KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİKLERİN AZALTILMASINDA WALSH FONKSİYONLARININ EVİRİCİLERDE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Seda AYDEMİR

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Bekir ÇAKIR

KOCAELİ, 2006

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİKLERİN AZALTILMASINDA WALSH FONKSİYONLARININ EVİRİCİLERDE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda AYDEMİR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Haziran 2006

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç.Dr.Bekir ÇAKIR	Yrd.Doç.Dr. Mehmet BAYRAK	Yrd.Doç.Dr.Engin ÖZDEMİR
(……)	(……)	(……)

KOCAELİ, 2006

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Endüstride yaygın bir şekilde kullanılan doğrultucu ve evirici gibi güç elektroniği düzeneklerinden dolayı güç kalitesi konusu çok önemli hale gelmiştir. Güç sistemlerinin harmonik içermesi motor, iletken, koruma cihazlarının bozulmasına, güç sistemlerinin erken yaşlanmasına sebep olur. Günümüzde harmonik kaynaklarının etkileri güç elektroniği elemanları içeren cihazların yaygın kullanımıyla bir problem olarak önemini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada harmonik kaynaklarından olan eviricilerin çıkış geriliminin harmoniklerinin azaltılması konusuna değinilmektedir.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarıma yön veren ve yardımcı olan danışmanım Doç. Dr. Bekir ÇAKIR'a, çalışmalarımda bana destek olan Yrd. Doç. Dr. Tarık ERFİDAN'a, çalışmalarımda her zaman yardımlarını esirgemeyen ve devre uygulama kısmında katkıları olan Arş. Gör. Mehmet UÇAR'a ve Arş. Gör. Metin KESLER'e ve çalışmalarımda sürekli bana destek olan sözlüm Serkan SEZEN' e ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
1. GİRİŞ 1
2. EVİRİCİLER 3
2.1. Giriş 3
2.2. Tek Fazlı Eviriciler 5
2.2.1. Yarım köprü evirici yapısı 5
2.2.2. Tam köprü evirici yapısı 10
2.3. Evirici Anahtarlama Yöntemleri 11
2.3.1. Sinüsoidal DGA yöntemi 12
2.3.2. Walsh fonksiyonları ile DGA yöntemi 14
2.4. Performans Paremetreleri 16
2.4.1. Harmonik Faktörü 16
2.4.2. Toplam Harmonik Bozulması 17
2.4.3. Bozulma Faktörü (BF) 17
2.4.4. En Düşük Mertebeli Harmonik 18
3. HARMONİKLER 19
3.1. Giriş 19
3.2. Harmoniklerin Tanımı 20
3.3. Harmonik Kaynakları 22
3.4. Harmoniklerin Etkileri 22
3.5. Harmonik Azaltma Yöntemleri 23
3.5.1. Harmoniklerin üretilmesinin önlenmesi 24
3.5.2. Pasif filtreler 24
3.5.3. İzolasyon transformatörleri 25
3.6. Harmoniklerin Analizi 25
3.6.1. Ortogonallik durumu 26
3.7. Güç Kalitesi Standartları 29
4. WALSH FONKSİYONLARI 30
4.1. Giriş 30
4.2. Walsh Fonksiyonlarının Tanımı 31
4.3. Fourier ve Walsh Serileri Arasındaki İlişki 35
4.4. Walsh Fonksiyonlarının Sıralanması 36
4.4.1. Ardışık sıralama (Sequency order) 37
4.4.2. Doğal sıralama (Natural order) 37
4.5. Walsh Fonksiyonlarının Türetilmesi … 37

4.6. Walsh Fonksiyonları ile Hesaplamalar 40
4.6.1. Örnek 1 40
4.6.2. Örnek 2 46
5. TEK FAZLI YARIM KÖPRÜ EVİRİCİ SİMULASYONU 50
5.1. Giriş 50
5.2. Sinosoidal ve Walsh Fonksiyonları ile DGA Modeli 50
5.3. Simulasyon Sonuçları 52
5.3.1. 5. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar 53
5.3.2. 3., 5., ve 7. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar 60
6. TASARIM VE UYGULAMA 65
6.1. Giriş 65
6.2. Uygulama Devresi 65
6.2.1. Doğrultucu devresi 66
6.2.2. Evirici güç devresi 68
6.2.3. Sürme ve yalıtım devresi 69
6.2.4. Denetim devresi 72
6.3. Deneysel Sonuçlar 74
6.3.1. 5. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar 75
6.3.2. 3., 5., 7. harmoniklerin azaltılması için elde edilen sonuçlar 84
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 88
KAYNAKLAR 91
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 93
EKLER 94
ÖZGEÇMİŞ 108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yarım köprü evirici devresi 6
Şekil 2.2. Yarım köprü eviricinin R-L yük için gerilim ve akımın değişimi 6
Şekil 2.3. Anahtar olarak BJT kullanılmış yarım köprü evirici devresi..... 7
Şekil 2.4. Yarım köprü evirici devresine ait akım-zaman grafikleri..... 8
Şekil 2.5. Tam köprü evirici devre şeması..... 10
Şekil 2.6. DGA işaretlerinin elde edilmesi (yalnızca yarım periyot)..... 13
Şekil 2.7. DGA eviricisinin faz gerilimi 14
Şekil 2.8. Tipik bir DGA çeyrek periyot dalga şekli..... 15
Şekil 2.9. Harmonik azaltmada Walsh fonksiyonunun kullanımına ilişkin algoritma16
Şekil 3.1. Sinüsoidal olmayan dalga şekli..... 21
Şekil 3.2. Filtre tasarımı için gerekli devre..... 25
Şekil 3.3. Delta yıldız izolasyon transformatörü..... 25
Şekil 4.1. Ardışık sıralı düzenlenmiş Walsh fonksiyonlarının bir dizisi..... 33
Şekil 4.2. N=16 için ardışık düzenlenmiş Walsh fonksiyonları..... 39
Şekil 4.3. Yarım-Köprü evirici modeli 41
Şekil 4.4. Yarım-Köprü evirici çıkışı dalga şekli (örnek1)..... 41
Şekil 4.5. Yarım-Köprü evirici çıkışı dalga şekli (örnek2)..... 47
Şekil 5.1. Simülasyon modeli 50
Şekil 5.2. Tek fazlı yarım köprü evirici modeli 51
Şekil 5.3. SDGA denetim sinyali parametreleri..... 52
Şekil 5.4. Walsh fonsiyonları ile DGA denetim sinyallerinin üretilmesi 52
Şekil 5.5. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon)..... 53
Şekil 5.6. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harmonik simülasyon) 53
Şekil 5.7. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harmonik simülasyon) 54
Şekil 5.8. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon)..... 54
Şekil 5.9. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon)..... 55
Şekil 5.10. R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon) 55
Şekil 5.11. R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon) 56

Şekil 5.12. R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon) 56
Şekil 5.13. R=22 Ω, L= 74mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harmonik simülasyon) 57
Şekil 5.14. R=22 Ω, L= 74mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harmonik simülasyon) 57
Şekil 5.15. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyon) 58
Şekil 5.16. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumlar (5. harmonik simülasyon)..... 58
Şekil 5.17. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simülasyonu) 59
Şekil 5.18. R=22 Ω, L= 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harmonik simülasyonu) 59
Şekil 5.19. R=22 Ω, L= 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harmonik simülasyonu) 60
Şekil 5.20. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik simülasyonu)..... 60
Şekil 5.21. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (üstte) ve N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 61
Şekil 5.22. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (üstte) ve N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 61
Şekil 5.23. R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 62
Şekil 5.24. R=22 □, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 62
Şekil 5.25. R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 63
Şekil 5.26. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 63
Şekil 5.27. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri 64

Şekil 5.28. R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik simülasyonu) 64
Şekil 6.1. Uygulama devresi blok şeması 65
Şekil 6.2. WFDGA denetimli tek fazlı yarım köprü evirici deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafı 66
Şekil 6.3. Doğrultucu devresi deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafı 67
Şekil 6.4. Doğrultucu devresi 68
Şekil 6.5. Güç devresinin genel yapısı 68
Şekil 6.6. Sürme devresine uygulanan sinyaller 70
Şekil 6.7. Sürme ve Yalıtım Devresi 71
Şekil 6.8. Denetim devresi 73
Şekil 6.9. 22 Ω direnç yükü 74
Şekil 6.10. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 76
Şekil 6.11. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 76
Şekil 6.12. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 77
Şekil 6.13. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 78
Şekil 6.14. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 79
Şekil 6.15. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 79
Şekil 6.16. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 80
Şekil 6.17. R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 81
Şekil 6.18. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 82
Şekil 6.19. R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 82
Şekil 6.20. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç) 83

Şekil 6.21. R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç) 84
Şekil 6.22. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 85
Şekil 6.23. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 86
Şekil 6.24. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 87
Şekil 6.25. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 87

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Yarım dalga eviricideki anahtar ve çıkış durumları 5
Tablo 2.2. Tam dalga eviricideki anahtar ve çıkış durumları 10
Tablo 3.1. IEEE Std 519-1992 gerilim harmonik sınırları 29
Tablo 4.1. İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları $Wal(n,m)$ 33
Tablo 4.2. Doğal sıralamadan ardışık sıralamanın elde edilmesi 39
Tablo 4.3. 5. Harmoniğin azaltılması için hesaplanan açı değerleri 46
Tablo 4.4. 3., 5.,7. Harmoniğin azaltılması için hesaplanan açı değerleri 49
Tablo 6.1. Doğrultucu devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri 67
Tablo 6.2. Güç devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri 69
Tablo 6.3. Güç Sürme ve yalıtım devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri .. 70
Tablo 6.4. PIC16F84 mikrodenetleyici özellikleri 72
Tablo 6.5. PIC16F84 mikro denetleyici bacak bağlantıları 73
Tablo 6.6. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 75
Tablo 6.7. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 77
Tablo 6.8. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 78
Tablo 6.9. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 80
Tablo 6.10. R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 81
Tablo 6.11. 6.11: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç) 83

Tablo 6.12. 5. Harmoniğin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar 84
Tablo 6.13. R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 85
Tablo 6.14. R=22 Ω, L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç) 86
Tablo 6.15. 3., 5.,7. Harmoniğin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar 87

SİMGELER DİZİNİ

a_0	: V_0 (t)' nin ortalama değeri
a_n, b_n	: Fourier sabitleri
$B_{2k-1,4n-3}$	: (4n-3) üncü Walsh fonk.' nun (2k-1) inci harmonik Fourier katsayısı
c_n	: n inci harmonik bileşen tepe değeri (genliği)
D_2	: 2. Diyot
e	: Doğrultucu gerlimi için izin verilen dalgalanmanın yüzde değeri
E	: Kaynak gerilimi
f	: Frekans
f(t)	: Fourier serisi fonksiyonu
I	: Bobin akımının başlangıç koşulu
i_L	: Yük akımı
I_c	: Transistor ortalama akımı
I_D	: Diyot ortalama akımı
K	: K-1 tane harmonik azaltmak için hesaplanması gereken anahtarlama açıları sayısı
L	: Yük endüktansı
L_k	: Devre koruma endüktansı
m	: Walsh fonksiyonu örnekleme noktası
n	: Walsh fonksiyonu sırası
N	: Bir peryotta Walsh fonksiyonları için belirlenen alt aralık değeri
R	: Direnç yükü
T	: Periyot
Q_1	: 1. Transistör
v	: Herhangi bir t anındaki gerilim değeri
V_1	: Ana bileşenin maksimum değeri
V_2	: İkinci harmonik bileşeninin maksimum değeri
V_3	: Üçüncü harmonik bileşeninin maksimum değeri
V_n	: n. Harmonik bileşeninin maksimum değeri
v_L	: Yük gerilimi
V_o	: Çıkış geriliminin efektif değeri
$V_0(t)$	: Çıkış gerilimi
Wal (n,t)	: Walsh fonksiyonları
W_{4n-3}	: DGA çıkış dalga şekli $f(t)$' nin, (4n-3) üncü Walsh katsayısı
ω	: Açısal hız
φ_1	: Temel dalganın faz açısı
$\varphi_2, \varphi_3 \ldots \varphi_n$	: Harmoniklerin faz açıları
ω_1	: Temel dalganın açısal frekansı
$\omega_2,\omega_3,\omega_4$	: Harmoniklerin açısal frekansları
φ_n	: n inci harmonik bileşen faz açısı
τ	: Zaman sabiti

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
BF	: Bozulma Faktörü
BJT	: Bipolar Junction Transistor
DA	: Doğru Akım
HF_n	: n. dereceden bir harmoniğin harmonik faktörü
H.S.	: Harmonik Sırası
IGBT	: Isolated Gate Bipolar Transistor
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineering
KGK	: Kesintisiz Güç Kaynağı
PIC	: Peripheral Interface Controller (Çevresel denetleyici)
RISC	: Reduced Instruction Set Computer (İndirgenmiş Komut Takımı Bilgisayarı)
SDGA	: Sinüsoidal Darbe Genişlik Ayarı
SCR	: Silicon Controlled Rectifier (Silikon Denetimli Doğrultucu)
THB	: Toplam Harmonik Bozulması
WFDGA	: Walsh fonksiyonu ile Darbe Genişlik Ayarı

HARMONİKLERİN AZALTILMASINDA
WALSH FONKSİYONLARININ EVİRİCİLERDE UYGULANMASI

Seda AYDEMİR

Anahtar Kelimler: Walsh Fonksiyonu, Evirici, Harmonik, Fourier.

Özet: Haberleşmeden işaret işlemeye kadar birçok alanda başarıyla uygulanan Walsh fonksiyonlarının yeni bir kullanım alanı olan harmoniklerin azaltılması konusu, 1990'lı yılların başında ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, tek fazlı yarım köprü eviricide seçilen harmoniklerin azaltılması konusu detaylı olarak ele alınmaktadır. Çalışma temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında Walsh fonksiyonları kullanılarak hesaplanan tetikleme açılarının uygulandığı evirici modeli, Matlab/Simulink ortamında oluşturulmaktadır. Ayrıca kullanılan Walsh fonksiyonları yöntemi Sinüsoidal Darbe Genişlik Ayarı (SDGA) yöntemi ile de karşılaştırılmaktadır. Çalışmanın 2. kısmında, evirici harmoniklerinin azaltılmasında Walsh fonksiyonlarının uygulanması için tasarlanan deney düzeneği açıklanmaktadır. Deneysel grafiklere bakıldığında, Walsh yönteminin seçilen harmoniklerin azaltılması konusundaki başarısı görülmektedir. İncelenen farklı aralık değerlerinin ($N=2^n$) değiştirilmesi durumunda, Walsh yönteminin kendi içindeki hassasiyeti ortaya konulmaktadır.

WALSH FUNCTIONS APPLICATION IN INVERTERS FOR HARMONICS ELIMINATION

Seda AYDEMİR

Keywords: Walsh Functions, Inverter, Harmonics, Fourier.

Abstract: Walsh functions can be successfully applied in wide variety applications from communications to signal processing. New applications subject for the Walsh functions is reduction of the harmonics and this function started to be used as an application method at the beginning of the 1990.

This study is related to reduction of selected harmonics in single phase half bridge inverter. There are two parts in this thesis. In first part, an inverter model which is calculated trigger angels by using the Walsh functions was prepared in Matlab/Simulink environment. In addition to that in this part also Walsh function method is compared with sinusoidal PWM method. In second part, designed and constructed test circuit is explained. This circuit is designed as an application of Walsh functions for reduction of the inverter harmonics. When the test circuit experimental data graphs were analyzed, it was observed that success of the Walsh function in reduction of the selected harmonics. It was also demonstrated how to change the Walsh method's sensitivity depend on selecting the different range values ($N=2^n$).

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kullanımı artan doğrultucu, evirici gibi güç elektroniği düzeneklerinden dolayı günümüzde güç kalitesi konusu çok önemli hale gelmiştir. Güç elektroniği düzeneklerinin yüksek gerilim, endüstriyel ısıtma, motor sürücüleri, bilgisayarlar, yazıcılar ve televizyon gibi birçok kullanım alanı mevcuttur. Yük olarak kullanılan bu düzenekler temel frekanstaki akım ve gerilimin yanında bu frekansın tam katlarına sahip akım ve gerilim değerlerine sahip dalga şekilleri içerirler. Bu dalga şekilleri motor, iletken, koruma cihazlarının bozulmasına, güç sistemlerinin erken yaşlanmasına sebep olurlar.

Güç elektroniği devreleriyle elde edilen dalga şekilleri sinüsoidal olmadıklarından her zaman istenmeyen harmonikler içerirler. Bu harmoniklerin gerek kaynağa, ve gerekse yüke etkilerini ortaya çıkarmak için çeşitli dalga şekillerinin içerdikleri harmoniklerin analizini yapmak gerekir [3].

Harmonik kaynaklarından biri olan eviricilerin fonksiyonu, bir DA giriş gerilimini; simetrik, istenilen genlik ve frekansta bir alternatif gerilime dönüştürmektir. Eviriciler, değişken hızlı AA motor sürücüleri, endüksiyonla ısıtma, AA gerilim regülatörleri, kesintisiz güç kaynakları (KGS) sistemleri gibi birçok endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Pratik eviricilerin çıkış gerilimleri ise sinüsoidal değildir ve belli harmonikler içerir. Yüksek hızlı yarı iletken güç elemanlarının uygunluğu doğrultusunda, çıkış gerilimindeki harmonik bileşenleri azaltılabilir yada çeşitli anahtarlama teknikleri ile önemli miktarda düşürülebilir [2].

Bir eviricinin çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerini azalmak için Walsh fonksiyonları temeline dayanan yeni bir darbe genişlik ayarı tekniği ortaya çıkmıştır. Walsh fonksiyonları, parçalı sabit ortogonal fonksiyonlarından biri olarak 1923 yılında Amerikan matematikçi J. L. Walsh tarafından ilk kez bulunmuştur. Sadece +1 -1 genlik değeri alan kare dalga işaretlerinin düzenlenmiş tümüyle ortogonal bir

kümeden oluşmaktadır ve birçok özelliğinin trigonometrik serilere benzemektedir [1].

Çalışmanın ikinci bölümünde, temel evirici yapısına, çeşitlerine ve evirici anahtarlama yöntemlerine kısaca değinilmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, harmonik tanımı, harmonik kaynakları, harmoniklerin etkileri, harmonik azaltma yöntemleri ve harmonik analizi konuları ele alınmaktadır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, Walsh fonksiyonlarının tanımı, Fourier serileriyle ile olan ilişkisi, Walsh fonksiyonlarının türetilmesi ve sıralanması ve Walsh fonksiyonları ile evirici tetikleme açılarının hesaplanması konularına detaylı olarak değinilmektedir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, simülasyon modelleri, elde edilen simülasyon sonuçları gösterilmektedir.

Çalışmanın altıncı bölümünde, tasarlanan deney düzeneğindeki doğrultucu katı, IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) sürücü katı, denetim katının tasarımı ve uygulama sonuçları konularına değinilmiştir.

BÖLÜM 2. EVİRİCİLER

2.1 Giriş

DA/AA (Doğru Akım/Alternatif Akım) dönüştürücüler evirici (inverter) olarak bilinirler. Eviriciler, DA kaynaktan alınan gücü istenilen çıkış gerilimi ve frekansında AA güce dönüştüren statik güç elektroniği devreleridir. AA çıkışı anahtarlama işlemleriyle elde edilir, elde edilen dalga şekli gerilim parçalarından oluşur. Bu parçacıkların değeri pozitif, negatif veya sıfır olabilir [6].

Eviricilerin üreteceği dalga şekilleri ve frekansları, kullanılan yarı iletken elemanların (Tristör, BJT, IGBT, MOSFET) karakteristiklerine, iletim ve kesim sürelerine bağlıdır. Yarı iletken elemanların iletim ve kesim süreleri uygun bir biçimde belirlenmelidir. Bu belirleme ile birlikte elemanların anahtarlama sırası da çok önemlidir.

Bir eviricinin görevi, bir DA giriş gerilimini, simetrik, istenilen genlikte ve frekansta bir AA çıkış gerilime dönüştürmektir. Çıkış gerilimi, ayarlı olabilirken, bu iş ya sabit ya da değişken frekansta yapılmaktadır. Değişken bir çıkış gerilimi, değişken bir DA giriş gerilimi kullanılarak, evirici kazancının sabit tutulması ile elde edilebilir. Diğer bir yol olarak, eğer DA giriş gerilimi sabit ve ayarlanamaz ise, değişken bir çıkış gerilimi evirici kazancını değiştirerek elde edilebilir ki, bu genelde eviricinin darbe genişlik ayarı DGA denetimiyle yani DGA (Pulse Width Modulation) kontrolüyle sağlanır. Evirici kazancı ise, AA çıkış geriliminin DA giriş gerilimine oranı olarak tanımlanabilir. İdeal eviricilere ait çıkış gerilim dalga şekilleri sinüsoidal olmalıdır. Bununla birlikte uygulama da eviricilerin çıkış gerilimleri ise sinüsoidal değildir ve belirli harmonikler içerirler [5].

Düşük ve orta güçlü uygulamalar için, kare dalga gerilimler kabul edilebilir; yüksek hızlı yarı iletken güç elemanlarının uygunluğu doğrultusunda, çıkış gerilimindeki

harmonik bileşenleri minimize edilebilir yada çeşitli anahtarlama teknikleri ile önemli bir miktarda düşürülebilir.

Eviriciler, uygulamada besleme özelliklerine göre ‘’Akım beslemeli ‘’ ve ‘’Gerilim beslemeli’’ olmak üzere iki grupta incelenirler. Evirici; eğer giriş gerilimi sabitse gerilim beslemeli, giriş akımı sabitse akım beslemeli olarak sınıflandırılır. Akım veya gerilim beslemeli eviriciler arasında yapılacak seçim, yükün özelliklerine göre değişir. Eğer yük, harmonik akımlara karşı yüksek empedans gösteriyorsa gerilim beslemeli eviriciler; yük harmonik akımlara karşı düşük empedans gösteriyorsa akım beslemeli eviriciler tercih edilmelidir.

Eviriciler faz sayısına göre iki gruba ayrılırlar:
- Tek fazlı eviriciler
- Üç fazlı eviriciler

Eviriciler, devre yapılarına göre ise:
• Çıkış transformatörlü orta nokta bağlantılı,
• Yarı köprü bağlantılı,
• Tam köprü bağlantılı devreler
olarak üç sınıfa ayrılabilir.

Eviriciler endüstriyel uygulamalarda (örneğin değişken hızlı AA motor sürücüleri, endüksiyonla ısıtma, AA gerilim regülatörleri, kesintisiz güç kaynakları) yaygın olarak kullanılır. Giriş gerilimi batarya, yakıt hücresi, güneş pili, enerji depolama elemanları (bobin, kondansatör) ya da daha farklı bir DA kaynak olabilir.

Eviricilerin başlıca uygulama alanları şunlardır;
1. Değişken hızlı asenkron motor sürücü sistemleri
2. Kesintisiz güç kaynakları
3. Yedek güç kaynakları
4. Uçaklarda güç kaynakları
5. Yüksek doğru gerilimle enerji iletimi sistemlerinde çıkış katı
6. Endüksiyon ısıtma

Uygulamaların çoğunda çıkış gerilimi ve çıkış frekansını beraber denetlemek gerekir. Örneğin asenkron motorlarda hız denetimi için frekans düşürülecek olursa manyetik akının sabit kalabilmesi için, geriliminde düşürülmesi gerekir.

Bu çalışmada tek fazlı yarım köprü evirici kullanılmaktadır. Anahtarlama elemanları olarak IGBT kullanılmıştır.

2.2 Tek Fazlı Eviriciler

2.2.1 Yarım köprü evirici yapısı

Temel evirici olarak da geçen yarım köprü evirici devre şeması Şekil 2.1' de gösterilmektedir. Şekil 2.1' deki devre direnç ve endüktanstan oluşan bir yüke kare dalgalı AA gerilim sağlamak için kullanılabilir. DA kaynağı eşit iki parçadan oluşur ve parçalı kaynak olarak adlandırılır ve Şekil 2.1' de görüldüğü gibi bir temel evirici devresi düzenlenebilir. Devre aynı zamanda yarım köprü olarak bilinir çünkü devrede iki anahtar kullanılır [7].

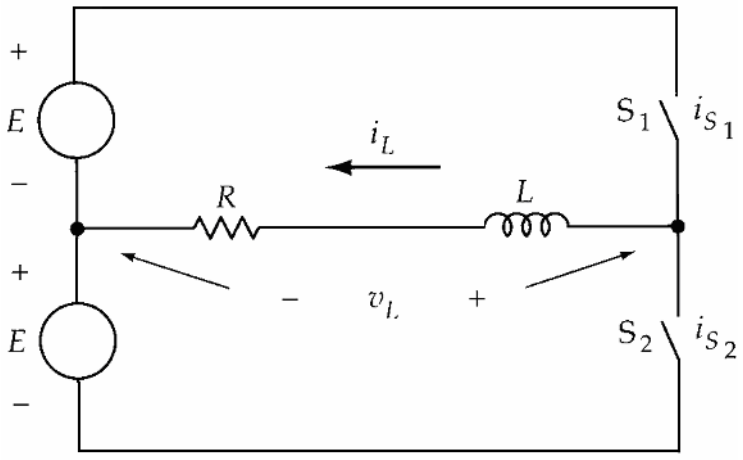
Şekil 2.1' deki ideal anahtarlar değişik zamanlarda açılır ve kapanırlar, zamanın her %50'si için bir anahtar kapalı iken diğeri açıktır. Anahtarlar, IGBT, BJT, SCR veya MOSFET olabilir. Tablo 2.1' de Şekil 2.1' deki yarım dalga eviricideki anahtar ve çıkış durumları görülmektedir.

Tablo 2.1: Yarım dalga eviricideki anahtar ve çıkış durumları

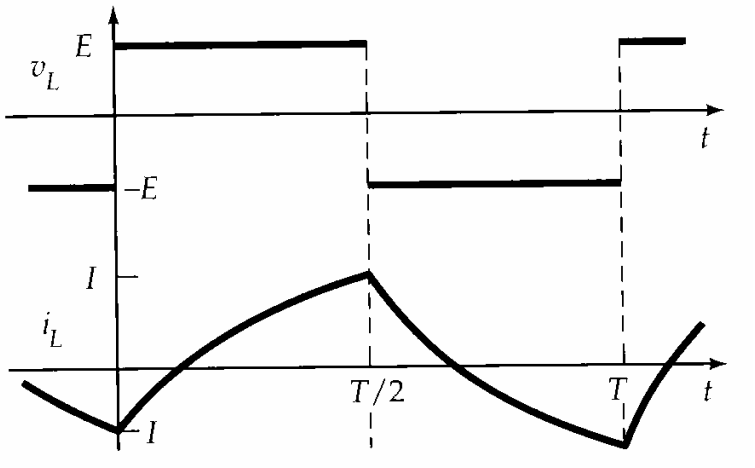
Durum	S_1	S_2	Çıkış Gerilimi
1	+	-	+E
2	-	-	0
3	-	+	-E
4	+	+	0

Şekil 2.1' de S_1 anahtarının kapalı olduğu aralıkta, S_2 açılır, yukarıdaki döngünün devre eşitliği Kirchoff' un gerilim kanununa göre, $v_L = E$ olur. Burada v_L, yük üzerinde düşen gerilimi ifade etmektedir. Belli bir zaman sonra, S_1 açılır ve S_2

kapanır. Bu durumda Kirchoff' un gerilim kanununa göre devre eşitliği $v_L = -E$ olur. S_1 anahtarının açılmadan tam önceki $t = T/2$ zamanında, i_L pozitiftir. S_1 anahtarının açılması ve S_2' nin kapanması üzerine, v_L 'nin işaretinin değişmesine rağmen, bobinde oluşan zıt emk' dan dolayı i_L' nin sürekli ve belli bir zaman için pozitif olması gerekir. Zamanın belirli bir periyodunda, S_2' nin akım yönünü değiştirmesiyle i_L işaretini değiştirmez. Bu durumda anahtar elemanı olarak sadece bir anahtarlama elemanı kullanılamaz. Buna ek olarak ters yöndeki akımı iletebilecek paralel bir diyot kullanılması gerekir. Devre işlemini daha işler hale getirmek için S_1 ve S_2 parçaları yerine BJT' ler kullanılmaktadır. Elde edilen yeni devre düzenlemesi Şekil 2.3 de gösterilmektedir.

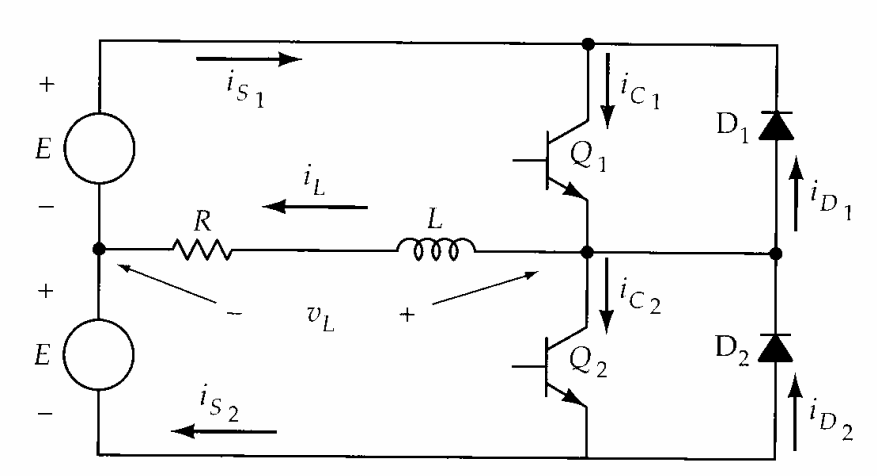


Şekil 2.1: Yarım köprü evirici devresi



Şekil 2.2: Yarım köprü eviricinin R-L yük için gerilim ve akımın değişimi

S_1'in kapalılığının sonunda, herhangi bir t anı göz önüne alınsın. Q_1 transistörünün ideal bir davranış olarak sıfır zamanda kesime gittiği varsayılsın. Q_2 transistörü beyz akımının sağlanması ile iletime geçirilir. Bobinde oluşan zıt emk' dan dolayı geçici bir süre i_L pozitif olduğundan, Q_2 transistörü yük akımını iletemez. i_L için mevcut olabilen tek yol D_2 diyotu iledir. Aynı anda i_L, Q_1 den D_2'ye anahtarlanır, böylece yük gerilimi polaritesini değiştirir. Q_2'nin iletime geçtiği anda bobin üzerinde oluşan zıt emk serbest geçiş diyodu üzerinden boşalacağından yük akımı bozulmaz .



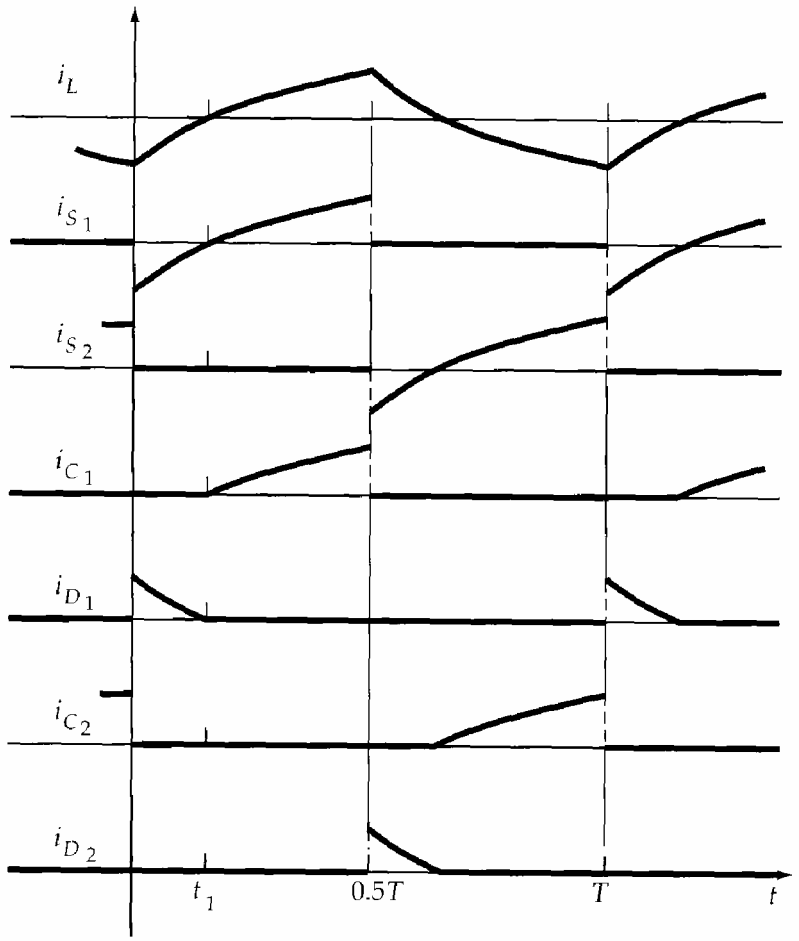
Şekil 2.3: Anahtar olarak BJT kullanılmış yarım köprü evirici devresi

Yük akımının azaldığı bir aralıktan sonra, yük akımı sıfıra gider ve negatif olur. Bu zaman noktasında, Q_2' nin gerçekten iletime geçmesi gerekir. Şekil 2.4 akım-zaman grafiklerini göstermektedir. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, transistör' ün kesime gitmesinin iletime gitmesinden ekseriyetle daha yavaş olmasıdır. Bundan dolayı, transistör' ün iletimi, diğer transistor kesim işlemini tamamlayıncaya kadar geciktirilir. Bu pratikte bir probleme neden olmaz, çünkü iletime geçecek transistor, gerçekte endüktif yükten dolayı belli bir periyot süresinde iletime geçmez. Şekil 2.1 deki devrede, S_1 anahtarı kapalı iken yük akımının davranışı denklem (2.1) kullanılarak bulunabilir [7].

$$E = v_L = Ri_L + L\frac{di_L}{dt} \tag{2.1}$$

S_2 anahtarı kapalı iken, denklem (2.2) eşitliği yazılabilir.

$$-E = v_L = Ri_L + L\frac{di_L}{dt} \tag{2.2}$$



Şekil 2.4: Yarım köprü evirici devresine ait akım-zaman grafikleri

Denklem (2.1) çözümü için sınır şartları, t=T/2 anındaki akım t=0 anındaki akıma işaret değişimi dışında benzer. Denklem (2.1) eşitliği çözülerek denklem (2.3) eşitliği bulunur.

$$i_L = \left(\frac{E}{R}\right)(1 - e^{-t/\tau}) - Ie^{-t/\tau} \tag{2.3}$$

burada,

$$I = \left(\frac{E}{R}\right)\left(\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}}\right) \tag{2.4}$$

I bobin akımının başlangıç koşulunu göstermektedir ve zaman sabiti denklem (2.5)'de gösterilmektedir.

