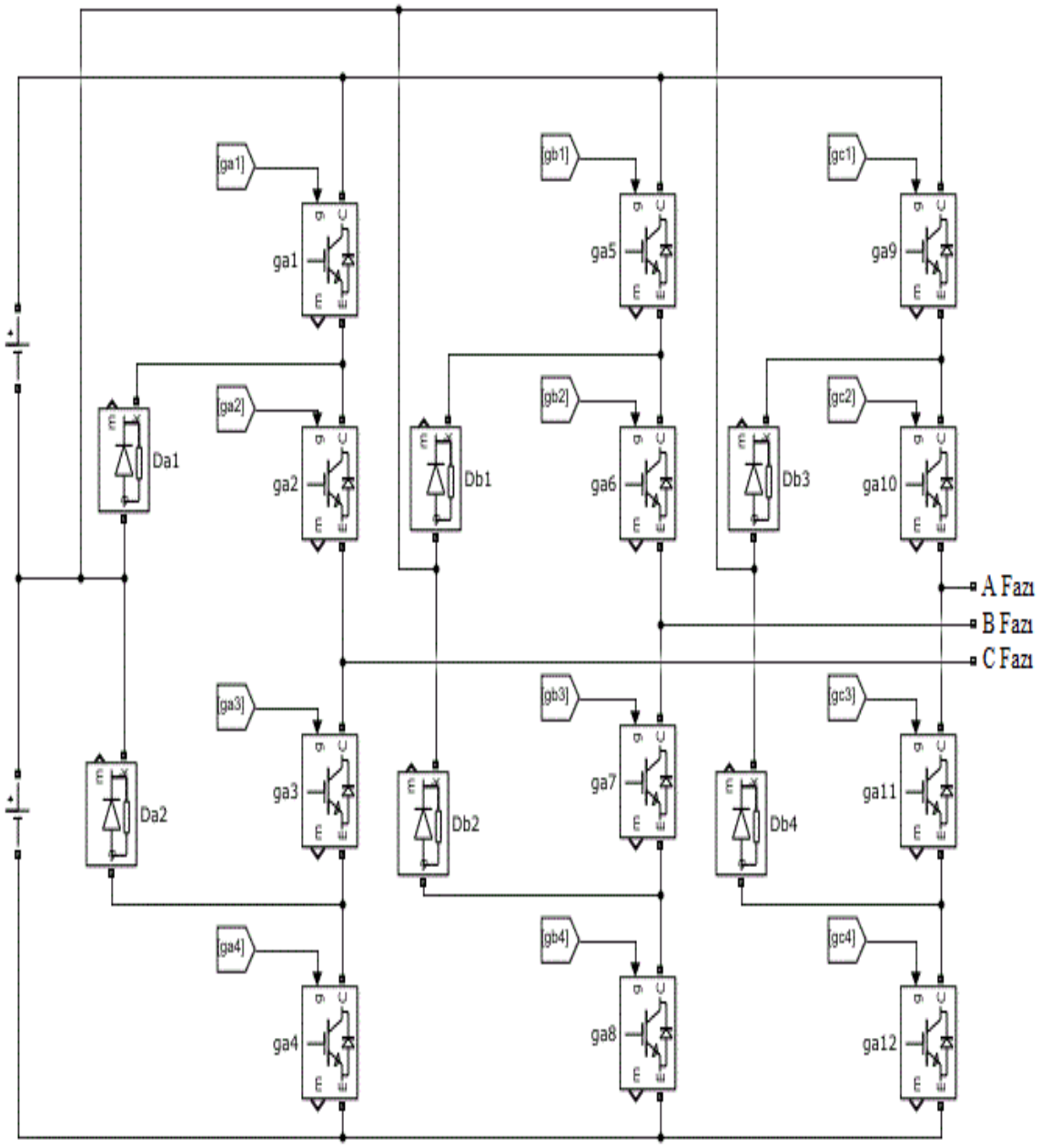


Şekil 3.15. UVDGM 1.sektör 3.bölge anahtarlama bloğu



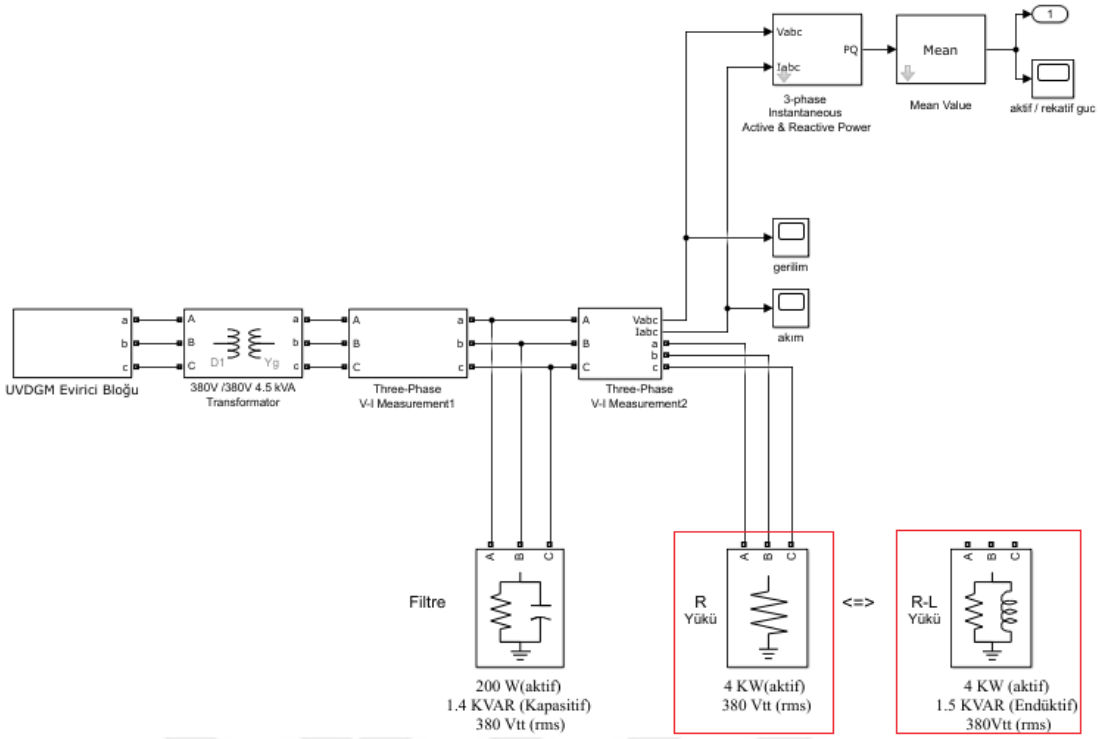
Şekil 3.16. UVDGM 1.sektör 4.bölge anahtarlama bloğu

Sonra tüm bu bölgeler ve sektörler için hesaplanan anahtarlama sinyalleri Şekil 3.1'deki UVDGM anahtarlama bloğundan çıkarak üç fazlı üç seviyeli izole kaynaklı kaskat bağlı Şekil 6.2'de verilen evirici bloğuna uygulanır. Şekil 3.17'de üç fazlı üç seviyeli evirici bloğu verilmiştir.



Şekil 3.17. Üç fazlı üç seviyeli evirici bloğu

UVDGM sinyalleri uygulanan eviriciye bir yük bağlanarak çıkış akım ve gerilimleri gözlenmiştir. Şekil 3.18'de eviriciye bağlanan bir R / R-L yükü görülmektedir.



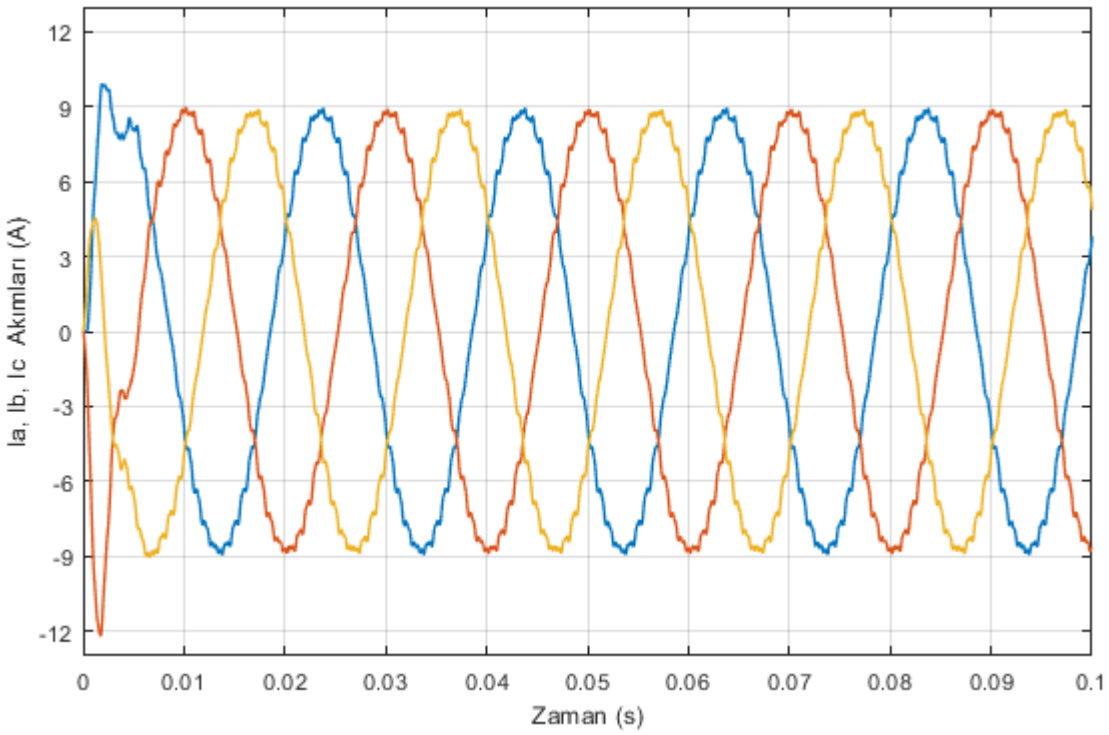
Şekil 3.18. Üç seviyeli üç fazlı evirici ve R / R-L yükü

