

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**3-FAZLI 4-TELLİ SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ DÜZELTİMİ  
İÇİN BİRLEŞİK SERİ-PARALEL AKTİF FİLTRE TASARIMI  
DENETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet UÇAR**

**Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şule ÖZDEMİR**

**KOCAELİ, 2010**

**3-FAZLI 4-TELLİ SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ DÜZELTİMİ  
İÇİN BİRLEŞİK SERİ-PARALEL AKTİF FİLTRE TASARIMI  
DENETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet UÇAR**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 Kasım 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 07 Aralık 2010**

**Tez Danışmanı**

**Yrd. Doç. Dr. Şule ÖZDEMİR**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Ethem KÖKLÜKAYA**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Bekir ÇAKIR**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. M. Hadi SARUL**

(.....)

**Üye**

**Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR**

(.....)

**KOCAELİ, 2010**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Elektrik güç sistemlerinde, doğrusal olmayan yüklerin ve modern güç elektroniği dönüştürücülerinin yaygın kullanımıyla hem sinüzoidal hem de periyodik olmayan akımlar ve gerilimler artmakta, dolayısıyla güç kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Elektrik güç dağıtım sistemleri ve hassas endüstriyel yükler, gerilim çökmesi, harmonik, dengesizlik, reaktif güç ve diğer bozulmaların neden olduğu güç kalitesi problemlerinden oldukça etkilenmektedir. Özellikle yapısında elektronik donanım barındıran cihazlar, hatasız ve arızasız çalışabilmek için kaliteli elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır.

Güç kalitesi problemleri için geçerli ve tek bir çözüm yoktur. Ayrıca bu çözümler kesin ve güvenilir olmalıdır. Bu amaçla günümüzde güç kalitesinin iyileştirilmesi, güvenilirlik ve enerji verimliliğinin artırılması için modern aktif filtreleme tekniklerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 3-fazlı 4-telli elektrik güç sistemlerindeki hem sinüzoidal hem de periyodik olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının kompanzasyonu için 3-faz 3-kollu 4-telli ve 3-faz 4-kollu 4-telli birleşik seri-paralel aktif filtre sistemlerinin tasarımı, denetim yöntemlerinin geliştirilmesi ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, 108E083 sayılı TÜBİTAK Araştırma Projesi ve Kocaeli Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Tez çalışmalarım süresince öneri ve desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Şule ÖZDEMİR'e, tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a ve sayın Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Destek ve önerileri ile yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Metin KESLER'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince sevgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, gösterdiği sabırdan dolayı teşekkürlerimi sunmayı bir borç bildiğim sevgili eşim İkrime ORKAN UÇAR'a ithaf olunur.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER .....	x
ÖZET .....	xiii
İNGİLİZCE ÖZET .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Elektrik Güç Kalitesi .....	2
1.2. Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması .....	3
1.2.1. Geçici olaylar .....	5
1.2.2. Kısa süreli değişimler .....	5
1.2.3. Uzun süreli değişimler .....	7
1.2.4. Gerilim dengesizliği .....	8
1.2.5. Dalga şekli bozulmaları .....	9
1.2.6. Gerilim dalgalanması .....	14
1.2.7. Frekans değişimleri .....	14
1.2.8. Periyodik olmayan bozulmalar .....	15
1.3. Güç Kalitesinin Etkileri .....	16
1.4. Güç Kalitesi ile İlgili Standartlar ve Yasal Düzenlemeler .....	19
1.5. Literatür Araştırması .....	21
1.6. Tezin Amacı ve Önemi .....	26
2. BİRLEŞİK SERİ-PARALEL AKTİF FİLTRE SİSTEMLERİ .....	28
2.1. BSPAF Sisteminin Sürekli Hal Güç Analizi .....	32
3. GENELLEŞTİRİLMİŞ AKTİF OLMAYAN GÜÇ TEORİSİ .....	38
3.1. Aktif Olmayan Güç Teorileri .....	38
3.2. Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi .....	43
4. 3-FAZ 3-KOLLU 4-TELLİ BSPAF SİSTEMİ .....	48
4.1. Denetim Tekniği .....	48
4.1.1. SAF denetim tekniği .....	48
4.1.2. PAF denetim tekniği .....	51
4.2. Simülasyon Sonuçları .....	53
4.2.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	54
4.2.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	56
4.2.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	58
4.2.4. Alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu .....	60
4.2.5. Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu .....	61
4.3. Test Platformunun Kurulması .....	64
4.3.1. Kaynak ve yük karakteristiği .....	68
4.3.2. Tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici .....	74

4.3.3. Tek-faz seri transformatör.....	78
4.3.4. Güç devresi .....	78
4.3.5. Akım ve gerilim ölçüm kartı.....	79
4.3.6. Sinyal koşullandırma arabirim kartları.....	81
4.3.7. DA gerilim ölçüm kartı .....	81
4.3.8. IGBT sürücü kartları .....	82
4.3.9. Aşırı akım ve gerilim koruma kartı.....	84
4.3.10. Besleme devre kartı.....	85
4.3.11. DSPACE tabanlı gerçek zamanlı denetim sistemi.....	86
4.4. Deneysel Sonuçlar.....	95
4.4.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	96
4.4.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	99
4.4.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	103
5. 3-FAZ 4-KOLLU 4-TELLİ BSPAF SİSTEMİ.....	108
5.1. Denetim Tekniği .....	109
5.1.1. SAF denetim tekniği .....	109
5.1.2. PAF denetim tekniği .....	112
5.2. Simülasyon Sonuçları.....	113
5.2.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	114
5.2.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	116
5.2.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	118
5.2.4. Alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu.....	120
5.2.5. Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu .....	121
5.3. Test Platformunun Kurulması .....	123
5.3.1. Güç devresi .....	127
5.3.2. IGBT sürücü kartı .....	127
5.3.3. DSPACE tabanlı gerçek zamanlı denetim sistemi.....	128
5.4. Deneysel Sonuçlar.....	130
5.4.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu .....	130
5.4.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	134
5.4.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	138
5.5. Ultra-Kapasitör Enerji Depolama Sistemi .....	142
5.5.1. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu.....	148
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	153
KAYNAKLAR .....	158
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	169
ÖZGEÇMİŞ .....	170

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: a) Anlık geçici olay b) salınımlı geçici olay .....	5
Şekil 1.2: Anlık gerilim çökmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri.....	6
Şekil 1.3: Anlık gerilim yükselmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri.....	6
Şekil 1.4: a) Çok kısa süreli gerilim kesintisi b) geçici gerilim kesintisi.....	7
Şekil 1.5: Sürekli gerilim kesintisi dalga şekli.....	8
Şekil 1.6: 3-faz dengesiz gerilim dalga şekilleri .....	9
Şekil 1.7: Doğrusal olmayan yüklerin olduğu şebeke sistemi tek hat şeması.....	11
Şekil 1.8: a) Harmonikli gerilim dalga şekli b) harmonik dağılım .....	11
Şekil 1.9: Harmonik ve ara harmonik bileşen içeren periyodik olmayan dalga şekli .....	12
Şekil 1.10: a) 3'ün tek katı harmonik yük akımlarının nötr iletkeninde toplanması b) tek-fazlı doğrusal olmayan yüklerin faz akımları ve nötr akım dalga şekli.....	13
Şekil 1.11: Gerilim dalga şekli bozulması a) çentik b) gürültü.....	13
Şekil 1.12: Gerilim dalgalanması .....	14
Şekil 1.13: ITIC (CBMA) eğrisi .....	17
Şekil 2.1: a) PAF b) SAF temel blok diyagramları.....	29
Şekil 2.2: BSPAF sistemi blok diyagramı .....	29
Şekil 2.3: 3-faz 3-telli BSPAF sistemi yapısı .....	30
Şekil 2.4: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı .....	31
Şekil 2.5: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı .....	31
Şekil 2.6: BSPAF sisteminin eşdeğer devresi .....	32
Şekil 2.7: Gerilim çökmesi durumunda aktif güç akışı.....	35
Şekil 2.8: Gerilim yükselmesi durumunda aktif güç akışı.....	35
Şekil 2.9: Fazör gösterim a) kompanzasyon devre dışı b) reaktif güç kompanzasyonu c) gerilim çökmesi d) gerilim yükselmesi.....	36
Şekil 4.1: SAF denetim blok diyagramı.....	48
Şekil 4.2: Pozitif sıra detektör blok diyagramı .....	49
Şekil 4.3: Sinüzoidal yük gerilimi hesaplama blok diyagramı .....	50
Şekil 4.4: Geliştirilmiş SDGM blok diyagramı .....	51
Şekil 4.5: PAF denetim blok diyagramı.....	52
Şekil 4.6: Histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı.....	53
Şekil 4.7: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi Matlab/Simulink blok diyagramı.....	54
Şekil 4.8: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	55
Şekil 4.9: Kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	57
Şekil 4.10: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	59
Şekil 4.11: Alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları....	61
Şekil 4.12: Stokastik periyodik olmayan akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	63

Şekil 4.13: 3-kollu 4-telli BSPAF güç sistemi blok diyagramı.....	65
Şekil 4.14: 3-kollu 4-telli BSPAF denetim sistemi blok diyagramı .....	66
Şekil 4.15: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü.....	67
Şekil 4.16: BSPAF sistemi kademeli besleme trafosu.....	68
Şekil 4.17: Gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafları a) Tek-faz diyotlu doğrultucu b) 3-faz diyotlu doğrultucu c) 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu.....	69
Şekil 4.18: Tek-faz ve 3-faz doğrultucuların çıkışına bağlanan yük dirençleri fotoğrafı.....	70
Şekil 4.19: a) Tektronix DPO 3054 4-kanallı 500 MHz osiloskop, b) Fluke 434 güç kalite analizörü, c) Pintek DP25 diferansiyel prob ve Fluke 80i10s akım ölçüm problemleri.....	70
Şekil 4.20: $RL$ yüklü 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu deneysel dalga şekilleri.....	71
Şekil 4.21: $RC$ yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu deneysel dalga şekilleri.....	72
Şekil 4.22: $RC$ yüklü tek-faz diyotlu doğrultucu deneysel dalga şekilleri.....	73
Şekil 4.23: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici güç devresi .....	75
Şekil 4.24: a) Gerilim çökmesi başlatmak ve b) sonlandırmak için denetim devresi sayısal işaretleri .....	75
Şekil 4.25: Gerçeklenen çökme üreticinin denetim devresi akış diyagramı a) ana program b) 2,5 ms zamanlayıcı c) 12,5 ms zamanlayıcı .....	76
Şekil 4.26: a) Gerçekleştirilen tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici fotoğrafı b) gerilim çökmesi üreticinin besleme transformatörüne bağlantısı .....	77
Şekil 4.27: Tek-faz %50 değerinde kaynak gerilim çökmesi başlangıcı ve sonlandırılması dalga şekli .....	77
Şekil 4.28: Tek-fazlı seri transformatör fotoğrafı .....	78
Şekil 4.29: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç devresi fotoğrafı .....	79
Şekil 4.30: Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması.....	80
Şekil 4.31: Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması .....	80
Şekil 4.32: Gerçekleştirilen akım (alt kat) ve gerilim (üst kat) ölçüm kartı fotoğrafı a) ön görünüşü b) yan görünüşü.....	80
Şekil 4.33: Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı.....	81
Şekil 4.34: Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı .....	81
Şekil 4.35: Gerçekleştirilen akım (alt kat) ve gerilim (üst kat) sinyal koşullandırma arabirim kartı fotoğrafı a) üst görünüş, b) yan görünüş .....	81
Şekil 4.36: AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması .....	82
Şekil 4.37: Gerçekleştirilen DA gerilim ölçüm kartı fotoğrafı .....	82
Şekil 4.38: IGBT sürücü yarım köprü modu devre bağlantı şeması .....	83
Şekil 4.39: IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri.....	83
Şekil 4.40: Gerçekleştirilen 6-kanal IGBT sürücü kartları fotoğrafı .....	84
Şekil 4.41: Aşırı akım ve gerilim koruma kartı blok diyagramı .....	84
Şekil 4.42: Gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı fotoğrafı .....	85
Şekil 4.43: Gerçekleştirilen besleme devre kartı fotoğrafı.....	85
Şekil 4.44: DSPACE ile tipik bir sürecin geliştirilmesi döngüsü blok diyagramı .....	87
Şekil 4.45: DSPACE gerçek zamanlı kontrol sistemi bileşenleri .....	87
Şekil 4.46: DS1103 PowerPC 750 GX kartının mimari yapısı.....	88
Şekil 4.47: DSPACE ControlDesk ortamı .....	90
Şekil 4.48: DS1103 ana işlemci RTI blokları .....	90

Şekil 4.49: DSPACE sistemi konfigürasyonu.....	91
Şekil 4.50: Laboratuvarda kurulan dSPACE sistemi fotoğrafı .....	92
Şekil 4.51: DSPACE/RTI ADC blok özellikleri.....	93
Şekil 4.52: DSPACE/RTI sayısal çıkış blok özellikleri.....	93
Şekil 4.53: 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan gerçek zamanlı denetim blok diyagramı .....	94
Şekil 4.54: ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı arayüzü.....	95
Şekil 4.55: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	97
Şekil 4.56: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı.....	98
Şekil 4.57: Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	101
Şekil 4.58: Yük gerilimi $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	102
Şekil 4.59: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	102
Şekil 4.60: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	105
Şekil 4.61: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	105
Şekil 5.1: SAF denetim blok diyagramı .....	109
Şekil 5.2: Taşıyıcı tabanlı 3B-UVM blok diyagramı .....	110
Şekil 5.3: PAF akım denetim blok diyagramı .....	112
Şekil 5.4: Histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı.....	113
Şekil 5.5: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi Matlab/Simulink blok diyagramı ...	114
Şekil 5.6: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları .....	115
Şekil 5.7: Kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	117
Şekil 5.8: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları .....	119
Şekil 5.9: Alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları....	120
Şekil 5.10: Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu simülasyon sonuçları.....	122
Şekil 5.11: 4-kollu 4-telli BSPAF güç sistemi blok diyagramı.....	124
Şekil 5.12: 4-kollu 4-telli BSPAF denetim sistemi blok diyagramı.....	125
Şekil 5.13: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü .....	126
Şekil 5.14: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç devresi fotoğrafı .....	127
Şekil 5.15: Gerçekleştirilen 2-kanal IGBT sürücü kartı fotoğrafları .....	128
Şekil 5.16: 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan gerçek zamanlı denetim blok diyagramı .....	129
Şekil 5.17: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	132
Şekil 5.18: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	133
Şekil 5.19: Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	136
Şekil 5.20: Yük gerilimi $b$ -fazı harmonik dağılımı .....	137
Şekil 5.21: Kaynak akımı $b$ -fazı harmonik dağılımı .....	137
Şekil 5.22: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	140



Şekil 5.23: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	140
Şekil 5.24: a) 58 F kapasitesi ile 15 V ultra-kapasitör paketi b), c) ultra-kapasitör paketlerinin delikli sac levhaya montaj görünüşleri.....	145
Şekil 5.25: Paketlenmiş 450V 1,93F kapasiteli ultra-kapasitör bankasının a) ön ve b) yan görünüşleri .....	146
Şekil 5.26: Ultra-kapasitör bankasının şarj sırasındaki akım ve gerilim eğrileri.....	146
Şekil 5.27: Ultra-kapasitör ile 4-kollu 4-telli BSPAF güç sistemi blok diyagramı .	147
Şekil 5.28: Ultra-kapasitör ile 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı .....	148
Şekil 5.29: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları .....	150
Şekil 5.30: Kaynak akımı $a$ -fazı harmonik dağılımı .....	151

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: Güç sistemindeki elektromanyetik olayların kategorileri ve karakteristikleri .....	4
Tablo 1.2: Dalga şekillerinin frekans (spektral) bileşenleri .....	12
Tablo 1.3: Harmonik ve ara harmonik bileşenleri .....	12
Tablo 1.4: IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları.....	20
Tablo 1.5: IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları.....	20
Tablo 1.6: Aktif ve reaktif enerji tüketim oranları .....	21
Tablo 2.1: BSPAF sistemini oluşturan SAF ve PAF birimlerinin fonksiyonları.....	30
Tablo 3.1: Zaman bölgesinde aktif olmayan güç teorilerinin karşılaştırılması.....	42
Tablo 3.2: Farklı kompanzasyon amaçları için parametreler.....	47
Tablo 4.1: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	56
Tablo 4.2: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	58
Tablo 4.3: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	58
Tablo 4.4: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	60
Tablo 4.5: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	60
Tablo 4.6: 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri.....	61
Tablo 4.7: 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri .....	62
Tablo 4.8: Kademeli besleme trafosu teknik özellikleri .....	68
Tablo 4.9: Doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri özeti.....	74
Tablo 4.10: Tek-fazlı seri transformatör teknik özellikleri.....	78
Tablo 4.11: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	99
Tablo 4.12: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	102
Tablo 4.13: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	103
Tablo 4.14: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	106
Tablo 4.15: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	106
Tablo 4.16: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi parametreleri .....	107
Tablo 5.1: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	116
Tablo 5.2: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	117
Tablo 5.3: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	118
Tablo 5.4: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	119
Tablo 5.5: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti.....	120
Tablo 5.6: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	134

Tablo 5.7: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	137
Tablo 5.8: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	138
Tablo 5.9: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	141
Tablo 5.10: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	141
Tablo 5.11: Enerji depolama elemanlarının karşılaştırması.....	143
Tablo 5.12: BPAK0058 B01 ultra-kapasitör paketinin teknik zellikleri.....	145
Tablo 5.13: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	151
Tablo 5.14: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti.....	151
Tablo 5.15: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi parametreleri .....	152

## SİMGELER

$C_{da}$	: DA-bara kondansatörü (F)
$C_{PF}$	: PAF filtre kondansatörü (F)
$C_{SF}$	: SAF filtre kondansatörü (F)
$f_a$	: Anahtarlama frekansı (Hz)
$f_K$	: Kaynak frekansı (Hz)
$I_a(t)$	: Aktif akımın etkin değeri (A)
$I_r(t)$	: Referans akımın etkin değeri (A)
$i_a(t)$	: Anlık aktif akım (A)
$i_{a1+}, i_{b1+}, i_{c1+}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı temel pozitif sıralı akım bileşenleri (A)
$i_{ca}(t)$	: Kompanzatorün çektiği anlık aktif akım (A)
$i_{Ka}, i_{Kb}, i_{Kc}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı kaynak akımları (A)
$i_{Kn}$	: Nötr kaynak akımı (A)
$i_n(t)$	: Anlık aktif olmayan akım (A)
$i_{PFa*}, i_{PFb*}, i_{PFc*}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı referans PAF akımları (A)
$i_{PFa}, i_{PFb}, i_{PFc}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı PAF akımları (A)
$i_{PFn*}$	: Nötr referans PAF akımı (A)
$i_r(t)$	: Referans akım (A)
$i_{Ya}, i_{Yb}, i_{Yc}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı yük akımları (A)
$i_{Ya1+}, i_{Yb1+}, i_{Yc1+}$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı temel pozitif sıralı yük akımı bileşenleri (A)
$i_{a\beta}$	: Akımın $\alpha$ - $\beta$ eksenli bileşenleri (A)
$K_v$	: Geri besleme kazancı
$L_{da}$	: DA-bara yük endüktansı (H)
$L_K$	: Kaynak endüktansı (H)
$L_{PF}$	: PAF filtre endüktansı (H)
$L_{SF}$	: SAF filtre endüktansı (H)
$L_Y$	: AA yük endüktansı (H)
$p$	: Anlık gerçek güç (W)
$P$	: Ortalama güç (W)
$p_0$	: Anlık sıfır sıralı güç (W)
$p_a(t)$	: Anlık aktif güç (W)
$P_a(t)$	: Ortalama aktif güç (W)
$q$	: Anlık sanal güç (IVA)
$Q$	: Reaktif Güç (VAR)
$QA, QB, QC$	: $a$ - $b$ - $c$ fazı anahtarlama fonksiyonları
$Q_{PF}$	: PAF anahtarlama sinyalleri
$Q_{SF}$	: SAF anahtarlama sinyalleri
$R_{da}$	: DA-bara yük direnci (R)
$R_{PF}$	: PAF filtre sönümlenme direnci ( $\Omega$ )
$R_{SF}$	: SAF filtre sönümlenme direnci ( $\Omega$ )
$S$	: Görünür Güç (VA)
$t$	: Zaman (s)
$T_c$	: Ortalama zaman aralığı (s)

$V_{1-}$	: Temel negatif sıralı gerilim bileşeni (V)
$V_{1+}$	: Temel pozitif sıralı gerilim bileşeni (V)
$v_a(t)$	: Anlık sinüzoidal gerilim (V)
$V_{am}$	: Anlık sinüzoidal gerilimin genliği (V)
$v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*$	: Faz-nötr referans gerilimleri (V)
$v_{ao}^*, v_{bo}^*, v_{co}^*$	: Faz-nötr çıkış gerilimleri (V)
$v_{da}$	: DA-bara gerilimi (V)
$V_{da}^*$	: Referans DA-bara gerilimi (V)
$v_{dq}$	: Gerilimin $d-q$ eksen bileşenleri (V)
$V_{dqm}$	: Gerilimin $d-q$ eksen bileşenlerinin genliği (V)
$v_K(t)$	: Kaynak gerilimi (V)
$v_{Ka}, v_{Kb}, v_{Kc}$	: $a-b-c$ fazı kaynak gerilimleri (V)
$v_{Ka1+}, v_{Kb1+}, v_{Kc1+}$	: $a-b-c$ fazı temel pozitif sıralı kaynak gerilimleri (V)
$v_{max}^*$	: Faz gerilimlerinin maksimum değeri (V)
$v_{min}^*$	: Faz gerilimlerinin minimum değeri (V)
$v_{no}^*$	: Ortak ofset gerilimi (V)
$v_r(t)$	: Referans gerilim (V)
$V_r(t)$	: Referans gerilimin etkin değeri (V)
$v_{SFA}^*, v_{SFB}^*, v_{SFC}^*$	: $a-b-c$ fazı referans SAF gerilimleri (V)
$v_{SFA}, v_{SFB}, v_{SFC}$	: $a-b-c$ fazı SAF gerilimleri (V)
$V_{Ym}^*$	: Referans yük gerilimi genliği (V)
$v_{\alpha\beta}$	: Gerilimin $\alpha-\beta$ eksen bileşenleri (V)
$Z_K$	: Kaynak empedansı ( $\Omega$ )
$\alpha$	: Tetikleme açısı (derece)
$\omega$	: Açıl hız (rad/s)

## Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
AF	: Aktif Filtre
ADC	: Analog sayısal dönüştürücü (Analog to Digital Converter)
AF	: Aktif Filtre
3B-UVM	: 3-Boyutlu Uzay Vektör Modülasyonu
BSPAF	: Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre
BGKD	: Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi
CBMA	: Computer and Business Equipment Manufacturers Association
DA	: Doğru Akım
DAC	: Sayısal Analog Dönüştürücü (Digital to Analog Converter)
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DSTATCOM	: Dağıtım sistemi statik kompanzatörü (Distributed Static Compensator)
DVR	: Dinamik gerilim iyileştirici (Dynamic Voltage Restorer)
EAF	: Elektrik Ark Fırınları
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FACTS	: Esnek AA iletim sistemleri (Flexible AC Transmission Systems)
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
IEC	: International Electrotechnical Commission

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	: İzole kapılı bipolar transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
ITIC	: Information Technology Industry Council
OBN	: Ortak Bağlantı Noktası
PAF	: Paralel Aktif Filtre
PLL	: Faz kilitlemeli döngü (Phase Locked Loop)
RTW	: Real-Time Workshop
RTI	: Real-Time Interface
SAF	: Seri Aktif Filtre
SSR	: Yarı iletken röle (Solid State Relay)
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
SDGM	: Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
STATCOM	: Statik kompanzatör (Static Synchronous Compensator)
SVC	: Statik var kompanzatörü (Static Var Compensator)

# 3-FAZLI 4-TELLİ SİSTEMLERDE GÜÇ KALİTESİ DÜZELTİMİ İÇİN BİRLEŞİK SERİ-PARALEL AKTİF FİLTRE TASARIMI DENETİMİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

**Mehmet UÇAR**

**Anahtar Kelimeler:** Aktif filtreler, güç kalitesi, reaktif güç, gerilim çökmesi harmonikler, periyodik olmayan dalga şekilleri, dengesizlik, nötr akımı.

**Özet:** Bu tez çalışmasının amacı 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli Birleşik Seri Paralel Aktif Filtre (BSPAF) sistemlerinin tasarımı, denetimi ve gerçekleştirilmesidir. BSPAF sistemi, ortak bir Doğru Akım (DA) barasına bağlı Paralel Aktif Filtre (PAF) ve Seri Aktif Filtre (SAF) olmak üzere iki güç elektroniği biriminden oluşmaktadır. PAF, akım ile ilgili güç kalitesi problemlerini kompanze etmekte ve DA-bara gerilimini regüle etmekte iken SAF, gerilim ile ilgili güç kalitesi problemlerini ortadan kaldırmaktadır.

Genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi, tek-fazlı veya 3-fazlı, sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, periyodik veya periyodik olmayan, dengeli veya dengesiz elektrik sistemlerinde kullanılabilir. Bu teori daha önce PAF denetimi için uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında ise periyodik (fakat sinüzoidal olmayan) veya periyodik olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının yanı sıra kısa süreli gerilim çökmesi, reaktif güç, dengesizlik ve nötr akımı kompanzasyonu amacıyla 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin denetimi için önerilmiştir.

3-fazlı 4-telli sistemlerde güç kalitesi iyileştirilmesi için tasarlanan 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin 5 kVA laboratuvar test platformu kurulmuştur. BSPAF sisteminin gerçek zamanlı denetimi amacıyla dSPACE DS1103 denetleyici kartı kullanılmıştır. Matlab/Simulink ortamında geliştirilen gerçek zamanlı denetim algoritmaları Matlab Real Time Workshop (RTW) ve dSPACE Real-Time Interface (RTI) yazılımları aracılığıyla dSPACE DS1103 denetleyici kartına doğrudan yüklenmiştir. Böylece, geliştirilen denetim algoritmasının uygulamaya geçirilmesi ve doğrulanması hızlandırılmıştır.

Ayrıca, BSPAF sisteminin DA-barasına bağlanan ultra-kapasitör bankası ile şebeke gerilimindeki kısa süreli gerilim çökmesini kompanze etme performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuç olarak, simülasyon çalışmaları yapılan, önerilen genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli BSPAF sistemi denetim yönteminin geçerliliği deneysel olarak gösterilmiştir.

# DESIGN CONTROL AND APPLICATION OF UNIFIED SERIES-PARALLEL ACTIVE FILTER SYSTEM FOR POWER QUALITY CORRECTION IN 3-PHASE 4-WIRE SYSTEMS

**Mehmet UÇAR**

**Keywords:** Active filters, power quality, reactive power, voltage sag, harmonics, non-periodic waveforms, unbalance, neutral current.

**Abstract:** The objective of this thesis study is to design, control and application of the 3-phase 3-leg 4-wire and 4-leg 4-wire Unified Series-Parallel Active Filter (USPAF) systems. The USPAF system is composed from two power electronics units with a common Direct Current (DC) link: Parallel Active Filter (PAF) and Series Active Filter (SAF). The PAF compensates current related power quality problems and regulates the DC-link voltage, while the SAF compensates voltage related power quality problems.

The generalized non-active power theory is applicable to single-phase or multi-phase, sinusoidal or non-sinusoidal, periodic or non-periodic, balanced or unbalanced electrical systems. The theory was implemented previously for the control of the PAF. In this thesis, it is proposed for the control of the 3-phase 3-leg 4-wire and 4-leg 4-wire USPAF systems to compensate the periodic (but non-sinusoidal) or non-periodic current and voltage waveform disturbances as well as short duration voltage sag, reactive power, unbalance and neutral current.

A 5 kVA laboratory test platform of the 3-phase 3-leg 4-wire and 4-leg 4-wire USPAF systems designed for power quality improvement in 3-phase 4-wire power systems was installed. DSPACE DS1103 controller board is used for the real-time control of the USPAF system. The developed real-time control algorithms in Matlab\Simulink platform were downloaded directly to the dSPACE DS1103 controller board using the Matlab Real Time Workshop (RTW) and dSPACE Real-Time Interface (RTI) software. Hence, verification and application of developed control algorithm can be implemented rapidly.

Additionally, the performance to compensate for short duration voltage sag in the utility voltage with the ultra-capacitor bank connected on the DC-link of the USPAF system was investigated experimentally. In conclusion, the performed simulation studies, the validity of the USPAF system control method based on the proposed generalized non-active power theory shown experimentally.



## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, temiz, kullanımı ve kontrolü kolay bir enerji türüdür. Su gücü (hidrolik), rüzgar, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebildiği gibi fosil ya da nükleer yakıtlardan da elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Geleneksel olarak yerleşim yerlerinin uzağında bulunan kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi, kayıpları azaltmak amacıyla yüksek gerilimlere çıkarılmakta, alternatif gerilim şeklinde iletilmekte ve dağıtım noktasında alçak gerilime indirilerek dağıtılmaktadır. Elektrik güç sistemlerinin amacı, elektrik enerjisi üretmek ve son kullanıcıların cihazlarına kadar bu enerjiyi kabul edilebilir bir gerilim şeklinde sunmaktır. Böylece güç kalitesi, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımından farklı seviyelerde etkilenmektedir. Örneğin elektrik enerjisi üretiminde meydana gelen bir arıza, iletim sisteminde hataya neden olmakta ve sonuç olarak dağıtım sistemindeki yükün kaybına yol açmaktadır. Aynı şekilde iletim sisteminde meydana gelen arıza da üretim bileşenlerinde hatalara neden olmakta ve dağıtımda tüketici yükünün güç kaybına yol açmaktadır [1].

Üretimden dağıtıma elektrik enerji şebekesi, jeneratör, transformatör, iletim ve dağıtım hatları ve yüklerden oluşmaktadır. Elektrik enerjisi güç kalitesi kavramı, bu şebeke üzerinde herhangi bir noktada tanımlanabilmesine karşın, genelde kullanıcı ucunda önem kazanmaktadır. Bu nedenle güç kalitesi kullanıcı için besleme noktasında tanımlanmaktadır. Elektrik enerjisi üreten ve hizmet veren kuruluşların önemli sorunluluklarından birisi, Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) enerji tüketen kullanıcılar için üretilen elektrik enerjisinin akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüzoidal formda, istenilen genlik ve frekansta olmasını sağlamaktır. Her ne kadar elektrik enerjisi senkron makineler ile sinüzoidal gerilime yakın biçimde üretilse de bazı istenmeyen ve beklenmeyen geçici gerilim olayları, kısa devre durumları, şebeke trafosunun doymaya girmesi, doğrusal olmayan yükler ve anahtarlamalı güç kaynaklarının şebekeye bağlanması gibi bozucu etkenler de güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. En çok karşılaşılan güç kalitesi problemleri birkaç saniyeden

birkaç saate kadar devam edebilen elektrik kesilmeleri, gerilimin çok düşük değerlere kadar indiği kısa süreli gerilim düşmeleri ve dalgalanmalarıdır. Uzun süreli kesintiler doğal olarak tüm kullanıcıları etkilemekte, kısa süreli kesintiler ise bazı kritik operasyonlar üzerinde son derece olumsuz etkiler oluşturabilmektedir.

### **1.1. Elektrik Güç Kalitesi**

İnsanlığın elektrik enerjisine olan ihtiyacı her geçen gün daha da artmaktadır; ancak bu ihtiyacın sahip olduğumuz sınırlı kaynaklarla karşılanması gittikçe zorlaşmaktadır. Bu nedenle kullandığımız elektriği tasarruflu kullanmanın yanında, kalitesini de arttırmak için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Güç kalitesi ifadesi, güç sistemlerinde oluşan problemlerin tamamını kapsayan genel bir ifade olarak kabul edilmektedir. Farklı sorunları referans alarak farklı güç kalitesi tanımı yapılabilmektedir. Örneğin elektrik enerjisini sağlayan kuruluşlar güç kalitesini güvenilirliği ve kararlılığı açısından değerlendirmekte, yük tarafındaki tüketiciler ise elektrik enerjisinin devamlılığı ve elektrik enerjisinden beslenen cihazların sorunsuz çalışması şeklinde güç kalitesi tanımı yapmaktadır. Eğer elektrik enerjisi bu ihtiyaçları karşılamayacak kadar yetersiz ve sorunlu ise o zaman genel manada güç kalitesinden bahsedilemez [2].

Genel olarak güç kalitesi, elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın kalitesi olarak nitelendirilebilir. Çünkü gerilimdeki sorunlar birçok güç kalitesinin ana sebeplerinden sayılmaktadır. Gerilimdeki anlık yükselmeler, gerilim çökmeleri, uzun ve kısa süreli kesintiler, gerilimdeki harmonikler ve frekans değişimleri gibi sorunlar örnek olarak verilebilir. Aslında gerilim ile akım arasında çok yakın bir ilişki vardır. Doğrusal olmayan bir yükün çektiği doğrusal olmayan akım, kaynak empedansı nedeniyle gerilim üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Bu nedenle güç kalitesi güç sistemlerinde akım ve gerilimin kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda güç kalitesini, gerilim ve akım dalga şekillerinin herhangi bir bozulmaya uğramamış, istenilen frekans ve genlikte olması durumunda temiz enerji olarak tanımlamak da mümkündür [2-4]. Bununla birlikte, bu terim tüketici cihazlarının hatalı çalışması ile sonuçlanan, gerilim, akım veya frekansta görülen sapmalar olarak da tanımlanmaktadır [5].

Güç kalitesi, elektrik şebekesinin güvenilirliği ile ilgili olan bir terimdir. Elektrik dağıtım şirketleri tarafından dağıtılan elektrik kaynağının güvenilirliği, çok sayıda dış etkene bağlı olarak sürekli değişmektedir. Yıldırım düşmesi, büyük güçlü yüklerin anahtarlanması, doğrusal olmayan yükler ve kazalar gibi etmenler elektrik güç kalitesini etkilemektedir [6].

Elektrik şebekesinde kullanılan elektrikli cihazların birçoğu şebekedeki gerilim ve frekans değişmelerine karşı hassas olmamakla birlikte, son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan elektronik devreler tarafından beslenen ve kontrol edilen cihazlar güç kalitesine karşı son derece duyarlıdır. Bu kontrol devrelerinden bazıları, alternatif akım ve doğru akım motor sürücüleri ve anahtarlama güç kaynakları gibi enerji dönüştürmede kullanılan devreler ile yardımcı kontrol devreleri olarak kullanılan bilgisayarlar ve programlanabilir mantık denetleyicilerdir. Bu tip doğrusal olmayan devreler, şebekedeki bozucu etkilerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkilenme sonucu elektronik devreler ile kontrol edilen cihazlar veya endüstriyel tesisler hatalı çalışabilmekte ve hatta devre dışı kalabilmektedir. Bu nedenle hızlı bir şekilde gelişen sanayi tesisleri ile elektrikli cihazların düzenli olarak çalışabilmesi için gerek tüketiciler gerekse şebeke açısından güç kalitesi konusunda bazı düzenlemeler ve sınırlandırmaların yapılması gerekmektedir [7].

## **1.2. Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması**

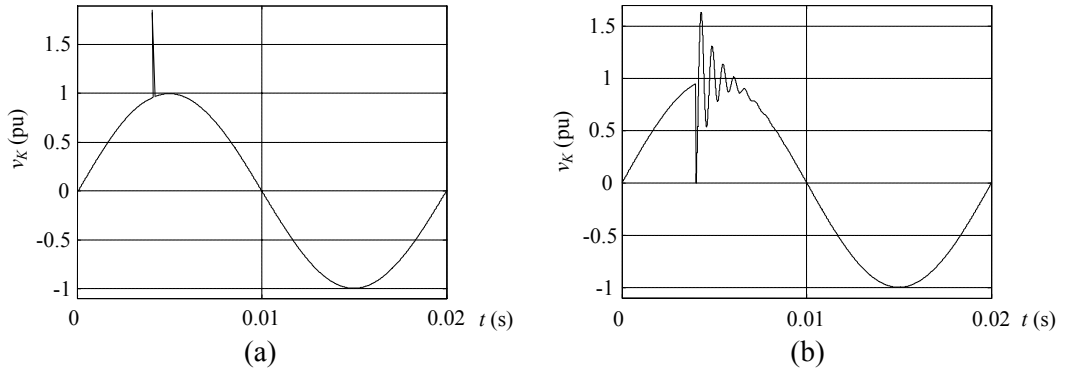
Güç kalitesi, güç sisteminde belirli bir noktada ve belirli bir zamandaki gerilim ve akımı niteleyen çok sayıda elektromanyetik olayların bütünüdür. Elektrik şebekesinde güç kalitesi problemlerine neden olan elektromanyetik olayların kategorileri ve karakteristikleri IEEE 1159-1995 standardında tanımlanmaktadır [8]. Bu standartta güç kalitesi bozuklukları, geçici olaylar (anlık, salınımlı), kısa süreli gerilim değişimleri (kesinti, çökme, yükselme), uzun süreli gerilim değişimleri (uzun süreli kesinti, düşük gerilim, aşırı gerilim), gerilim dengesizliği, dalga şekli bozulması (DA bileşen, harmonik, ara harmonik, çentik gürültü), gerilim dalgalanmaları ve şebeke frekans değişimleri şeklinde ana başlıklar altında sınıflandırılmaktadır. Tablo 1.1'de bu standartta belirtilen elektromanyetik olaylar detaylı olarak verilmektedir.

Tablo 1.1: Güç sistemindeki elektromanyetik olayların kategorileri ve karakteristikleri

Kategoriler	Tipik Spektral Bileşen	Tipik Süre	Tipik Gerilim Genliği
<b>Geçici olaylar</b>			
Darbe			
Nano saniye	5 ns yükselme	< 50 ns	
Mikro saniye	1 µs yükselme	50 ns-1 ms	
Mili saniye	0,1 ms yükselme	> 1 ms	
Salınımlı			
Düşük frekans	< 5 kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
Orta frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
Yüksek frekans	0,5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
<b>Kısa süreli değişimler</b>			
Anlık			
Çökme		0,5-30 periyot	0,1-0,9 pu
Yükselme		0,5-30 periyot	1,1-1,8 pu
Çok kısa süreli			
Kesinti		0,5 periyot-3 s	< 0,1 pu
Çökme		30 periyot-3 s	0,1-0,9 pu
Yükselme		30 periyot-3 s	1,1-1,4 pu
Geçici			
Kesinti		3 s-1 dakika	< 0,1 pu
Çökme		3 s-1 dakika	0,1-0,9 pu
Yükselme		3 s-1 dakika	1,1-1,2 pu
<b>Uzun süreli değişimler</b>			
Kesinti, uzun süreli		> 1 dakika	0 pu
Düşük gerilimler		> 1 dakika	0,8-0,9 pu
Aşırı gerilimler		> 1 dakika	1,1-1,2 pu
<b>Gerilim dengesizliği</b>		sürekli hal	%0,5-2
<b>Dalga şekli bozuklukları</b>			
DA bileşen		sürekli hal	%0-0,1
Harmonikler	0-100	sürekli hal	%0-20
Ara harmonikler	0-6 kHz	sürekli hal	%0-2
Çentik		sürekli hal	
Gürültü		sürekli hal	%0-1
<b>Gerilim dalgalanmaları</b>	< 25 Hz	süreksiz	%0,1-7
<b>Güç sistem frekansı değişimleri</b>	50 Hz	< 10 s	

### 1.2.1. Geçici olaylar

Geçici olaylar, bir elektronik cihazın etkilenmesine ya da bozulmasına neden olabilecek büyük enerjilere sahip olabilmektedir. Geçici olaylar, akım veya gerilimin dalga şekline göre anlık ve salınımlı olarak sınıflandırılabilir. Anlık geçici olaylar, çok küçük süreli ( $< 0,5$  periyot) dalgalanmalardır. Tepe genliği, yükselme ve oluşum zamanları ile karakterize edilmektedir. Yıldırımlar, transformatörlerin enerjilenmesi, kondansatör anahtarlanması tipik nedenleridir. Şekil 1.1a'da tipik bir anlık geçici olay görülmektedir. Salınımlı geçici olaylar, akım veya gerilim dalgası üzerine binmiş yüksek frekanslı ve kısa süreli dalgalanmalardır. Frekans bileşenleri ve tepe genliği ile karakterize edilmektedir. Tipik nedenleri hat, kondansatör veya yük anahtarlama olaylarıdır. Şekil 1.1b'de tipik bir salınımlı geçici olay gösterilmektedir.

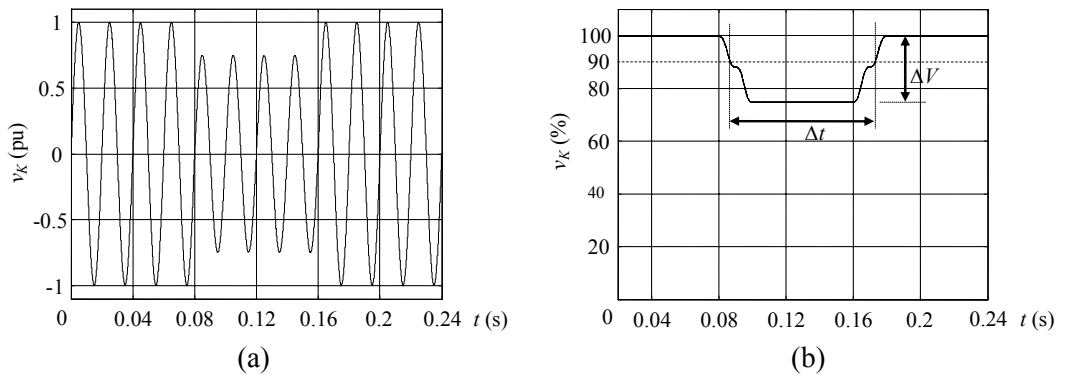


Şekil 1.1: a) Anlık geçici olay b) salınımlı geçici olay

### 1.2.2. Kısa süreli değişimler

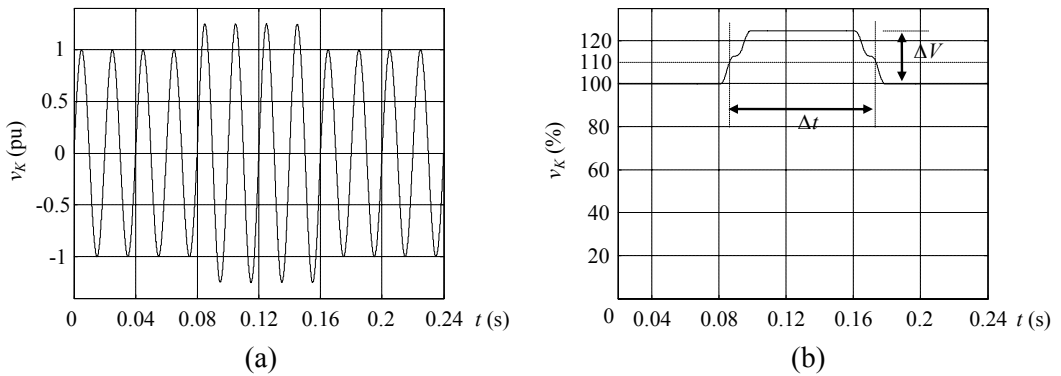
Kısa süreli gerilim çökmeleri, gerilim yükselmeleri ve gerilim kesintilerinden oluşmaktadır. Her bir değişim, oluşum süresine göre anlık, çok kısa süreli ve geçici olarak tanımlanmaktadır. Kısa süreli gerilim çökme ve yükselme olayı güç dağıtım sisteminin zayıflığını göstermektedir. Bu tür sistemlerde, yüksek başlangıç akımı çeken büyük güçlü yüklerin devreye girmesi veya çıkması, iyi yapılmamış güç kablosu bağlantılarından kaynaklanan arızalar gibi nedenlerle gerilim önemli miktarlarda değişmektedir. Bu durum bilgisayarların kapanmasına ve veri kayıplarına yol açabilmektedir.

Kısa süreli çökme, 0,5 periyot ile 1 dakikalık zaman boyunca anma şebeke gerilimi veya yük akımı etkin değerinin 0,1 pu ile 0,9 pu arasındaki bir değere düşmesidir. Gerilim çökmeleri genellikle enerji dağıtım sistemindeki arızalar, büyük güçlü motorların devreye girmesi veya sisteme bağlı yüklerin aniden artması sonucunda oluşabilmektedir. Kısa süreli gerilim çökmeleri, kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına, motor hızının değişmesine veya devreden çıkmasına, kontaktörün zamansız açılmasına, bilgisayar sistemlerinde arızalara ve anahtarlama arızaları gibi problemlere neden olmaktadır. Şekil 1.2’de anlık gerilim çökmesi görülmektedir.



Şekil 1.2: Anlık gerilim çökmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri

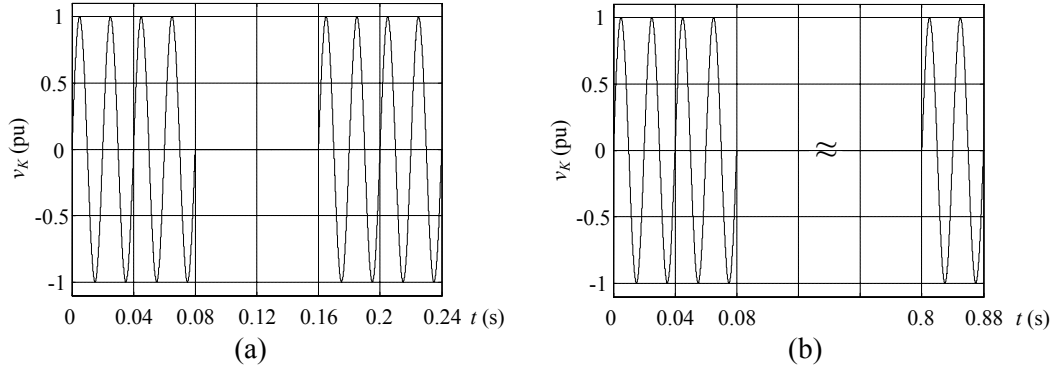
Kısa süreli yükselme, 0,5 periyot ile 1 dakikalık zaman boyunca anma şebeke gerilimi veya yük akımı etkin değerinin 1,1 pu ile 1,2 pu arasındaki bir değere yükselmesi olarak tanımlanmaktadır. Yükselmeler etkin değer genliği ve süresi ile karakterize edilmektedir. Şekil 1.3’de anlık gerilim yükselmesi gösterilmektedir. Yükselmeler, çökmeler gibi genellikle sistem arızalarıyla ilgilidir ancak gerilim çökmeleri gibi yaygın değildir.



Şekil 1.3: Anlık gerilim yükselmesi a) gerilim dalga şekli b) gerilim etkin değeri

Yükselme, sistemde meydana gelen arızalar, büyük bir kondansatör bankasının devreye girmesi veya büyük bir yükün devreden çıkması nedeniyle oluşabilmektedir. Bir arıza süresince oluşan anlık gerilim yükselmesi sistem empedansına, arızanın yerine ve topraklamaya bağlıdır. Gerilim yükselmesi sonucunda, bilgisayar donanımları, motor sürücüleri, kontrol elemanları olumsuz etkilenmekte ve aşırı ısınmadan dolayı cihaz arızaları oluşmaktadır.

Kısa süreli kesinti, 1 dakikadan daha küçük bir zaman periyodunda şebeke gerilimi veya yük akımı etkin değerinin 0,1 pu altına düştüğü durumda oluşmaktadır. Kesintiler genellikle güç sistemi arızaları, yük arızaları ve denetim kısmındaki bozulmalarından kaynaklanmaktadır. Şebekede bir arızadan dolayı meydana gelen kesintinin süresi şebeke koruma cihazının devreye girme zamanı ile belirlenmektedir. Şekil 1.4a ve Şekil 1.4b’de sırasıyla çok kısa süreli ve geçici gerilim kesintisi dalga şekilleri görülmektedir.

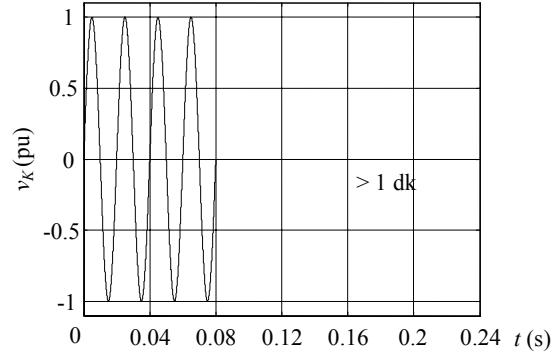


Şekil 1.4: a) Çok kısa süreli gerilim kesintisi b) geçici gerilim kesintisi

### 1.2.3. Uzun süreli değişimler

Uzun süreli değişimler, güç sistem frekansında 1 dakikadan daha uzun etkin değer sapmalarını kapsamaktadır. Değişimin nedenine bağlı olarak kalıcı kesinti, aşırı gerilimler ve düşük gerilimler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aşırı ve düşük gerilimler genel olarak sistem arızalarının bir sonucu olmamakla birlikte sistemdeki yük değişimleri ve anahtarlama işlemleri nedeniyle meydana gelmektedir. Kalıcı kesinti, şebeke gerilimi genliğinin 1 dakikayı aşan bir zaman periyodu için 0 pu

değerine düşmesidir. Şekil 1.5’de şebeke geriliminde sürekli gerilim kesintisi dalga şekli gösterilmektedir.



Şekil 1.5: Sürekli gerilim kesintisi dalga şekli

Düşük gerilim, şebeke gerilimi etkin değerinin 1 dakikadan daha uzun bir süre için %10’undan daha düşük genliğe azalmasıdır. Düşük gerilim, şebekenin aşırı yüklenmesi veya bir kondansatör bankasının devreden çıkması sonucunda oluşmaktadır. Aşırı gerilim, şebeke gerilimi etkin değerinin 1 dakikadan daha uzun bir süre için %10’undan daha yüksek genliğe artmasıdır. Aşırı gerilimler, genellikle büyük bir yükün devreden çıkarılması veya bir kondansatör bankasının devreye alınması sonucunda oluşmaktadır.