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{2.5}$$

Şekil 2.4 de, bazı akımların başlangıcı ve sonu i_L sıfır iken oluşur. Bu zaman, denklem (2.6) eşitliğinde gösterildiği gibi, 2.3 eşitliğinde i_L sıfıra eşitlenerek ve denklem (2.4) eşitliği kullanılarak bulunabilir.

$$t_1 = \tau \ln\left(\frac{2}{1+e^{-T/2\tau}}\right) \tag{2.6}$$

Şekil 2.4 deki grafikten, anahtarın iki kısmındaki ortalama akım hesaplanabilir. Transistör akımı t_1 ve $t=T/2$ arasında oluşur ve periyodun diğer kısmında sıfırdır. Diyot akımı $t=0$ ve t_1 arasında oluşur ve periyodun kalan kısmında sıfırdır. Ortalama akımlar denklem (2.7) ve denklem (2.8) ile verilir [7].

$$I_C = \left(\frac{1}{T}\right)\int_{t_1}^{T/2} i_L \, dt \tag{2.7}$$

$$I_D = \left(\frac{1}{T}\right)\int_{0}^{t_1} -i_L \, dt \tag{2.8}$$

Şekil 2.3'de yarım köprü olarak bilinen eviricinin çıkış geriliminin efektif değeri $\mathrm{Vs} = 2\,\mathrm{E}$ olduğu durumda denklem (2.9) elde edilir.

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0}\int_0^{T/2} \frac{{V_s}^2}{4} dt\right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \tag{2.9}$$

Ani çıkış gerilimi Fourier serisinde denklem (2.10)' daki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} V_o &= \sum_{n=1,3,5\ldots}^{x} \frac{2V_s}{n\pi}\sin nwt \\ &= 0 \qquad\qquad (\mathrm{n} = 2,4,\ldots \text{ için}) \end{aligned} \tag{2.10}$$

$\omega = 2\pi f_0$ çıkış gerilim frekansı rad/s, n=1 için temel bileşenin efektif değerini (2.10)' dan yazacak olursak denklem (2.11) elde edilir [5].

$$V_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0.45V_s \tag{2.11}$$

2.2.2 Tam köprü evirici yapısı

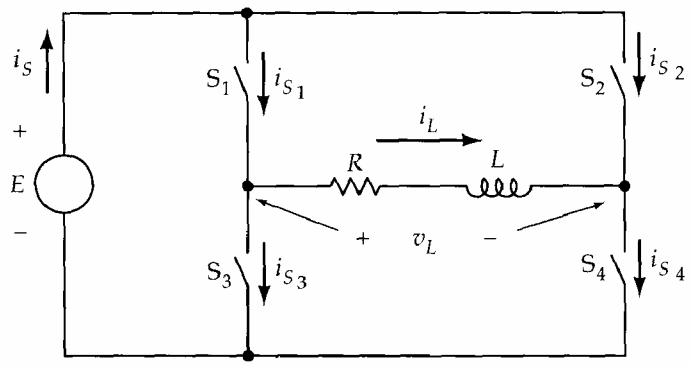
Yarım köprü evirici yapısında eşit genlikteki iki kaynağa gerek duyulması, çoğu durumlarda bu çözümü istenilmez hale getirir. Bunun yerine, köprü evirici düzenlemesi kullanılabilir. Tam köprü eviricide bir kaynak kullanılır, fakat bu gelişim dört anahtar kullanılarak dengelenir.

Şekil 2.5 deki devre, bir DA kaynağı ve dört adet çift yönlü anahtar kullanan bir eviricidir. Bundan önce anahtar için bahsedilen bütün şartlar geçerlidir. DA kaynağı her yarım dalgada eviriciye akım verir, oysaki yarım köprüdeki iki DA kaynağının her biri, her evirici dalgasının her yarım dalgasının birinde akım verir. Tam köprü eviricide anahtar ve çıkış durumları Tablo 2.2' de gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Tam dalga eviricideki anahtar ve çıkış durumları

Durum	S_1	S_2	S_3	S_4	Çıkış Gerilimi
1	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	+E
2	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	-E
3	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	+E
4	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	-E

Evirici işlemi süresince, S_1 ve S_4 anahtarları aynı zamanda kapanır ve v_L' nin pozitif değerli olmasını sağlar. Bir yarım dalganın sonunda, anahtarlar açılır, S_2 ve S_3 kapanır. Burada yine, indüktif yükün bir sonucu olarak, anahtarların çift yönlü akımları geçirebilmeleri gerekir.



Şekil 2.5: Tam köprü evirici devre şeması

Şekil 2.5 deki gerilim kaynağındaki i_S akımının yük üzerindeki zıt emk' dan dolayı negatif olduğu aralıklar vardır. Bu aralıklarda enerji yükten kaynağa geri döner. Kaynağın bu enerjiyi kabul edebilecek özellikte olması gerekir. Şayet kaynak bir doğrultucu ise, çıkış terminallerinde bu enerjiyi kapasitör üzerinde depolanabilecek özellikte olmalıdır.

Köprü düzenleme, S_1 ve S_2' nin *E'* nin negatif kısmı ile ortak terminallerinin olmamasını gerektirir. S_1 ve S_2 yi iletime geçirecek devrelerin, S_3 ve S_4 ü iletime geçirecek devrelerden yalıtılması gerekir çünkü ortak terminalleri yoktur. Örneğin, şayet bu dört anahtar NPN tipi BJT' ler ise dört emiter terminalleri ortak değildir ve beyz sürücü devrelerinin hepsi de aynı referansa sahip olmayabilir. Problem, S_1 ve S_2 yi iletime geçirecek sinyallerin ayrılması ile iki şekilde çözülebilir; kuplaj izolasyonu sağlayan bir darbe transformatörü ile veya beyz akımını iletime geçirecek bir foto-transistör sürücünün bir LED ile optik izolasyonu kullanılarak sağlanabilir [7].

2.3 Evirici Anahtarlama Yöntemleri

Günümüzde endüstrinin bir çok alanında kullanılan eviricilerin, çıkış geriliminin bazı durumlarda denetlenmesi istenmektedir. Bu durumlardan evirici gerilim denetim tekniklerini şu şekilde sıralanmaktadır;

- Eviriciyi besleyen DA giriş geriliminin denetimi
- Eviricilerin AA çıkış geriliminin denetimi
- Evirici içindeki gerilimin denetimi (Sabit V / F denetimi)

Bu sayılanların sağlanması için çeşitli teknikler kullanılır. Bu tekniklerin en etkililerinden biri Darbe Genişlik Ayarı (DGA) tekniğidir.

DGA için kullanılan en yaygın kullanılan yöntemler şunlardır:

1. Kare dalga DGA
2. Sinüsoidal DGA
3. Histeresiz DGA

DGA, temel elektronik devre elemanlarıyla gerçekleştirildiği gibi son yıllarda gelişme gösteren mikro işlemciler yardımıyla da gerçekleştirilmektedir. Mikro işlemcilerin kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda referans sinyali mikro işlemciden sağlanıp, işlemsel amplifikatörlü bir devreyle elde edilen taşıyıcı sinyali ile karşılaştırılarak DGA sinyali elde edilirdi. Daha sonraki gelişmelerde DGA sinyallerin açıları , daha önceden hesaplanıp bir hafıza elemanında toplandı ve mikro işlemci yardımıyla da DGA sinyali elde edildi. Mikroişlemcilerin hızlarının çok fazla artmasıyla bu hesaplama işlemi aynı anda yapılarak (On Line) DGA sinyalleri elde edilmeye başlandı.

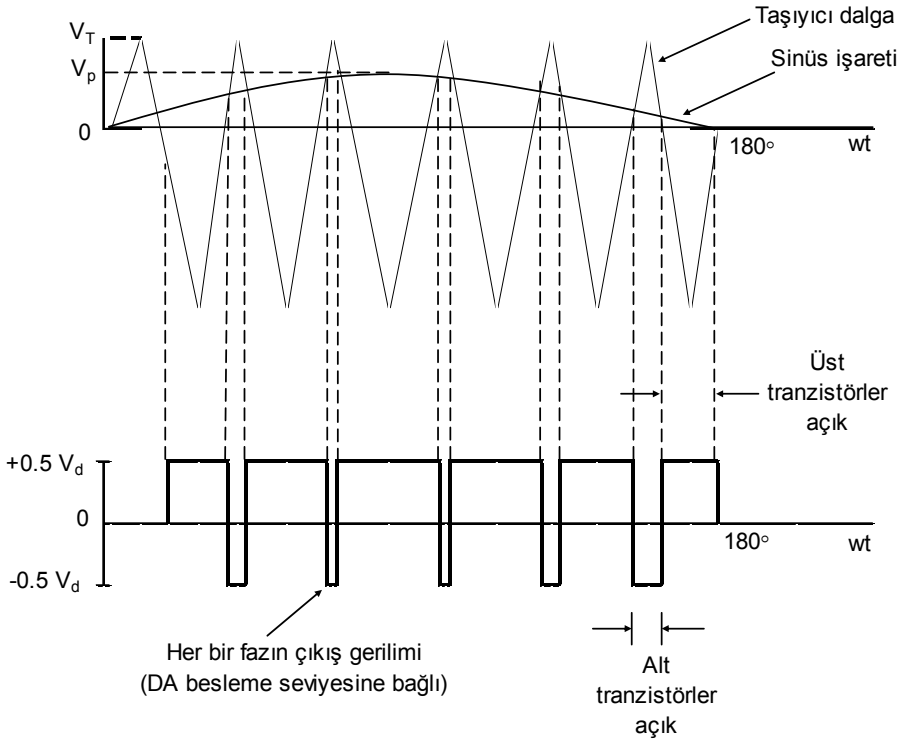
Eviricilerde gerilim kontrolü, evirici çıkış gerilimi dalga şeklinin kontrolü ile sağlanır. Dolayısıyla eviricilerin beslenmesi için girişinde kontrollü bir doğrultucuya gerek duyulmamaktadır.

DGA' de amaç ana kare dalgada darbeler oluşturmak ve bu darbelerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkış ana dalgasının temel bileşenini değiştirmektir. Darbelerin yarı periyottaki sayıların değiştirilmesiyle başlıca anahtarlama harmoniklerinin frekansını yükseltmek suretiyle, motor endüktansının harmonik akımların sınırlanması sağlanır. Anahtarlama frekansının yükselmesi anahtarlama kayıplarının artmasına da sebep olur.
Çıkış frekansının kontrolü için eviricideki elemanlarının faz değiştirme zamanlarının değiştirilmesi yeterli olacaktır. Böylece çıkış gerilimi ve frekansı aynı anda eviriciden kolayca ayarlanabilecektir. Bu özellik, DGA eviricilerin, altı basamaklı eviricilere göre bir üstünlüğüdür [5].

2.3.1 Sinüsoidal DGA yöntemi

Sinüsoidal DGA (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SDGA) yöntemi endüstriyel uygulamalarda yaygındır ve literatürde geniş bir şekilde incelenmektedir. Sinüsoidal darbe genişlik ayarında, çıkış gerilimi, sinyalin tepe değerindeki iletim sürelerinin en uzun olacak şekilde iletim ve yalıtım sürelerini değiştirerek denetlenir. Bir ikizkenar taşıyıcı üçgen dalganın temel frekanslı sinüs dalga ile karşılaştırıldığı DGA yöntemi ve ara kesit noktaları ile belirlenen anahtarlama işaretleri Şekil 2.6' da

gösterilmektedir. Faz geriliminin dalga şekli Şekil 2.7' da gösterilmiştir. Yarım köprü evirici çıkışının alternatif darbesi ve boşluk genişliği sinüs sinyali ile ayarlanır ve dalga şekli frekansın temel bileşenini içerir. Çıkış dalgasının Fourier analizi oldukça karmaşıktır fakat denklem (2.12) eşitliğindeki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.6: DGA işaretlerinin elde edilmesi (yalnızca yarım periyot)

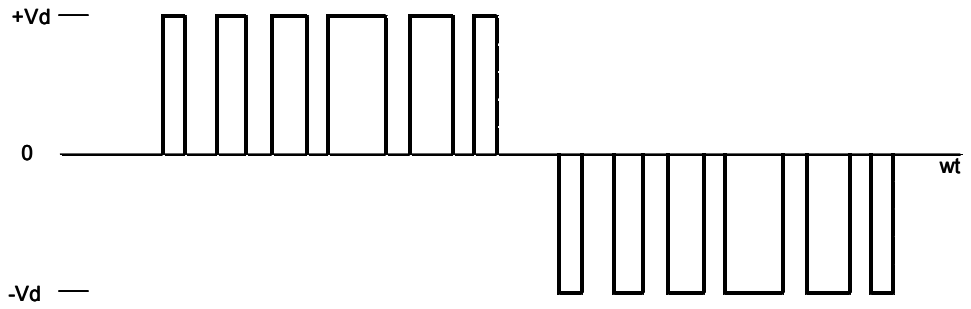
$$v(t) = m\frac{V_d}{2}\sin(\omega_s t + \phi) + Bessel\ fonksiyonu\, harmonik\, terimi \qquad (2.12)$$

Denklem (2.12)' de m ayar işareti, ω_s temel frekans, ϕ çıkış geriliminin faz açısı olup ayar dalgasının konumuna bağlıdır. Modülasyon indeksi diye de geçen ayarlama işareti $m=V_p / V_T$ şeklinde belirlenir $(0 \le m \le 1)$. Burada V_p temel dalganın tepe değeridir ve V_T taşıyıcı dalganın tepe değeridir. Ayarlama işareti ayarlanan gerilim ve çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi göstermek için 0 ile 1 arasında değiştirilebilir; m=1 için temel gerilimin tepe değeri en fazla $0.5V_d$ olur ve bu kare dalga tepe geriliminin %78.5' i dir [6].

m, darbelerin genişliğini ve böylece evirici çıkış geriliminin rms değerini belirler. m, genellikle taşıyıcı sinyalin genliğini sabit tutarken referans sinyalin genliğini

değiştirerek ayarlanır. Evirici çıkış geriliminin frekansı referans sinyalin frekansını değiştirerek ayarlanır. Eviricinin darbe tekrarlama frekansı ile taşıyıcı frekansı aynı değerdedir [4].

Üçün katı harmonikler ve temel dalga karşılaştırılarak doğrusal aralıktaki azami gerilim değeri bir miktar arttırılabilir. m' in sıfıra yakın değerlerinde çıkış gerilimi, simetrik darbe ve boşluk genişliği ile kare dalga olur. Ayarlama işareti 1' e yaklaşırken yarım salınım ortalarındaki boşluk genişliği yok olma eğilimindedir.



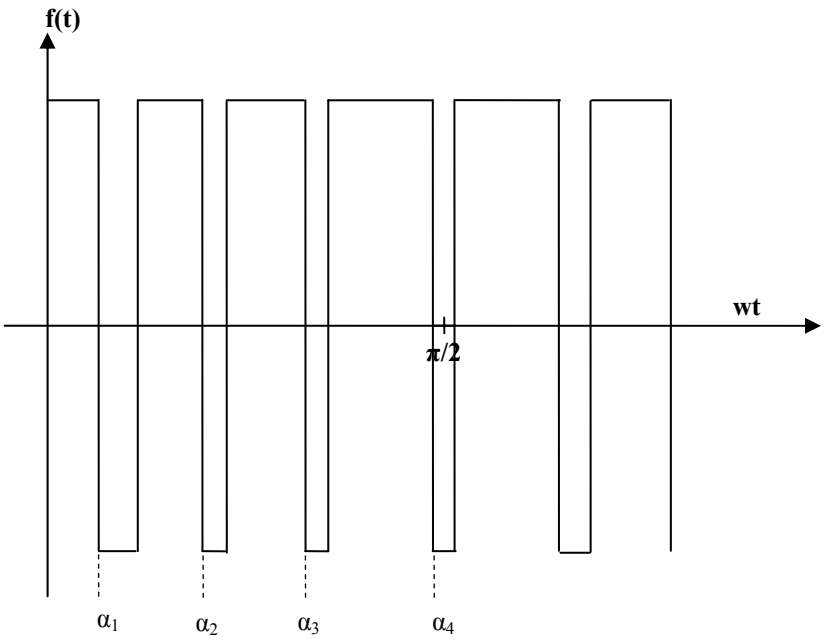
Şekil 2.7: DGA eviricisinin faz gerilimi

Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda, çıkış gerilimi, sinyalin tepe değerindeki iletim sürelerinin en uzun olacak şekilde iletim ve yalıtım sürelerini değiştirerek denetlenir. Şekil 2.7' de de genel bir SDGA modeli görülmektedir.

2.3.2 Walsh fonksiyonları ile DGA yöntemi

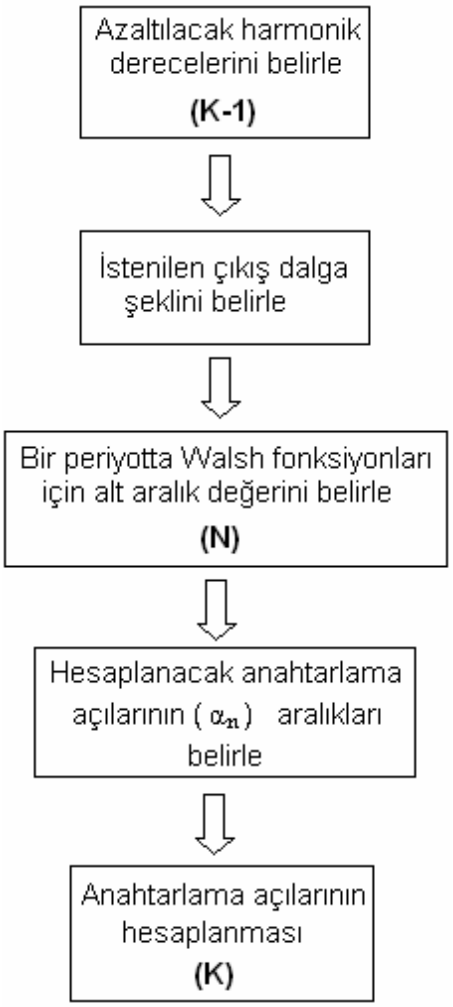
Walsh fonksiyonları, evirici denetimi için yaygın olarak kullanılan harmonik azaltma yöntemidir ve çevrimdışı (off-line) dijital DGA tekniğine dayanmaktadır. Çevrimdışı DGA teknikleri, evirici sabit bir gerilimde çalıştığı zaman daha iyi bir gerilim kullanımı ve daha düşük bir anahtarlama frekansı sağlar.

Evirici çıkış dalga şekli Walsh fonksiyonlarıyla da elde edilebilir. Elde etmekteki amaç seçilen harmonikleri azaltmak için istenilen çıkış dalga şeklini oluşturmaktır. Tipik bir DGA çeyrek periyot dalga şekli Şekil 2.8' de gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Tipik bir DGA çeyrek periyot dalga şekli

Bir çeyrek periyotta K-1 tane harmonik azaltmak için sadece K tane anahtarlama açısını hesaplamaya ihtiyaç duyulur. Şekil 2.9, Walsh fonksiyonları kullanılarak evirici harmoniklerinin azaltılmasında izlenecek işlem basamaklarını ifade etmektedir.



Şekil 2.9: Harmonik azaltmada Walsh fonksiyonunun kullanımına ilişkin algoritma

2.4 Performans Parametreleri

Pratikte, evirici çıkışları harmonikler içerir ve evirici kalitesi normal olarak aşağıdaki performans parametrelerine göre değerlendirilir.

2.4.1 Harmonik Faktörü (HF)

n. dereceden bir harmoniğin, harmonik faktörü, tek tek harmoniklerin dağılımı olmaktadır ve denklem (2.13) de ifade edildiği gibidir.

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \tag{2.13}$$

Burada V_1; ana dalganın efektif değeri ve V_n; n. dereceden dalganın efektif değeridir.

2.4.2 Toplam Harmonik Bozulması (THB)

Toplam harmonik bozulması (THB), dalga şekli ile bu dalga şeklinin bileşenleri arasındaki şekil benzerliğinin bir ölçüsüdür. Denklem (2.14)' deki gibi hesaplanabilir.

$$THB = \frac{1}{V_1}\left(\sum_{n=2,3,..}^{\infty} V_n{}^2\right)^{1/2} \tag{2.14}$$

2.4.3 Bozulma Faktörü (BF)

THB, toplam harmonik mevcudiyetini verir, fakat her bir harmoniğin tek tek seviyesini belirtmez. Eğer eviricilerin çıkışında bir filtre kullanılırsa, yüksek dereceli harmonikler daha kuvvetli biçimde zayıflayacaktır. Bundan dolayı, her dalganın frekans ve genliğinin bilinmesi son derece önemlidir. Bozulma faktörü, belli bir dalga şeklinde, ikinci seviyeden bir zayıflamaya uğradıktan sonra (n^2'ye bölündükten sonra) kalan harmonik bozulmasını belirtmektedir. Böylece BF, istenmeyen harmoniklerin azaltılmasındaki etkinliğin bir garantisini, çıkıştaki ikinci seviyeden yük filtresini görme zorunluluğunu ortadan kaldırarak gösteren bir ifade olup denklem (2.15) da ifade edilmektedir.

$$BF = \frac{1}{V_1}\left(\sum_{n=2,3,..}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2\right)^{1/2} \tag{2.15}$$

Tek tek ya da n. harmoniğe ait bozulma faktörü ise denklem (2.16) deki gibi bulunabilir.

$$BF_n = \frac{V_n}{V_1 n^2} \tag{2.16}$$

2.4.4 En Düşük Mertebeli Harmonik

En küçük dereceli harmonik, frekansı ana dalga frekansına en yakın olan ve genliği ana dalga genliğinin en az %3'üne eşit ya da bu değerden daha büyük olan harmoniktir [5].

BÖLÜM 3. HARMONİKLER

3.1 Giriş

Doğrusal olmayan bir elemana sinüs biçimli bir gerilim uygulandığı zaman, akım sinüs biçimli olarak değişmez ve harmonik bileşenler içerir.

Harmonikler güç sistemlerinde önemli sorunlara yol açmaktadırlar. Sistemin çalışma koşullarını iyileştirmek amacıyla kullanılan kondansatörlerde harmonik seviyesini arttırmaktadır.

Güç sistemlerinde harmonik akım ve gerilim seviyeleri gittikçe artmaktadır. Bunun nedenleri arasında yer alan harmonik üreten güç sistemi elemanlarının kullanılması en önemlisidir. Manyetik ve elektrik devrelerinde lineer olmayan durumlar harmoniklerin oluşmasına sebep olduğundan bu elemanlar lineer olmayan yük çeşitleridir. Bunlar: doğrultucular, hız kontrol cihazları, güç elektroniği devreleridir.

Kullanımı artan doğrultucu, evirici gibi güç elektroniği düzeneklerinden dolayı günümüzde güç kalitesi konusu çok önemli hale gelmiştir. Güç elektroniği düzeneklerinin yüksek gerilim, endüstriyel ısıtma, motor sürücüleri, bilgisayarlar, yazıcılar ve televizyon gibi birçok kullanım alanı mevcuttur. Yük olarak kullanılan bu düzenekler temel frekanstaki akım ve gerilimin yanında bu frekansın tam katlarına sahip akım ve gerilim değerlerine sahip dalga şekilleri içerirler. Bu dalga şekilleri motor, iletken, koruma cihazlarının bozulmasına, güç sistemlerinin erken yaşlanmasına sebep olurlar.

Güç sistemlerine bağlanan bazı devre elemanları ve bunların yol açtığı olaylar sebebi ile sinüsoidal dalga şeklinde sapmalar olur. Manyetik ve elektrik devrelerinde lineer olmayan durumlar harmoniklerin oluşmasına sebep olur. Güç dağıtım sistemleri güç elektroniği cihazları kaynaktan sinüsoidal akım çektikleri için harmonik bozulmaya

neden olurlar. Güç sistemlerinde harmonikler, farklı genlik ve frekanslarda bozuk sinüs dalgalarını ifade etmek için kullanılırlar. Bu bozuk sinüs dalgaları Fourier serileriyle analiz edilerek bileşenleri bulunur [2].

Güç sistemine bağlanan elemanların akım ve gerilim şeklinin sinüsoidal olması istenir. Bu durum sisteme sinüsoidal kaynak ve lineer elemanların bağlanması sonucu elde edilebilir. Günümüzde gittikçe artan sayıdaki lineer olmayan elemanlar, güç sisteminde sinüsoidal olmayan büyüklüklere sebep olurlar. Sinüsoidal olmayan büyüklüklerin bulunması harmoniklerin güç sisteminde bulunması demektir. Harmoniklerin oluşması enerji sistemleri için istenen bir durum olmamakla beraber, önlem alınmazsa ortaya çıkması kaçınılmazdır. Harmonikler başlıca generatör ve şebeke geriliminin bozulmasına, gerilim düşümünün artmasına, enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artmasına ve rezonans olaylarına sebep olmaktadırlar.

Eviricilerin çıkış gerilimleri kare dalga formundadır. Eviriciden elde edilen gerilim tam sinüs olmadığı için çıkış işaretinin Fourier serisine açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler meydana gelecektir. Bu harmonikler, işletilen cihazda istenen performansın alınabilmesini engellediği için istenmez. Örneğin eviriciden beslenen motorlarda istenmeyen akım harmonik bileşenleri oluşması sonucunda ek kayıplar, moment dalgalanmaları, verim düşüklüğü gibi problemler ortaya çıkar [4]. Uygulamalarda harmonikleri yok etmek için yüksek dereceden bir filtre kullanılması maliyet bakımından iyi bir çözüm değildir [5]. Bu nedenle evirici devresindeki anahtarlama elemanlarının, tetikleme frekanslarının ve iletim sürelerinin değiştirilmesi ile bazı harmoniklerin yok edilmesi çözümüne gidilir. Bütün harmoniklerin evirici devresinde yok edilmesi imkansızdır. Bu yüzden çıkışta alçak geçiren filtre devresi kullanılır [9].

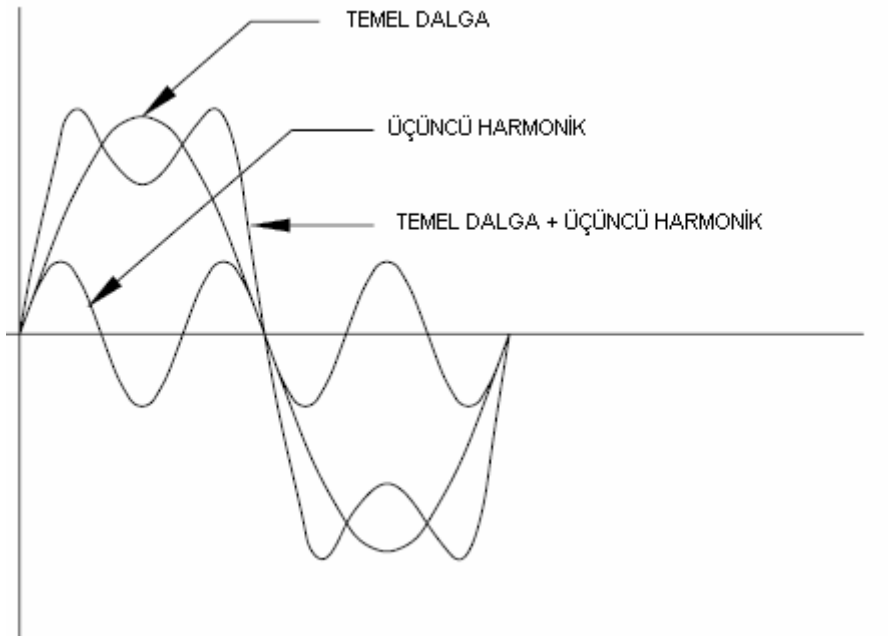
3.2 Harmoniklerin Tanımı

Devirli bir fonksiyon; temel frekansının katlarında ve farklı genliklerde sinüs ve kosinüs fonksiyonlarından oluşmuş trigonometrik bir seri olarak ifade edilmektedir. Bu farklı frekans ve genlikteki sinüs ve kosinüs bileşenlerine harmonik adı

verilmektedir. Örneğin, frekansı temel frekansın 7 katı olan bir bileşene 7. harmonik denir. Her harmoniğin temel bileşenle aynı fazda olduğu kabul edilir.

Periyodik, fakat biçimleri bozulmuş olan gerilim ve akım dalgaları, Fourier analiz yöntemi kullanılarak, genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalganın toplamı olarak ifade edilmektedir. Başka bir ifade ile frekansı, temel frekansın tam katı biçiminde olan bileşenler harmonik olarak tanımlanır. Harmoniklerin dağıtım şebekelerine etkilerinin belirlenebilmesi için harmonik akım ve gerilimlerinin hesaplanması gerekir.

Sinüsoidal olmayan dalgaları sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde ifade etmek, güç sistemleri problemlerini çözmede daha genel matematiksel ifadeleri ve formülleri kullanmamıza imkan verir. Ekipmanın bir parçası üzerindeki sinüsoidal olmayan akım veya gerilimin etkisini bulmak yerine sadece harmoniğin etkisini saptamak ve sonra toplam etkiyi bulmak için sonuçları vektörel olarak toplamak yeterli olur. Şekil 3.1 sinüsoidal harmoniklerin toplanarak nasıl sinüsoidal olmayan bir dalga şekli oluşturduklarını göstermektedir [8].



Şekil 3.1: Sinüsoidal olmayan dalga şekli

3.3 Harmonik Kaynakları

Gerek ticari gerek endüstriyel bütün iş alanlarının yönetim ve enerji/kamu hizmetinin güç kalitesiyle ilişkisi bulunmaktadır. Beklenen kalitedeki elektriğin güvenilir ve kesintisiz dağıtımı günlük işler için kritiktir. Yüklerdeki sayısal teknolojideki artışla birlikte kaliteli enerjiye olan gereksinim de artmaktadır. Harmonik içeriğiyle dolu bir ortam güç dağıtım sistemine ve bağlı bulunduğu cihazlara ciddi boyutta sıkıntı vermektedir.

AA elektriksel yükler genellikle rezistif, endüktif ve kapasitif elemanlardan oluşmaktadır. Harmonik üreten kaynaklar üç ana gruba ayrılabilir.

Bunlar,

1. Ferromanyetik cihaz, temel olarak demir nüve etrafına sarılmış bobin. Örnek olarak transformatörler ve motorlar verilebilir. Bu cihazlar normalde rezonans durumu olmadıkça problem yaratmaz.
2. Elektronik doğrultucular ve eviriciler. Örnek olarak bilgisayarlar, ayarlı hız sürücüleri, yumuşak yol vericiler, KGK sistemleri, statik AA/DA güç dönüştürücüleri verilebilir.
3. Ark yapan cihazlar. Bu cihazlar floresan ve gaz (vapor) aydınlatması, ark kaynak makineleri ve ark fırınlarını içerir.

Bir sinüsoidal dalga formu 50 Hz ya da 60 Hz (diğer bazı uygulamalarda 400 Hz) temel frekansına sahiptir ve harmonik spektrumu temel frekansın tam sayı katları olarak ölçülür ve ‘derece’ olarak listelenir. Temel frekansı 50 Hz olan bir sistem için ortak sınıflandırma örneği olarak üçüncü derece harmoniğini (3x50 Hz) 150Hz, beşinci derece harmoniğini (5x50 Hz) 250 Hz içerir.

3.4 Harmoniklerin Etkileri

Harmoniklerin etkileri ve çözümleri çok farklıdır ve ayrı ayrı ele alınması gerekir. Harmonikler güç sistemlerinin verimsizliğine yol açar. Harmoniklerin yükleri ya da cihazlara olan olumsuz etkileri şu şekilde sıralanabilir:

1. İletkenlerin aşırı ısınması: Normalden ince iletkenler ya da kablolar üzerindeki harmonik akımları yüzey etkisine (skin effect) sebep olurlar. Bu etki frekansla birlikte artar ve merkezkaç kuvvete benzer.
2. Kondansatörler: Kondansatörler sıcaklık artışından etkilenebilirler ve ömürleri kısalabilir. Eğer bir kondansatör 5. ya da 7. harmonik gibi karakteristik harmoniklere ayarlanırsa aşırı gerilim ve rezonans dielektrik hatasına neden olabilir ya da kondansatörü patlatabilir.
3. Sigortalar ve devre kesiciler (circuit breakers): Harmonikler elemanlara görünür bir neden olmaksızın zarar vererek yanlış işlemlere neden olabilirler.
4. Transformatörler: Harmonikler, transformatör sargılarında aşırı ısınmaya neden olur ve yalıtım bozulur.
5. Jeneratörler: Transformatörlerle benzer problemlere sahiptir. Boyutlandırma ve düzenleme gerilim regülatörünün çalışması için kritiktir. Gerilim harmoniklerinin aşırı olması akım dalga şekillerinde çoklu sıfır geçişlerine neden olacaktır. Çoklu sıfır geçişleri de gerilim regülatörünün zamanlamasını etkiler ve bu da girişime ve kararsız çalışmaya sebep olabilir.
6. Elektrik sayaçları: Elektrik sayaçları ölçümleri hatalı yapılabilir. Bu da tüketicilere daha yüksek faturaların gelmesine sebep olur.
7. Sürücüler/Güç kaynakları: Çoklu sıfır geçişleri nedeniyle yanlış çalışmadan etkilenebilir. Harmonikler SCR' li AA ve DA sürücülerinde bulunan komütasyon devrelerinde hataya yol açabilir.
8. Elektrik tesislerinde güç faktörünün değişimine neden olur.
9. Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi neden olur.
10. Anahtarlama elemanları üzerinde olumsuz etkileri vardır.
11. Elektrik tesislerinde jeneratörler ve şebeke geriliminin şeklinin bozulmasına sebep olur [4,10].

3.5 Harmonik Azaltma Yöntemleri

Harmoniklerin dezavantajlarını azaltmada kullanılan yöntemler teknik ve ekonomik gerçekler temelinde seçilir. Harmonikleri filtrelemenin mi ya da harmoniklerin üretilmesini önlemenin mi daha ekonomik olduğuna karar vermek gerekir. Burada

yer verilecek harmonik azaltma yöntemleri, pasif filtreler, izolasyon ve harmonik azaltma transformatörleri ve aktif filtrelerdir.

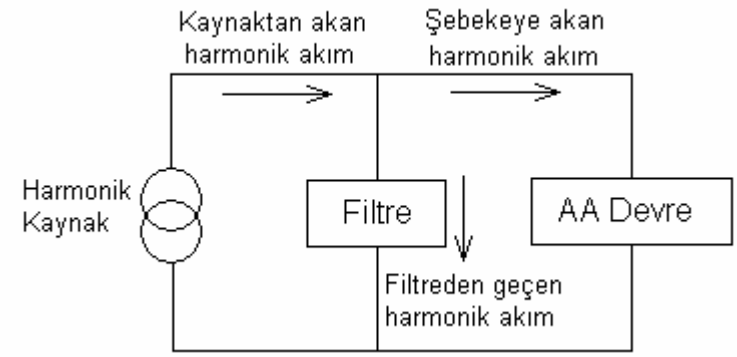
3.5.1 Harmoniklerin üretilmesinin önlenmesi

Doğrusal olmayan elemanların karakteristiklerinin değiştirilmesi veya geliştirilmesi üretilen harmonik miktarını azaltabilmektedir. Geliştirme, en önemli harmonik kaynaklarından biri olan dönüştürücü sistemlerinde olmalıdır. Bu dönüştürücülerden biri olan evirici sistemlerinde, darbe sayısının artırılmasıyla harmonik genliğin azaltılması ve düşük frekanslı harmoniklerin iptali mümkün olmaktadır. Örneğin 6 darbeli yerine 12 darbeli eviricilerin kullanılması 5. ve 7. dereceden harmoniklerin iptal olmasını sağlar. Diğer bir dönüştürücü topolojisi olan DA güç kaynağının denetiminin geliştirilmesiyle, giriş akımlarının harmonik spektrumu da geliştirilmektedir. Yine darbe genişlik modülasyonlu eviricilerde, istenen harmonik veya harmonikleri yok etmek için denetim sinyalindeki tetikleme açıları hesaplanabilmektedir. Bu hesaplama yöntemlerinden biri de Walsh fonksiyonları yöntemidir.