3.4. M_i aynı V_{da} Hat Gerilimleri Farklı Olan R Yüklü SDGM ile UVDGM Eviricilerinin Benzetim Sonuçları

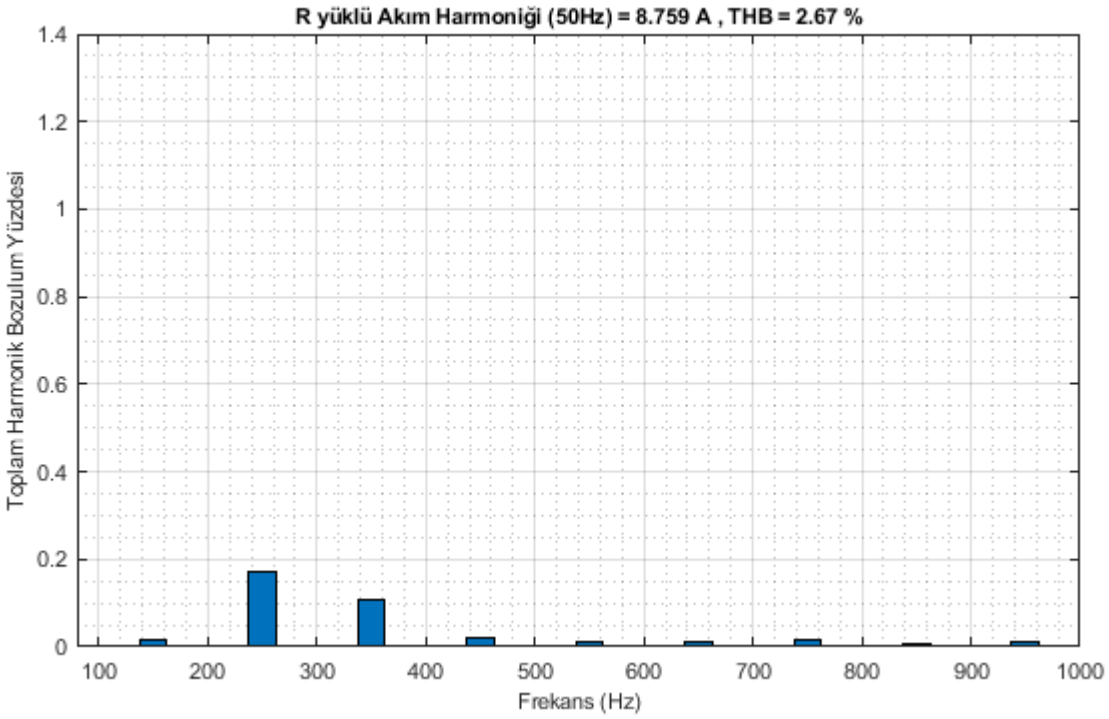
Tablo 3.1'de verilen parametreler kullanılarak M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R yüklü iki seviyeli SDGM ile üç seviyeli UVDGM'nin benzetimleri yapılmıştır.

3.4.1. R Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricinin Benzetim Sonucu

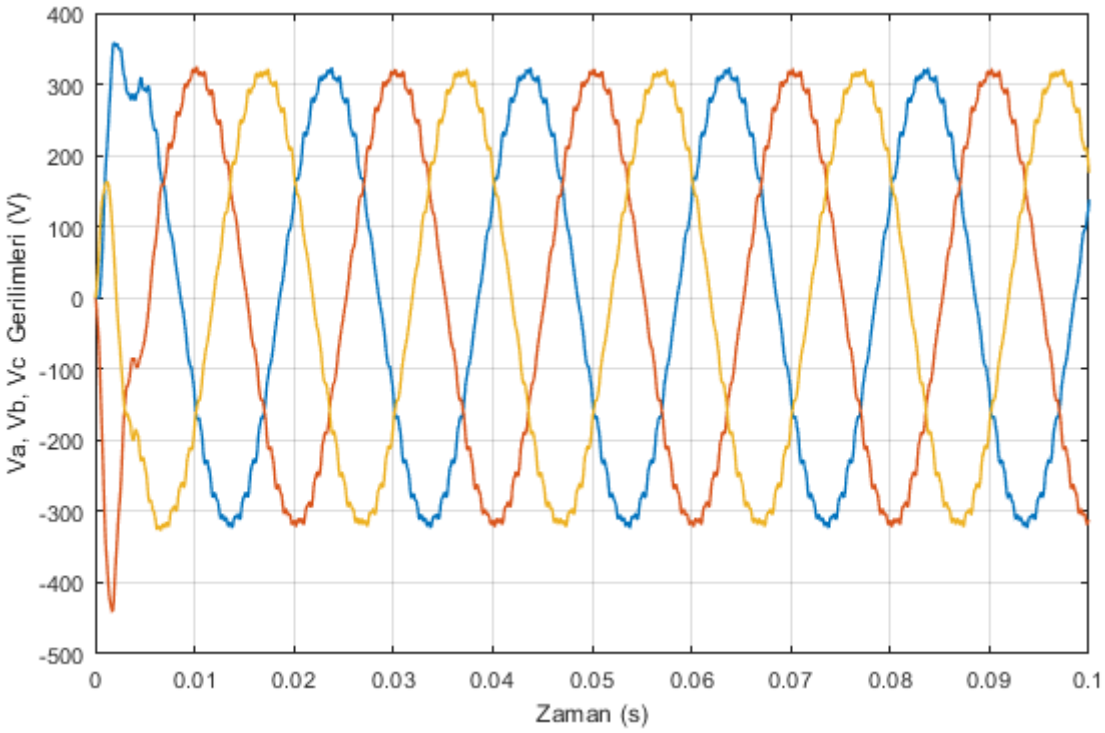
SDGM eviricisinin benzetim sonucu Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametrelerden M_i aynı V_{da} hat gerilimlerinin ise farklı olduğu R yüklü SDGM'nin benzetim sonuçlarından I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri Şekil 3.19'da; bu akımların harmonik spektrumu ise Şekil 3.20'de verilmiştir. V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri Şekil 3.21'de; bu gerilimlerin harmonik spektrumu ise Şekil 3.22'de verilmiştir. Aktif ve reaktif güce ait dalga şekli ise Şekil 3.23'te verilmiştir.



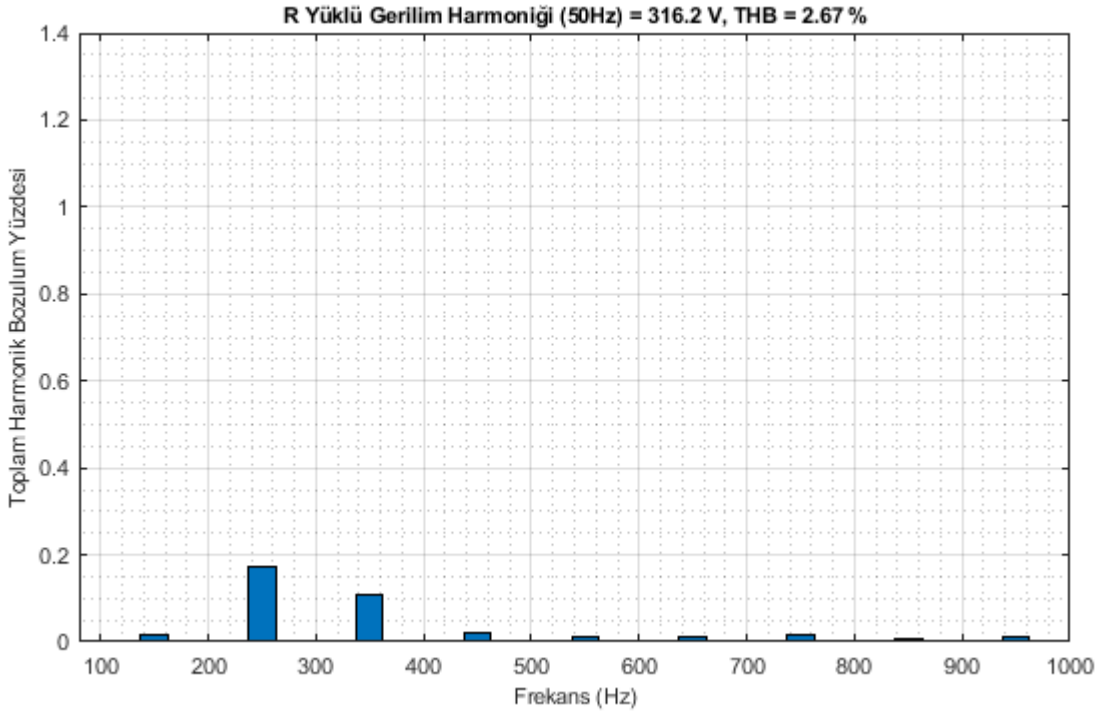
Şekil 3.19. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri



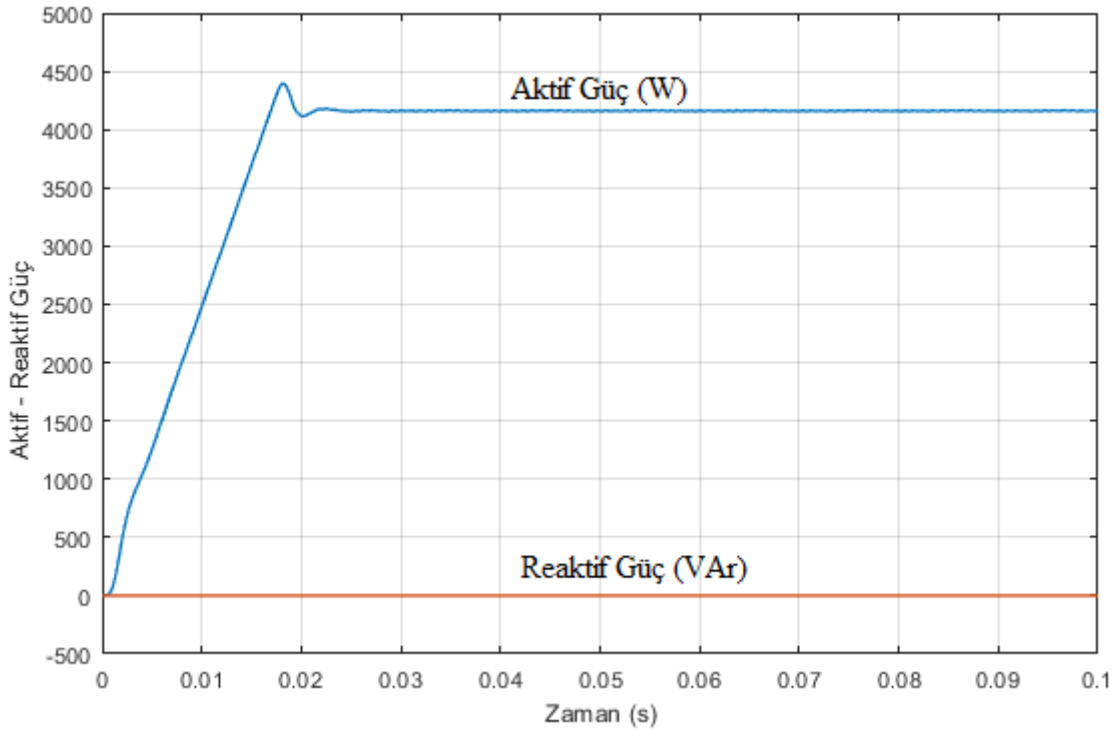
Şekil 3.20. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu



Şekil 3.21. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri



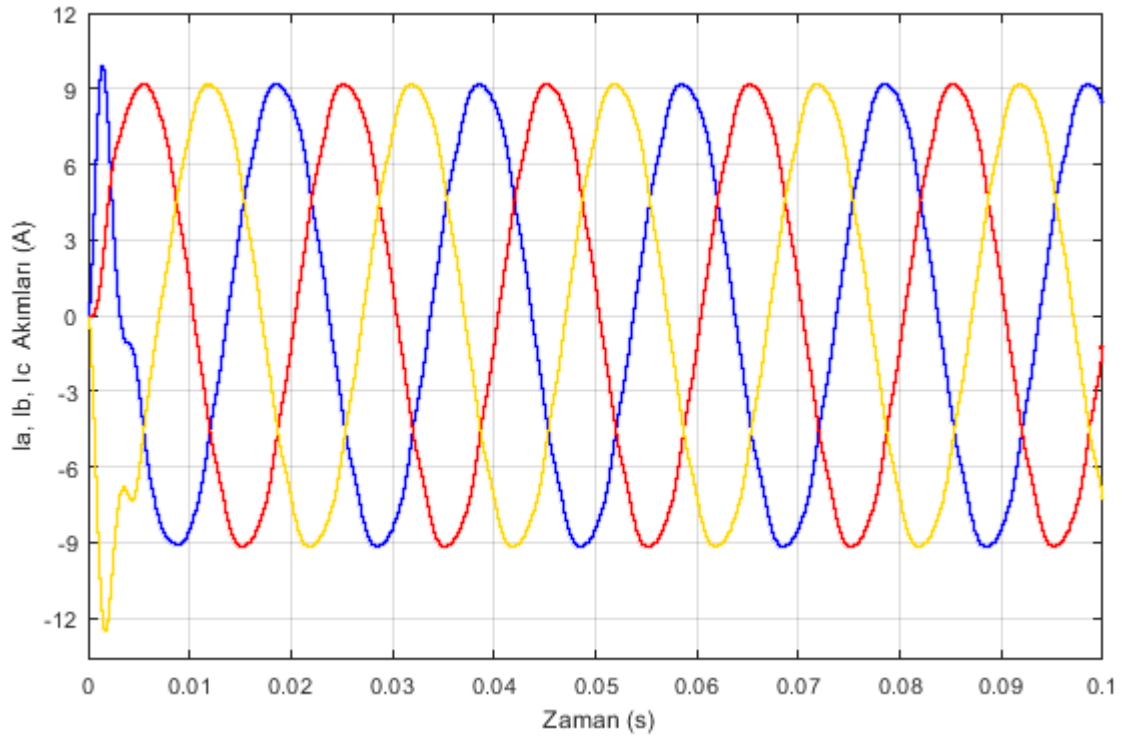
Şekil 3.22. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları



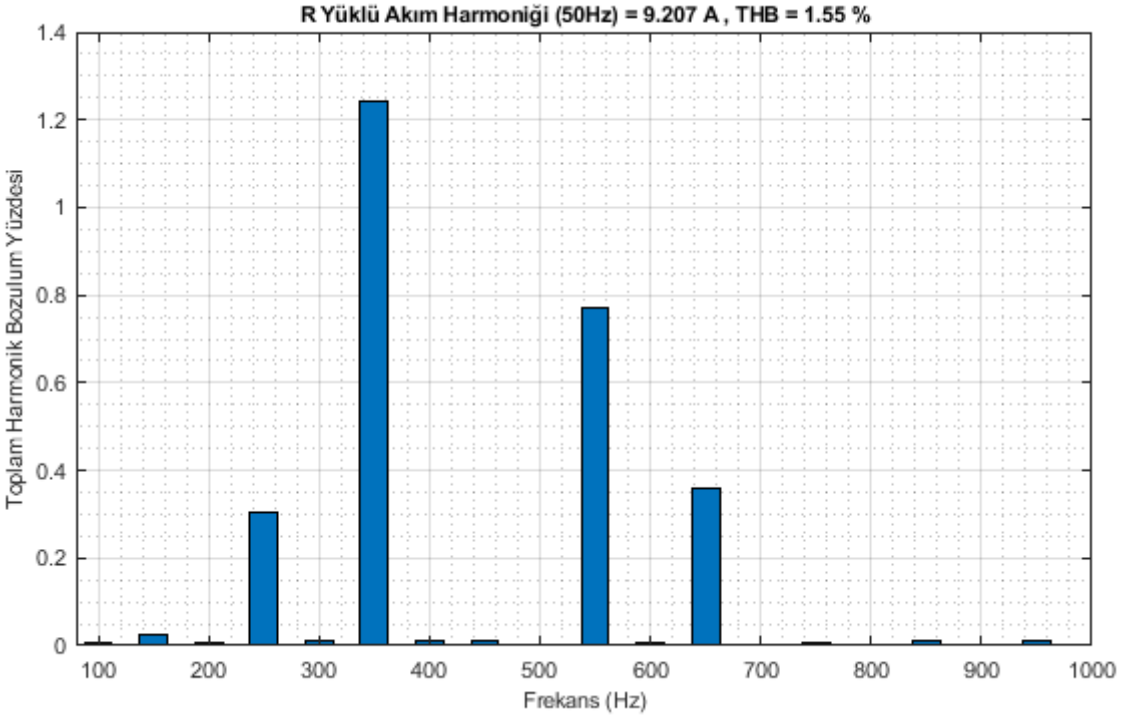
Şekil 3.23. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü SDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli

3.4.2. R Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricinin Benzetim Sonucu

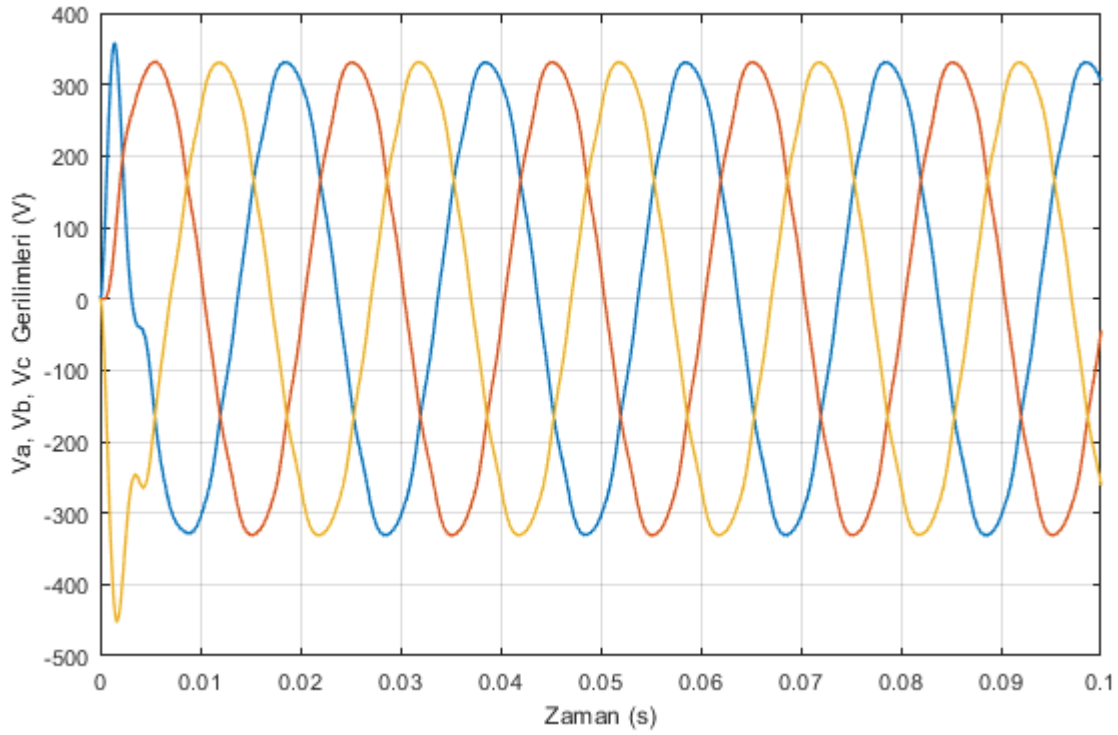
UVDGM eviricisinin benzetim sonucu Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametrelerden M_i aynı V_{da} hat gerilimlerinin ise farklı olduğu R yüklü üç seviyeli UVDGM'nin benzetim sonuçlarından I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri Şekil 3.24'te; bu akımların harmonik spektrumu ise Şekil 3.25'te verilmiştir. V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri Şekil 3.26'da; bu gerilimlerin harmonik spektrumu ise şekil 3.27'de verilmiştir. Aktif ve reaktif güce ait dalga şekli ise Şekil 3.28'de verilmiştir.