#### 1.2.4. Gerilim dengesizliği

Gerilim dengesizliği, 3-fazlı sistemlerde faz gerilimlerinin etkin değerleri veya ardışık fazlar arasındaki faz açılarının eşit olmaması durumudur. Gerilim dengesizliği, tek fazlı yüklerden, 3-fazlı yüklerin dengesiz akım çekmesinden, yıldız bağlı yüklerin nötrlerinin bağlanmamasından, transformatör problemlerinden kaynaklanabilmektedir. Dengesizliğin derecesi, IEEE 100-1992 standardına göre (1.1) denkleminde verilen formülle belirlenebilmektedir [9].

$$\% \text{ Gerilim dengesizliği} = \frac{\text{Ortalamadan maksimum sapma}}{3\text{- faz gerilimlerinin ortalaması}} \times 100 \quad (1.1)$$

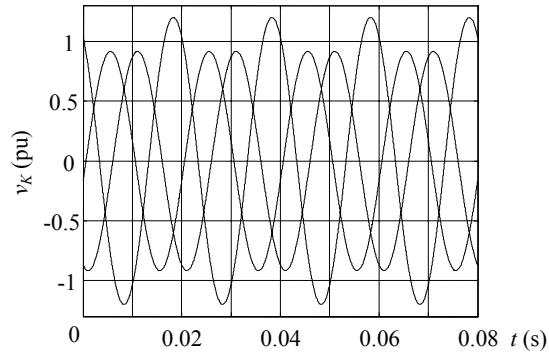
Ayrıca, 3-fazlı gerilimler ve akımlar, pozitif bileşen, negatif bileşen ve sıfır bileşen olmak üzere üç bileşene ayrıştırılabilmektedir. Pozitif bileşen, 3-faz dengeli sistemde



olduğu gibi dengeli bir bileşendir. Negatif bileşen, dengesiz faz-faz akımları ve gerilimleri nedeniyle oluşmaktadır. Bu bileşen 3-fazlı motorlarda bir frenleme etkisi yapmakta, bu da aşırı ısınmaya ve motor ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Sıfır bileşen ise 4-telli güç sistemlerindeki dengesiz yükte oluşmaktadır ve nötr iletkenindeki akımı simgelemektedir. Negatif bileşen gerilim dengesizliği, (1.2) denkleminde verilen şebeke geriliminin temel negatif sıralı bileşeni ( $V_{1-}$ ) ile temel pozitif sıralı bileşeni ( $V_{1+}$ ) karşılaştırılarak belirlenebilmektedir. Sıfır bileşen gerilim dengesizliği ise (1.3) denkleminde verilen şebeke geriliminin temel sıfır sıralı bileşeni ( $V_{10}$ ) ile temel pozitif sıralı bileşeni ( $V_{1+}$ ) karşılaştırılarak belirlenebilmektedir. Şekil 1.6'da 3-faz dengesiz gerilim dalga şekilleri gösterilmektedir.

$$\% \text{ Negatif bileşen gerilim dengesizliği} = \frac{|V_{1-}|}{|V_{1+}|} \times 100 \quad (1.2)$$

$$\% \text{ Sıfır bileşen gerilim dengesizliği} = \frac{|V_{10}|}{|V_{1+}|} \times 100 \quad (1.3)$$



Şekil 1.6: 3-faz dengesiz gerilim dalga şekilleri

### 1.2.5. Dalga şekli bozulmaları

Dalga şeklinin bozulması, ideal sinüs dalgasının güç sistem frekansından sapması olarak ifade edilmektedir. DA bileşen, harmonikler, ara harmonikler, çentik ve gürültü olmak üzere 5 farklı dalga şekli bozulması görülmektedir. DA bileşen, genellikle güç elektroniği dönüştürücülerinin asimetrisinden kaynaklanmaktadır. Gerilim dalga şeklinde pozitif ve negatif yarım dalgalarının birbirine eşit

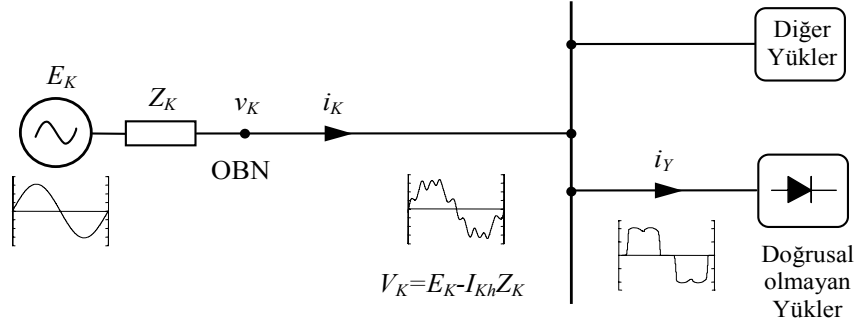
olmamasıdır. Genellikle yarım dalga doğrultuculu sistemlerden kaynaklanmaktadır. Alternatif Akım (AA) sistemdeki DA bileşen trafo sargılarında zararlı bir etkiye neden olup transformatörlerde doyma ve ısınma problemine ve öngörülen çalışma ömründe kısalmaya neden olmaktadır.

Harmonikler, gerilim ve akımda bulunan farklı genlik ve frekanstaki sinüzoidal işaretlerle bozulmuş sinüs dalga şekilleri olarak tanımlanmaktadır. Dengeli 3-fazlı güç sistemlerinde genellikle tek sayılı harmonikler bulunmaktadır (3, 5, 7, 9,...). Elektrik enerji sistemlerinde, sinüzoidal olmayan dalga şekilleri simetrik olduğu (her bir periyodundaki pozitif ve negatif yarı dalgalar birbirine eşit olduğu) için çift sıralı harmoniklere sıklıkla rastlanmamaktadır (2, 4, 6, 8,...). Temel frekansa göre harmoniklerin faz dönüş ilişkisi, harmonik faz sırası olarak bilinmektedir [4]. Pozitif sıralı harmonikler (4., 7., 10., ...) temel frekansla aynı yönde, negatif sıralı harmonikler (2., 5., 8., ...) temel frekansın tersi yönünde dönmektedir. Sıfır sıralı harmonikler (3., 6., 9., ...) dönmemektedir. Pozitif sıralı harmonik bir motoru daha hızlı çalıştırırken negatif sıralı harmonik yavaşlatmaktadır. Her iki durumda da motor moment kaybetmekte ve aşırı ısınmaktadır. Sıfır sıralı akım harmonikleri, nötr iletkenine eklenmekte ve bu nedenle nötr iletkeninde aşırı ısınmaya neden olmaktadır.

Gerilim ve akımda meydana gelen harmonik bozulmaların kaynağı, kesintisiz güç kaynakları, motor yol vericileri, AA ve DA motor sürücüleri, kaynak makineleri, ark fırınları, elektronik balastlar, bilgisayarlar, fotokopi makineleri gibi doğrusal olmayan yüklerdir. Ayrıca tüm güç elektroniği dönüştürücüleri şebekedeki harmonik bozulumu arttırıcı etki göstermektedir. Güç dağıtım sistemlerinde akım ve gerilim harmonikleri, cihazlarda aşırı ısınmaya, kayıplarda artışa, kontrol ve koruma rölelerinde işletimsel sorunlara, anahtarlarda hatalı açmalara, etkin değer ve maksimum değerde artışa, düşük güç faktörüne, 3-faz 4-telli sistemlerde nötr iletkeninde aşırı akımların oluşmasına, transformatör, generatör, motor ve kondansatörlerde aşırı ısınmaya, motorlarda ısınma ve mekanik salınımlara, hassas elektronik cihazların hatalı çalışmasına, izolasyon sistemlerinde yalıtkan stresinin artmasına neden olmaktadır.

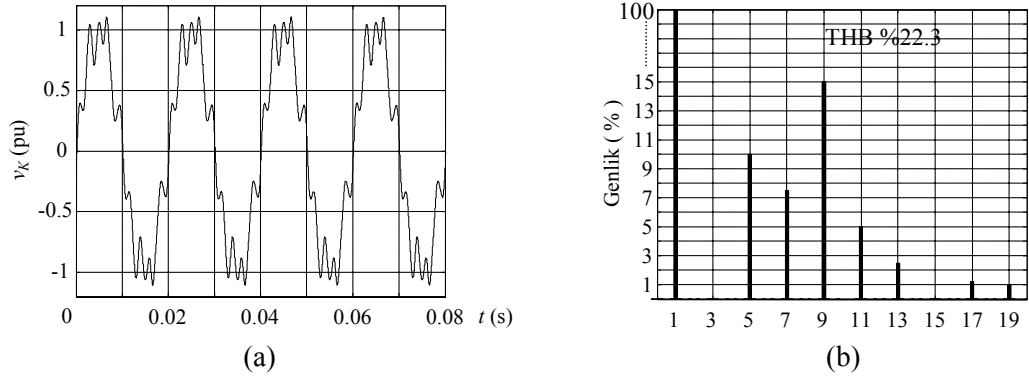
Doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen akım harmonikleri ( $I_{Kh}$ ), (1.4) denkleminde göre kaynak empedansı ( $Z_K$ ) üzerinde kendi harmonik frekanslarında gerilim düşmeleri meydana getirerek Şekil 1.7’de görüldüğü gibi OBN’de gerilim dalga şeklini ( $V_K$ ) bozmaktadır.

$$V_K = E_K - I_{Kh} Z_K \quad (1.4)$$



Şekil 1.7: Doğrusal olmayan yüklerin olduğu şebeke sistemi tek hat şeması

Harmonik akımların genliği arttıkça gerilim dalga şeklindeki bozulma artmaktadır. Bu etkinin büyüklüğü doğrudan sistem empedansı ile ilgilidir. Ayrıca OBN’ye bağlı diğer tüm yükler de bozuk gerilim dalga şeklinden etkilenmektedir. Şekil 1.8’de harmonikli gerilim dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.8: a) Harmonikli gerilim dalga şekli b) harmonik dağılımı

Ara harmonikler, temel bileşen (50 Hz) frekansının tam sayı katlarında olmayan frekanslar içeren akımlar veya gerilimlerdir. Ara harmonik bozulumu çoğunlukla ark makinaları, kaynak makineleri, statik frekans dönüştürücüleri, doğrudan frekans dönüştürücüleri nedeniyle oluşmaktadır. Ara harmonikler ile ilgili elektromanyetik bozulmalar günümüzde büyük dikkat çekmektedir. Güç sistemlerinde her zaman var

olan ara harmoniklerin önemi güç elektroniğindeki gelişmeler paralelinde artmaya devam etmektedir. Harmonikler ve ara harmoniklerin dalga şekillerine göre matematiksel olarak tanımları Tablo 1.2’de verilmektedir. Alt harmonik ifadesi, şebeke frekansından daha küçük bir frekansa ait bir ara harmonik bileşen olarak ifade edilmektedir [10].

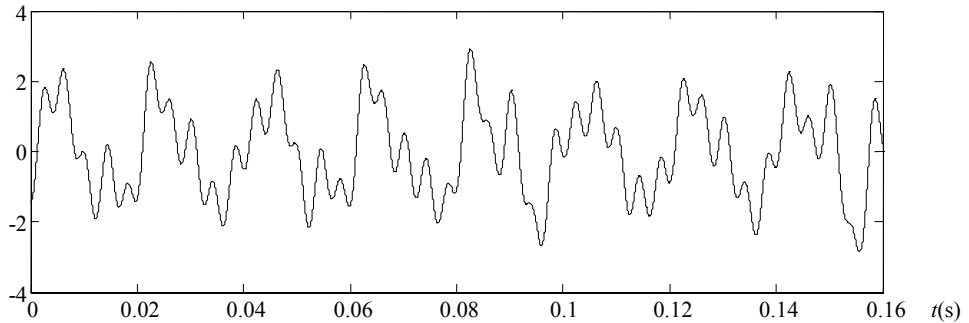
Tablo 1.2: Dalga şekillerinin frekans (spektral) bileşenleri

Harmonik	$f=nf_1$ n sıfırdan büyük bir tam sayıdır
DA Bileşeni	$f=nf_1$ n=0 için
Ara harmonik	$f \neq nf_1$ n sıfırdan büyük bir tam sayı
Alt harmonik	$f > 0$ Hz ve $f < f_1$
$f_1 =$ temel frekans	

Şekil 1.9’da, Tablo 1.3’de verilen 6 adet frekans bileşeninden meydana gelen dalga şekli gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi harmonik ve ara harmonik bileşenleri periyodik olmayan dalga şekillerini meydana getirmektedir [11].

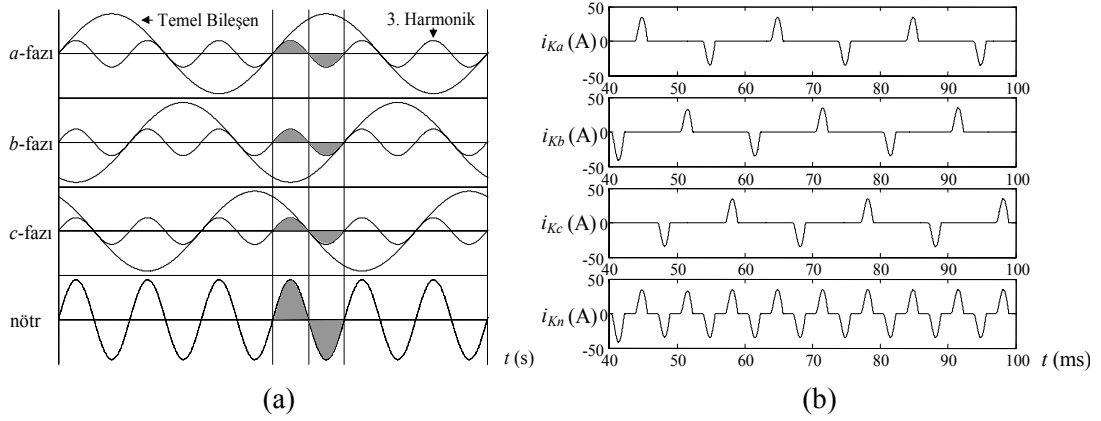
Tablo 1.3: Harmonik ve ara harmonik bileşenleri

Frekans (Hz)	Genlik (pu)
50	1,0
104	0,3
117	0,4
134	0,2
147	0,2
250	0,5



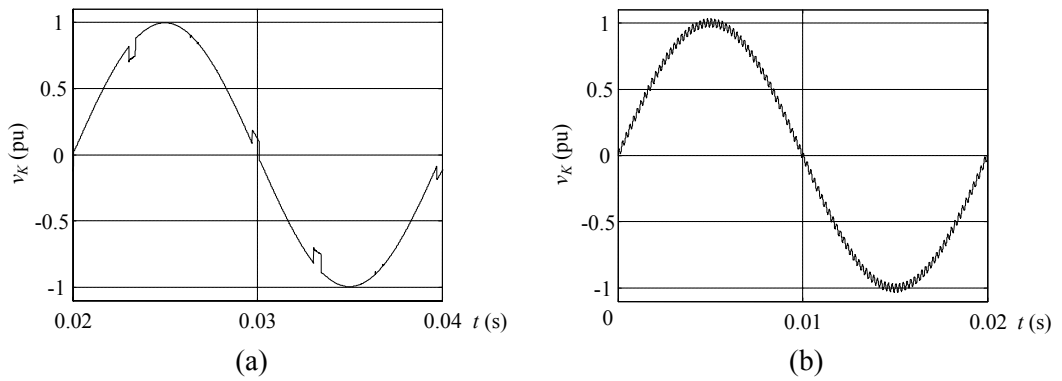
Şekil 1.9: Harmonik ve ara harmonik bileşen içeren periyodik olmayan dalga şekli

3-fazlı 4-telli sistemlerde, tek-fazlı doğrusal olmayan yüklerin (bilgisayarlar, fotokopi makineleri, elektronik balastlar, tek fazlı motor sürücüleri, tek fazlı kesintisiz güç kaynakları vb.) ürettiği 3 ve 3'ün tek katı olan harmoniklerin nötr iletkeninden toplanarak geçmesi nötr akımını meydana getirmektedir. Bu durumda Şekil 1.10'da görüldüğü gibi nötr akımı faz akımının 1,73 katına kadar çıkabilmekte ve nötr iletkenin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır [12].



Şekil 1.10: a) 3'ün tek katı harmonik yük akımlarının nötr iletkeninde toplanması b) tek-fazlı doğrusal olmayan yüklerin faz akımları ve nötr akım dalga şekli

Çentik, güç elektroniği elemanlarındaki darbe sayısı kadar şebeke geriliminde meydana gelen periyodik gerilim bozulmasıdır. Genelde doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktanslarının anahtar aktarımını geciktirmesi nedeniyle oluşmaktadır. Sürekli durumda gerilimin harmonik dağılımı ile karakterize edilmektedir. Şekil 1.11a'da gerilimde meydana gelen çentikler görülmektedir. Gürültü, akım veya gerilim dalga şekli üzerine binmiş 10 kHz ile 1 GHz arasında değişen düşük enerjili bozucu dalgalarıdır. Şekil 1.11b'de gerilimde oluşan gürültü etkisi gösterilmektedir.

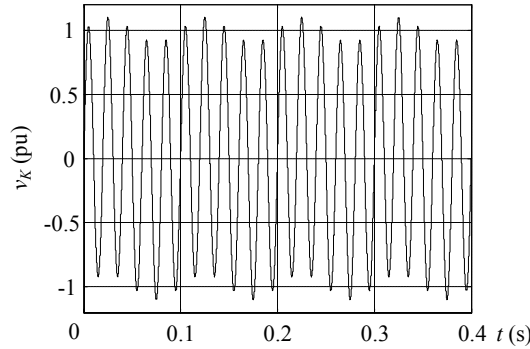


Şekil 1.11: Gerilim dalga şekli bozulması a) çentik b) gürültü

Güç sistemlerinde gürültü, güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, kaynak makineleri, doğrultuculu yükler ve anahtarlama güç kaynakları nedeniyle oluşabilmektedir.

### 1.2.6. Gerilim dalgalanması

Gerilim dalgalanması, rasgele veya sistematik gerilim değişimleridir. Şekil 1.12’de şebekede meydana gelen gerilim dalgalanması görülmektedir. Gerilim dalgalanmalarına genellikle yük akımında ani değişimler meydana getiren ark fırınları ve kaynak makineleri neden olmaktadır. Gerilim dalgalanmalarının en tipik belirtisi özellikle ışık kaynaklarında görülen gerilim kırışmasıdır. Gerilim dalgalanmaları, motor ve jeneratörlerin işletim performansını bozmakta, elektronik cihazların ömürlerini azaltmakta ve yanlış çalışmalarına neden olmakta, bilgisayarlarda işlem hatalarına ve bellek kayıplarına yol açmakta, ışık kaynaklarının etkinliklerini bozmaktadır.



Şekil 1.12: Gerilim dalgalanması

### 1.2.7. Frekans değişimleri

Şebeke frekansının anma değerinden sapmasıdır. Frekans değişimlerine, enerji iletim hattındaki arızalar, büyük güçlü yüklerin devreden çıkması, büyük bir jeneratörün (rüzgar türbini) sisteme bağlanması veya kesintisiz güç kaynaklarındaki ayar düzensizlikleri neden olabilmektedir.

### 1.2.8. Periyodik olmayan bozulmalar

Genellikle güç elektroniği dönüştürücüleri, hat frekansının tamsayı katlarındaki frekanslarda harmonik bileşenli akım üretirler. Diğer yandan, bazı yükler hat frekansının tamsayı katlarında olmayan harmonikli akımlar çekmektedir. Bu harmonik bileşenler, hat frekansının altında ise alt-harmonik, üstünde ise süper-harmonik olarak adlandırılır. Ancak hat frekansının tam katlarında olmadıkları için periyodik olmayan akımlar olarak düşünülürler [13]. Literatürde hat frekansının üzerinde periyodik olmayan bu akımlar ara-harmonik olarak da adlandırılmaktadır [14,15].

Ark fırınları, statik frekans dönüştürücüler, ayarlanabilir hız sürücüleri ve kaynak makineleri gibi bazı cihazlar normal çalışmaları sırasında periyodik olmayan akımlar üretebilmektedir. Aynı zamanda periyodik olmayan bileşenler gerilimde de oluşabilmektedir. Akım ve gerilimdeki periyodik olmayan bu bileşenlerin zararlı etkileri, harmoniklerin neden olduğu zararlara benzerdir ancak anlaşılması daha zordur. Bu bileşenler, güç kayıplarına, ölçme hatalarına, denetim arızalarına ve bunun sonucunda dağıtım sistemlerinde kaynağın güç kalitesinin düşmesine neden olur [16].

Önemli bir ara-harmonik akım kaynağı ark kaynaklı yüklerdir. Bunlara kaynak makineleri ve ark fırınları dahildir. Bu tip yükler düşük frekanslı gerilim dalgalanmalarıyla ve bunun sonucu olarak ışık kırışması (fliker) ile ilişkilendirilir. Bu gerilim dalgalanmaları düşük frekanstaki ara-harmonik bileşenler olarak düşünülebilir. Bununla birlikte ark kaynaklı yükler ayrıca, geniş bir frekans bandında daha yüksek frekansta ara-harmonik bileşenler meydana getirebilir [14].

Bir araştırma sonucuna göre, son yıllarda Türkiye’de demir ve çelik endüstrisinin hızlı gelişimi ile tüm ülkenin elektrik üretiminin onda biri olan 40 GW kurulu güç demir çelik endüstrisi ihtiyaçlarına harcanmaktadır. Türkiye’deki çelik üretiminde, Türkiye Elektrik İletim Sisteminde birçok güç kalitesi problemine neden olan ark ve pota fırınlarından yararlanılmaktadır [17]. Sözü edilen çalışmada Türkiye’deki ark fırını tesislerinin güç kalitesi sonuçları araştırılmaktadır. Bu çalışmada, TÜBİTAK

Milli Güç Kalitesi İzleme Projesi kapsamındaki mobil güç kalitesi izleme sistemleri ile iletim sistemindeki kritik noktalar izlenerek demir çelik tesislerinin güç kalitesi, IEC 61000-4-30 standardı kapsamında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre, incelenen demir çelik tesislerinin modern statik var kompanzatorü (Static Var Compensator, SVC) sistemleri ile donatılmalarına rağmen kırışma ve toplam talep bozulması değerlerinin Türkiye Elektrik İletim Sistemi Kaynak Güvenilirliği ve Kalitesi yönetmeliğine uygun olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca tüm ark fırınları ortak bağlantı noktalarında yapılan kompanzasyona rağmen ikinci harmonik akım değerlerinin sınırlar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Ark fırınlarının akım dalga şeklinin, özellikle erime noktasında düşük frekanslı ara harmonikler içerdiği görülmüştür. Örneğin 8,8 Hz kırışma modülasyon frekansında şebeke akımında ara harmoniklere neden olduğu tespit edilmiştir.

Elektrik Ark Fırınları (EAF), elektrik şebekesindeki en problemlili yüklerdir. EAF, kırışma kompanzasyon sistemleriyle birlikte çok yüksek değerde aktif ve reaktif güç tüketmektedir. Sonuç olarak EAF tesislerindeki ışık kırışmasının temel nedeni, var olan harmoniklerin arasında bulunan ara harmoniklerdir. Bu nedenle, temel olarak birinci ve ikinci harmonik arasındaki veya ikinci ve üçüncü harmonik bileşenlerin arasındaki ara harmonikler kırışmanın temel nedenidir. Birinci ve ikinci harmonik bileşenler arasındaki ara harmonikler genel olarak sıklıkla kullanılan pasif filtreler tarafından yükseltilmekte ayrıca SVC tipindeki kırışma kompanzasyon sistemi ortak bağlantı noktasındaki kırışmayı daha da arttırmaktadır. EAF tesislerindeki kırışma, ara harmonik ve ikinci harmonik problemlerinin giderilmesi için yeni nesil Aktif Filtre (AF) ve dağıtım sistemi statik kompanzatorü (Distributed Static Compensator, DSTATCOM) sistemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir [17].

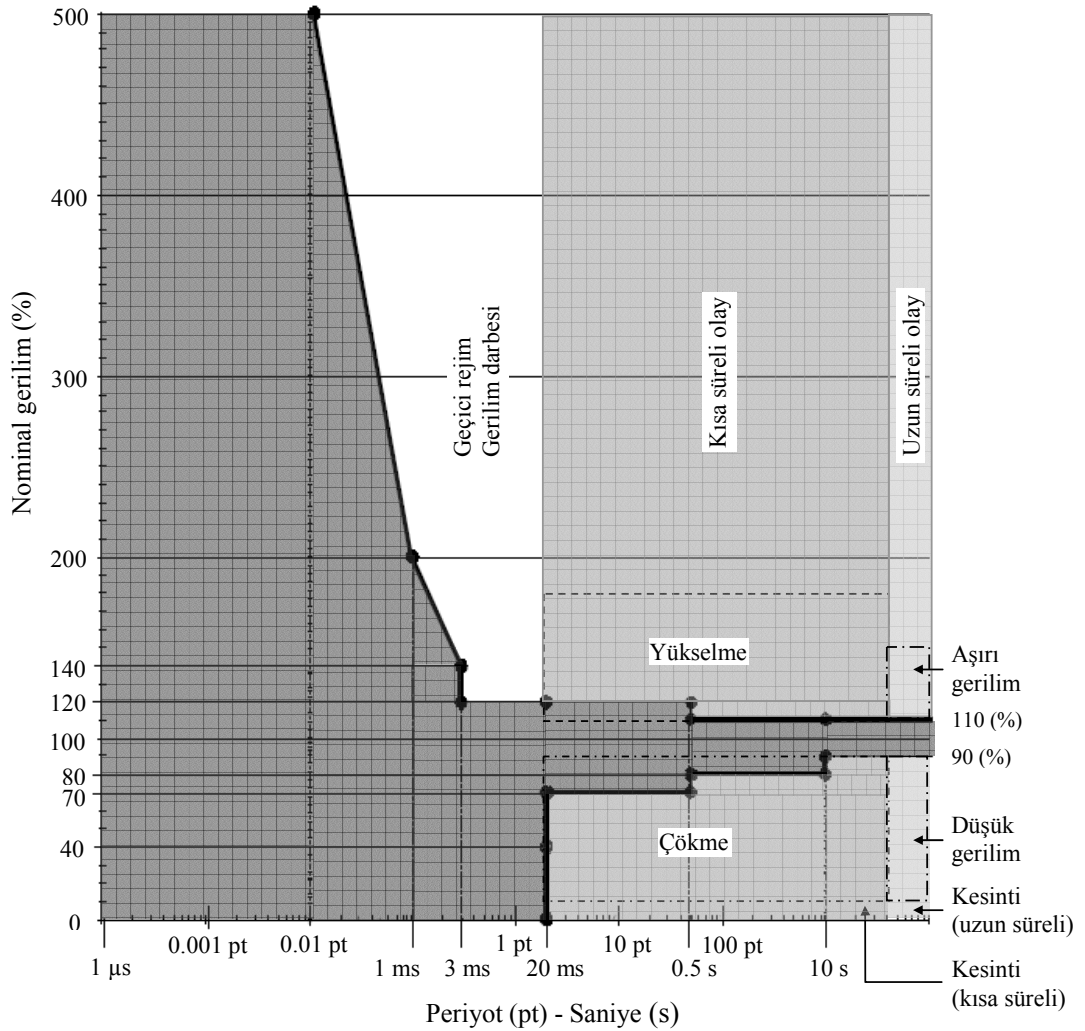
### **1.3. Güç Kalitesinin Etkileri**

Gerilim azalmaları ve kesintilerinin büyük çoğunluğu iletim ve dağıtım sistemlerinden kaynaklanmaktadır ve tedarikçinin sorumluluğu altındadır. Gerilim azalması, besleme geriliminin etkin değerinde meydana gelen ve bir saniyeden daha kısa veya birkaç saniye devam eden kısa süreli gerilim azalmalarıdır. Gerilim



azalması, kalıcı gerilim ve azalma süresi olarak tanımlanır ve olay sırasında devam eden nominal giriş geriliminin etkin değer yüzde oranı olarak ifade edilir.

Bilgisayar vb. elektronik cihazların gerilim değişiminin etkin değeri ve süresine göre güvenli çalışma bölgesi belirtilen ve daha önce Computer and Business Equipment Manufacturers Association (CBMA) eğrisi olarak adlandırılan Information Technology Industry Council (ITIC) eğrisi [18] Şekil 1.13'de görülmektedir. ITIC eğrisi 120 V 60 Hz tek-fazlı cihazlar için uygulanabilir olsa da diğer güç sistemleri için kullanışlı bir genel kaynaktır. Bu amaçla, eğri üzerine IEEE 1159-1995 standardında belirtilen gerilim kalitesi olayları da ilave edilmiştir.



Şekil 1.13: ITIC (CBMA) eğrisi

Düsey ekseninde gerilimin etkin değerinin yüzdesi ve yatay ekseninde bozukluğa neden olan olayın logaritmik olarak süresi verilmektedir. Bu eğri, fonksiyonda kesinti olmayan bölge, yasak bölge ve bozulma olmayan bölge olmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır. Normal çalışmada cihazın fonksiyonda kesinti olmayan bölgede (kabul edilebilir güç kalitesi) çalışması istenir. Cihaz gerilim sıçramaları nedeniyle yasaklanmış bölgede çalışarak bozulabilmektedir. Düşük gerilim ve aşırı gerilim sınırları arasında kalan bölge kabul edilebilir güç kalitesi bölgesidir. Bu sınırların dışında gerçekleşen çalışmada, gerilim çökmesi/kesinti nedeniyle cihazın işlevini yerine getirememesine/kapanmasına veya gerilim sıçramaları nedeniyle yasaklanmış bölgede çalışarak arızalanmasına neden olmaktadır.

Örneğin bir veri işleme cihazı, nominal gerilimin beş katına 100 µs dayanabilmeli, fakat nominal gerilimin sadece %20 fazlasına ise 10 ms dayanabilmelidir. Düşük gerilim tarafında ise, komple güç kaybına 20 ms (bir şebeke frekans periyodu) dayanabilmeli, 100 ms içinde de gerilim nominal gerilimin %70'ine yükselmelidir. ITIC eğrisi, bilgi işlem cihazları kullanıcıları ile elektrik tedarikçileri arasındaki elektrik enerjisinde kalite problemlerinin çözümüne yardımcı olmak üzere geliştirilmiştir. Daha sonra, cihazlara ait özelliklerin standartlaştırılması neticesinde, kullanım yerinde yapılan ölçümlere dayanılarak verilen elektriğin yeterli olup olmadığının tespiti son derece kolaylaştırılmıştır.

Harmoniklerin ekonomik etkileri ise daha kısa tesisat ömrü, düşük enerji verimliliği ve beklenmedik kesintilere karşı hassasiyet olarak ifade edilebilir. Beklenmedik açılmaların maliyeti diğer plan dışı kesintilerde olduğu gibi önemli boyutlara ulaşabilir. Normal olarak kullanım ömürleri 30 veya 40 yıl olması gereken transformatörlerin 7-10 yılda değiştirilmeleri ciddi finansal kayıplara yol açar. Hesaplanan minimum kesitten daha büyük kesitli kablo kullanılması, başlangıçta maliyetin biraz artmasına karşın kayıpları azaltacağı gibi işletme maliyetinden tasarruf sağlar. Elektrik enerjisinde güç kalitesinin garanti altına alınması, başlangıç aşamasında iyi tasarım, etkin ve uygun cihaz seçimi, tedarikçi ile işbirliği, sürekli kontrol ve dikkatli bakım gerektirmektedir.

Güç kalitesi problemlerinin ortaya çıkması, enerji kaynağı besleme geriliminin kalitesi, tesisat üzerindeki yüklerin tipi, kullanılan cihazların elektrik güç sisteminde oluşan rejim dışı sapmalara karşı hassasiyeti faktörlerine bağlıdır. Elektrik enerjisi güç kalitesini sağlamak için her zaman geçerli ve tek bir çözüm yoktur. Bu amaçla, yük ve enerji kaynağı yeterli kalite şartlarını sağlar durumda seçilmeli, akım ve gerilim düzenleyici sistem ve cihazlar kullanılmalı, elektrik tesisatı ve topraklama standartlara uygun yapılmalı, hassas veya problemlili yüklerin ayrılması sağlanmalı, 4 veya 6 darbe yerine 12 darbeleri sistemler kullanılmalı, enerji kalitesi sürekli izlenmeli, kompanzasyon sistemi kullanılmalı, tesislerde güce ve hassasiyete göre aktif filtre ve pasif filtre kullanılmalıdır. Optimum teknik ve ekonomik bir çözümün bu faktörler dikkate alınarak tesisat için tasarlanması gerekir.

#### 1.4. Güç Kalitesi ile İlgili Standartlar ve Yasal Düzenlemeler

Güç kalitesi kavramı, tüketiciye sunulan elektrik enerjisinin kesintisiz olarak sağlanması ve gerilim, frekans ve güç faktörü gibi büyüklüklerin istenen belirli sınırlar içerisinde kalması olarak tanımlanabilmektedir. Elektrik güç kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla akım ve gerilim harmonikleri ile ilgili olarak IEEE 519-1992, EN 50160 ve IEC 61000-3-4 gibi ülkelere göre değişen standartlar bulunmaktadır. Toplam Harmonik Bozulumu (THB) akım ve gerilim dalgalarındaki bozulmayı ifade eden bir göstergedir. THB, harmoniklerin etkin değerlerinin toplamının temel bileşenin etkin değerine oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Gerilim ve akımın THB değerleri (1.5) ve (1.6) denklemlerindeki gibi hesaplanmaktadır [19].

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1.5)$$

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.6)$$

Doğrusal olmayan yüklerin şebekedeki bozucu etkilerini sınırlamak amacıyla IEEE 519-1992 standardına göre OBN’de maksimum gerilim ve akım THB değerleri

%5'dir. Tablo 1.4 ve Tablo 1.5'de IEEE 519-1992 standardı tarafından belirlenen akım ve gerilim harmonik sınırları verilmektedir.

Tablo 1.4: IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları

<b>Isc/I1</b>	<b>h&lt;11</b>	<b>11≤h&lt;17</b>	<b>17≤h&lt;23</b>	<b>23≤h&lt;35</b>	<b>35≤h</b>	<b>THB (%)</b>
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tablo 1.5: IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları

<b>Bara Gerilimi</b>	<b>Maksimum bireysel harmonik bileşen (%)</b>	<b>Maksimum THB (%)</b>
2,3-69 kV	3,0	5,0
69-138 kV	1,5	2,5
>138kV	1,0	1,5

Türkiye elektrik dağıtım sistemi'nde reaktif enerji akışları ile ilgili hususlar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun (EPDK) 25.09.2002 tarihli ve 24887 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinde yapılan 09.01.2007 tarihli ve 26398 sayılı ve 20.06.2007 tarihli ve 26558 sayılı resmî gazetede yayınlanan Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile yeniden düzenlenmiştir [20]. 20.06.2007 tarihli yönetmelik uyarınca 01.01.2008'den itibaren kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olan işletmeler, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde on beşini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlü olmaktadır. Yeni güncel sınır değerler Tablo 1.6'da verilmektedir.

Yönetmeliğe göre reaktif enerji sınırlarının endüktif bölgede 0,98, kapasitif bölgede ise 0,988 değerlerine yükselmesi nedeniyle Türkiye Elektrik Dağıtım Sistemi'nden beslenen kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olan tüm endüstriyel tesis veya yüklerin neredeyse 1,0 ortalama güç faktöründe çalıştırılmaları zorunluluk haline gelmektedir.

Tablo 1.6: Aktif ve reaktif enerji tüketim oranları

Yönetmelikte Belirtilen Sınır Değerler		Enerji Tüketimi /Ay		
		Aktif (%)	Reaktif (%)	
			Endüktif	Kapatif
Dağıtım sisteminde kurulu gücü 50 kVA'nın altında olanlar	1 Ocak 2007'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
	1 Ocak 2008'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
Dağıtım sisteminde kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar	1 Ocak 2007'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
	1 Ocak 2008'den itibaren	100	≤ 20	≤ 15

### 1.5. Literatür Araştırması

Tez konusu ile ilgili yapılan ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmalar ve araştırmalar aşağıda özetlenmektedir.

1-faz ve 3-faz 3-telli BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar; Moran [21], giriş akımı ve çıkış gerilimini bağımsız denetleyebilme yeteneğine sahip seri-paralel filtre yapısını, 1-faz güç düzenleyicisi olarak ilk önermiştir. Gyugyi [22], güç elektroniği dönüştürücülerinin seri-paralel birleşimini 3-faz 3-telli yapıda güç sistemi denetleyicisi olarak uygulamıştır. Karman ve Habetler [23], güç filtresi olarak seri-paralel dönüştürücü birleşiminde, sistem performansının iyileştirilmesi amacıyla birleşik dönüştürücü denetimini önermiştir. Akagi [24], SAF ve PAF birleşiminden oluşan yapıyı “Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD)” olarak isimlendirmiştir. Ghosh ve Ledwich [25], BGKD için seri ve paralel kompanzasyon yeteneğine sahip bir güç yapısı ve denetim tekniği incelenmiştir.

Haque ve diğ. [26], birleşik güç kalitesi düzenleyicisi için yeni basit denetim algoritması tasarımından bahsetmiştir. Çalışmada BGKD için geliştirilen denetim algoritmasının basit ve uygulamasının kolaylığından bahsedilmiştir. BGKD'nin paralel filtre kısmında gelişmiş  $p-q$  teorisi ve seri filtre kısmında ise anlık simetri bileşen teorisi kullanılmıştır. BGKD'nin seri aktif filtre kısmıyla gerilim harmonikleri ve paralel aktif filtre kısmıyla da akım harmonikleri ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir. Monteiro ve diğ. [27], birleşik güç kalitesi düzenleyicisinin kullanıldığı alanlara, yapısına ve geleneksel kontrol stratejilerine yer

vermiştir. Çalışmada, gerilim ve akım harmoniklerinin düzeltilmesi için basit kontrol stratejileri denenmiş ve simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Ayrıca geleneksel kontrol teorilerinden farklı olarak “sönümleyici denetim algoritması” önerilmektedir.

Aredes ve diğ. [28], anlık güç teorisi ( $p-q$ ) tabanlı 3-faz 3-kollu bir birleşik güç kalite düzenleyicisi sayısal denetimi ile 4,5 kVA gücünde bir laboratuvar prototipi geliştirmiştir. Sayısal işlemci olarak sabit noktalı bir işlemci seçilmiştir. Han ve diğ. [29], 3-faz 3-telli sistemde birleşik güç kalite düzenleyicisinin dağıtık enerji üretim sistemleri ile birleşiminin analizini yapmıştır. Çalışmada güç sistemindeki harmoniklerin düzelmesi, gerilim yükselme ve düşmelerinin kontrol edilmesi, gerilim kesilmeleri ve reaktif güç kompanzasyonu gibi güç kalitesi bileşenlerinin düzeltilmesi konusunda simülasyon ve deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca dağıtık enerji üreteçlerinin güç sistemlerine bağlandığı noktada ve diğer endüstriyel güç sistemlerinde güç kalitesinin artırılması konusuna değinilmiştir. Forghani ve Afsharnia [30], birleşik güç kalite düzenleyicisi için yük akımları ve kaynak gerilimlerinin simetrik olmayan harmonik bileşenlerini de kompanze edebilen çevrimiçi dalgacık dönüşümü tabanlı yeni bir denetim algoritması önermiştir.

Basu ve diğ. [31], hassas doğrusal olmayan yüklerin güç kalitesini iyileştirmek üzere BGKD’de kullanılmak üzere iki farklı denetim yöntemi önermiştir. Önerilen iki denetim yönteminin SABER yazılımında detaylı simülasyon sonuçları verilmektedir. Djeghloud ve diğ. [32], 3-faz sistemdeki kaynak akımı ve yük gerilimindeki bozulmaları düzeltmek üzere seri ve paralel aktif güç filtresinden oluşan bir BGKD yapısı önermektedir. Çalışmada önerilen sistemin sadece simülasyon sonuçları verilmektedir. Basu ve diğ. [33], BGKD denetimi için bilgisayar temelli yeni bir hibrit denetim yöntemi önermiştir. Önerilen dört evreli gerilim enjeksiyonu yönteminin laboratuvar deneysel sonuçları verilmektedir.

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar; Aredes [34], 3-faz 4-telli sistemde iki kondansatörlü ortak DA-baraya bağlı iki 3-kollu Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) yapısı kullanan BGKD’nin anlık reaktif güç teorisi denetim tekniği tabanlı simülasyonunu ve uygulamasını tez çalışmasında gerçekleştirmiştir. Ayrıca, Aredes ve diğ. [35], 3-faz 4-telli sistem için gelişmiş aktif güç hat düzenleyicisini

incelemekte ve anlık gerçek ve sanal güç teorisi tabanlı denetimi açıklamaktadır. Faranda ve Valade [36], 3-faz 3-kollu 4-telli BGKD sisteminin toplam kayıplarını sınırlamak için bir denetim stratejisi önermektedir.

Silva ve diğ. [37], 3-faz 4-telli sistemde seri-paralel aktif güç hat düzenleme yeteneğine sahip hat etkileşimli kesintisiz güç kaynağı (Uninterruptible Power Supply, UPS) sistemi uygulamasını gerçekleştirmiştir. Fan ve diğ. [38], 3-faz 4-telli birleşik güç kalite düzenleyicisinin  $p-q-r$  anlık güç teorisi tabanlı denetim algoritması ile analizini yapmıştır. Li ve diğ. [39], 3-faz 4-telli sistemde iki kondansatörlü ortak DA-baraya bağlı iki 3-kollu GKE yapısında  $p-q-r$  anlık güç teorisinde hesaplamaları basitleştirerek iyileştirilmesi amacıyla yeni bir denetim stratejisi önermiştir.

Axente ve diğ. [40], BGKD'nin seri eviricisini korumak için bir koruma yöntemi incelemiştir. Önerilen yöntemde seri evirici, BGKD'nin yük tarafındaki kısa devrelerden kaynaklanan aşırı gerilim ve aşırı akımlardan korunmaktadır. Axente ve diğ. [41], kaynak gerilimi ve yük akımı bozulmalarını kompanze etmek için tamamen DSP kontrollü 12 kVA BGKD laboratuvar prototipi geliştirmiştir. Amini [42], BGKD için kaynak geriliminin bozulma düzeyine göre gerilim kompanzasyonu amacıyla yeni bir denetim önermiştir. Yük üzerinde zararlı etkileri olmayan gerilim bozuklukları paralel filtrenin VA kapasitesi kullanılarak kompanze edilmektedir.

3-faz 3-telli SAF ve 3-faz 4-kollu 4-telli PAF birimlerinden oluşan BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar; Chen ve diğ. [43], 3-faz 4-telli sistemlerde kullanılan tek-fazlı yüklerden kaynaklanan dengesizlik problemlerinin giderilmesi için önerdikleri BSPAF yapısında, PAF tarafında 4-kollu GKE, SAF tarafında ise geleneksel 3-kollu GKE kullanmışlardır. Khadkikar ve Chandra [44], 3-faz 4-telli dağıtım sisteminde birleşik güç kalite düzenleyicisi için yeni bir yapı önermiştir. 3-faz 3-telli sistemi, seri transformatörlerin ortak uçlarını nötr hattı olarak kullanarak 3-faz 4-telli sisteme dönüştürmüş ve SAF için 3-kollu, PAF için 4-kollu GKE yapısı kullanmıştır. Ayrıca dengesiz yük akımlarını dengelemek için yeni bir denetim stratejisi önermiştir.

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar; Ji ve diğ. [45], iki adet 4-kollu 4-telli GKE yapısında seri-paralel aktif güç hat düzenleme yeteneğine sahip 3-faz bir UPS sistemi önermiştir. Ayrıca literatürde 4-kollu evirici yapısının kullanıldığı PAF [46-48], DSTATCOM [49,50] ve dinamik gerilim iyileştirici (Dynamic Voltage Restorer, DVR) [51,52] uygulamalarının bulunduğu da görülmüştür. Özellikle 3-kollu evirici yapısında meydana gelen kondansatör gerilimi dengeleme problemine çözüm olarak 4-kollu evirici yapıları önerilmektedir.

Farklı gerilim ve yapılardaki BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar; Han ve diğ. [53], BGKD için yeni bir konfigürasyon önermiştir. Çalışmada geleneksel BGKD uygulamalarında kullanılan SAF kısmında kullanılan enjeksiyon trafosu kullanılmayıp, onun yerine her bir faz için tam dalga köprü evirici devresi ile bağlanmış enjeksiyon kondansatörleri kullanılmıştır. BSPAF sistemi, çok sayıda evirici devresinin seri bağlanmasıyla orta gerilim uygulamalarında da kullanılabilir. Geethalakshmi ve Dananjayan [54], geleneksel BGKD'de DA-barada kullanılan kondansatörü kaldırarak sistemin dinamik analiz çalışmalarını yapmıştır. Çalışmada, simülasyonlarda elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin, akım harmoniklerinin giderilmesinde ve gerilim dalgalanmalarının düzeltilmesinde başarılı olduğuna değinilmiştir.

BSPAF sistemi ile periyodik olmayan dalga şekillerinin kompanzasyonuna yönelik çalışmalar; Fujita ve Akagi [55], BGKD ile gerilim flikeri/dengesizliği, reaktif güç, negatif sıralı akımlar ve harmoniklerin kompanzasyonunu yapmıştır. Elmitwally ve diğ. [56], birleşik güç kalite düzenleyicisini inceleyerek akım dengesizliği, akım harmonikleri, reaktif akım, gerilim regülasyonu, gerilim harmonikleri, gerilim dengesizlikleri, ve gerilim flikeri kompanzasyon işlevlerini yerine getirdiğini göstermişlerdir. Elnady ve diğ. [57], BGKD sistemi için büyük AA ark fırınları tarafından üretilen gerilim flikeri ve dengesizliklerini azaltan yeni bir strateji incelemektedir.

Graovac ve diğ. [58], evrensel güç kalite düzenleyici sistemini inceleyerek, çökmeler, yükselmeler, dengesizlik, harmonikler, reaktif akım ve akım dengesizliği ile ilgili kaynak gerilimi ve yük akımı bozulmalarını kompanze etmeyi amaçlamıştır.



Esfandiari ve diğ. [59], bir elektrik ark fırını besleyen sistemde güç kalitesini iyileştirmek için önerilen BGKD kontrol stratejisinin uygulamasını tartışmaktadır. Önerilen yöntemde gerilim referansları sinüs dalga şekli üretmek için faz kilitlemeli döngü (Phase Locked Loop, PLL) kullanılarak elde edilmektedir. Tüm sistemin sadece simülasyonu verilmekte ve önerilen denetim yönteminin geçerliliği değerlendirilmektedir.

Ayrıca literatürde, aktif ve aktif olmayan güç tanımlamalarının incelenmesi [60], periyodik olmayan akım dalga şekillerinin kompanzasyonunda anlık güç teorisinin kullanılması [13], periyodik olmayan akımların özellikleri, tanımlanması ve kompanzasyon temelleri [16], 3-faz sistemlerde anlık ve tam kompanzasyon [61], periyodik olmayan koşullarda aktif filtreler ve enerji depolama sistemlerinin işletilmesi [62], periyodik olmayan koşullarda modifiye edilen denetim tekniği ile bir paralel aktif güç düzenleyicisinin değerlendirmesi [63], tek-fazlı ve çok fazlı sistemlerde ve aynı zamanda periyodik olan ve/veya periyodik olmayan dalga şekillerinin kompanzasyonu için “genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi” önerilerek paralel kompanzasyon sisteminde uygulanması [64], genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisinin, hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan yük akım dalga şekillerinin kompanzasyonu amacıyla Statik kompanzatörde (Static Synchronous Compensator, STATCOM) uygulanması [65] çalışmalarının yapıldığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında güç kalitesi iyileştirmesi için ultra-kapasitörün enerji depolama sistemi olarak kullanımına yönelik çalışmalar; Byung ve Bae [66], gerilim kesintileri için doğru akım dönüştürücüsü üzerinden bağlı bir ultra-kapasitör devresinden oluşan 3-faz 3-telli BGKD sistemini önermiştir. Ayrıca ultra-kapasitörler, kısa süreli enerji kesintileri için PAF [67], güç kalitesi iyileştirme için DSTATCOM [68], güç sistem stabilizesini iyileştirmek için STATCOM [69], elektrik ark fırını fliker kompanzasyonu için STATCOM [70] uygulamalarında kullanılmıştır. Ayrıca literatürde ultra-kapasitörlerin enerji depolama amaçlı olarak, rüzgar enerjisi uygulamalarında [71], elektrikli ulaşım sistemleri uygulamalarında [72], motor sürücü uygulamalarında [73] kullanıldığı görülmektedir.

Ayrıca literatürde güç kalite düzenleyicileri konusunda yazılmış temel eserler de vardır [74,75]. Bu çalışmalarda aktif filtreler ve güç kalitesi iyileştirme yöntemleri detaylı biçimde anlatılmaktadır. Ülkemizde BSPAF sistemlerine yönelik çalışmalar [76-84] bulunmaktadır. Ayrıca SAF [85] ve PAF [86-90] ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

## **1.6. Tezin Amacı ve Önemi**

Elektrik güç sistemlerinde, değişken hızlı motor sürücüleri, hat komutasyonlu 3-fazlı tristör temelli doğrultucular, ark fırınları, kaynak makineleri, anahtarlamalı güç kaynakları gibi doğrusal olmayan yüklerin ve güç elektroniği dönüştürücülerinin yaygın kullanımı hem sinüzoidal hem de periyodik olmayan akımlar ve gerilimlerin artmasına ve dolayısıyla güç kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır.

Tez çalışmanın amacı; farklı şebeke ve yük çalışma koşullarında yüksek güç kalitesi sağlamak üzere, 3-fazlı 4-telli güç sistemleri için geliştirilen 3-faz 3-kollu ve 4-kollu BSPAF sistemi yapıları için denetim ve anahtarlama algoritmaları geliştirmek ve bu çalışmaları Matlab/Simulink simülasyonları ve BSPAF sisteminin tasarımı, laboratuvar prototipinin kurulması ve dSPACE DS1103 deneyleyici kartı üzerinden denetimi ile deneysel olarak gerçekleştirmektir. Ayrıca 3-fazlı BSPAF sistemi için önerilen 3-faz 4-kollu evirici yapısı ve bu yapıda kullanılan ultra-kapasitör ilavesi ile performans artışı incelenmiştir.

Literatür araştırmasına göre bilimsel çalışmalarda daha çok periyodik olan ve sinüzoidal olmayan akımların kompanzasyonunun dikkate alındığı görülmektedir. Önerilen BSPAF denetim sistemi ile periyodik olan ve sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının yanı sıra hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının kompanzasyonu amaçlanmaktadır.

Ülkemizde özellikle son yıllarda güç kalitesi ile ilgili problemlerin arttığı gözlemlenmektedir. Geliştirilen BSPAF sisteminin özellikle yüksek güç kalitesi gereksinimi bulunan kritik yüklerin yer aldığı bilgi işlem merkezleri ve hastane gibi

yerlerin elektrik giriş noktalarında kullanımı önem kazanmaktadır. Çalışma sonuçlarının ülkemizde geliştirilebilecek olan bu tip cihazların tasarımına katkı sağlaması beklenmektedir. Tez çalışmasını oluşturan bölümlerin ana hatları aşağıda kısaca sunulmaktadır.

Bu giriş bölümünden sonra ikinci bölümde tez çalışmasında kullanılan BSPAF sistemi yapıları incelenerek BSPAF sisteminin sürekli hal güç analizi verilmektedir.

Üçüncü bölümde, aktif olmayan güç teorileri incelenerek BSPAF sistemi yapıları için önerilen genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi detaylı olarak açıklanmaktadır.