3.5.2 Pasif filtreler

Hat ile nötr arasında bulunan ve istenilen frekanstaki harmonik akımının toprağa akmasını sağlayan devrelere pasif harmonik filtre denilmektedir. Süzülmek istenen harmonik frekansında rezonansta olan; böylece bir devrenin direnci rezonans frekansı için çok küçük olduğundan, bu frekanstaki akımın büyük bir kısmı toprağa akıtılarak süzülmüş olur .

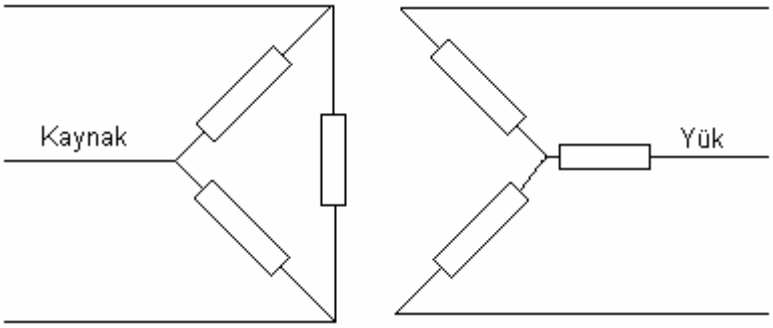
Pasif fitreler Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi harmonik akımı için düşük empedans yolu sağlarlar. Öyle ki harmonik akımı kaynaktan değil filtreden akar. Filtre, gereksinimlere bağlı olarak tek bir harmonik derecesi için ya da daha geniş bandlı bir harmonik spektrumu için tasarlanabilir [11].



Şekil 3.2: Filtre tasarımı için gerekli devre

3.5.3 İzolasyon transformatörleri

Üçlü-N akımları transformatörün delta sargılarında dolaşır. Bu, transformatör üreticileri için bir problem olduğu halde –ekstra bir yük hesaba katılmak zorundadır- sistem tasarımcıları için faydalıdır, çünkü üçlü-N harmoniklerini kaynaktan izole eder.



Şekil 3.3: Delta yıldız izolasyon transformatörü

Aynı etki zig-zag sargılı transformatör kullanılarak sağlanabilir. Zig-zag transformatörler kaynaklar paralel bağlı sargılarla arasında özel faz ilişkisi bulunan yıldız konfigürasyonlu oto transformatörleridir.

3.6 Harmoniklerin Analizi

Her periyodik dalga biçiminin, üç kalemde toplanabilecek şu bileşenlerin süperpozisyonu ile elde edilebileceği gösterilebilir.

1. Doğru (sabit) bir bileşen
2. Saf bir temel sinüs bileşeni
3. Frekansları, temel bileşenin frekansının tam katları olan saf sinüs bileşenler (harmonikler) [3].

Sürekli haldeki gerilim genellikle zamanın periyodik fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$V_0(t) = V_0(t+T) \tag{3.1}$$

Burada T periyot olup, f çıkış geriliminin frekansıdır. Açısal frekans ise ;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{3.2}$$

$$V_0(\omega t) = V_0(\omega t + 2\pi) \tag{3.3}$$

3.6.1 Ortogonallik durumu

İstenilen doğruluk derecesinde çözüm elde etmek için sadece ortogonal fonksiyonlar tümüyle sentez ve analiz edilebilir. Dahası, ortogonal bir kümenin karakteristikleri, verilen zaman fonksiyonunda yer alan kümenin belirli elemanlarının özellikleri fonksiyon üzerinde oldukça basit matematiksel işlemler kullanılarak tanımlanır [1].

a ve b aralığında tanımlanan iki fonksiyonun skaler çarpımı denklem (3.4)' de gösterilmektedir.

$$\int_a^b \varphi(x) \cdot \Theta(x) dx \tag{3.4}$$

Denklem (3.4)' de gösterilen fonksiyonların skaler çarpımları sıfıra eşit olduğu durumda bu φ(x)ve Θ(x) fonksiyonları ortogonaldır denir.

$$\int_0^{\pi} \sin x \cdot \cos x \cdot dx = \frac{\sin^2 \pi}{2} - \frac{\sin^2 0}{2} = 0 \tag{3.5}$$

Denklem (3.5)' deki eşitliğe göre, [0,pi] aralığında "sinx ve cosx ortogonaldır" denir.

Sinüsoidal olmayan dalgalar matematiksel olarak denklem (3.6)' daki gibi ifade edilirler.

$$v = V_1.\mathrm{Sin}(\omega t + \varphi_1) + V_2.\mathrm{Sin}(2\omega t + \varphi_2) + V_3.\mathrm{Sin}(3\omega t + \varphi_3) + \ldots\ldots\ldots + V_n.\mathrm{Sin}(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)' da,

v : Herhangi bir t anındaki gerilim değeri,

V_1 : Ana bileşenin maksimum değeri,

V_2 : İkinci harmonik bileşeninin maksimum değeri,

V_3 : Üçüncü harmonik bileşeninin maksimum değeri,

V_n : n. Harmonik bileşeninin maksimum değeri,

φ_1 : Temel dalganın faz açısı,

$\varphi_2, \varphi_3 \ldots \varphi_n$: Harmoniklerin faz açıları,

ω_1 : Temel dalganın açısal frekansı,

$\omega_2, \omega_3, \omega_4$: Harmoniklerin açısal frekanslarıdır.

Sin(a + b) = sina.cosb + cosa.sinb trigonometrik eşitliği kullanılarak denklem (3.7)' deki biçime dönüştürülebilir.

$$f(t): \frac{1}{2}a_0 + a_1\cos\omega t + a_2\cos 2\omega t + a_3\cos 3\omega t + \ldots\ldots\ldots + a_n\cos n\omega t + b_1\sin\omega t + b_2\sin 2\omega t + b_3\sin 3\omega t + \ldots\ldots + b_n\sin n\omega t \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)' deki eşitlik Fourier serisi olarak bilinir ve Fourier analizi yardımıyla eşitliğin katsayıları bulunur. Aynı denklemi kısaca denklem (3.8)' deki gibi ifade edilebilir.

$$f(t): \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t + b_n\sin n\omega t) \quad (3.8)$$

Fourier teoremi, peryodik bir $V_0(t)$ fonksiyonunun k tam sayı olmak üzere, bir sabit ve k.ω frekansının sinüs ile cosinüslü terimlerinden oluşan sonsuz denklem (3.9)' daki şekilde bir seri olarak tanımlanabilir.

$$V_0(t) = \frac{a_0}{2} + a_1\cos\omega t + b_1\sin\omega t + a_2\cos 2\omega t + b_2\sin 2\omega t. + \ldots \ldots + a_n\cos n\omega t + b_1\sin n\omega t \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)' da periyot T kabul edildiğinde (0,T) veya (-T/2, T/2) aralıkları için hesaplamak gerekir ki; bu durumda a_0 , a_n , b_n değerlerini veren formüller denklem (3.10), (3.11), (3.12)' de görülen eşitliklerdir.

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)dt \tag{3.10}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos n\omega t dt \tag{3.11}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin n\omega t dt \tag{3.12}$$

Aynı frekanstaki sinüs ve kosinüs terimleri bir faz açısı ile bir tek sinüs yada kosinüs terimi altında toplanabilirler. Bu şekilde trigonometrik serilerin denklem (3.13) ve denklem (3.14)' deki iki türü meydana gelir;

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\sin n\omega t + \varphi_n) \tag{3.13}$$

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n(\cos n\omega t + \theta_n) \tag{3.14}$$

$c_1\sin(\omega t + \varphi_1)$ terimine *f(t)* fonksiyonunun birinci harmoniği yada temel dalga denir. Bu durumda denklem (3.15)' deki eşitlik yazılabilir.

$$c_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \tag{3.15}$$

denklem (3.15)' deki ifade, harmoniğin genliğini belirtir. Faz açısı ise denklem (3.16)' daki gibi bulunur [18].

$$\varphi_n = Arctg(\frac{a_n}{b_n}) \tag{3.16}$$

Periyodik bazı dalga şekilleri sinüs ve kosinüs terimlerini beraber veya her iki terimlerin tek harmoniklerini içerirler. Bu nedenle bazı simetri tanımları önemlidir.

- T periyotlu f(ωt) fonksiyonu, birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşmuş ise f(ωt) = - f(ωt + π) şartı sağlanır. Bu durumda yarı dalga simetrisi olur ve harmonikler tek mertebelidir.

$$f(t) = b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\omega t + \ldots\ldots + a_1 \cos \omega t + a_3 \cos 3\omega t + \ldots\ldots \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)' deki şeklini alır.

Verilen fonksiyon f(ωt) = f(-ωt) koşulunu sağlıyorsa çift fonksiyondur. Bu tip fonksiyonlarda sadece kosinüslü terimler bulunur. Denklem (3.18)'deki eşitlik şeklinde olur.

$$f(t) = 1/2a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \ldots\ldots \quad (3.18)$$

- Verilen fonksiyon f(ωt) = - f(- ωt) koşulunu sağlıyorsa tek fonksiyondur. Fonksiyon açılımında sadece sinüslü terimler bulunur. Denklem (3.19)' daki şekilde ifade edilir.

$$f(t) = 1/2a_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \ldots\ldots \quad (3.19)$$

3.7. Güç Kalitesi Standartları

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineering-IEEE) tarafından akım ve gerilim harmonik bozulmalarının kabul edilebilir sınırları belirlenmiştir.

Pratikte, birçok kullanıcı tüm güç sistemi ya da içerisindeki herhangi bir kısım için IEEE-519 gerilim ve akım harmonik bozulma sınırı %5 olarak belirtmiştir [4].

Tablo 3.1: IEEE Std 519-1992 gerilim harmonik sınırları

Bara Gerilimi (kV)	Maksimum Bireysel Harmonik Bileşen (%)	Maksimum THB_v (%)
69 ve altı	3.0	5.0
115-161	1.5	2.5
161 ve üstü	1.0	1.5

BÖLÜM 4. WALSH FONKSİYONLARI

4.1 Giriş

Sinüs ve kosinüs fonksiyonları, birçok elektrik mühendisliği alanının gelişmesinde temel bir sistem oluşturur. Bu konuda çalışmalar, tamamlanmış ve ortogonal (dikken) özellikler taşıyan haberleşme ve rassal problemlerin analizinde uygulanmaktadır.

Doğrusal zaman sabitli sistemlerde sin ve kos fonksiyonlarının bazı istenilen özelliklerinin kullanılamadığı durumlarda, sistemin tamamını gösteren ortogonal fonksiyonlar, dijital teknikler ve yarı iletken teknolojilerinin uygulamalarında daha direk uygulanabilirlik avantajı sağlamaktadır.

Walsh ve Haar fonksiyonlar kümesi, ortogonal fonksiyonların en önemlisini oluşturur. Bu fonksiyonlar sadece iki durumda sınıflandırılır. Bunlar; sayısal mantık davranışına ve sinüs ve kosinüs serilerinin etkin hileli özelliklerinin çoğuna sahip olmasıdır.

Haar serileri, ilk olarak bir Macar matematikçi olan Alfred Haar tarafından 1910 yılında tanımlanmıştır. Alfred Haar verilen fonksiyona yakınsayan yeni fonksiyonlarda, genişletilmiş yapıda sürekli bir fonksiyon veren ve sadece iki değer alabilen bir ortogonal fonksiyonlar kümesi önermektedir. Ortogonal seriler için önerilen teoriler Göttingen' de Schmidt tarafından yeni yüzyıla girerken geliştirilmiştir.

Walsh fonksiyonları, ilk olarak bir Amerikan matematikçi olan J. L. Walsh tarafından 1923 yılında tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar aynı zamanda tam bir ortogonal kümedir ve sadece +1 ve -1 değerlerini alır, bununla birlikte bu fonksiyonların trigonometrik serilerle benzerlik gösterdiği bulunmuştur. Walsh

fonksiyonlarının ortaya çıkışından önce bir Alman matematikçi olan H. Rademacher, Walsh fonksiyonlarına tamamlanmamış fakat doğru bir alt küme sunmuştur.
Bu fonksiyon kümeleri işaret işleme ve haberleşmede yeni bir yöntemin temelini oluşturmuştur. 1931 yılında başka bir Amerikan matematikçi olan R. E. A. C. Paley tarafından Walsh fonksiyonlarının tamamen farklı bir tanımlaması yapılmıştır. Çeşitli Alman ve Amerikan matematikçiler ilerleyen yıllarda da bu konu üzerine çalışmalar yapmıştır [1].

4.2 Walsh Fonksiyonlarının Tanımı

Walsh fonksiyonları, esas olarak Fourier analizinde kullanılan kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının sayısal cevabıdır. Başka bir ifadeyle sayısal bir şekilde ifade edilmesidir. Fourier serileri seçilmiş frekanslardaki saf kosinüs ve sinüs dalgalarının toplamı olarak oluşturulan dalga işaretidir. Fourier serileri karmaşık işlemler içerir ve yüksek matematik bilgisi gerektirir. Walsh fonksiyonlarında birkaç ana temel düşünce esas alınarak çalışılabilir [12].

Genellikle haberleşmede, işaret işlemede, görüntü işlemede, wavelet uygulamalarında, spektrum ölçümlerinde kullanılır. Bununla birlikte Walsh fonksiyonları, harmonik analizinde de kullanılan bir yöntemdir. Bu alanda Walsh fonksiyonu metodu, genellikle sayısal DGA tekniğine dayalı evirici harmoniklerinin azaltılmasında kullanılır. Bu algoritma, seçilen harmoniklerin azaltılmasında doğru, tam sonuçlar üretir ve hesabı kolaylaştırır [13].

Darbe genişliği ayarlama tekniklerinin (DGA) uygulama ve prensipleri literatürde geniş bir şekilde yer alır. DGA dalga şeklini üretmenin çeşitli yöntemleri vardır; bunlardan biri de harmonik azaltma metodudur. Bu metodun genel karakteristiğinde DGA dalga formunu elde etmek için yapılan analizi Fourier tanım kümesinde meydana gelir. Seçilen harmonikleri yok etmek için değişken darbe genişliğine sahip (DGA) evirici dalga şekillerinde parçalı-sabit ortogonal fonksiyonlarla (piecewise constant ortogonal functions) birlikte yeni bir yöntem sunulmuştur. Blok-darbe fonksiyonları (block-pulse function) arasındaki ilişki Walsh fonksiyonları ile Fourier serileriyle birlikte bir DGA eviricide harmonik azaltmak için kullanılmıştır. DA/AA

eviriciler, kontrol edilebilir genlik ve frekansla birlikte sinüsoidal AA bir gerilim üretirler. Eviriciler, kesintisiz güç kaynağı (KGK) ve AA motor sürücüleri gibi bir çok uygulama da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir çok tipte evirici vardır. Endüstriyel uygulamalarda sinüsoidal DGA eviriciler en çok kullanılanlarıdır [14].

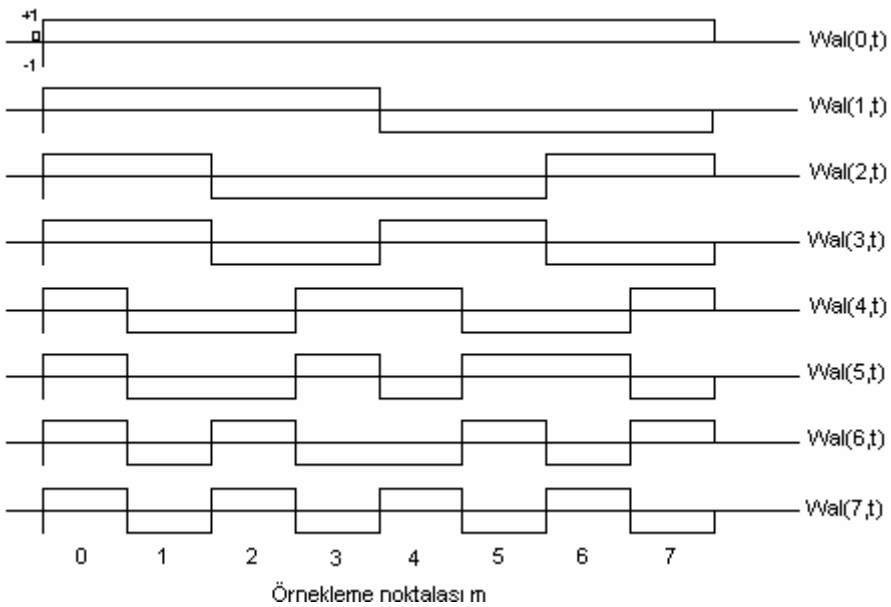
Walsh fonksiyonları, sadece +1 -1 genlik değeri alan kare dalga işaretlerinin düzenlenmiş tümüyle ortogonal bir kümeden oluşmaktadır ve birçok özelliğinin trigonometrik serilere benzemektedir ve sınırlandırılmış bir zaman aralığında tanımlanır. Parçalı sabit ortogonal fonksiyondur. Sinüs ve kosinüs fonksiyonları gibi iki bağımsız değişken, Walsh fonksiyonlarının tanımlanmasında yeterlidir. Bu iki değişkenden biri t (bir zaman periyodu), diğeri ise n (frekansla ilişkili olarak sıra numarası)' dır.

Walsh fonksiyonu matematiksel olarak eşitlik (4.1)' deki gibi ifade edilir.

$$Wal(n,t) \tag{4.1}$$

Sürekli zamanda ardışık sıralı (sequency order) Walsh fonksiyonu için Walsh' ın gerçek sırası $Wal(n,t)$' dir. M eşit uzaklık noktalarıyla örneklenen $Wal(n,t)$, birbirini takip eden ayrık zaman formuyla ilişkili olarak elde edilir, $Wal(n,m)$ olarak belirtilir. Bu yapıda bir normalize periyot M alt aralığa bölünmüştür. $Wal(n,m)$ bir normalize edilmiş zaman periyodunda m/M ve $m+1/M$ aralığındaki $Wal(n,t)$' nin değerini gösterir.

İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları Şekil 4.1'de gösterilmiştir [13].



Şekil 4.1: Ardışık sıralı düzenlenmiş Walsh fonksiyonlarının bir dizisi

Tablo 4.1: İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları $Wal(n,m)$

Walsh fonksiyon sırası (n)	Örnekleme noktası (m)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
n=0	1	1	1	1	1	1	1	1
n=1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
n=2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
n=3	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
n=4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
n=5	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
n=6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
n=7	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

Walsh serileri sin ve kos serileriyle benzerlik gösterir. Bu benzerlik denklem (4.2)' de eşitlik olarak verilmektedir. Walsh fonksiyonları orta veya sıfır zaman noktasıyla ilişkili olarak simetriktir. Fonksiyon $-\frac{1}{2} \le t \le \frac{1}{2}$ aralığında tanımlandığında doğrudan simetriktir (cal fonksiyonu) veya ters olarak simetriktir (sal fonksiyonu) [19].

$$Wal(2n,t) = Cal(n,t)$$
$$Wal(2n-1,t) = Sal(n,t) \qquad n = 1,2,....N/2 \tag{4.2}$$

Sin ve kosinüs fonksiyon serisinin toplamı olarak $f(t)$ denklem (4.3)' de ifade edilmiştir [20].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(kw_0 t)) + (b_k \cdot \sin(kw_0 t)) \tag{4.3}$$

Sinüs ve kosinüs fonksiyon serilerinin toplamını ifade eden $f(t)$ eşitliğindeki a_0, a_k, b_k katsayıları denklem (4.4)' deki eşitlikler yardımıyla bulunur.

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T}\int_0^T f(t)dt \\ a_k &= \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\cos kw_0 t.dt \\ b_k &= \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\sin kw_0 t.dt \end{aligned} \tag{4.4}$$

Bir zaman serisi olan $f(t)$, Walsh fonksiyonlarının serisinin toplamında benzer yolla tanımlanırsa Walsh fonksiyonları denklem (4.5)' deki gibi tanımlanır.

$$f(t) = a_0 \cdot Wal(0,t) + \sum_{n=1}^{N-1} a_n \cdot Wal(n,t) \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T}\int_0^T f(t).Wal(0,t)dt \\ a_n &= \frac{1}{T}\int_0^T f(t).Wal(n,t)dt \end{aligned} \tag{4.6}$$

Denklem (4.2)' den Cal ve Sal olarak tanımlı iki serinin toplamı kullanılarak denklem (4.7)' daki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} b_j &= \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\cdot Cal(j,t)dt \\ a_i &= \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\cdot Sal(i,t)dt \end{aligned} \tag{4.7}$$

Cal ve Sal formunda denklem (4.3)' deki sinüs-kosinüs serilerine benzer şekilde Walsh serileri denklem (4.8)' deki gibi ifade edilebilir.

$$f(t) = a_0 \cdot Wal(0,t) + \sum_{i=1}^{N/2} \sum_{j=1}^{N/2-1} [(a_i \cdot Sal(i,t)) + (b_i \cdot Cal(j,t))] \quad (4.8)$$

a_i ve b_i katsayılarının iki yeni serisi $f(t)$' nin ardışık tanım kümesinde birlikte ifade edilir. $Wal(0,t) = Cal(0,t)$ ' dır. Dikkat edilirse denklem (4.8)' deki ifadede Cal terimleri sayısı Sal terimlerinden daha az olmaktadır. Bu katsayı serilerinin türevleri, $f(t)$' nin benzer bileşenleri içinde ayrıştırılmış olarak gösterilir, ancak bu bileşenler artık sinüsoidal formda değildir. Walsh serisine ait Sal ve Cal fonksiyonlarından elde edilen bu iki farklı seriye, $f(t)$' nin tam sıralı davranışını açıklamak için ihtiyaç duyulur [1].

4.3 Fourier ve Walsh Serileri Arasındaki İlişki

Denklem (4.4) ve (4.6)' den normalize edilmiş bir seri için görülür ki; $0 \le t \le 1$ açık aralığında $Wal(0,t) = 1$ olduğundan $a_0 / 2$ için Fourier ve Walsh serilerinin ortalama değerlerinin eşit olduğu görülmektedir.

Denklem (4.4)' de verilen kosinüs katsayıları için, denklem (4.8)' deki ifade de yerine kullanılabilir, bu şekilde denklem (4.9) elde edilir.

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_i \cdot Sal(i,t) + b_i \cdot Cal(j,t) \right] \cdot \cos kw_0 t \cdot dt \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)' de integral alma işlemi düzenlendiğinde denklem (4.10) elde edilir.

$$a_k = a_0 + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left[\int_0^T Sal(i,t) \cdot \cos kw_0 t \cdot dt \right] + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cdot \left[\int_0^T Cal(j,t) \cdot \cos kw_0 t \cdot dt \right] \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)' daki köşeli parantez içindeki terimler sırasıyla $Sal(i,t)$ ve $Cal(i,t)$ için Fourier katsayıları sırasıyla gösterilirse; $a_k\, Sal$ ve $a_k\, Cal$ şeklinde yazılırsa denklem (4.11), denklem (4.12) elde edilir.

$$a_k = a_0 + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cdot a_k \cdot Sal + b_j \cdot a_k \cdot Cal] \quad (4.11)$$

$$b_k = a_0 + \frac{2}{T}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty}\left[a_i \cdot b_k \cdot Sal + b_j \cdot b_k \cdot Cal\right] \tag{4.12}$$

a_k ve b_k için Walsh serisi terimleri olarak denklem (4.3)' de yerine koyularak denklem (4.13)'de gösterilen Fourier serileri bulunur.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}\left[a_0 + \frac{2}{T}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty}\left[a_i \cdot a_k \cdot Sal + b_j \cdot a_k \cdot Cal\right]\right]\cdot\cos(kw_0 t) \\ +\left[a_0 + \frac{2}{T}\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty}\left[a_i \cdot b_k \cdot Sal + b_j \cdot b_k \cdot Cal\right]\right]\cdot\sin(kw_0 t)\end{array}\right\} \tag{4.13}$$

Walsh ve Fourier serilerinin her ikisi de ortogonal terimler içerdiklerinden a_0, $a_i a_k(Sal)$ ve $b_i b_k(Cal)$ yok edilirse denklem basitleşir ve denklem (4.14) elde edilir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{T}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\left[a_i \cdot b_k \cdot Sal \cdot \sin kw_0 t + b_j \cdot a_k \cdot Cal \cdot \cos kw_0 t\right] \tag{4.14}$$

Denklem (4.14) sınırlandırılmış ve normalize edilmiş basit bir şekle getirilirse denklem (4.15) elde edilir [1].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\left[a_i \cdot b_k \cdot (Sal)\cdot\sin\left(2\pi k\frac{i}{N}\right) + b_j \cdot a_k \cdot (Cal)\cdot\cos\left(2\pi k\frac{i}{N}\right)\right] \tag{4.15}$$

4.4 Walsh Fonksiyonlarının Sıralanması

Walsh fonksiyonlarında sıralama yapmak için genellikle iki önemli yöntem kullanılmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen algoritma ve sonuçlar karşılaştırıldığı zaman, iyi tanımlanmış yöntemler kullanılmazsa karışıklıklar ortaya çıkabilir. Aradığımız şey, diğer ortogonal fonksiyonlarla birlikte pratik deneyimlerle ilişkili, sayısal ve analitik amaçlar için belirlenmesi kolay olan bir fonksiyonda, temeli sıfır geçiş sayısına dayalı bir sıralamadır. Aşağıda tanımlanan bu iki sıralama yönteminin hiçbiri Walsh teorisi uygulamalarında ayrı ayrı rol oynadığından bahsedilen her iki gereksinimi aynı anda karşılayamaz. Walsh fonksiyonlarının ardışık sıralama ve doğal sıralama yöntemi olmak üzere iki sıralama yöntemi bulunmaktadır [1].

4.4.1 Ardışık sıralama (Sequency order)

Bu yöntem, J. L. Walsh' ın oluşturduğu özgün bir sıralama yöntemidir. Bu yöntemde, bileşenler sıfır geçişinin artan sırasında düzenlenmektedir ve direk olarak artan harmonik sayısında düzenlenmiş Fourier bileşenleri içeren frekansla ilişkilidir. Walsh fonksiyonlarının ardışık sıralama yöntemi kullanılarak oluşturulan hali Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

4.4.2 Doğal sıralama (Natural order)

Bu sıralama yöntemi, ardışık Rademacher fonksiyonlarından elde edilen bir sıralamadır. Paley tarafından ilk defa kullanılmıştır ve $PAL(\mathrm{n},\mathrm{t})$ olarak gösterilmektedir. Bu sıralama yönteminin Gibbs, Ahmed, Yuen ve diğerleri tarafından ortaya konulan analitik ve hesaba dayalı avantajları vardır. Özellikle Gibbs göstermiştir ki; bir lojik diferansiyel operatörün kök fonksiyonları olarak tanımlanabilir.

Doğal sıralama, teorik matematik çalışmalarında, görüntü iletiminde ve hızlı bir hesaplama için kullanılır. Ardışık sıralama ise haberleşme ve işaret işleme (spektral analiz ve filtreleme gibi) alanlarında sıkça kullanılmaktadır.

4.5 Walsh Fonksiyonlarının Türetilmesi

Walsh fonksiyonlarını oluşturmak için birkaç yol vardır;

- Bir fark eşitliği aracılığıyla
- Rademacher fonksiyonlarının üretilmesinden
- Hadamard matrisinin aracılığıyla
- Boolean sentezini kullanarak elde edilebilir.

Bu çalışmada, Hadamard matrisini kullanarak Walsh fonksiyonları elde edilmektedir. Hadamard matrisi, yalnızca +1 ve -1 değerlerini alan tüm kolonları karşılıklı ortogonal olan matristir.

En küçük Hadamard matrisi denklem (4.16)' deki gibidir [1].

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Bir Hadamard matrisi tüm sütunlar ortogonal olduğundan rasgele sıralanabilir. Bununla birlikte Walsh fonksiyonlarının elde edilişine kadar önemli üç sıralama vardır:

En küçük Hadamard matrisi kullanılarak N=8 için doğal sıralama yapılırsa denklem (4.17) elde edilir. Doğal sıralama, Walsh fonksiyonlarının elde edilişindeki ilk sıralamadır.

$$\begin{matrix} \text{Sıra} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix} \qquad \begin{matrix} \text{matris} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{4.17}$$

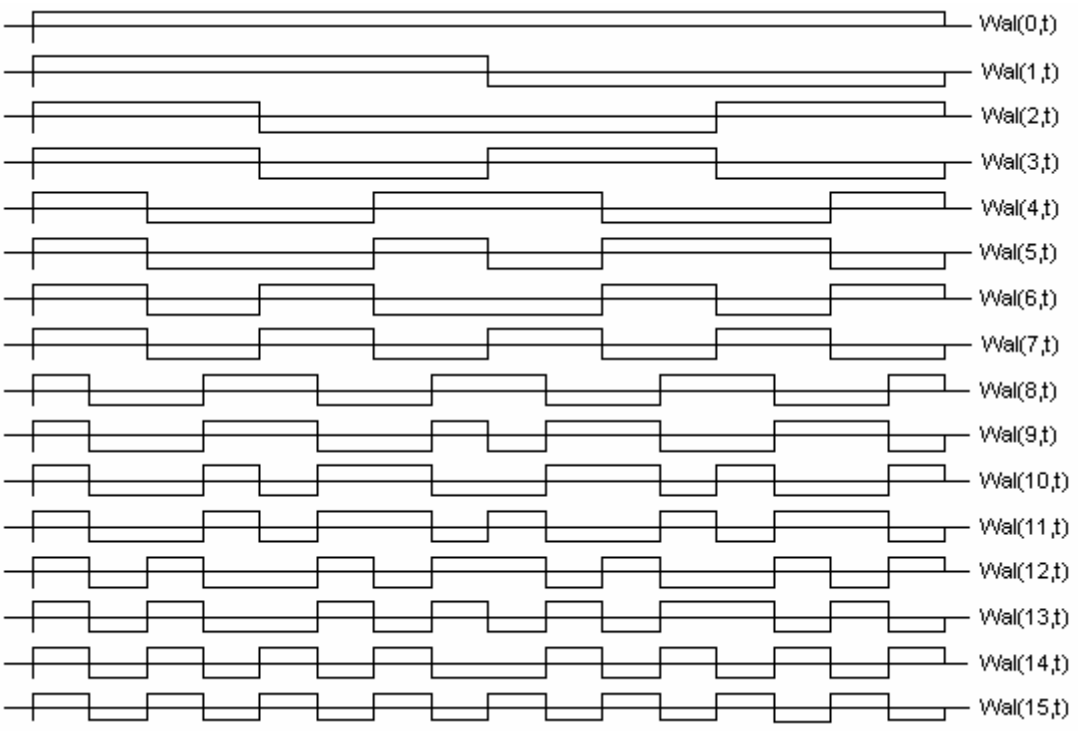
Doğal sıralama yapıldıktan sonra Hadamard-Walsh dönüşümünde ardışık dizi sıralama yapılır. Bu sıralama, Fourier dönüşümündeki sinüs ve kosinüslerin bir analog satırındaki sinyal değişimlerinin sayısına dayanır. Dönüştürülmüş veri artan frekansta sıralanır. Yapılan ardışık sıralama denklem (4.18)' de gösterilmektedir.

$$\begin{matrix} \text{Sıra(H)} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 6 \\ 2 \\ 3 \\ 7 \\ 5 \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \qquad \begin{matrix} \text{matris} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \qquad \begin{matrix} \text{değişmiş sıra(W)} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{4.18}$$

Walsh fonksiyonlarının elde edilmesinde üçüncü önemli sırlama bit tersleme sıralamasıdır. Doğal sıralama gray kodlama ve bit tersleme işlemleri yapılarak ardışık sırlamaya dönüştürülür. Elde edilen bu ardışık sıralama aslında türetilmiş yeni Walsh fonksiyonlarının sırasıdır. Uygulanan bu işlem Tablo.2' de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Doğal sıralamadan ardışık sıralamanın elde edilmesi

Doğal				Sıralı	
Onluk	İkilik	Gray		Bit tersleme	Onluk
0	000	000	⇒	000	0
1	001	001	⇒	100	4
2	010	011	⇒	110	6
3	011	010	⇒	010	2
4	100	110	⇒	011	3
5	101	111	⇒	111	7
6	110	101	⇒	101	5
7	111	100	⇒	001	1



Şekil 4.2: N=16 için ardışık düzenlenmiş Walsh fonksiyonları

Örneğin N=16 aralık için Hadamard matrisi aracılıyla üretilen Walsh fonksiyonları Şekil 4.2' de görülmektedir[15].

4.6. Walsh Fonksiyonları ile Hesaplamalar

Walsh fonksiyonu daha öncede ifade edildiği gibi darbe genişliği ayarlanabilir bir eviricide (DGA evirici) seçilen harmoniklerin azaltılması için kullanılan parçalı-darbe fonksiyonudur.

Bu kısımda istenilen harmonikleri azaltmak için Walsh fonksiyonları ile DGA evirici tetikleme açılarının hesaplanması konusuna değinilmektedir. Walsh fonksiyonlarıyla oluşturulan algoritma, hesaplanacak tetikleme açıları için, başlangıç değerleri gerektirir ve belirlenen bu başlangıç değerleri gerekli çözüm için daima yakınsamaz. Bu kısımda iki ayrı hesaplamaya yer verilmektedir. Bunlardan birincisi sadece 5. harmoniğin, diğeri ise 3., 5., 7. harmoniklerin azaltılması için gerçekleştirilen hesaplamalardır.

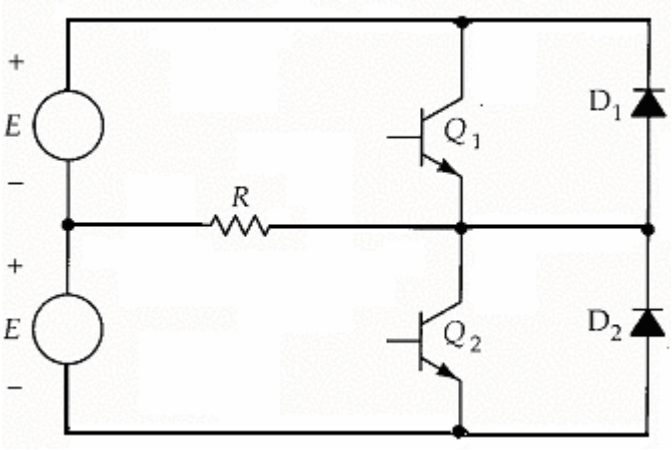
4.6.1 Örnek 1

Bu örnekte, tek fazlı yarım-köprü (half-bridge,bipolar) eviricide temel bileşenin 0.8391 değerinde olması koşulunu sağlayarak 5. harmoniğin elenmesi için gerekli tetikleme açıları (α_1, α_2) hesaplanmaktadır [14].