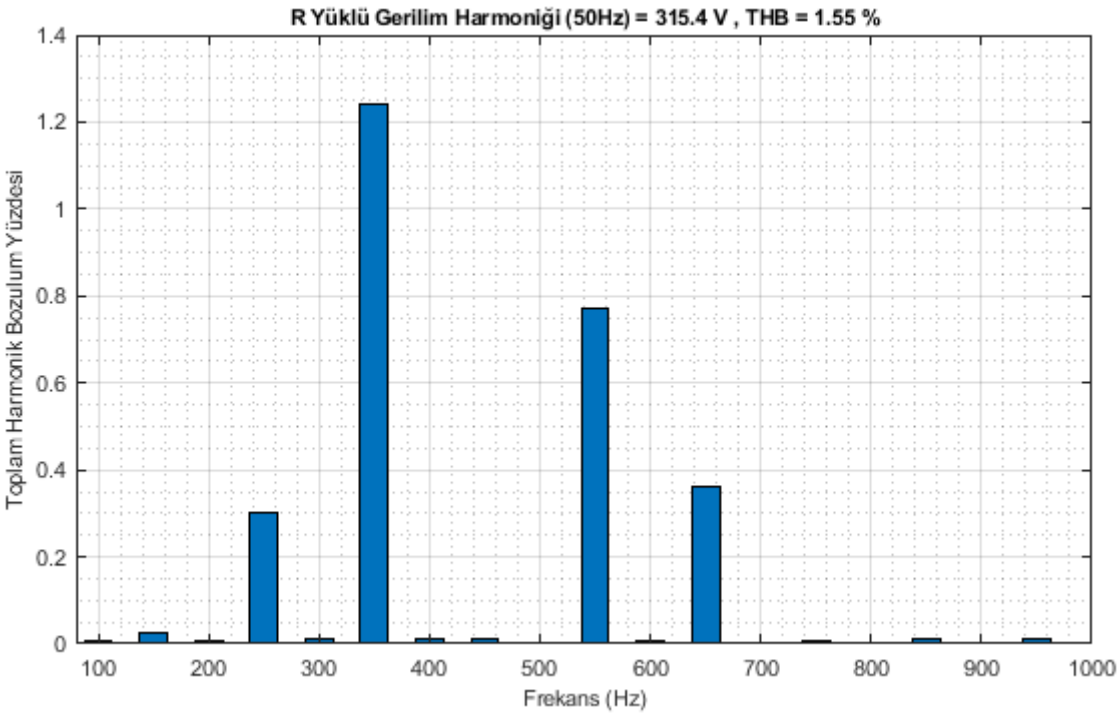
Şekil 3.24. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri



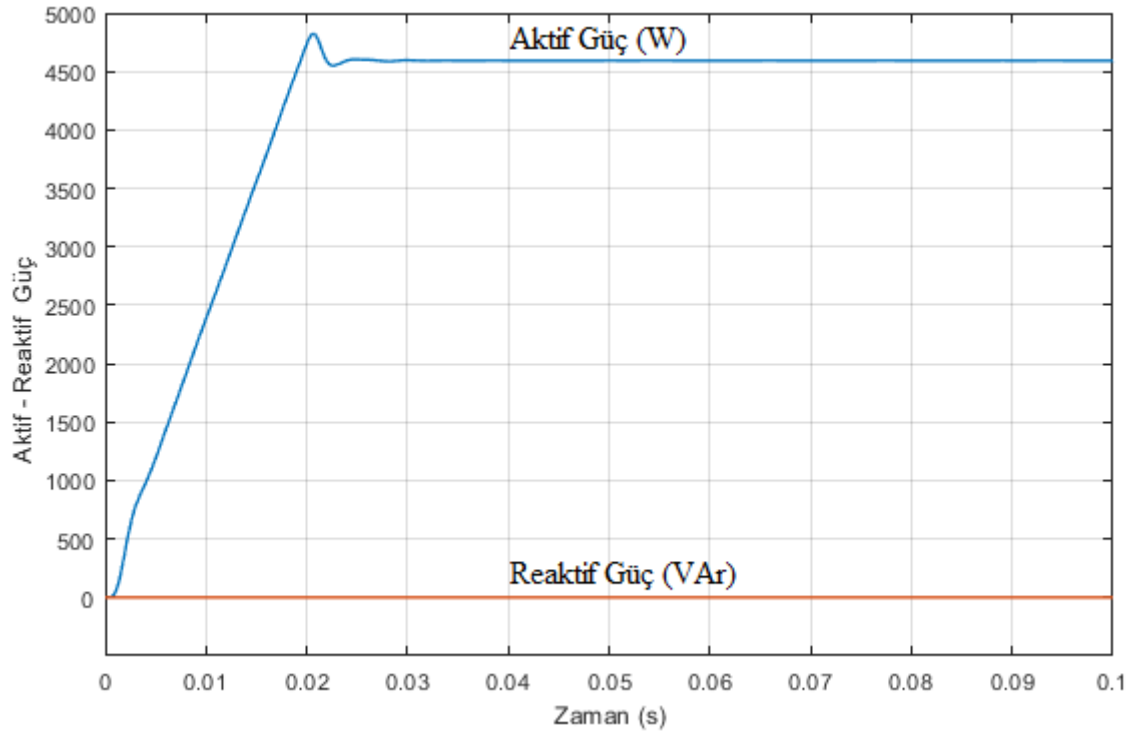
Şekil 3.25. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu



Şekil 3.26. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri



Şekil 3.27. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları



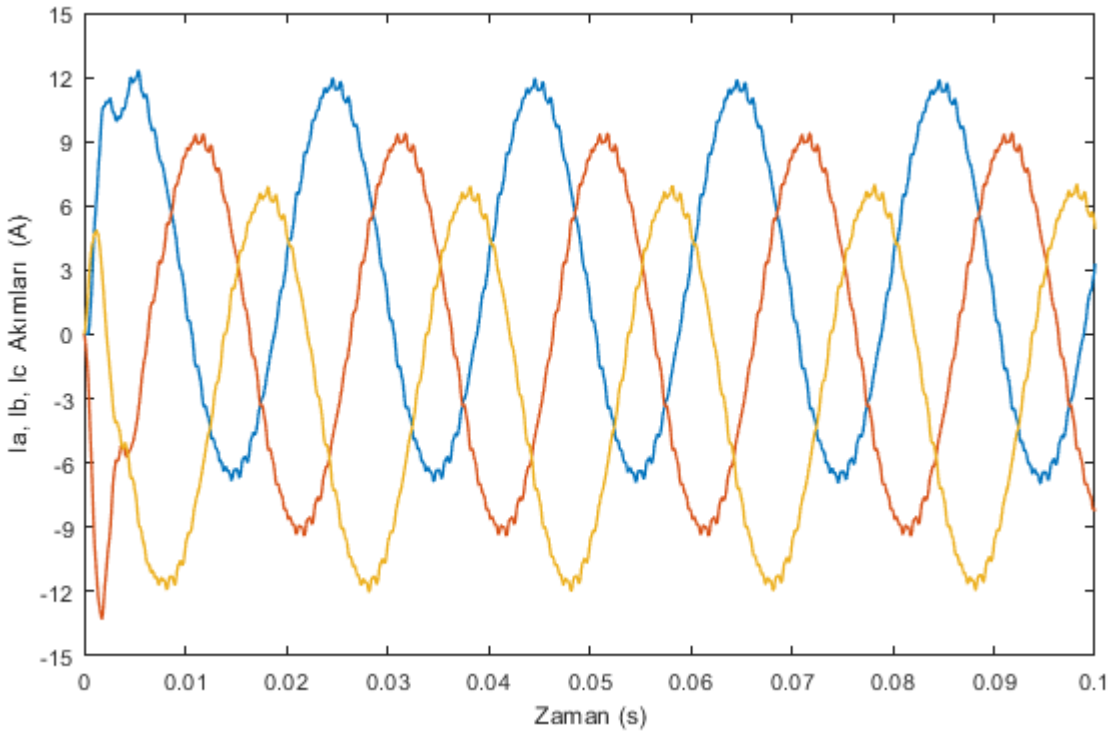
Şekil 3.28. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R yüklü UVDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli

3.5. M_i Aynı V_{da} Hat Gerilimleri Farklı Olan R-L Yüklü SDGM ile UVDGM Eviricilerinin Benzetim Sonuçları

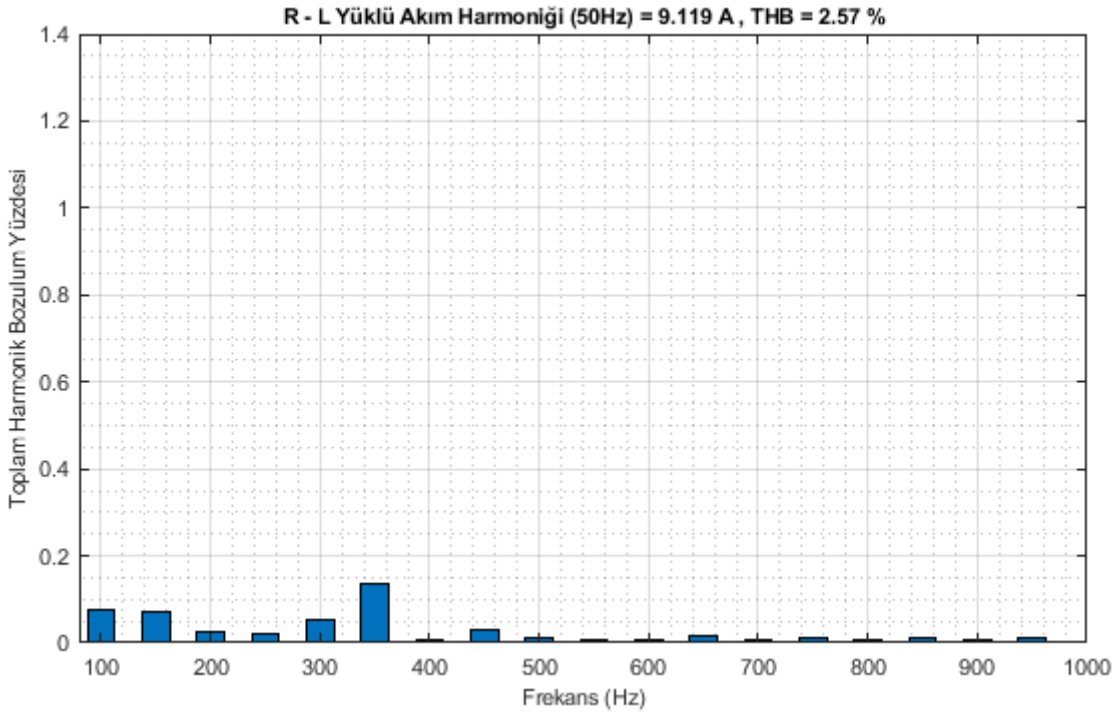
Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak iki seviyeli SDGM ile üç seviyeli UVDGM'nin benzetimleri yapılmıştır.

3.5.1. R-L Yüklü İki Seviyeli SDGM Eviricinin Benzetim Sonucu

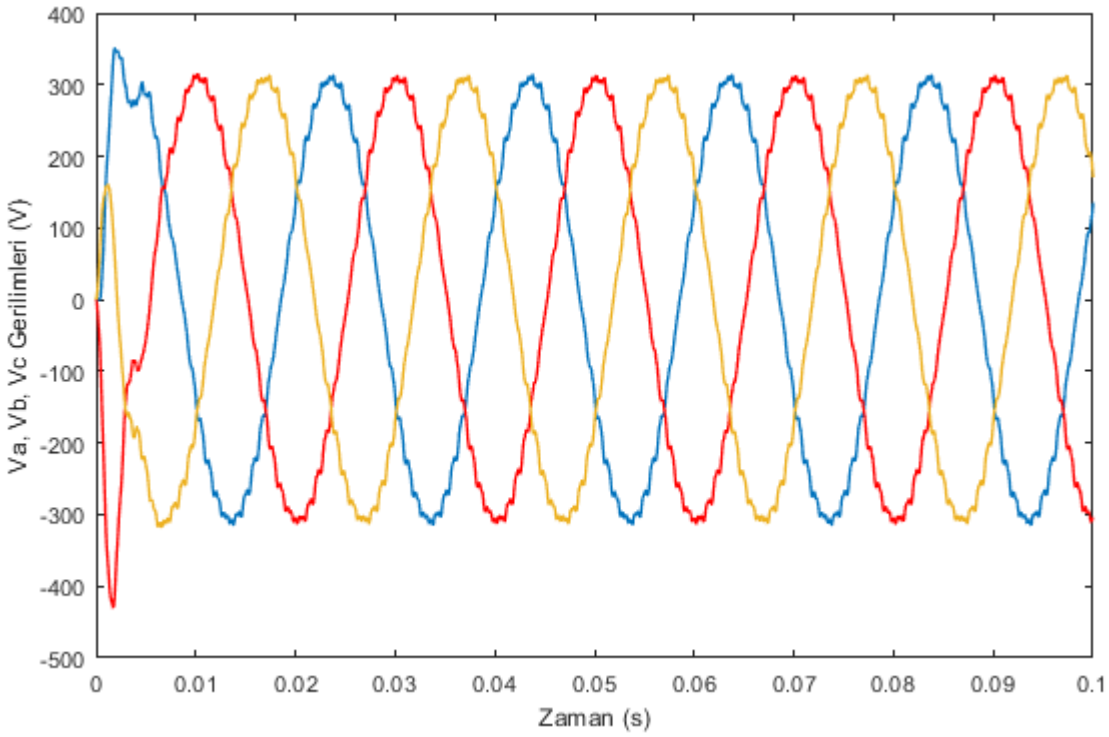
SDGM eviricisinin benzetim sonucu Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak elde edilmiştir. M_i aynı V_{da} hat geriliminin ise farklı olduğu R-L yüklü SDGM'nin benzetim sonuçlarından I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri Şekil 3.29'da; bu akımların harmonik spektrumu ise Şekil 3.30'da verilmiştir. V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri Şekil 3.31'de; bu gerilimlerin harmonik spektrumu ise Şekil 3.32'de verilmiştir. Aktif ve reaktif güce ait dalga şekli Şekil 3.33'te verilmiştir.



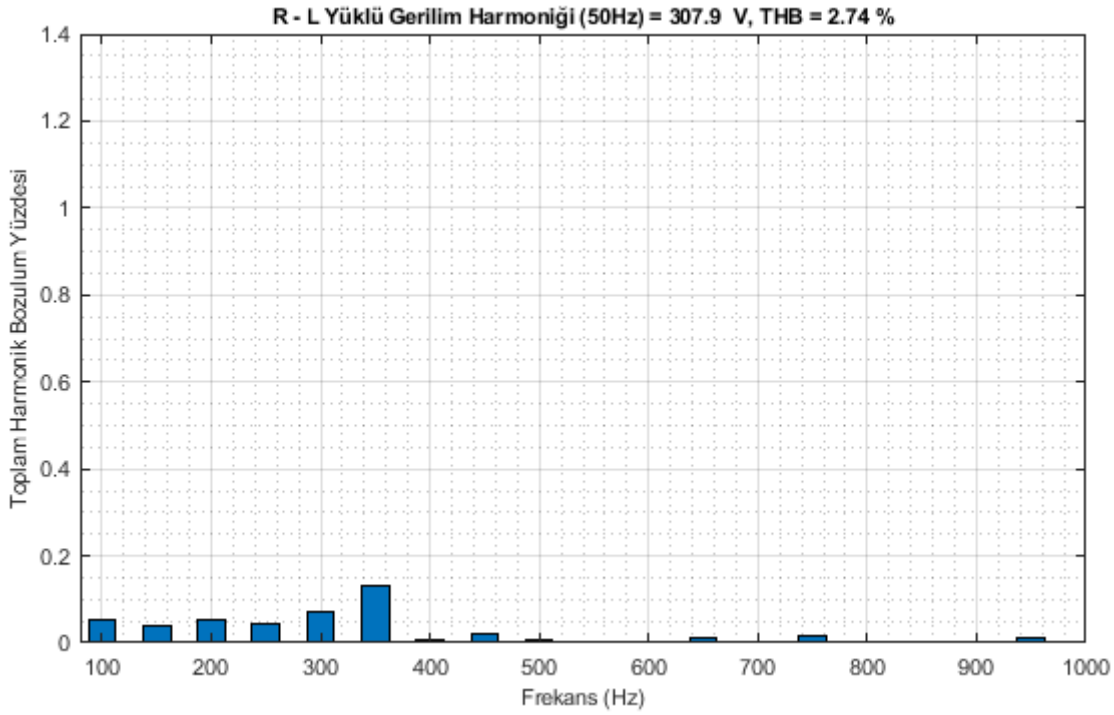
Şekil 3.29. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri



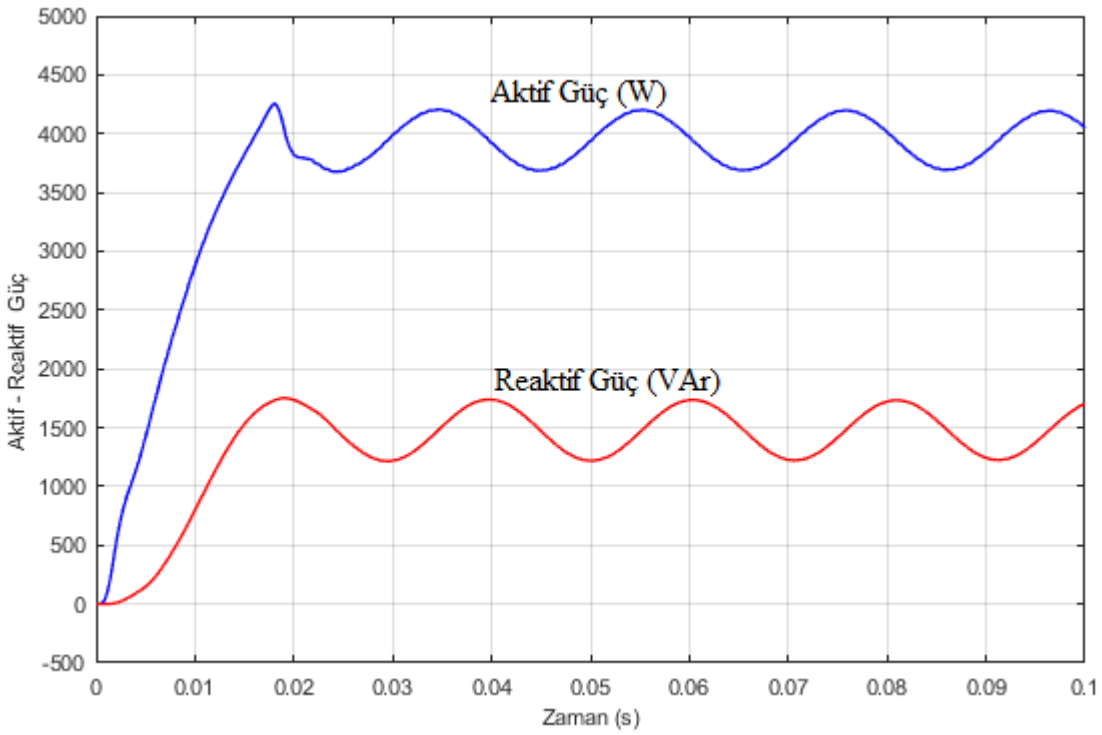
Şekil 3.30. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu



Şekil 3.31. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri



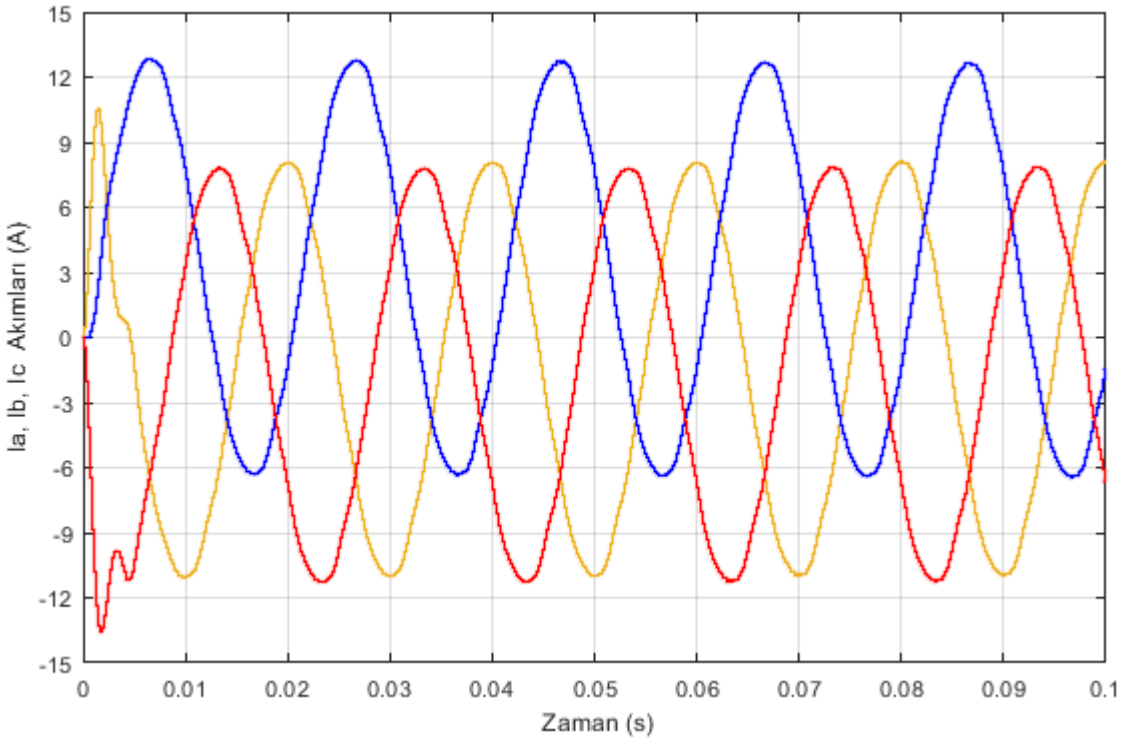
Şekil 3.32. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları



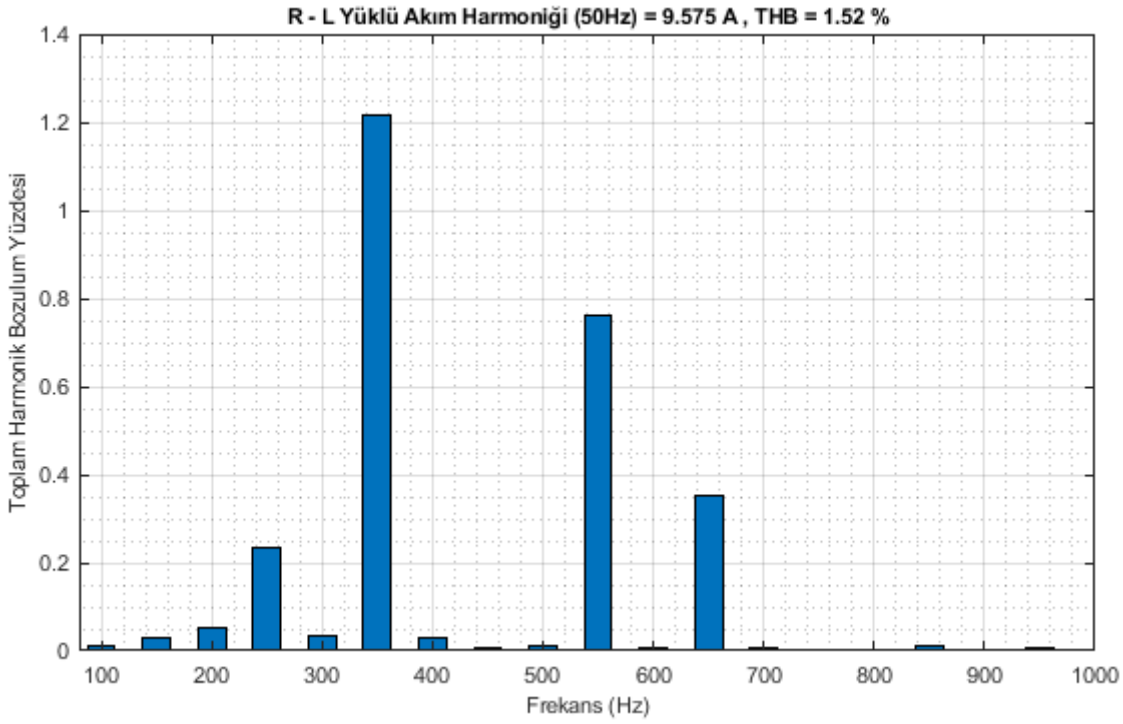
Şekil 3.33. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü SDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli

3.5.2. R-L Yüklü Üç Seviyeli UVDGM Eviricinin Benzetim Sonucu

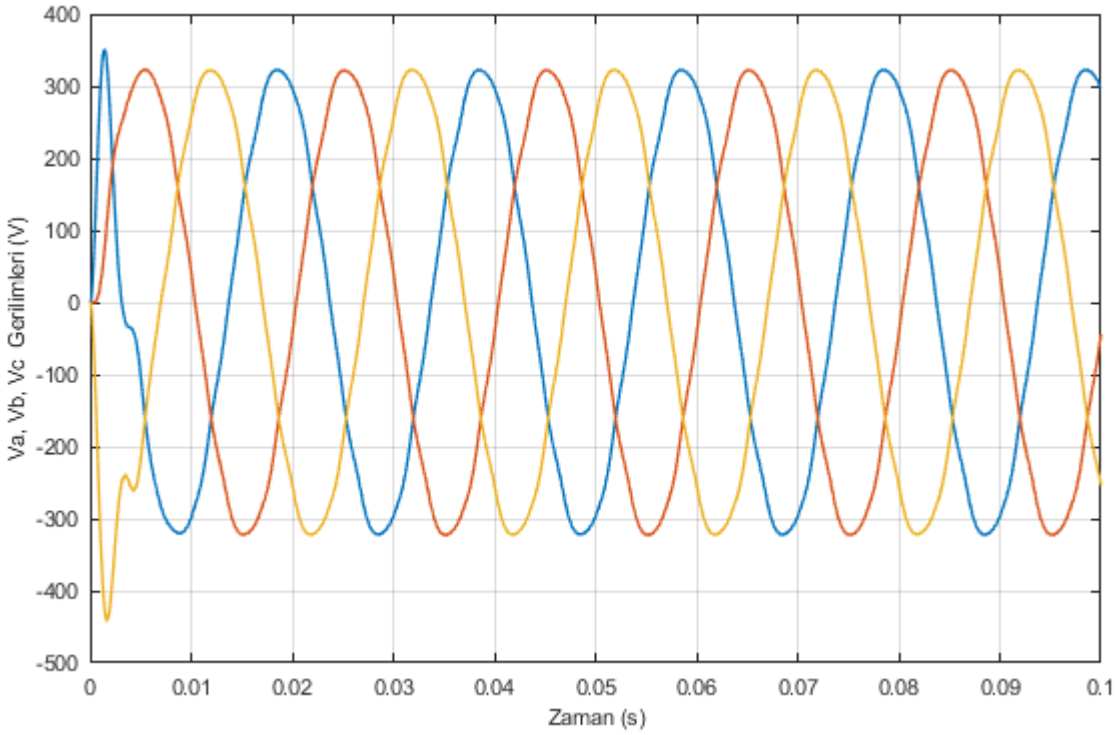
UVDGM eviricisinin benzetim sonucu Tablo 3.1'deki parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametrelerden M_i aynı V_{da} hat geriliminin ise farklı olduğu R-L yüklü UVDGM'nin benzetim sonuçlarından I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri Şekil 3.34'te; bu akımların harmonik spektrumu ise Şekil 3.35'te verilmiştir. V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri Şekil 3.36'da; bu gerilimlerin harmonik spektrumu ise Şekil 3.37'de verilmiştir. Aktif ve reaktif güce ait dalga şekli ise Şekil 3.38'de verilmiştir.