Dördüncü bölümde, 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminde uygulanan akım ve gerilim denetim teknikleri açıklanmakta, Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmekte ve test platformunun kurulması açıklanarak deneysel sonuçlar verilmektedir.

Beşinci bölümde, 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinde uygulanan akım ve gerilim denetim teknikleri açıklanmakta, Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmekte ve test platformunun kurulması açıklanarak deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Altıncı bölümde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar vurgulanarak geleceğe yönelik öneriler ele alınmaktadır.

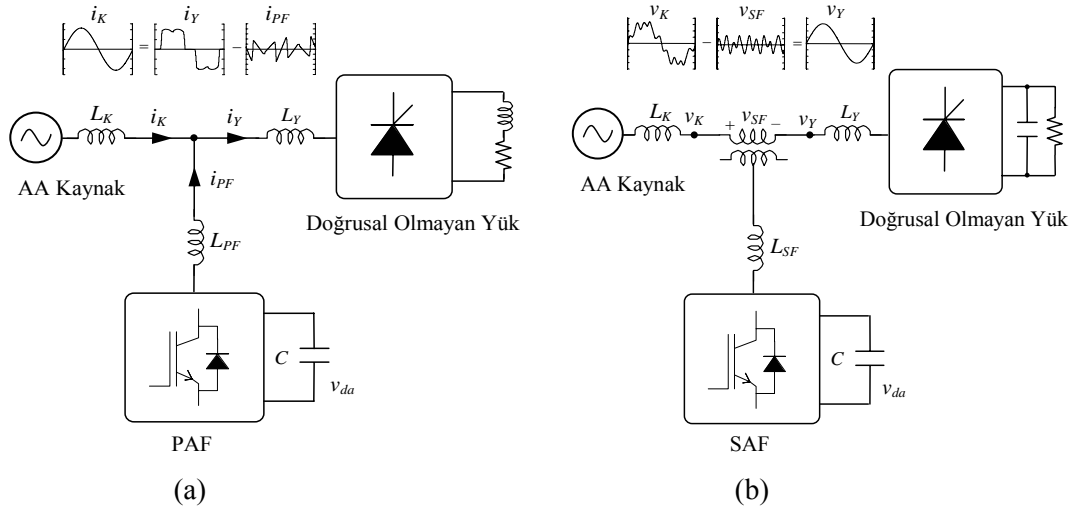
## 2. BİRLEŞİK SERİ-PARALEL AKTİF FİLTRE SİSTEMLERİ

Statik güç dönüştürücülerinin tüketiciler tarafından endüstriyel işlemlerde sıklıkla kullanımı elektrik güç şebekesindeki harmoniklerin artmasına yol açarak güç faktörünün de düşmesine neden olmaktadır. Bu tip bozulmalar, gerilim dalga şeklinin kalitesini bozarak elektronik ekipmanların güvenilirliğini etkilemektedir. Güç kalite problemlerine çözüm üretmek, güç sistemlerinin performansını ve kararlılığını artırmak için çok sayıda teknik ve cihaz önerilmekte ve uygulanmaktadır.

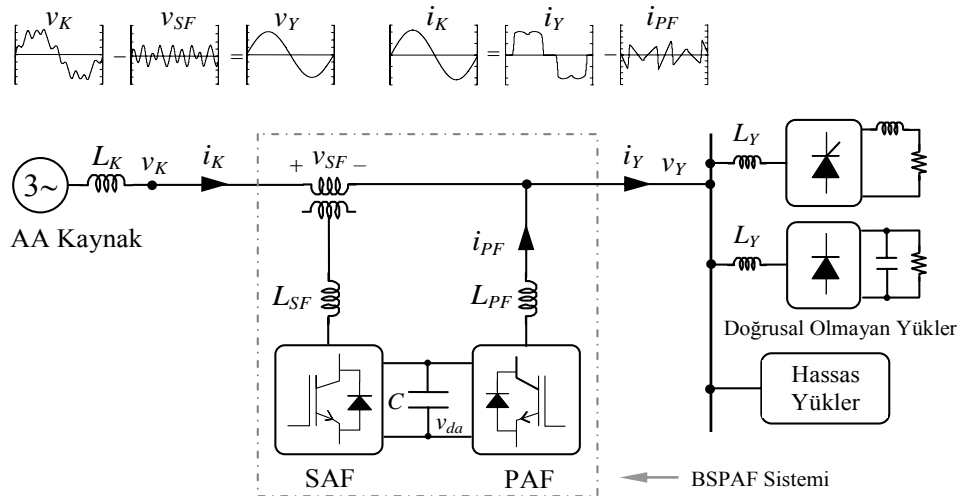
Geleneksel cihazlar, gerilim regülasyonu yapmak ve seri-paralel güç kondansatörleri ile güç faktör düzeltimi için kullanılmaktadır. Hat akımında görülen düşük değerli harmoniklerin (5., 7., 11., ...) kompanzasyonu ve dağıtım sistemine harmonik akımların akışını sınırlamak için pasif *LC* filtreler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ikinci dereceden pasif filtreler, seri ve paralel rezonans, ayar problemleri ve kompanze edilecek harmonik bileşen sayısı arttığında da karmaşıklık gibi dezavantajlara sahiptir. Ayrıca güç kalitesi problemlerini gidermek, aktif ve reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu yapmak için özel güç cihazları kullanılmaktadır. Gerilim regülasyon performansını artırmak, temel frekansta kalıcı durum ve anlık aktif ve reaktif güç kontrolü yapmak düzeltmek için gelişmiş esnek AA iletim sistemleri (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) sistemleri kullanılmaktadır. Diğer modern çözüm yöntemi olan ve güç kalitesi problemlerine geniş çaplı çözüm üreten BGKD sistemleri de önerilmektedir [3].

Günümüzde hibrit yapılarla birlikte kullanılabilen AF'ler, pasif filtrelere alternatif bir çözümdür. Aktif Filtreler sistem konfigürasyonuna göre SAF, PAF ve ikisinin birleşimi olan BSPAF olarak sınıflandırılabilir [91-93]. PAF, akım ile ilgili kompanzasyonlarda (akım harmonikleri, reaktif güç, akım dengesizliği, nötr akımı), SAF ise gerilim ile ilgili kompanzasyonlarda (gerilim harmonikleri, gerilim dengesizliği, çökme, yükselme, regülasyon, fliker vb.) kullanılmaktadır.

Şekil 2.1(a) ve Şekil 2.1(b)'de sırasıyla PAF ve SAF temel blok diyagramları gösterilmektedir. PAF, yüke paralel bağlanarak yük akımının harmoniklerini yok etmek, dengesizlik ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sisteme ters fazda ve eşit büyüklükte akımlar verir. Böylece kaynaktan çekilen akımların dalga şekli sinüzoidal yapılır. SAF, gerilim harmoniklerini yok etmek, çökme, yükselme, dengesizlik, gerilim regülasyonu ve fliker kompanzasyonu için kaynak ile yük arasında tek-fazlı transformatörler ile seri bağlanarak sisteme ters fazda eşit büyüklükte gerilimler verir. Böylece yüke uygulanan gerilim dalga şekli sinüzoidal yapılır. Hem akım hem de gerilimle ilgili kompanzasyonlarda ise SAF ve PAF'nin bir kombinasyonu olan BSPAF sistemleri kullanılmaktadır [91-93]. Şekil 2.2'de BSPAF sistemi blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.1: a) PAF b) SAF temel blok diyagramları



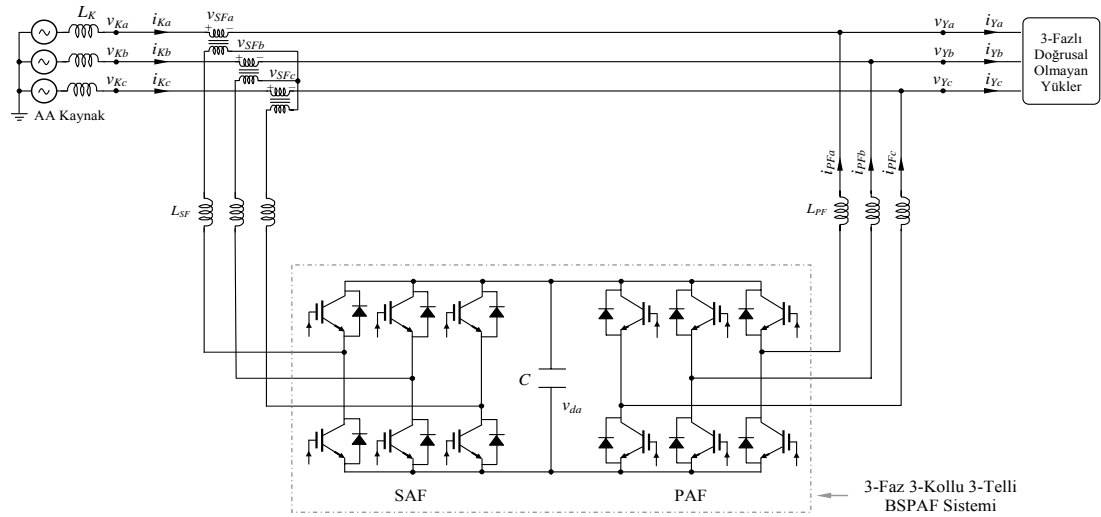
Şekil 2.2: BSPAF sistemi blok diyagramı

BSPAF sistemi, DA kondansatörüne bağlı iki GKE devresinden oluşmaktadır. Bu eviricilerden biri hatta seri bağlanarak kontrollü gerilim kaynağı, diğeri paralel bağlanarak kontrollü akım kaynağı olarak çalışmaktadır. Böylece kaynaktan çekilen akımların dalga şekli ve yüke uygulanan gerilim dalga şekli sinüzoidal olmaktadır. Bu sayede BSPAF sistemi ile üretim süreçlerinde, fabrikalar ve tesislerde üretkenliğin artırılması, etkinlik, güvenlik ve kalite unsurlarının iyileştirilmesi açısından oldukça iyi bir çözüm sunulmaktadır. BSPAF sistemini oluşturan SAF ve PAF birimlerinin fonksiyonları Tablo 2.1’de verilmektedir.

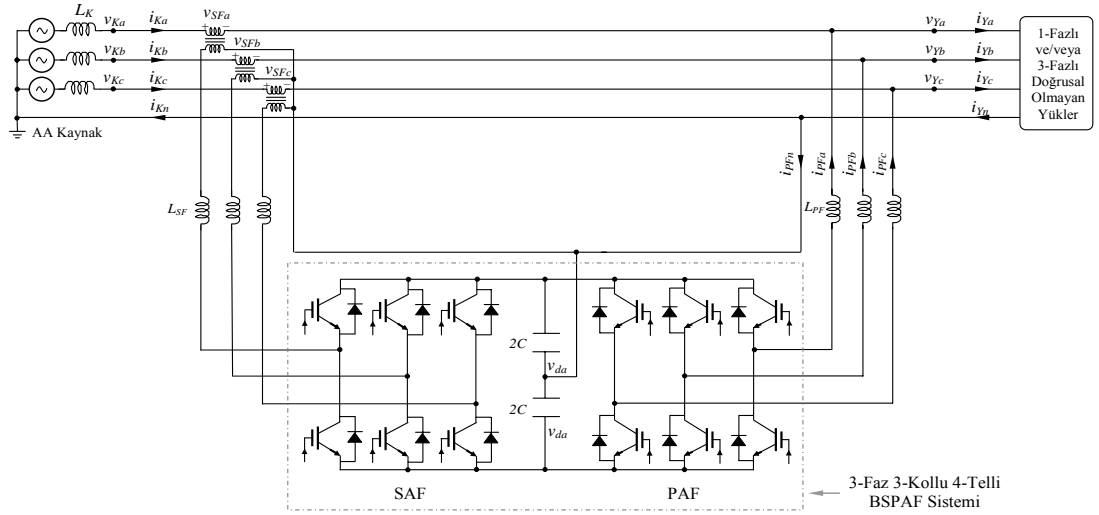
Tablo 2.1: BSPAF sistemini oluşturan SAF ve PAF birimlerinin fonksiyonları

SAF	PAF
Gerilim harmoniklerinin filtrelenmesi	Akım harmoniklerinin filtrelenmesi
Gerilim regülasyonu	Reaktif akım kompanzasyonu
Gerilim dengeleme	Akım dengeleme
Gerilim çökme, yükselme, dalgalanma kompanzasyonu	Nötr akımı kompanzasyonu
-	DA gerilim regülasyonu

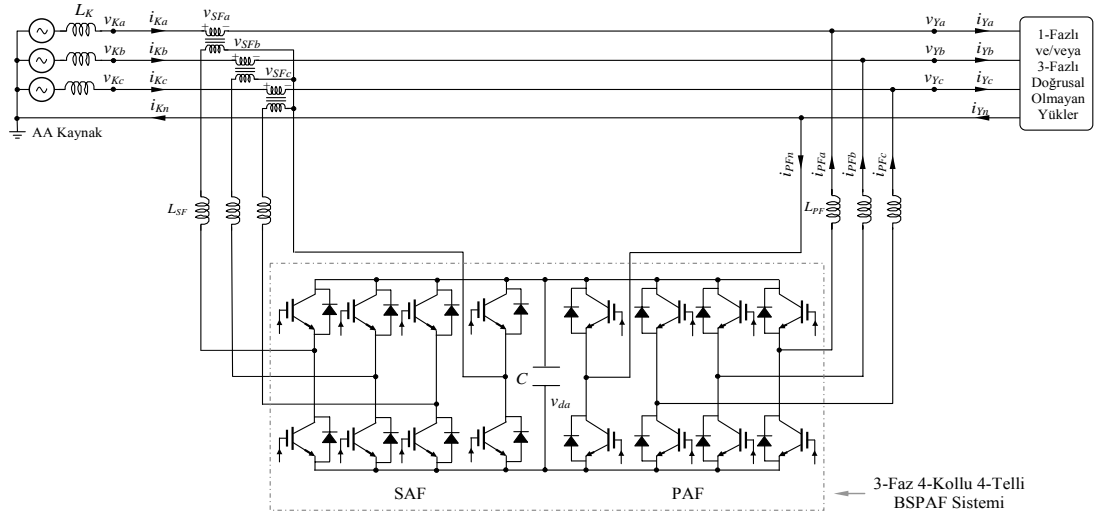
3-faz 3-telli 3-kollu BSPAF sistemi yapısı Şekil 2.3’de görülmektedir. 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı ve 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı sırasıyla Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3: 3-faz 3-telli BSPAF sistemi yapısı



Şekil 2.4: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı



Şekil 2.5: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi yapısı

Bu çalışmada geliştirilen BSPAF sistemi aşağıdaki özelliklere sahiptir.

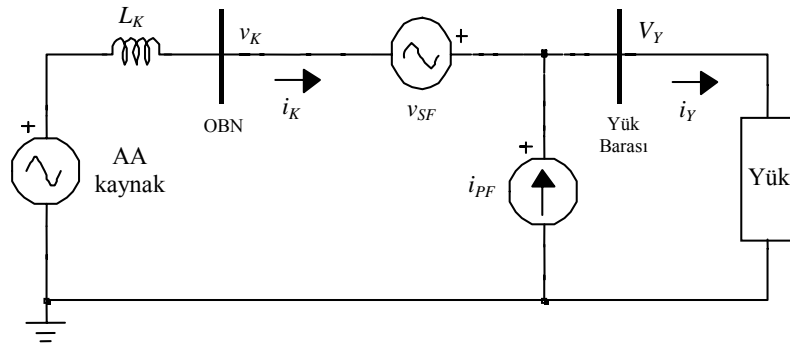
- Doğrusal olmayan yüklerin meydana getirdiği kaynak akımındaki harmonikleri en aza indirerek ederek şebeke akımı güç kalitesini iyileştirmektedir.
- Yükün gerektirdiği reaktif gücü sağlayarak, şebeke akım ve geriliminin sürekli aynı fazda olmasını sağlamakta böylece ilave güç faktörü düzeltme ekipmanlarına gerek duyulmamaktadır.
- Kaynak gerilim çökmesi durumunda yük gerilimi istenen değerde tutulabilmektedir.
- BSPAF sisteminin yük üzerinde verdiği gerilim DA-bara tarafından sağlandığı için SAF için gerekli DA-bara gerilim desteğinde ilave bir kondansatör gereksinimi

yoktur. İlave güç PAF tarafından sağlanmaktadır. Bu durumu tersine çevirmek için ilave DA-bara desteği ultra-kapasitör tarafından sağlandığında PAF güç gereksinimi azalmaktadır.

- İdeal olarak SAF’de kararlı halde aktif güç kaybı olmadığı kabul edildiğinde, düşük gerilim durumunda BSPAF sistemi ilave güç sağlayabilmektedir.

## 2.1. BSPAF Sisteminin Sürekli Hal Güç Analizi

Harmonik bileşenler nedeniyle oluşan güçler, temel bileşen güçlere göre küçük olduğundan BSPAF sisteminin sürekli hal işletim analizi yalnızca temel frekans bileşen temelinde yapılmaktadır [94]. BSPAF sisteminin eşdeğer devresi Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6: BSPAF sisteminin eşdeğer devresi

BSPAF, yük barasında gerilimin sürekli sinüzoidal ve istenilen genlikte olacak şekilde kontrol edilmektedir. Bu sebeple SAF tarafından enjekte edilen gerilim, kaynak gerilimi ile ideal yük gerilimi arasındaki farka eşit olmaktadır. Analizde yük gerilimi gerilim çökmesi ve yükselmesi durumunda da terminal gerilimi ile aynı fazda olduğu varsayılmaktadır. Bu durum gerilim çökmesi veya yükselmesi koşullarında kaynak gerilimi ile aynı fazda veya karşı fazda seri gerilimin enjektisi ile sağlanmaktadır. PAF DA hat gerilimini sabit tutmakta ve yük için gerekli reaktif gücü sağlamaktadır. Böylece kaynaktan yalnızca temel aktif güç sağlanmakta ve güç faktörü 1 olmaktadır.

Kaynak gerilimi ve yük geriliminin etkin değerleri sırasıyla  $V_K$  ve  $V_Y$ , kaynak ve yük akımlarının etkin değerleri sırasıyla  $I_K$  ve  $I_Y$  ile sembolize edilmektedir. SAF



tarafından enjekte edilen gerilim  $V_{SF}$ , PAF tarafından enjekte edilen akım  $I_{PF}$  ile gösterilmektedir. Yük geriliminin referans fazör ve yükün geri güç faktörüne sahip olduğu varsayılarak ( $\cos\phi_Y$ ),

$$V_Y = V_Y \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$I_Y = I_Y \angle -\phi_Y \quad (2.2)$$

$$V_K = V_Y(1+k) \angle 0^\circ \quad (2.3)$$

Burada  $k$  faktörü kaynak geriliminin dalgalanmasını tanımlamaktadır.

$$k = \frac{V_K - V_Y}{V_Y} \quad (2.4)$$

SAF tarafından enjekte edilen gerilim (2.5) denkleminde verilmektedir.

$$V_{SF} = V_Y - V_K = -kV_Y \angle 0^\circ \quad (2.5)$$

BSPAF kayıpsız olarak varsayıldığında yük tarafından talep edilen aktif güç, kaynak tarafındaki aktif güce eşit olmaktadır. BSPAF neredeyse 1 güç faktöründe kaynak akımı sağlamaktadır. Bu yüzden verilen yük durumu için kaynakta giriş güç faktörü aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir.

$$P_K = P_Y \quad (2.6)$$

$$V_{OBN} I_K = V_Y I_Y \cos\phi_Y \quad (2.7)$$

$$V_Y(1+k)I_K = V_Y I_Y \cos\phi_Y \quad (2.8)$$

$$I_K = \frac{I_Y}{1+k} \cos\phi_Y \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklemde kaynak akımı  $I_K$ ,  $\phi_Y$  ve  $I_Y$  yük karakteristikleri tipik bir yük çeşidi için sabit olduğundan  $k$  faktörüne bağlıdır. SAF tarafından çekilen kompleks güç;

$$S_{SF} = V_{SF} I_K^* \quad (2.10)$$

$$P_{SF} = V_{SF} I_K \cos \phi_K = -k V_Y I_K \cos \phi_K \quad (2.11)$$

$$Q_{SF} = V_{SF} I_K \sin \phi_K \quad (2.12)$$

$\phi_S = 0$ , BSPAF 1 güç faktörü sağladığı için;

$$P_{SF} = V_{SF} I_K = -k V_Y I_K \quad (2.13)$$

$$Q_{SF} \cong 0 \quad (2.14)$$

PAF tarafından çekilen kompleks güç;

$$S_{PF} = V_Y I_{PF}^* \quad (2.15)$$

PAF tarafından sağlanan akım, kaynak akımı ile yük akımı arasındaki farktır, bu akım yük harmonikleri akımını ve reaktif akım içermektedir.

$$I_{PF} = I_K - I_Y \quad (2.16)$$

$$I_{PF} = I_K \angle 0^\circ - I_Y \angle -\phi_L \quad (2.17)$$

$$I_{PF} = I_K - (I_Y \cos \phi_Y - j I_Y \sin \phi_Y) \quad (2.18)$$

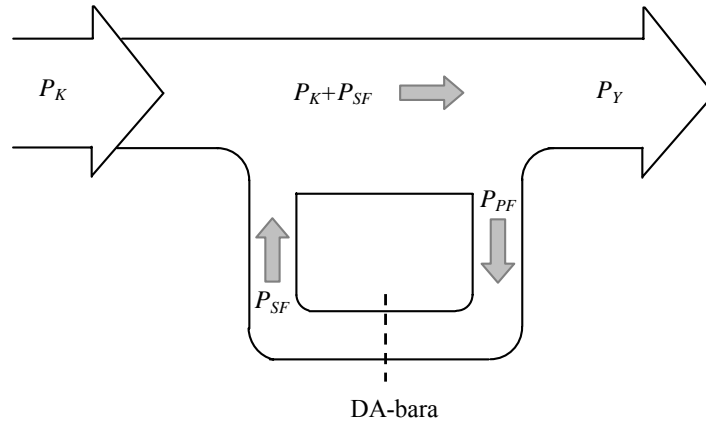
$$I_{PF} = (I_K - I_Y \cos \phi_Y) + j I_Y \sin \phi_Y \quad (2.19)$$

$$P_{PF} = V_Y I_{PF} \cos \phi_{PF} = V_Y (I_K - I_Y \cos \phi_Y) \quad (2.20)$$

$$Q_{PF} = V_Y I_{PF} \sin \phi_{PF} = V_Y I_Y \sin \phi_Y \quad (2.21)$$

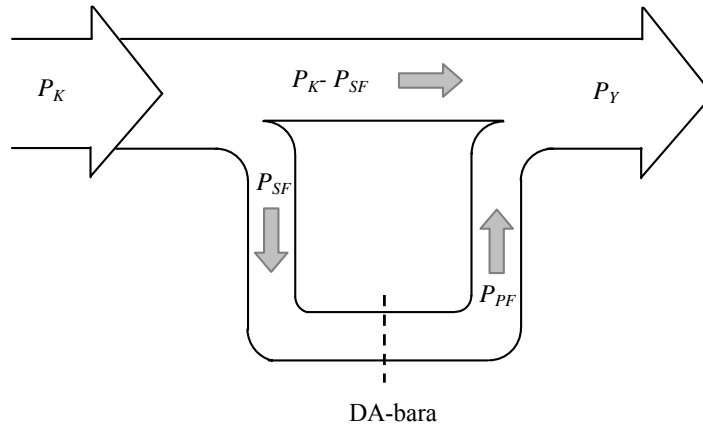
BSPAF kaynağa bağlandığında yük tarafından gerekli reaktif güç yalnızca PAF tarafından sağlanmaktadır. PAF, gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi ve harmonik kompanzasyonu koşullarında tüm reaktif gücü karşılamaktadır. Böylece reaktif güç kaynağı yüklememektedir. (2.14) denkleminde görüldüğü gibi SAF yük reaktif güç ihtiyacını karşılamada aktif görev üstlenmemektedir.

Gerilim çökmesi durumunda BSPAF sistemindeki aktif güç akışı Şekil 2.7’de görülmektedir. Kaynakta gerilim çökmesi meydana geldiğinde ( $V_K < V_Y$ ) (2.4) ve (2.13) denkleminde  $P_{SF}$  pozitif olmaktadır. Bu durumda SAF yük için aktif güç sağlamaktadır. PAF, DA hat gerilimini istenilen seviyede tutmak ve kaynakta güç dengesini sürdürmek için kaynaktan daha fazla akım çekmektedir. (2.9) denkleminde görüldüğü gibi kaynak akımı  $I_K$  normal değerinden daha büyük olmaktadır. Gerilim çökmesi durumunda aktif güç kaynaktan PAF’ye, PAF’den SAF’ye ve son olarak SAF’den yüke aktarılmaktadır. Böylece yük gerilim çökmesi durumunda bile nominal gücünde çalıştırılabilmektedir. Kaynaktan PAF tarafından çekilen aktif güç yük için SAF tarafından sağlanan aktif güce eşit olmaktadır.



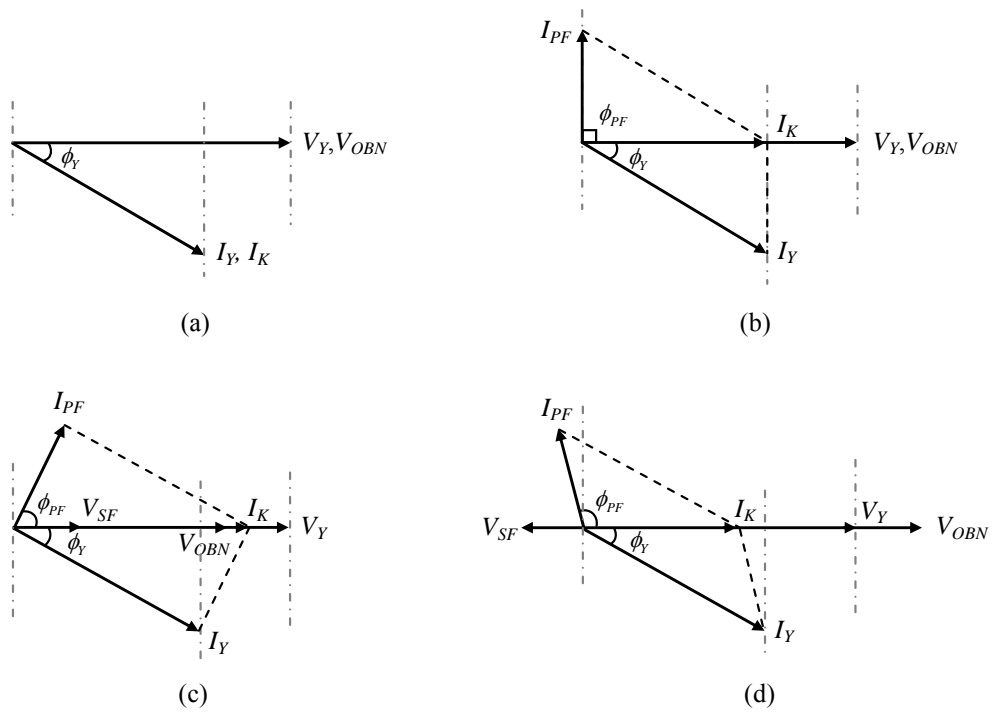
Şekil 2.7: Gerilim çökmesi durumunda aktif güç akışı

Gerilim yükselmesi durumunda BSPAF sistemindeki aktif güç akışı Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8: Gerilim yükselmesi durumunda aktif güç akışı

Kaynakta gerilim yükselmesi meydana geldiğinde ( $V_K > V_Y$ ) (2.4) ve (2.13) denkleminde  $P_{SF}$  negatif olmaktadır. Bu durumda SAF kaynaktan ekstra gerçek güç çekmektedir. Kaynak gerilimi  $V_K$  arttığı için DA hat gerilimi de artmaktadır. DA hat gerilimini sabit seviyede tutmak için PAF denetleyici kaynaktan çekilen akımı azaltır. Diğer bir ifadeyle BSPAF besleme sistemine ekstra güç vermektedir. (2.9) denkleminde kaynaktan çekilen akım  $I_K$  normal akımından daha az olacaktır. BSPAF sisteminin, normal kaynak gerilimi, çökme ve yükselme koşullarında çalışması fazör olarak Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Fazör gösterim a) kompanzasyon devre dışı b) reaktif güç kompanzasyonu c) gerilim çökmesi d) gerilim yükselmesi

Şekil 2.9a'da yük gerilimi  $V_Y$  referans fazör,  $\phi_Y$  yükün geri güç faktörü açısıdır. Normal kaynak gerilimi koşulu süresince hiçbir kompanzasyon yapılmadığı için  $I_K$  tamamen  $I_Y$ 'ye eşittir. BSPAF işleme alındığında PAF ileri akım enjekte ederek yükün gerekli reaktif güç ihtiyacını sağlamaktadır. Böylece kaynak akımı kaynak gerilimi ile aynı faza getirilir. Şekil 2.9b'de bu fazör diyagram gösterilmektedir. Gerilim çökmesi ve gerilim yükselmesi durumunda fazör gösterim sırasıyla Şekil 2.9c ve Şekil 2.9d'de gösterilmektedir.

Kaynak gerilimi ile kompanzasyon akım fazörünün sapması bu koşullarda PAF'ye biraz aktif güç akışı olduğunu belirtmektedir. Normal kaynak gerilimi koşulunda PAF yükün reaktif güç ihtiyacını karşılamakta iken SAF aktif veya reaktif güç taşımadığından, SAF'nin boyutu yük boyutlarının çok küçük bölümü olmaktadır. PAF'nin boyutlandırılması ise sağladığı kompanzasyon akımına yani yükün güç faktörü veya yük reaktif güç gereksinimine bağlıdır.

SAF boyutlandırması (2.4), (2.9) ve (2.13) denklemlerinden kaynak akımı  $I_K$  ve  $k$  faktörüne bağlıdır. Kaynak akımı, gerilim çökmesi koşulunda artar iken gerilim yükselmesi koşulunda azalmaktadır. Bu yüzden SAF boyutlandırmasında kompanze edilmesi gerekli gerilim çökme yüzdesi oldukça etkilemektedir. Gerilim çökmesi durumunda (2.9) denklemlerinden kaynak akımı arttığı için PAF oranı daha çok artmaktadır. Ayrıca, gerilim çökmesi ve yükselmesi kompanzasyonu süresince PAF'nin DA hat gerilimini sabit seviyede tutmak zorunda olması boyutlandırılmasını daha çok etkilemektedir.

Ultra-kapasitörler, çok hızlı şarj edilebilen, kısa sürede enerji verebilen, yüksek güç yoğunluğuna, çevrim yeteneğine ve mekanik sağlamlığa sahip elektrik enerjisi depolama elemanlarıdır [68]. BSPAF sistemi ile güç kalitesi bozukluklarının düzeltilmesi (gerilim çökmesi, gerilim regülasyonu vb.) anında gereken anlık enerji ihtiyacının, şebekeden ilave güç çekmek yerine ultrakapasitör modülleri tarafından sağlanabilmektedir.

### 3. GENELLEŞTİRİLMİŞ AKTİF OLMAYAN GÜÇ TEORİSİ

Bu bölümde anlık aktif olmayan güç teorileri incelenerek, avantaj ve dezavantajları özetlenmektedir. Tez çalışmasında BSPAF sisteminin denetimi için önerilen genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi detaylı olarak açıklanmaktadır.

#### 3.1. Aktif Olmayan Güç Teorileri

Doğrusal olmayan yükler nedeniyle akımlar ve aynı zamanda gerilim dalga şekilleri bozulmakta, sinüzoidalden uzaklaşmakta ve hatta bazen periyodik olmamaktadır. Bu akım ve gerilim dalga şekilleri tek-fazlı, çok fazlı, periyodik, periyodik olmayan, dengeli dengesiz olarak gruplanabilmektedir. Farklı aktif olmayan güç teorileri [95]'de kıyaslanmaktadır.

##### Fryze teorisi

Fryze 1931 yılında harmonikler ile sinüzoidal güç sistemleri için aktif olmayan güç tanımlamasını yapmıştır [96]. Fryze, akımı  $i(t)$  (3.1) ve (3.2) denklemlerinde tanımlandığı gibi, aktif akım  $i_a(t)$  (kaynak gerilimi  $v(t)$  ile aynı fazda) ve aktif olmayan akım  $i_n(t)$  olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır. Kaynak gerilimi  $v(t)$ 'nin etkin değeri ( $V$ )'dir ve (3.3) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$i_a(t) = \frac{P}{V^2} v(t) \quad (3.1)$$

$$i_n(t) = i(t) - i_a(t) \quad (3.2)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3.3)$$

Gerilimin etkin değeri ( $V$ ) ile akımın aktif olmayan bileşeninin etkin değerinin ( $I_n$ ) çarpımı Fryze'nin tanımlamış olduğu  $Q_F$  aktif olmayan güçtür ve (3.4) denklemi ile verilmiştir. Eğer sürekli halde gerilim ve akım dalga şekilleri sinüzoidal ise aktif olmayan güç tanımı ile standart reaktif güç tanımı benzerdir.

$$Q_F = VI_n \quad (3.4)$$

Sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekline sahip ideal bir sistemde, Fryze teorisi ile standart güç tanımlamaları benzerdir. Bu teori, harmonik içeren sistemlerde geçerlidir. Aktif akım  $i_a(t)$  ve aktif olmayan akım  $i_n(t)$  anlık değerler ise aktif olmayan güç  $Q_F$ , ortalama bir değerdir.

### **Endüktif ve kapasitif güç teorisi**

Kusters ve Moore 1980 yılında periyodik sinüzoidal olmayan dalga şekilleri için bir teori geliştirmiştir [97]. Aktif akım  $i_a(t)$  Fryze teorisi ile benzer şekilde tanımlanmaktadır. Fakat aktif olmayan akım endüktif (kapasitif) reaktif akım ve diğer akım olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Endüktif (kapasitif) akım yüke paralel bir kapasitor (endüktör) bağlayarak tamamen elimine edilebilmektedir. Bu sebeple teori tek-fazlı sistemlerde pasif kompanzasyon için uygulanabilmektedir.

### **Anlık çok fazlı akımlar teorisi**

Willems [98] anlık çok fazlı akım teorisini, Rossetto ve Tenti [99] anlık dik akım, Peng ve Lai [100] 3-faz sistemler için geliştirilmiş anlık reaktif güç teorisini ve Dai ve diğ. [101] çok fazlı sistemler için anlık reaktif çokluk gibi birbirine benzer teorileri sunmuşlardır. Bu teorilerde, Fryze'nin teorisi çok fazlı sistemlere genişletilmiş ve ortalama değerler yerine anlık değerler kullanılmıştır. Çok fazlı bir sistemde gerilim ve akım vektörleri,

$$v(t) = [v_1, v_2, v_3 \dots v_m]^T \quad (3.5)$$

$$i(t) = [i_1, i_2, i_3 \dots i_m]^T \quad (3.6)$$

burada  $m$  faz sayısıdır. Anlık aktif akım (3.7) denklemini ile tanımlanmaktadır.

$$i_p(t) \equiv \frac{v^T i}{v^T v} v \quad (3.7)$$

Anlık aktif olmayan akım aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır. Burada aktif akım  $i_p(t)$  ve aktif olmayan akım  $i_q(t)$  birbirine diktir.

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t) \quad (3.8)$$

[100] ve [101]'de tanımlanan teorilerin [98] ve [99]'da tanımlanan teorilerden farkı anlık aktif olmayan gücün tanımlanmasıdır. [100] ve [101]'de aktif olmayan güç gerilim vektörü ve akım vektörünün vektörel çarpımıdır. [100]'de önerilen teori ise yalnızca nötr hatlı veya nötr hatsız 3-faz sistemlerde uygulanabilmektedir. Bu teorilerde gerilim dalga şekilleri sinüzoidal ve dengeli varsayılmaktadır. Akım ise anlık ve periyodik dalga şekilleri ile sınırlı değildir. Fakat bu teori,  $i(t)$  akımı harmonik bileşenlere sahip ise, temel bileşen ve bir harmonik veya farklı frekanslarda iki harmonik bileşen arasındaki çarpımdan dolayı  $i(t)$  akım harmonik bileşenlerinden farklı frekanslarda harmonik bileşenler üretmektedir.

### ***p-q* teorisi**

Akagi ve diğ. 1984 yılında 3-faz sistemler için *p-q* teorisi olarak bilinen anlık reaktif güç teorisini önermiştir [102]. *p-q* teorisi ilk olarak 3-faz 3-telli sistemler için geliştirilmiş, sıfır sıra bileşenlerin eklenmesiyle genişletilerek de 3-faz 4-telli sistemlerde kullanılmıştır. *p-q* teorisi, (3.9) ve (3.10) denkleminde görüldüğü gibi  $a$ - $b$ - $c$  koordinatlarındaki üç fazlı akım ve gerilimlerin,  $\alpha$ - $\beta$ -0 koordinatlarına dönüşümünden (Clarke dönüşümü) ve sonrasında anlık güç bileşenlerinin hesaplanmasından oluşmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$



$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Anlık gerçek güç ( $p$ ), anlık sanal güç ( $q$ ) ve anlık sıfır sıralı güç ( $p_0$ ) (3.11) denklemindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Anlık gerçek ve sanal güç, AA ve DA bileşenler içermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Bu teoride 3-faz kaynak gerilimi sinüzoidal ve dengeli varsayılmaktadır. Fakat gerçekte güç sistemlerinde gerilimde bozulmalar vardır ve eğer aktif olmayan güç kompanzasyon sisteminde uygulandığında  $p$ - $q$  teorisi hatalı çalışmaktadır [103].

### ***p-q-r* teorisi**

Kim ve diğ. iki dönüşüm temeline dayanan  $p$ - $q$ - $r$  teorisini önermektedir [104]. Gerilimler ve akımlar ilk olarak  $a$ - $b$ - $c$  koordinatlarından  $\alpha$ - $\beta$ -0 koordinatlarına ve sonrasında  $\alpha$ - $\beta$ -0 koordinatlarından  $p$ - $q$ - $r$  koordinatlarına dönüştürülmektedir. Bu teori 3-faz 4-telli sistemlerde de geçerli olduğundan, sistem gerilimi dengesiz ve harmonik bileşenler içerse bile nötr akımı tamamen elimine edilebilmektedir.

Bu teorilere ilave olarak Depenbrock [105] tarafından geliştirilen Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) metodunda aktif akım ve aktif olmayan akım tanımlamaları, Fryze teorisinin çok fazlı sistemlere genişletilmesiyle elde edilmiştir. Bu teoride ortalama değerler kullanıldığından aktif olmayan akımın kompanzasyonu ancak sürekli hal koşullarında mümkün olmaktadır. Enslin ve Van Wyk, Fryze teorisini

[96] tek-fazlı periyodik olmayan sistemlere uyarlamaktadır [106]. Bu teoride periyodik olmayan bir sistem için bir zaman aralığı  $\Delta T$  tanımlanmaktadır. Aktif akım ve aktif olmayan akım bu zaman aralığına göre belirlenmektedir.

### Ferrero ve Superti-Furga park güç teorisi

Park sanal gücün (anlık aktif olmayan güç) tanımlanması dışında  $p-q$  teorisi [102] ile benzerdir [107]. Ayrıca Fryze teorisi 3-faz 3-telli sisteme genişletilmiştir. Nabae ve Tanaka [108] gerilim ve akım uzay vektörlerini kutupsal koordinatlarda tanımlamaktadır. 3-faz sistemler ile de sınırlıdır. Akım ve güç tanımlamalarında sistem gerilimi temel frekansta ve dengeli olarak varsayılmaktadır. Tablo 3.1’de zaman bölgesinde aktif olmayan güç teorileri özetlenmektedir.

Tablo 3.1: Zaman bölgesinde aktif olmayan güç teorilerinin karşılaştırılması

Teori	Fazlar			Zaman Periyodu		Sistem Gerilimi	Akım Dalga şekilleri		
	1	3	m	Ortalama	Anlık		Temel	Harmonik	Periyodik olmayan
Fryze teorisi [96]	√			√		a	√	√	
Endüktif ve kapasitif güç [97]	√			√		a	√	√	
Anlık çok fazlı akımlar [98]-[101]		√	√		√	b	√	√	
$p-q$ teorisi [102]		√			√	b	√	√	
$p-q-r$ teorisi [104]		√			√	c	√	√	
FBD metodu [105]		√	√	√		b	√	√	
Tek-fazlı periyodik olmayan [106]	√			√		d	√	√	√
Park güç [107]		√			√	b	√	√	
Nabae ve Tanaka [108]		√			√	b	√		

Tablo 3.1’de sistem gerilimi a) sinüzoidal dalga şekli b) sinüzoidal dalga şekli ve dengeli c) periyodik fakat sinüzoidal olmayan dalga şekli d) herhangi bir dalga şekli olarak varsayılmaktadır.

### 3.2. Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi

Bu bölümde, hem periyodik hem de periyodik olmayan yük akım ve kaynak gerilim dalga şekli bozukluklarının kompanzasyonu amacıyla kullanılan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi açıklanmaktadır. Genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi [64] Fryze'nin aktif olmayan güç/akım görüşüne [96] dayanmakta ve [109]'da önerilen teorinin genişletilmesidir [65]. m-fazlı bir sistemde gerilim vektörü  $v(t)$  ve akım vektörü  $i(t)$ , (3.13) ve (3.14) denkleminde verilmektedir.

$$v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_m(t)]^T \quad (3.13)$$

$$i(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_m(t)]^T \quad (3.14)$$

Anlık güç  $p(t)$  ve  $[t-T_c, t]$  zaman aralığında ortalama güç  $P(t)$  sırasıyla (3.15) ve (3.16) denkleminde gösterilmektedir.

$$p(t) = v^T(t) i(t) = \sum_{k=1}^m v_k(t) i_k(t) \quad (3.15)$$

$$P(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p(\tau) d\tau \quad (3.16)$$

3-fazlı bir sistemde anlık aktif akım  $i_a(t)$  ve anlık aktif olmayan akım  $i_n(t)$  sırasıyla (3.17) ve (3.18) denklemlerindeki gibi belirlenmektedir.

$$i_a(t) = \frac{P(t)}{V_r^2(t)} v_r(t) \quad (3.17)$$

$$i_n(t) = i(t) - i_a(t) \quad (3.18)$$

Bir gerilim vektörünün  $v(t)$  ve etkin değeri  $V(t)$  (3.19) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$V(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v^T(\tau) v(\tau) d\tau} \quad (3.19)$$

Referans gerilim  $v_r(t)$  ve etkin değeri  $V_r(t)$  (3.20) denkleminde verilmektedir.

$$V_r(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v_r^T(\tau) v_r(\tau) d\tau} \quad (3.20)$$

Anlık aktif güç  $p_a(t)$  ve anlık aktif olmayan güç  $p_n(t)$  aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$p_a(t) = v^T(t) i_a(t) = \sum_{f=1}^m v_f(t) i_{af}(t) \quad (3.21)$$

$$p_n(t) = v^T(t) i_n(t) = \sum_{f=1}^m v_f(t) i_{nf}(t) \quad (3.22)$$

Akım  $i(t)$ , aktif akım  $i_a(t)$  ve aktif olmayan akım  $i_n(t)$  etkin değerleri sırasıyla aşağıda verilmektedir.

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t i^T(\tau) i(\tau) d\tau} \quad (3.23)$$

$$I_a(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t i_a^T(\tau) i_a(\tau) d\tau} \quad (3.24)$$

$$I_n(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t i_n^T(\tau) i_n(\tau) d\tau} \quad (3.25)$$

$[t-T_c, t]$  aralığında ortalama aktif güç  $P_a(t)$ , ortalama aktif olmayan güç  $P_n(t)$  sırasıyla (3.26) ve (3.27) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$P_a(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p_a(\tau) d\tau \quad (3.26)$$

$$P_n(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p_n(\tau) d\tau \quad (3.27)$$

Görünür güç  $S(t)$ , aktif güç  $P_a(t)$  ve aktif olmayan güç  $Q(t)$  aşağıda tanımlanmaktadır.

$$S(t) = V(t)I(t) \quad (3.28)$$

$$P_a(t) = V(t)I_a(t) \quad (3.29)$$

$$Q(t) = V(t)I_n(t) \quad (3.30)$$

Ortalama zaman aralığı  $T_c$  ve referans gerilim  $v_r(t)$  genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisinde kullanılan iki önemli parametredir. Ortalama zaman aralığı  $T_c$ 'nin değeri, periyodik veya periyodik olmayan dalga şekillerinin kompanzasyonu amacına göre sıfırdan sonsuza kadar belirlenebilmekte ve farklı  $T_c$  değerleri için aktif akım ve aktif olmayan akım farklı karakteristiklere sahip olmaktadır [95]. Temel bileşen periyodu  $T$  olan periyodik akımların kompanzasyonu için  $T_c$  ortalama zaman aralığını  $T/2$ 'nin katı seçmek yeterli olmaktadır [64].  $T_c$  seçimi aşağıda verilmektedir.

A.  $T_c=0$  seçildiğinde ortalama güç tanımları anlık güçler ile benzerdir. Etkin değer tanımları (3.31) denkleminde verildiği gibi farklı biçimdedir.

$$V_r(t) = v_r^T(t)v_r(t) \quad (3.31)$$

Anlık aktif akım  $i_a(t)$  ve anlık aktif olmayan akım  $i_n(t)$  tanımları (3.17) ve (3.18) denklemleri ile benzer şekildedir. Eğer  $v_r(t) = v(t)$  ise anlık aktif güç  $p_a(t)$  anlık güç  $p(t)$ 'ye eşit ve anlık aktif olmayan güç  $p_n(t)$  sıfır olmaktadır. Tek fazlı bir sistemde anlık aktif akım  $i_a(t)$  her zaman  $i(t)$  akımına eşit ve anlık aktif olmayan akım  $i_n(t)$  her zaman sıfır olmaktadır. Bu nedenle  $T_c=0$  tek fazlı sistemler için uygun değildir.

B. Bir çok uygulamada  $T_c$  sonlu bir değer seçilmektedir.  $T$  periyotlu periyodik bir sistemde akım ve gerilim harmoniklerini kompanze etmek için  $T_c$ ,  $T/2$  olarak seçilmektedir [64]. Eğer  $v_r(t)$   $T$  periyotlu periyodik bir dalga şekli seçilirse ortalama güç  $P(t)$  ve etkin gerilim değeri  $V_r(t)$  sabit değer olmaktadır. Anlık aktif akım  $i_a(t)$  referans gerilim ile orantılı ve benzer şekilde olmaktadır.

C.  $T_c$  sonsuz seçildiğinde ise akımın periyodik olmayan bileşeni tamamen kompanze edilebilmektedir. Fakat gerçek bir güç sistemi uygulamasında  $T_c$  değerini sonsuz seçmek uygulanabilir olmadığı için sonlu bir değer seçilmektedir. Aktif olmayan güç kompanzasyonunda  $T_c$  kabul edilebilir kompanzasyon sonuçları ve maliyet arasındaki dengeye bağlı olarak genellikle temel periyodun 1-10 katı seçilmektedir.

Referans gerilim  $v_r(t)$  ise pratikte  $v(t)$  gerilimine,  $i(t)$  akımına ve istenilen  $i_a(t)$  aktif akımına bağlı olarak seçilmektedir [95].  $v_r(t)$  seçimi aşağıda verilmektedir.

A.  $v(t)$  sinüzoidal ise ya da aktif akım  $i_a(t)$ 'nin,  $v(t)$ 'nin dalga şekliyle aynı olması istendiğinde,  $v_r(t) = v(t)$  olarak seçilmektedir.

B. Güç sistemlerinde  $v(t)$  harmonikli ve/veya dengesizse ve sinüzoidal bir  $i_a(t)$  istenirse; o zaman  $v_r(t)$ ,  $v(t)$ 'nin pozitif sıralı temel bileşeni  $v_f(t)$  olarak seçilmektedir ( $v_r(t) = v_f(t)$ ). Böylece  $i_a(t)$  dengeli ve harmonik içermemektedir.

Genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi, ortalama zaman aralığını  $T_c$  ve referans gerilim  $v_r(t)$ 'yi değiştirerek tek fazlı sistemler, sinüzoidal olmayan sistemler ve periyodik olmayan sistemler gibi diğer farklı durumlar için de geçerli olmaktadır ve aşağıdaki özelliklere sahiptir [109].

- i. Farklı kompanzasyon hedeflerini karşılayabilme esnekliği,
- ii. Sinüzoidal olmayan ve periyodik olmayan sistemler için geçerli olması,
- iii. Tek fazlı ve çok fazlı sistemler için geçerli olmasıdır.

Tablo 3.2'de farklı referans gerilimi ve zaman aralıklarının seçilmesiyle farklı kaynak akımlarının elde edildiği görülmektedir. Bu teoride tüm tanımlamalar anlık olarak verildiğinden gerçek zamanlı denetim için uygun olmaktadır.

Tablo 3.2: Farklı kompanzasyon amaçları için parametreler

<b>Kompanzasyon Amaçları</b>	$v_r(t)$	$T_c$	<b>Elde edilen Kaynak Akımları</b>
Tek veya çok fazlı reaktif akım	$v$	$T/2, T$	Sinüzoidal kaynak gerilimi için birim güç faktörü ve sinüzoidal dalga şekli
Tek veya çok fazlı reaktif akım ve harmonik akım	$v_f$	$T/2, T$	Kaynak gerilimi bozulumu dikkate alınmaksızın birim güç faktörü ve sinüzoidal dalga şekli
Çok fazlı sistem için anlık reaktif güç	$v$	$T_c \rightarrow 0$	Çok fazlı sistemler için anlık birim güç faktörü
Periyodik olmayan bozuk akım	$v_f$	$nT$	Azalan genlik ve birim güç faktörü ile yaklaşık sinüzoidal dalga şekli
Alt harmonik akım	$v_f$	$nT$	Saf sinüzoidal dalga şekli veya birim güç faktörü ile yuvarlatılmış sinüzoidal dalga şekli
Stokastik (rasgele) periyodik olmayan akım	$v_f$	$nT$	Birim güç faktörü ile yuvarlatılmış sinüzoidal dalga şekli

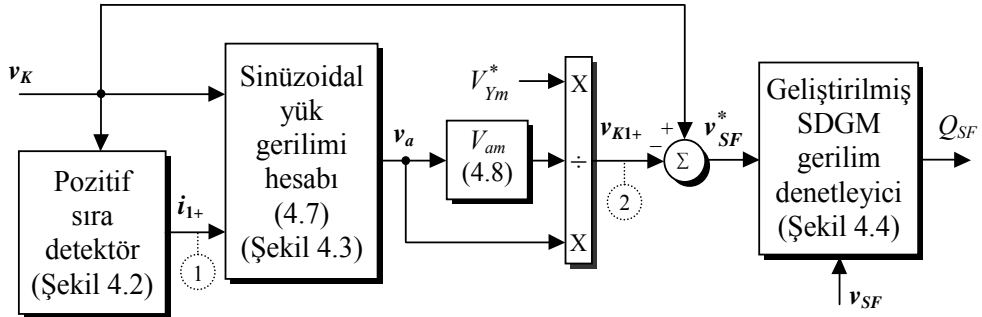
## 4. 3-FAZ 3-KOLLU 4-TELLİ BSPAF SİSTEMİ

### 4.1. Denetim Tekniği

Bu bölümde, 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin SAF ve PAF birimlerinde denetim tekniği olarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisinin kullanımı detaylı olarak açıklanmaktadır.