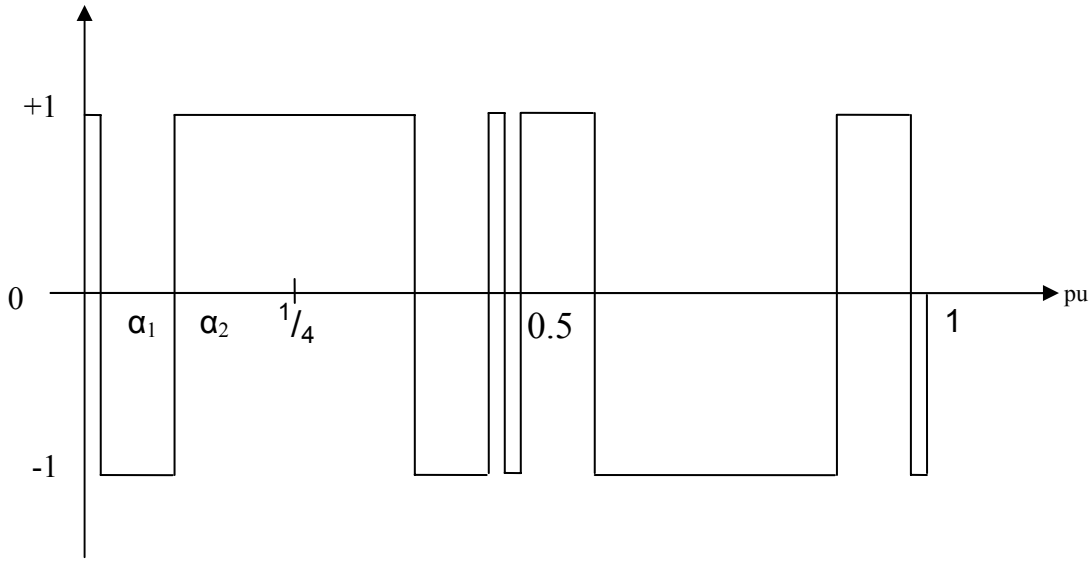
Çözüm için fonksiyonu, öncelikle N=16 alt aralıkta incelersek ve α_1 ve α_2 için başlangıç aralıkları denklem (4.19)' deki gibi seçilir.

$$0 \langle \alpha_1 \langle \frac{1}{16} \qquad \frac{1}{16} \langle \alpha_2 \langle \frac{2}{16} \tag{4.19}$$

Yarım-köprü eviricinin basit devre şeması Şekil 4.3'de ve evirici çıkışının dalga şekli de Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.3: Yarım-Köprü evirici modeli



Şekil 4.4: Yarım-Köprü evirici çıkışı dalga şekli (örnek1)

DGA çıkış dalga şekli, $f(t)$ Şekil 4.4' de de görüldüğü gibi birim genliğe ve sabit DA gerilim kaynağıyla çeyrek dalga şeklinde simetriye sahiptir. Fourier serisini kullanarak çıkış dalga şekli $f(t)$ tanımlanırsa denklem (4.20), (4.21) elde edilir. Burada k toplam harmonik sayısını ifadesini etmektedir.

$$f(t) = \sum_{k=1}^{K} a_{2k-1} \cdot \sin[(2k-1)w_0 t] \tag{4.20}$$

$$a_{2k-1} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin[(2k-1)w_0 t] dt \tag{4.21}$$

Denklem (4.20) ve (4.21)' deki Fourier serilerine benzer şekilde Walsh serileri denklem (4.22) ve (4.23)' deki gibi ifade edilebilir. Bu soruda evirici çıkış dalga şekli çeyrek periyotta simetriye sahip olduğundan analiz sinyalin çeyrek periyodu için yapılabilir.

$$f(t)=\sum_{n=1}^{N} W_{4n-3}\cdot Wal(4n-3,t) \tag{4.22}$$

$$W_{4n-3}=\int_{0}^{1} f(t)\cdot Wal(4n-3,t)\,dt \tag{4.23}$$

Denklem (4.22), denklem (4.21)' de yerine konursa denklem (4.24) elde edilir.

$$a_{2k-1}=\sum_{n=1}^{N} W_{4n-3}\cdot[\frac{2}{T}\int_{0}^{T} Wal(4n-3,t)\cdot\sin[(2k-1)w_0 t]dt] \tag{4.24}$$

Denklem (4.24) düzenlenirse denklem (4.25) eşitliği elde edilir.

$$a_{2k-1}=\sum_{n=1}^{N} B_{2k-1,4n-3}W_{4n-3} \tag{4.25}$$

$$B_{2k-1,4n-3}=\frac{2}{T}\int_{0}^{T} Wal(4n-3,t)\cdot\sin[(2k-1)w_0 t]\;dt \tag{4.26}$$

Elde edilmesi gereken denklemler bir matris haline getirilirse denklem (4.27)' deki eşitlik elde edilir.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_3 \\ . \\ . \\ a_{2k-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,5} & B_{1,9} & . & . & . & B_{1,4n-3} \\ B_{3,1} & B_{3,5} & B_{3,9} & . & . & . & B_{3,4n-3} \\ . & & & & & & . \\ . & & & & & & . \\ B_{2k-1,1} & . & . & . & . & . & B_{2k-1,4n-3} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} W_1 \\ W_5 \\ . \\ . \\ W_{4n-3} \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

Denklem (4.27)' den daha genel bir formda ifade edilirse denklem (4.28)' daki eşitlik yazılabilir.

$$[A]=[B]\cdot[W] \tag{4.28}$$

Denklem (4.26)' deki $B_{2k-1,4n-3}$: (4n-3) üncü Walsh fonksiyonunun (2k-1) inci harmonik Fourier katsayısını ifade etmektedir.

N=16 için B katsayılarının hesabı denklem (4.29)' daki denklem grubunda görülmektedir.

$$B_{1,1} := \frac{4}{\pi}\cdot\left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(t)\,dt\right)$$

$$B_{1,5} := \frac{4}{\pi}\cdot\left[\int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin(t)\,dt - \int_{\frac{\pi}{4}}^{\left(\frac{\pi}{2}\right)} \sin(t)\,dt\right]$$

$$B_{1,9} := \frac{4}{\pi}\cdot\left[\int_0^{\frac{\pi}{8}} \sin(t)\,dt - \int_{\frac{\pi}{8}}^{3\cdot\left(\frac{\pi}{8}\right)} \sin(t)\,dt + \int_{3\cdot\left(\frac{\pi}{8}\right)}^{\left(\frac{\pi}{2}\right)} \sin(t)\,dt\right]$$

$$B_{1,13} := \frac{4}{\pi}\cdot\left(\int_0^{\frac{\pi}{8}} \sin(t)\,dt - \int_{\frac{\pi}{8}}^{\frac{\pi}{4}} \sin(t)\,dt + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\cdot\pi}{8}} \sin(t)\,dt - \int_{\frac{3\cdot\pi}{8}}^{\frac{\pi}{2}} \sin(t)\,dt\right) \qquad (4.29)$$

3 ve 5. harmonikler için de katsayılar aynı şekilde hesaplanır.

W_{4n-3} : DGA çıkış dalga şeklinin, $f(t)$, (4n-3) üncü Walsh katsayısıdır. Bu Walsh katsayıları denklem (4.30)' deki denklem grubundaki görülen şekilde hesaplanır.

$$W_1 := 4\cdot\left(\int_0^{\alpha 1} 1\,dt - \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} 1\,dt + \int_{\alpha 2}^{\frac{1}{4}} 1\,dt\right)$$

$$W_5 := 4\cdot\left[\int_0^{\alpha 1} 1\,dt - \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} 1\,dt + \left(\int_{\alpha 2}^{\frac{2}{16}} 1\,dt\right) - \int_{\frac{2}{16}}^{\frac{4}{16}} 1\,dt\right]$$

$$W_9 := 4\cdot\left(\int_0^{\alpha 1} 1\,dt - \int_{\alpha 1}^{\frac{1}{16}} 1\,dt + \int_{\frac{1}{16}}^{\alpha 2} 1\,dt - \int_{\alpha 2}^{\frac{2}{16}} 1\,dt + \int_{\frac{2}{16}}^{\frac{3}{16}} 1\,dt - \int_{\frac{3}{16}}^{\frac{4}{16}} 1\,dt\right)$$

$$W_{13} := 4\cdot\left(\int_0^{\alpha 1} 1\,dt - \int_{\alpha 1}^{\frac{1}{16}} 1\,dt + \int_{\frac{1}{16}}^{\alpha 2} 1\,dt - \int_{\alpha 2}^{\frac{2}{16}} 1\,dt + \int_{\frac{2}{16}}^{\frac{3}{16}} 1\,dt - \int_{\frac{3}{16}}^{\frac{4}{16}} 1\,dt\right) \qquad (4.30)$$

Matcad programı yardımıyla denklemler çözülürse denklem (4.31) ve (4.32)' deki eşitlik elde edilir.

$$B := \begin{pmatrix} B_{1,1} & B_{1,5} & B_{1,9} & B_{1,13} \\ B_{3,1} & B_{3,5} & B_{3,9} & B_{3,13} \\ B_{5,1} & B_{5,5} & B_{5,9} & B_{5,13} \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 1.273 & -0.527 & -0.105 & -0.253 \\ 0.424 & 1.025 & -0.685 & 0.284 \\ 0.255 & 0.615 & 0.92 & -0.381 \end{pmatrix} \qquad (4.31)$$

$$W := \begin{pmatrix} W_1 \\ W_5 \\ W_9 \\ W_{13} \end{pmatrix} \qquad W \text{ simplify } \rightarrow \begin{pmatrix} 8\cdot\alpha 1 - 8\cdot\alpha 2 + 1 \\ 8\cdot\alpha 1 - 8\cdot\alpha 2 \\ 8\cdot\alpha 1 - 1 + 8\cdot\alpha 2 \\ 8\cdot\alpha 1 - 1 + 8\cdot\alpha 2 \end{pmatrix} \qquad (4.32)$$

A1=0.8391 , A5=0 alındığında uygun tetikleme açıları bulunabilmektedir.

$$A1 \text{ simplify } \rightarrow 1.6322930963504785636 + 3.1016115309748563034\cdot\alpha 1 - 8.8324627218278235536\cdot\alpha 2$$

$$A5 \text{ simplify } \rightarrow -.28444171429383534408 + 11.267151379270401642\cdot\alpha 1 - 2.6436061304401183942\cdot\alpha 2$$

$$\alpha 1 := 0.05$$

$$\alpha 2 := 0.108 \qquad (4.33)$$

Denklem (4.33) Matcad programı yardımıyla elde edilen sonuçtur ve burada $\alpha_1 = 18^\circ, \alpha_2 = 38.8^\circ$ karşılık gelir.

Walsh fonksiyonlarının alt aralık değerinin değişimine göre incelenen en hassas alt değeri referans alınarak bulunan çözümde denklem (4.34)' e göre hata hesabı yapıldığında hata = 0.0138 olarak bulunur.

$$hata = \sqrt{\left(\alpha_{1gerçek} - \alpha_{1bulunan}\right)^2 + \left(\alpha_{2gerçek} - \alpha_{2bulunan}\right)^2 + ... + \left(\alpha_{\mathrm{n}\,gerçek} - \alpha_{\mathrm{n}\,bulunan}\right)^2} \qquad (4.34)$$

Fonksiyon, N=16 alt aralıkta ve farklı başlangıç aralıkları için incelenirse denklem (4.35) elde edilir.

$$0 \langle \alpha_1 \langle \frac{1}{16} \qquad \frac{1}{16} \langle \alpha_2 \langle \frac{3}{16} \qquad (4.35)$$

$$A1\ \text{simplify} \rightarrow 2.1797861005865985186 + 3.1016115309748563034 \cdot \alpha 1 - 13.217499713895723845 \cdot \alpha 2$$

$$A5\ \text{simplify} \rightarrow -2.2762976580775238502 + 11.267151379270401642 \cdot \alpha 1 + 13.290329015854575150 \cdot \alpha 2$$

$$\alpha 1 := 0.065$$
$$\alpha 2 := 0.118 \qquad (4.36)$$

Denklem (4.36) Matcad programı yardımıyla elde edilen sonuçtur ve burada $\alpha_1 = 23.4^\circ, \alpha_2 = 42.48^\circ$ karşılık gelir. hata = 0.0047 olarak bulunur.

Aralıklar değiştirildiğinde hata yaklaşık üç kat kadar azalmıştır, Walsh fonksiyonlarının kullanımında başlangıç aralıkların doğru belirlenmesi sonucu oldukça etkilemektedir. Yanlış aralıklar belirlendiği takdirde gerekli çözüm için sonuç yakınsamaz.

Fonksiyonu N=32 aralıkta incelersek, α_1 ve α_2 için başlangıç aralıkları belirlenirse denklem (4.37) elde edilir.

$$\frac{1}{32} \langle \alpha_1 \langle \frac{2}{32} \qquad \frac{3}{32} \langle \alpha_2 \langle \frac{4}{32} \qquad (4.37)$$

N=32 ve ayrıca N=64 aralık için başlangıç aralıkları belirlenirken alt aralık sayısı büyürken açı değerleri için seçilen aralık değerinin de büyümesi gerekir. Bu çözüm için elde edilen sonuç eşitlik (4.38)' de görülmektedir.

$$A1\ \text{simplify} \rightarrow 1.6970082749840865690 - 10.132399745385105028 \cdot \alpha 2 + 4.6365372374283895608 \cdot \alpha 1$$

$$A5\ \text{simplify} \rightarrow -1.4232972628898790579 + 4.4595798854232972628 \cdot \alpha 2 + 15.289115213239974538 \cdot \alpha 1$$

$$\alpha 1 := 0.060$$
$$\alpha 2 := 0.112 \qquad (4.38)$$

$\alpha_1 = 21.72^\circ$, $\alpha_2 = 40.32^\circ$ değerlerine karşılık gelir ve hata = 0.00294' dır.

Fonksiyonu N=64 aralıkta incelersek, α_1 ve α_2 için başlangıç aralıkları belirlenirse denklem (4.39) elde edilir. Elde edilen sonuç eşitlik (4.40)' da görülmektedir.

$$\frac{3}{64} \langle \alpha_1 \langle \frac{4}{64} \qquad \frac{7}{64} \langle \alpha_2 \langle \frac{8}{64} \qquad (4.39)$$

$$\alpha 1 := 0.062497$$
$$\alpha 2 := 0.113999 \qquad (4.40)$$

$\alpha_1 = 22.499^\circ$, $\alpha_2 = 41.039^\circ$ olarak bulunur. hata = 0' dır.

Tablo 4.3: 5. Harmoniğin azaltılması için hesaplanan açı değerleri

N = 16	N = 32	N = 64
α_1 = 0.05 (18°)	α_1 = 0.06 (21,72°)	α_1 = 0.062497 (22,499°)
α_2 = 0.108 (38,8°)	α_2 = 0.112 (40,32°)	α_2 = 0.11399 (41,039°)

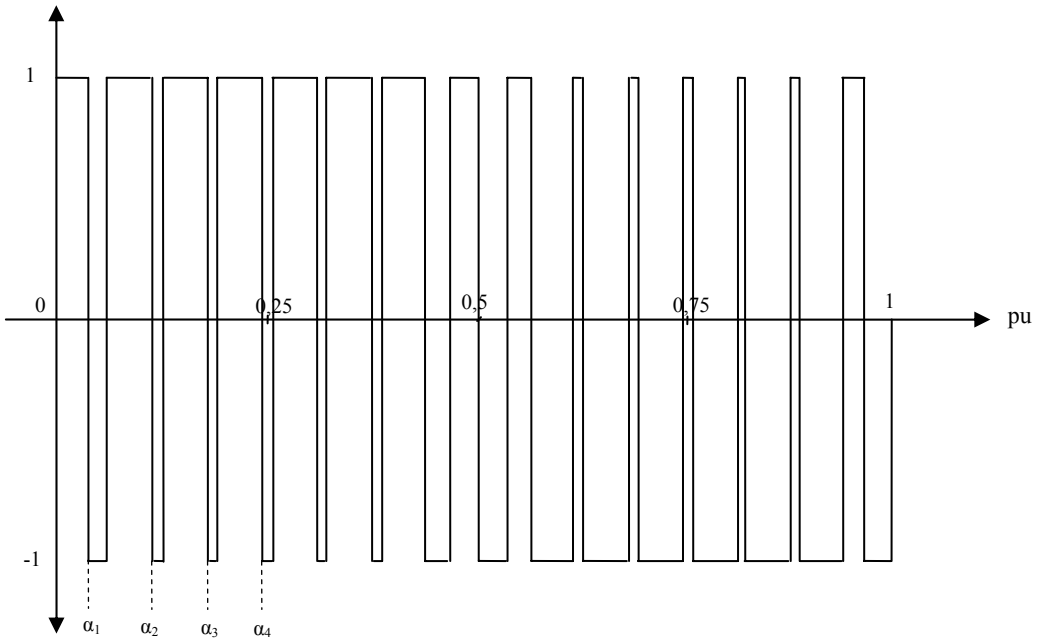
Tablo 4.3' de Walsh fonksiyonları ile hesaplanan açı değerleri görülmektedir.

4.6.2 Örnek 2

Bu örnekte tek fazlı yarım-köprü (half-bridge,bipolar) eviricide temel bileşenin 0.784-1.007 değerinde olması koşulunu sağlayarak 3., 5., 7. harmoniklerin azaltılması için gerekli tetikleme açıları (α_1, α_2, α_3, α_4) hesaplanmaktadır [16].

Çözüm için fonksiyon için, öncelikle aralık belirlenmelidir. 7. harmoniğe kadar değerlendirme yapabilmek için Walsh fonksiyonları 64 alt aralıkta seçilmesi yeterlidir. Bir periyot 64 örnekleme aralığına bölünür. Doğru bölgesel bir çözüm sağlamak için uygun bir hipotez gereklidir. N=64 alt aralıkta incelersek ve α_1, α_2, α_3, α_4, için başlangıç aralıkları denklem (4.41)' deki gibi seçilir.

$$\frac{2}{64}\langle\alpha_1\langle\frac{3}{64}, \qquad \frac{7}{64}\langle\alpha_2\langle\frac{8}{64}, \qquad \frac{11}{64}\langle\alpha_3\langle\frac{12}{64}, \qquad \frac{15}{64}\langle\alpha_4\langle\frac{16}{64} \tag{4.41}$$



Şekil 4.5 Yarım-Köprü evirici çıkışı dalga şekli (örnek2)

DGA çıkış dalga şekli, $f(t)$ Şekil 4.5' de de görüldüğü gibi birim genliğe ve sabit DA gerilim kaynağıyla çeyrek dalga şeklinde simetriye sahiptir. Çözüm aynı şekilde bir önceki soruda olduğu gibi yapılır.

(4.27)' deki eşitliğe göre bu soruda N=64 aralık için, hesaplanması gereken B katsayıları, $B_{1,1}$, $B_{1,5}$, $B_{1,9}$, $B_{1,13}$, $B_{1,17}$, $B_{1,21}$, $B_{1,25}$, $B_{1,29}$, $B_{1,33}$, $B_{1,37}$, $B_{1,41}$, $B_{1,45}$, $B_{1,49}$, $B_{1,53}$, $B_{1,57}$, $B_{1,61}$ temel dalga için bunlardır. Ayrıca azaltılmak istenen 3, 5 ve 7 için de aynı B katsayılarının hesaplaması gereklidir. Örneğin $B_{1,33}$ katsayısının çözümü denklem (4.42)' de gösterilmektedir.

$$B133 := \frac{4}{\pi}\cdot\left(\int_0^{\frac{\pi}{32}}\sin(t)\,dt - \int_{\frac{\pi}{32}}^{\frac{3\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt + \int_{\frac{3\cdot\pi}{32}}^{\frac{5\cdot\pi}{16}}\sin(t)\,dt - \int_{\frac{5\cdot\pi}{32}}^{\frac{7\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt + \int_{\frac{7\pi}{32}}^{\frac{9\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt - \int_{\frac{9\cdot\pi}{32}}^{\frac{11\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt + \int_{\frac{11\cdot\pi}{32}}^{\frac{13\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt - \int_{\frac{13\cdot\pi}{32}}^{\frac{15\cdot\pi}{32}}\sin(t)\,dt + \int_{\frac{15\pi}{32}}^{\frac{\pi}{2}}\sin(t)\,dt\right) \quad (4.42)$$

Eşitlik (4.43)' de hesaplanması gereken B katsayıları bir matris halinde görülmektedir. Matcad yardımıyla bu matrisin elde edilen çözümü de eşitlik (4.44)' de görülmektedir.

$$B := \begin{pmatrix} B11 & B15 & B19 & B113 & B117 & B121 & B125 & B129 & B133 & B137 & B141 & B145 & B149 & B153 & B157 & B161 \\ B31 & B35 & B39 & B313 & B317 & B321 & B325 & B329 & B333 & B337 & B341 & B345 & B349 & B353 & B357 & B361 \\ B51 & B55 & B59 & B513 & B517 & B521 & B525 & B529 & B533 & B537 & B541 & B545 & B549 & B553 & B557 & B561 \\ B71 & B75 & B79 & B713 & B717 & B721 & B725 & B729 & B733 & B737 & B741 & B745 & B749 & B753 & B757 & B761 \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

$B =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1.273	-0.527	-0.105	-0.253	-0.025	0.01	-0.052	-0.125	0.409	0.418	0.277	0.277	0.147	0.165	0.134	0.097
1	0.424	1.025	-0.685	0.284	-0.086	-0.208	-0.311	0.129	0.439	0.412	0.493	0.45	0.31	0.25	0.2	0.415
2	0.255	0.615	0.92	-0.381	-0.204	-0.492	0.329	-0.136	-0.281	-0.329	-0.041	0.134	0.179	0.044	0.429	0.211
3	0.182	-0.075	0.379	0.914	-0.75	0.311	0.062	0.149	-0.379	-0.303	-0.408	-0.565	-0.312	0.151	0.042	0.08

(4.44)

W_{4n-3} : DGA çıkış dalga şeklinin, $f(t)$, (4n-3) üncü Walsh katsayısıdır. Bu Walsh katsayıları denklem (4.44)' deki denklem grubundaki görülen şekilde hesaplanır.

$$W := \begin{pmatrix} W1 \\ W5 \\ W9 \\ W13 \\ W17 \\ W21 \\ W25 \\ W29 \\ W33 \\ W37 \\ W41 \\ W45 \\ W49 \\ W53 \\ W57 \\ W61 \end{pmatrix} \quad W \text{ simplify} \rightarrow \begin{pmatrix} 8\cdot\alpha1 - 4 + 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 + 2 + 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 + 1 \\ -8\cdot\alpha1 + 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 - 1 \\ -8\cdot\alpha1 + 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 \\ -8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 - 2 + 8\cdot\alpha4 \\ 5 - 8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 \\ \frac{-17}{4} - 8\cdot\alpha1 + 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 \\ -8\cdot\alpha1 + 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 + \frac{11}{4} - 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 + \frac{1}{4} - 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 + \frac{5}{4} - 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - \frac{7}{4} + 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 + 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - \frac{3}{4} + 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 - 8\cdot\alpha2 + 8\cdot\alpha3 - \frac{11}{4} + 8\cdot\alpha4 \\ 8\cdot\alpha1 + \frac{17}{4} - 8\cdot\alpha2 - 8\cdot\alpha3 - 8\cdot\alpha4 \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

Denklem (4.28)' deki hesaplanan bu matrisler yerine konduğunda denklem grubu (4.45) elde edilir.

$$
\begin{aligned}
&-2.064\alpha_1 - 7.1285 + 12.960\alpha_2 + 14.448\alpha_3 + 15.9680\alpha_4 = 1\\
&12.172\alpha_1 + 2.89925 + 7.7960\alpha_2 - 8.812\alpha_3 - 10.852\alpha_4 = 0\\
&26.336\alpha_1 - 1.441 - 13.424\alpha_2 - 9.424\alpha_3 + 15.360\alpha_4 = 0\\
&25.952\alpha_1 + 1.547 - 14.624\alpha_2 + 15.664\alpha_3 - 14.768\alpha_4 = 0
\end{aligned}
\qquad (4.46)
$$

Denklem (4.46) Matcad programı yardımıyla hesaplanırsa (4.47) eşitlikleri elde edilir.

$$
\begin{aligned}
&\alpha_1 = 0.03865 \quad (13.914°)\\
&\alpha_2 = 0.11434 \quad (41.162°)\\
&\alpha_3 = 0.1848 \quad (66.528°)\\
&\alpha_4 = 0.24779 \quad (89.204°)
\end{aligned}
\qquad (4.47)
$$

Tablo 4.4: 3., 5.,7. Harmoniğin azaltılması için hesaplanan açı değerleri

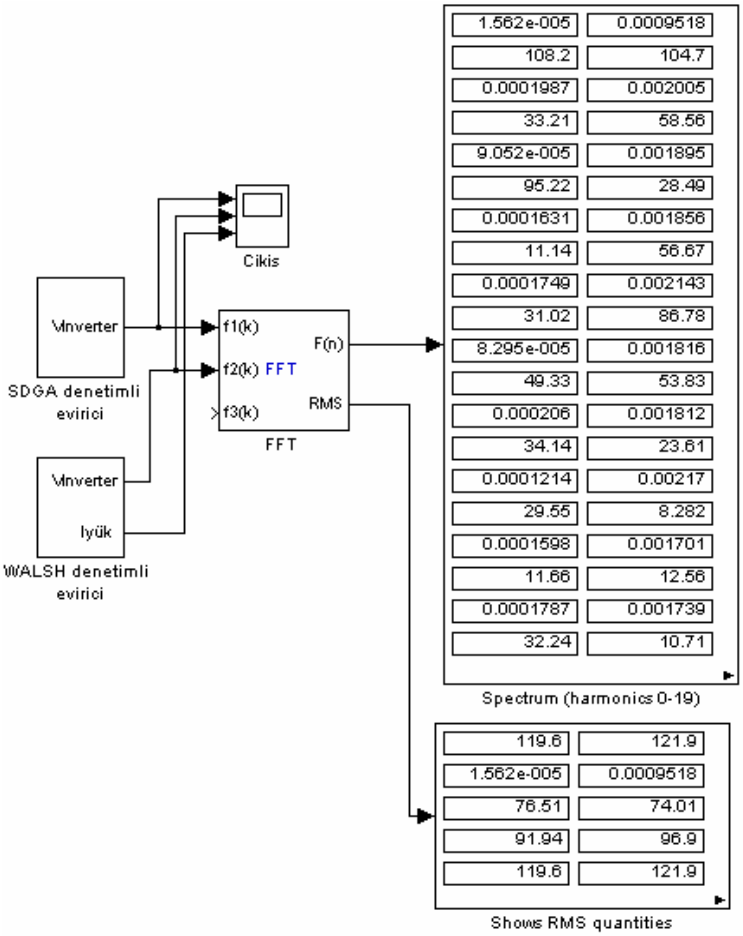
	α_1	α_2	α_3	α_4
N=64	0.0386 (13.914°)	0.1143 (41.162°)	0.1848 (66.528°)	0.2477 (89.204°)

BÖLÜM 5. TEK FAZLI YARIM KÖPRÜ EVİRİCİ SİMULASYONU

5.1 Giriş

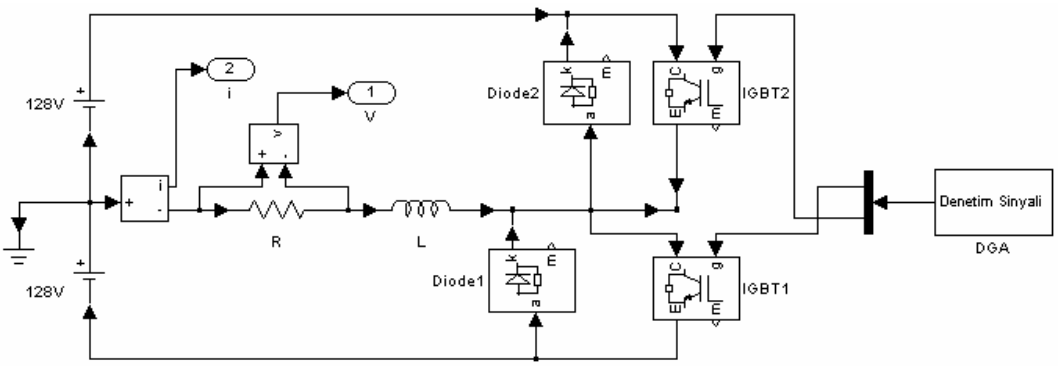
Bu bölümde Bölüm 4' de örnek 1' de Walsh fonksiyonları yardımıyla hesaplanan α_1, α_2 ve örnek 2' de hesaplanan α_1, α_2, α_3, α_4 anahtarlama açıları bir denetim sinyali olarak tek fazlı yarım köprü eviriciye uygulanmaktadır. Ayrıca bu denetim sinyali sinüsoidal DGA yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Tüm simülasyonlar Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmektedir.

5.2 Sinüsoidal ve Walsh Fonksiyonları ile DGA Modeli



Şekil 5.1: Simülasyon modeli

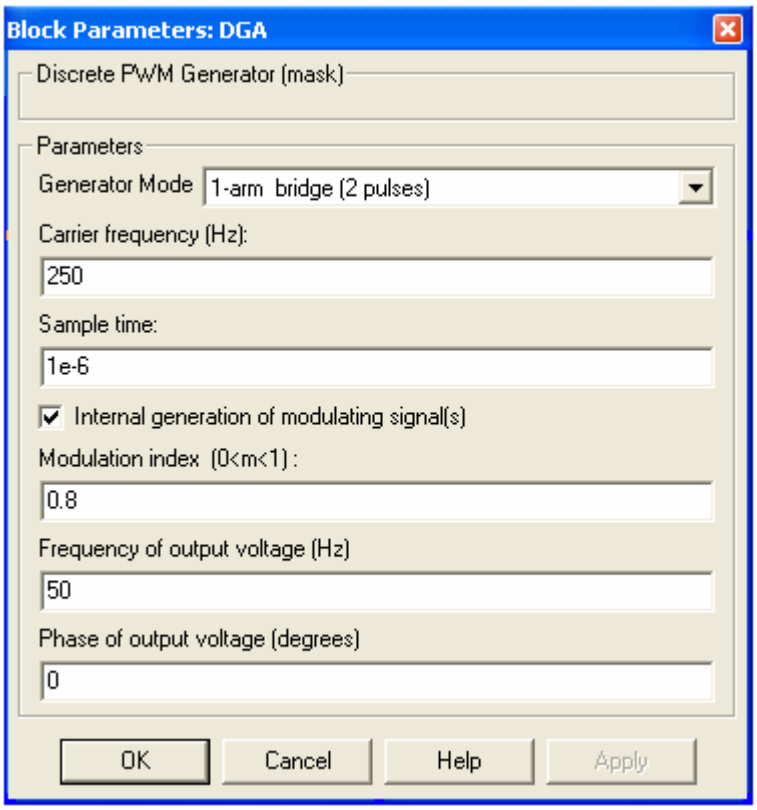
Şekil 5.1’ de iki tane evirici modeli görülmektedir. Matlab/Simulink ortamında Simulink güç sistemleri araç kutusunu (Simulink-Power System toolbox) kullanarak oluşturulan tek fazlı yarım köprü bir evirici modeline iki ayrı tetikleme sinyali uygulanmıştır. Şekil 5.2’ de bu evirici modeli gösterilmektedir. Anahtarlama elemanları için gerekli olan anahtarlama sinyalleri Sinüsoidal DGA yöntemi ve Walsh fonksiyonları ile DGA yöntemi aracılığıyla üretilmiştir.



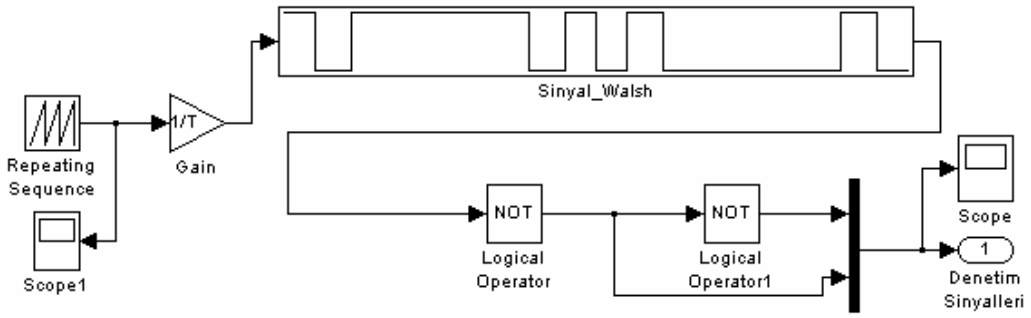
Şekil 5.2: Tek fazlı yarım köprü evirici modeli

SDGA yöntemiyle üretilen denetim sinyallerinin parametreleri Şekil 5.3’ de görülmektedir. Bu parametrelerde eviricinin türü, taşıyıcı frekansı, sinyalin üretilmesinde kullanılan örnekleme zamanı değeri, sinyalin modülasyon indeksi, evirici çıkış geriliminin frekansı girilmektedir. Bu blok girilen bu parametreler yardımıyla denetim sinyallerini üretir.

Walsh fonksiyonları ile DGA sinyalleri ise Şekil 5.4’ deki model yardımıyla üretilir. Bölüm 4’ de hesaplanan anahtarlama açıları değerleri Şekil 5.4’ de Sinyal_Walsh adıyla geçen Matlab tablosu (look-up table) içine tam bir periyot için gerekli şekilde girilmiştir. Walsh yönteminde oluşturulmak istenen evirici çıkış dalga şekli belirli olduğu için bu sinyali Matlab/Simulink ortamında da elde etmek zor değildir.