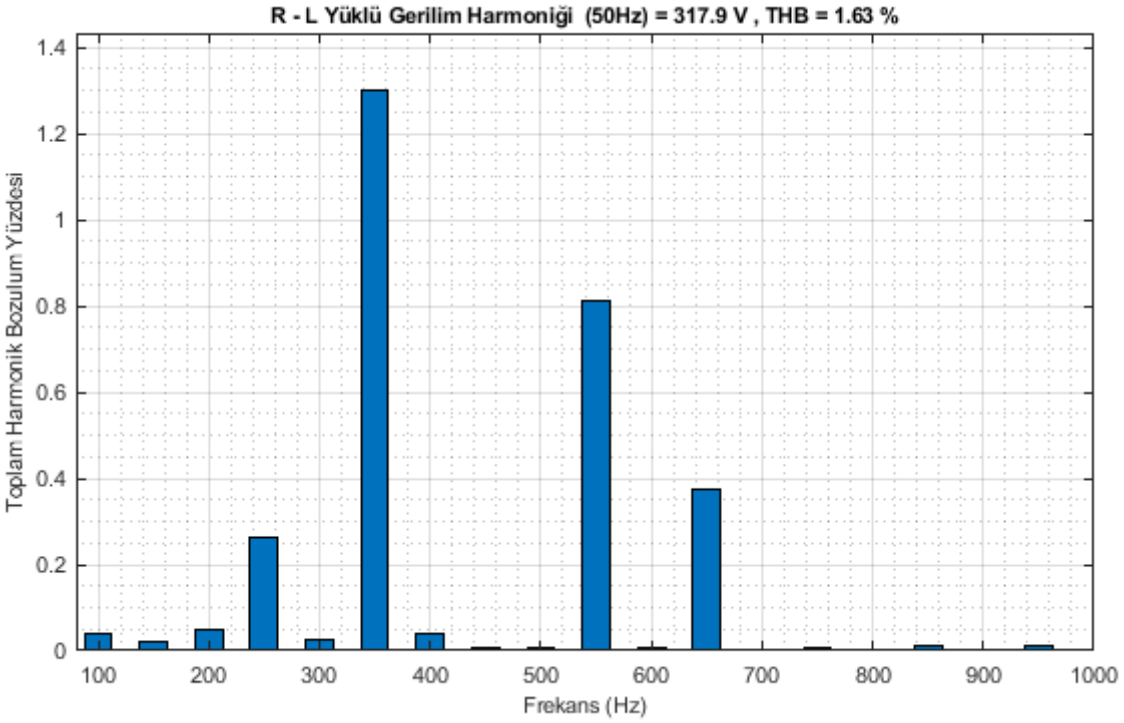
Şekil 3.34. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akım dalga şekilleri



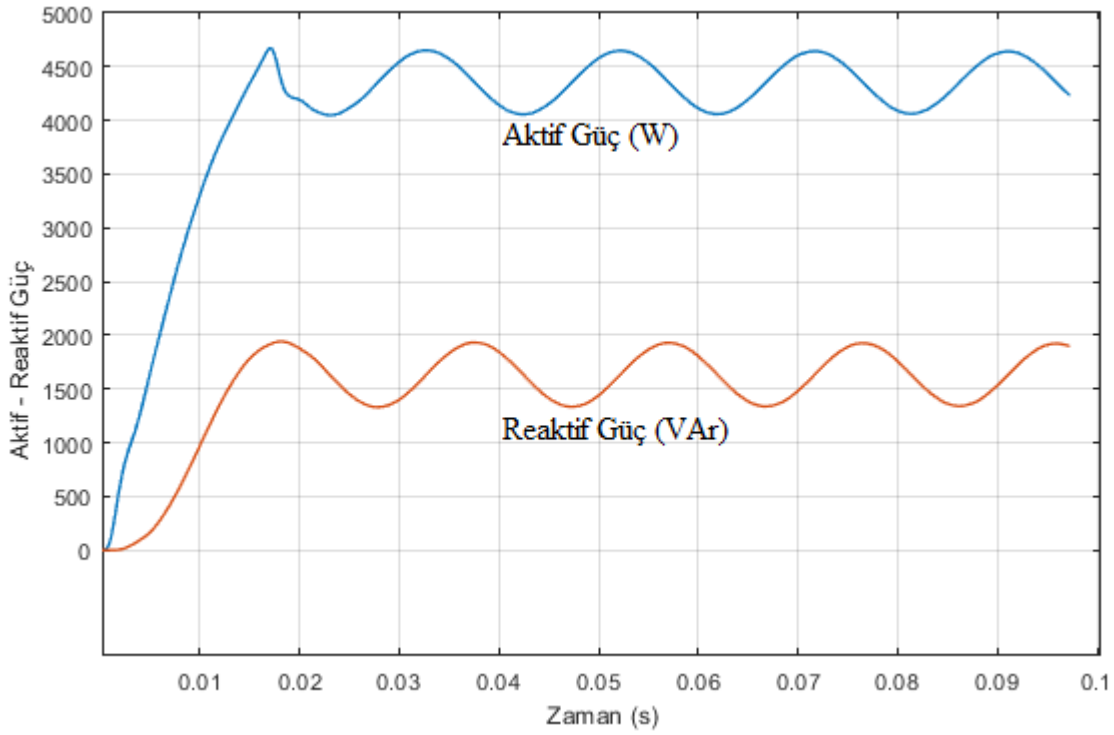
Şekil 3.35. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin I_a, I_b, I_c akımlarının harmonik spektrumu



Şekil 3.36. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilim dalga şekilleri



Şekil 3.37. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin V_a, V_b, V_c gerilimlerin harmonik spektrumları



Şekil 3.38. M_i aynı V_{da} gerilimi farklı olan R-L yüklü UVDGM'nin aktif ve reaktif güç dalga şekli

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Darbe genişlik modülasyon teknikleri kıyaslandığında bu tekniklerin birbirlerine karşı çeşitli üstünlükleri vardır. Bu teknikler içerisinde en yaygın olarak kullanılan iki teknik karşımıza çıkmaktadır. Biri SDGM tekniği, diğeri ise UVDGM tekniğidir.

Mikroişlemcilerde yaşanan gelişmelerle beraber yeni darbe genişlik modülasyon teknikleri geliştirilmiştir. UVDGM tekniği, bu gelişmenin bir ürünüdür. UVDGM ile çıkış gerilimi istenilen frekans ve genlikte ayarlanmakta ve mikroişlemciler yardımıyla oldukça kolay bir şekilde uygulanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında şebekeden bağımsız iki seviyeli SDGM ile üç seviyeli UVDGM eviricilerinin MATLAB/Simulink benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetimler neticesinde: M_i aynı V_{da} hat gerilimleri farklı olan SDGM ile UVDGM eviricilerinin R yüklü benzetim sonuçları Tablo 4.1'de; R-L yüklü benzetim sonuçları ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablodaki verilerden yola çıkarak;

1. Aynı çıkış gerilimi elde etmek için UVDGM tekniğinde SDGM tekniğine kıyasla daha küçük Vda hat gerilimi kullanılır. Diğer bir ifadeyle UVDGM tekniğinde daha düşük giriş gerilimi kullanılarak aynı çıkış gerilimi elde edilir.
2. UVDGM tekniği SDGM tekniğine kıyasla daha düşük harmonik bozunuma sahiptir.
3. Teorik olarak hesaplanan çıkış gerilimi ile benzetimler neticesinde elde edilen çıkış gerilimleri birbirine yakındır.
4. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de R / R-L yüklü SDGM ve UVDGM benzetimi sonucunda elde edilen akım ve gerilime ait toplam harmonik bozulma seviyesinin uluslararası standartlarda belirtilen değer olan akım için %3, gerilim için %5'in atında olduğu görülmektedir.Böylece yapılan benzetim çalışmasının sonucunun doğru ve standartları sağladığı da tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R yüklü SDGM ve UVDGM'nin benzetim sonuçları

	SDGM		**UVDGM**	
Giriş gerilimi (V_{da})	777,817 V		550.082 V	
Çıkış gerilimi (Etkin değer)	Teorik Sonuç	Benzetim Sonucu	Teorik Sonuç	Benzetim Sonucu
	311.126 V	316,2 V	311.126 V	315,4 V
Yük Akımı % (THB)	%2.67		%1.55	
Yük Gerilimi % (THB)	%2.67		%1.55	

Tablo 4.2. M_i aynı V_{da} gerilimleri farklı olan R- L yüklü SDGM ve UVDGM'nin benzetim sonuçları

	SDGM		**UVDGM**	
Giriş gerilimi (V_{da})	777,817 V		550.082 V	
Çıkış gerilimi (Etkin değer)	Teorik Sonuç	Benzetim Sonucu	Teorik Sonuç	Benzetim Sonucu
	311.126 V	307,9 V	311.126 V	317,9 V
Yük Akımı % (THB)	%2,57		%1,63	
Yük Gerilimi % (THB)	%2,74		%1,52	

Sonuç olarak, çok seviyeli eviricilerden SDGM ve UVDGM eviricilerin kıyası yapıldığında UVDGM eviricinin SDGM'ye göre daha az harmonik bozuluma sahip olduğu, daha düşük hat gerilimi ile aynı çıkış gerilimi elde edildiği tespit edilmiştir. UVDGM eviricisine ait bu özellikler göz önüne alındığında UVDGM tekniğinin SDGM tekniğine nazaran daha iyi bir performans gösterdiği hem teorik olarak hemde benzetimler neticesinde tespit edilmiştir.

Bu evirici türlerinin geniş bir uygulama alanı olduğundan, gerek akademik alanda gerek de endüstriyel alanda AR-GE çalışmaları sürekli yapılmaktadır. Bu yüzden bu alan popülerliğini yitirmeyeceği gibi bu alanda yapılacak daha optimum özellikli evirici ciddi bir kazanç sağlayacaktır. Dolayısıyla gelişmeleri takip etmek ve daha optimum özellikli evirici tasarımı gerçekleştirmek gittikçe önem kazanmaktadır.

KAYNAKLAR

Asker, M. E., Özdemir, M., Bayındır, M. I., 2009. Sinüzoidal DGM ile uzay vektör DGM yöntemlerinin karşılaştırılmalı incelenmesi. *5. Uluslararası ileri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09),* Karabük, Türkiye.

Akmaz, D., 2012. Güç sistemlerinde harmoniklerin incelenmesi ve akım harmoniklerinin azaltılması için aktif güç filtre tasarımları, *Yüksek Lisans Tezi*, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.

Akmaz, D., Mamiş, M.S., Gülan, H., Şeker, B., 2016. İki farklı darbe genişlik modülasyonlu evirici tasarımı ve bu eviricilerin akıllı şebekeler için kıyaslanması. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC),* Çukurova Üniversitesi, Adana / Türkiye Ekim 26-28.