#### 4.1.1. SAF denetim tekniği

SAF denetim blok diyagramı Şekil 4.1’de görülmektedir. SAF denetim stratejisinde, pozitif-sıra detektör, geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi için referans akım  $i_r(t)$  olarak kullanılacak yardımcı denetim sinyallerini ( $i_{a1+}$ ,  $i_{b1+}$ ,  $i_{c1+}$ ) üretmektedir.



Şekil 4.1: SAF denetim blok diyagramı

Pozitif-sıra detektör blok diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Temel frekans  $\omega_1$  ( $2\pi 50$ ), birim genlikte  $\sin(\omega_1 t)$  ve  $\cos(\omega_1 t)$  sinyallerini üretmek için bir sinüs dalga üreticinde kullanılmaktadır. Pozitif-sıra detektörün girişleri kaynak gerilimleri ( $v_{Ka}$ ,  $v_{Kb}$ ,  $v_{Kc}$ )’dir. Bu gerilimler, temel frekansta dönen  $\omega_1$  referans çerçeve ile (4.1) denklemi kullanılarak senkron  $dq$  referans çerçeveye dönüştürülmektedir.

$$v_{Kdq} = T_{abc}^{dq} v_{Kabc} \quad (4.1)$$



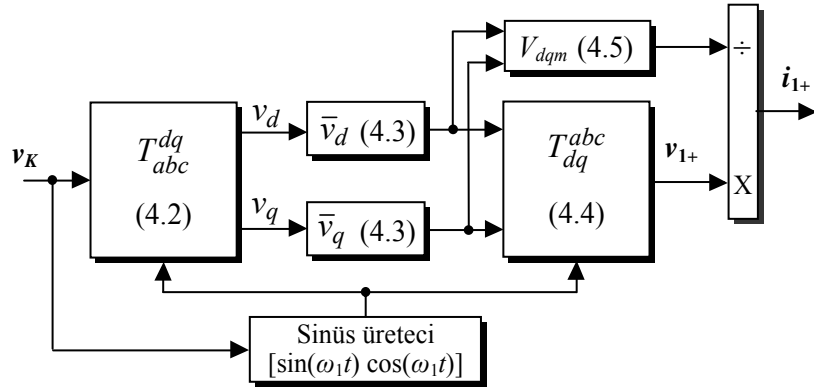
Buradaki  $abc$ 'den  $dq$ 'ya dönüşüm matrisi (4.2) denkleminde verilmektedir.

$$T_{abc}^{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t) & \sin(\omega_1 t - 120^\circ) & \sin(\omega_1 t + 120^\circ) \\ \cos(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t - 120^\circ) & \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

(4.3) denklemi ile  $d$  ve  $q$  eksenlerinde DA bileşenler elde edilmekte ve (4.4) denklemi kullanılarak  $abc$  referans yapıya tekrar dönüştürülerek kaynak gerilimlerinin temel pozitif-sıralı bileşeni  $v_{1+}(t)$  elde edilmektedir.

$$\bar{v}_{d,q} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v_{d,q} dt \quad (4.3)$$

$$v_{abc1+} = T_{dq}^{abc} \bar{v}_{d,q}; \quad (T_{dq}^{abc} = T_{abc}^{dq})^{-1} \quad (4.4)$$



Şekil 4.2: Pozitif sıra detektör blok diyagramı

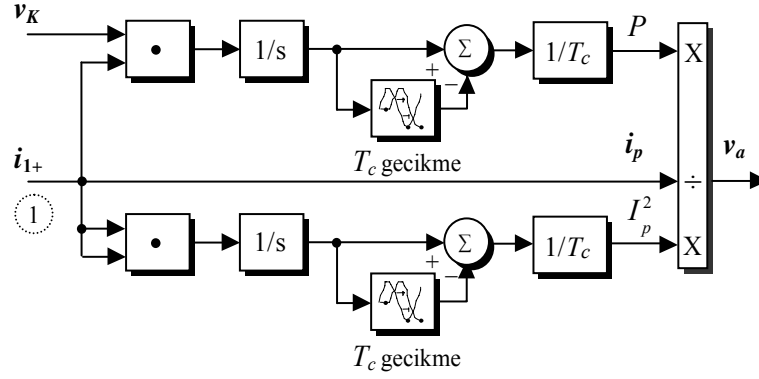
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi  $v_{1+}(t)$  (4.5) denklemi kullanılarak  $V_{dqm}$  genliğine bölünmekte ve böylece kaynak gerilimlerinin temel pozitif-sıralı bileşeni ( $v_{Ka1+}$ ,  $v_{Kb1+}$ ,  $v_{Kc1+}$ ) ile aynı fazda birim genliğe sahip yardımcı denetim sinyalleri ( $i_{a1+}$ ,  $i_{b1+}$ ,  $i_{c1+}$ ) olan referans akım  $i_r(t)$  sinyalleri elde edilmektedir. Aynı zamanda bu referans akımın  $i_r(t)$  etkin değeri  $I_r(t)$  (4.6) denkleminde verilmektedir.

$$V_{dqm} = \sqrt{\bar{v}_d^2 + \bar{v}_q^2} \quad (4.5)$$

$$I_r(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t \mathbf{i}_r^T(\tau) \mathbf{i}_r(\tau) d\tau} \quad (4.6)$$

Kaynak gerilimleri ( $v_{Ka}$ ,  $v_{Kb}$ ,  $v_{Kc}$ ) ve referans akımlar ( $i_{a1+}$ ,  $i_{b1+}$ ,  $i_{c1+}$ ) kullanılarak [ $t-T_c$ ,  $t$ ] ortalama zaman aralığında ortalama güç değeri  $P(t)$  (3.16) denklemi ile hesaplanmaktadır. Sinüzoidal yük gerilimi  $v_a(t)$  (4.7) denklemi ile elde edilmektedir [111]. Şekil 4.3’de SAF denetiminde uygulanan sinüzoidal yük gerilimi hesaplama blok diyagramı görülmektedir.

$$v_a(t) = \frac{P(t)}{I_r^2(t)} i_r(t) \quad (4.7)$$



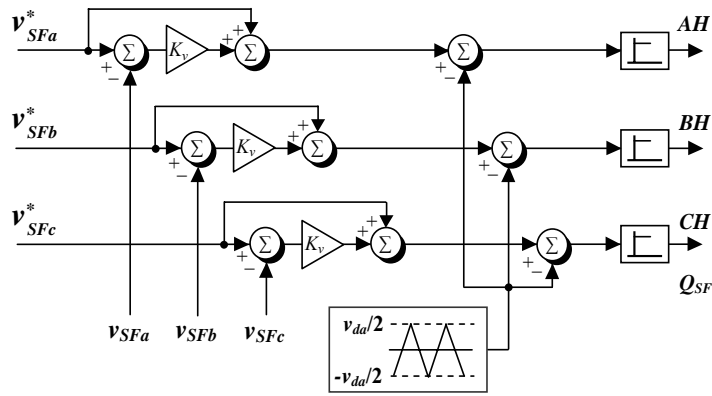
Şekil 4.3: Sinüzoidal yük gerilimi hesaplama blok diyagramı

Nominal yük gerilimini  $v_{K1+}$  elde etmek için Şekil 4.1’de görüldüğü gibi sinüzoidal yük gerilimi  $v_a(t)$  (4.8) denklemi kullanılarak  $V_{am}$  genliğine bölünmekte ve nominal yük gerilimini genliği  $V_{Ym^*}$  ile çarpılmaktadır. Daha sonra kaynak geriliminden nominal yük gerilimi çıkarılarak (4.9) denklemi ile SAF’nin kompanzasyon gerilim referansları ( $v_{SFa^*}$ ,  $v_{SFb^*}$ ,  $v_{SFc^*}$ ) elde edilmektedir.

$$V_{am} = \frac{2}{3} \sqrt{v_{aa}^2 + v_{ab}^2 + v_{ac}^2} \quad (4.8)$$

$$v_{SF}^*(t) = v_K(t) - v_{K1+}(t) \quad (4.9)$$

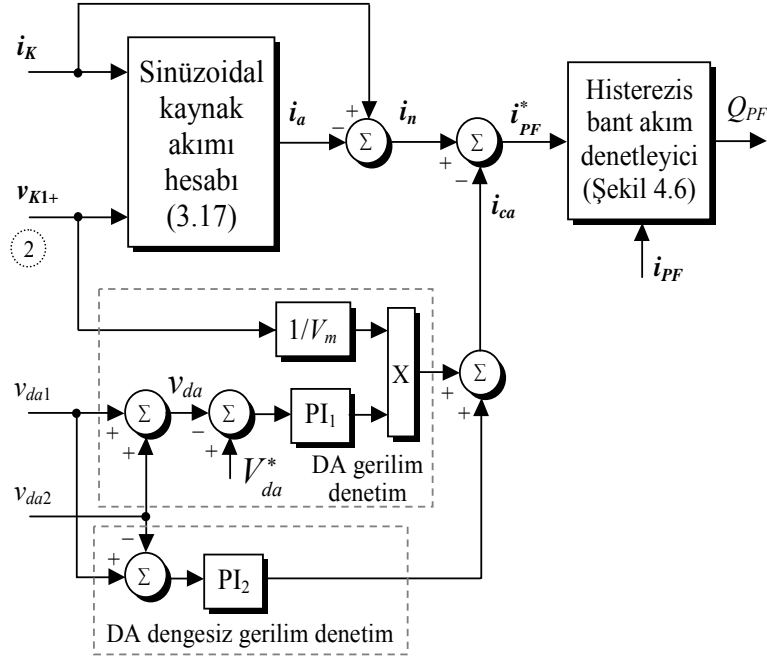
SAF gerilim denetimi geliştirilmiş Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) tekniği ile gerçekleştirilmektedir. 3-kollu 4-telli seri GKE için uygulanan geliştirilmiş SDGM blok diyagramı Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Referans gerilimler ile ölçülen SAF gerilimleri arasındaki sapmayı en aza indirmek için ölçülen SAF gerilimlerinden geri besleme alınmaktadır [34]. Referans gerilim değeri ve ölçülen SAF gerilim değeri arasındaki hata  $K_v$  kazancı ile çarpılmakta ve referans gerilim değeri ile toplanarak SDGM'ye uygulanmaktadır. Böylece SAF anahtarlama sinyalleri  $Q_{SF}$  üretilmektedir.



Şekil 4.4: Geliştirilmiş SDGM blok diyagramı

#### 4.1.2. PAF denetim tekniği

PAF denetim blok diyagramı Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Yük akımları ( $i_{Ya}, i_{Yb}, i_{Yc}$ ) ve temel pozitif-sıralı kaynak gerilimleri ( $v_{Ka1+}, v_{Kb1+}, v_{Kc1+}$ ) kullanılarak  $[t-T_c, t]$  ortalama zaman aralığında ortalama güç değeri  $P(t)$  (3.16) denklemi ile hesaplanmaktadır. İstenilen sinüzoidal kaynak akımları ( $i_{Ya1+}, i_{Yb1+}, i_{Yc1+}$ ) (3.17) denklemi kullanılarak elde edilmektedir. Anlık aktif olmayan akım  $i_n(t)$  (3.18) denklemi ile hesaplanmaktadır. BSPAF sisteminin güç kayıplarını ve geçici durumlarda DA gerilim dalgalanmalarını kompanze etmek için gereken ilave aktif akım  $i_{ca}(t)$  (4.10) denkleminde verildiği gibi ölçülen DA-bara gerilimi  $v_{da}$  değerini referans gerilimi  $V_{da}^*$  değerine regüle ederek kaynaktan çekilmektedir. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi  $PI_1$  denetleyicisi DA-bara gerilimini  $v_{da}$  regüle etmek için kullanılmaktadır. Ölçülen DA-bara gerilimi ve referans DA-bara gerilimi arasındaki fark  $PI_1$  denetleyicisine uygulanmaktadır. Elde edilen çıkış 3-faz birim genliğe sahip temel sinüzoidal dalga ile çarpılmaktadır.



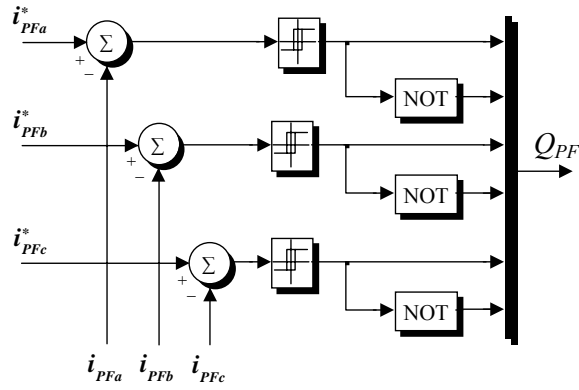
Şekil 4.5: PAF denetim blok diyagramı

Ayrıca, Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, DA-barada bulunan iki kondansatör üzerindeki gerilim dengesizliğinin kompanzasyonu amacıyla  $v_{da1}$  ve  $v_{da2}$  arasındaki fark  $PI_2$  denetleyiciye uygulanmaktadır. Sonuç olarak PAF’nin kompanzasyon referans akımları ( $i_{PFa}^*$ ,  $i_{PFb}^*$ ,  $i_{PFc}^*$ ) (4.11) denklemi ile elde edilmektedir.

$$i_{ca}(t) = \left( \frac{v_{KI+}}{V_m} [K_{P1}(V_{da}^* - v_{da}) + K_{I1} \int_0^t (V_{da}^* - v_{da}) dt] \right) + (K_{P2}(v_{da1} - v_{da2}) + K_{I2} \int_0^t (v_{da1} - v_{da2}) dt) \quad (4.10)$$

$$i_{PF}^*(t) = i_n(t) - i_{ca}(t) \quad (4.11)$$

PAF akım denetimi histerezis bant akım denetleyici ile gerçekleştirilmektedir. 3-kollu 4-telli paralel GKE için uygulanan histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı Şekil 4.6’da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı

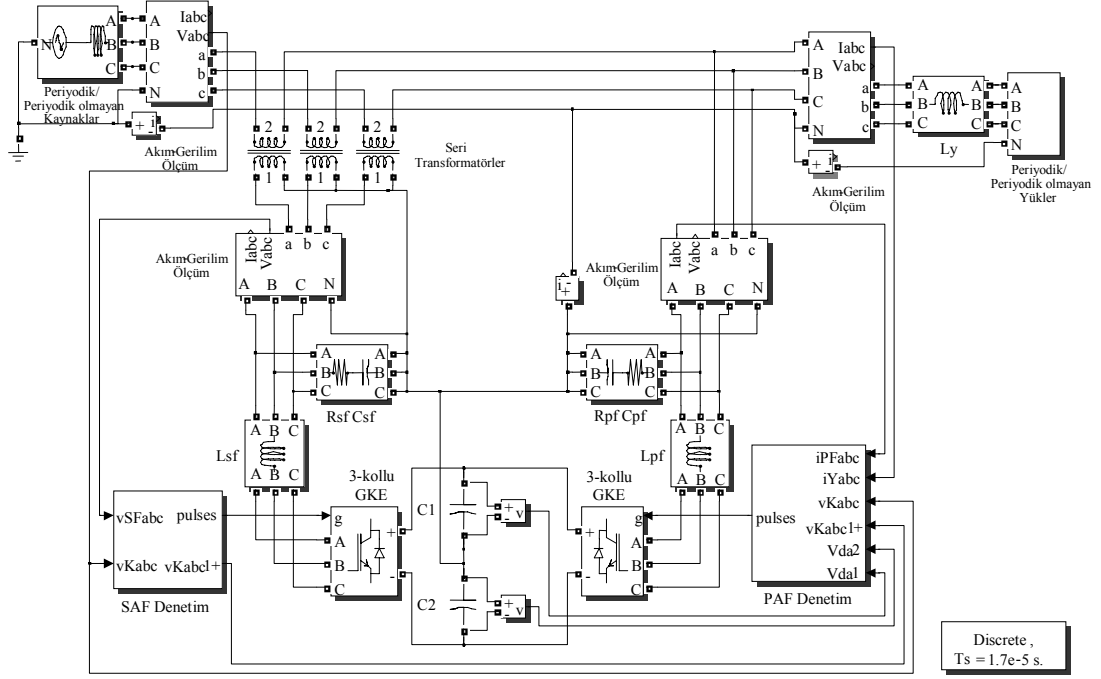
Denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ( $i_{PFa}^*$ ,  $i_{PFb}^*$ ,  $i_{PFc}^*$ ) ile ölçülen PAF hat akımları ( $i_{PFa}$ ,  $i_{PFb}$ ,  $i_{PFc}$ ) karşılaştırılmakta ve histerezis bant akım denetleyici ile anahtarlama sinyalleri  $Q_{PF}$  elde edilmektedir. Histerezis bant akım denetimi, minimum donanım ve yazılım gereksinimi ile hızlı ve basit bir denetim metodudur fakat değişken anahtarlama frekansı önemli dezavantajdır [112]. Histerizis bant akım denetleyici,  $a$ -kolu için anahtarlama fonksiyonlarını  $QA$  aşağıda açıklanan mantık ile belirlemektedir. Diğer  $b$  ve  $c$ -kolları için anahtarlama fonksiyonları  $QB$  ve  $QC$  benzer biçimde bulunmaktadır. Buna göre;

Eğer  $i_{PFa} < (i_{PFa}^* - hb)$   $a$ -kolu için üst anahtar açık ve alt anahtar kapalıdır ( $QA=1$ ).

Eğer  $i_{PFa} > (i_{PFa}^* + hb)$   $a$ -kolu için üst anahtar kapalı ve alt anahtar açıktır ( $QA=0$ ).

## 4.2. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin farklı güç kalitesi bozulmalarında kompanzasyon performansının test edilmesi amacıyla Matlab/Simulink simülasyon sonuçları sunulmaktadır. 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



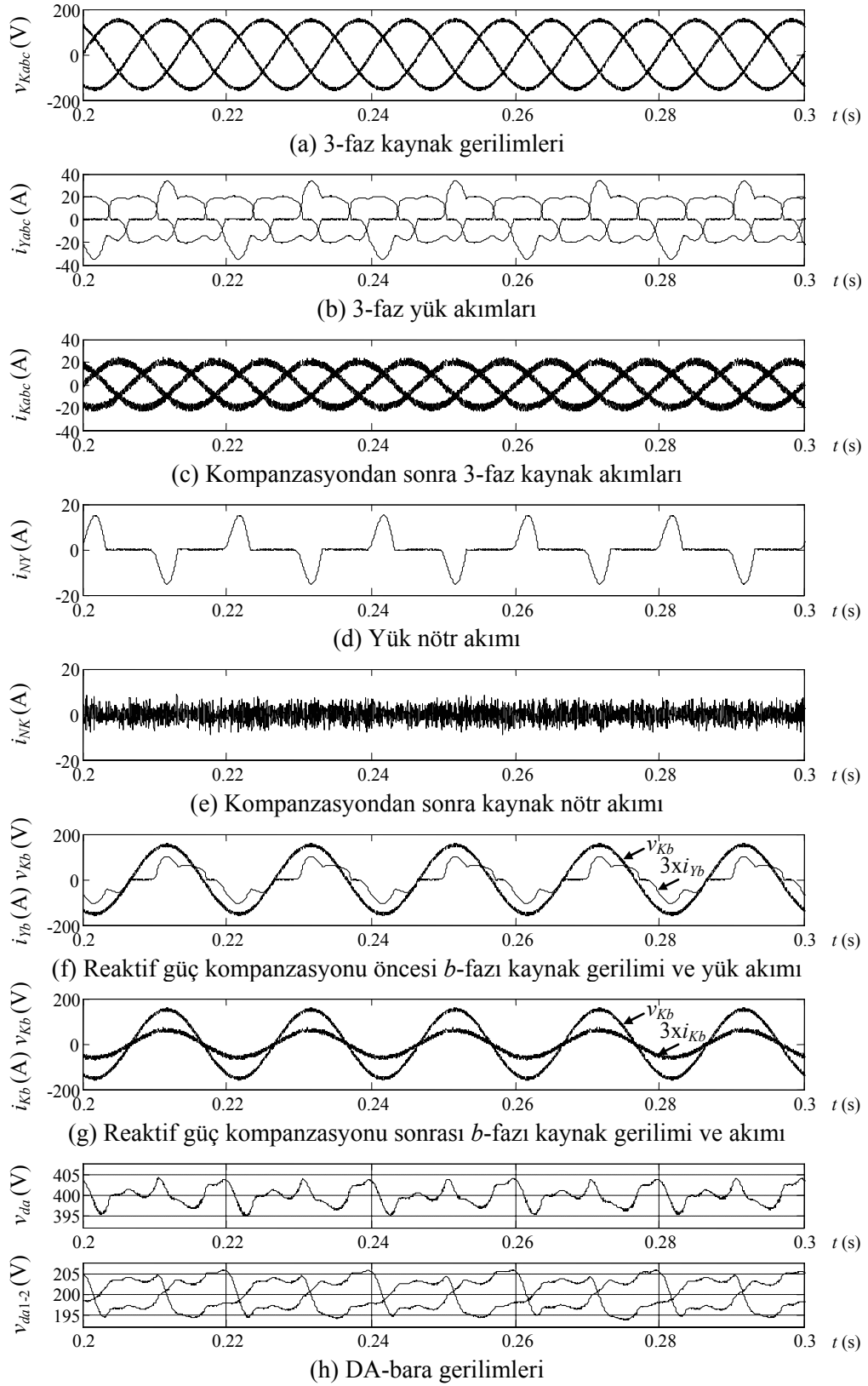
Şekil 4.7: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi Matlab/Simulink blok diyagramı

Sistem üzerinden ölçülen kaynak akımları ( $i_{Ka}$ ,  $i_{Kb}$ ,  $i_{Kc}$ ), kaynak gerilimleri ( $v_{Ka}$ ,  $v_{Kb}$ ,  $v_{Kc}$ ) ve yük akımları ( $i_{Ya}$ ,  $i_{Yb}$ ,  $i_{Yc}$ ) genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli SAF ve PAF denetim algoritmalarına uygulanarak gerekli kompanzasyon referans gerilimleri ( $v_{SFA}^*$ ,  $v_{SFB}^*$ ,  $v_{SFC}^*$ ) ve referans akımları ( $i_{SFA}^*$ ,  $i_{SFB}^*$ ,  $i_{SFC}^*$ ) elde edilmektedir. Geliştirilmiş SDGM tekniği ile 3-kollu 4-telli seri GKE ve histerezis bant akım denetleyici ile 3-kollu 4-telli paralel GKE anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin, dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, kaynak gerilim harmoniği ve kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu, stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu performansına ait elde edilen Matlab/Simulink simülasyon sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

#### 4.2.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada, 110 V<sub>rms</sub> faz-nötr gerilimindeki 3-faz 4-telli sinüzoidal kaynağa tetikleme açısı  $\alpha=30^\circ$  olan 3-faz RL yüklü yarı denetimli tristörlü doğrultucu ve fazlardan dengesiz akım çekilmesini sağlamak amacıyla b-fazına tek-faz RC yüklü

diyotlu doğrultucu bağlanmıştır. Şekil 4.8’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Şekil 4.8a’da sinüzoidal 3-faz kaynak gerilimleri, Şekil 4.8b’de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları verilmektedir. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 4.8c’de kompanzasyondan sonra dengelenen ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları görülmektedir. Şekil 4.8d’de yük nötr akımı ve Şekil 4.8e’de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 4.8f’de  $b$ -fazı yük gerilimi ile yük akımı ve Şekil 4.8g’de kompanzasyondan sonra  $b$ -fazı kaynak gerilimi ile kaynak akımının aynı faza getirilerek birim güç faktörünün sağlandığı gösterilmiştir. Şekil 4.9h’da DA-bara gerilimleri verilmektedir. Tablo 4.1’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.

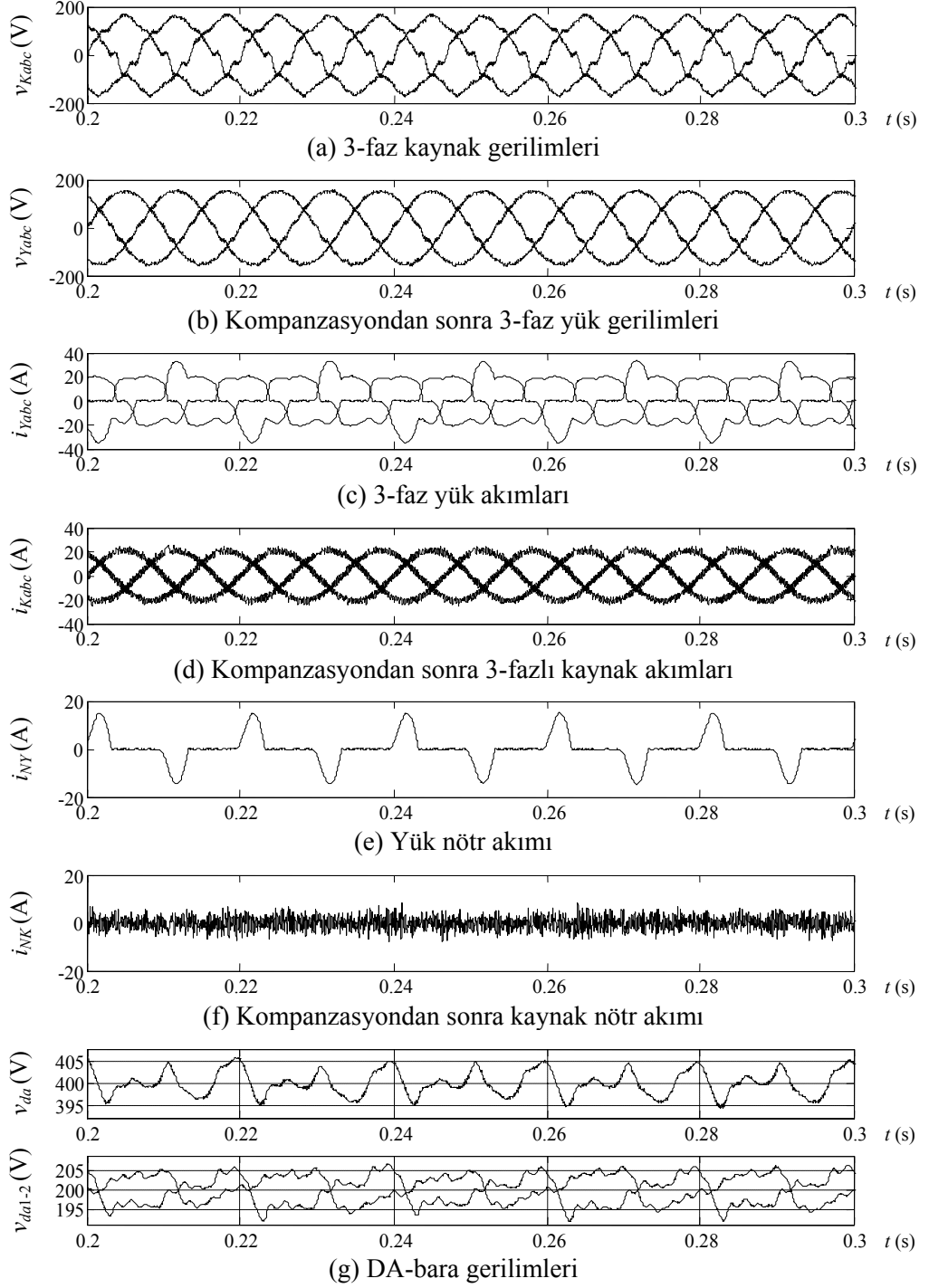
Tablo 4.1: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	14,66	14,31
	$b$ -fazı	19,25	14,25
	$c$ -fazı	14,64	14,35
	nötr	6,11	2,8
THB (%)	$a$ -fazı	30,59	4,34
	$b$ -fazı	36,19	4,66
	$c$ -fazı	30,81	4,31
Güç Faktörü		0,91	0,99

#### 4.2.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada 3-faz 110  $V_{rms}$  faz-nötr kaynak gerilimleri THB değeri %9,3 olan harmonik gerilim bileşenleri içermektedir. Aynı zamanda harmonik akım, reaktif güç, dengesizlik ve nötr akımı kompanzasyonu yapmak amacıyla 3-faz 4-telli kaynağa 4.2.1 bölümünde kullanılan dengesiz ve doğrusal olmayan yükler bağlanmıştır. Şekil 4.9’da kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları verilmektedir. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir.





Şekil 4.9: Kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Şekil 4.9a'da harmonik içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 4.9b'de kompanzasyondan sonra sinüzoidal dalga şekline benzeten 3-faz yük gerilimleri verilmektedir. Şekil 4.9c'de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları ve Şekil 4.9d'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzeten 3-faz kaynak akımları görülmektedir. Şekil 4.9e'de yük nötr akımı ve Şekil 4.9f'de

kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 4.9g'de DA-bara gerilimleri verilmektedir. Tablo 4.2'de kaynak gerilim harmoniği ve Tablo 4.3'de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.

Tablo 4.2: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
THB (%)	$a$ -fazı	9,33	3,03
	$b$ -fazı	9,36	3,10
	$c$ -fazı	9,38	3,08

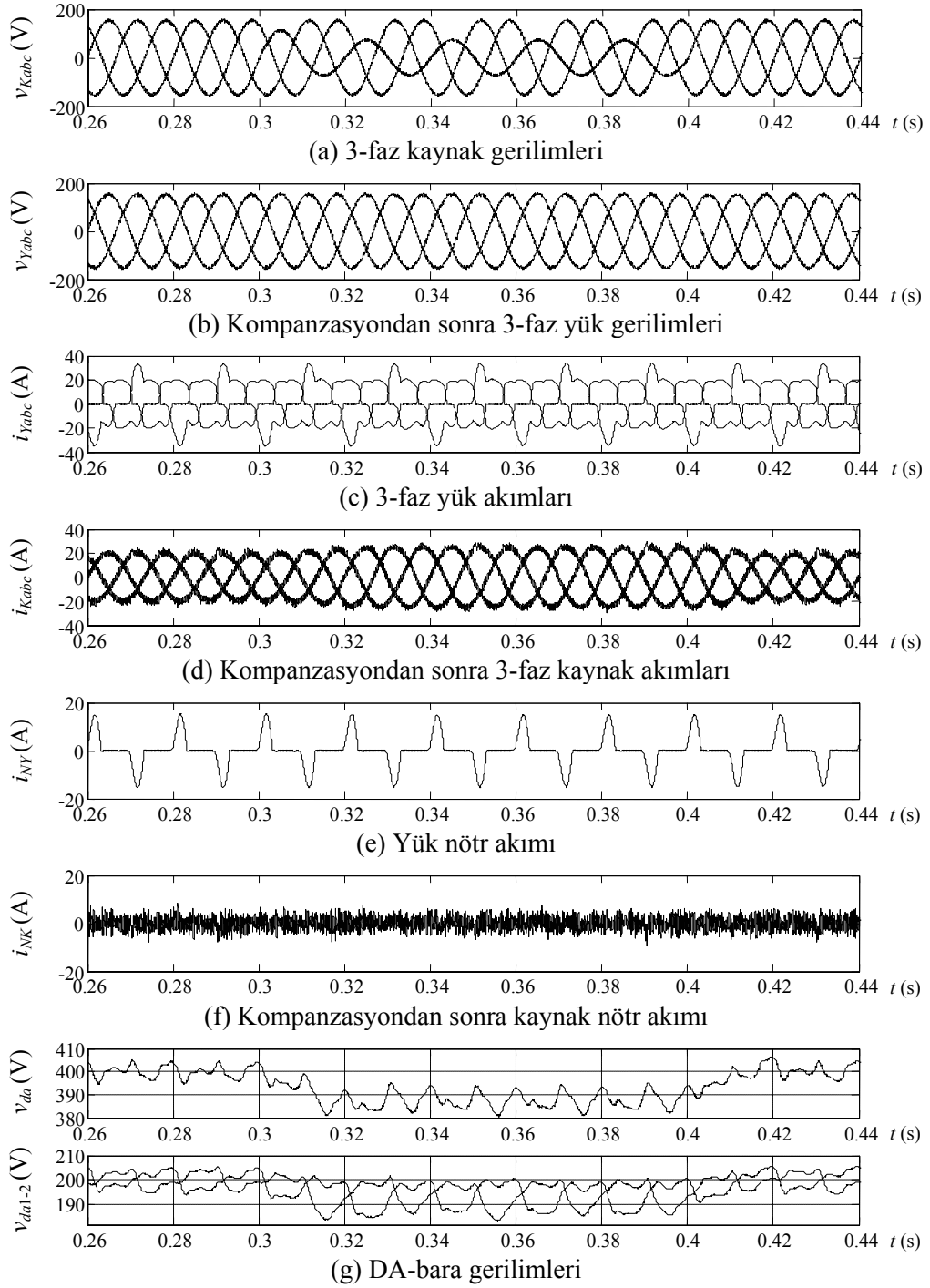
Tablo 4.3: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	14,75	15,31
	$b$ -fazı	19,30	15,20
	$c$ -fazı	14,68	15,40
	nötr	6,01	2,33
THB (%)	$a$ -fazı	29,57	4,59
	$b$ -fazı	35,16	4,84
	$c$ -fazı	30,32	4,33
Güç Faktörü		0,91	0,99

#### 4.2.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada, 3-faz 110  $V_{rms}$  faz-nötr kaynak geriliminin  $a$ -fazında %50 değerinde gerilim çökmesi meydana gelmektedir. 3-faz 4-telli kaynağa, 4.1.1 bölümünde kullanılan dengesiz ve doğrusal olmayan yükler bağlanmıştır. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 4.10a'da  $a$ -fazında kısa süreli %50 değerinde gerilim çökmesi oluşan 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 4.10b'de kompanzasyondan sonra nominal değerine regüle edilen 3-faz yük gerilimleri verilmektedir. Şekil 4.10c'de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları ve Şekil 4.10d'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları görülmektedir. Yüke uygulanan gerilimin kompanzasyonu için gerekli güç kaynaktan karşılandığı için

kaynak akımının arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 4.10e’de yük nötr akımı ve Şekil 4.10f’de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 4.10g’de DA-bara gerilimleri verilmektedir. Tablo 4.4’de tek-faz kaynak gerilim çökmesi ve Tablo 4.5’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.



Şekil 4.10: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Tablo 4.4: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	$a$ -fazı	52,46	109,5
	$b$ -fazı	109,2	110,3
	$c$ -fazı	109,2	107,9

Tablo 4.5: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

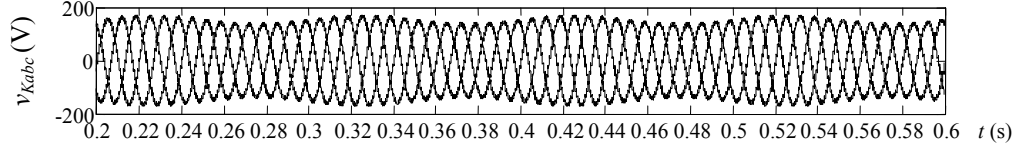
Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	9,45	18,07
	$b$ -fazı	18,53	18,46
	$c$ -fazı	14,28	18,02
	nötr	6,08	2,12
THB (%)	$a$ -fazı	43,04	4,21
	$b$ -fazı	36,97	4,46
	$c$ -fazı	22,47	4,86
Güç Faktörü		0,91	0,99

#### 4.2.4. Alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu

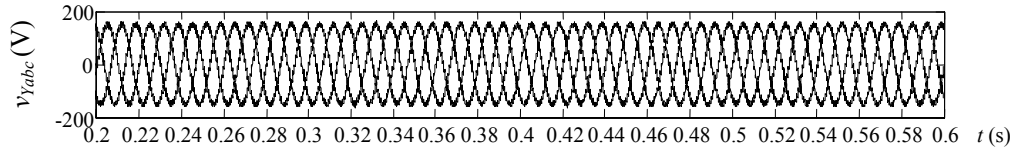
Periyodu güç sisteminin temel bileşen periyodundan daha küçük olan alt harmonik akımlar genellikle güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından üretilmektedir. Bu guruptaki periyodik olmayan akım ve gerilimlerin genel özelliği tekrarlı bir periyoda sahip olmasıdır [64]. Bu çalışmada kullanılan alt harmonik bileşen içeren 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri Tablo 4.6'da verilmektedir. Aktif olmayan akımı tamamen kompanze edebilmek için ortalama zaman aralığı  $T_c$ , temel bileşen ve alt harmonik bileşeninin ortak katına bağlı olarak seçilmektedir [64]. Şekil 4.11'de alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Alt harmonik içeren dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T_c=2,5T$  seçilmiştir. Şekil 4.11a'da alt harmonik bileşen içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 4.11b'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz yük gerilimleri görülmektedir. Şekil 4.11c'de alt harmonik bileşen içeren 3-faz kaynak akımları ve Şekil 4.11d'de kompanzasyondan sonra dengelenen ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları gösterilmektedir. Şekil 4.11e'de DA-bara gerilimleri verilmektedir.

Tablo 4.6: 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri

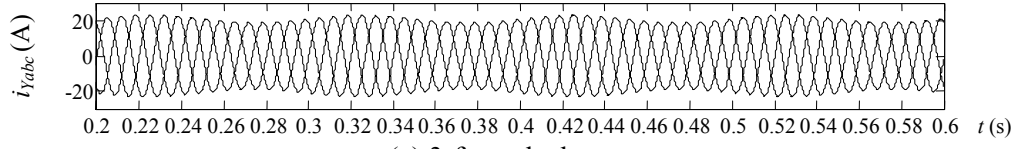
Parametre	Temel	Alt Harmonik
Frekans (Hz)	50	10
Akım	15 A	%20
Gerilim	110 V	%20



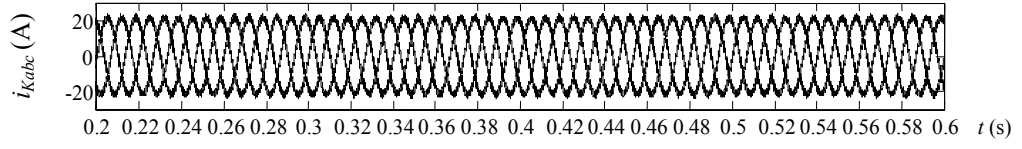
(a) 3-faz kaynak gerilimleri



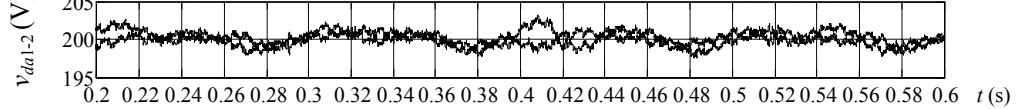
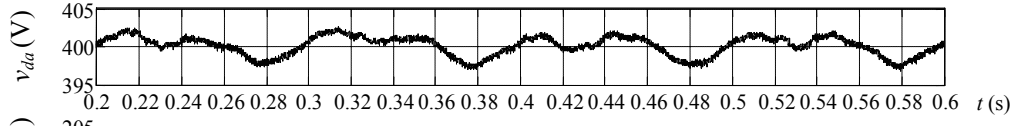
(b) Kompanzasyondan sonra 3-faz yük gerilimleri



(c) 3-faz yük akımı



(d) Kompanzasyondan sonra 3-faz kaynak akımları



(e) DA-bara gerilimleri

Şekil 4.11: Alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları

#### 4.2.5. Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu

Ark fırını akımları periyodu güç sisteminin temel bileşen periyodundan daha büyük ancak tam katı olmayan stokastik (rastgele) periyodik olmayan akımlar içerebilmektedir. Teorik olarak periyodik olmayan bu tip yüklerin periyodu sonsuz olabilmektedir [113]. Bu sebeple ortalama zaman aralığı  $T_c$  değeri  $T/2$ ,  $T$  veya hatta  $T$ 'nin birkaç katı seçilerek stokastik periyodik olmayan akım ve gerilimler tamamen

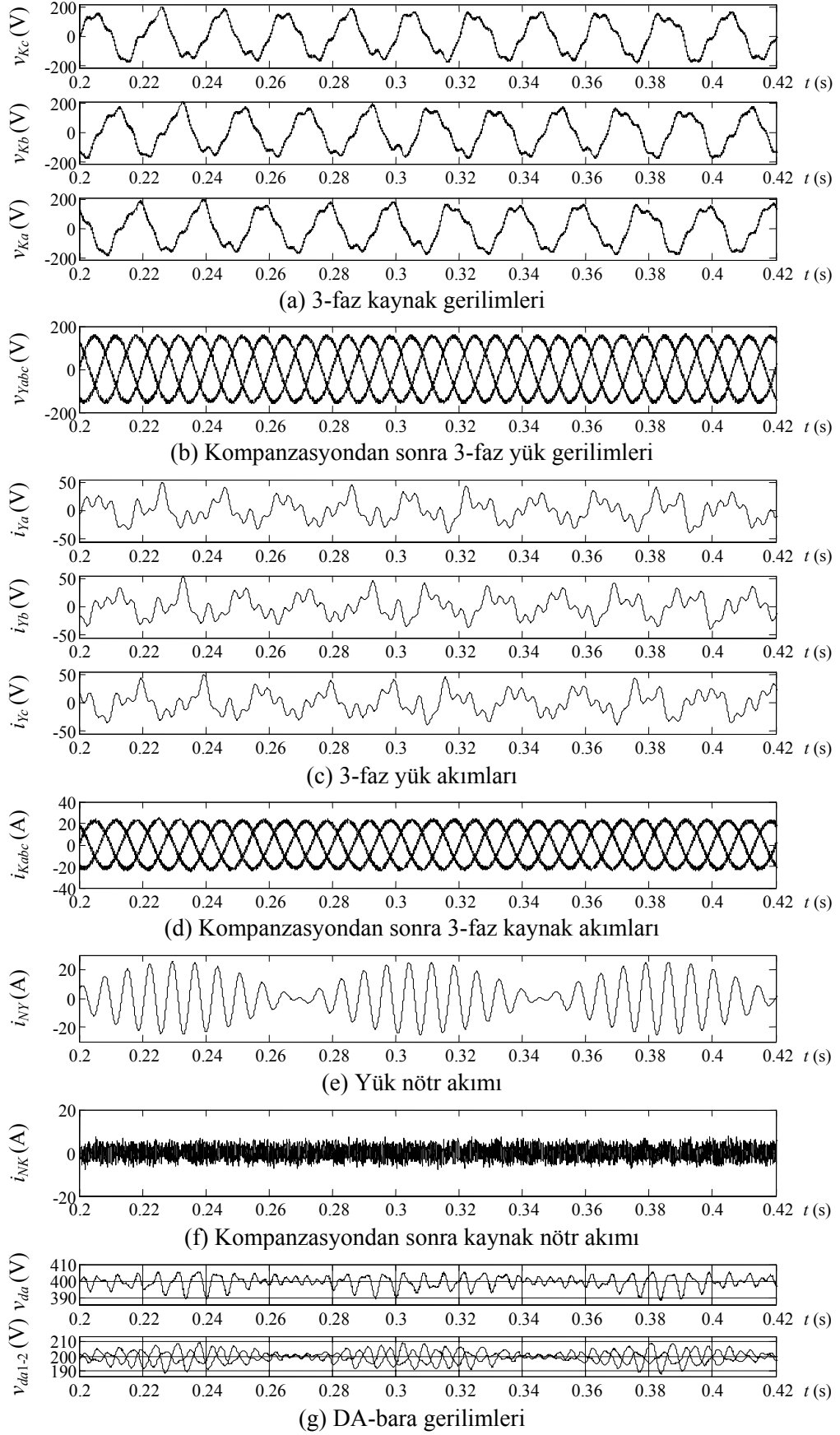
kompanze edilememektedir. Teorik olarak  $T_c$  sonsuza yaklaştıkça kaynak akımı ve yük gerilimi saf sinüs olmaktadır. Güç sistemlerinde minimum THB değerinde ve sinüzoidal kaynak akımı istenen ideal bir durumdur, fakat kompanzatörün enerji depolama ihtiyacı düşünüldüğünde, en iyi kompanzasyon ve en küçük enerji depolama elemanı ihtiyacı arasında bir denge kurulmalıdır. Ortalama zaman aralığı  $T_c$  daha fazla arttırıldığında ise doğrusal bir şekilde kondansatörün değeri de büyümekte, ancak kaynak akımındaki THB'deki iyileşme çok az olmaktadır. Bütün bunlar göz önüne alınarak optimum  $T_c$  değeri belirlenmektedir [113].

Bu çalışmada, stokastik periyodik olmayan bileşenlere sahip 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri Tablo 4.7'de verilmektedir. Stokastik periyodik olmayan dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı Matlab/Simulink simülasyonları ile  $T_c=5T$  olarak seçilmiştir. Şekil 4.12'de stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.12a'da stokastik periyodik olmayan bileşen içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 4.12b'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz yük gerilimleri görülmektedir.

Şekil 4.12c'de stokastik periyodik olmayan bileşen içeren 3-faz kaynak akımı dalga şekilleri ve Şekil 4.12d'de kompanzasyondan sonra dengelenen ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları gösterilmektedir. Şekil 4.12e'de yük nötr akımı ve Şekil 4.12f'de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 4.12g'de DA-bara gerilimleri verilmektedir.

Tablo 4.7: 3-faz kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri

Parametre	Temel	Bileşen (%)				
Frekans (Hz)	50	104	117	134	147	250
Akım	15 A	30	40	20	20	50
Gerilim	110 V	7,5	10	5	5	12,5



Şekil 4.12: Stokastik periyodik olmayan akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları

### 4.3. Test Platformunun Kurulması

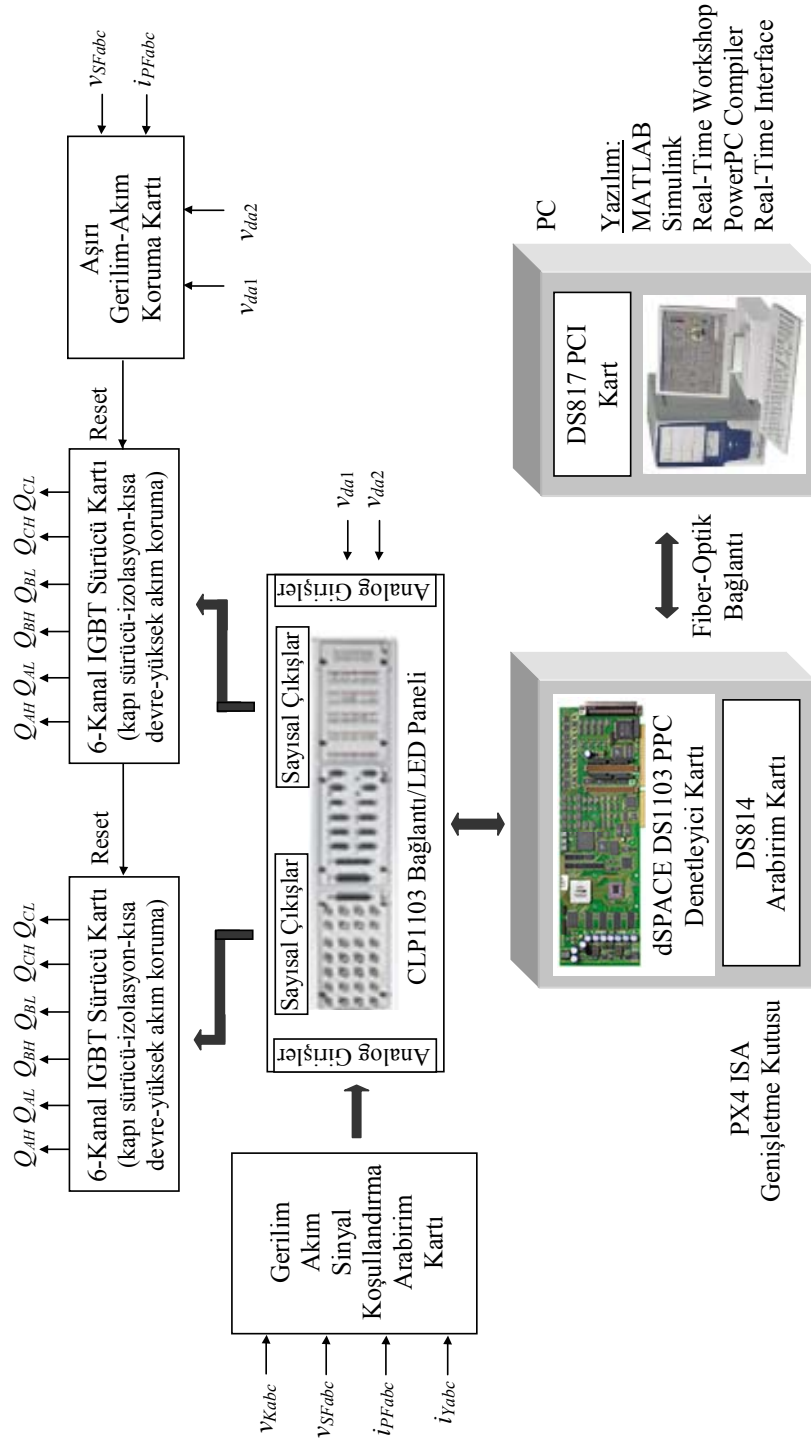
3-faz 4-telli sistemde  $110 V_{rms}$  faz-nötr kaynak geriliminde ve 5 kVA dengesiz-doğrusal olmayan yük durumunda hem periyodik hem de periyodik olmayan akım ve gerilimlerin kompanzasyonu için tasarlanan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin laboratuvar ortamında test platformu kurulmuştur. 3-kollu 4-telli BSPAF güç ve denetim sistemi blok diyagramı sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmektedir.

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi test platformunun kurulması için seri ve paralel 3-kollu 4-telli GKE tabanlı güç devreleri, 6-kanal izole kapılı bipolar transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) sürücü kartları, akım-gerilim ölçüm kartı, sinyal koşullandırma ara birim kartı, DA-bara gerilim ölçüm kartı, aşırı akım ve gerilim koruma kartı ve besleme devresi kartı tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.