Şekil 5.3: SDGA denetim sinyali parametreleri

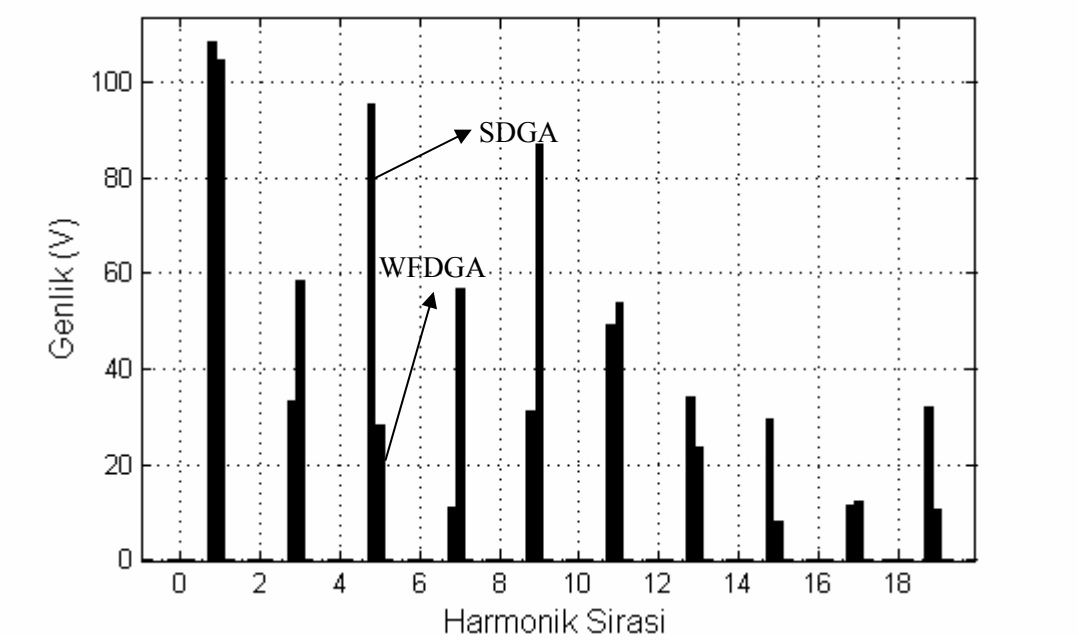


Şekil 5.4: Walsh fonsiyonları ile DGA denetim sinyallerinin üretilmesi

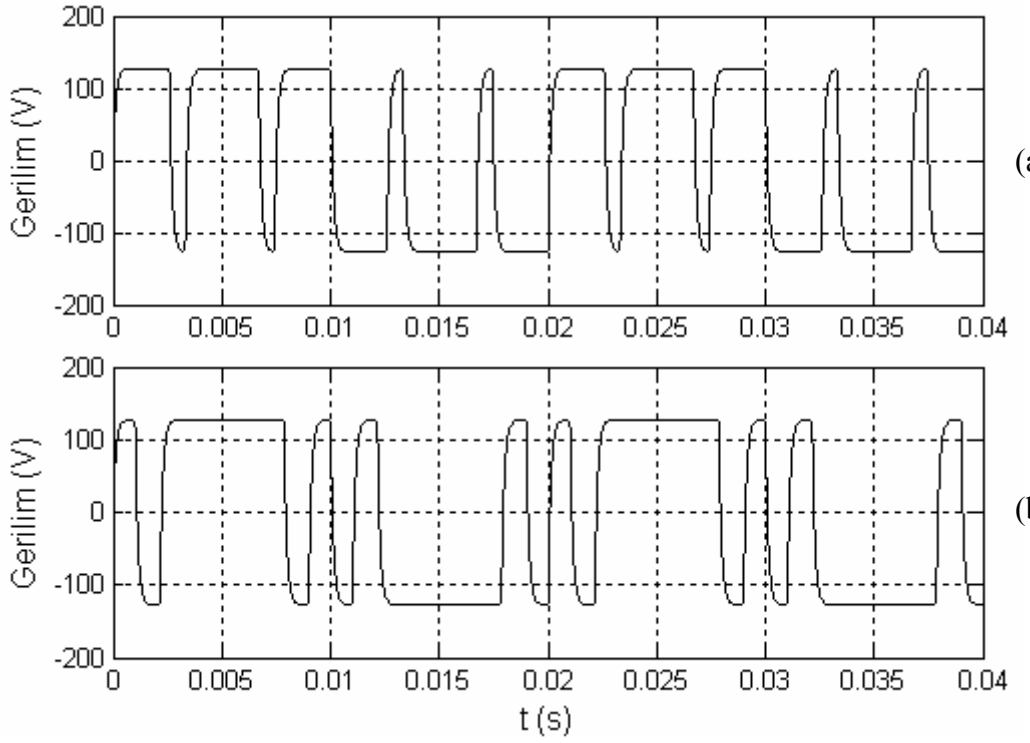
5.3 Simulasyon Sonuçları

Bu kısımda, Bölüm 4'de hesaplanan açı değerleri için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Sinüsoidal DGA ve Walsh fonksiyonları ile DGA yöntemi sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

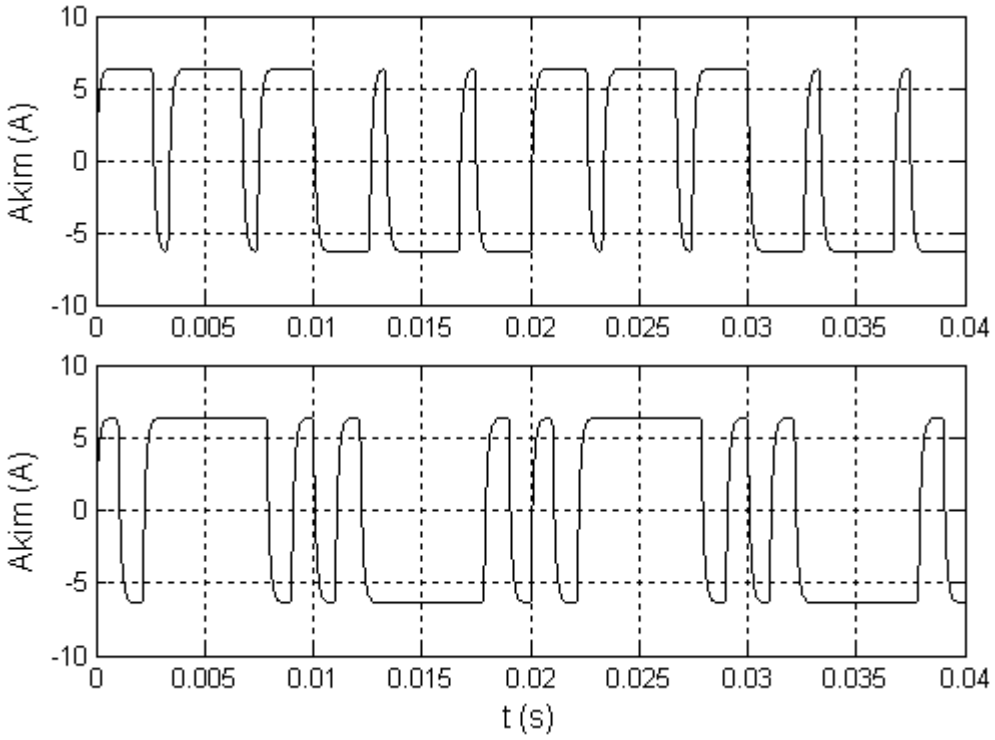
5.3.1 5. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar



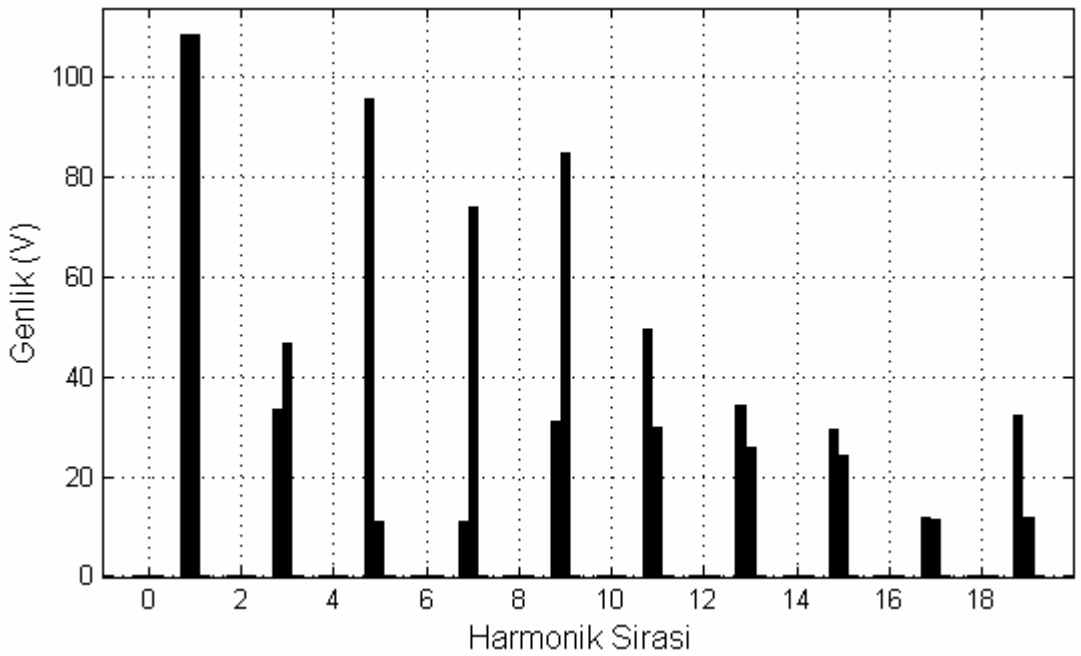
Şekil 5.5: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harmonik simulasyonu)



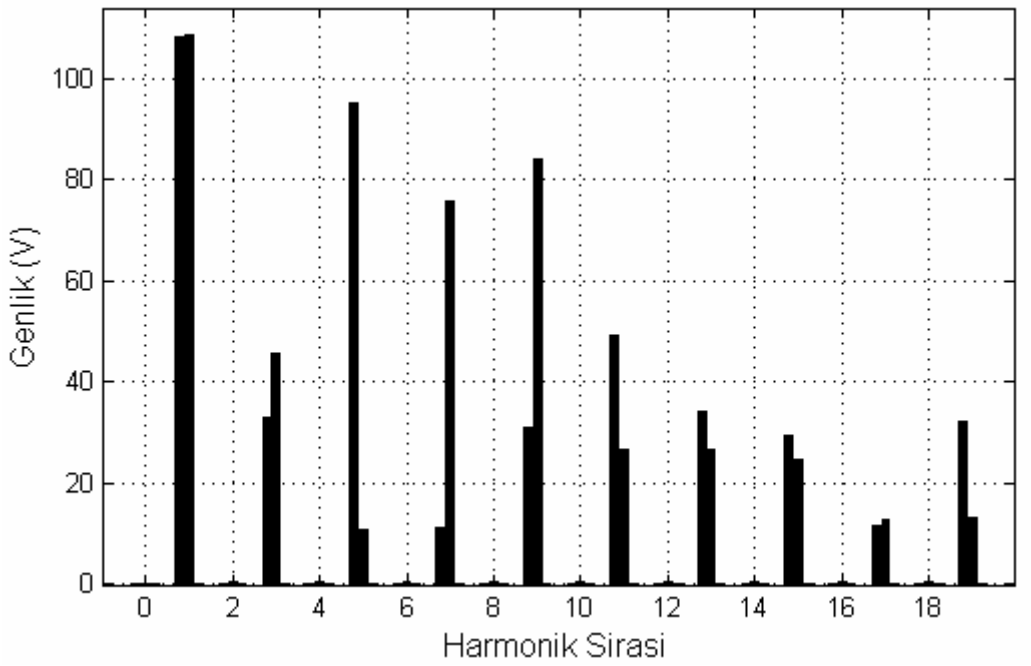
Şekil 5.6: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harm.sim.)



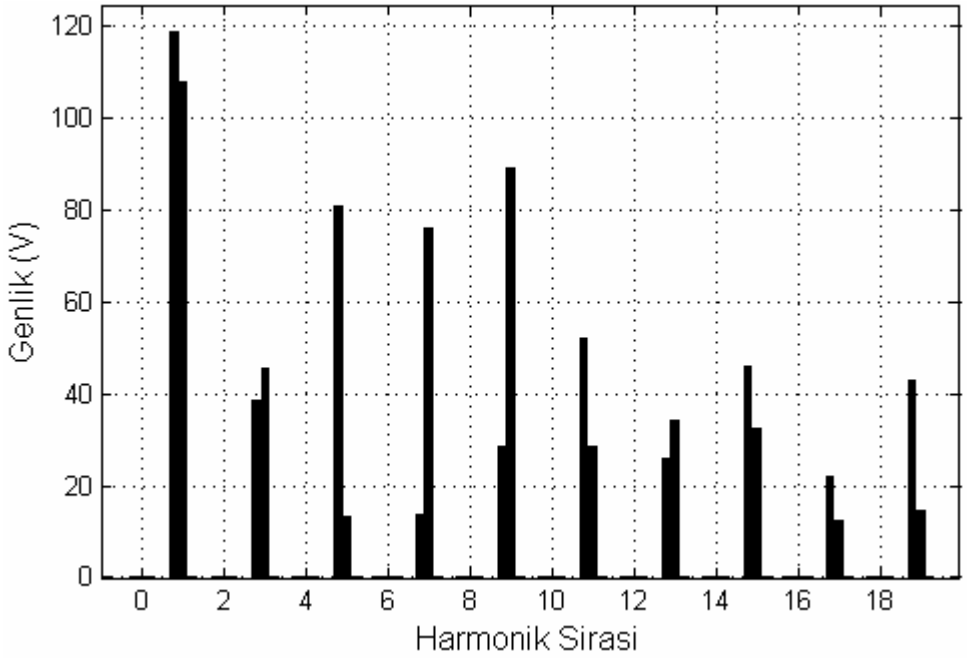
Şekil 5.7: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harm.sim.)



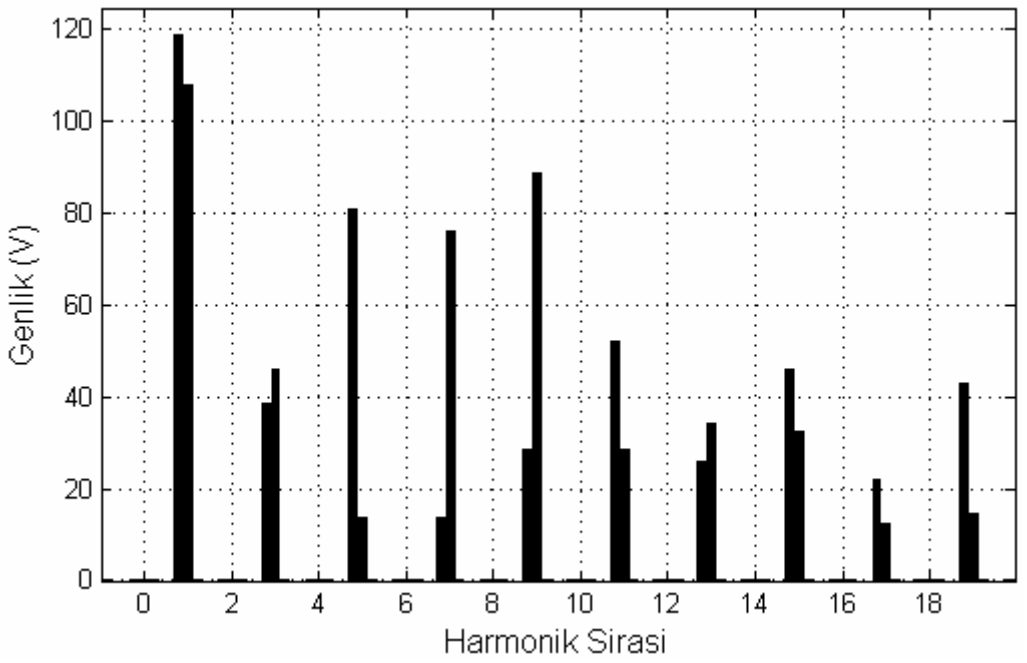
Şekil 5.8: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



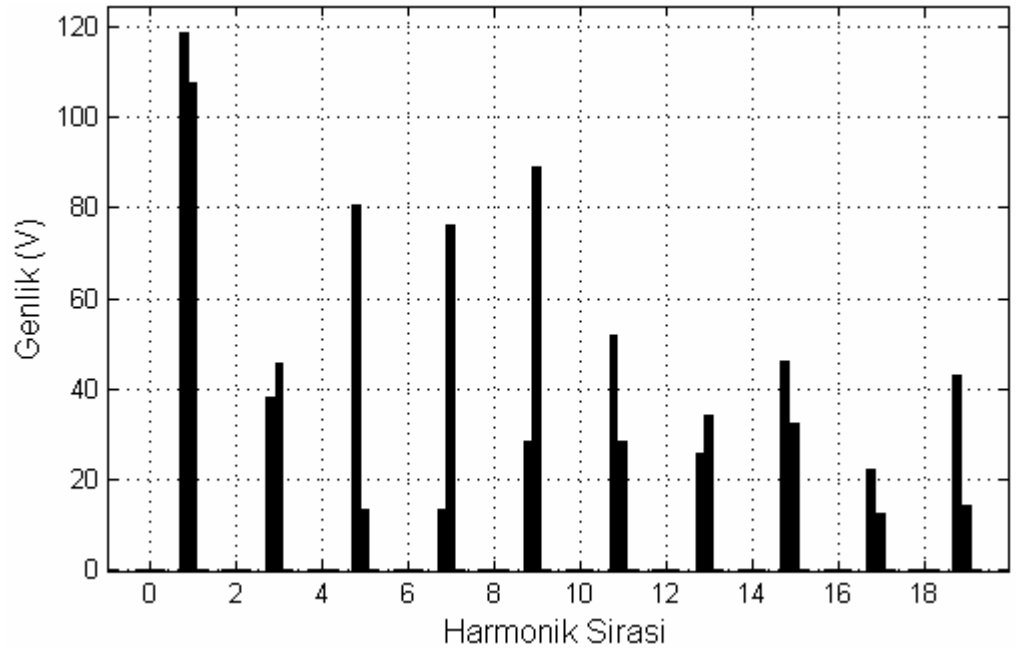
Şekil 5.9: R=22 Ω, L_k= 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



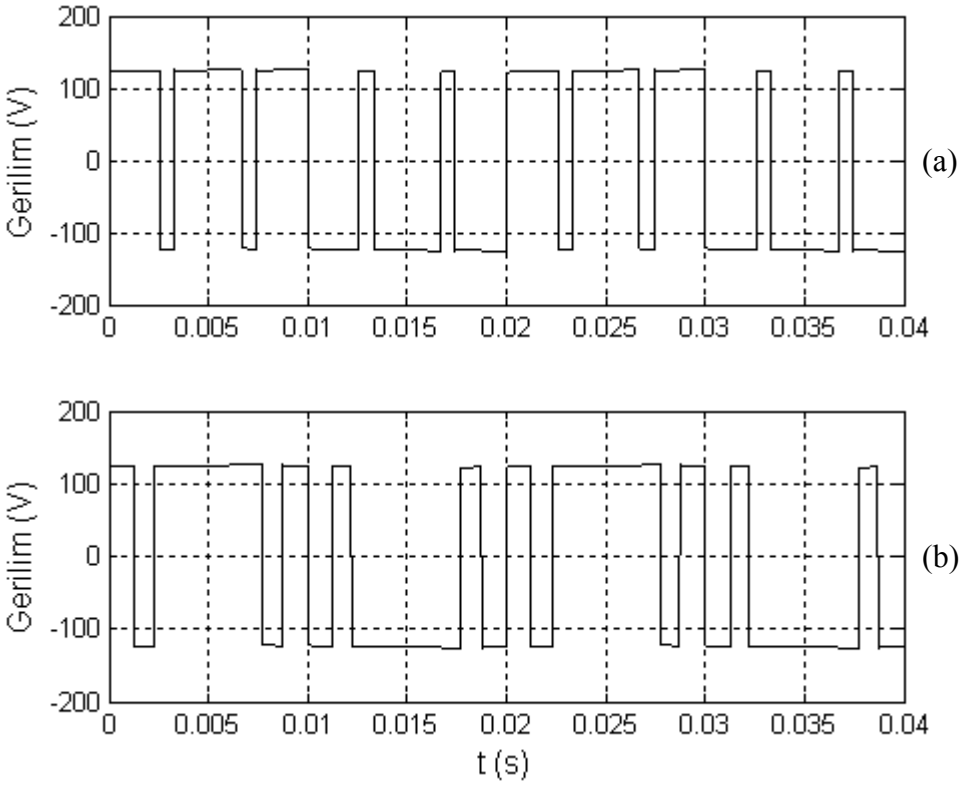
Şekil 5.10: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



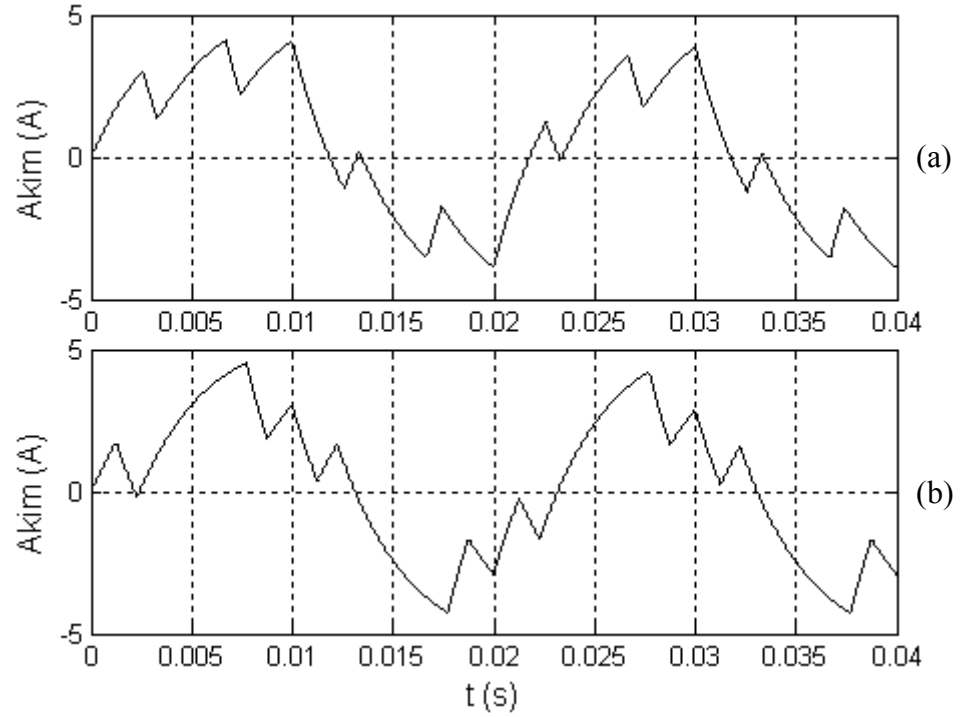
Şekil 5.11: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



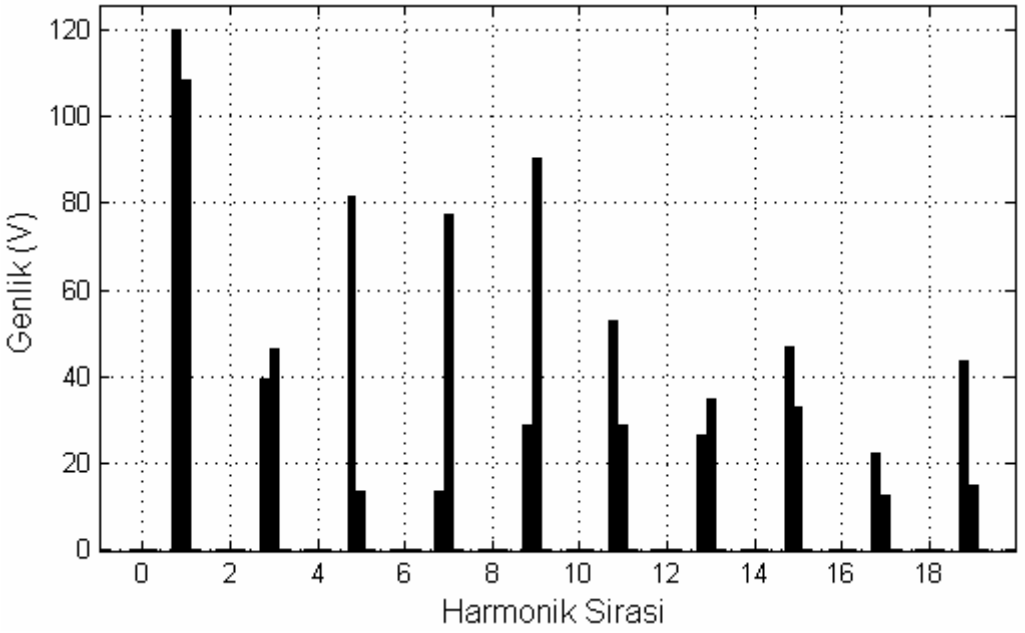
Şekil 5.12: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



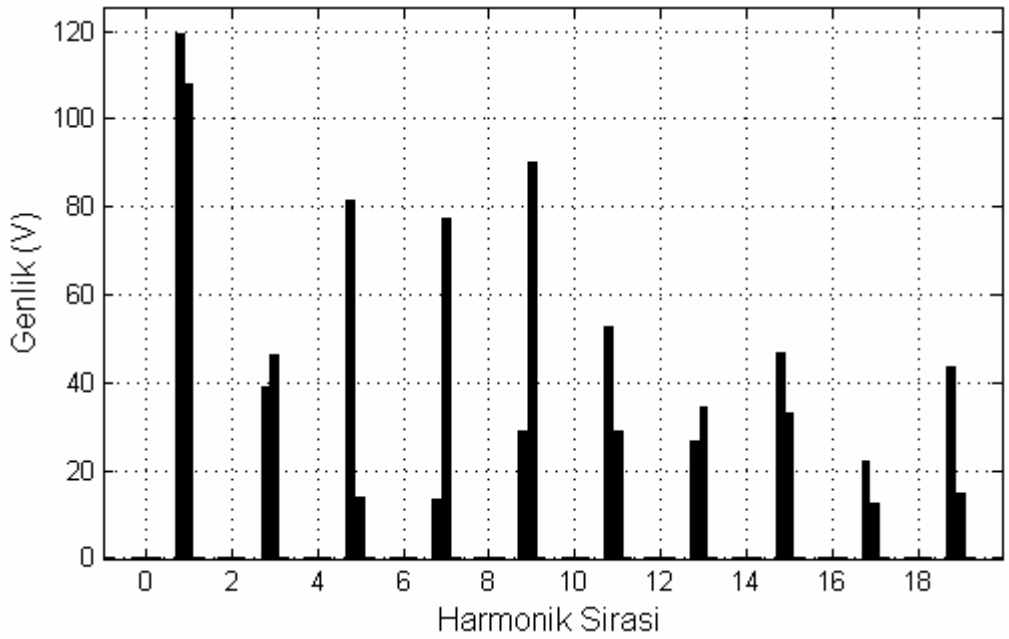
Şekil 5.13: R=22 Ω, L= 74mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harm.sim.)



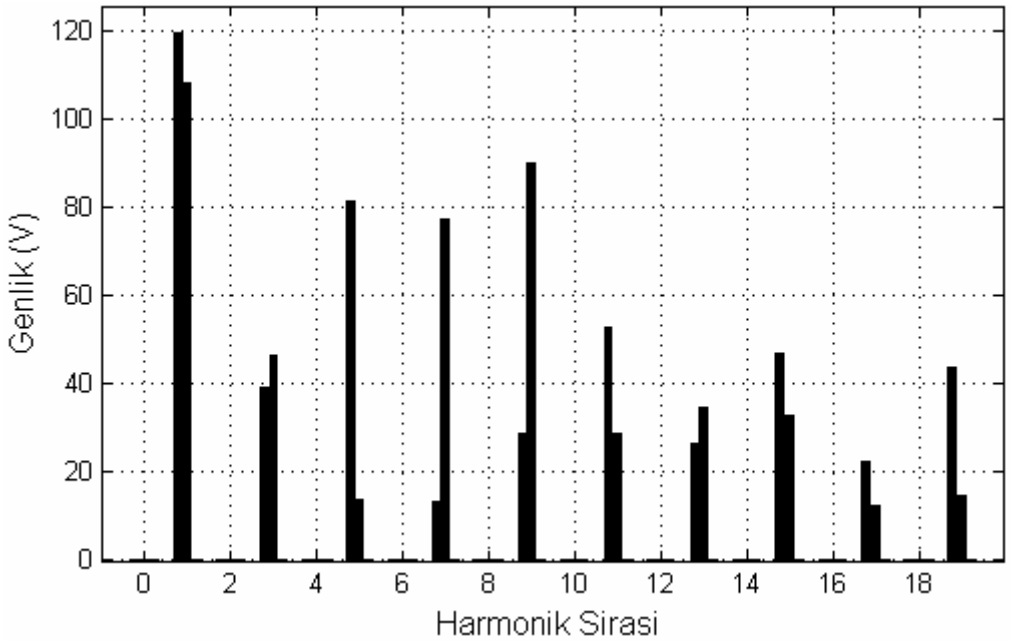
Şekil 5.14: R=22 Ω, L= 74mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harm.sim.)



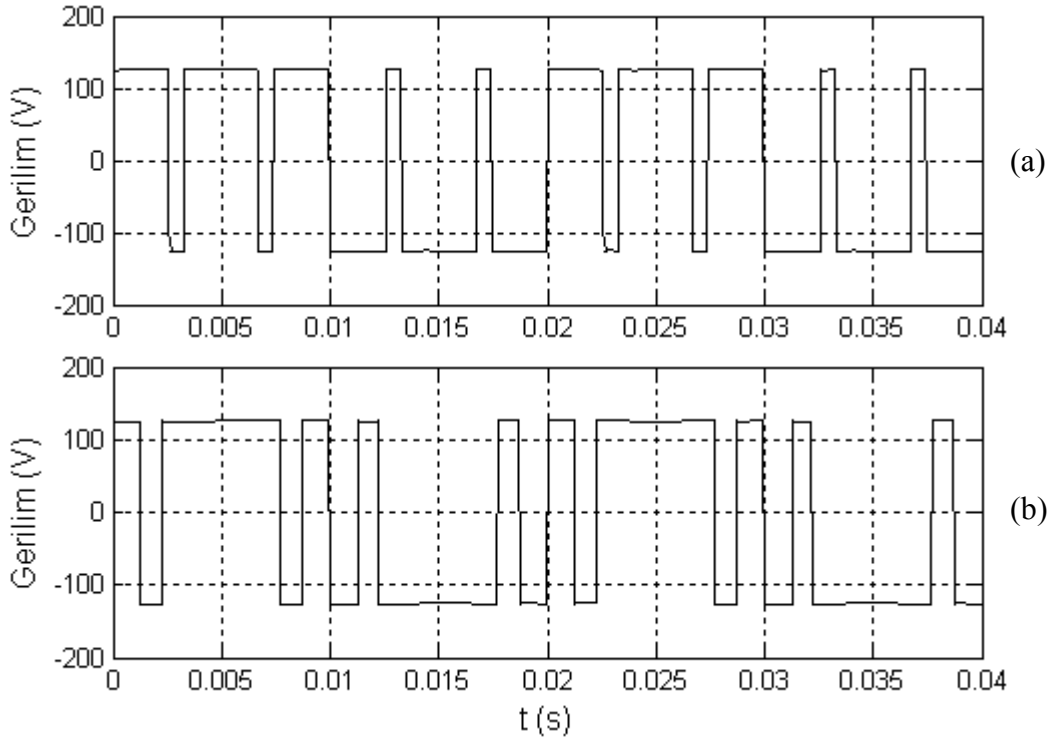
Şekil 5.15: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=16 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



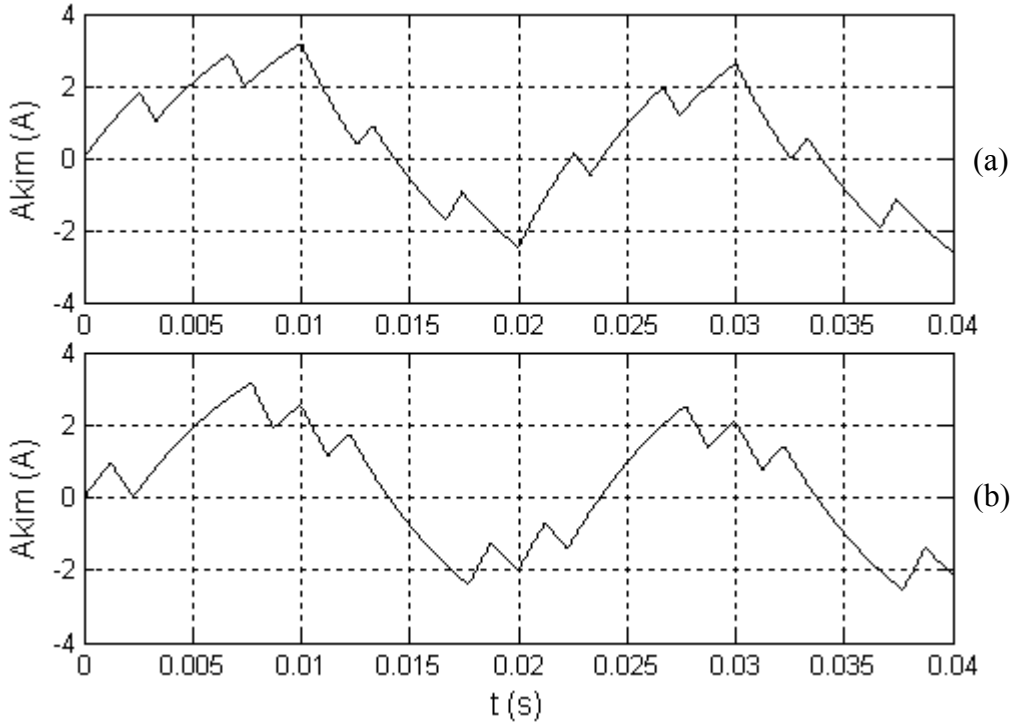
Şekil 5.16: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=32 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)



Şekil 5.17: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k= 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (5. harm.sim.)

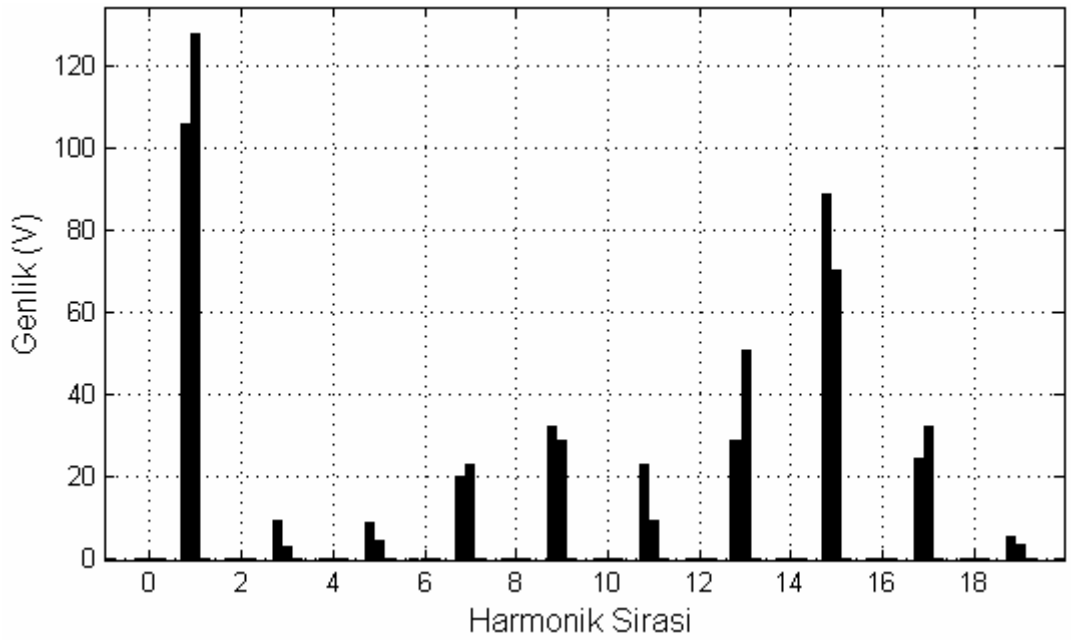


Şekil 5.18: R=22 Ω, L= 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (5. harm.sim.)