Başman, F., 2006. Elektrik enerji sistemlerinde harmonikler ve filtreleme, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Beşer, E., 2009. Anahtarlama elemanı sayısı ve harmonik optimizasyonu ile bir fazlı çok seviyeli evirici tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Beşer, E., Arifoğlu, B., Çamur, S., Kandemir, E., 2011. 3 Fazlı Çok Seviyeli Evirici Tasarımı ve Uygulaması. *4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,* Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli/Türkiye Mayıs 12-13.

Bilge, M., 2008. Güç sistemlerinde harmoniklerin pasif filtrelerle eliminasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Bingöl, O., 2005. Yapay sinir ağı ile modellenen alan yönlendirmeli bir asenkron motorun üç seviyeli evirici ile hız denetimi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bodur, H., 2010. Güç Elektroniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 396s.

Bozabalı, M., 2009. Üç fazlı sistemlerde paralel aktif güç filtre tasarımı ve simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Budak, Ü., 2011. Çok seviyeli eviricili elektronik balast devresinin modellenmesi ve benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Betanzos-Ramirez, J.D., Rodriguez-Rivas, J.J., Peralta-Sanchez, E., 2011. DSP-based simplified space-vector PWM for a three-level VSI, *2011 Electric Machines & Drives Conference (IEMDC),* 277 - 282.

Canbaz, R., 2014. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici ile çıkış geriliminin sabitlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çolak İ., Kabalcı E., 2008. Çok seviyeli eviricilerin kontrol yöntemleri, *TÜBAV Bilim Dergisi* 2:45-54.

Cordero, R., Pinto, J.O.P., O Soares, J., 2010. New simplification of SV-PWM based on conditional rotation of the reference vector, *2010 Power Electronics Conference (IPEC),* 2992 - 2999.

Das, S., Narayanan, G., 2012. Novel switching sequences for a space-vector-modulated three-level ınverter, Industrial Electronics, *IEEE Transactions,* 59(3). 1477 - 1487.

Demirdöven, İ., 2008. Sinüzoidal PWM sinyalindeki harmoniklerin optimize edilmiş taşıyıcı üçgen dalga ile azaltılması, *Yüksek Lisans Tezi,* Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Deniz, **E.**, 2005. Beş seviyeli inverterlerin SDGM ile kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elazığ.

Deniz, E., 2010. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu kullanan üç seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-statkom'un tasarımı ve gerçekleştirilmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Deniz, E., Altun, H., 2007. Beş seviyeli izole DC kaynaklı kaskat inverterin SPWM tekniği ile kontrolü. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 1-9.

Deniz, E., Tuncer, S., Gencoglu, M.T., 2009. Voltage regulation in a distribution system by using STATCOM with three level diode clamped inverter, *IATS'09 5th-International Advanced Technologies Symposium,* Karabuk/Turkey, 13-15 May.

Dordevic, O., Jones, M., Levi, E., 2011. A space vector PWM algorithm for a three-level seven-phase voltage source inverter, *Power Electronics and Applications,* EPE 2011.

Çağlar, T., 2009. Harmoniklerin akım transformatörü performansına etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Efe, K., 2011. Harmonikleri filtreleme yöntemleri ve kompanze edilmiş bir sistemin yük akış analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Efe, S. B., 2006. Güç sistemlerinde harmoniklerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Elmas Ç., Bingöl O., 2008. Üç-Seviyeli Bir Eviricinin Tasarım Ve Uygulaması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 77-84.

Erdem, E., 2014. 5 KW trafolu tek faz kısa devre korumalı inverter tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Eskin, A., 2012. Alternatif enerji sistemlerinde kullanılan çok seviyeli eviricilerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Fidanboy, H., 2011. Farklı darbe genişlik modülasyon teknikleri ile sürekli mıknatıslı senkron motorun performans analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Gezegin, C., 2006. Harmonikleri süzülmesi ve tepkin güç kompanzasyonu için melez koşut etkin güç süzgeçleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Güzel S., 2014. Çok seviyeli kaskad bağlı H-köprü eviricinin modellenmesi ve benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi,* Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Hyeong, S.J.,Chang-Ho, C., Dong-Seok,H., 1999. A New Simplified Space Vector PWM

İbrahimbaş, M., 2010. Değişken gerilim ve frekanslı senkronsuz ve sinüs olmayan PWM ile çevirici tasarımı ve incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Jacob, B., Baiju, M.R., 2010. Spread spectrum scheme for two-level inverters using space vector sigma-delta modulation. *Power Electronics, Machines and Drives, PEMD,* 2010

Kaçar, E., 2010. Fotovoltaik sistemler için tek fazlı bir invertör tasarımı ve uygulaması, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.

Kabalcı, E., 2010. Çok seviyeli inverterler için yeni bir SDGM tekniğinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kang D.W., Lee Y.H., Suh B.S., Choi C.H., Hyun D.S., 2000. An improved carrierwavebased SVPWM method using phase voltage redundancies for generalized cascaded multilevel inverter topology, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2000.* Fifteenth Annual IEEE, February, 542-548.

Kerem A., 2012. 6 Anahtarlı 3 seviyeli evirici tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Key, S.T., Lai, S.J., 1993. Comparison of standards and power supply design options for limiting harmonic distortion in power systems, industry applications, IEEE Transactions on, 29, 688–695.

Kocalmış A., Sünter, S., 2006. Simulation of a space vector pwm controller for a three-level voltage-fed inverter motor drive, *IEEE Industrial Electronics, IECON, 2006,* 1915 - 1920.

Kocalmıs A., 2005. Uzay vektör PWM kontrollü çok seviyeli inverterin modellenmesi ve benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Kocalmış Bilhan, A., 2012. Bölge ve sektör tespitinde yapay sinir ağları kullanan uzay vektör darbe genişlik modülasyon kontrollü kaskat bağlı üç seviyeli evirici tasarımı, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Kocatepe, C. Uzunoğlu, M. ve Yumurtacı, R., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Köseoğlu, C., 2014. Yenilenebilir enerji sistemleri için çok seviyeli bir eviricinin gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Liu, Hyo L., Choi, Nam S., Cho, Gyu H., 1991. Dsp based space vector PWM for three-level inverter with DC-lınk voltage balancing, *IEEE Application.*

Manjrekar, M., Venkataramanan, G., 1996. Advanced topologies and modulation strategies for multilevel inverters, *IEEE Appplications,* Sayfa. 1013-1018.

Michael, P.A., Devarajan, N., 2009. FPGA implementation of multilevel space vector PWM algorithms, *International Journal of Engineering and Technology,* 208-212.

Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P., 2007. Güç Elektroniği, Literatür Yayıncılık, İstanbul Beyoğlu.

Mondal, Subrata K., Pinto, O.P., Bose, Bimal K., 2001. A neural-network-based space vector pwm controller for a threel-level voltage-fed inverter induction motor drive, *Industry Application Conference,* 1679-1686.

Omaç Z. , Öksüztepe E. , Ceylan S., 2011. Üç Seviyeli Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonlu İnverter İle Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu.*

Önder, H. İ., 2010. Basamaklı çok katlı eviricilerin asenkron motorlarda uygulanmasının analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Sarıkurt, T., 2010. Yenilenebilir enerji sistemleri için çok katlı evirici tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Suh Jae-Hyeong, Choi Chang-Ho, Hyun Dong-Seok., 1999. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters, *IEEE Applications.*

Sünter, Z., 2013. Tek fazlı gerilim kaynaklı eviricilerde harmonik eiminasyonu için yeni bir yaklaşım, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Stynski, S., 2010. Space Vector PWM modulator reducing switching losses for three-level flying-capacitor inverters, 3912 - 3917.

Şerefoğlu, Ş., 2014. Solar sistemler için akıllı evirici tasarımı ve uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Tadros, Y., Salama, S., Höf, R., 1992. Three level IGBT inverter. *Power Electronics Specialists Conference, PESC'92*, 46 - 52.

Tolbert, L. M., Habetler, T. G., 1998. Novel multilevel inverter carrier-based pwm method. IEEE Annual Meeting, St Louis, Missoouri, 1424-1431.

Tuncer, S., 2004. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu kullanan beş seviyeli inverter tasarımı ve uygulaması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elazığ

Tuncer, S., 2004. Çok Seviyeli İnverterler Ve DGM Teknikleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Araştırmaları Dergisi*, 56-61.

Rathnakumar, D., Perumal, J.L., Srinivasan, T., 2005. A new software implementation of space vector PWM, IEEE Southeast Conference, India, 8-10 April, 131-136.

Yumurtcı, M., 2007. Çeşitli modülasyon tekniklerinin harmonik bozulma üzerindeki etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Yumurtacı, M., Üstün, S.V., Varbak Neşe, S., 2009. SVPWM İnverterin Çoklu Darbeler Yöntemiyle Harmonik Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 101-106.

Y. Tadros, S. Salama, R. H., 1992. Three level IGBT inverter, 23rd Ann. Power Electron. Specialists Conf., Toledo, Spain, 46-52.

Walker, G.; Ledwich, G., 1999. Bandwidth considerations for multilevel converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.14, 74 –81.

Wei S., Wu B., Li F., Liu C., 2003. A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters, *Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC03.* Eigteenth Annual IEEE, vol.1, February, 562-568

Wu, B., 2006. High-power converters and ac drives, The Institute of Electrical and Electronics Engineer. Inc.2006.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Elazığ / Palu'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Palu'da, lise öğrenimini ise Kovancılar'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2013 yılında mezun oldu.

Özel firmalarda Yüksek gerilim hatları tesis işlerinde Şantiye Şefi, Trafo tesis işerinde Kontrol Mühendisi ve Enerji iletim hatları işletiminde Grup Mühendisi gibi pozisyonlarda görev aldı.

C sınıfı İSG Uzmanıyken Balıkesir Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği ABD'da yüksek lisansını 2018 yılında tamamlayıp B sınıfı İSG Uzmanı oldu.

Şuanda Balıkesir TEİAŞ'a ait Enerji İletim Hatlarının Bakım Kontrol Arıza giderim işlerinin yapılmasında İşletme Mühendisi olarak çalışmakta.

Evli ve bir çocuğu vardır.