BSPAF sisteminin gerçek zamanlı denetimi amacıyla dSPACE kontrol geliştirme sistemi kurularak ve test platformu ile bağlantısı sağlanmıştır. Ayrıca, deneysel testlerin yapılabilmesi amacıyla şebeke kaynaklı (anlık gerilim çökmesi ve gerilim harmoniği) ve doğrusal olmayan yük kaynaklı (akım harmonikleri, dengesizlikleri ve nötr akımı) güç kalitesi bozucu etkenler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun tasarımı, kurulumu ve performansının test edilebilmesi için deneysel olarak gerçekleştirilen güç kalitesi bozuklukları aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

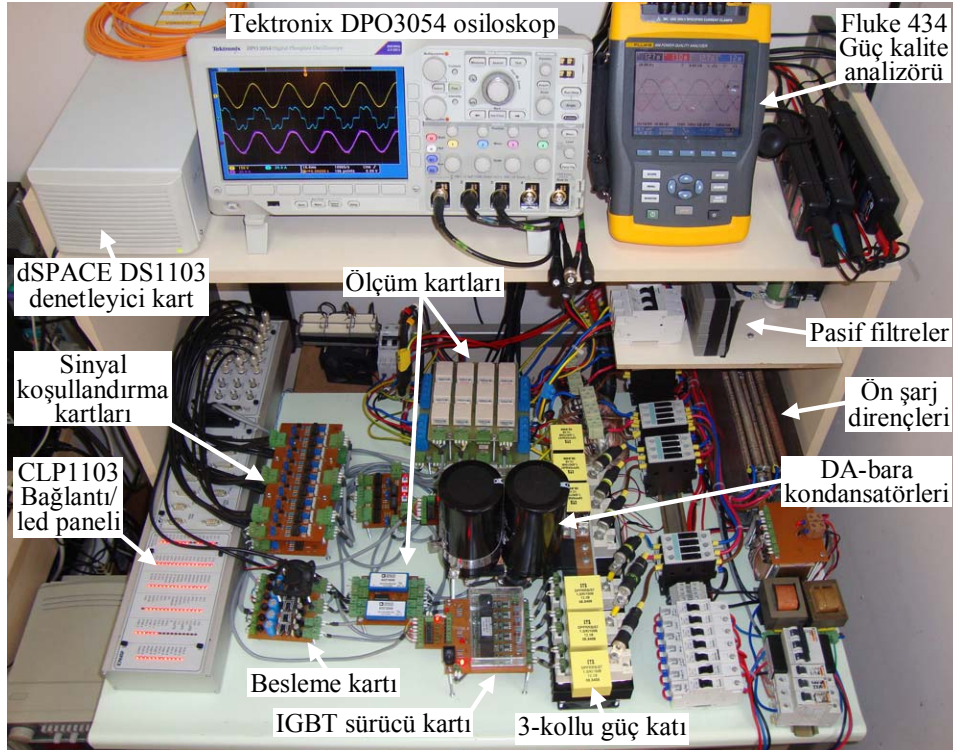




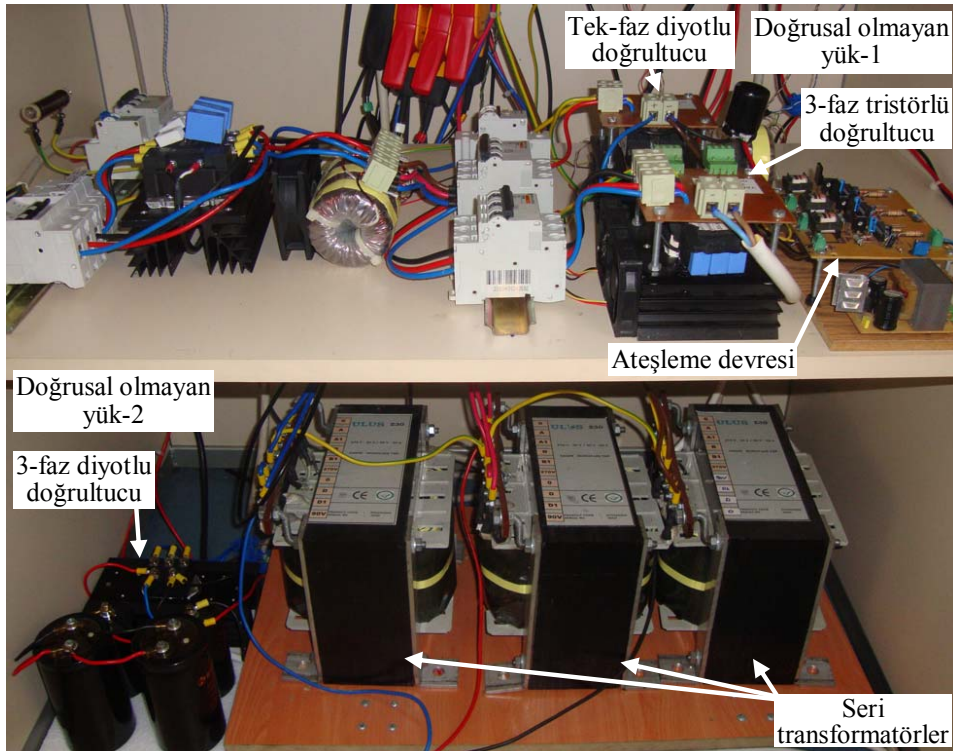


Şekil 4.14: 3-kollu 4-telli BSPAF denetim sistemi blok diyagramı

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı Şekil 4.15'de görülmektedir.



(a)

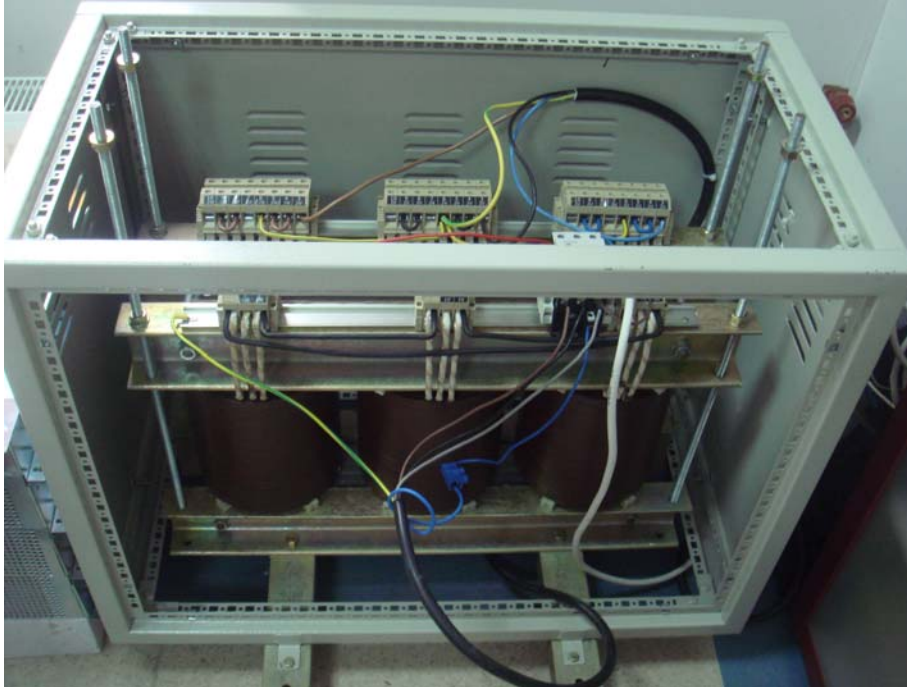


(b)

Şekil 4.15: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı  
a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü

### 4.3.1. Kaynak ve yük karakteristiği

BSPAF sisteminde, kaynak tarafı empedansını belirlemek, sistemi şebekeden izole etmek, düşük gerilimlerde deneyler yapmak ve gerilim çökmesi gibi farklı durumların deneysel incelenebilmesi için özel olarak tasarlanıp imal ettirilen 3-fazlı kademeli bir trafo kullanılmaktadır. Şekil 4.16’da kademeli besleme trafosu fotoğrafı gösterilmektedir. Tablo 4.8’de kademeli besleme trafosu teknik özellikleri verilmektedir. Deneysel çalışmalarda şebeke gerilimi olarak kademeli besleme trafosu üzerinden alınan  $110 V_{rms}$  faz-nötr gerilim değeri kullanılmıştır.



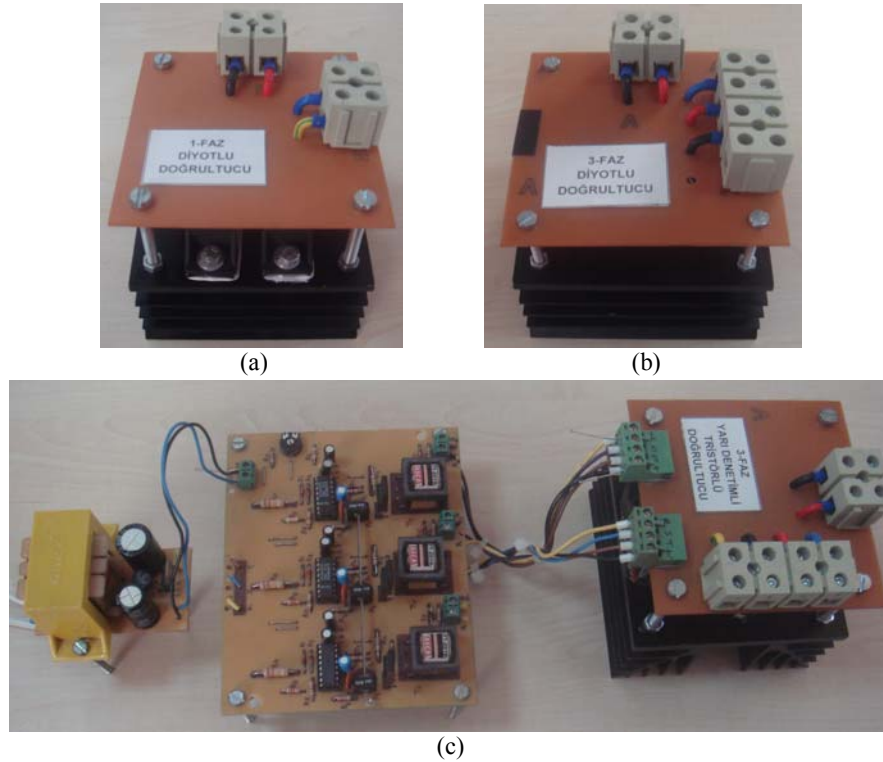
Şekil 4.16: BSPAF sistemi kademeli besleme trafosu

Tablo 4.8: Kademeli besleme trafosu teknik özellikleri

Bileşenler	Değerler
Gücü	25 kVA
Gerilim	380/4x55 V
Frekans	50 Hz
Boştaki kayıplar	134 W
Kısa devre kayıpları	498 W
Kısa devre gerilimi	%3,317
Koruma derecesi	IP21

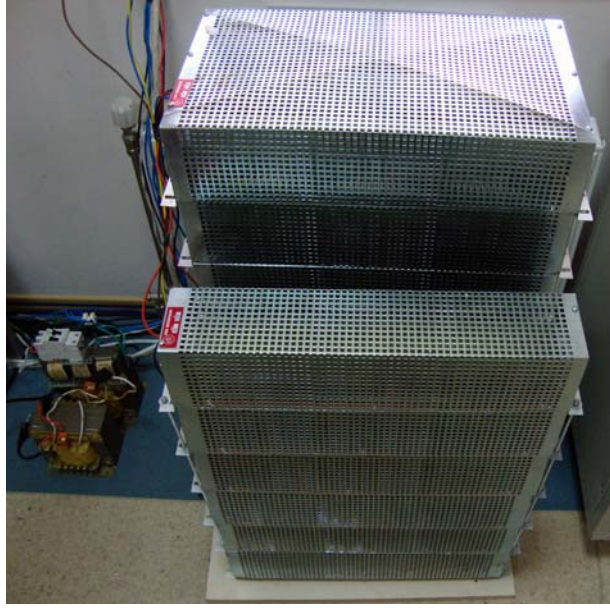
BSPAF sistemi ile kaynak gerilim çökmesi düzeltimi performansının deneysel olarak test edilebilmesi için tek-faz %50 değerinde bir gerilim çökme üretici gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.3.2’de tek-faz çökme üretici tasarımı detaylı olarak açıklanmaktadır. BSPAF sistemi ile gerilim harmoniği düzeltimi performansının deneysel olarak test edilebilmesi için ise kaynak empedansı seri endüktans eklenerek  $59 \mu\text{H}$ ’den  $3,6 \text{ mH}$ ’ye yükseltilerek ve Şekil 4.13’de gösterildiği gibi OBN’ye  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu doğrultucudan oluşan doğrusal olmayan yük-2 bağlanarak kaynak tarafında gerilim harmonikleri %10 değerine yükseltilmiştir.

BSPAF sistemi ile dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu ve nötr akımının azaltılması performansının deneysel olarak test edilebilmesi için doğrusal olmayan yük-1 olarak ateşleme açısı  $30^\circ$  olan  $RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu (Semikron SK70DH16 modül, 68 A, 1600 V),  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu (IXYS VUO36-16NO8 modül, 35 A, 1600 V ) ve  $RC$  yüklü tek-faz diyotlu doğrultucu (iki adet Sirectifier SDD120N16B diyot-diyot modül, 120 A, 1600 V) grupları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafları Şekil 4.17’de görülmektedir.

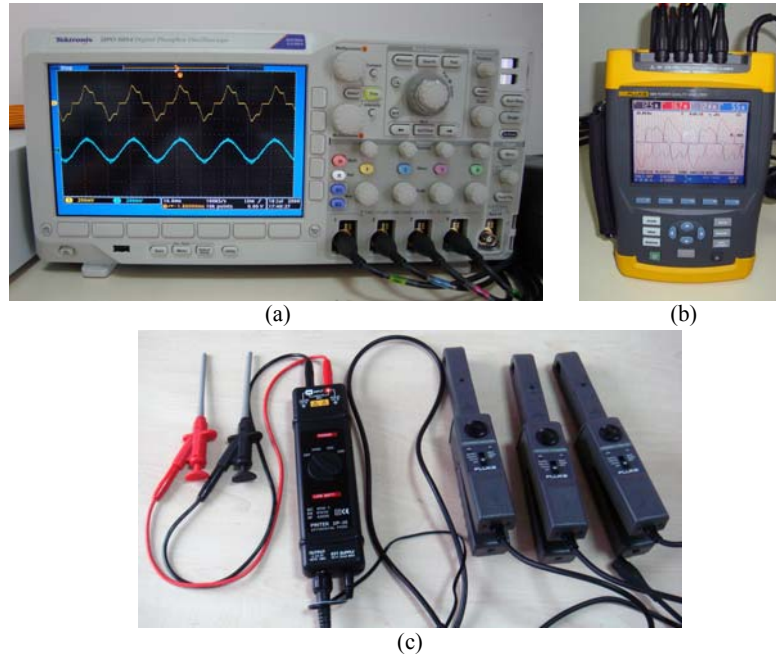


Şekil 4.17: Gerçekleştirilen doğrultucu fotoğrafları a) tek-faz diyotlu doğrultucu b) 3-faz diyotlu doğrultucu c) 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu

Şekil 4.18’de tek-faz ve 3-faz doğrultucuların çıkışına bağlanan yük dirençleri fotoğrafı gösterilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan diferansiyel prob (Pintek DP-25, 1000V), akım ölçüm probları (Fluke 80i-110s, 100A), osiloskop (Tektronix DPO3054, 4-kanallı, 500MHz) ve Fluke 434 güç kalite analizörü fotoğrafları Şekil 4.19’da gösterilmektedir.

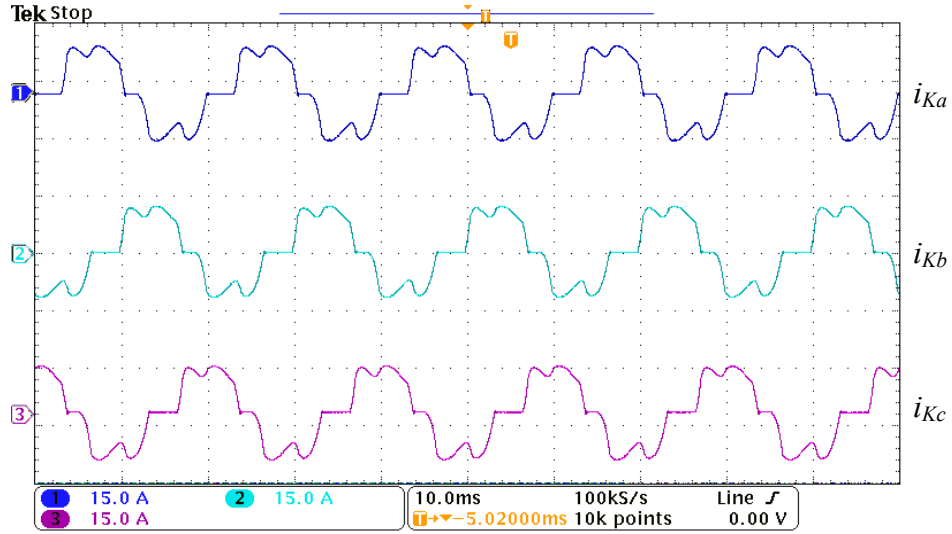


Şekil 4.18: Tek-faz ve 3-faz doğrultucuların çıkışına bağlanan yük dirençleri fotoğrafı

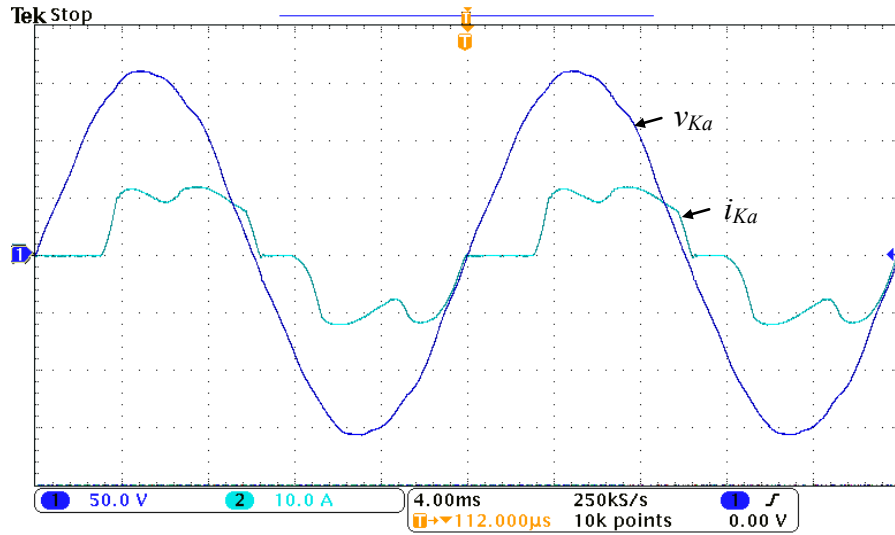


Şekil 4.19: a) Tektronix DPO 3054 4-kanallı 500 MHz osiloskop, b) Fluke 434 güç kalite analizörü, c) Pintek DP25 diferansiyel prob ve Fluke 80i10s akım ölçüm probları

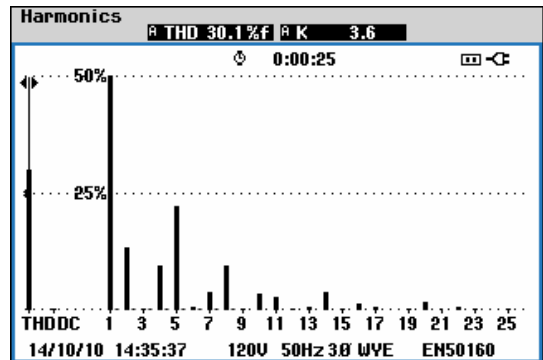
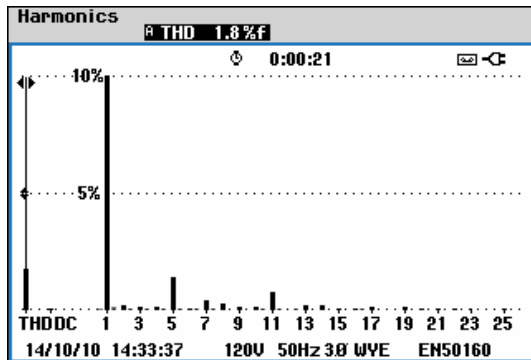
Şekil 4.20'de  $RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir.



(a) 3-faz kaynak akımı dalga şekilleri



(b)  $a$ -fazı kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri

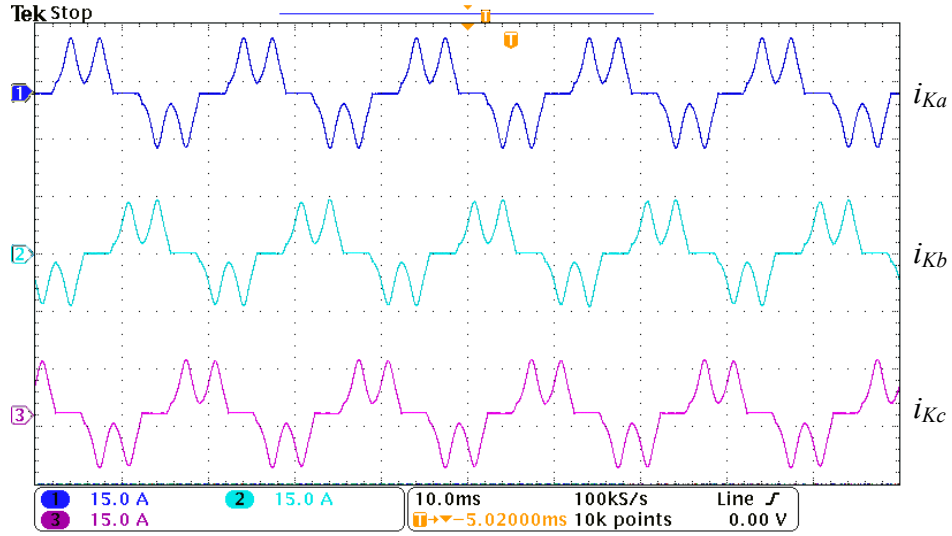


(c)  $a$ -fazı kaynak gerilimi harmonik dağılımı

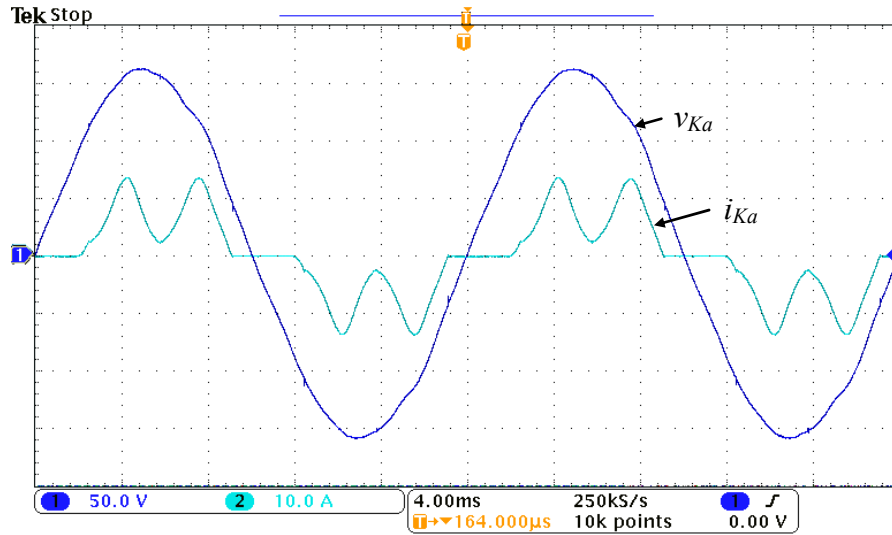
(d)  $a$ -fazı kaynak akımı harmonik dağılımı

Şekil 4.20:  $RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu deneysel dalga şekilleri

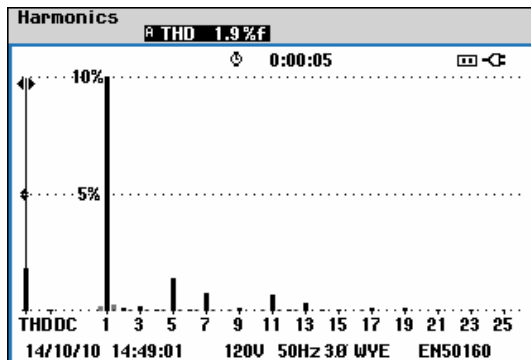
Şekil 4.21'de  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir.



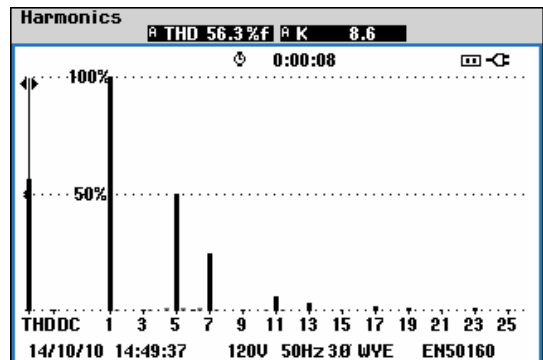
(a) 3-faz kaynak akımı dalga şekilleri



(b)  $a$ -fazı kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri



(c)  $a$ -fazı kaynak gerilimi harmonik dağılımı

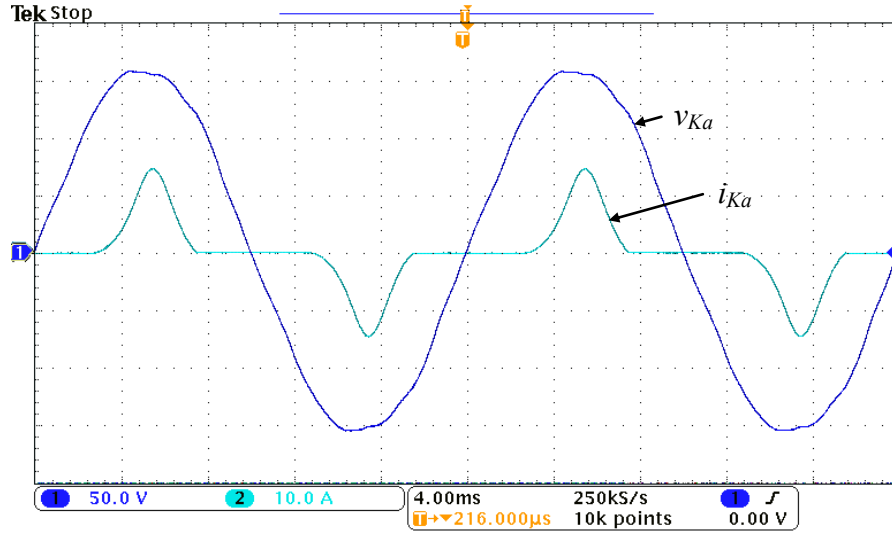


(d)  $a$ -fazı kaynak akımı harmonik dağılımı

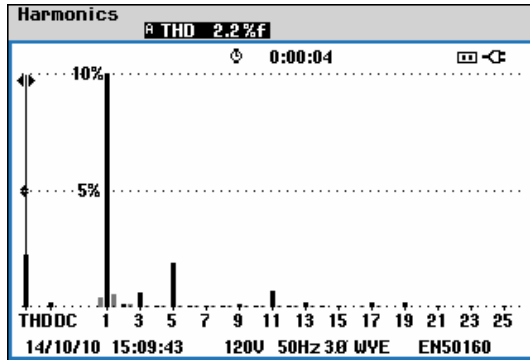
Şekil 4.21:  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu deneysel dalga şekilleri



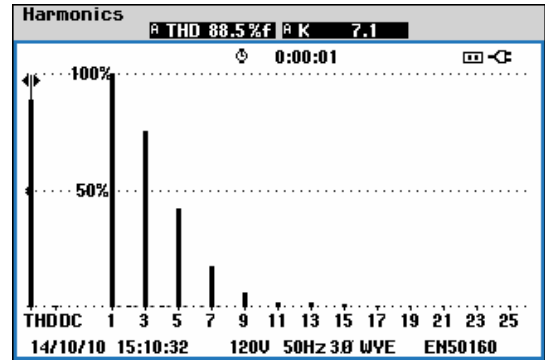
Şekil 4.22'de  $RC$  yüklü tek-faz diyotlu doğrultucuya ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir.



(a) Kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri



(b)  $a$ -fazı kaynak gerilimi harmonik dağılımı



(c)  $a$ -fazı kaynak akımı harmonik dağılımı

Şekil 4.22:  $RC$  yüklü tek-faz diyotlu doğrultucu deneysel dalga şekilleri

$RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli,  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu ve  $RC$  yüklü tek-faz doğrultucu gibi farklı tipte doğrultucu ve yük durumunda; akım dalga şekli ve harmonik dağılımı değişimi açıkça görülmektedir. Ayrıca, 3-faz yarı denetimli doğrultucunun çektiği akımlarda yarı dalga simetrisi olmadığından çift harmoniklerin de bulunduğu Şekil 4.20d'de gösterilmektedir.  $RC$  yüklü tek-faz diyotlu doğrultucunun çektiği akımda ise 3 ve 3'ün katı sıfır sıralı harmoniklerin bulunduğu Şekil 4.22c'de görülmektedir. Tablo 4.9'da doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri özeti verilmektedir.

Tablo 4.9: Doğrultucu yüklerin deneysel ölçüm değerleri özeti

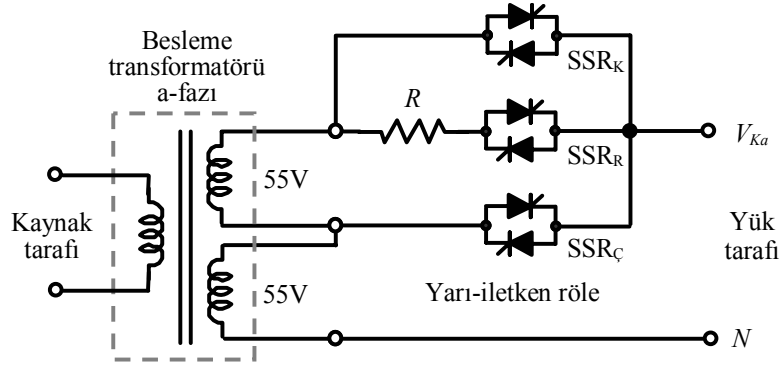
Parametreler	3-faz Tristörlü Doğrultucu (RL Yüklü, $\alpha=30^\circ$ )	3-faz Diyotlu Doğrultucu (RC Yüklü)	Tek-faz Diyotlu Doğrultucu (RC Yüklü)
Kaynak Gerilimi (V)	112,2	113,2	113,4
Kaynak Akım (A)	7,9	6,9	5,6
Görünür güç (kVA)	2,65	2,28	1,11
Aktif güç (kW)	2,34	1,96	0,47
Reaktif güç (kVAr)	1,23	1,16	1,00
Güç faktörü	0,89	0,86	0,74
THB <sub>v</sub> (%)	1,8	1,9	2,2
THB <sub>i</sub> (%)	30,1	56,3	88,5
DA Yük	R: 22 $\Omega$ , L: 5,7 mH	R: 33 $\Omega$ , C: 100 $\mu$ F	R: 45 $\Omega$ , C: 330 $\mu$ F

#### 4.3.2. Tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici

Elektrik şebekesi gerilim çökmeleri en yaygın güç kalitesi sorunlarından biridir. Tipik olarak doğal nedenlerle oluşan faz-nötr kısa devreleri yada büyük motorların doğrudan (yol verici kullanmadan) kalkışı sırasında çekilen aşırı akımlardan kaynaklanan elektrik şebekesi gerilim çökmeleri, elektrik şebekesinde en çok sorun yaratan etkilerden biri olmaktadır. Özellikle kontrol devreleri gibi gerilim çökmesine duyarlı elektronik cihazlar ve motor sürücü devreleri çökmeden dolayı devre dışı kalıp süreçlerin durmasına, arızalara ve yüksek maliyetli olan endüstriyel süreci yeniden başlatma gereksinimine neden olurlar. Dolayısıyla elektrik şebekesindeki çökmeler, çökmeye duyarlı yükler için son derece olumsuz etkiler yapmakta ve fabrikalarda (özellikle üretim hatlarında) vb. ortamlarda her yıl milyonlarca lira zarara neden olmaktadır [2].

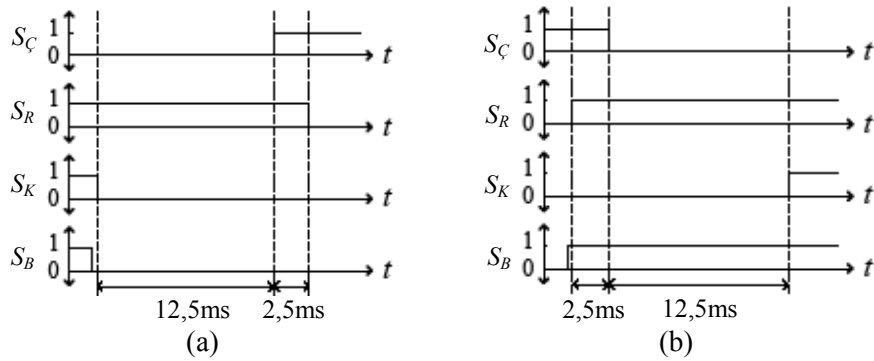
BSPAF sisteminin kaynak gerilim çökmesi düzeltimi performansının deneysel olarak test edilebilmesi için tek-faz %50 değerinde bir gerilim çökme üretici gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.23'de [114]'de önerildiği gibi tasarlanan tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici güç devresi görülmektedir. Şebeke geriliminde çökme olmadığı durumda sadece yarı iletken röle (Solid State Relay, SSR) SSR<sub>K</sub>'nın bulunduğu yol etkindir. SSR<sub>K</sub>'dan SSR<sub>Ç</sub>'ye geçiş sürecinde oluşabilecek yük gerilimi/akımı kesintisini engellemek için SSR<sub>R</sub> kolu bulunmaktadır. Direnç değeri

ise olağan şebeke koşulundan çökme durumuna geçiş bölgesinde (dirençli yolun etkin olduğu geçici rejim) üretcin çıkışında amaçlanan çökme gerilimi ve anma akımına göre ayarlanmaktadır [114].



Şekil 4.23: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretci güç devresi

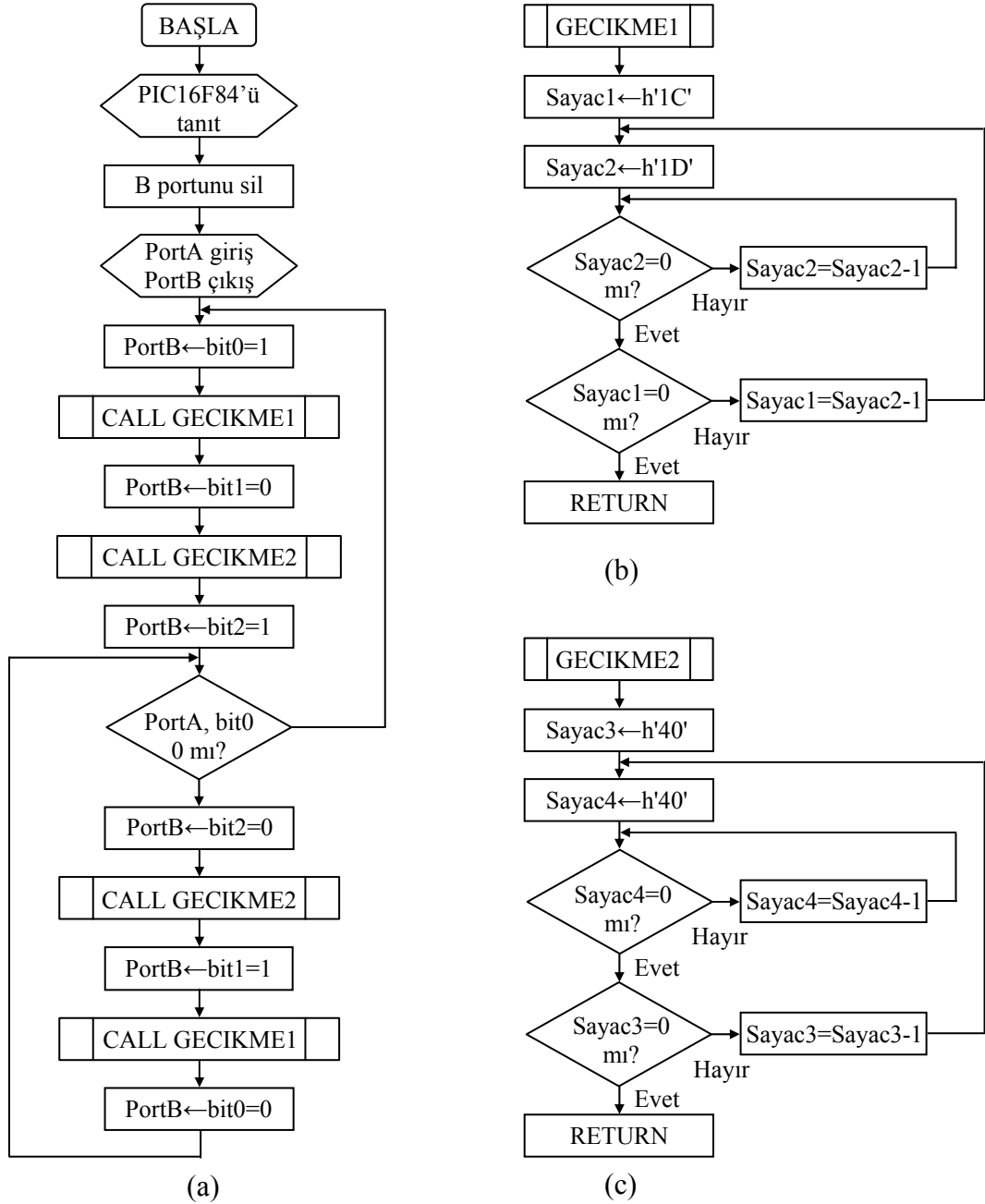
Devrenin kaynak gerilim çökmesini üretmesi ve yeniden anma gerilimine dönüşü sağlaması için SSR kapılarının uygun sayısal işaretler ile sürülmesi amacıyla mikrodenetleyici tabanlı bir elektronik denetim devresi kullanılmaktadır. Şekil 4.24'de gerilim çökmesi başlatmak ve sonlandırmak için denetim devresi tarafından üretilen sayısal işaretler gösterilmektedir. Şekil 4.25'de gerçekleşen çökme üretcinin denetim devresi akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.24: a) Gerilim çökmesi başlatmak ve b) sonlandırmak için denetim devresi sayısal işaretleri

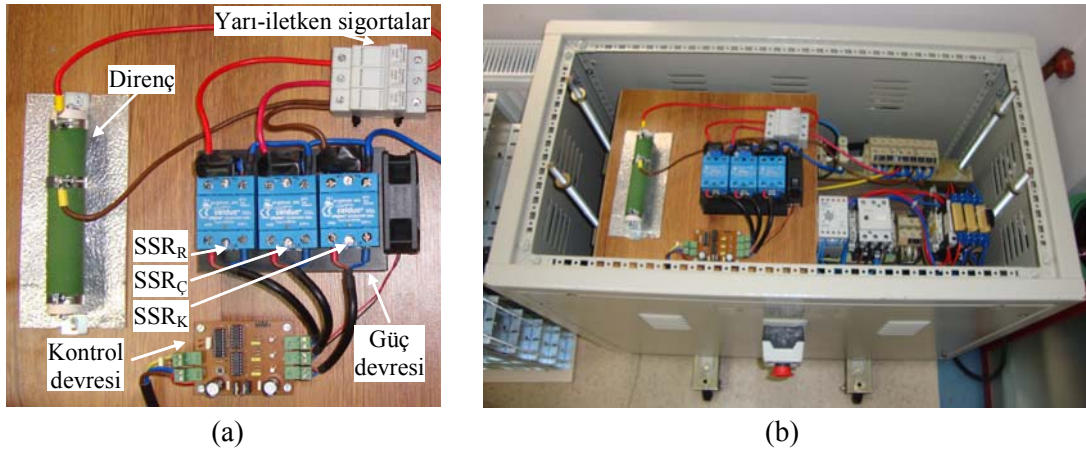
Denetim devresinde gerekli zamanlamalar 16F84A mikrodenetleyicisi ile ayarlanmaktadır. Olağan çalışma koşulunda (S<sub>B</sub>=1) sadece şebeke (SSR<sub>K</sub>) ve direnç yolu (SSR<sub>R</sub>) SSR'leri etkindir. Çökme başlatma işaretinin gelmesi (S<sub>B</sub>:1→0) ile SSR<sub>K</sub>'ya kesim işareti gönderilir. SSR<sub>K</sub> kesime girdiği anda akım SSR<sub>R</sub> üzerinden akmaya başlar. SSR<sub>C</sub>'ye ise iletme girme işareti, SSR<sub>K</sub>'nın kesime girme işaretinden

yaklaşık 12,5 ms gönderilir. Böylece SSR<sub>K</sub>'nın kesimi garantilenir ve transformatör çıkışları SSR'ler üzerinden kısa devre edilmez. SSR<sub>R</sub>'ye kesim işareti ise SSR<sub>Ç</sub>'nin iletim işaretinden yaklaşık 2,5 ms sonra gönderilerek çıkış gerilimindeki herhangi bir süreksizliğin önüne geçilmektedir.

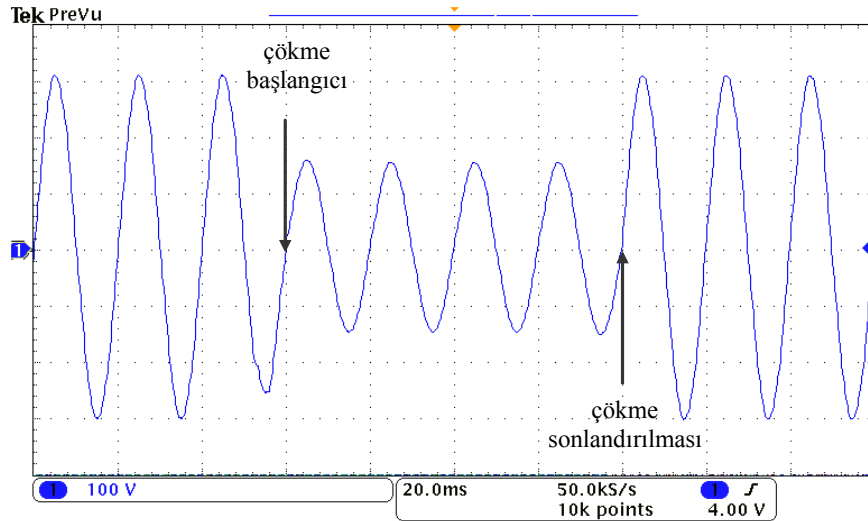


Şekil 4.25: Gerçeklenen çökme üreticinin denetim devresi akış diyagramı a) ana program b) 2,5 ms zamanlayıcı c) 12,5 ms zamanlayıcı

Çökme durumundan olağan şebeke gerilimine dönüşte de kısa devre ve çıkış gerilimi süreksizliği durumlarını önlemek için çökme işaretinin kaldırılmasından ( $SB:0 \rightarrow 1$ ) hemen sonra öncelikle  $SSR_R$  iletime geçirilir ve bu iletim işaretinin yaklaşık 2,5 ms ardından  $SSR_C$ 'ye kesim işareti gönderilir. Bu işareten yaklaşık 12,5 ms sonra ise  $SSR_K$ 'ya iletim işareti gönderilerek herhangi bir kısa devre durumundan sakınılmaktadır. Şekil 4.26'da gerçekleştirilen tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici ve besleme transformatörüne bağlantısı fotoğrafları gösterilmektedir. Şekil 4.27'de  $RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu yük koşulunda  $a$ -fazında %50 değerinde kaynak gerilim çökmesi başlangıcı ve sonlandırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.26: a) Gerçekleştirilen tek-faz kaynak gerilim çökmesi üretici fotoğrafı b) gerilim çökmesi üreticinin besleme transformatörüne bağlantısı



Şekil 4.27: Tek-faz %50 değerinde kaynak gerilim çökmesi başlangıcı ve sonlandırılması dalga şekli

### 4.3.3. Tek-faz seri transformatör

3-fazlı 4-telli BSPAF sisteminde gerilim ile ilgili güç kalitesi problemlerinin çözümü için şebekeye gerilim basmak amacıyla her bir faza seri bağlanan 3-adet tek-faz seri transformatör fotoğrafı Şekil 4.28’de görülmektedir. Tablo 4.10’da tek-fazlı seri transformatör teknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 4.28: Tek-fazlı seri transformatör fotoğrafı

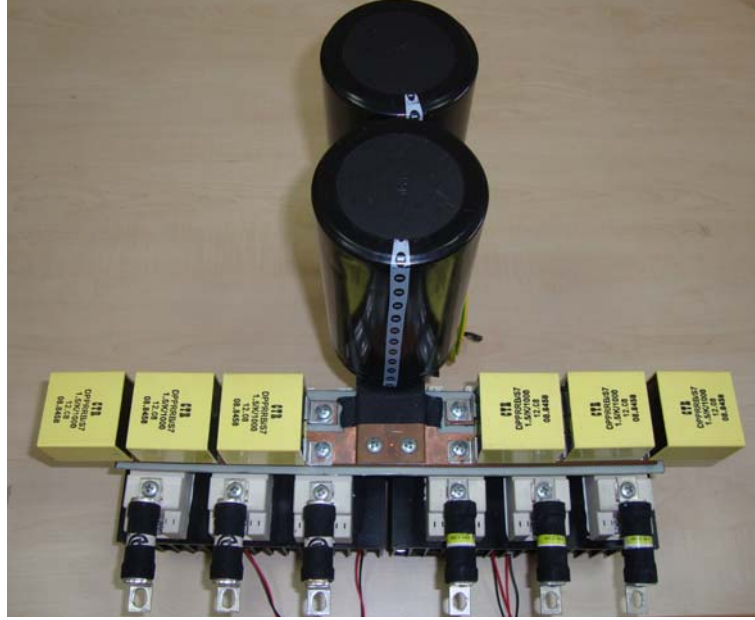
Tablo 4.10: Tek-fazlı seri transformatör teknik özellikleri

Bileşenler	Değerler
Güç	5,4 kVA
Gerilim	270/90 V
Frekans	50 Hz

### 4.3.4. Güç devresi

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç katında iki adet seri bağlı 2200  $\mu$ F, 450 V DA kondansatör, PAF ve SAF AA hat endüktansları olarak 2,5 mH, 25 A toroid nüve üzerine sarılı filtre bobinleri kullanılmıştır. 3-kollu PAF ve 3-kollu SAF yarı iletken elemanları 6 adet yarım köprü (Semikron, SKM 75GB12T4 75A, 1200V) IGBT modülleri kullanılmıştır. IGBT elemanlarını kesim esnasında yüksek gerilimlerden korumak amacıyla her birinin DA uçlarına paralel bastırma

kondansatörleri bağlanmıştır. Şekil 4.29’da 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç devresi fotoğrafı görülmektedir. Kondansatörlerin bağlı olduğu doğru akım barası, kaçak endüktansların azaltılması ve kapasitif etki oluşturmak amacıyla üst üste olacak şekilde imal edilmiştir.

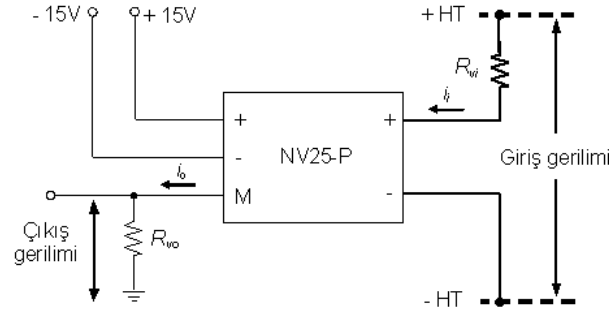


Şekil 4.29: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç devresi fotoğrafı

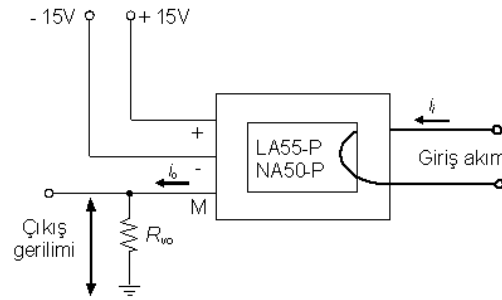
Deneysel düzeneğin geçici durumlarda meydana gelen yüksek akımlardan korunması için yarı iletken hızlı sigortalar ve yüksek akım ve gerilim koruma devreleri tesis edilmiştir. Ayrıca ilk çalışmaya başlama anındaki DA kondansatörlerin çektiği aşırı akımların sönmülmesi için ön-şarj dirençleri PAF’ye seri bağlanmıştır. BSPAF sisteminin ürettiği anahtarlama harmoniklerinin bastırılması için PAF ve SAF AA tarafına RC pasif filtreler bağlanmıştır.

#### 4.3.5. Akım ve gerilim ölçüm kartı

BSPAF sisteminde akım ve gerilimlerin ölçülmesinde elektrik sisteminden galvanik olarak izolasyon sağlayan hall etkili akım (LEM LA55-P ve TEG NA50-P, 50A, 1:1000 dönüştürme oranı) ve hall etkili gerilim (TEG NV25P, 500V, 2500:1000 dönüştürme oranı) sensörleri kullanılmıştır. Akım ve gerilim ölçümlerinde sensörlerin çıkış gerilimi  $R_{vo}$  direnci ile elde edilmektedir. Hall etkili gerilim ve akım sensörü devre bağlantı şeması sırasıyla Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de verilmektedir.

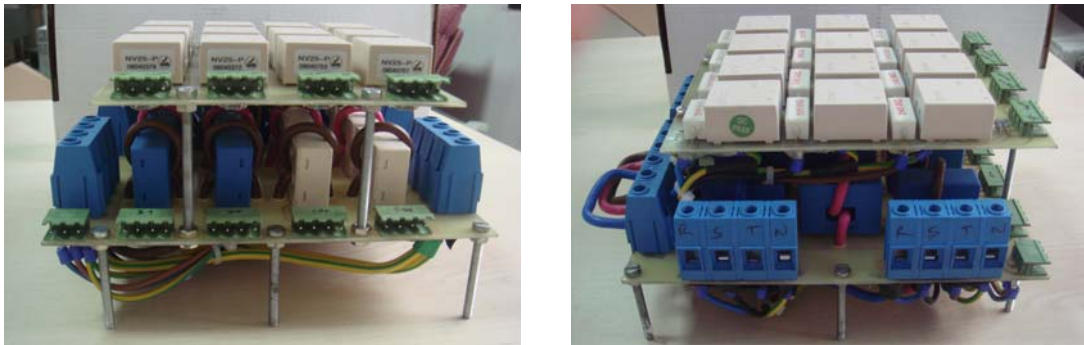


Şekil 4.30: Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması



Şekil 4.31: Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması

BSPAF sistemi laboratuvar test platformunda yapılan tüm ölçümlerin dSPACE DS1103 kontrol geliştirme kartına alınmasını sağlamak amacıyla 3-fazlı kaynak, yük, SAF ve seri transformatör şebeke tarafı gerilimlerini ölçmek için 12 adet gerilim sensörü, 3-fazlı kaynak, yük, PAF ve SAF akımlarını ölçmek için 12 adet akım sensörü kullanılmıştır. Şekil 4.32’de gerçekleştirilen akım ve gerilim ölçüm kartı fotoğrafı görülmektedir.