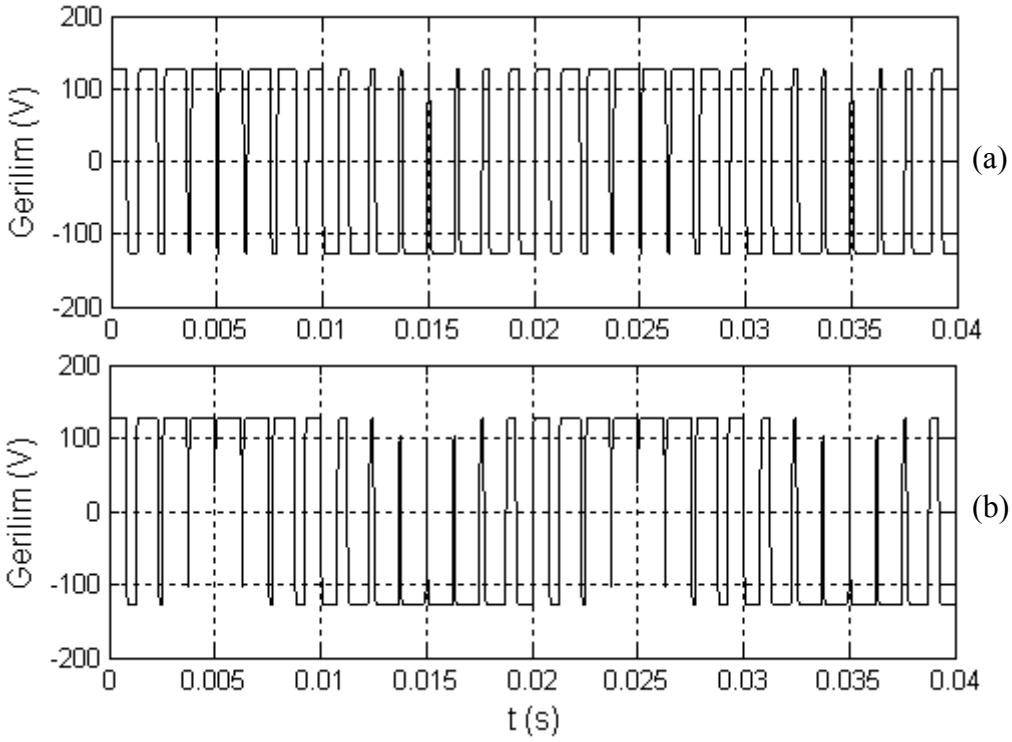


Şekil 5.19: R=22 Ω, L= 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (5. harm.sim.)

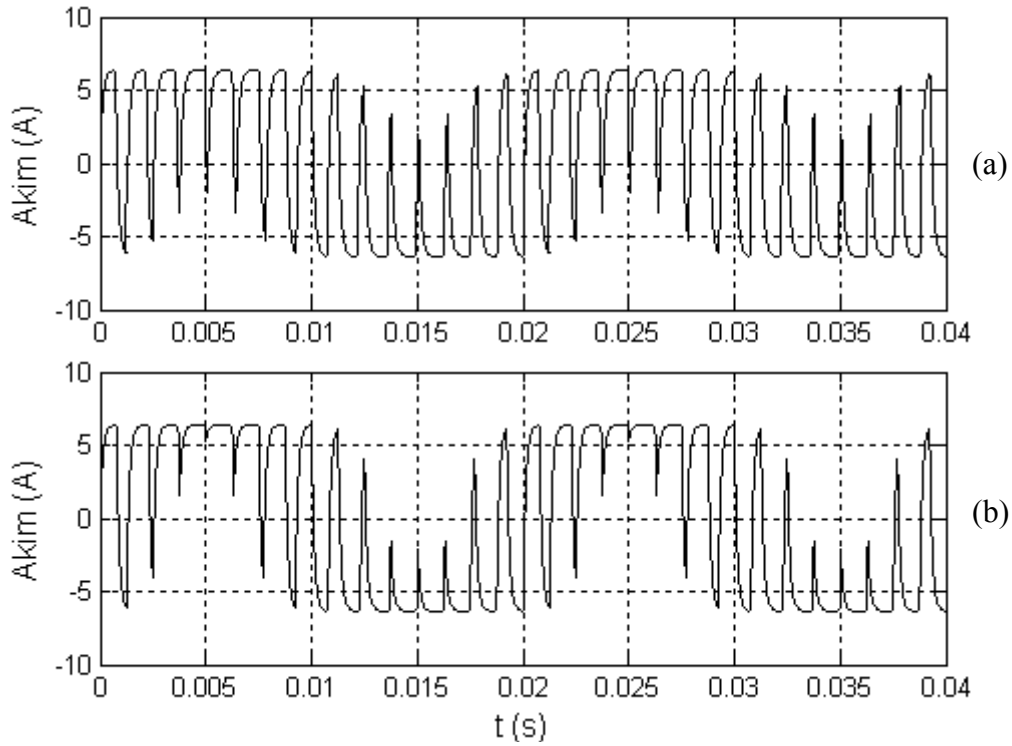
5.3.2 3., 5., ve 7. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar



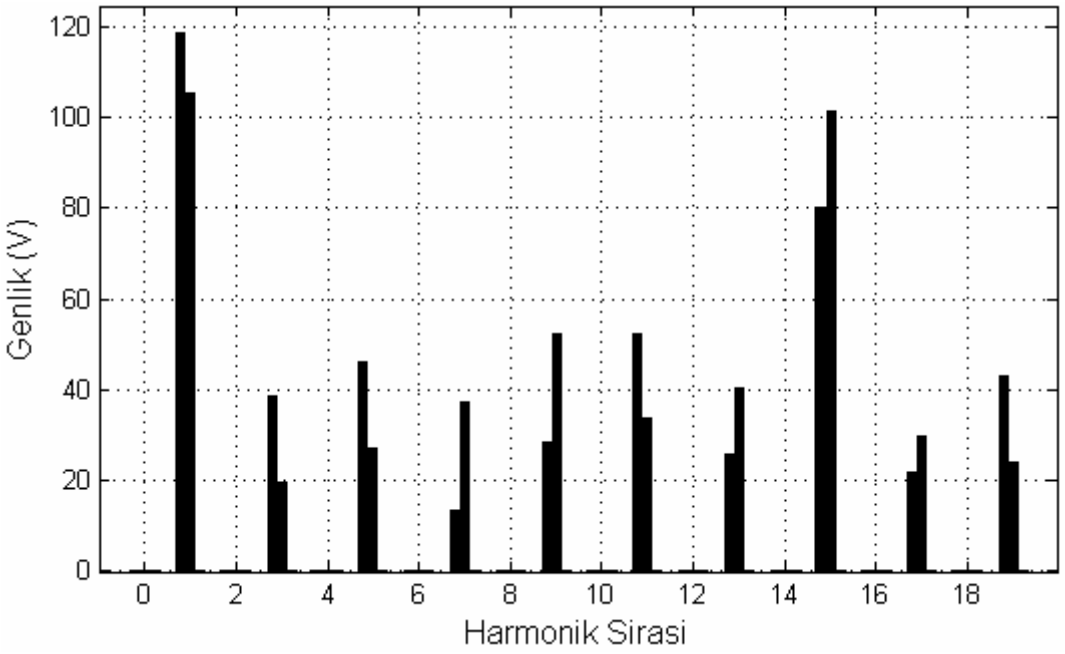
Şekil 5.20: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spektrumları (3.,5.,7. harm.sim.)



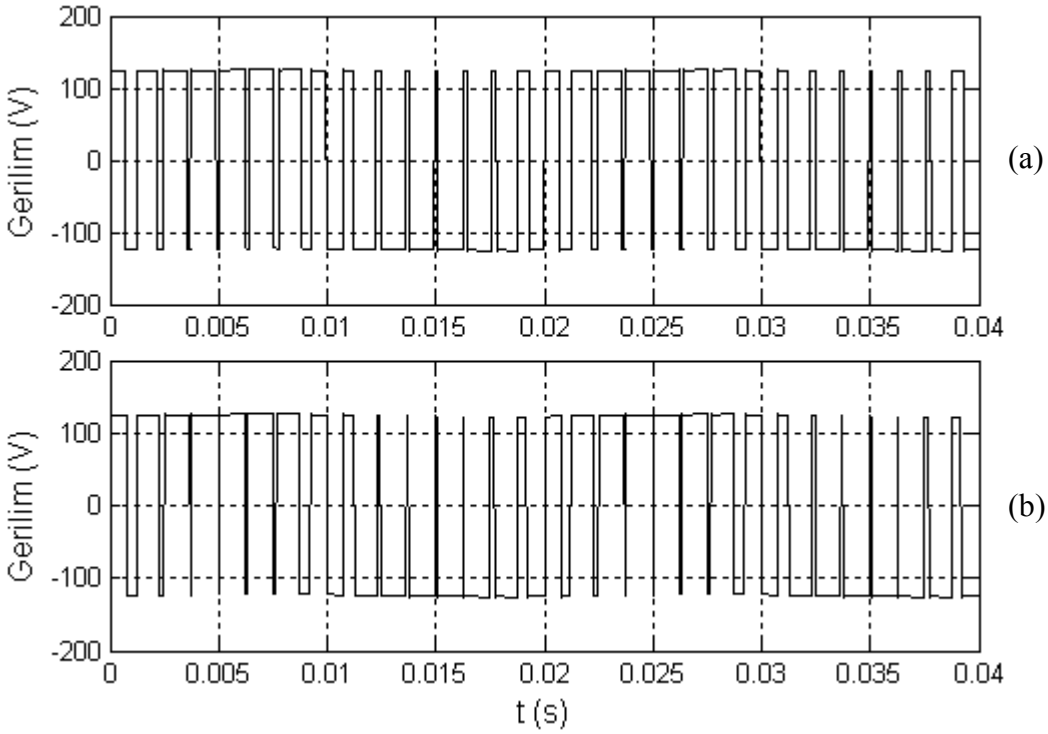
Şekil 5.21: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)



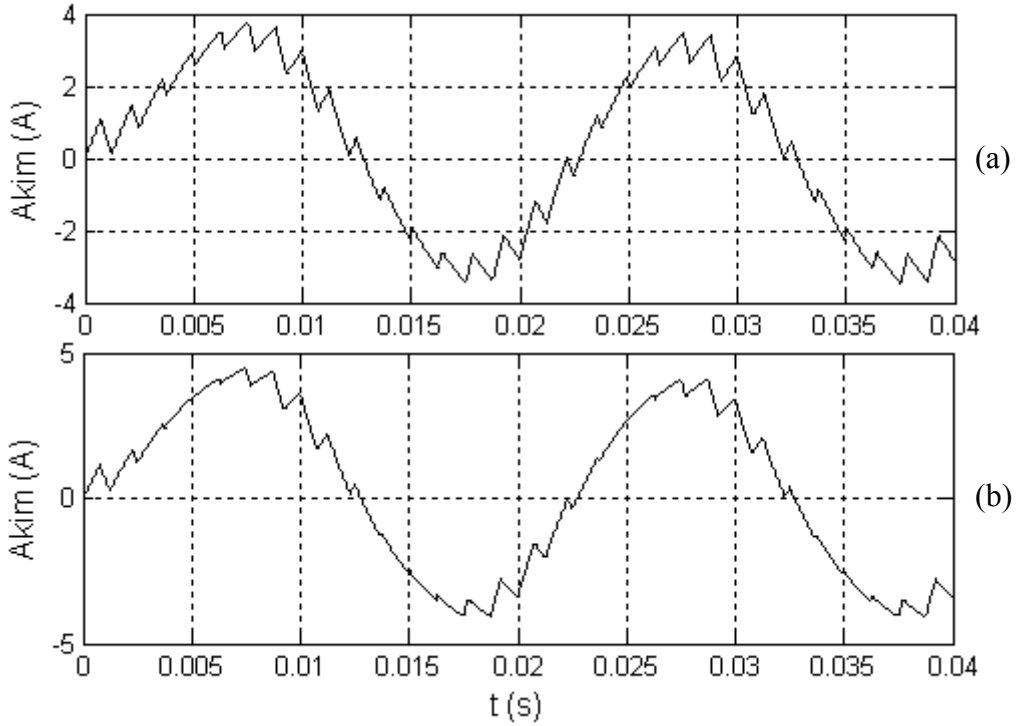
Şekil 5.22: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)



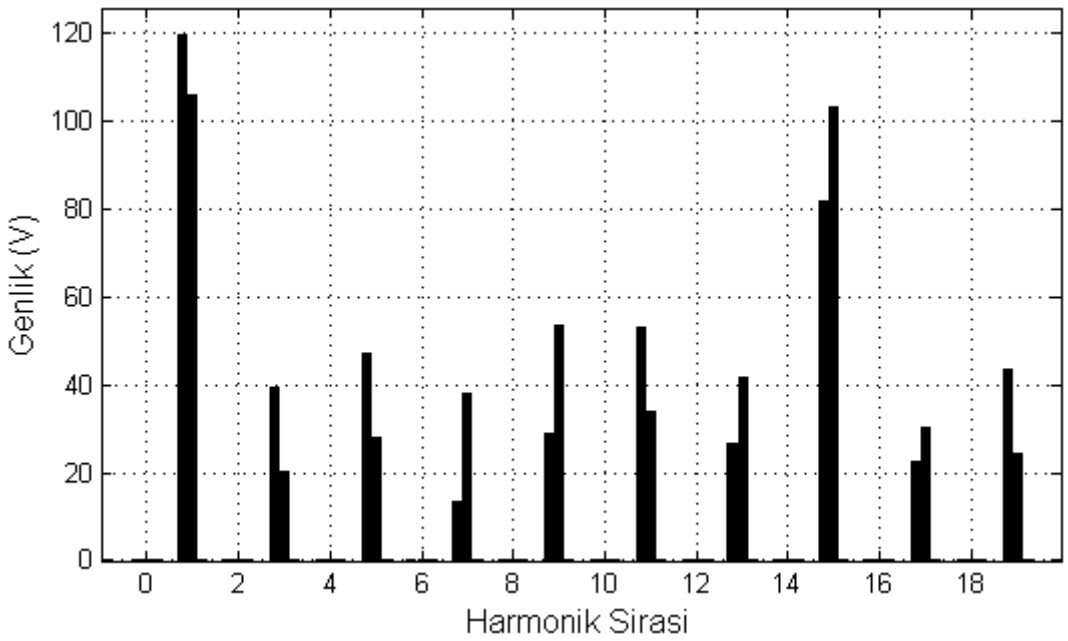
Şekil 5.23: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spekt. (3.,5.,7. harm.sim.)



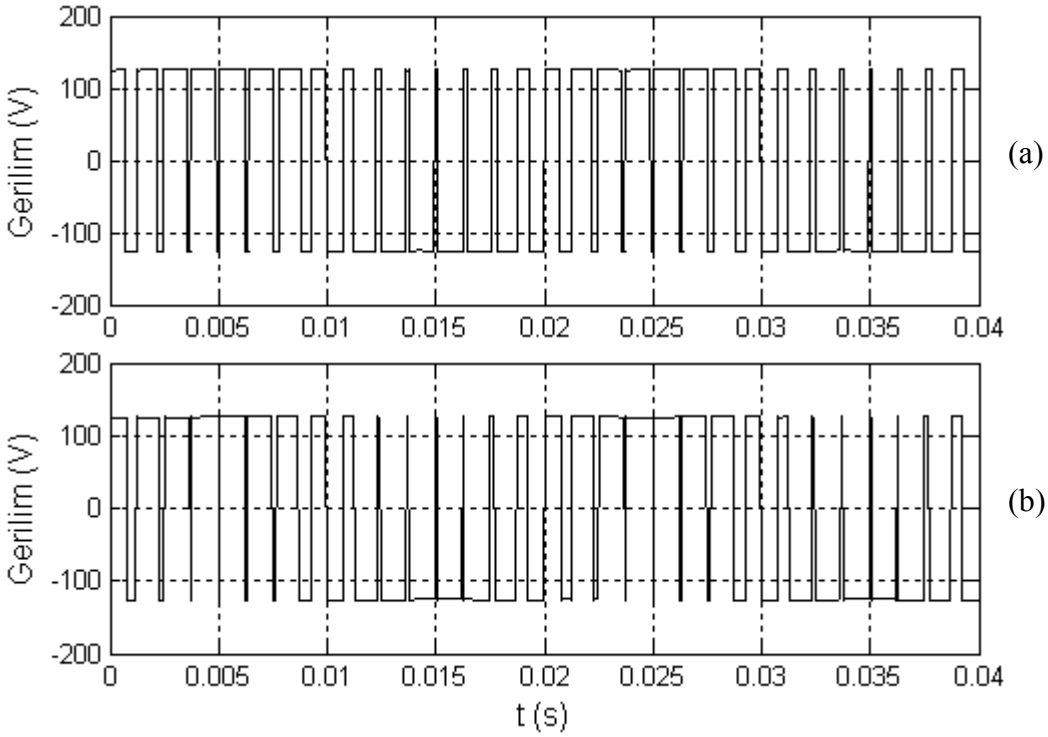
Şekil 5.24: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)



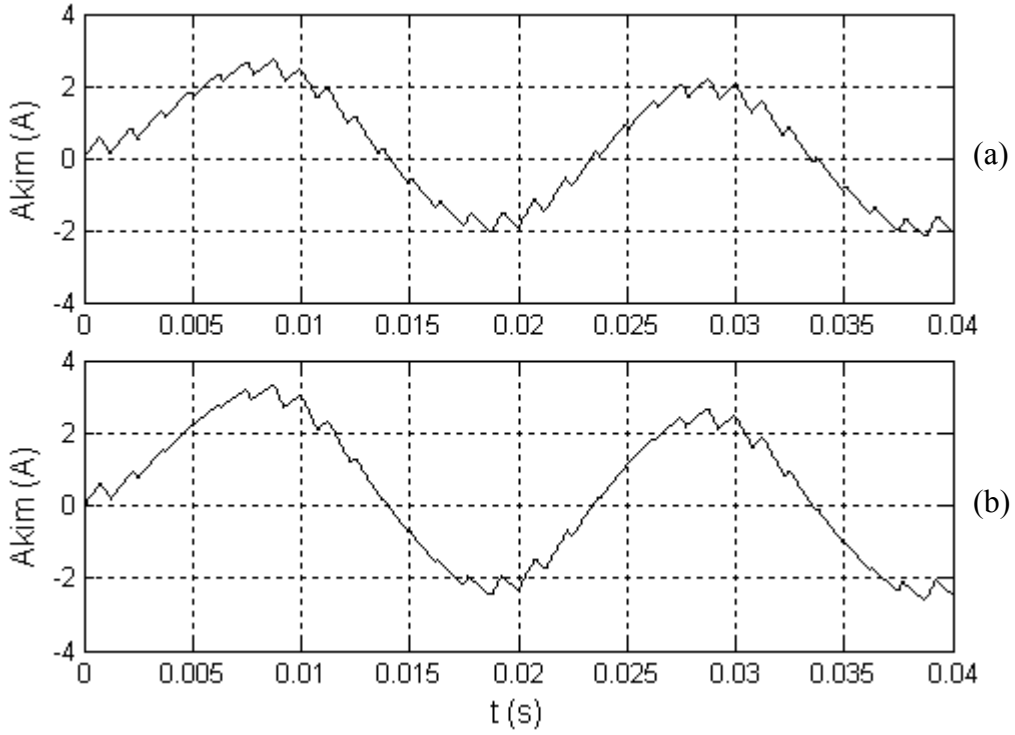
Şekil 5.25: R=22 Ω, L = 74 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)



Şekil 5.26: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA ve N=64 aralıkta Walsh fonksiyonları ile DGA (WFDGA) denetimli eviricinin harmonik spekt. (3.,5.,7. harm.sim.)



Şekil 5.27: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)



Şekil 5.28: R=22 Ω, L = 149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için SDGA (a) ve (b) N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harm.sim.)

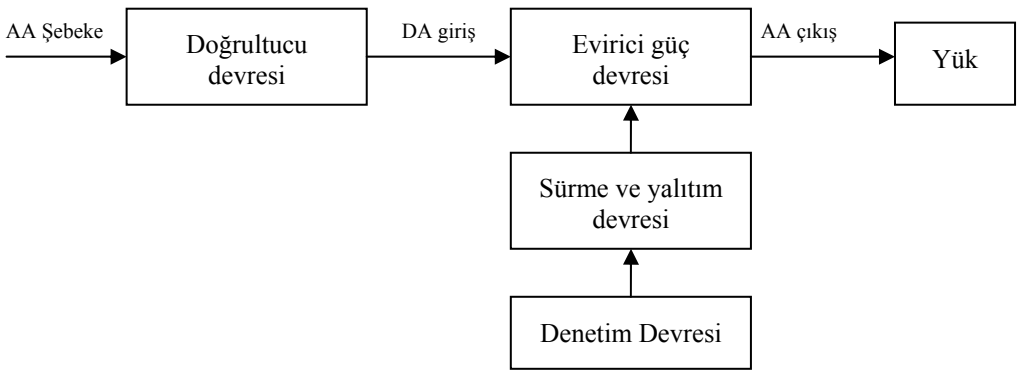
BÖLÜM 6. TASARIM VE UYGULAMA

6.1 Giriş

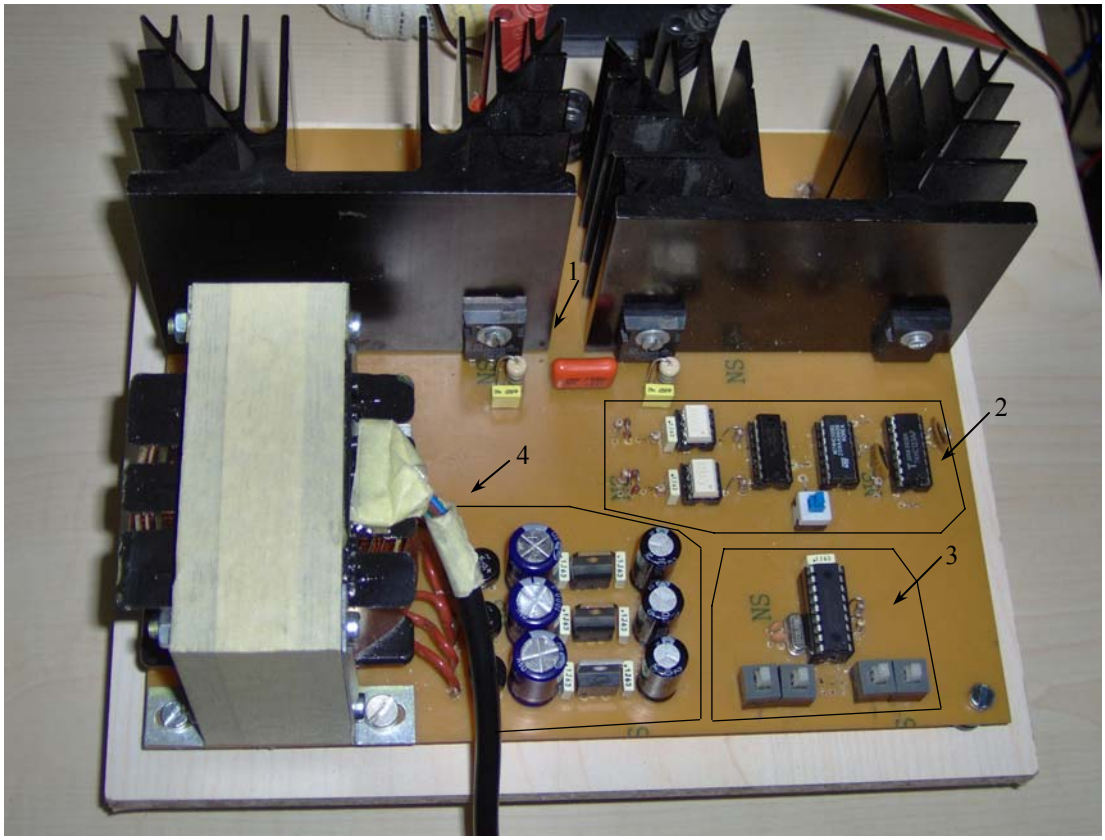
Bu kısımda Walsh fonksiyonları kullanılarak harmoniklerin azaltılması için gerekli devrenin tasarımı ve uygulanması detaylı olarak açıklanmaktadır. Bu çalışmada Bölüm 4' de hesaplanan anahtarlama açıları tek fazlı yarım köprü bir eviriciye uygulanmaktadır.

6.2 Uygulama Devresi

Uygulama devresi, doğrultucu devresi, güç devresi, sürme ve yalıtım devresi ve denetim devresi olmak üzere dört kısımdan meydana gelmektedir. Uygulama devresinin genel blok diyagramı Şekil 6.1' de gösterilmektedir. Bu blok devreye uygun kurulan deney düzeneği fotoğrafı ise Şekil 6.2' de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: Uygulama devresi blok şeması



Şekil 6.2: WFDGA denetimli tek fazlı yarım köprü evirici deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafı

1. Güç devresi
2. Sürme ve yalıtım devresi
3. Denetim devresi
4. +15V,+15V, +5V besleme devresi

6.2.1 Doğrultucu devresi

Doğrultucu devresine uygun kurulan deney düzeneği ise Şekil 6.3' de gösterilmektedir. Bu devrenin devre şeması Şekil 6.4' de gösterilmektedir. Şekil 6.4' de gösterilen devrenin yapısı üç kısımdan oluşur. Birinci kısımda bulunan orta uçlu transformatör 220 V' luk şebeke gerilimini 110 V' a düşürmektedir. Bu gerilim, devrenin ikinci kısmını oluşturan köprü doğrultuculara iletilir. Bu doğrultucular çıkışta gerilimin efektif değerinin $\sqrt{2}$ katı kadar bir DA gerilimi üretir. Son olarak üçüncü kısımda DA gerilimi kondansatörler yardımıyla filtre edilerek sabit çıkış gerilimi elde edilir. Bu devrede denetimsiz tam dalga orta uçlu doğrultucu devresi

kullanılmaktadır. Devrede kullanılan malzemeler ve özellikleri Tablo 6.1' de verilmektedir.

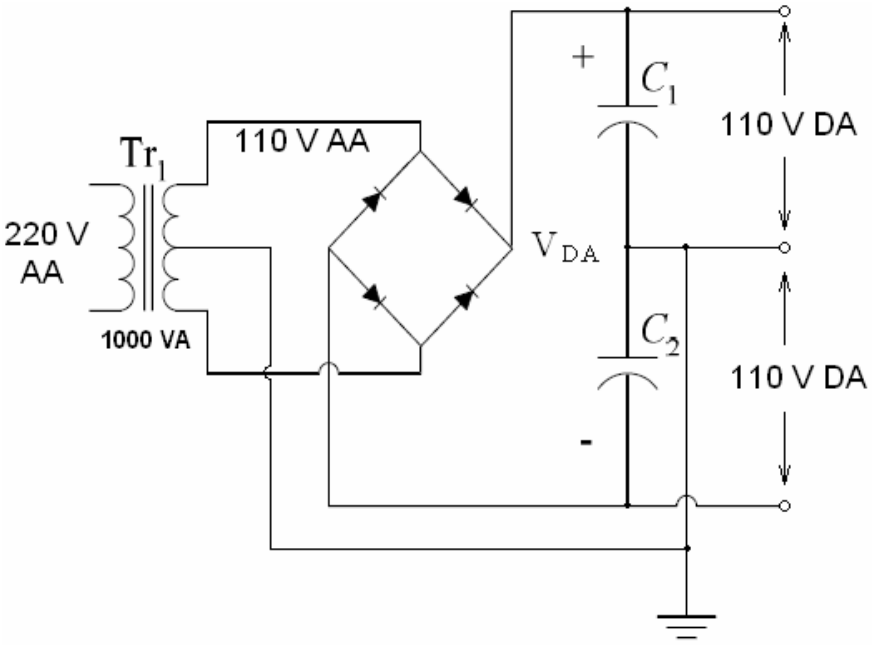


Şekil 6.3: Doğrultucu devresi deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafı

Tablo 6.1: Doğrultucu devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme adı	Özelliği
Trafo	220 / 2x120/110/90 V, 1000 VA, orta uçlu
Köprü diyot_KBPC3510	1000 V, 35 A
Kondansatör	2200 μF, 150 V
Yarıiletken kartuş sigorta _FWC-25A10F	2x25A 600V AA
Otomatik sigorta _M.G. NC32a B10	2x10 A 230V AA

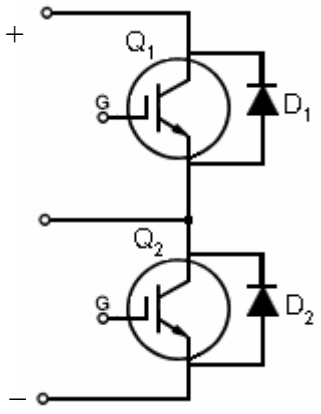
Doğrultucu devresinde, elde edilen doğrultulmuş DA geriliminde izin verilen dalgalanmanın (e) %10 olduğu durumda kullanılması gereken kondansatör değeri $\%e = w \cdot R \cdot C$ eşitliği yardımıyla bulunur.



Şekil 6.4: Doğrultucu devresi

6.2.2 Evirici güç devresi

Evirici güç devresinde en yüksek dayanma akımı (25°C' de) ve gerilimi 75A, 600V olan IGBT yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Güç devresinin genel yapısı devresi Şekil 6.5' de gösterilmiştir.



Şekil 6.5: Güç devresinin genel yapısı

Tablo 6.2: Güç devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme adı	Özelliği
IGBT_ IXSH40N60B	40A, 600V
Diyot_USE130	12 A

IGBT' ler yüksek gerilimli ve yüksek akımlı bir BJT' yi (Bipolar Junction Transistör) ile düşük güçlü ve hızlı anahtarlamalı metal-oksit yarı iletken alan etkili transistorün (MOSFET) özelliğine sahip yarı iletkendir. IGBT' ler bipolar ve MOSFET transistörlerin birleşiminden oluşmuştur ve bipolar transistor ün anahtarlama ve iletim karakteristiklerine, MOSFET' in de gerilim denetimli olma özelliğine sahiptir.

Hızlı anahtarlama ve düşük endüktans özelliğine sahip IGBT' ler servo sürücülerde, eviricilerde, kesintisiz güç kaynaklarında kullanılabilir. 100 kHz' e kadar olan güç anahtarlarının bir çok uygulamasında, IGBT iyi bir seçimdir. 100 kHz kadar yüksek frekanslı uygulamalar için bir IGBT aynı boyuttaki MOSFET' e göre yüksek gerilimlerde daha yüksek akımı kaldırabilir.

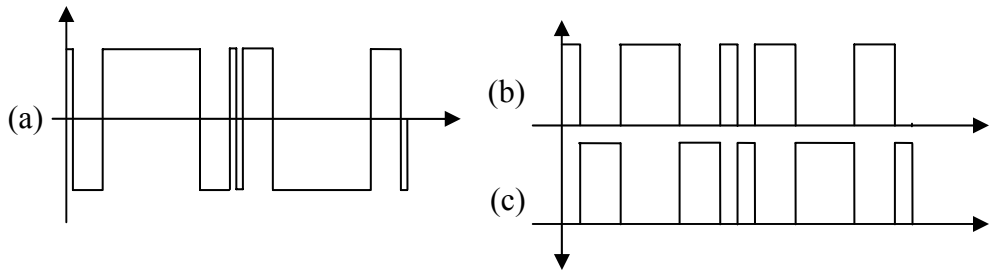
6.2.3 Sürme ve yalıtım devresi

Tasarlanan devrenin şeması Şekil 6.7' de görülmektedir. Bu devre IGBT' leri sürmek için kullanılan optik yalıtımlı bir devredir. Denetim devresinden gelen sinyallerin genlikleri, IGBT' leri sürmeye yeterli olmadığı için sinyallerin genlikleri tetikleme devresi tarafından yükseltilir. Bu devrede IGBT' yi iletime ve kesime sokmak için gerekli tetikleme sinyalini sağlayan TLP250 sürücü entegre kullanılmıştır. TLP250 entegresi IGBT' lerin sürme işlemini gerçekleştirirken ayrıca gelen sinyali güç devresine gerekli yalıtımı sağlayarak iletir. Yani denetim devresini güç devresinden yapısındaki fotoseçici diyot aracılığıyla ayırmaktadır.