(a)

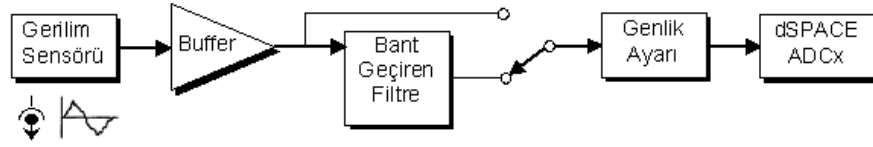
(b)

Şekil 4.32: Gerçekleştirilen akım (alt kat) ve gerilim (üst kat) ölçüm kartı fotoğrafı a) ön görünüşü b) yan görünüşü

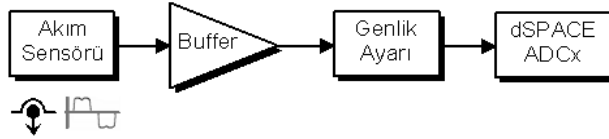


#### 4.3.6. Sinyal koşullandırma arabirim kartları

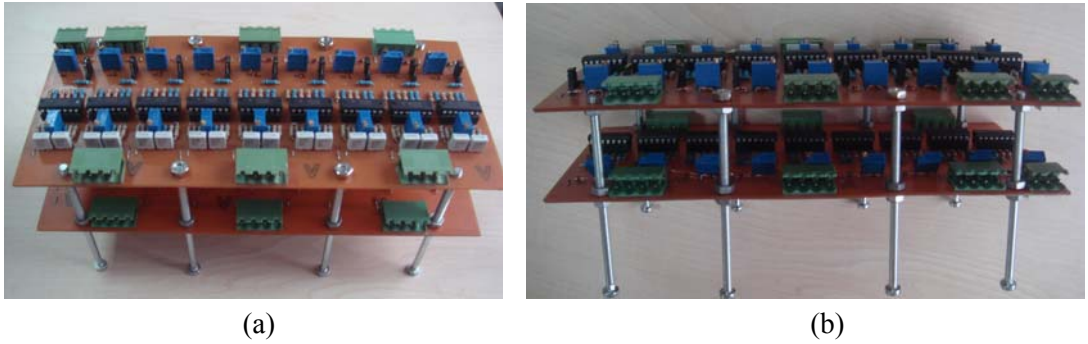
Akım ve gerilim sensörlerinden elde edilen sinyaller, sinyal koşullandırma arabirim kartları ile uygun seviyelere getirilerek dSPACE CLP1103 bağlantı panelindeki, analog sayısal dönüştürücü (Analog to Digital Converter, ADC) girişlerine uygulanmıştır. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de sırasıyla gerilim ve akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramları gösterilmektedir. Şekil 4.35’de gerçekleştirilen akım ve gerilim sinyal koşullandırma arabirim kartı fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.33: Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı



Şekil 4.34: Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı

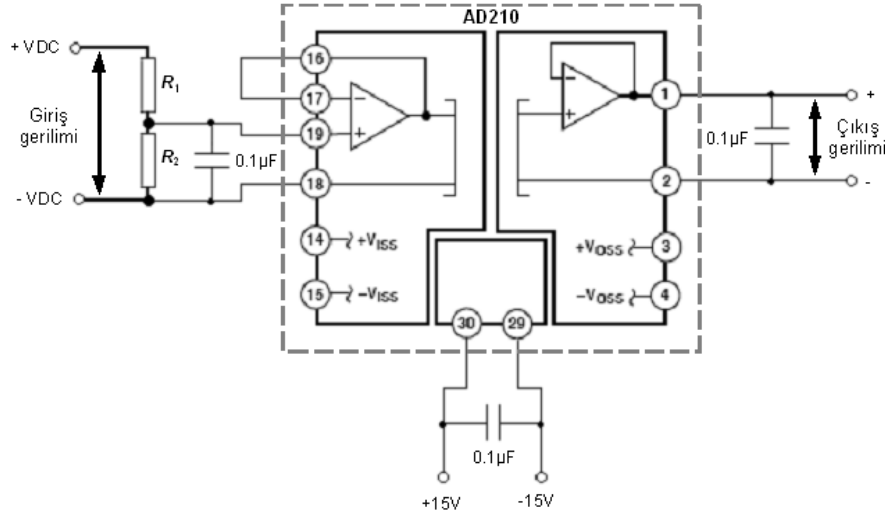


Şekil 4.35: Gerçekleştirilen akım (alt kat) ve gerilim (üst kat) sinyal koşullandırma arabirim kartı fotoğrafı a) üst görünüş b) yan görünüş

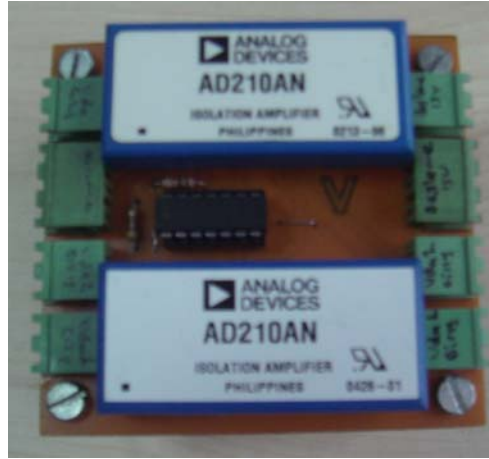
#### 4.3.7. DA gerilim ölçüm kartı

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi güç devresinde, DA-barada bulunan iki kondansatörün gerilimlerinin ölçülmesi amacıyla iki adet izolasyon yükseltici (AD210, 2500 V<sub>rms</sub> yüksek gerilim izolasyonu, giriş, çıkış ve güç izolasyonu, 20 kHz

geniş bant genişliği ve 15 V izoleli güç) kullanılmıştır. DA kondansatör gerilimi, gerilim bölücü dirençler ile 10 V gerilim değerinin altına düşürülerek AD210 girişine uygulanmış ve çıkışta bu gerilim izoleli olarak alınmıştır. Şekil 4.36'da AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması görülmektedir. Şekil 4.37'de gerçekleştirilen DA gerilim ölçüm kartı fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.36: AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması



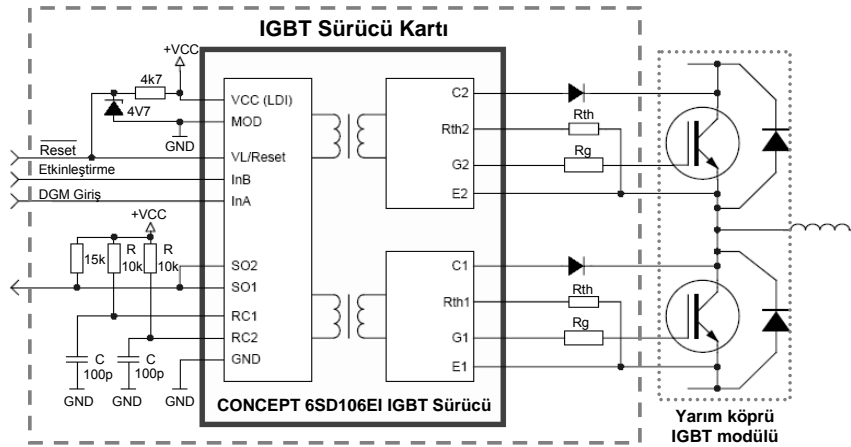
Şekil 4.37: Gerçekleştirilen DA gerilim ölçüm kartı fotoğrafı

#### 4.3.8. IGBT sürücü kartları

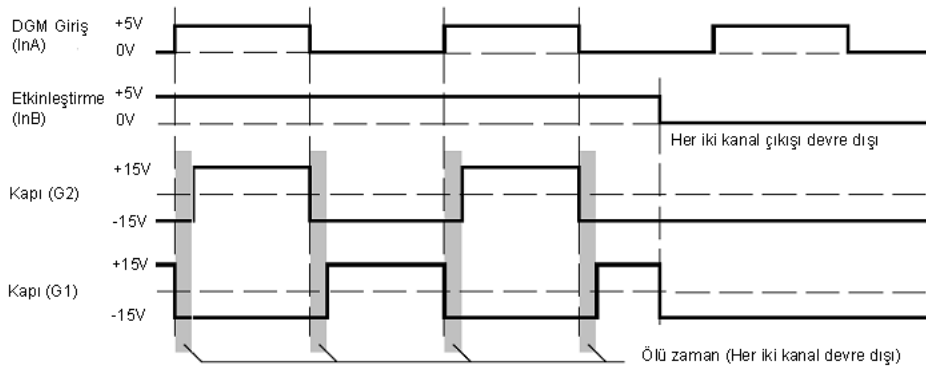
Akım ve gerilim denetleyiciler tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için iki adet 6-kanal sürücü modül (CONCEPT 6SD106EI, tüm anahtarlama sinyallerinin elektriksel izolasyonu, her bir IGBT için kısa devre ve aşırı akım koruma, reset girişi) kullanılmıştır. Bu çalışmada IGBT sürücü yarım köprü

modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları (dead time) otomatik olarak üretilmiştir. Böylece denetim devresinden 3-kollu GKE'nin sadece üstteki IGBT'leri için Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) çıkışları üretmek yeterli olmuştur. Alttaki IGBT'lere uygulanan DGM sinyalleri ise IGBT sürücü katı tarafından ölü zaman eklenerek oluşturulmuştur.

Şekil 4.38'de IGBT sürücü yarım köprü modu devre bağlantı şeması görülmektedir. Ayrıca yapılan bu bağlantı ile sürücü, IGBT'lerin ilettime geçiş sırasında kolektör-emitör gerilim düşümünü ölçerek IGBT'lerin kısa devre ve aşırı akıma karşı korunması sağlanmıştır. Şekil 4.39'da IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri gösterilmektedir.

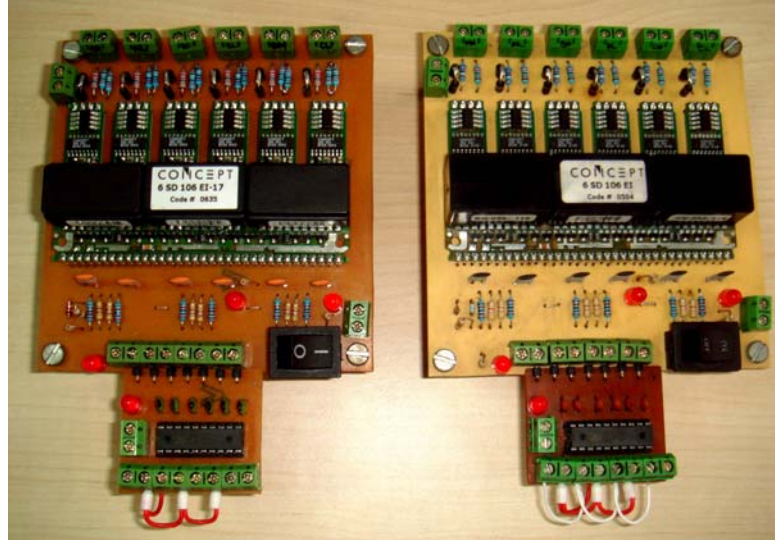


Şekil 4.38: IGBT sürücü yarım köprü modu devre bağlantı şeması



Şekil 4.39: IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri

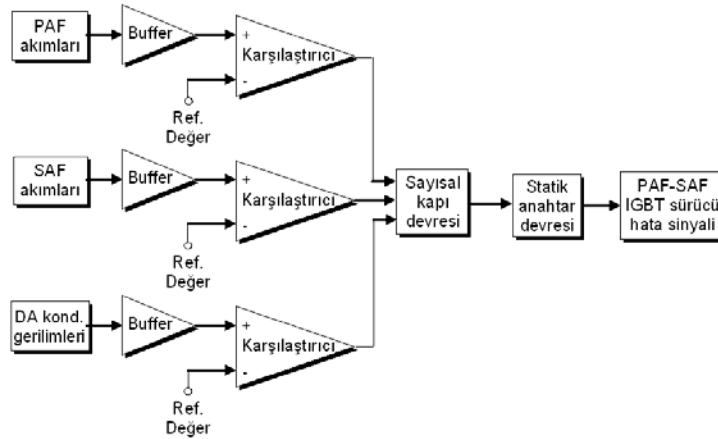
Şekil 4.40'da BSPAF sistemi için gerçekleştirilen 6-kanal IGBT sürücü kartı fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.40: Gerçekleştirilen 6-kanal IGBT sürücü kartları fotoğrafı

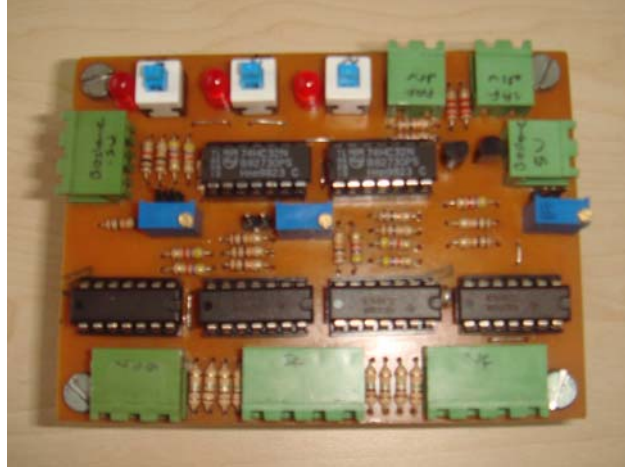
#### 4.3.9. Aşırı akım ve gerilim koruma kartı

BSPAF sisteminde oluşabilecek aşırı akım ve/veya gerilim gibi olumsuz durumlar, hızlı işlemsel yükselteçler kullanılarak gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı ile tespit edilerek, IGBT sürücülerin reset girişine gönderilen sinyal ile IGBT'ler devreden çıkarılmaktadır. Böylece deneysel sistemin güvenli bir şekilde çalıştırılması sağlanmıştır. Şekil 4.41'de aşırı akım ve gerilim koruma kartı blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.41: Aşırı akım ve gerilim koruma kartı blok diyagramı

Şekil 4.42’de gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.42: Gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma kartı fotoğrafı

#### 4.3.10. Besleme devre kartı

BSPAF sistemi deneysel düzeneğinde akım ve gerilim ölçme, akım ve gerilim arabirim katları  $\pm 15$  V’luk simetrik kaynak ile beslenmiştir. IGBT sürücü ve AD 210 izolasyon yükselteci 15 V’luk kaynak ile beslenmiştir. Besleme devreleri 7815 gerilim regülatör entegreleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu entegrelerin aşırı ısınmasını önlemek amacıyla ayrıca fan ile soğutulmuştur. Şekil 4.43’de gerçekleştirilen besleme devre kartı fotoğrafı gösterilmektedir.



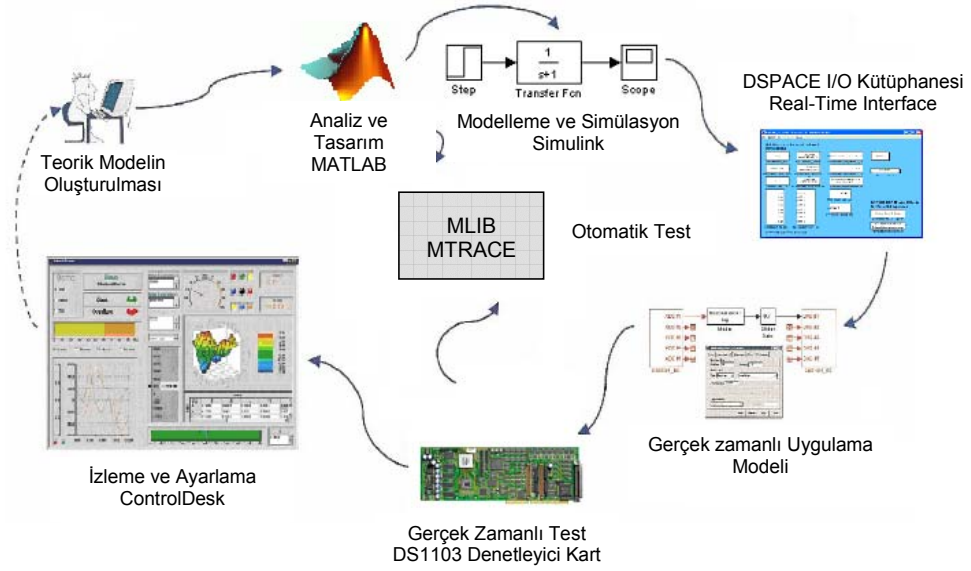
Şekil 4.43: Gerçekleştirilen besleme devre kartı fotoğrafı

#### 4.3.11. DSPACE tabanlı gerçek zamanlı denetim sistemi

Bu bölümde öncelikle MATLAB/Simulink/RTW, dSPACE/RTI yazılımları ve dSPACE denetleyici donanımı birlikte kullanılarak, model tabanlı gerçek zamanlı kontrol sisteminin kurulması anlatılmaktadır. Daha sonra BSPAF sisteminin denetimi için model tabanlı gerçek zamanlı dSPACE kontrol sisteminin kurulması ve test platformu ile ilişkilendirilmesi açıklanmaktadır. DSPACE gerçek zamanlı kontrol sistemi, Simulink bloklarıyla oluşturulan gerçek-zamanlı modelden otomatik olarak C kodları ürettiği için, programın hazırlanma sürecini kısaltırken, aynı zamanda hataların kolay bir şekilde belirlenmesiyle benzetim algoritmaları üzerinden doğrudan müdahalede bulunarak hızlı bir şekilde modifikasyonunun gerçekleştirilmesini de sağlamaktadır. DSPACE ile tipik bir gerçek zamanlı sürecin geliştirilmesi adımları aşağıda verilmektedir.

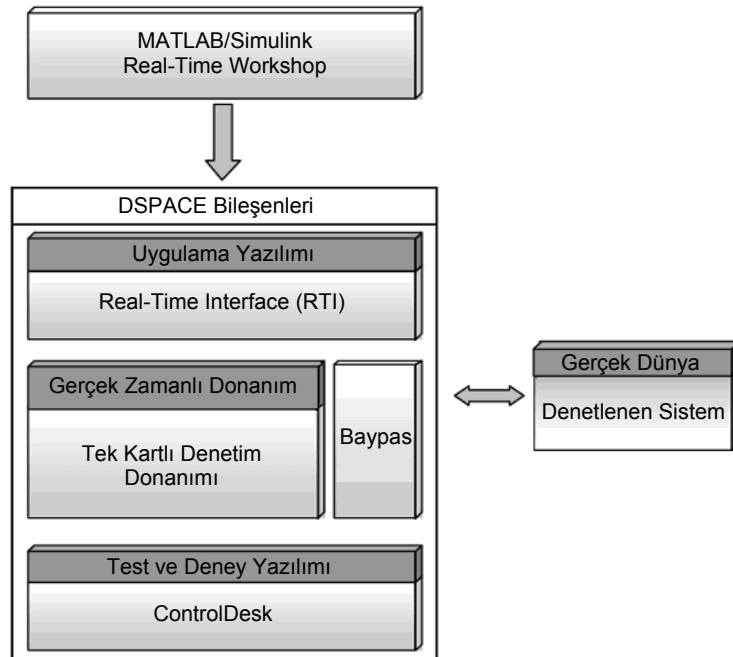
- i. Denetlenecek sistemin teorik modelinin oluşturulması,
- ii. MATLAB ortamında ilk denetim tasarımının oluşturulması,
- iii. Simulink ortamında çevrimdışı simülasyon blok algoritmaları ile denetlenen tasarımın test edilmesi,
- iv. RTI birimindeki analog ve sayısal giriş/çıkış bloklarının Simulink ortamında tanımlanması,
- v. Model için gerekli gerçek zaman kod üretiminin otomatik olarak yapılması,
- vi. C kodların işlemcide değerlendirilmesiyle donanımsal benzetimin (HIL, Hardware-In-the-Loop) gerçekleştirilmesi,
- vii. ControlDesk yazılımıyla verilerin elde edilmesi, toplanan verilerin tablo veya grafiksel olarak gözlemlenmesi ve model içinde kullanılan değişkenlere doğrudan müdahale edilerek, bu değerlerin ayarlanıp hataların giderilmesi ve hızlı bir şekilde modifikasyonun gerçekleştirilmesi,
- viii. Gerçek zamanlı ve donanımsal benzetim sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi, sonuçlara göre sisteme müdahale gerekli ise teorik modelin oluşturulması adımından başlayarak gerçek zamanlı kontrol sisteminin eksikliklerini veya hatalarını giderecek şekilde yeniden tasarlanmasıdır. Böylece gerçek zamanlı kontrol sistemi, doğrudan, kolay ve çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

DSPACE ile tipik bir sürecin geliştirilmesi adımlarına ilişkin blok diyagramı Şekil 4.44'de gösterilmektedir.



Şekil 4.44: DSPACE ile tipik bir sürecin geliştirilmesi döngüsü blok diyagramı

BSPAF sisteminin tasarım ve uygulama aşamaları MATLAB/Simulink ortamında ve dSPACE DS1103 gerçek zamanlı işlemci donanımında yürütülmektedir. DSPACE sistemi donanım ve yazılım bileşenleri Şekil 4.45'de verilmekte ve aşağıda bu bileşenler açıklanmaktadır [115].

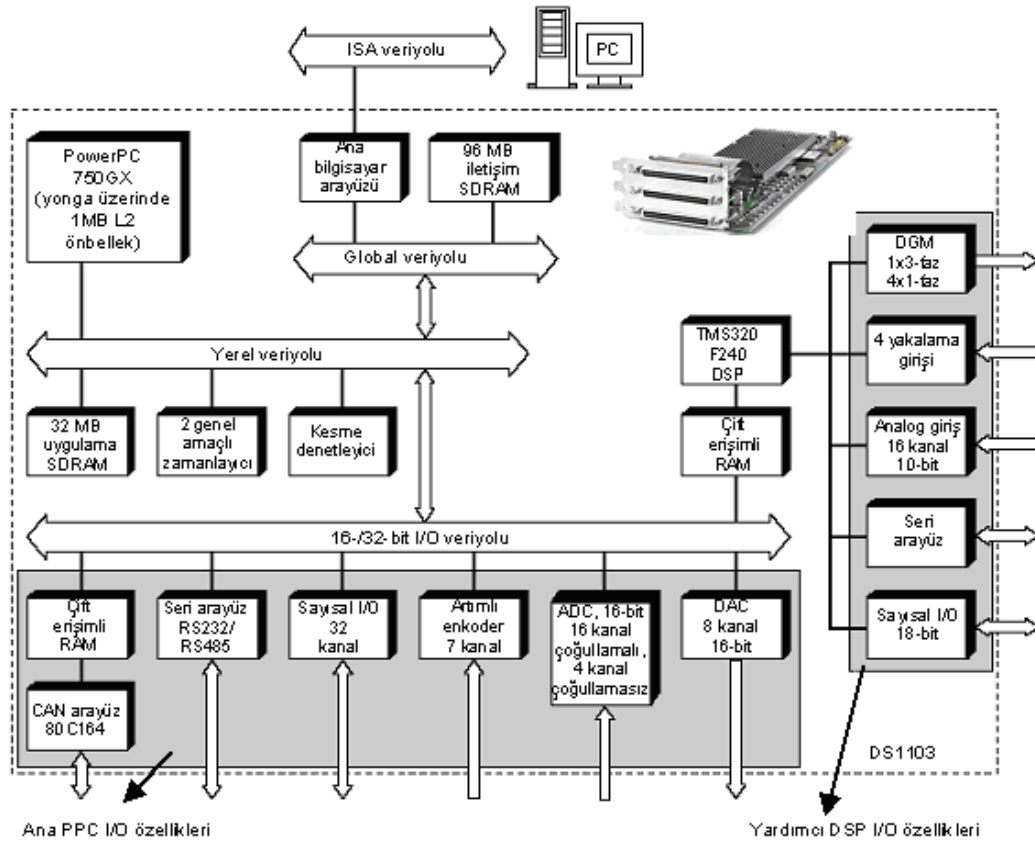


Şekil 4.45: DSPACE gerçek zamanlı kontrol sistemi bileşenleri

DSPACE sistemi donanım bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır.

**DS1103 denetleyici kartı:** Bu kart üzerinde PowerPC 750GX/1 GHz ana işlemci ve Texas Instruments TMS320F240/20 MHz yardımcı işlemci bulunmaktadır. Ana işlemcide, 20 kanal 16 bit ADC, 8 kanal 16 bit sayısal analog dönüştürücü (Digital to Analog Converter, DAC), 32 kanal sayısal giriş/çıkış, yardımcı işlemcide ise 16 kanal 10 bit analog giriş, 18 bit sayısal giriş/çıkış, 1 adet 3-faz ve 4 adet tek-faz DGM ve 4 yakalama girişi bulunmaktadır [115]. Şekil 4.46'da DS1103 PowerPC 750 GX kartının mimari yapısı görülmektedir. DS1103 denetleyici kart, ISA veri yolu üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır.

**CLP1103 bağlantı ve led paneli:** Analog sinyallere erişim BNC konektörleri ile sayısal sinyallere erişim ise Sub-D konektörleri ile yapılmaktadır. LED panel, kartın sayısal sinyallerinin durumunu göstermektedir.



Şekil 4.46: DS1103 PowerPC 750 GX kartının mimari yapısı



DSPACE sistemi yazılım bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır.

**MATLAB:** Denetlenecek sistemin teorik modelinden yararlanılarak çevrimdışı olarak bilgi işlemenin gerçekleştirildiği, analiz, tasarım ve sistem optimizasyon işlemlerinin yerine getirildiği ve ilk denetim tasarımının oluşturulduğu yazılımdır.

**Simulink:** Çevrimdışı benzetim algoritmalarının blok diyagramlar kullanılarak modellenmesinin yapıldığı yazılımdır.

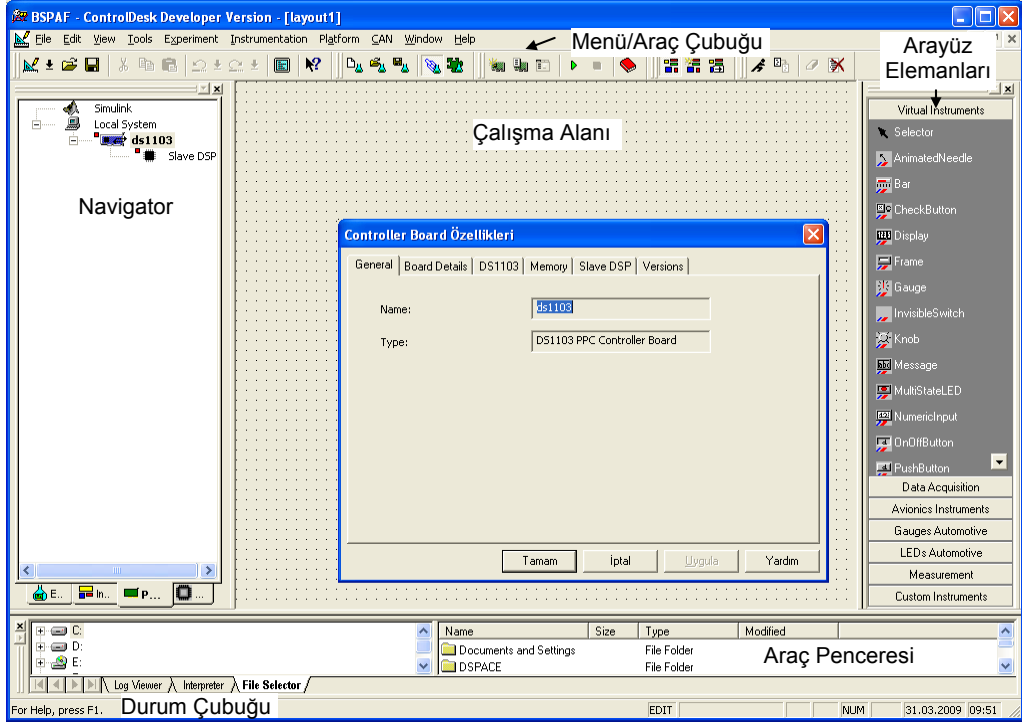
**Real-Time Workshop:** Simulink ortamında oluşturulan bloklardan C kod üretiminin gerçekleştirildiği yazılımdır.

**ControlDesk Developer:** Denetimi gerçekleştirilen sistemin deneysel denetiminin ve test otomasyonunun yapıldığı yazılımdır. Ayrıca dSPACE ControlDesk Developer yazılımı ile, denetleyici kart tarafından hesaplanan ve ölçülen devre parametreleri grafiksel bir platform üzerinden gözlenebilmekte ve bu veriler sonradan istenmek üzere MAT dosyası olarak kaydedilebilmektedir [116]. Şekil 4.47’de dSPACE ControlDesk ortamı gösterilmektedir.

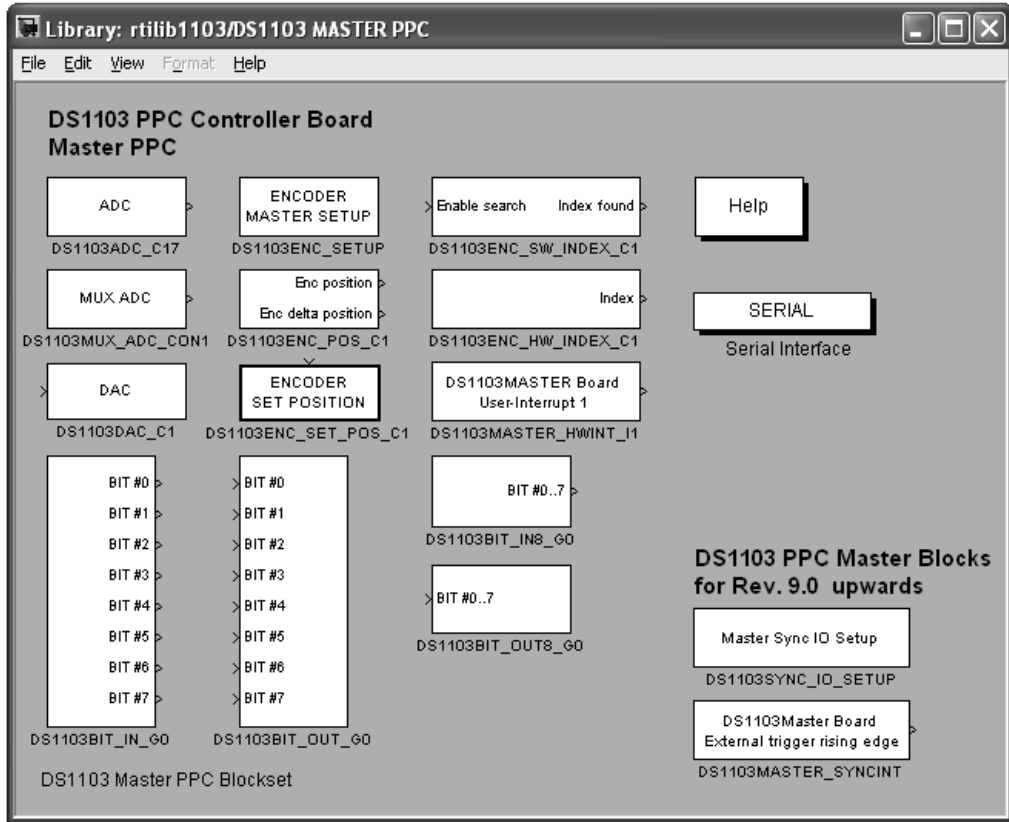
**Real-Time Interface:** Simulink ve dSPACE donanımı arasında bir ara yüzdür. Gerçek zamanlı kodun oluşturulması, yüklenmesi ve dSPACE donanımı üzerinde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu işlem, MATLAB/Simulink blok kütüphanesine eklenen dSPACE’in DS1103 gerçek zamanlı ara yüz I/O blokları ile yapılmaktadır. Şekil 4.48’de MATLAB/Simulink yazılımına entegre edilen DS1103 ana işlemci blokları gösterilmektedir.

**MLIB/MTRACE:** MATLAB çalışma alanından dSPACE gerçek zamanlı donanıma doğrudan erişim fonksiyonlarının bulunduğu bilgi toplama ve değerlendirme birimidir.

**Microtec Power PC C derleyicisi:** DS1103 uygulamalarını derlemek için kullanılmaktadır.



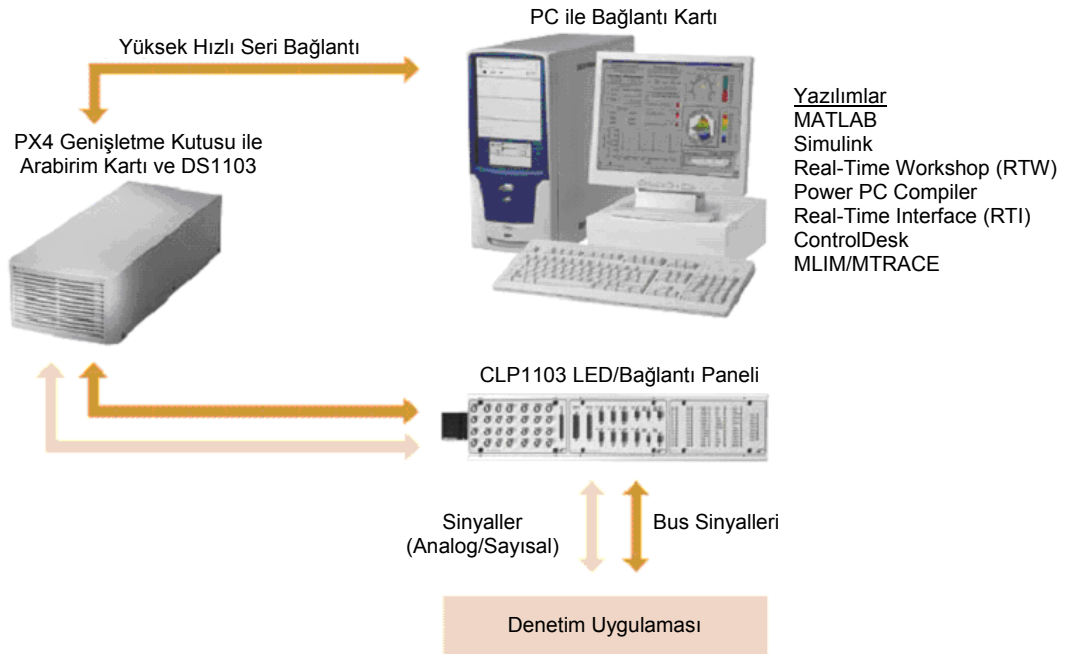
Şekil 4.47: DSPACE ControlDesk ortamı



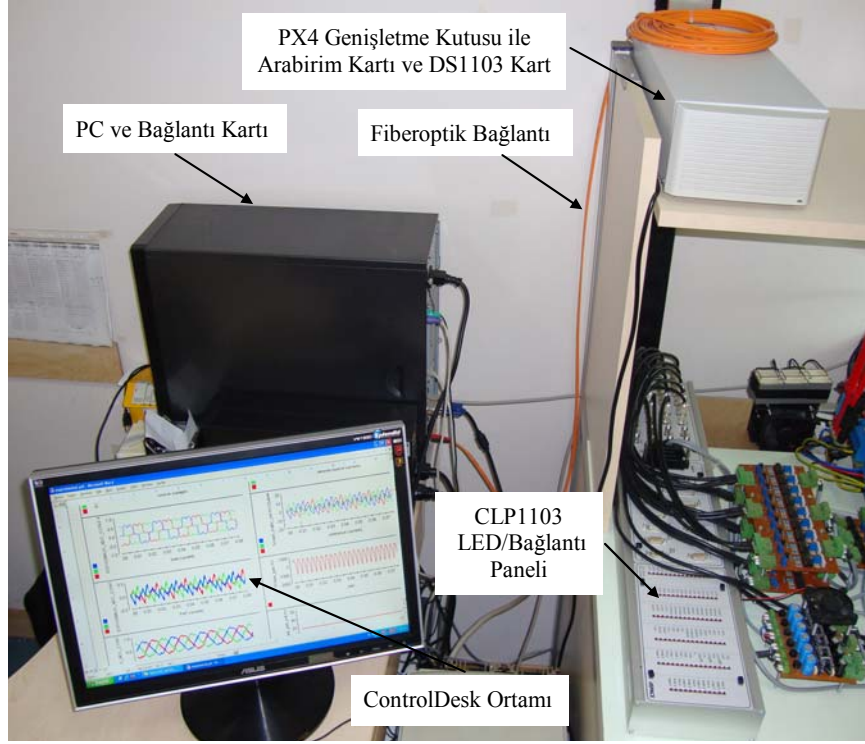
Şekil 4.48: DS1103 ana işlemci RTI blokları

BSPAF sistemi denetim algoritmasının gerçek zamanlı uygulaması için simülasyon modelindeki giriş ve çıkış blokları, Simulink blok kütüphanesinde gerçek-zamanlı modele dönüştürmede kullanılan dSPACE blokları (analog, sayısal giriş/çıkış) ile değiştirilerek deneysel modeller oluşturulmuştur. Bu modeller Simulink/RTW ve dSPACE/RTI yazılımları sayesinde gerçek-zamanlı koda dönüştürülmüştür. Bu ek bloklar sayesinde Simulink ile dSPACE gerçek-zaman donanımı arasında bağlantı kurulmuştur.

DS1103 denetleyici kartı dSPACE sistemi içinde yer alan PX4 ISA bus genişletme kutusundaki ISA yuvasına takılmaktadır. Genişletme kutusuna ve bilgisayarın PCI yuvasına sırasıyla DS814 ve DS817 PCI bağlantı kartları takılmaktadır. Bu kartlar arasındaki fiber optik bağlantı ile dSPACE ve bilgisayar arasında yüksek hızlı haberleşme sağlanmaktadır. BSPAF sisteminin giriş ve çıkışları CLP1103 bağlantı ve led paneli aracılığıyla yapılmıştır. Şekil 4.49'da dSPACE sistemi konfigürasyonu gösterilmektedir. Laboratuarda kurulan dSPACE sistemi fotoğrafı ise Şekil 4.50'de verilmektedir.



Şekil 4.49: DSPACE sistemi konfigürasyonu

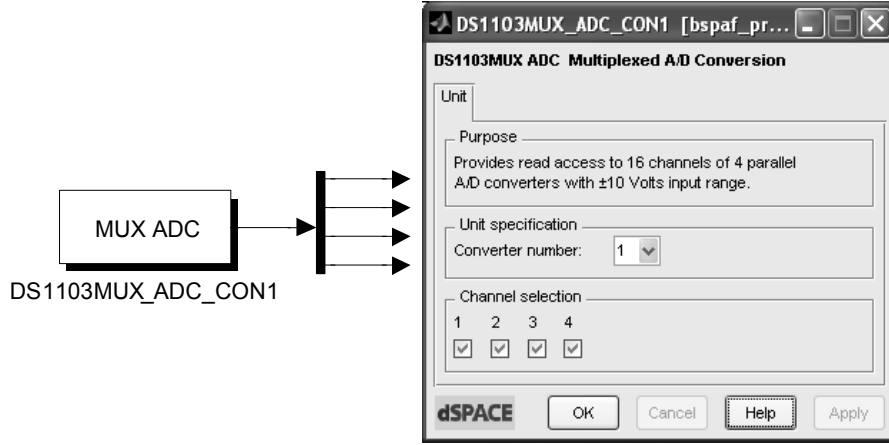


Şekil 4.50: Laboratuvarında kurulan dSPACE sistemi fotoğrafı

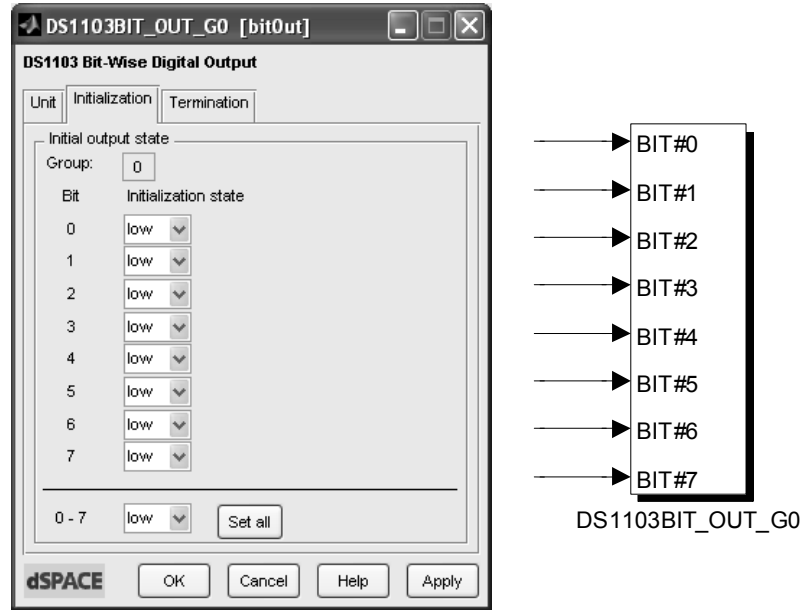
DSPACE DS1103 denetleyici kart, ana işlemcide 16 bit 16 kanal (4 paralel) çoklamalı ve 4 kanal çoklamasız analog girişlere sahiptir. DSPACE RTI kütüphanesinde bulunan DS1103MUX\_ADC\_CON1-4 blokları BSPAF sisteminde seçilen kanallardan akım ve gerilim verilerinin okunması için kullanılmıştır. Denetleyici kartın ADC girişlerine  $\pm 10$  V değerinde uygulanan gerilimler DS1103MUX\_ADC\_CON1-4 bloğunun çıkışında  $\pm 1$  (double) olarak ölçeklenmektedir. Bu ölçeklenmiş değerler, BSPAF sisteminin gerçek zamanlı denetiminde kullanılmak üzere katsayılar ile çarpılarak tekrar gerçek değerlere dönüştürülmüştür. Şekil 4.51’de dSPACE/RTI ADC blok özellikleri görülmektedir. Dönüştürücü numarası ve kanal seçimi yapılarak istenen kanal aktif yapılabilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi çoklayıcı (multiplexer) kullanılarak her bir kanal ayrı olarak seçilebilmektedir.

DSPACE DS1103 denetleyici kart ana işlemcide 8 bitlik gruplar halinde 32 bit sayısal giriş/çıkışa sahiptir. 8 bitlik gruplar giriş veya çıkış olarak ayarlanabilmektedir. Her bir sayısal girişin başlangıç değeri yüksek veya düşük olarak belirlenebilmektedir. DSPACE RTI kütüphanesinde bulunan

DS1103BIT\_OUT\_G0 bloğu, BSPAF sisteminde PAF ve SAF birimlerinin DGM çıkışları olarak kullanılmıştır. Şekil 4.52’de dSPACE/RTI sayısal çıkış blok özellikleri gösterilmektedir.



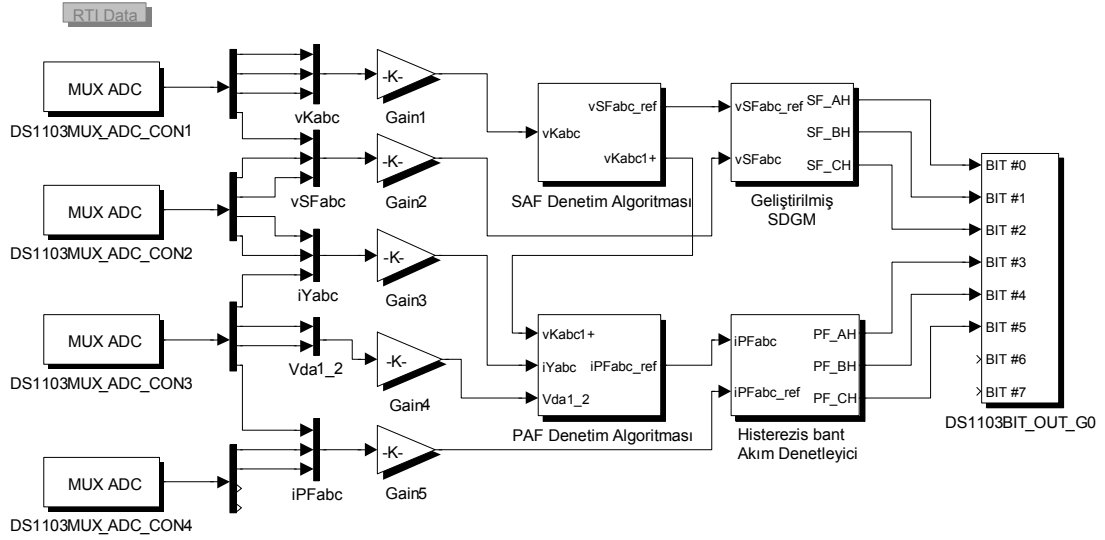
Şekil 4.51: DSPACE/RTI ADC blok özellikleri



Şekil 4.52: DSPACE/RTI sayısal çıkış blok özellikleri

Matlab/Simulink ortamında DS1103 ana işlemci RTI blokları kullanılarak oluşturulan BSPAF sisteminin geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi tabanlı gerçek zamanlı denetim blok diyagramı Şekil 4.53’de gösterilmektedir. CLP1103 bağlantı paneli aracılığıyla DS1103 denetleyici kartının analog girişlerinden DS1103MUXADC\_CON blokları kullanılarak Matlab/Simulink ortamına alınan

kaynak ve yük akım ve gerilim bilgileri kazanç (gain) ile çarpılarak normalize edilmiş ve SAF ve PAF denetim algoritmalarında kullanılmıştır.



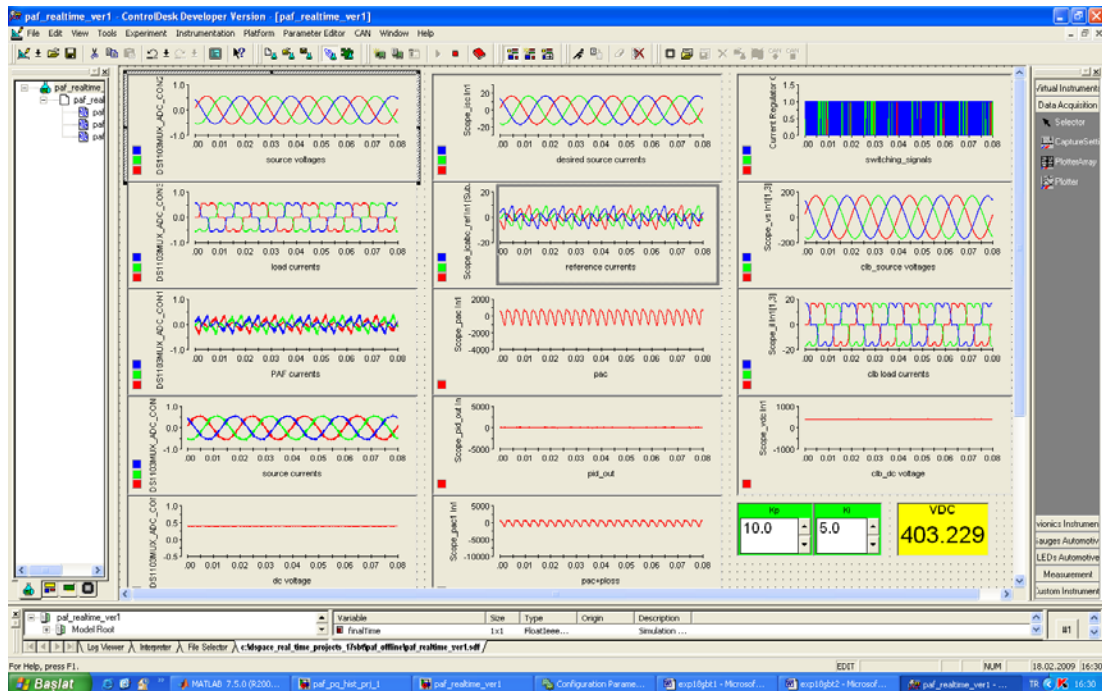
Şekil 4.53: 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan gerçek zamanlı denetim blok diyagramı

SAF denetim algoritmasında analog girişlerden alınan kaynak gerilimleri kullanılarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi ile referans gerilim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen referans gerilim değerleri geliştirilmiş SDGM gerilim denetleyici algoritmasında üçgen karşılaştırma yöntemi kullanılarak, sayısal çıkış kanalları üzerinden SAF tarafındaki IGBT sürücüyü anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Bu anahtarlama sinyalleri DS1103BIT\_OUT\_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla SAF'ye ait IGBT sürücüyü gönderilmiştir.

PAF denetim algoritmasında, 3-fazlı yük akımları, kaynak gerilimleri ve DA-bara gerilim değişimi kullanılarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi tabanlı PAF'nin üretmesi gereken referans akım değerleri belirlenmiştir. Elde edilen referans akımlar, histerezis bant akım denetleyicide PAF'den geçen akım değerleri ile karşılaştırılarak PAF anahtarlama sinyalleri elde edilmiştir. Bu sayısal sinyaller DS1103BIT\_OUT\_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla PAF'ye ait IGBT sürücüyü gönderilmiştir. Sadece üst kollarda bulunan IGBT'ler için gönderilen 3 anahtarlama sinyali, IGBT sürücü

yardımıyla ölü zaman gecikmesi de eklenerek alt kollar için otomatik olarak üretilmiştir.

BSPAF sisteminin PAF biriminin geliştirilmesinde ControlDesk yazılımıyla kaynak akımı, kaynak gerilimi, yük akımı, PAF akımı ve DA-bara gerilimi verileri gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve DA-bara gerilimi denetimi için PI katsayıları gerçek zamanlı olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.54’de ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı arayüzü gösterilmektedir.



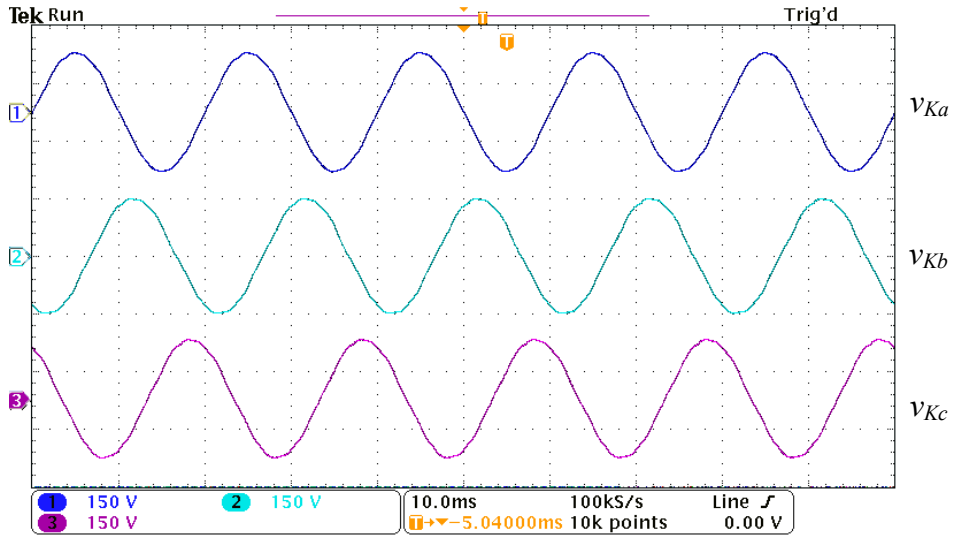
Şekil 4.54: ControlDesk çalışma alanında oluşturulan kullanıcı arayüzü

#### 4.4. Deneysel Sonuçlar

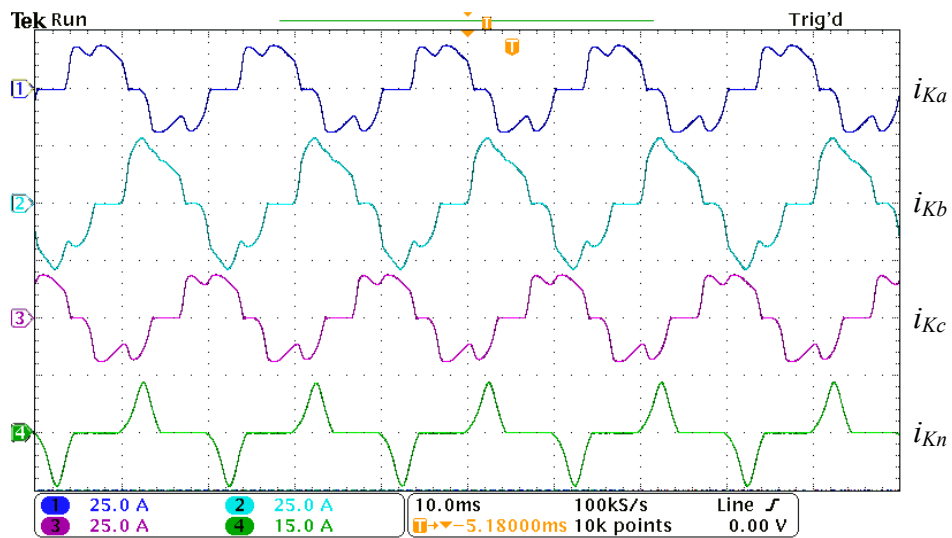
Tez çalışmasında önerilen geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi ile dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, kaynak gerilim harmoniği ve kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu çalışmaları deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen dalga şekilleri Tektronix DPO3054 osiloskop ile kaydedilmiştir. Harmonik analizi sonuçları ise Fluke 434 güç kalite analizörü ile alınmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

#### 4.4.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

3-kollu 4-telli BSPAF sistemi deneysel çalışmalarında, dengesiz ve doğrusal olmayan yük olarak Şekil 4.13’de gösterildiği gibi tetikleme açısı  $\alpha=30^\circ$  olan 3-faz  $RL$  yüklü yarı denetimli tristörlü doğrultucu ve  $b$ -fazına tek-faz  $RC$  yüklü diyotlu doğrultucu kullanılmıştır. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel dalga şekilleri Şekil 4.55’de gösterilmektedir. Şekil 4.55a’da kaynak gerilimi dalga şekilleri ve Şekil 4.55b’de kompanzasyondan önce dengesiz-doğrusal olmayan kaynak akımı dalga şekilleri görülmektedir. Periyodik akım dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir.

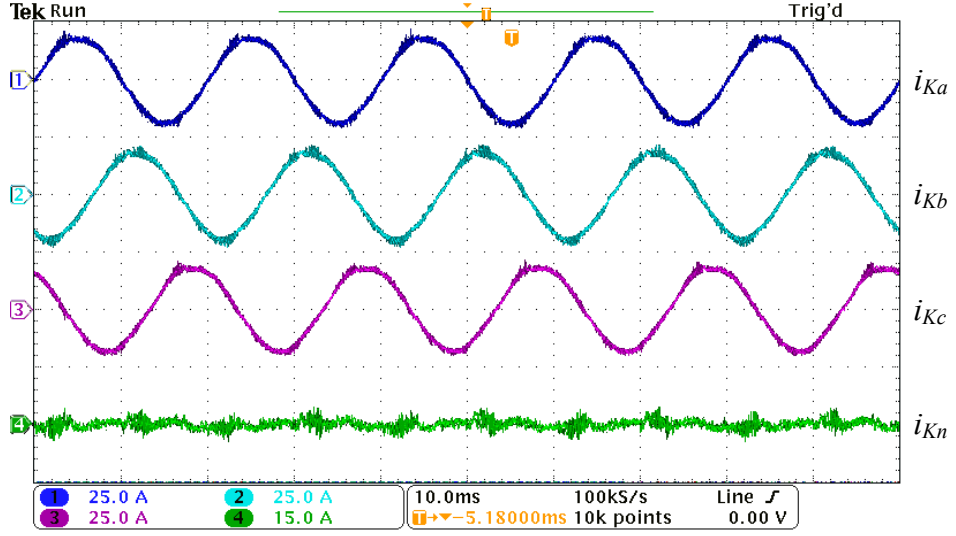


(a) Kaynak gerilimi dalga şekilleri

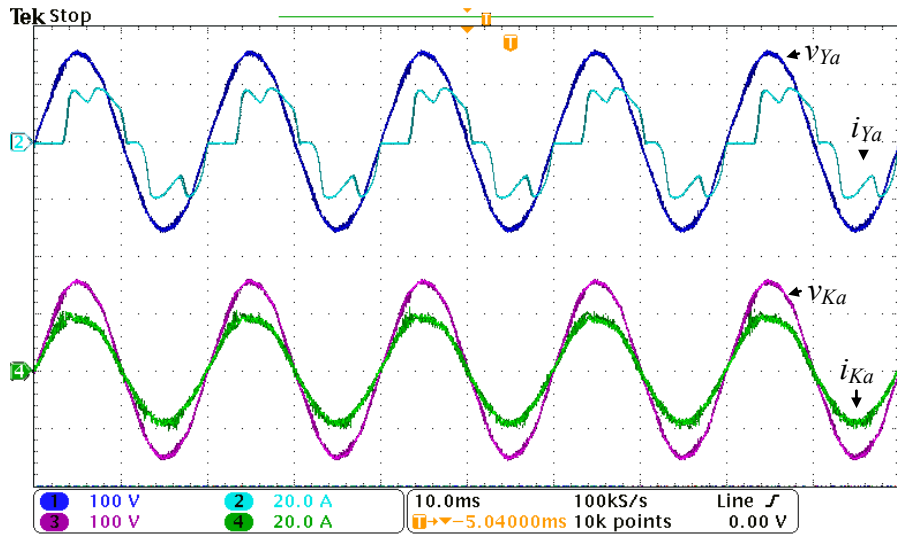


(b) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri

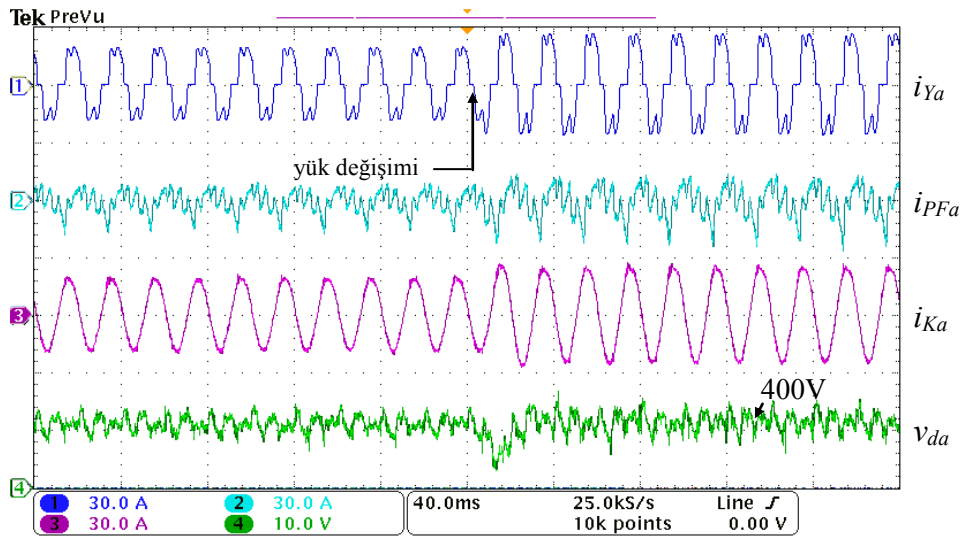




(c) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri



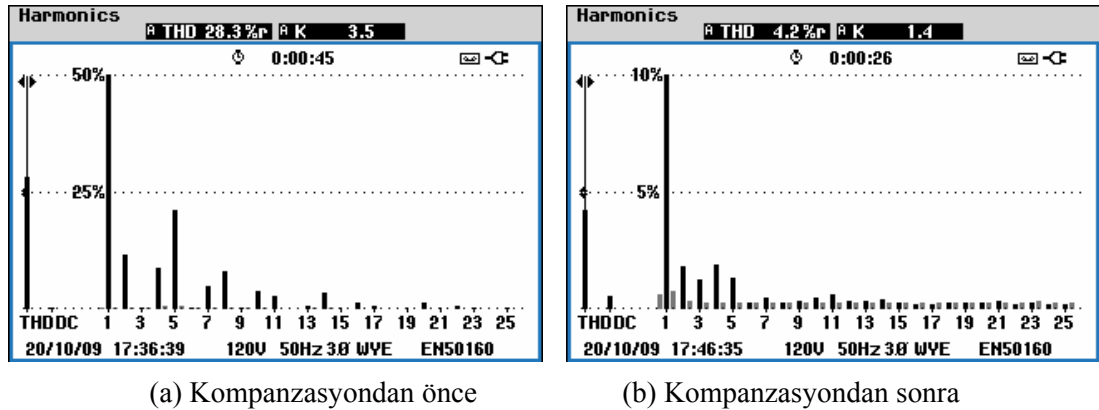
(d) Reaktif güç kompanzasyonu



(e) Sistemin yük değişimi koşulunda performansı

Şekil 4.55: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 4.55c’de görüldüğü gibi BSPAF sisteminin PAF birimi ile kompanzasyondan sonra kaynak akımları dengelenmekte, sinüzoidal dalga şekline benzetilmekte ve nötr akımı azaltılmaktadır. Şekil 4.55d’de  $a$ -fazı yük gerilimi ile yük akımı (üst şekil) ve kaynak gerilimi ile kaynak akımı (alt şekil) arasındaki faz farkı gösterilerek PAF biriminin reaktif güç kompanzasyonu performansı incelenmektedir. PAF birimi kaynak gerilimi ile kaynak akımını aynı faza getirerek yükün reaktif gücünü kompanze etmektedir. Şekil 4.55e’de yük değişimi koşulunda üstten alta doğru  $a$ -fazı yük akımı, PAF akımı, kompanze edilen kaynak akımı ve DA-bara gerilimi ( $v_{da1}+v_{da2}$ ) görülmektedir. PAF birimi yük değişimi sırasında DA-bara gerilimini yaklaşık 1 periyotta referans değerine oturtmaktadır. Şekil 4.56’da kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı gösterilmektedir. Burada, 3-faz yarı denetimli tristörlü doğrultucu kullanımı nedeniyle ortaya çıkan çift harmonikler açıkça görülmektedir.



(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 4.56: Kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı

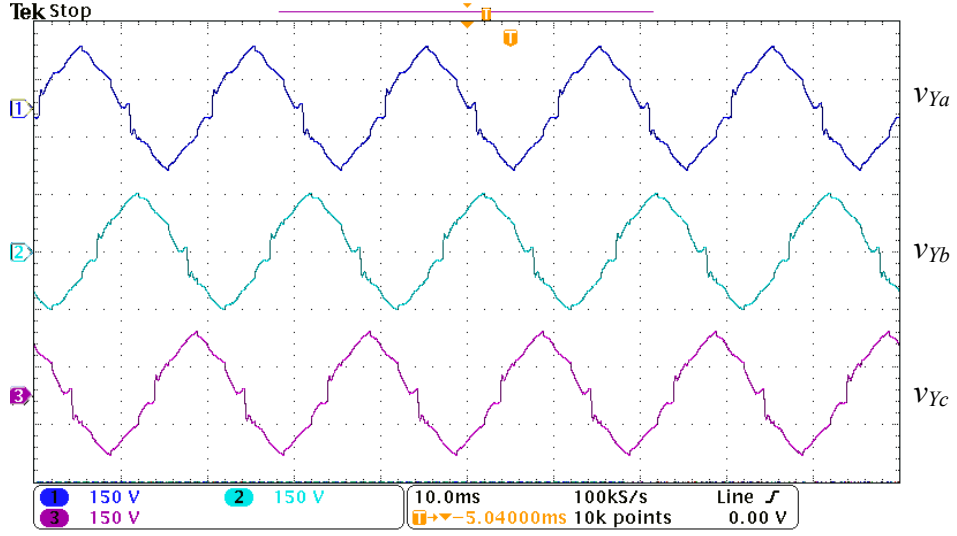
Tablo 4.11’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel sonuç özeti verilmektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde THB akım değerinin ortalama olarak %28’den %4,1’e düşürüldüğü gösterilmektedir. Kompanzasyon sonrasında 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi başarılı biçimde tüm harmonikleri azaltarak IEEE 519 standardında istenen düzeyin altına indirmeyi başarmaktadır. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 12,8 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 5,2 A’den 1,2 A’e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,88’den 0,99’a yükseltilmektedir.

Tablo 4.11: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

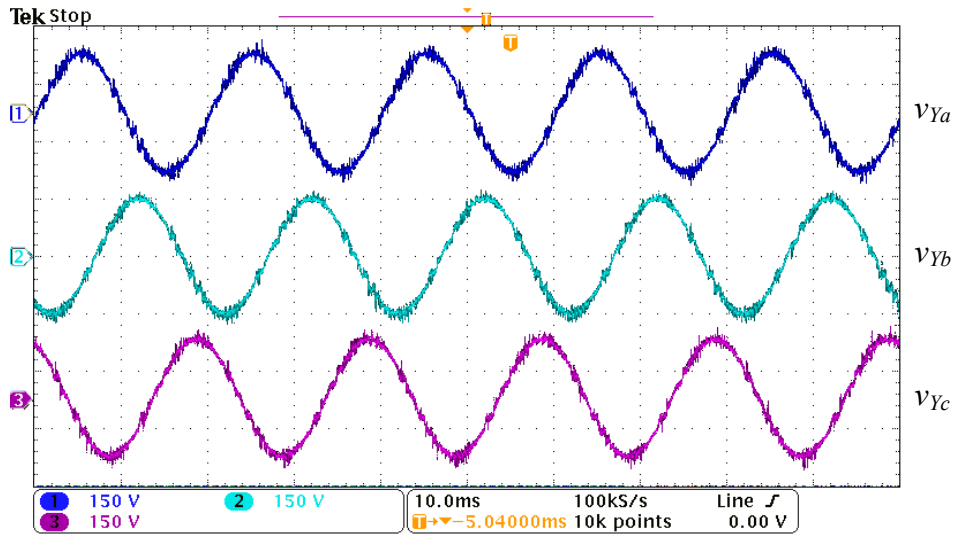
Kaynak akımları ( $i_k$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	<i>a</i> -fazı	12,7	12,8
	<i>b</i> -fazı	16,4	12,9
	<i>c</i> -fazı	12,6	12,5
	nötr	5,2	1,2
THB (%)	<i>a</i> -fazı	28,3	4,2
	<i>b</i> -fazı	27,4	4,0
	<i>c</i> -fazı	28,4	4,3
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	9,1	1,1
	Sıfır bileşen	9,8	1,3
Güç Faktörü		0,88	0,99

#### 4.4.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

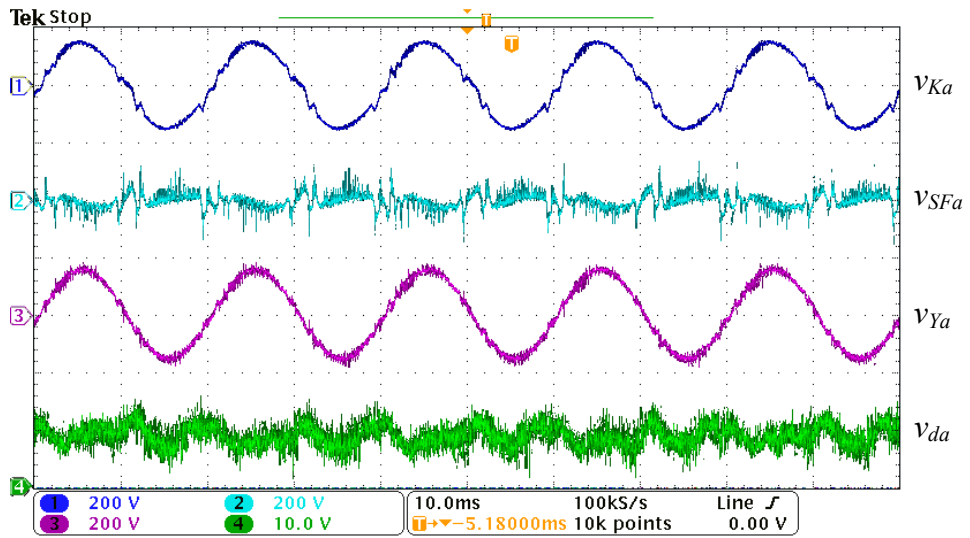
Sistem empedansı 59  $\mu\text{H}$ 'den 3,6 mH'ye yükselttilerek ve OBN'ye bağlanan *RC* yüklü doğrultucu (doğrusal olmayan yük-2) ile çekilen harmonik akımlar kaynak tarafında gerilim harmonikleri oluşturulmuştur. Kaynak tarafındaki gerilim harmonikleri %10 düzeyine yükselttilerek test çalışmalarında gerilim harmonikleri meydana getirilmiştir. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi kaynağa bağlanan doğrusal olmayan yük-1 grubu ile dengesiz ve sinüzoidal olmayan akımlar çekilmektedir. Periyodik akım ve gerilim dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 4.57'de kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel dalga şekilleri gösterilmektedir. Şekil 4.57a'da kompanzasyondan önce 3-faz harmonik içeren yük gerilimleri görülmektedir. Şekil 4.57b'de gösterildiği gibi kompanzasyondan sonra yük gerilimleri sinüzoidal dalga şekline benzetilmektedir. Şekil 4.57c'de üstten alta doğru, *a*-fazı kaynak gerilimi, SAF gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi ve DA-bara gerilimi gösterilmektedir. DA-bara geriliminin istenilen 400 V değerine oturduğu görülmektedir. Şekil 4.57d'de kompanzasyondan önce dengesiz-doğrusal olmayan kaynak akımları gösterilmektedir. Şekil 4.57e'de görüldüğü gibi kompanzasyondan sonra kaynak akımları sinüzoidal dalga şekline benzemekte, dengelenmekte ve aynı zamanda nötr akımı kompanze edilmektedir.



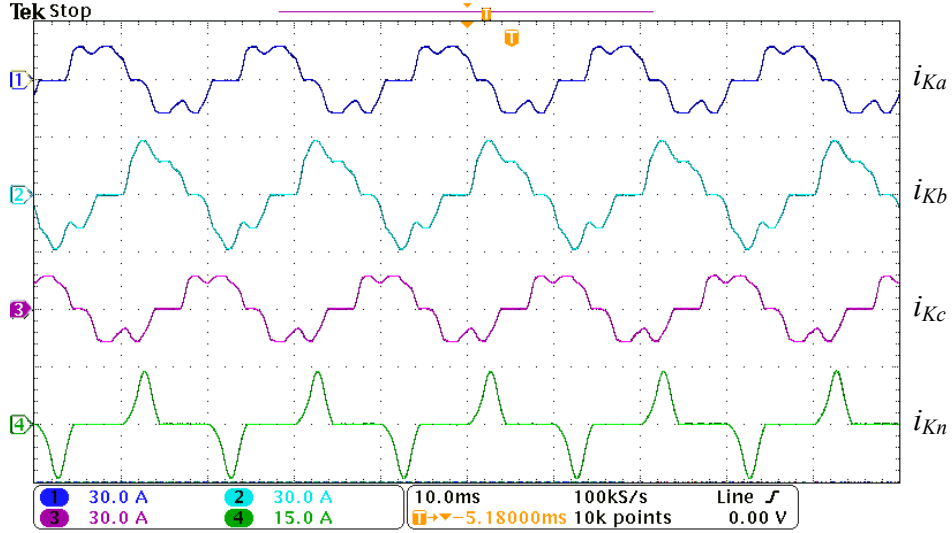
(a) Kompanzasyondan önce yük gerilimi dalga şekilleri



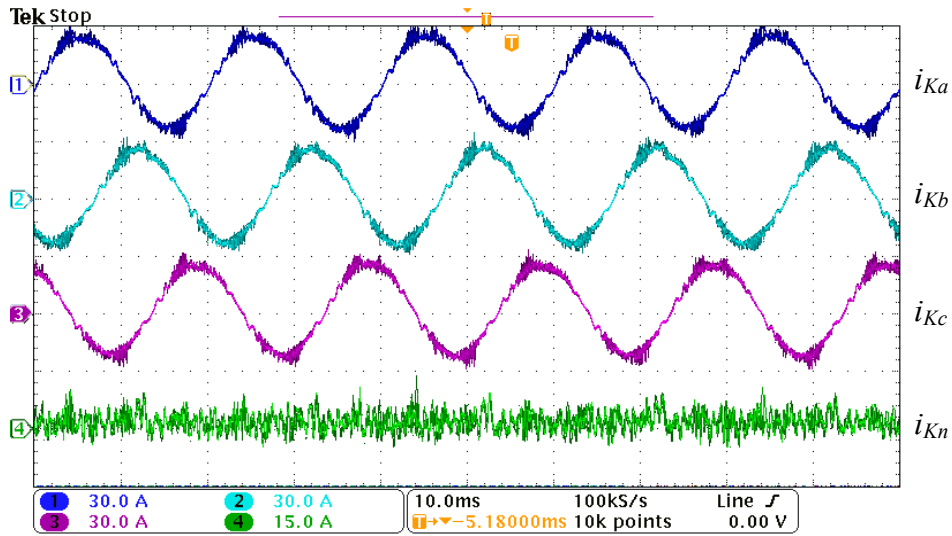
(b) Kompanzasyondan sonra yük gerilimi dalga şekilleri



(c) Kaynak gerilimi, SAF gerilimi, yük gerilimi ve DA-bara gerilimi dalga şekilleri



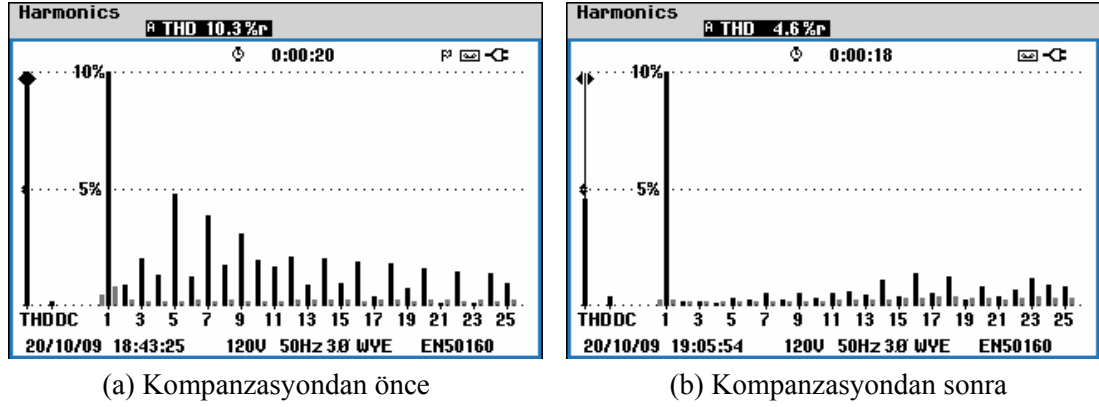
(d) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri



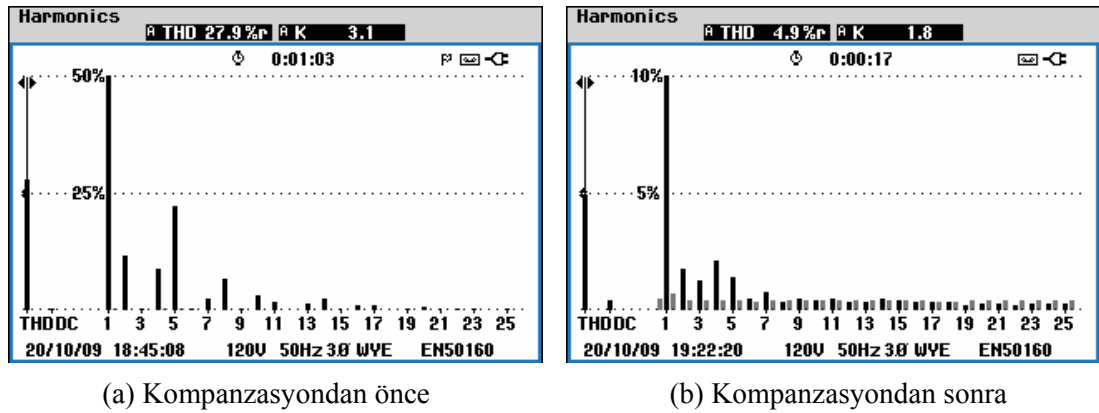
(e) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri

Şekil 4.57: Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Kompanzasyondan önce ve sonra yük gerilimi  $a$ -fazı harmonik dağılımı Şekil 4.58'de gösterilmektedir. Harmonik dağılımdan özellikle düşük değerli gerilim harmoniklerinin oldukça azaltıldığı açıkça görülmektedir. Ortaya çıkan yüksek değerli harmonikler ise küçük bir pasif filtre ile kolaylıkla giderilebilmektedir. Kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı Şekil 4.59'da gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde akım harmoniklerinin de başarılı biçimde azaltıldığı görülmektedir. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özetleri sırasıyla Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'de verilmektedir.



Şekil 4.58: Yük gerilimi *a*-fazı harmonik dağılımı



Şekil 4.59: Kaynak akımı *a*-fazı harmonik dağılımı

Tablo 4.12: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	<i>a</i> -fazı	103,3	110,4
	<i>b</i> -fazı	102,4	109,5
	<i>c</i> -fazı	103,6	109,9
THB (%)	<i>a</i> -fazı	10,3	4,6
	<i>b</i> -fazı	9,1	4,5
	<i>c</i> -fazı	9,8	4,3

Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyondan önce yük gerilimlerinin ortalama THB değeri %9,7 iken PAF ile harmonik akım kompanzasyonu yapıldığında yük gerilimlerinin ortalama THB değeri ancak %9,7'den %6,8'e düşürülebilmektedir. SAF ile kompanzasyondan sonra ise yük gerilimlerinin ortalama THB değeri %4,4 olmakta ve hedeflenen %5 standardının altına düşürülmektedir. Ayrıca yük gerilimleri nominal değerine regüle edilerek dengelenmektedir.

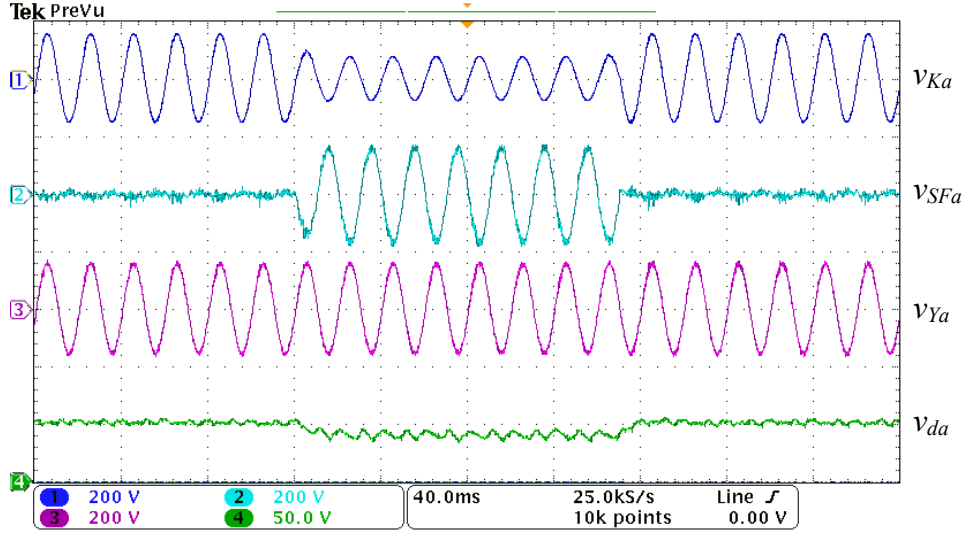
Tablo 4.13: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_k$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	<i>a</i> -fazı	11,6	16,5
	<i>b</i> -fazı	15,3	16,6
	<i>c</i> -fazı	11,6	16,3
	nötr	5,2	2,3
THB (%)	<i>a</i> -fazı	27,9	4,9
	<i>b</i> -fazı	29,6	4,6
	<i>c</i> -fazı	27,9	4,7
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	9,5	0,9
	Sıfır bileşen	10,2	1,5
Güç Faktörü		0,86	0,99

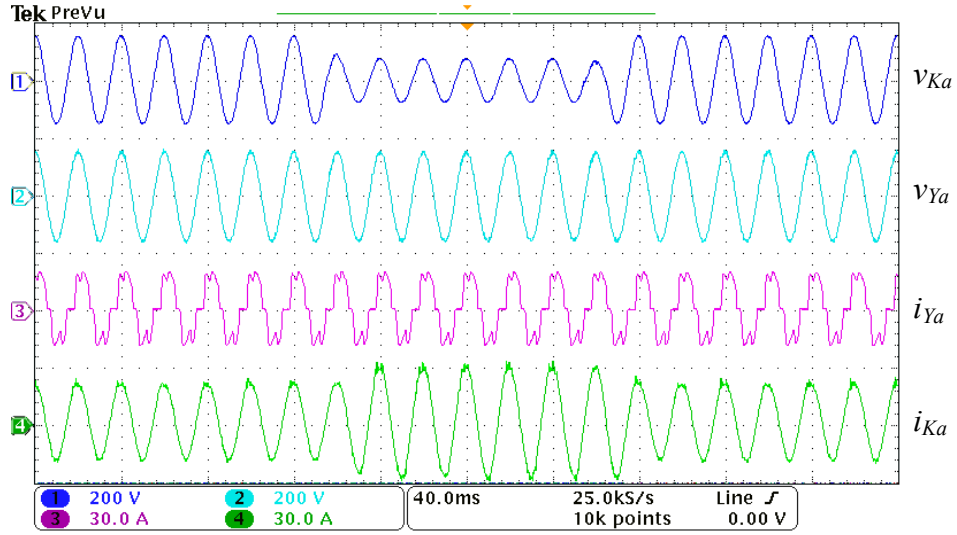
Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kaynak akımlarının ortalama THB değeri kompanzasyondan önce %28,4 iken kompanzasyondan sonra %4,7 olmakta ve böylece hedeflenen %5 standardının altına indirilmektedir. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 16 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 5,2 A'den 2,3 A'e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,86'dan 0,99'a yükseltilmektedir.

#### 4.4.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

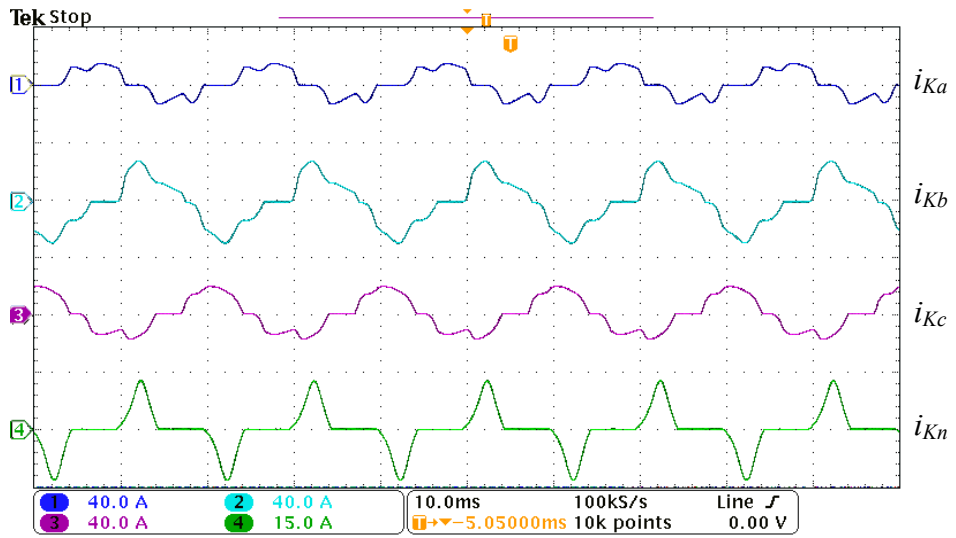
Gerilim çökmeleri çok yaygın güç kalitesi bozukluklarından biridir ve tipik olarak güç sisteminde meydana gelen faz-toprak hatalarından veya büyük elektrik motorların yol almasından kaynaklanmaktadır [2]. Şekil 4.60'da tek-faz kaynak gerilim çökmesi ve aynı zamanda dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel dalga şekilleri gösterilmektedir. Periyodik akım ve gerilim dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 4.60a'da yukarıdan aşağıya doğru *a*-fazı kaynak gerilimi, SAF gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi ve DA-bara gerilimi gösterilmektedir. BSPAF sistemi ile *a*-fazı kaynak gerilimi çökmesi durumunda yük uçlarındaki gerilim anma etkin değerine regüle edilmektedir.



(a) Kaynak gerilimi, SAF gerilimi, yük gerilimi ve DA-bara gerilimi dalga şekilleri

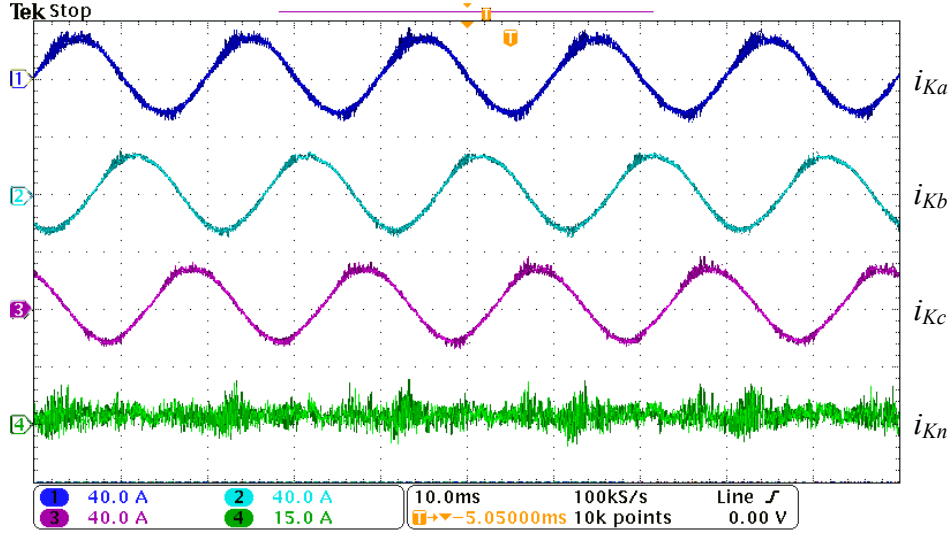


(b) Kaynak gerilimi, yük gerilimi, yük akımı ve kaynak akımı dalga şekilleri



(c) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri

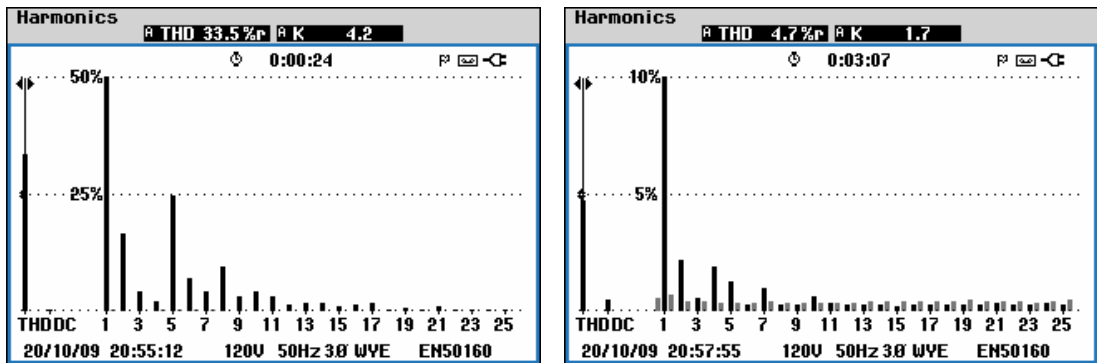




(d) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri

Şekil 4.60: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 4.60b’de yukarıdan aşağıya doğru *a*-fazı kaynak gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi, yük akımı ve kompanze edilen kaynak akımı gösterilmektedir. Kısa süreli çökme anında yük geriliminin kompanzasyonu için gerekli güç kaynaktan sağlandığından kaynak akımlarının genliği artmaktadır. Kompanzasyondan önce dengesiz-doğrusal olmayan kaynak akımları Şekil 4.60c’de görülmektedir. Kompanzasyondan sonra Şekil 4.60d’de görüldüğü gibi kaynak akımları sinüzoidal dalga şeklinde ve dengeli olmaktadır. Ayrıca nötr akımı da azaltılmaktadır. Kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı *a*-fazı harmonik dağılımı Şekil 4.61’de gösterilmektedir. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel sonuç özetleri sırasıyla Tablo 4.14 ve Tablo 4.15’de verilmektedir.



(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 4.61: Kaynak akımı *a*-fazı harmonik dağılımı

Tablo 4.14: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	$a$ -fazı	54,7	110,2
	$b$ -fazı	110,4	110,5
	$c$ -fazı	111,0	108,2
Dengesizlik (%)	Negatif-sıra	20,0	1,2
	Sıfır-sıra	20,6	0,3

Tablo 4.15: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	8,3	17,8
	$b$ -fazı	15,2	17,5
	$c$ -fazı	11,6	17,3
	nötr	5,1	1,9
THB (%)	$a$ -fazı	33,5	4,7
	$b$ -fazı	31,4	3,9
	$c$ -fazı	25,6	4,9
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	26,5	1,0
	Sıfır bileşen	11,8	0,5
Güç Faktörü		0,86	0,99

Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde çökme görülen  $a$ -faz gerilimi 54,7 V iken  $b$  ve  $c$ -fazı gerilimi ortalama olarak 110,7 V değerindedir. Kompanzasyon sonrasında dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen gerilimler kompanze edilerek yük gerilimleri ortalama olarak 109,6 V değerine yükseltilmekte ve dengelenmektedir. Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde  $a$ -fazı için % 33,5,  $b$ -fazı için %31,4 ve  $c$ -fazı için de %25,6 olan THB akım değerleri, kompanzasyon sonrasında %5 düzeyinin altına indirilmektedir. Böylece BSPAF sistemi ile kompanzasyon sonrasında tüm faz akımları IEEE 519 standardında belirlenen sınır değerinin altında THB değerine sahip olmaktadır. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 17 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 5,1 A'den 1,9 A'e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,86'dan 0,99'a yükseltilmektedir. Tablo 4.16'da

simülasyon ve deneylerde kullanılan 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi devre parametreleri verilmektedir.

Tablo 4.16: 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi parametreleri

Bileşenler		Sembol	Parametreler
Güç kaynağı	Gerilim, frekans	$V_{Kabc}, f_k$	110 V, 50 Hz
	Empedans	$L_k$	59 $\mu$ H
DA-bara	Kondansatörler	$C_1, C_2$	4700 $\mu$ F, 4700 $\mu$ F
	Referans gerilim	$V_{da}$	400 V
PAF	Filtre	$L_{PF}, R_{PF}, C_{PF}$	3 mH, 5 $\Omega$ , 30 $\mu$ F
	Anahtarlama frekansı	$f_{ap}$	8 kHz
SAF	Filtre	$L_{SF}, R_{SF}, C_{SF}$	2,5 mH, 2 $\Omega$ , 150 $\mu$ F
	Anahtarlama frekansı	$f_{as}$	10 kHz
	Seri transformatör	$N_1/N_2, S$	2, 5,4 kVA
Doğrusal olmayan yük-1	3-faz tristörlü	$L_Y, L_{da}, R_{da}$	3mH, 5,7mH, 12 $\Omega$
	Tek-faz diyotlu	$L_Y, C_{da}, R_{da}$	2mH, 330 $\mu$ F, 45 $\Omega$
Doğrusal olmayan yük-2	3-faz diyotlu	$C_{da}, R_{da}$	8800 $\mu$ F, 15 $\Omega$

Bu bölümde, genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisinin 3-faz 3-kollu ve 4-telli BSPAF sisteminin hem gerilim denetim stratejisinde hem de akım denetim stratejisinde kullanımı ve farklı güç kalitesi bozulmalarında kompanzasyon performansının test edilmesi amacıyla yapılan simülasyon ve deneysel sonuçları verilmiştir. İlk üç durumda periyodik akım ve gerilim kompanzasyonu deneysel ve simülasyon olarak test edilmiştir. Son iki durumda ise periyodik olmayan akım ve gerilimler deneysel olarak gerçekleştirilemediği için bu akım ve gerilimlerin kompanzasyonu sadece Matlab/Simulink simülasyonu ile test edilmiştir.

## 5. 3-FAZ 4-KOLLU 4-TELLİ BSPAF SİSTEMİ

3-fazlı 4-telli dağıtım sistemi, bir üçgen-yıldız transformatör kullanarak veya dağıtım sistemi seviyesinde üretim sisteminden gelen 3-faz ve bir nötr iletkeni ile sağlanmaktadır. 3-faz 4-telli uygulamalarda geleneksel 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemleri kullanılmaktadır [44]. Bu çalışmada 4-kollu 4-telli GKE güç devresine sahip BSPAF sistemi incelenmiştir. 3-faz 4-telli dağıtım sistemlerinde dengesiz yük akımları oldukça yaygın ve çok önemli bir problemdir. Bu çalışmada test edilen 4-kollu 4-telli GKE devre şekli ile dengesizlik durumunda ortaya çıkan nötr akımı ilave edilen dördüncü IGBT kolu ile kompanze edilmektedir. Ayrıca iki kondansatörlü 3-kollu 4-telli GKE uygulamasında meydana gelen kondansatörler üzerindeki gerilimleri dengeleme problemi ortaya çıkmamaktadır. Böylece 4-kollu GKE'nin DA tarafındaki kondansatöre paralel olarak enerji depolama elemanı (ultra-kapasitör) ilavesi daha kolay hale gelmektedir.

İki kondansatörlü 3-kollu 4-telli GKE yapısının en önemli avantajı, az sayıda anahtarlama elemanı gerektirmesi ve böylece basit bir modülasyon metodu ile kontrol edilebilmesidir. Bununla beraber, nötr akımı faz akımlarından bağımsız biçimde kontrol edilemez ve denetim sisteminde DA-bara kondansatör gerilimi dengeleme devresi ilave edilmesi gereklidir [117]. Ayrıca 3-kollu GKE yapısı ile DA-bara kullanımını arttırmak üzere uzay vektör modülasyonu uygulanması mümkün olmamaktadır [118].

3-kollu GKE'nin alternatifi, her kolda 2 anahtar olmak üzere toplam 8 anahtarlama elemanı ve bir DA-bara kondansatöründen oluşan 4-kollu GKE yapısıdır. 4-kollu GKE yapısı, 3-kollu GKE yapısına göre, DA-bara kondansatör gerilimi dengeleme gereksinimi olmaması, nötr akımının faz akımından bağımsız biçimde kontrol edilmesi ve DA-bara geriliminin %15 kadar daha düşük belirlenmesi gibi avantajlara sahiptir [119]. Ayrıca, DA-bara kondansatörü üzerinden geçen akımın etkin değeri daha düşüktür. 4-kollu GKE yapısının en önemli dezavantajı ise 3-kollu yapıya göre

daha fazla sayıda yarı iletken devre elemanı ve sürme devresi gerektirmesi ve daha karmaşık modülasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca, nötr akımı faz akımlarının toplamı olduğu için nötr hattındaki yarı iletken devre elemanlarının akım oranlarının, faz hattındaki yarı iletken devre elemanlarının en az iki katı kadar olması gerekmektedir [120].

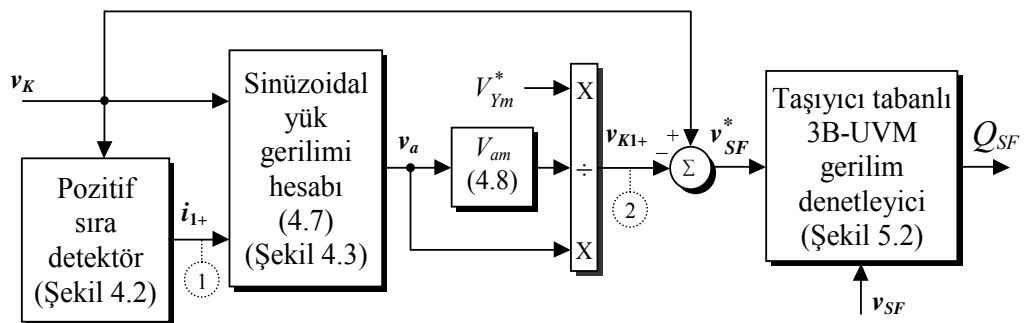
DA-bara kullanımını artırmak için 3-Boyutlu Uzay Vektör Modülasyonu (3B-UVM) tekniği 4-kollu GKE yapısı ile kullanılabilir. Böylece 3B-UVM tekniği ile çıkışta daha düşük harmonik bozulma, sayısal kontrol uygulama kolaylığı, sabit anahtarlama frekansı ve sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunun göre %15 daha yüksek DA-bara gerilimi kullanımı sağlanmaktadır [121].

## 5.1. Denetim Tekniği

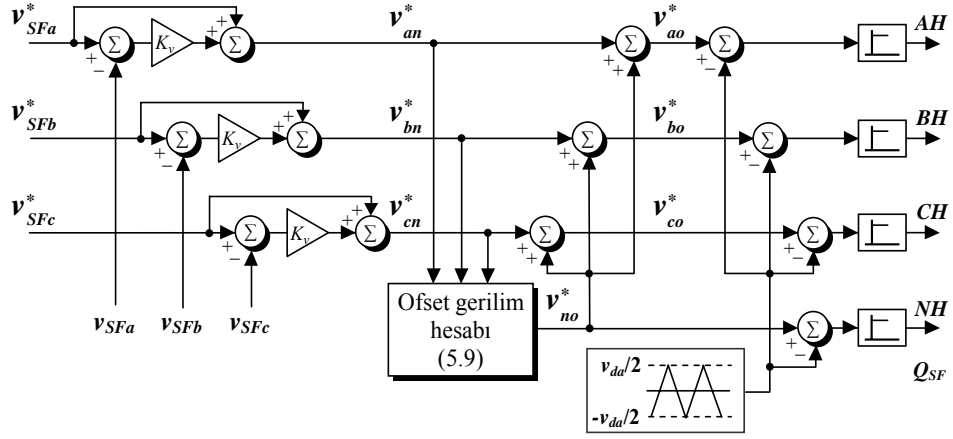
Bu bölümde, 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin SAF ve PAF birimlerinde denetim tekniği olarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisinin kullanımı detaylı olarak açıklanmaktadır.

### 5.1.1. SAF denetim tekniği

Şekil 5.1’de SAF denetim blok diyagramı görülmektedir. SAF’nin kompanzasyon gerilim referansları ( $v_{SFa}^*$ ,  $v_{SFb}^*$ ,  $v_{SFc}^*$ ) 4.1.1 bölümünde olduğu gibi elde edilmiştir. SAF gerilim denetimi taşıyıcı tabanlı 3B-UVM tekniği ile gerçekleştirilmiştir. 4-kollu 4-telli seri GKE için uygulanan taşıyıcı tabanlı 3B-UVM blok diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1: SAF denetim blok diyagramı



Şekil 5.2: Taşıyıcı tabanlı 3B-UVM blok diyagramı

4-kollu 4-telli GKE'nin üç ayrı faz-nötr çıkış referans gerilimleri ( $v_{SFa}^*$ ,  $v_{SFb}^*$ ,  $v_{SFc}^*$ ) Şekil 5.2'deki gösterildiği gibi ölçülen SAF gerilimleri ile karşılaştırılarak ve daha iyi referans takibi için  $K_v$  kazancı ile ileri-besleme gerilim ilave edilerek ( $v_{an}^*$ ,  $v_{bn}^*$ ,  $v_{cn}^*$ ) referans gerilimlerine dönüştürülmüştür. Bu gerilimler (5.1) denklemi ile sınırlıdır. Ayrıca burada “n” 3-faz 4-telli sistemin nötr noktasıdır ve 4-telli GKE'de 4. kolun orta noktasına bağlıdır. Her bir faz-nötr çıkış gerilimi, her bir faz gerilimi ve ortak ofset gerilimi (4. kolun orta noktası “n” ile iki kondansatörlü sanal DA-bara orta noktası “o” arasındaki gerilim) “ $v_{no}^*$ ” kullanılarak (5.2) denkleminde görüldüğü gibi ifade edilebilmektedir [122].

$$-v_{da} \leq v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^* \leq v_{da} \quad (5.1)$$

$$v_{an}^* = v_{ao}^* - v_{no}^*, \quad v_{bn}^* = v_{bo}^* - v_{no}^*, \quad v_{cn}^* = v_{co}^* - v_{no}^* \quad (5.2)$$

3-fazlı 3-kollu ve 4-kollu GKE'ler arasındaki fark, “ $v_{no}$ ” ofset geriliminin, 4-kollu GKE'deki ilave kolun kapı devresi sinyali üzerinden aktif olarak değiştirilebilmesidir. Eğer ofset gerilimi sabit bir değere sabitlenirse, her bir faz gerilimi aşağıdaki (5.3) denklemdeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$v_{ao}^* = v_{an}^* - v_{no}^*, \quad v_{bo}^* = v_{bn}^* - v_{no}^*, \quad v_{co}^* = v_{cn}^* - v_{no}^* \quad (5.3)$$

Faz gerilimleri ve ofset gerilimi sırasıyla (5.4) ve (5.5) denklemlerinde verilen şekilde, DA-bara geriliminin yarısı ile sınırlanmaktadır. Ofset geriliminin sıfır sıralı bileşen tarafından diğer bir sınırlaması da (5.6) denklemine verilmektedir.

$$-\frac{v_{da}}{2} \leq v_{ao}^*, v_{bo}^*, v_{co}^* \leq \frac{v_{da}}{2} \quad (5.4)$$

$$-\frac{v_{da}}{2} \leq v_{no}^* \leq \frac{v_{da}}{2} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} -\frac{v_{da}}{2} \leq v_{no}^* \leq \frac{v_{da}}{2} - v_{max} \quad v_{min} > 0 \\ -\frac{v_{da}}{2} - v_{min} \leq v_{no}^* \leq \frac{v_{da}}{2} \quad v_{max} < 0 \\ -\frac{v_{da}}{2} - v_{min} \leq v_{no}^* \leq \frac{v_{da}}{2} - v_{max} \quad \text{aksi halde} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Burada  $v_{min}^*$  ve  $v_{max}^*$  sırasıyla, faz gerilimlerinin minimum ve maksimum değerlerini veren fonksiyonlardır ve sırasıyla (5.7) ve (5.8) denklemi ile verilmektedir. Sıfır sıralı olmayan anahtarlama vektörü, örnekleme zamanının tam ortasına yerleştirilirse ofset gerilimi (5.9) denkleminde verildiği gibi olur.

$$v_{min}^* = \min(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*), \quad (5.7)$$

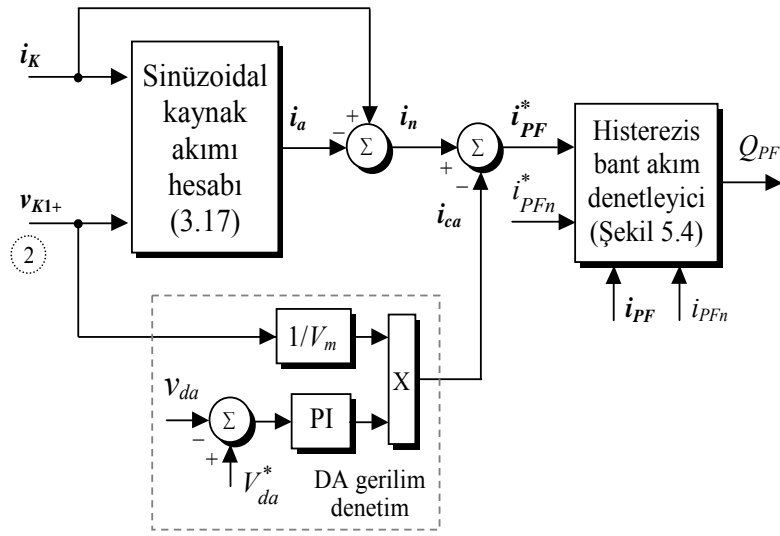
$$v_{max}^* = \max(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*). \quad (5.8)$$

$$v_{no}^* = \begin{cases} -\frac{v_{max}^*}{2}, & v_{min} > 0 \\ -\frac{v_{min}^*}{2}, & v_{max} < 0 \\ -\frac{v_{max}^* + v_{min}^*}{2}, & \text{aksi taktirde} \end{cases} \quad (5.9)$$

Şekil 5.2'de gösterildiği gibi taşıyıcı tabanlı 3B-UVM'de üçgen taşıyıcı dalga ve (5.3) ve (5.9) denklemleriyle elde edilen faz/ofset gerilimlerinin karşılaştırılmasıyla SAF anahtarlama sinyalleri  $Q_{SF}$  elde edilmiştir. Bu yöntem aynı zamanda simetrik hizalanmış 1. sınıf 3-boyutlu uzay vektör DGM [123] ile benzerdir [122].