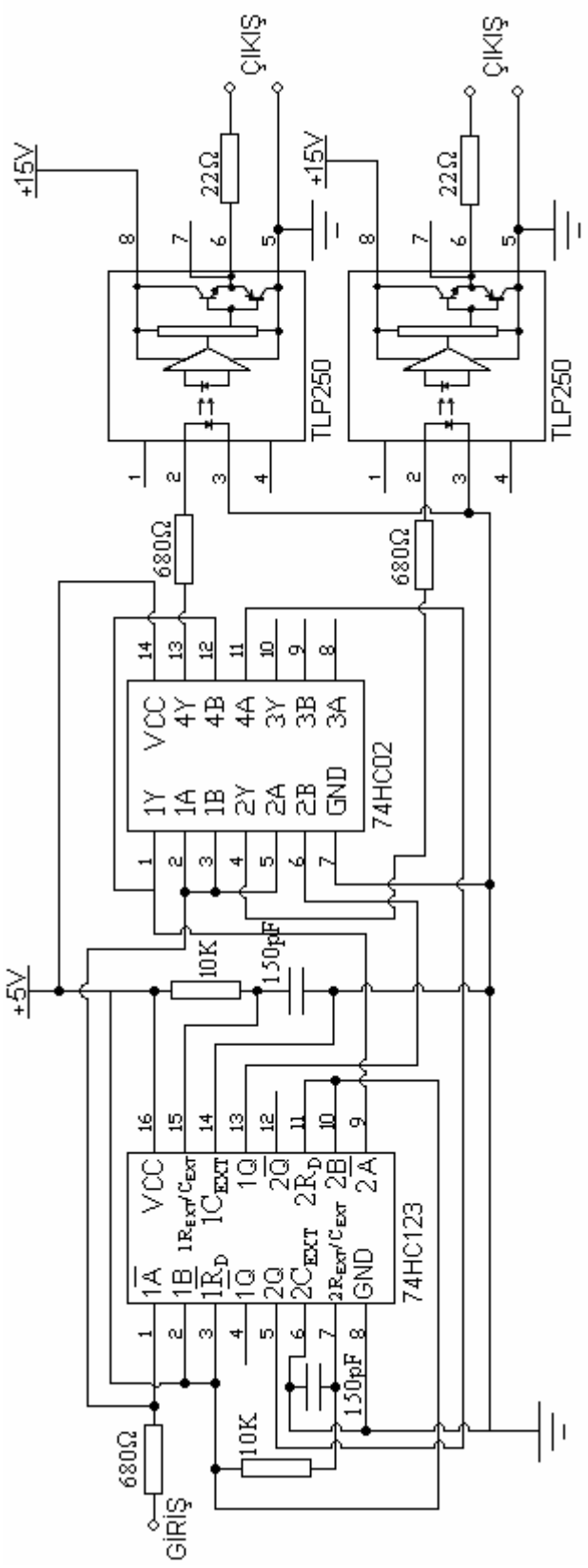
Tablo 6.3: Sürme ve yalıtım devresinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme adı	Özelliği
74HC123	İki yönlü, tekrar tetiklenebilir, sıfırlanabilir, tek kararlı multivibratör (Dual retriggerable monostable multivibrator with reset)
TLP250	IGBT sürücü entegre
74HC02	4' lü, 2girişli Nor kapısı
680Ω	Direnç
150pF	Kondansatör
22Ω	Direnç

Bu sürme devresinde kullanılan sistemdeki yarım köprü evirici güç devresinde IGBT' lerin hiçbir zaman aynı anda tetiklenmemesi gerekir. Bu durumu önlemek için de 74HC123 entegresi kullanılmıştır. Bu entegre çift yönlü tekrar tetiklenebilir özelliğe sahip tek kararlı (monostable) multivibratördür. Tek kararlı multivibratörler, dışarıdan uygulanan uygun bir sinyal ile durumunu geçici bir süre değiştirip bir süre sonra tekrar eski durumuna dönen multivibratör devresidir. Multivibratörün ürettiği sinyaller dijital devrelerde tetikleme sinyali olarak kullanılır. Tek kararlı multivibratörlerde, girişe uygulanan sinyal ile devrenin eski durumuna dönme süresi ayarlanarak, istenilen şekilde kare ve dikdörtgen dalga üretilebilir. Şekil 6.7' deki devrede tek bir giriş vardır. Örneğin Şekil 6.6.a' de görülen evirici çıkında bir periyot çıkış gerilimi elde etmek için Şekil 6.6.b' de görülen sinyalin, sürme ve yalıtım devresinin girişine uygulanması yeterlidir. Girişe uygulanan bu sinyal 74HC123 entegresinin sağladığı ölü zaman gecikmesi ile sinyal ikinci kez üretilir ve 74HC02 Nor kapısı ile sinyal terslenir ve Şekil 6.6.c' de gösterilen sinyal elde edilir. Bu iki sinyal TLP250 entegrelerine uygulanır.



Şekil 6.6: Sürme devresine uygulanan sinyaller



Şekil 6.7: Sürme ve Yalıtım Devresi

6.2.4 Denetim devresi

Bu çalışmada denetleyici olarak Microchip' in PIC (Peripheral Interface Controlller) serisi 16F84 denetleyicisi kullanılmıştır. PIC mikrodenetleyicisi ile gerekli anahtarlama işaretleri üretilir ve IGBT sürücü devresi aracılığıyla işaretler güç devresine gönderilerek uygun anahtarlama sağlanır. PIC16F84 mikro denetleyicisinin genel özellikleri Tablo 6.4' de verilmiştir.

Tablo 6.4: PIC16F84 mikrodenetleyici özellikleri

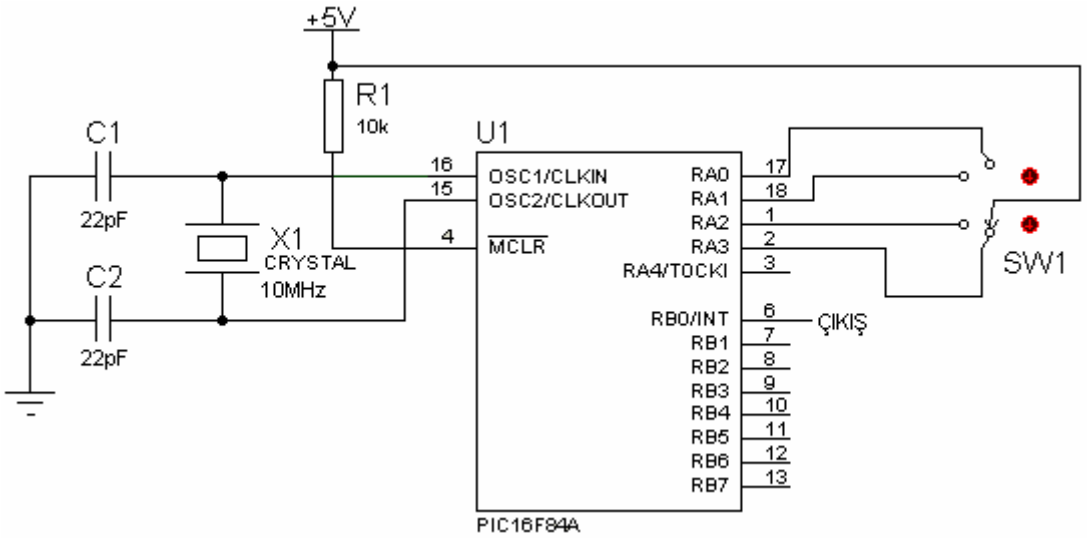
PIC16F84	
Özellikleri	1K Flash program bellek
	68 bayt RAM bellek
	64 byte EEPROM bellek
	14 bit genişliğinde komutlar
	Kesme (interrupt kaynağı)
	13 giriş-çıkış portları
	25mA port çıkış akımı
	Bekçi Köpek devresi
	Uyku modu
	+5V da 2mA akım, 2V da 15nA akım

PIC16F84 mikrodenetleyicisi 10 MHz kadar bir saat hızında çalışabilir. Bu hızda çalışınca komut çevrimi 400 ns kadardır. RISC (Reduced Instruction Set Computer) yapısına sahip olan bu denetleyicinin sadece 35 tane tek kelimelik komutu vardır.

Bu denetleyicilerin üretim amacı, çok fonksiyonlu lojik uygulamalarının hızlı ve ucuz bir denetleyici ile yazılım yoluyla karşılanmasını sağlamaktır. Bu denetleyici 8031 ve 8051 ailesine göre fiyat, çevre birimleri, kolay programlama, ve kullanım esnekliği gibi üstün özelliklere sahiptir ve böylece maliyet minimuma inmekte, sistemin güvenilirliği artmakta, enerji sarfiyatı azalmaktadır. PIC16F84 mikrodenetleyici entegresinin bacak bağlantıları Tablo 6.5' de verilmektedir.

Tablo 6.5: PIC16F84 mikrodenetleyici bacak bağlantıları

Bacak ismi	Bacak no	Tanım
RA0	17	PORTA bit 0
RA1	18	PORTA bit 1
RA2	1	PORTA bit 2
RA3	2	PORTA bit 3
RA4/TOCKI	3	PORTA bit 4, TMR0 zamanlayıcısı saat girişi
RB07 INT	6	PORTB bit 0, INT dış kesme bacağı
RB1	7	PORTB bit 1
RB2	8	PORTB bit 2
RB3	9	PORTB bit 3
RB4	10	PORTB bit 4
RB5	11	PORTB bit 5
RB6	12	PORTB bit 6
RB7	13	PORTB bit 7
VSS	5	Toprak bacağı
VDD	14	Pozitif kaynak bacağı
MCLR	4	Reset bacağı
OSC1	16	Osilatör giriş bacağı
OSC2	15	Osilatör giriş bacağı

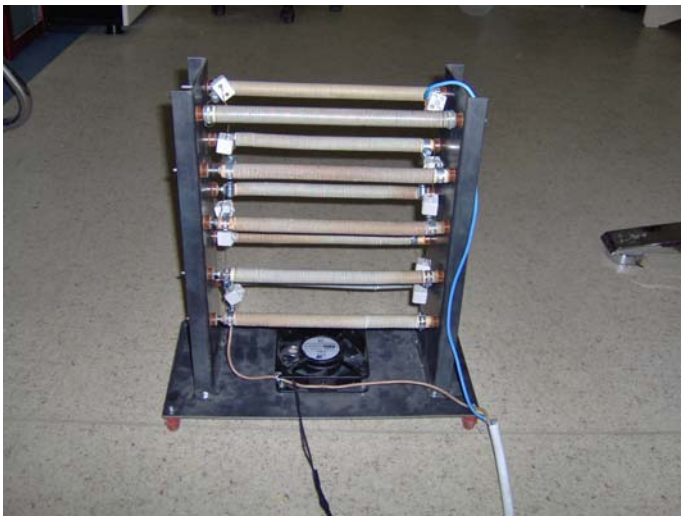


Şekil 6.8: Denetim devresi

Şekil 6.8’ deki denetim devresinde PIC16F84 15 ve 16 nolu bacaklarına bağlı bulunan 10 MHz kristal osilatör, entegrenin saat sinyalini oluşturur. Entegre, saat işaretine göre hafızasına yazılan programı yürütür. Yazılan programa göre portlar yönlendirilir. A portu giriş olarak belirlenmiştir. Girişindeki dört anahtar aracılığıyla yürütülmek istenen program parçası ana programda seçilir ve bu seçime göre B portundan çıkış alınır. Uygulanmak istenen anahtarlama sinyali sürme ve yalıtım devresi girişine uygulanır. Bu sinyal sürme ve yalıtım devresinde, IGBT’ lerin tetikleme ucuna uygulanabilecek düzeye getirilir. Uygulanan bu sinyale göre de istenilen evirici çıkış gerilimi elde edilir.

6.3 Deneysel Sonuçlar

Bölüm 4’ de hesaplanan anahtarlama açılarına göre yazılan programla gerçeklenen sistemden sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda evirici çıkış geriliminin 5. harmoniğinin azaltılması için gerekli olan anahtarlama sinyali sisteme uygulanmıştır. İkinci kısımda ise 3., 5., 7. harmoniklerin azaltılması için gerekli anahtarlama sinyali uygulanmıştır. Sistemde yük olarak Şekil 6.9’ de görülen R = 22 Ω direnci ve L = 149 mH endüktansı kullanılmıştır. Devreye ayrıca yükten ayrı, yüke seri, koruma amaçlı 2.5mH bir filtre bobini bağlanmıştır.



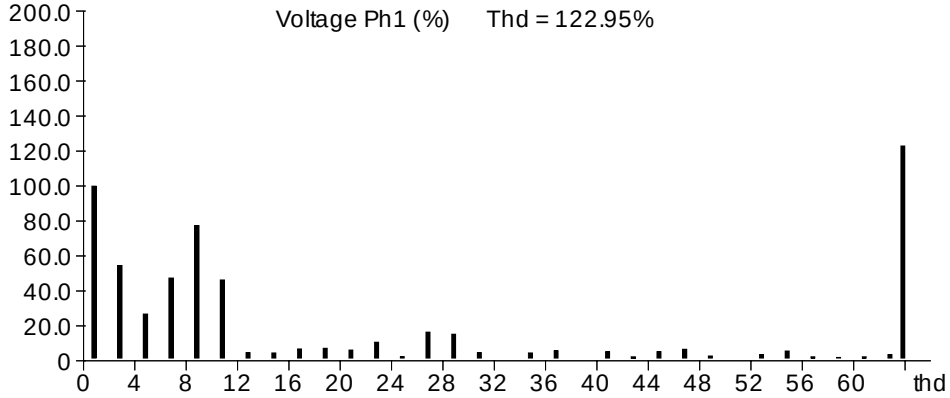
Şekil 6.9: 22 Ω direnç yükü

6.3.1 5. harmoniğin azaltılması için elde edilen sonuçlar

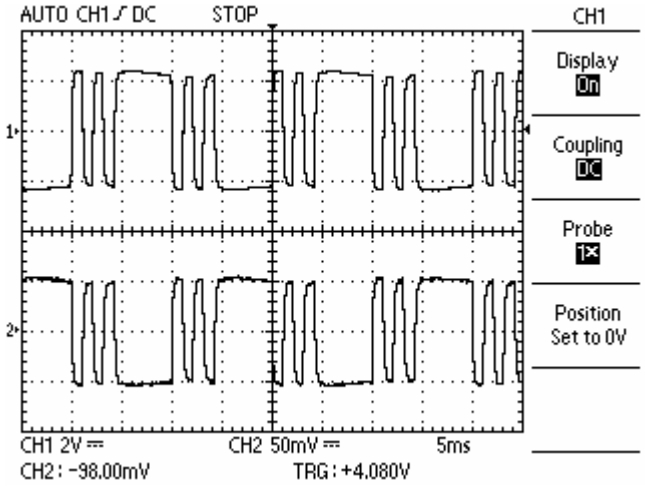
Tablo 6.6, Tablo 6.7, Tablo 6.8' de sırası ile N=16, N=32, N=64 Walsh fonksiyonları alt aralıkları için R=22 Ω ve 2.5mH filtre bobin yükünde elde edilen çıkış gerilimi harmonik yüzdeleri ve genlik değerleri gösterilmektedir. Tablolarda yer alan H.S., harmonik sırasını, U1 (%) yüzde olarak harmonik değerini, U1(V) ise, volt olarak harmonik genlik değerini göstermektedir. Şekil 6.10, Şekil 6.12, Şekil 6.14' de aynı şartlarda harmonik spektrumları ve Şekil 6.11, Şekil 6.13, Şekil 6.15' de de çıkış dalga şekilleri gösterilmektedir.

Tablo 6.6: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,13	32	0,17	0	0,08	32	0,12
1	100	33	1,05	1	66,54	33	0,7
2	0,15	34	0,09	2	0,1	34	0,06
3	54,37	35	4,57	3	36,17	35	3,04
4	0,13	36	0,16	4	0,08	36	0,1
5	26,75	37	5,64	5	17,8	37	3,75
6	0,13	38	0,17	6	0,09	38	0,12
7	47,49	39	0,64	7	31,6	39	0,43
8	0,42	40	0,21	8	0,28	40	0,14
9	77,44	41	5,32	9	51,53	41	3,54
10	0,47	42	0,14	10	0,31	42	0,1
11	46,13	43	2,23	11	30,7	43	1,48
12	0,27	44	0,05	12	0,18	44	0,03
13	4,74	45	5,35	13	3,15	45	3,56
14	0,04	46	0,16	14	0,02	46	0,1
15	4,48	47	6,71	15	2,98	47	4,47
16	0,06	48	0,21	16	0,04	48	0,14
17	6,89	49	2,73	17	4,58	49	1,82
18	0,15	50	0,21	18	0,1	50	0,14
19	7,25	51	0,27	19	4,82	51	0,18
20	0,18	52	0,15	20	0,12	52	0,1
21	6,12	53	3,62	21	4,07	53	2,41
22	0,2	54	0,14	22	0,13	54	0,09
23	10,7	55	5,48	23	7,12	55	3,65
24	0,06	56	0,15	24	0,04	56	0,1
25	2,45	57	2,26	25	1,63	57	1,5
26	0,21	58	0,21	26	0,14	58	0,14
27	16,4	59	1,87	27	10,91	59	1,24
28	0,32	60	0,23	28	0,22	60	0,15
29	15,27	61	2,21	29	10,16	61	1,47
30	0,26	62	0,15	30	0,18	62	0,1
31	4,79	63	3,66	31	3,18	63	2,43
		THB	122,95				



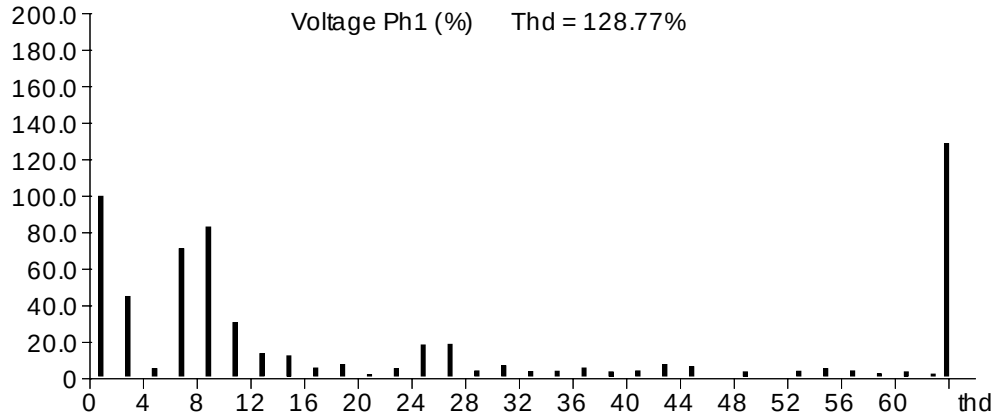
Şekil 6.10: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)



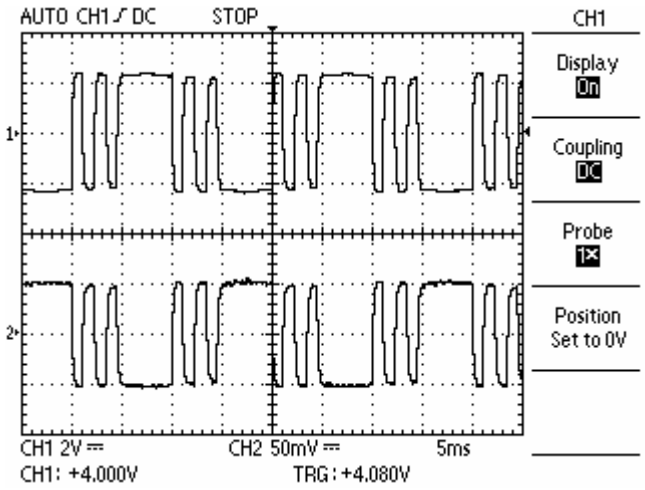
Şekil 6.11: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.7: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,08	32	0,11	0	0,05	32	0,07
1	100	33	3,97	1	65,12	33	2,58
2	0,1	34	0,07	2	0,07	34	0,05
3	45,07	35	4,23	3	29,35	35	2,75
4	0,17	36	0,06	4	0,11	36	0,04
5	5,53	37	5,88	5	3,6	37	3,83
6	0,13	38	0,12	6	0,08	38	0,08
7	71,23	39	3,91	7	46,38	39	2,55
8	0,28	40	0,14	8	0,18	40	0,09
9	83,19	41	4,39	9	54,17	41	2,86
10	0,28	42	0,15	10	0,18	42	0,1
11	30,88	43	7,84	11	20,11	43	5,11
12	0,25	44	0,15	12	0,16	44	0,1
13	13,79	45	6,55	13	8,98	45	4,27
14	0,16	46	0,1	14	0,1	46	0,07
15	12,55	47	1,26	15	8,17	47	0,82
16	0,07	48	0,15	16	0,04	48	0,1
17	5,98	49	3,87	17	3,89	49	2,52
18	0,07	50	0,23	18	0,04	50	0,15
19	7,93	51	1,48	19	5,16	51	0,97
20	0,05	52	0,13	20	0,03	52	0,08
21	2,27	53	4,26	21	1,48	53	2,78
22	0,1	54	0,06	22	0,07	54	0,04
23	5,49	55	5,53	23	3,58	55	3,6
24	0,2	56	0,07	24	0,13	56	0,05
25	18,47	57	4,34	25	12,03	57	2,82
26	0,32	58	0,02	26	0,21	58	0,01
27	18,87	59	2,8	27	12,29	59	1,82
28	0,2	60	0,15	28	0,13	60	0,1
29	4,34	61	3,8	29	2,83	61	2,47
30	0,11	62	0,17	30	0,07	62	0,11
31	7,11	63	2,58	31	4,63	63	1,68
		THB	128,77				



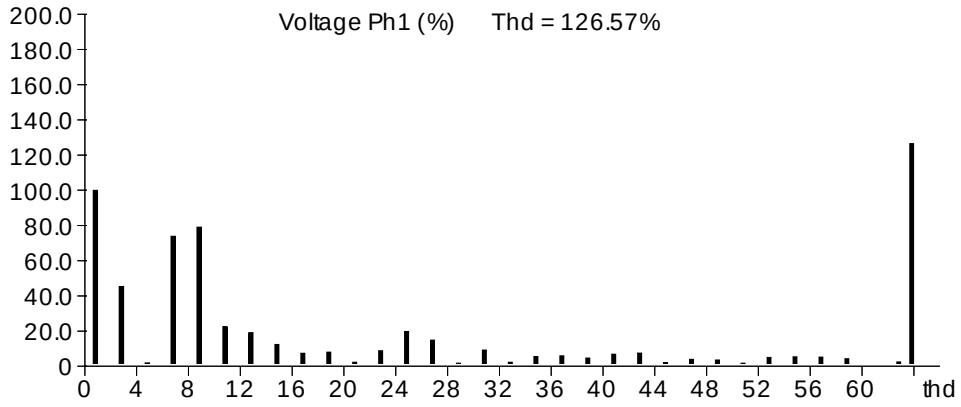
Şekil 6.12: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)



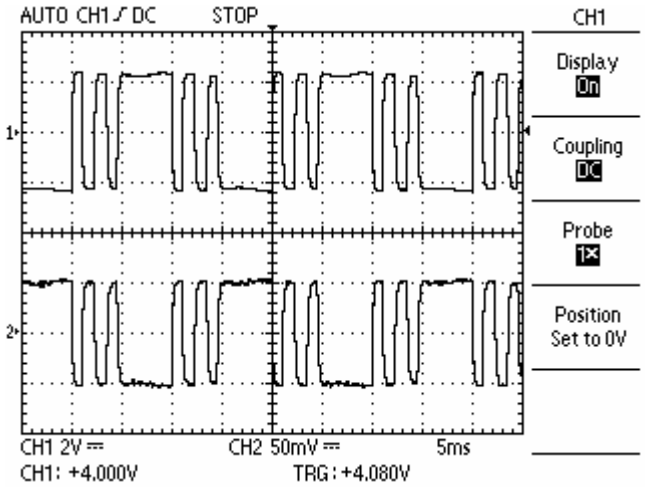
Şekil 6.13: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.8: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,16	32	0,18	0	0,11	32	0,12
1	100	33	2,33	1	65,69	33	1,53
2	0,2	34	0,07	2	0,13	34	0,04
3	45,23	35	5,59	3	29,71	35	3,67
4	0,14	36	0,07	4	0,09	36	0,04
5	1,9	37	5,88	5	1,25	37	3,86
6	0,16	38	0,1	6	0,11	38	0,07
7	73,78	39	4,68	7	48,47	39	3,08
8	0,25	40	0,09	8	0,17	40	0,06
9	79,07	41	6,81	9	51,94	41	4,47
10	0,28	42	0,13	10	0,18	42	0,09
11	22,61	43	7,43	11	14,85	43	4,88
12	0,06	44	0,24	12	0,04	44	0,16
13	19,05	45	2,03	13	12,51	45	1,33
14	0,18	46	0,07	14	0,12	46	0,04
15	12,51	47	4,06	15	8,22	47	2,67
16	0,05	48	0,23	16	0,03	48	0,15
17	7,32	49	3,59	17	4,81	49	2,36
18	0,17	50	0,1	18	0,11	50	0,07
19	8,09	51	1,71	19	5,31	51	1,12
20	0,03	52	0,19	20	0,02	52	0,12
21	2,17	53	5,19	21	1,42	53	3,41
22	0,19	54	0,16	22	0,12	54	0,11
23	8,98	55	5,39	23	5,9	55	3,54
24	0,15	56	0,16	24	0,1	56	0,11
25	19,72	57	5,22	25	12,95	57	3,43
26	0,4	58	0,15	26	0,26	58	0,1
27	14,86	59	4,37	27	9,76	59	2,87
28	0,22	60	0,05	28	0,14	60	0,03
29	1,73	61	1,16	29	1,13	61	0,76
30	0,24	62	0,09	30	0,16	62	0,06
31	9,26	63	2,45	31	6,08	63	1,61
		THB	126,57				



Şekil 6.14: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)

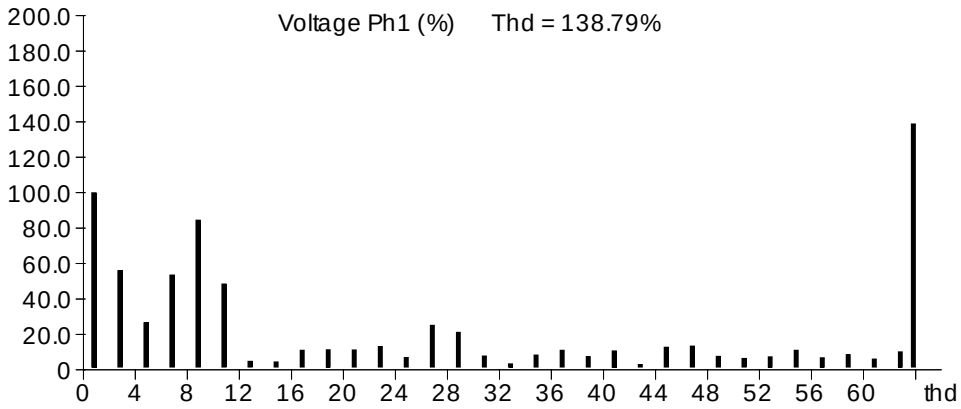


Şekil 6.15: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

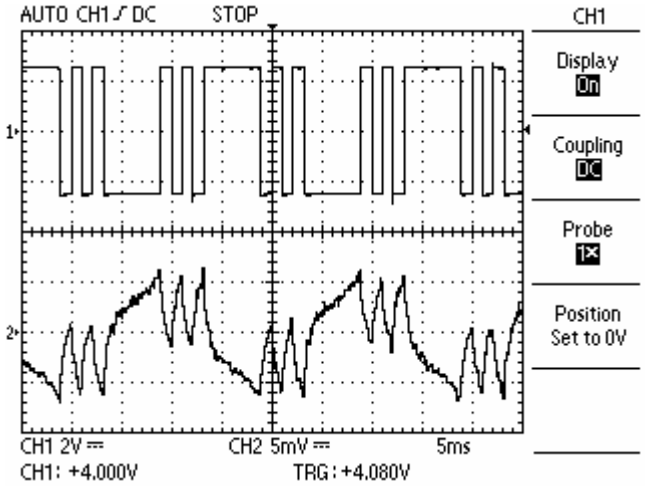
Tablo 6.9, Tablo 6.10, Tablo 6.11' de sırası ile N=16, N=32, N=64 Walsh fonksiyonları alt aralıkları için R= 22 Ω, L= 149 mH ve 2.5 mH filtre bobin yükünde elde edilen çıkış gerilimi harmonik yüzdeleri ve genlik değerleri gösterilmektedir. Şekil 6.16, Şekil 6.18, Şekil 6.20' de aynı şartlarda harmonik spektrumları ve Şekil 6.17, Şekil 6.19, Şekil 6.21' de de çıkış dalga şekilleri gösterilmektedir.

Tablo 6.9: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,41	32	0,65	0	0,3	32	0,47
1	100	33	3,36	1	72,14	33	2,43
2	0,63	34	0,73	2	0,45	34	0,53
3	56,02	35	8,44	3	40,41	35	6,09
4	0,72	36	0,68	4	0,52	36	0,49
5	26,5	37	10,93	5	19,12	37	7,89
6	0,66	38	0,62	6	0,48	38	0,45
7	53,61	39	7,57	7	38,67	39	5,46
8	0,6	40	0,56	8	0,44	40	0,4
9	84,51	41	10,62	9	60,97	41	7,66
10	0,57	42	0,66	10	0,41	42	0,47
11	48,43	43	3,01	11	34,94	43	2,17
12	0,6	44	0,67	12	0,43	44	0,48
13	4,91	45	12,88	13	3,54	45	9,29
14	0,69	46	0,69	14	0,5	46	0,5
15	4,55	47	13,37	15	3,29	47	9,64
16	0,68	48	0,62	16	0,49	48	0,45
17	11,06	49	7,64	17	7,98	49	5,51
18	0,64	50	0,59	18	0,46	50	0,42
19	11,41	51	6,45	19	8,23	51	4,65
20	0,57	52	0,63	20	0,41	52	0,45
21	11,14	53	7,28	21	8,04	53	5,25
22	0,65	54	0,7	22	0,47	54	0,51
23	13,13	55	11,08	23	9,47	55	7,99
24	0,71	56	0,69	24	0,51	56	0,49
25	6,96	57	6,79	25	5,02	57	4,9
26	0,64	58	0,53	26	0,46	58	0,38
27	25,21	59	8,64	27	18,19	59	6,23
28	0,64	60	0,6	28	0,46	60	0,43
29	21,16	61	6,15	29	15,26	61	4,44
30	0,59	62	0,66	30	0,42	62	0,48
31	7,82	63	10,07	31	5,64	63	7,26
		THB	138,79				



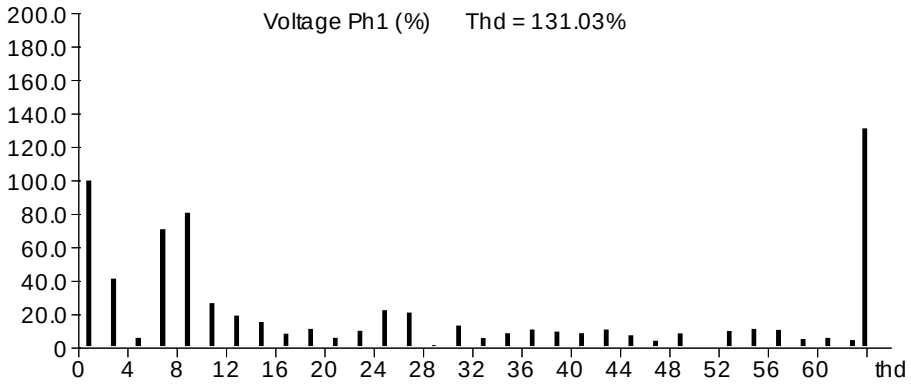
Şekil 6.16: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)



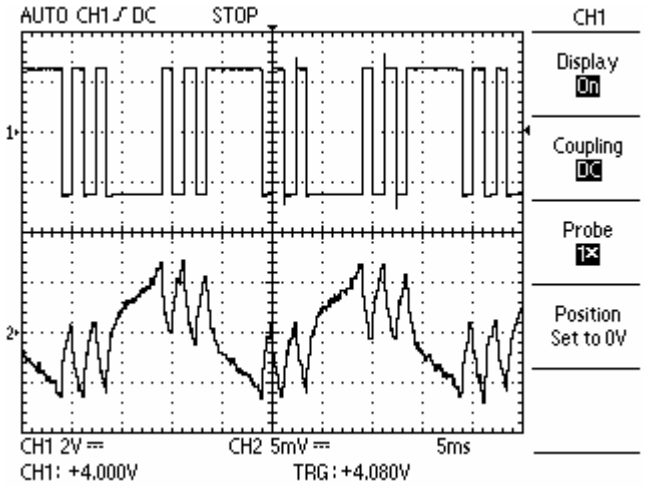
Şekil 6.17: R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=16 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.10: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,45	32	1,2	0	0,34	32	0,9
1	100	33	5,74	1	74,72	33	4,29
2	1,12	34	1,04	2	0,84	34	0,78
3	41,27	35	8,74	3	30,84	35	6,53
4	1,18	36	1,1	4	0,88	36	0,82
5	5,98	37	10,86	5	4,47	37	8,12
6	0,98	38	1,2	6	0,73	38	0,9
7	70,91	39	9,67	7	52,99	39	7,22
8	1,19	40	1,01	8	0,89	40	0,76
9	80,64	41	8,76	9	60,26	41	6,54
10	1,15	42	1,05	10	0,86	42	0,79
11	26,67	43	10,75	11	19,93	43	8,03
12	1	44	1,21	12	0,75	44	0,9
13	19,27	45	7,57	13	14,4	45	5,65
14	1,15	46	1	14	0,86	46	0,75
15	15,34	47	4,22	15	11,46	47	3,15
16	1,12	48	1,14	16	0,83	48	0,85
17	8,33	49	8,64	17	6,22	49	6,46
18	1,02	50	1,17	18	0,76	50	0,88
19	11,26	51	0,43	19	8,41	51	0,32
20	1,25	52	0,99	20	0,93	52	0,74
21	5,95	53	10,02	21	4,45	53	7,48
22	1,01	54	1,11	22	0,75	54	0,83
23	10,15	55	11,26	23	7,58	55	8,41
24	1,03	56	1,2	24	0,77	56	0,9
25	22,4	57	10,65	25	16,74	57	7,96
26	1,26	58	0,99	26	0,94	58	0,74
27	20,95	59	5,28	27	15,66	59	3,95
28	1,08	60	1,1	28	0,81	60	0,82
29	1,6	61	5,98	29	1,2	61	4,47
30	0,98	62	1,16	30	0,73	62	0,87
31	13,28	63	4,51	31	9,92	63	3,37
		THB	131,03				



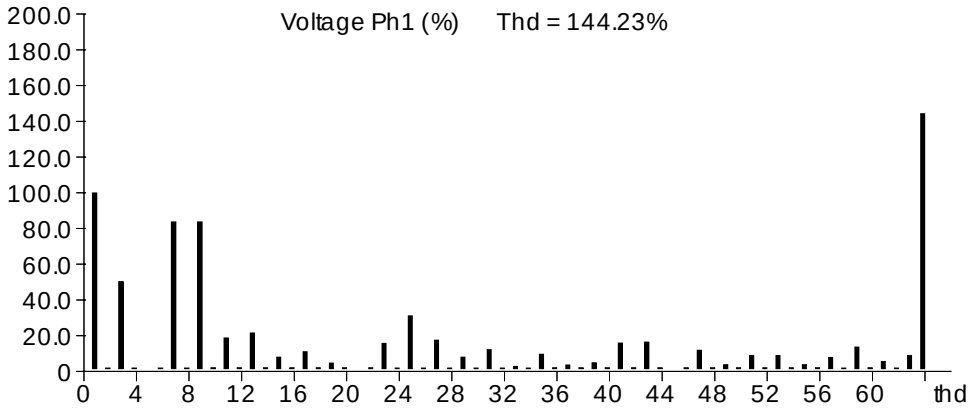
Şekil 6.18: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)



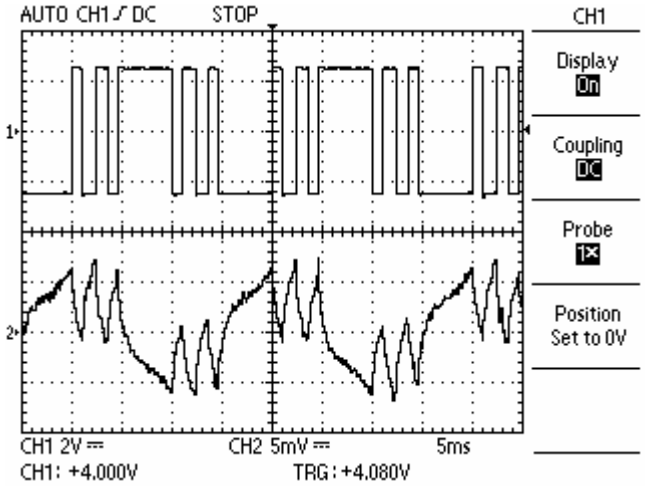
Şekil 6.19: R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=32 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.11: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (5. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,86	32	1,96	0	0,6	32	1,38
1	100	33	2,74	1	70,54	33	1,93
2	1,97	34	1,94	2	1,39	34	1,37
3	50,31	35	9,52	3	35,49	35	6,72
4	1,93	36	1,98	4	1,36	36	1,4
5	1,49	37	3,66	5	1,05	37	2,58
6	1,96	38	2,05	6	1,38	38	1,45
7	83,79	39	4,85	7	59,1	39	3,42
8	1,96	40	2,03	8	1,39	40	1,43
9	83,73	41	16	9	59,06	41	11,29
10	2,02	42	2,07	10	1,43	42	1,46
11	18,66	43	16,5	11	13,16	43	11,64
12	2,02	44	1,99	12	1,42	44	1,41
13	21,55	45	0,24	13	15,2	45	0,17
14	2	46	2,01	14	1,41	46	1,42
15	8,12	47	11,98	15	5,73	47	8,45
16	2,01	48	2,08	16	1,42	48	1,47
17	11,01	49	3,89	17	7,77	49	2,75
18	2	50	2,05	18	1,41	50	1,44
19	4,69	51	8,97	19	3,31	51	6,32
20	2,04	52	2	20	1,44	52	1,41
21	1,37	53	8,97	21	0,96	53	6,32
22	2,02	54	2,01	22	1,42	54	1,42
23	15,69	55	3,79	23	11,06	55	2,67
24	1,94	56	1,99	24	1,37	56	1,4
25	31,19	57	7,81	25	22	57	5,51
26	1,92	58	1,97	26	1,36	58	1,39
27	17,42	59	13,55	27	12,29	59	9,56
28	1,95	60	1,97	28	1,38	60	1,39
29	8,11	61	5,58	29	5,72	61	3,94
30	1,93	62	1,9	30	1,36	62	1,34
31	12,25	63	8,98	31	8,64	63	6,33
		THB	144,23				



Şekil 6.20: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (5. harmonik deneysel sonuç)



Şekil 6.21: R=22 Ω,L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (5. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.12' de tek fazlı evirici çıkış geriliminde 5. harmonik bileşeninin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 6.12: 5. Harmoniğin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar

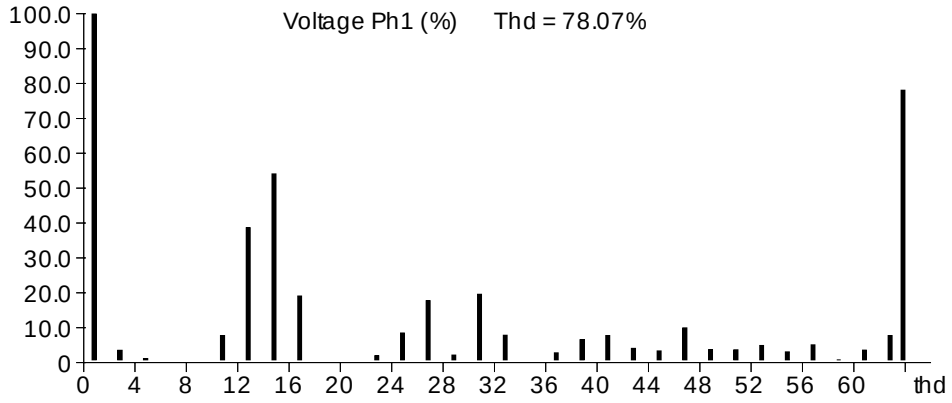
WFDGA ile Evirici çıkış gerilimi 5. harmonik bileşeninin azaltılması								
$V_1 = 0.8391.V_S$			R = 22Ω ,L_k= 2.5mH yükte			R = 22 Ω,L =149 mH,L_k=2.5mH yükte		
N	α_1	α_2	U_5 (%)	U_5(V)	THB(%)	U_5 (%)	U_5(V)	THB(%)
16	18°	38.8°	26.75	17.8	122.95	26.5	19.12	138.79
32	21.72°	40.32°	5.53	3.6	128.77	5.98	4.47	131.03
64	22.49°	41.039°	1.9	1.25	126.57	1.49	1.05	144.23

6.3.2 3., 5., 7. harmoniklerin azaltılması için elde edilen sonuçlar

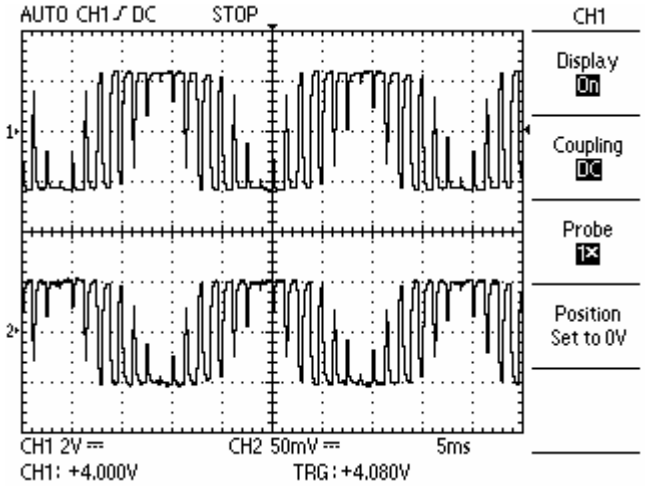
Tablo 6.12, Tablo 6.13, N= 64 Walsh fonksiyonları alt aralıkları için sırası ile R = 22 Ω ve 2.5mH filtre bobin yükünde ve R=22 Ω, L= 149 mH ve 2.5mH filtre bobin yükünde elde edilen çıkış gerilimi harmonik yüzdeleri ve genlik değerleri gösterilmektedir. Şekil 6.22 ve Şekil 6.24' de aynı şartlarda harmonik spektrumları ve Şekil 6.23 ve Şekil 6.25' de de çıkış dalga şekilleri gösterilmektedir.

Tablo 6.13: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,09	32	0,24	0	0,07	32	0,19
1	100	33	7,87	1	79,28	33	6,24
2	0,03	34	0,18	2	0,02	34	0,14
3	3,53	35	0,28	3	2,8	35	0,22
4	0,04	36	0,19	4	0,03	36	0,15
5	1,12	37	2,76	5	0,89	37	2,19
6	0,07	38	0,18	6	0,06	38	0,14
7	0,64	39	6,56	7	0,51	39	5,2
8	0,05	40	0,17	8	0,04	40	0,14
9	0,23	41	7,76	9	0,18	41	6,15
10	0,25	42	0,23	10	0,2	42	0,18
11	7,77	43	4,11	11	6,16	43	3,25
12	0,21	44	0,19	12	0,17	44	0,15
13	38,67	45	3,27	13	30,66	45	2,6
14	0,09	46	0,2	14	0,07	46	0,16
15	54,06	47	9,94	15	42,86	47	7,88
16	0,46	48	0,14	16	0,36	48	0,11
17	19,03	49	3,76	17	15,09	49	2,98
18	0,16	50	0,27	18	0,12	50	0,21
19	0,52	51	3,66	19	0,41	51	2,9
20	0,01	52	0,07	20	0,01	52	0,05
21	0,18	53	4,84	21	0,14	53	3,83
22	0,07	54	0,23	22	0,05	54	0,18
23	1,99	55	3,08	23	1,58	55	2,45
24	0,22	56	0,21	24	0,18	56	0,17
25	8,48	57	5,04	25	6,72	57	4
26	0,07	58	0,21	26	0,06	58	0,17
27	17,76	59	0,79	27	14,08	59	0,62
28	0,22	60	0,29	28	0,18	60	0,23
29	2,19	61	3,6	29	1,73	61	2,86
30	0,15	62	0,3	30	0,12	62	0,24
31	19,6	63	7,75	31	15,54	63	6,14
		THB	78,07				



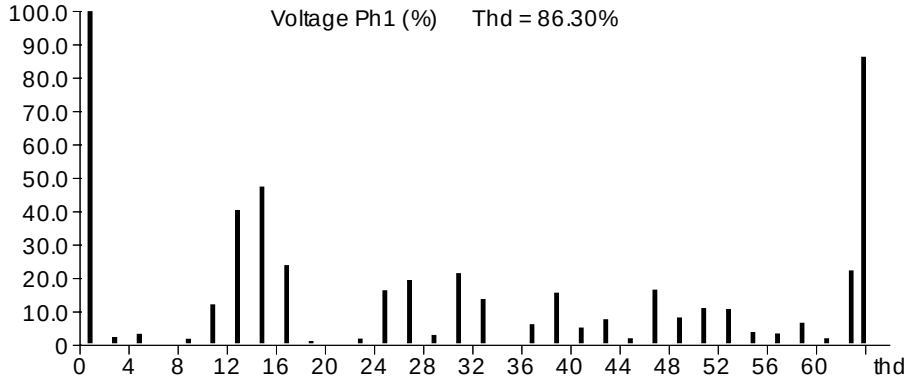
Şekil 6.22: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)



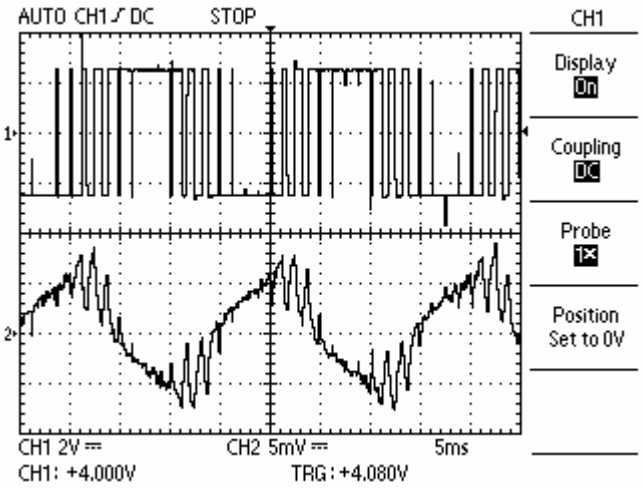
Şekil 6.23: R=22 Ω, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.14: R=22 Ω, L=149 mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik değerleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)

H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (%)	H.S.	U1 (V)	H.S.	U1 (V)
0	0,05	32	0,11	0	0,04	32	0,1
1	100	33	13,72	1	93,17	33	12,79
2	0,11	34	0,09	2	0,1	34	0,08
3	2,41	35	0,46	3	2,25	35	0,43
4	0,11	36	0,07	4	0,1	36	0,07
5	3,33	37	6,21	5	3,1	37	5,79
6	0,06	38	0,04	6	0,06	38	0,04
7	0,23	39	15,68	7	0,22	39	14,61
8	0,12	40	0,06	8	0,11	40	0,05
9	1,84	41	5,12	9	1,72	41	4,77
10	0,09	42	0,04	10	0,09	42	0,04
11	12,16	43	7,69	11	11,33	43	7,16
12	0,07	44	0,09	12	0,07	44	0,08
13	40,29	45	2	13	37,54	45	1,86
14	0,06	46	0,13	14	0,06	46	0,12
15	47,48	47	16,5	15	44,24	47	15,37
16	0,09	48	0,12	16	0,08	48	0,11
17	23,86	49	8,22	17	22,23	49	7,66
18	0,06	50	0,11	18	0,06	50	0,1
19	1,1	51	11,04	19	1,02	51	10,28
20	0,11	52	0,13	20	0,11	52	0,12
21	0,72	53	10,7	21	0,68	53	9,97
22	0,16	54	0,11	22	0,15	54	0,1
23	1,89	55	3,88	23	1,76	55	3,61
24	0,16	56	0,1	24	0,15	56	0,09
25	16,39	57	3,38	25	15,27	57	3,15
26	0,14	58	0,11	26	0,13	58	0,11
27	19,42	59	6,64	27	18,09	59	6,19
28	0,11	60	0,08	28	0,1	60	0,08
29	2,96	61	1,98	29	2,76	61	1,85
30	0,12	62	0,07	30	0,11	62	0,07
31	21,49	63	22,31	31	20,02	63	20,78
		THB	86,3				



Şekil 6.24: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilimi harmonik spektrumları (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)



Şekil 6.25: R=22 Ω, L=149mH, L_k = 2.5 mH yükü için N=64 aralıkta WFDGA denetimli eviricinin çıkış gerilim (1) ve (2) akım dalga şekilleri (3.,5.,7. harmonik deneysel sonuç)

Tablo 6.15' de 3., 5., 7. tek fazlı bir eviricinin çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerinin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 6.15: 3., 5.,7. Harmoniğin azaltılması için elde edilen deneysel sonuçlar

WFDGA ile Evirici çıkış gerilimi 3., 5., 7. harmonik bileşenlerinin azaltılması								
$V_1 = 1.V_S$					R = 22Ω ,L_k= 2.5mH yükte		R = 22 Ω,L =149 mH,L_k=2.5mH yükte	
N	α_1	α_2	α_3	α_4	THB = % 78.07		THB = % 86.3	
64	13.914°	41.162°	66.528°	89.204°	U (%)	U(V)	U (%)	U(V)
H.S.	3. harmonik bileşeni				3.53	2.8	2.41	2.25
	5. harmonik bileşeni				1.12	0.89	3.33	3.1
	7. harmonik bileşeni				0.64	0.51	0.23	0.22

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde eviriciler, AA motor sürücüler, KGK gibi bir çok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir çok tipte evirici bulunmakla beraber endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen eviriciler değişken darbe genişliğine sahip eviricilerdir. Darbe genişliği ayarlanabilir eviricilerin denetimi en genel şekilde; programlanabilir ayarlanabilir darbe genişliğine sahip eviriciler ve sinüsoidal darbe genişliğine sahip eviriciler olarak sınıflandırılabilir. Bir çok uygulamada sinüsoidal DGA metodu kullanılır. Buna karşın bu denetim şekli değişken sinüsoidal gerilim ve frekans gerektiren sistemlerde mikroişlemci temeline dayanan uygulamalar için uygun değildir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, Walsh fonksiyonları temeline dayanan bir darbe genişlik ayar tekniğidir. Klasik sinüsoidal DGA tekniğinde güç anahtarları için gerekli olan anahtarlama sinyalleri, referans ve taşıyıcı sinyal olmak üzere iki dalga şeklinin karşılaştırılması ile elde edilir. Walsh fonksiyonları tekniğinde, evirici çıkış dalga şekline ait anahtarlama açıları, istenilen temel dalga genliğinde istenen harmoniklerin azaltılmasını sağlamak için uygulanır ve kullanılan bir yöntemdir.

Bu teknikle, tüm tek harmonikleri, üçün katı olan çift harmonikleri ve DGA sinyalinin yapısına bağlı olarak bazı üçün katı olmayan çift harmonikleri azaltmak mümkündür.

Dalga şekline ait anahtarlama açıları ile, çıkış geriliminin harmonik değeri arasında matematiksel olarak bir ilişki vardır. Eğer Fourier metodu kullanılırsa bu ilişki doğrusal ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi zordur. Walsh fonksiyonlarının en büyük avantajı, bu matematiksel ilişkiyi ifade eden denklemleri lineer hale getirmesidir.

Walsh fonksiyonları analizi, fourier serilerinin dijital olarak ifade edilmesidir. Sadece cebirsel işlemler içeren Walsh fonksiyonları, dijital uygulamalar için büyük kolaylık

sağlar. İstenilen doğruluk derecesinde çözüm elde etmek için, Walsh fonksiyonları, tümüyle sentez yapılabilir, analiz edilebilir. Bilinen başlangıç şartlarında anahtarlama açıları için bölgesel çözüm sağlamaktadır.

Bu çalışmada, seçilen harmoniklerin azaltılması için bir DGA eviricide parçalı darbe fonksiyonu olan Walsh fonksiyonları kullanılmıştır. Bu yöntem, mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında belli şartlar kabul edildiğinde; izin verilen birden fazla açı ve verilen bir aralık içinde fourier analizine göre daha kolay ve hızlıdır. Hesaplamaları lineer cebir denklemleri içerir.

Aynı anahtarlama frekanslarına sahip eviriciler DGA ve Walsh Yöntemi ile denetlenerek evirici çıkış gerilimi harmonikleri incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında, örneğin 5. harmoniğin azaltılması durumu için R=22 Ω yükte SDGA yöntemi ile denetlenen evirici çıkış gerilimdeki 5. harmonik bileşeninin değeri %87,99 iken N=16 alt aralıkta Walsh yöntemi ile denetlenen evirici çıkış gerilimndeki 5. harmonik bileşeninin değeri %27,21 olmaktadır.

Walsh fonksiyonları ile N=16 alt aralık için yapılan çözüme göre, N=32 alt aralıkta, daha hassas, istenilen çözüme yakın bir sonuç elde edildiği görülmüştür. Uygulama sonuçlarına bakıldığında, örneğin R= 22 Ω yükte, N= 16 alt aralıkta, 5. harmonik bileşeninin genliği, %26,75 iken N= 32 alt aralık için %5,53' e düşmüştür; öyle ki N=64 alt aralıkta yapılan Walsh fonksiyonları analizinde istenilen çözüme en yakın değerler elde edilmiştir; 5. harmoniğin genlik değeri %1,9' a düşmüştür. Bu değer, IEEE Std 519-1992 gerilim harmonik sınırlarının, kabul edilen gerilim bozulma sınırı %5' in altındadır.

Bu çalışmada ayrıca yarım köprü tek fazlı evirici çıkış geriliminin istenen 3., 5. ve 7. harmonik bileşenlerinin azaltılması için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre örneğin, R= 22, L= 149 mH yükü için 3. harmonik bileşeninin gerilim değeri %2,41, 5. harmonik bileşeninin gerilim değeri %3,33, 7. harmonik bileşeninin gerilim değeri %0,23 ölçülmüştür. Bu değerler, IEEE standartlarına göre kabul edilen gerilim bozulma sınırı %5' in altındadır.

Bu çalışmada, gerçekleştirilen sayısal denetime ait tüm sinyaller, PIC serisinin en yaygın kullanılan ve en temeli olan PIC16F84 ile PIC assembly programlama dili yardımı ile yazılan programla denetim sinyalleri elde edilebilmiştir. Bu uygulama için bu mikrodenetleyicinin kullanılması maliyeti önemli ölçüde azaltmıştır.

Bu denetleyicinin kullanım amacı, çok fonksiyonlu lojik uygulamalarının hızlı ve ucuz bir denetleyici ile yazılım yoluyla karşılanmasını sağlamaktadır. Bu denetleyici 8031 ve 8051 ailesine göre fiyat, çevre birimleri, kolay programlama ve kullanım esnekliği gibi üstün özelliklere sahiptir. PIC16F84 ailesi daha az dış eleman kullanımına imkan verecek özeliklere sahiptir ve böylece maliyet azalmakta, sistemin güvenilirliği artmakta, enerji sarfiyatı azalmaktadır.

Bu çalışmada evirici anahtarlama sinyalleri arasındaki ölü zaman gecikmesi PIC mikrodenetleyici entegresine yazılan programla gerçekleştirilebilir olmasına rağmen, 74HC123 entegresi ile donanımsal olarak sağlanmaktadır. Ölü zaman gecikmesinin bu şekilde elde edilmesi denetim sürecini daha güvenilir ve daha hızlı hale getirmektedir.

Sabit yükteki evirici uygulamalarında harmoniklerin azaltılması için aktif güç filtreleri yerine Walsh fonksiyonlarıyla darbe genişliği ayarlanan eviriciler tercih edilmelidir.

Düşük anahtarlama frekanslarında, sinüsoidal darbe genişlik ayarı yapılan eviriciler yerine Walsh fonksiyonlarıyla darbe genişlik ayarı yapılan eviriciler kullanılmalıdır.

Harmoniklerin azaltılması için kullanılan pasif filtre düzenekleri, maliyeti arttıracağından düşük dereceli harmoniklerin azaltılmasında Walsh fonksiyonları kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Beauchamp K.G., ”Walsh Functions and Their Applications” , ***London New York Sanfrancisco,*** 1-26, (1975).

2. Kılıç, F., “PWM Kontrollü Sincap Kafesli Bir Asenkron Motorun Dinamik Davranışı ve Simülasyonu”, Yük. Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, 47-60, (2003).

3. Yetkin, M., “Mikroişlemci Kontrollü Kesintisiz Güç Kaynağı”, Bitirme Tezi, ***İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü***, İstanbul, 25-29, (1991).

4. Doğru Bolat, E., “Kesintisiz Güç Kaynakları İçin Sayısal Tabanlı Evirici Denetimi”, Doktora Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, 9,16,20-25,50-57, (2005).

5. Harunur Rashıd Muhammad., ”Power Electronics Circuits, Devices, and Applications” ***Prentice-Hail, Englewood Cliffs,*** 226-229,239,240 (1988).

6. Karabağ, Y., “Bir Fazlı Eviricilerin Bulanık Mantık ile Denetimi”, Doktora Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, 28, 29, (2004).

7. Gürdal, O., ”Güç Elektroniği”, ***Nobel Yayın Dağıtım, Ankara,*** (2000).

8. Sankaran, C., “Power Quality”, ***Boca Raton London New York Washington, D.C.,*** 83, (2001).

9. İnce, M.C., Gürsu, B., “Eviricilerin Harmonik Eleminasyonunda Optimum Anahtarlama Açılarının Genetik Algoritmalar ile Elde Edilmesi”, ***Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi Elk.-Elektronik Bölümü Fen ve Mühendislik Dergisi 17(2) ,*** 224-226, (2005).

10. Kolektif, “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, ***Birsen Yayınevi***, 7-1,2,3, (2003).

11. Yeğin, M., “Güç Sistem Harmonikleri Analizi”, Y. Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, 66, (1996).

12. Jacoby, PhD Benjamin, “Walsh Functions: A Digital Fourier Series”, ***American Journal of Match,*** 65, (1973).

13. Lıang, T. J., Hoft, R. G., “Walsh Function Method of Harmonic Elemination”, ***Power Electronics Research Center, IEEE APEC Conf. Rec,*** 847-853, (1993).

14. Nazarzadeh, J., Razzaghı, M., Nıkravesh, K. Y., "Harmonic Elemination in Pulse-width Modulated Inverters Using Piecewise Constant Orthogonal Functions", ***Electric Power System Research 40***, 45-49, (1997)

15. Valens, C., "The Hadamard Transform", (1999-2003).

16. Lıang, T. J., O'connell, M. Robert, Hoft, R. G., "Inverter Harmonic Reduction Using Walsh Function Harmonic Elimination Method", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 971-981, (1997)

17. Radoı, C., Drogoreanu, V., Lazarescu, V., "PWM Inverter Based on Walsh Functions", ***IEEE Applied Electronics Department***, 1238, (1996)

18. Abut, N., " Güç Elektroniği" , ***Kocaeli Üniversitesi Müh. Fakültesi Elektrik Müh. Bölümü,*** Kocaeli, 323,324, (2001).

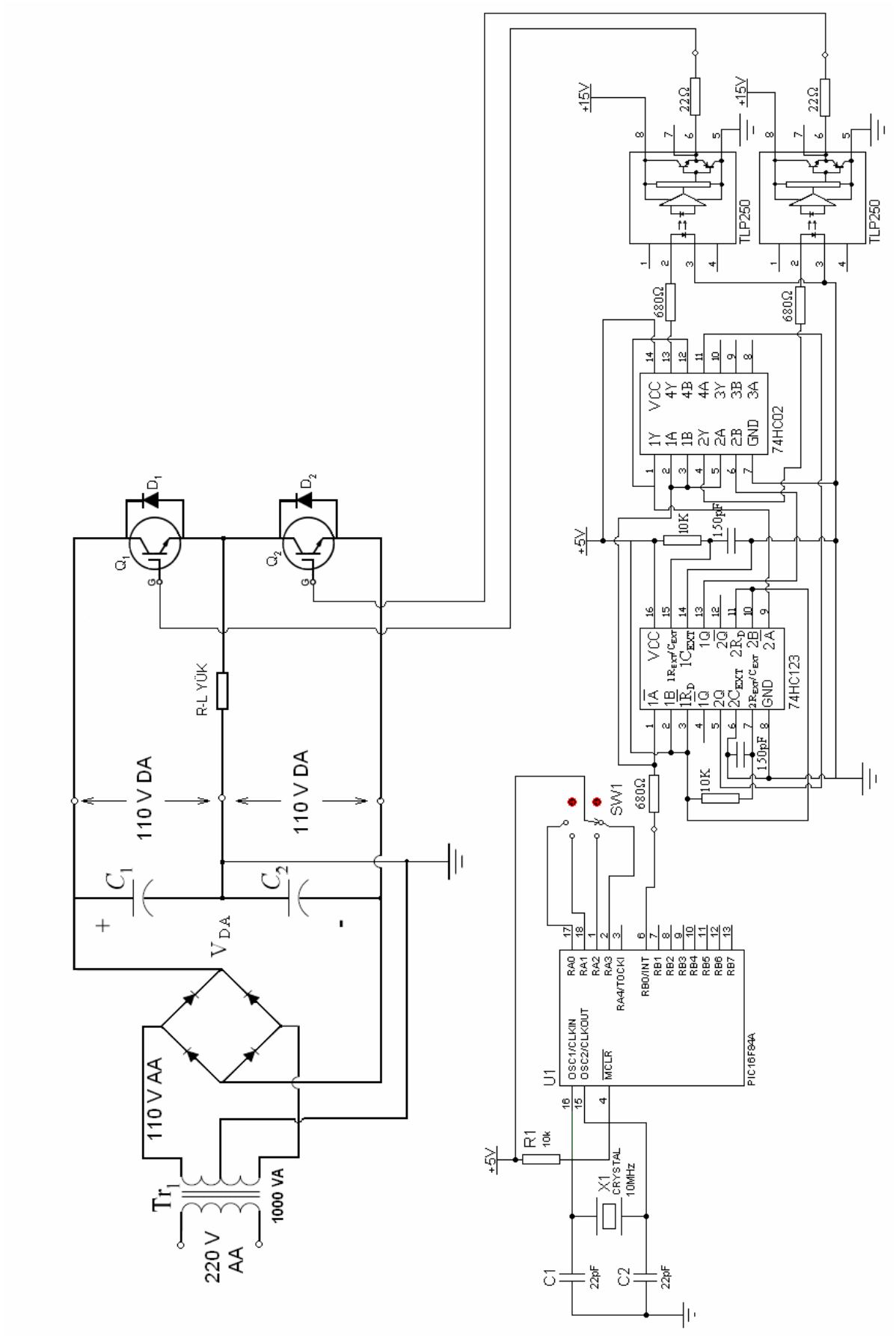
19. Ateeq, Amin M.A Bin., Alamoud, A.R.M., "Hardware Realization of Walsh Functions and Their Applications Using VHDL and Reconfigurable Logic", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 58-61, (2002)

20. Zheng, Chunfang, Zhang, Bo, Qıu, Dongyuan "Solving Switching Angles for the Inverter's Selected Harmonic Elemination Tecnique with Walsh Function", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 1366-1370, (2004)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

AYDEMİR, S., SEZEN, S. and ERTUNÇ, H. M., "Fuzzy Logic Speed Control of a DC Motor", ***The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2004),*** Xian, China, pp. 766-771, (2004)

EK-1:Tüm Devre Şeması



EK-2: PIC16F84A Mikrodenetleyici Entegresi için Yazılan Program

```
;#include "P16F84A.INC"

_CP_OFF      equ H'3FFF'                    ;code protect off
_PWRTE_ONequ H'3FFF'                        ;power on timer on
_WDT_OFF   equ H'3FFB'                      ;watch dog timer off
_HS_OSC      equ H'3FFE'                    ;crystal oscillator

__CONFIG _CP_OFF & _WDT_OFF & _HS_OSC & _PWRTE_ON

status  equ 03h
porta   equ 05h
portb   equ 06h
trisa    equ 85h
trisb    equ 86h

RP0             equ 05

                list p=16F84A

page1  macro
                bsf status,RP0
                endm

page0  macro
                bcf status,RP0
                endm
init
                page1
                movlw B'11111'
                movwf trisa
                banksel trisb
                movlw B'11111100'
                movwf trisb
                page0

                banksel porta
                movlw 0
                movwf porta
                movwf portb
```

```
;////////////////////////////////////////////////////////
;>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Ana Program <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<
;////////////////////////////////////////////////////////

start
        cblock H'0C'
        d1
        d2
        endc

loop
        BTFSC porta, 0
        goto main16             ;main16

        BTFSC porta, 1
        goto main32             ;main32

        BTFSC porta, 2
        goto main64             ;main64

        BTFSC porta, 3
        goto main3h64           ;main3h64

        goto loop

;////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
main16

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay1

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay2

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay3

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay4

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay5

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay1

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay2

        bcf portb,0     ;OFF
```

```
        CALL delay3

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay4

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay5

        goto loop

;>>>>>>>>>>>> delay = 0.0010088 seconds = 2522 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay1
                        ;2518 cycles
        movlw 0xF7
        movwf d1
        movlw 0x02
        movwf d2
Delay_1
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_1
                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>delay = 0.0011396 seconds = 2849 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay2
                        ;2843 cycles
        movlw 0x38
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_2
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_2

                        ;2 cycles
        goto    $+1
                        ;4 cycles (including call)

        return
```

```
;>>>>>>>>>>> delay = 0.0057036 seconds = 14259 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay3
                        ;14253 cycles
        movlw 0x22
        movwf d1
        movlw 0x0C
        movwf d2
Delay_3
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_3

                        ;2 cycles
        goto    $+1
                        ;4 cycles (including call)
        return
;>>>>>>>>>>>>> delay = 0.00114 seconds = 2850 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay4
                        ;2843 cycles
        movlw 0x38
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_4
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_4

                        ;3 cycles
        goto    $+1
        nop
                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>> delay = 0.001008 seconds = 2520 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay5
                        ;2513 cycles
        movlw 0xF6
        movwf d1
        movlw 0x02
        movwf d2
Delay_5
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
```

```
        goto    Delay_5

                        ;3 cycles
        goto    $+1
        nop
                        ;4 cycles (including call)

        return

;//////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

main32

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay12

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay22

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay32

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay22

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay12

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay12

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay22

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay32

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay22

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay12

        goto loop
;>>>>>>>>>>>>>> delay = 0.00125 seconds = 3125 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay12
                        ;3118 cycles
        movlw 0x6F
        movwf d1
```

```
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_12
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_12

                ;3 cycles
        goto    $+1
        nop

                ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>>> delay = 0.00103 seconds = 2575 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay22
                ;2568 cycles
        movlw 0x01
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_22
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_22

                ;3 cycles
        goto    $+1
        nop

                ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>> delay = 0.00544 seconds = 13600 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay32
                ;13593 cycles
        movlw 0x9E
        movwf d1
        movlw 0x0B
        movwf d2
Delay_32
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_32
```

```
                        ;3 cycles
        goto    $+1
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

main64

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay13

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay23

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay33

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay23

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay13

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay13

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay23

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay33

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay23

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay13

        goto loop

;>>>>>>>>>>>>> delay = 0.0012068 seconds = 3017 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay13
                        ;3013 cycles
        movlw 0x5A
        movwf d1
        movlw 0x03
```

```
        movwf d2
Delay_13
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_13

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>> delay = 0.0010412 seconds = 2603 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay23
                        ;2598 cycles
        movlw 0x07
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_23
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_23

                        ;1 cycle
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>> delay = 0.0055048 seconds = 13762 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay33
                        ;13758 cycles
        movlw 0xBF
        movwf d1
        movlw 0x0B
        movwf d2
Delay_33
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_33

                        ;4 cycles (including call)
        return
```

```
;/////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
main3h64

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay11

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay21

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay31

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay41

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay51

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay61

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay71

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay81

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay71

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay61

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay51

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay41

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay31

        bcf portb,0     ;OFF
        CALL delay21

        bsf portb,0     ;ON
        CALL delay11
```

```
bcf portb,0     ;OFF
CALL delay11

bsf portb,0     ;ON
CALL delay21

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay31

bsf portb,0     ;ON
CALL delay41

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay51

bsf portb,0     ;ON
CALL delay61

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay71

bsf portb,0     ;ON
CALL delay81

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay71

bsf portb,0     ;ON
CALL delay61

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay51

bsf portb,0     ;ON
CALL delay41

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay31

bsf portb,0     ;ON
CALL delay21

bcf portb,0     ;OFF
CALL delay11


goto loop
```

```
;>>>>>>>>>>>> delay = 0.0007732 seconds = 1933 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay11
                        ;1928 cycles
        movlw 0x81
        movwf d1
        movlw 0x02
        movwf d2
Delay_11
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_11

                        ;1 cycle
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>delay = 0.0004772 seconds = 1193 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay21
                        ;1188 cycles
        movlw 0xED
        movwf d1
        movlw 0x01
        movwf d2
Delay_21
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_21

                        ;1 cycle
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>> delay = 0.0010368 seconds = 2592 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay31
                        ;2588 cycles
        movlw 0x05
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_31
```

```
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_31

                        ;4 cycles (including call)
        return
;>>>>>>>>>>>> delay = 0.0002132 seconds = 533 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay41
                        ;529 cycles
        movlw 0xB0
        movwf d1
Delay_41
        decfsz  d1, f
        goto    Delay_41

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>delay = 0.001192 seconds = 2980 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay51
                        ;2973 cycles
        movlw 0x52
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_51
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_51

                        ;3 cycles
        goto    $+1
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>>> delay = 5.8e-005 seconds = 145 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay61
                        ;139 cycles
        movlw 0x2E
        movwf d1
Delay_61
        decfsz  d1, f
        goto    Delay_61
```

```
                        ;2 cycles
        goto    $+1

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>delay = 0.0012452 seconds = 3113 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<

delay71
                        ;3108 cycles
        movlw 0x6D
        movwf d1
        movlw 0x03
        movwf d2
Delay_71
        decfsz  d1, f
        goto    $+2
        decfsz  d2, f
        goto    Delay_71

                        ;1 cycle
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

;>>>>>>>>>>>>delay = 1.08e-005 seconds = 27 cycles <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<
delay81
                        ;22 cycles
        movlw 0x07
        movwf d1
Delay_81
        decfsz  d1, f
        goto    Delay_81

                        ;1 cycle
        nop

                        ;4 cycles (including call)
        return

   END

        ;End of code
```

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kocaeli' de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli' de tamamladı. 1999 yılında Kocaeli 19 Mayıs Lisesi Fen Blimleri Bölümü'nden mezun oldu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. A.B.D.'da Yüksek Lisans eğitimine başladı.

Şu anda özel bir şirkette proje mühendisi olarak görev yapmaktadır.