### 5.1.2. PAF denetim tekniği

PAF denetim blok diyagramı Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Anlık aktif olmayan akım  $i_n(t)$  4.1.2 bölümünde olduğu gibi elde edilmiştir. BSPAF sisteminin güç kayıplarını ve geçici durumlarda DA gerilim dalgalanmalarını kompanze etmek için gereken ilave aktif akım  $i_{ca}(t)$  (5.10) denkleminde verildiği gibi ölçülen DA-bara gerilimi  $v_{da}$  değerini referans gerilimi  $V_{da}^*$  değerine regüle ederek kaynaktan çekilmektedir.



Şekil 5.3: PAF akım denetim blok diyagramı

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi DA-bara gerilimini  $v_{da}$  regüle etmek için PI denetleyici kullanılmıştır. Ölçülen DA-bara gerilimi ve referans DA-bara gerilimi arasındaki fark PI denetleyiciye uygulanmakta ve çıkış 3-faz birim genliğe sahip temel sinüzoidal dalga ile çarpılmaktadır. Sonuç olarak PAF’nin kompanzasyon referans akımları ( $i_{PFa}^*$ ,  $i_{PFb}^*$ ,  $i_{PFc}^*$ ,  $i_{PFn}^*$ ) (5.11) ve (5.12) denklemleri ile elde edilmiştir.

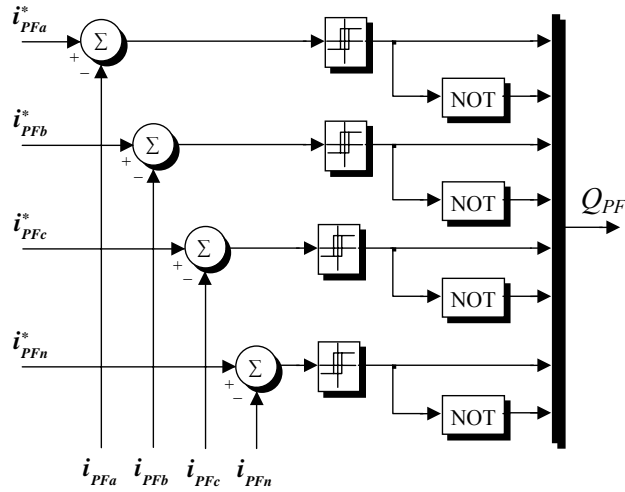
$$i_{ca}(t) = \frac{v_{SI+}}{V_m} [K_P (V_{dc}^* - v_{dc}) + K_I \int_0^t (V_{dc}^* - v_{dc}) dt] \quad (5.10)$$

$$i_{PF}^*(t) = i_n(t) - i_{ca}(t) \quad (5.11)$$

$$i_{PFn}^* = -(i_{PFa}^* + i_{PFb}^* + i_{PFc}^*) \quad (5.12)$$



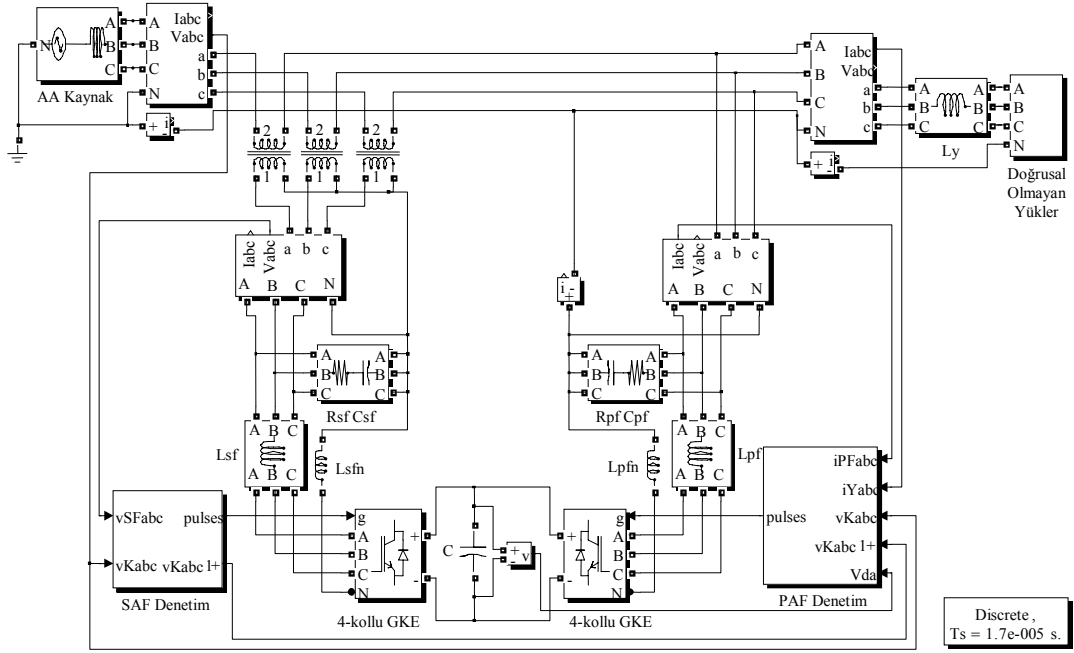
PAF anahtarlama sinyalleri histerezis bant akım denetleyici ile elde edilmiştir. 4-kollu 4-telli paralel GKE için uygulanan histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı Şekil 5.4’de gösterilmektedir. Denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ( $i_{PFa}^*$ ,  $i_{PFb}^*$ ,  $i_{PFc}^*$ ,  $i_{PFn}^*$ ) ile ölçülen PAF hat akımları ( $i_{PFa}$ ,  $i_{PFb}$ ,  $i_{PFc}$ ) ve  $i_{PFn}$  (5.12) denklemi ile benzer şekilde hesaplanarak karşılaştırılmakta ve elde edilen hata sinyalleri histerezis bant denetleyiciye uygulanmaktadır. Histerezis bant denetleyici bu akım hatalarını belirlenen sınırlar içinde tutacak şekilde anahtarlama sinyallerini  $Q_{PF}$  üreterek PAF hat akımlarının referans akımları takip etmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.4: Histerezis bant akım denetleyici blok diyagramı

## 5.2. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin farklı güç kalitesi bozulmalarında kompanzasyon performansının test edilmesi amacıyla Matlab/Simulink simülasyon sonuçları sunulmaktadır. 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 5.5’de gösterilmektedir. 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminden ölçülen kaynak akımları ( $i_{Ka}$ ,  $i_{Kb}$ ,  $i_{Kc}$ ), kaynak gerilimleri ( $v_{Ka}$ ,  $v_{Kb}$ ,  $v_{Kc}$ ) ve yük akımları ( $i_{Ya}$ ,  $i_{Yb}$ ,  $i_{Yc}$ ) geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli PAF ve SAF denetim algoritmasına uygulanarak gerekli akım ( $i_{PFa}^*$ ,  $i_{PFb}^*$ ,  $i_{PFc}^*$ ,  $i_{PFn}^*$ ) ve gerilim ( $v_{Sfa}^*$ ,  $v_{Sfb}^*$ ,  $v_{Sfc}^*$ ) kompanzasyon referans sinyalleri üretilmiştir. Histerezis bant akım denetleyici ile 4-kollu 4-telli paralel GKE ve taşıyıcı tabanlı 3B-UVM tekniği ile 4-kollu 4-telli seri GKE anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

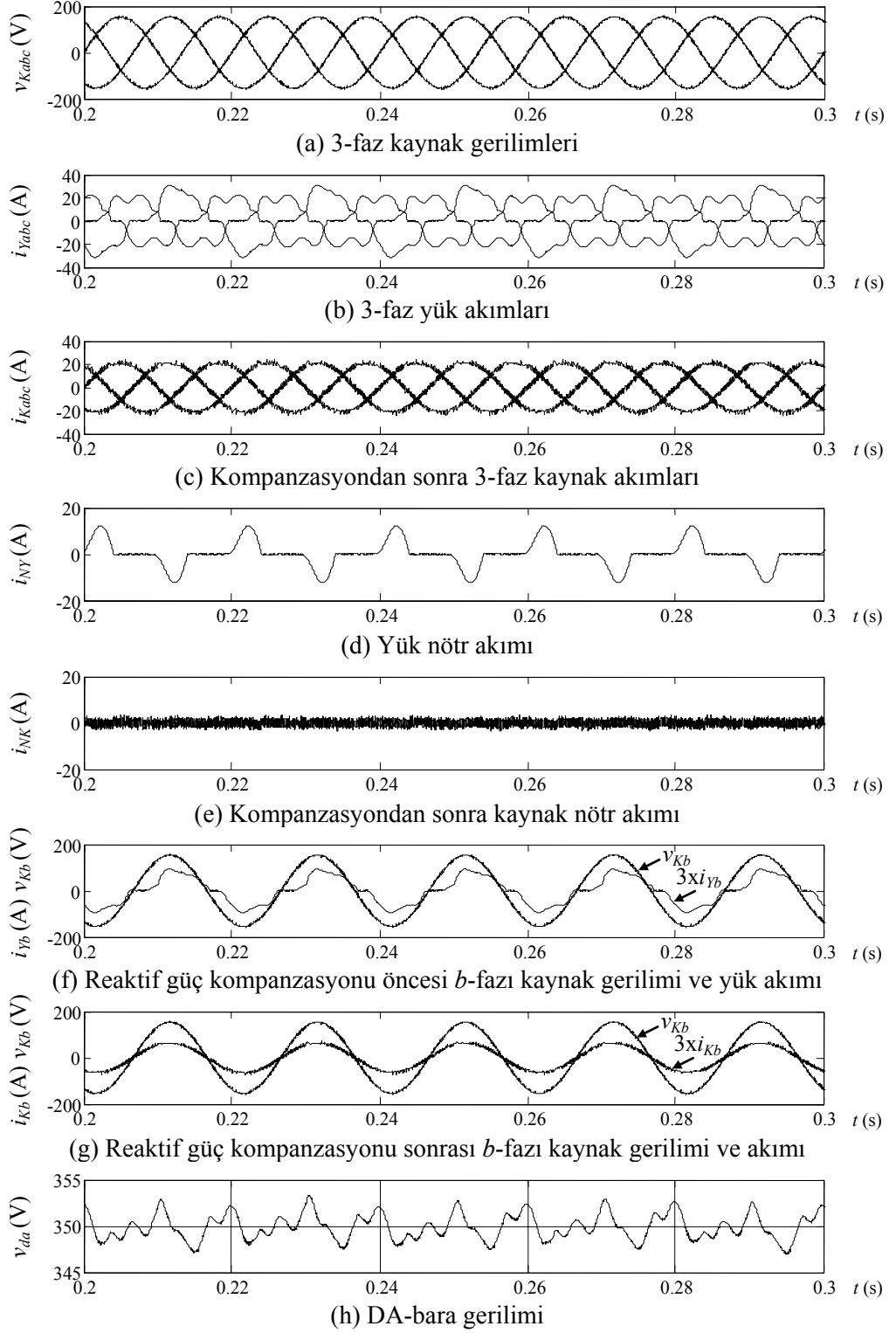


Şekil 5.5: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi Matlab/Simulink blok diyagramı

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin, dengesiz ve harmonikli yük akımı kompanzasyonu, kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu, stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu performansına ait elde edilen Matlab/Simulink simülasyon sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

### 5.2.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada,  $110 V_{rms}$  faz-nötr gerilimindeki 3-faz 4-telli sinüzoidal kaynağa tetikleme açısı  $\alpha=30^\circ$  olan 3-faz  $RL$  yüklü yarı denetimli tristörlü doğrultucu, 3-faz  $RC$  yüklü diyotlu doğrultucu ve fazlardan dengesiz akım çekilmesini sağlamak amacıyla  $b$ -fazına tek-faz  $RC$  yüklü diyotlu doğrultucu bağlanmıştır. Şekil 5.6'da dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.6a'da sinüzoidal 3-faz kaynak gerilimleri, Şekil 5.6b'de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları verilmektedir. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 5.6c'de kompanzasyondan sonra sinüzoidal dalga şekline benzetilen ve dengelenen 3-faz kaynak akımları görülmektedir.



Şekil 5.6: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Şekil 5.6d'de yük nötr akımı ve Şekil 5.6e'de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 5.6f'de  $b$ -fazı yük gerilimi ile yük akımı ve Şekil 5.6g'de kompanzasyondan sonra  $b$ -fazı kaynak gerilimi ile kaynak akımının

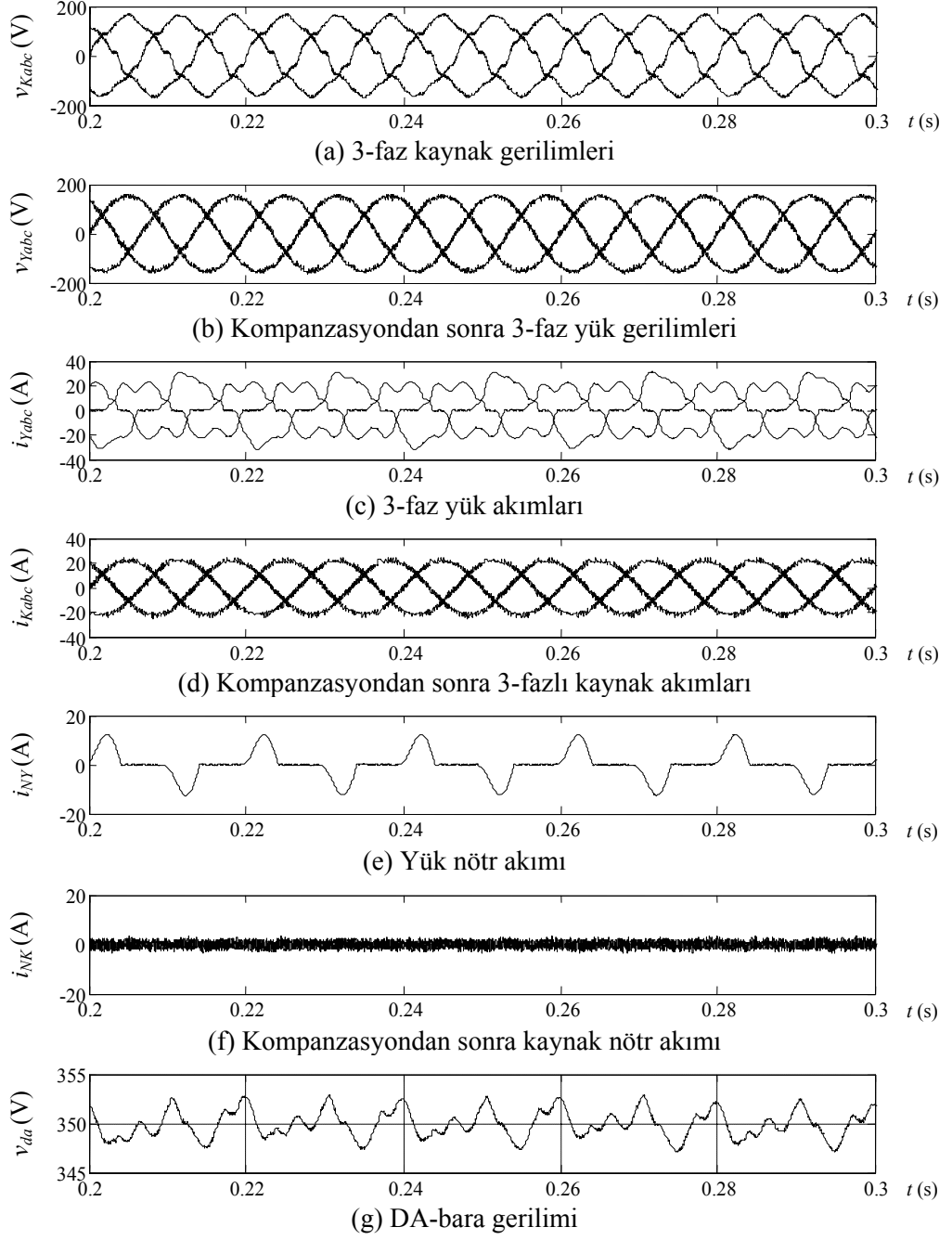
aynı faza getirilerek reaktif gücün kompanse edildiği gösterilmektedir. Şekil 5.6h’da DA-bara gerilimi verilmektedir. Tablo 5.1’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.

Tablo 5.1: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	14,94	15,15
	$b$ -fazı	19,22	15,07
	$c$ -fazı	14,98	15,12
	nötr	5,47	0,99
THB (%)	$a$ -fazı	28,64	3,48
	$b$ -fazı	24,90	3,29
	$c$ -fazı	28,49	3,22
Güç Faktörü		0,94	0,99

### 5.2.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada 3-faz 110 V<sub>rms</sub> faz-nötr kaynak gerilimleri THB değeri %8,5 olan harmonik gerilim bileşenleri içermektedir. 3-faz 4-telli kaynağa 5.2.1 bölümünde kullanılan dengesiz ve doğrusal olmayan yükler bağlanmıştır. Şekil 5.7’de kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları verilmektedir. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 5.7a’da harmonik içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 5.7b’de kompanzasyondan sonra sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz yük gerilimleri verilmektedir. Şekil 5.7c’de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları ve Şekil 5.7d’de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları görülmektedir. Şekil 5.7e’de yük nötr akımı ve Şekil 5.7f’de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 5.7g’de DA-bara gerilimi verilmektedir. Tablo 5.2’de kaynak gerilim harmoniği ve Tablo 5.3’de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.



Şekil 5.7: Kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Tablo 5.2: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

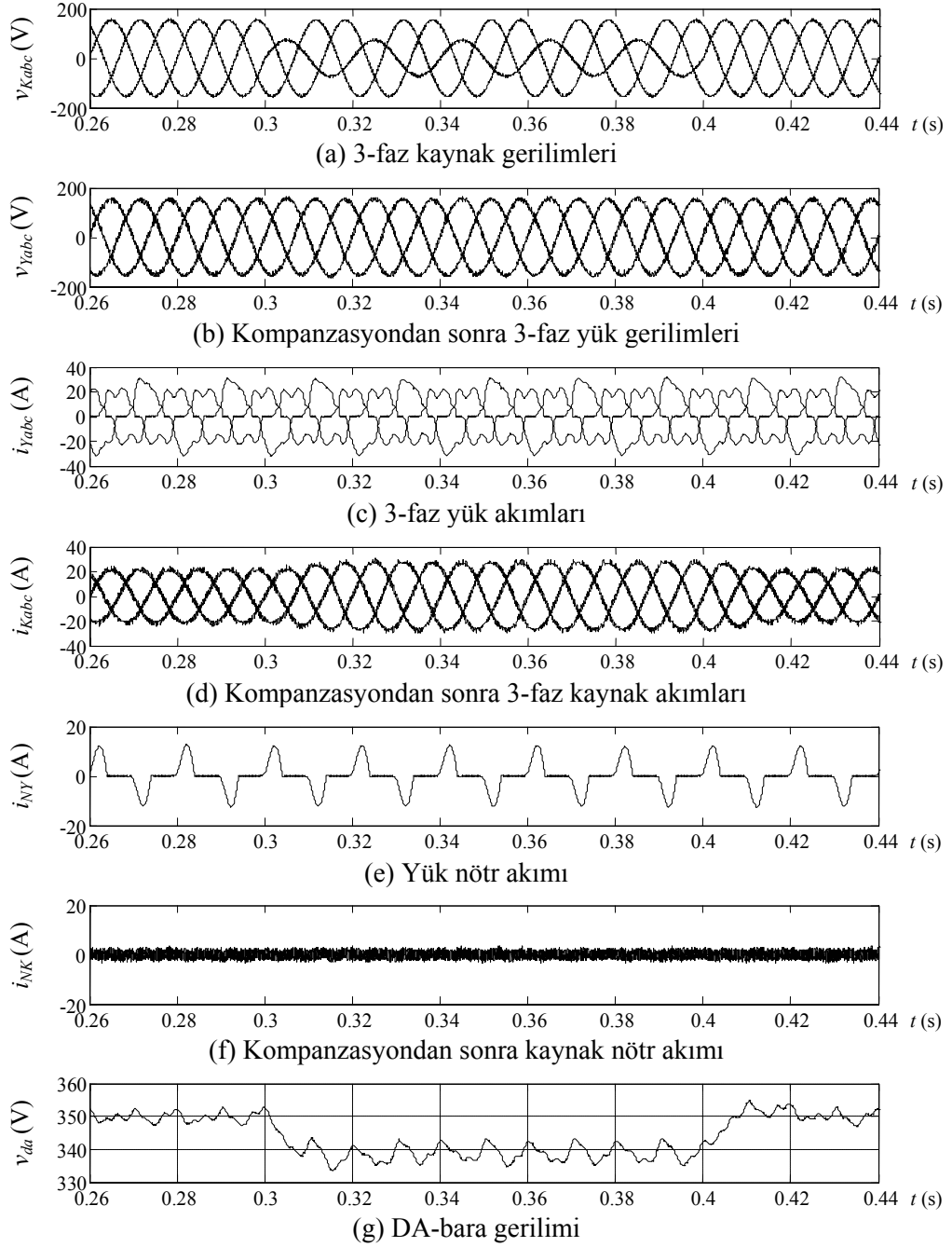
Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
THB (%)	$a$ -fazı	8,51	2,65
	$b$ -fazı	8,51	2,48
	$c$ -fazı	8,50	2,40

Tablo 5.3: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	14,98	15,72
	$b$ -fazı	19,15	15,73
	$c$ -fazı	15,07	15,71
	nötr	5,37	1,45
THB (%)	$a$ -fazı	29,20	3,38
	$b$ -fazı	24,88	3,14
	$c$ -fazı	28,88	3,02
Güç Faktörü		0,94	0,99

### 5.2.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Bu çalışmada, 3-faz 110  $V_{rms}$  faz-nötr kaynak geriliminin  $a$ -fazında 5 periyot süresince %50 değerinde gerilim çökmesi meydana gelmektedir. 3-faz 4-telli kaynağa, 5.2.1 bölümünde kullanılan dengesiz ve doğrusal olmayan yükler bağlanmıştır. Şekil 5.8'de tek-faz kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları verilmektedir. Periyodik dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 5.8a'da  $a$ -fazında kısa süreli %50 değerinde gerilim çökmesi oluşan 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 5.8b'de kompanzasyondan sonra nominal değerine regüle edilen 3-faz yük gerilimleri verilmektedir. Şekil 5.8c'de dengesiz ve doğrusal olmayan 3-faz yük akımları ve Şekil 5.8d'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları görülmektedir. Yüke uygulanan gerilimin kompanzasyonu için gerekli güç kaynaktan karşılandığı için kaynak akımının arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 5.8e'de yük nötr akımı ve Şekil 5.8f'de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 5.8g'de DA-bara gerilimi verilmektedir. Tablo 5.4'de tek-faz kaynak gerilim çökmesi ve Tablo 5.5'de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait simülasyon sonuç özeti verilmektedir.



Şekil 5.8: Tek-faz kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları

Tablo 5.4: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

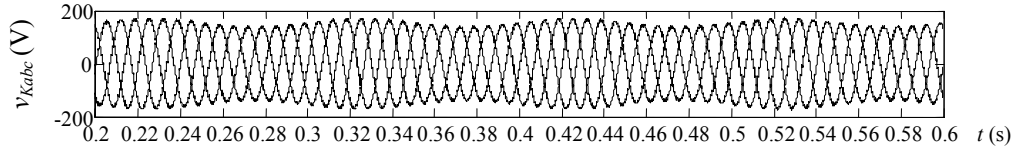
Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	$a$ -fazı	52,41	111,8
	$b$ -fazı	109,1	110,2
	$c$ -fazı	109,1	107,2

Tablo 5.5: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu simülasyon sonuç özeti

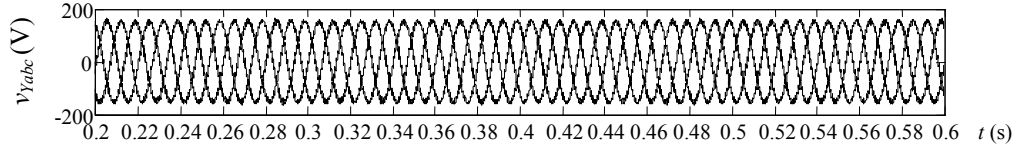
Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	10,25	19,31
	$b$ -fazı	17,13	19,69
	$c$ -fazı	15,26	19,07
	nötr	5,47	1,43
THB (%)	$a$ -fazı	43,3	3,10
	$b$ -fazı	28,71	3,60
	$c$ -fazı	17,98	3,47
Güç Faktörü		0,94	0,99

#### 5.2.4. Alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu

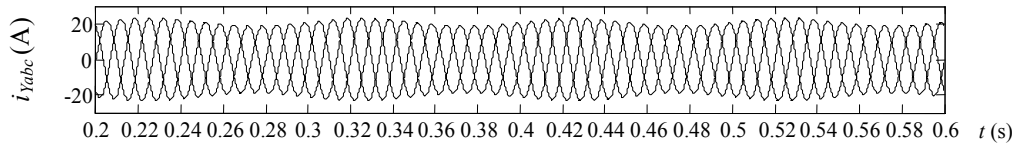
Bu çalışmada kullanılan alt harmonik bileşene sahip 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri Tablo 4.6'da verildiği gibi alınmıştır. Şekil 5.9'da alt harmonik gerilim ve akım kompanzasyonu simülasyon sonuçları görülmektedir.



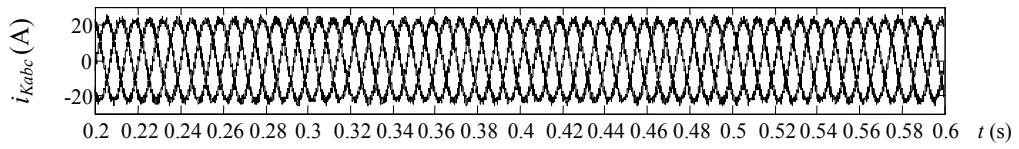
(a) 3-faz kaynak gerilimleri



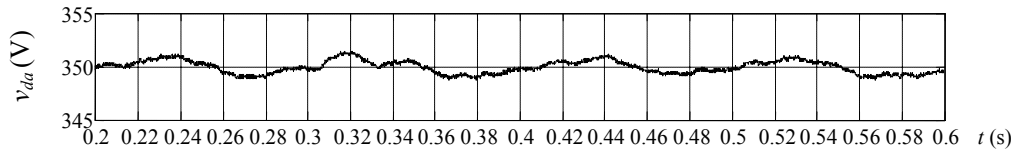
(b) Kompanzasyondan sonra 3-faz yük gerilimleri



(c) 3-faz yük akımları



(d) Kompanzasyondan sonra 3-faz kaynak akımları



(e) DA-bara gerilimi

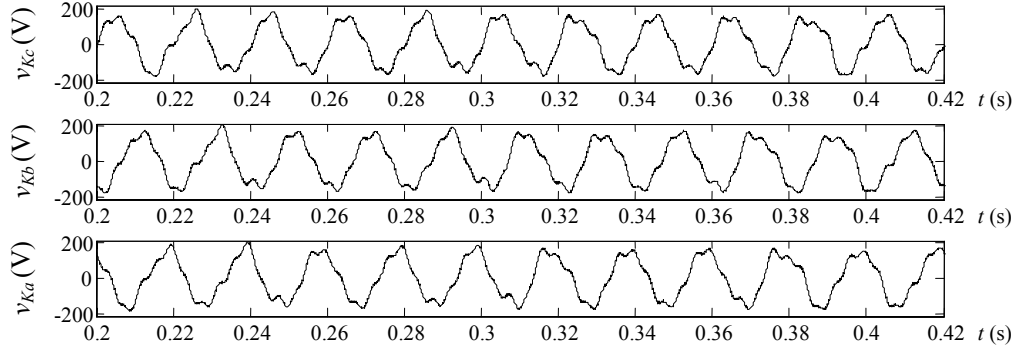
Şekil 5.9: Alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları



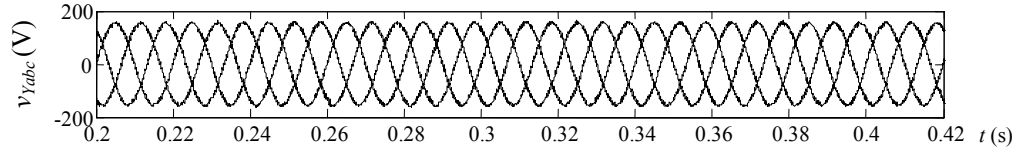
Alt harmonik içeren dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T_c=2,5T$  seçilmiştir. Şekil 5.9a'da alt harmonik bileşen içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 5.9b'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz yük gerilimleri görülmektedir. Şekil 5.9c'de alt harmonik bileşen içeren 3-faz kaynak akımları ve Şekil 5.9d'de kompanzasyondan sonra dengelenen ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları gösterilmektedir. Şekil 5.9e'de DA-bara gerilimleri verilmektedir.

### **5.2.5. Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu**

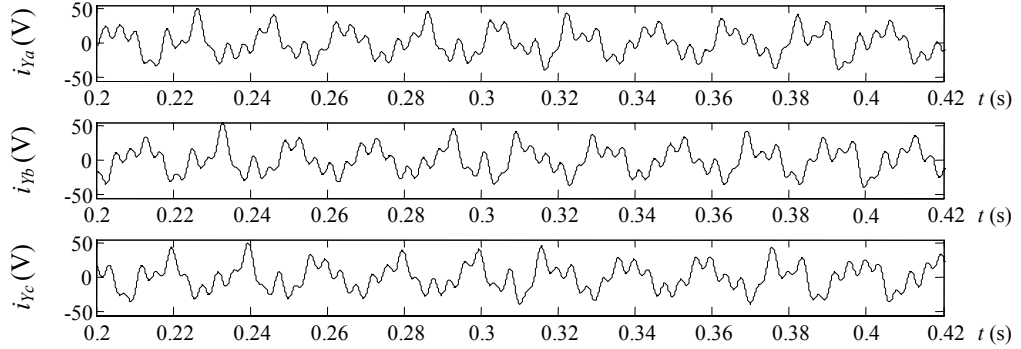
Bu çalışmada, stokastik periyodik olmayan bileşenlere sahip 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri Tablo 4.7'de verildiği gibi alınmıştır. Stokastik periyodik olmayan dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı Matlab/Simulink simülasyonları ile  $T_c=5T$  olarak seçilmiştir. Şekil 5.10'da stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.10a'da stokastik periyodik olmayan bileşen içeren 3-faz kaynak gerilimleri ve Şekil 5.10b'de kompanzasyondan sonra dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz yük gerilimleri görülmektedir. Şekil 5.10c'de stokastik periyodik olmayan bileşen içeren 3-faz kaynak akımı dalga şekilleri ve Şekil 5.10d'de kompanzasyondan sonra dengelenen ve sinüzoidal dalga şekline benzetilen 3-faz kaynak akımları gösterilmektedir. Şekil 5.10e'de yük nötr akımı ve Şekil 5.10f'de kompanzasyondan sonra azaltılan kaynak nötr akımı gösterilmektedir. Şekil 5.10g'de DA-bara gerilimi verilmektedir.



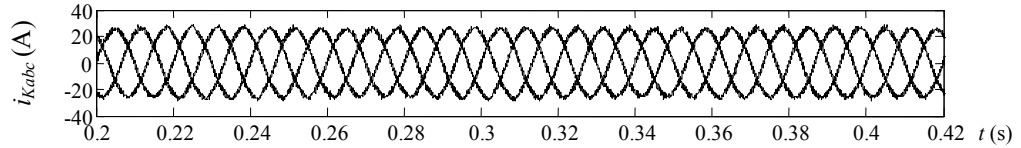
(a) 3-faz kaynak gerilimleri



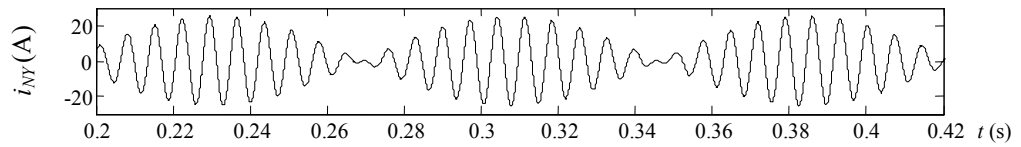
(b) Kompanzasyondan sonra 3-faz yük gerilimleri



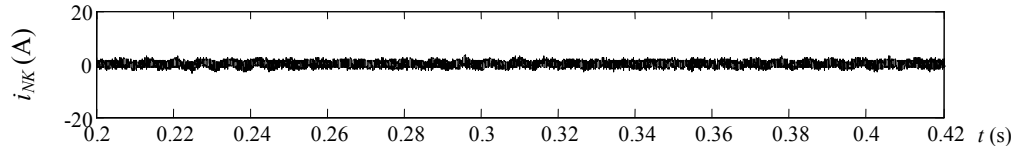
(c) 3-faz yük akımları



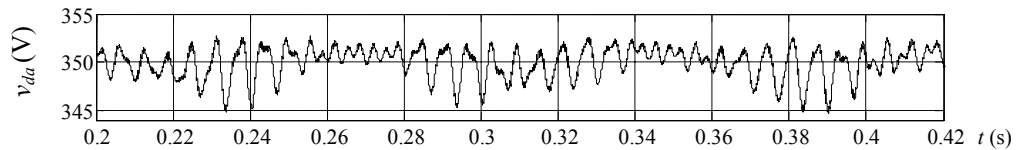
(d) Kompanzasyondan sonra 3-faz kaynak akımları



(e) Yük nötr akımı



(f) Kompanzasyondan sonra kaynak nötr akımı

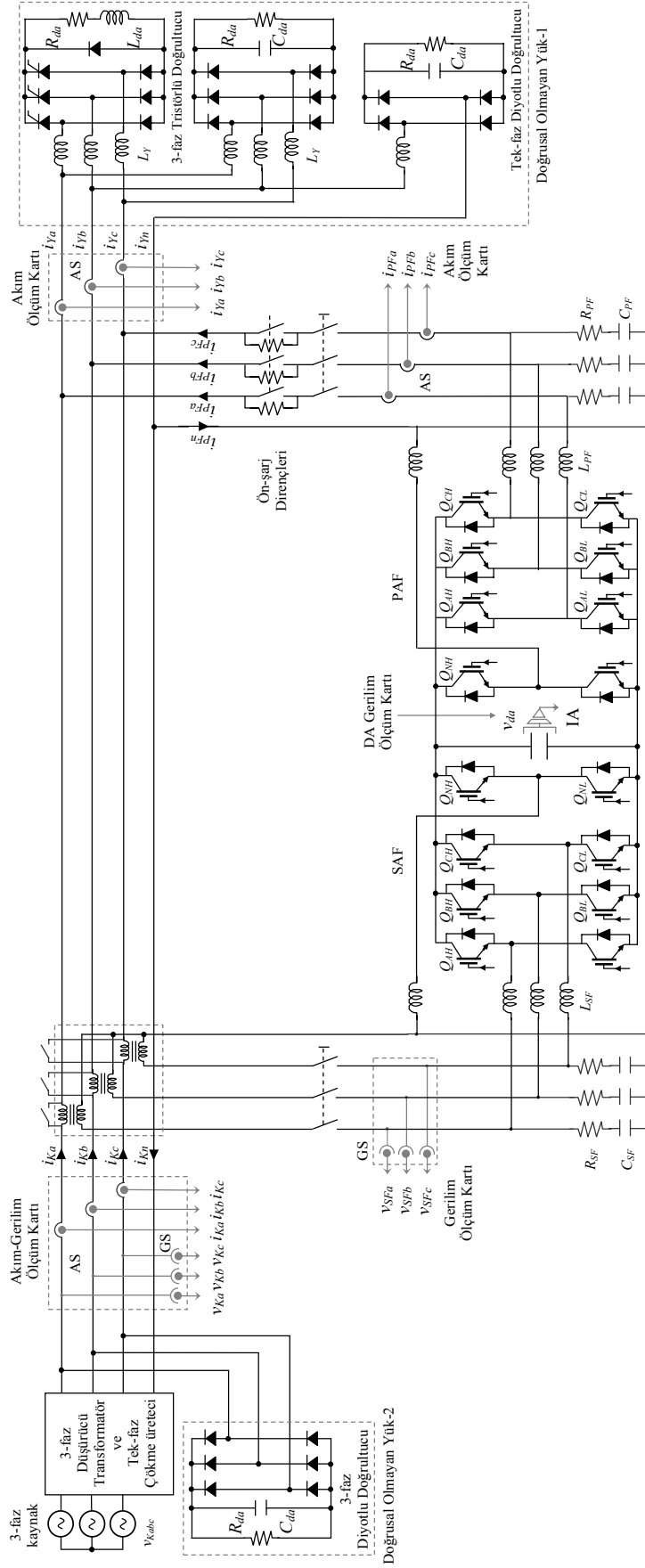


(g) DA-bara gerilimi

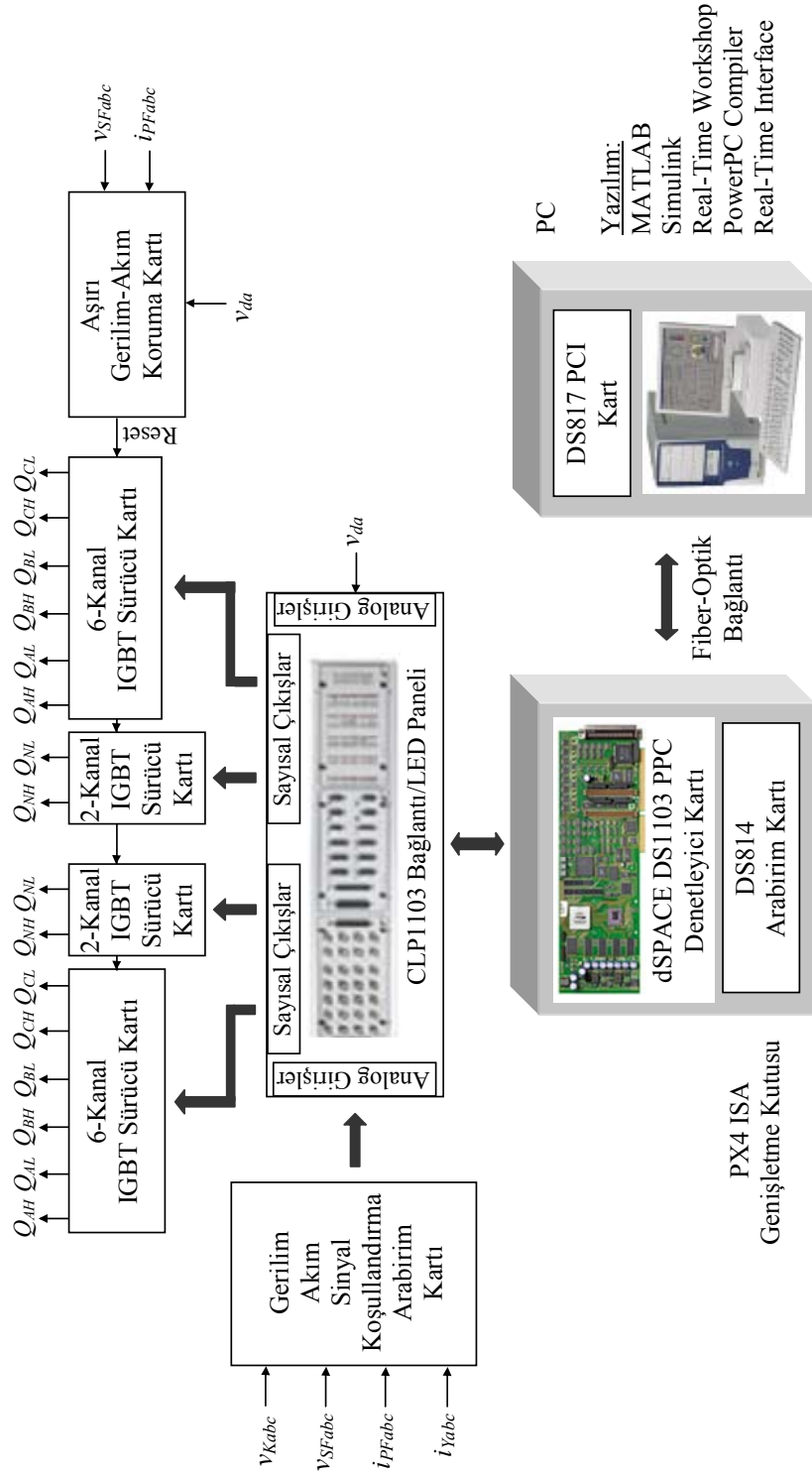
Şekil 5.10: Stokastik periyodik olmayan gerilim ve akım kompanzasyonu simülasyon sonuçları

### 5.3. Test Platformunun Kurulması

3-faz 4-telli sistemde  $110 V_{rms}$  faz-nötr kaynak geriliminde ve 5 kVA dengesiz-doğrusal olmayan yük durumunda hem periyodik hem de periyodik olmayan akım ve gerilimlerin kompanzasyonu için tasarlanan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin laboratuvar ortamında test platformu kurulmuştur. 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi test platformunun oluşturulması amacıyla daha önce kurulan 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi test platformunun güç devresi ve IGBT sürücü katında ilaveler yapılmıştır. DSPACE DS1103 tabanlı denetim sistemi, ölçüm kartları, sinyal koşullandırma kartları ve ön şarj dirençleri değişiklik yapılmadan 4-kollu 4-telli BSPAF test platformunda da kullanılmıştır. Yapılan değişiklikler aşağıda detaylı biçimde açıklanmaktadır. 4-kollu 4-telli BSPAF güç ve denetim sistemi blok diyagramı sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmektedir.

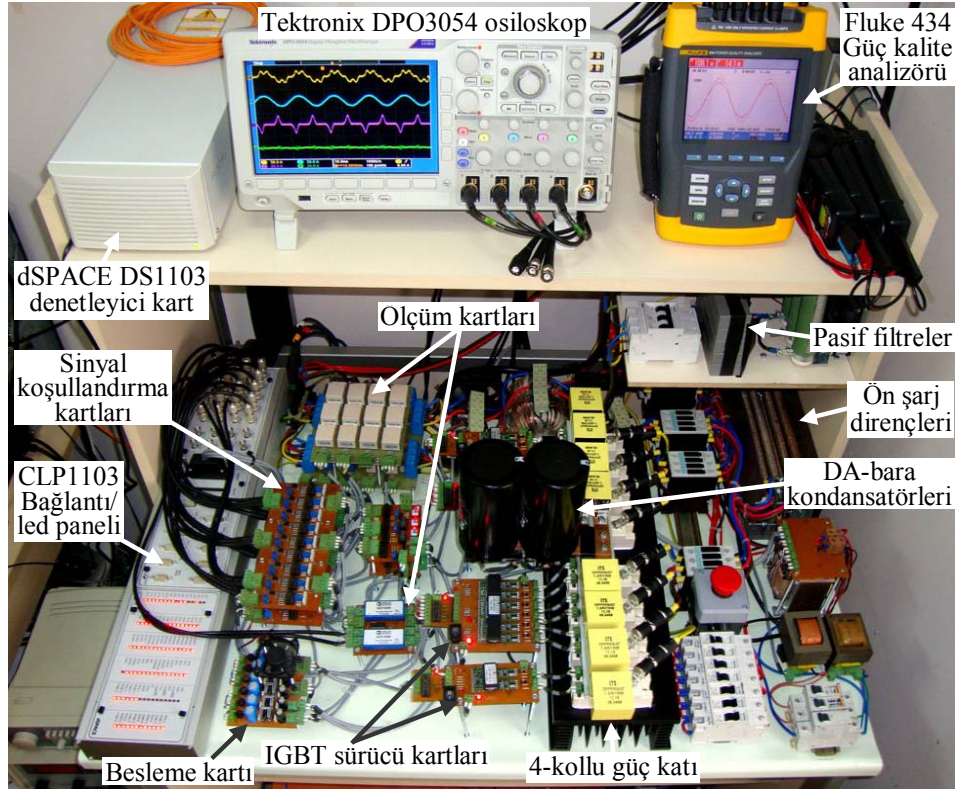


Şekil 5.11: 4-kollu 4-telli BSPAF güç sistemi blok diyagramı

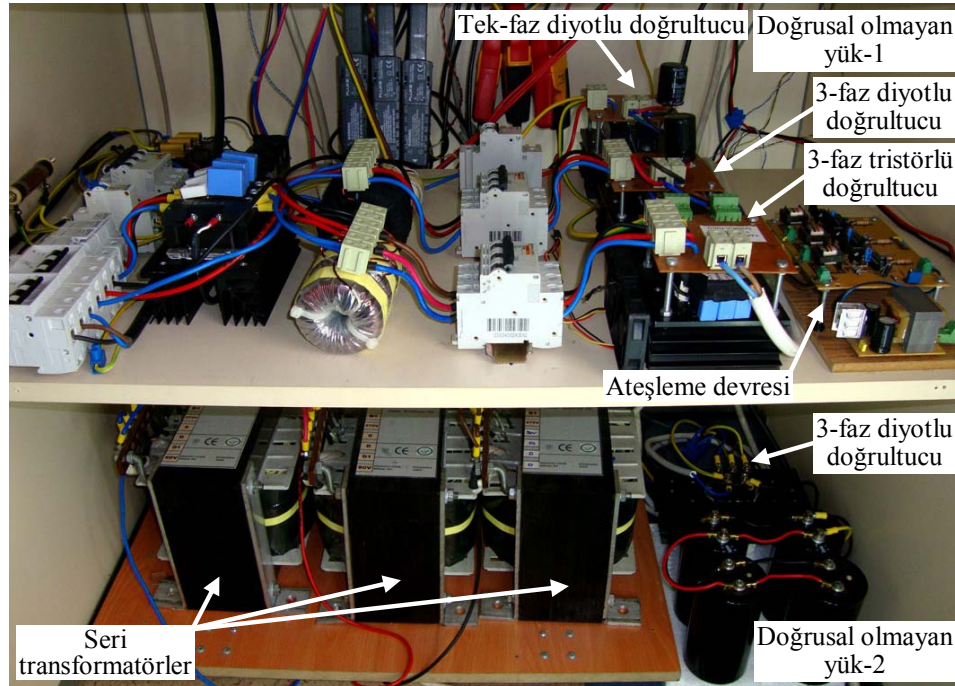


Şekil 5.12: 4-kollu 4-telli BSPAF denetim sistemi blok diyagramı

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı Şekil 5.13'de görülmektedir.



(a)

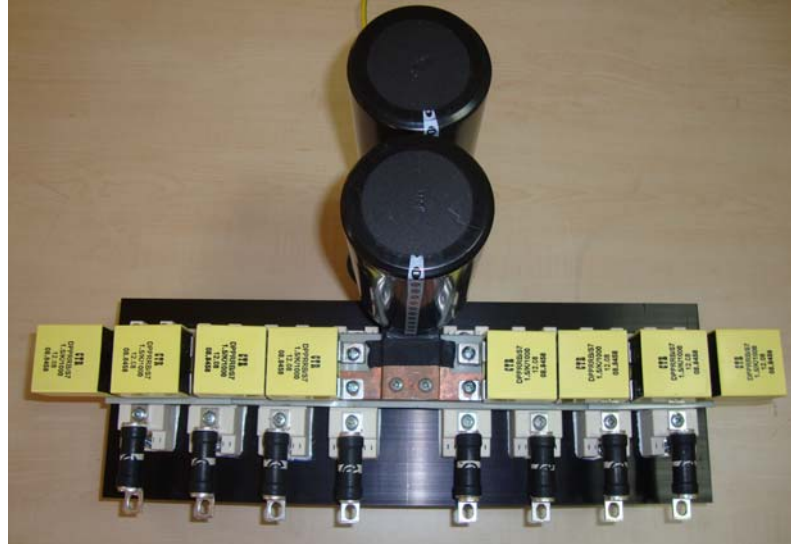


(b)

Şekil 5.13: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı  
a) deney masasının üstten görünüşü b) deney masasının alt kısmının görünüşü

### 5.3.1. Güç devresi

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin (4-kollu PAF ve 4-kollu SAF birimlerinden oluşan) güç katında 8 adet yarım köprü IGBT modülleri kullanılmıştır. DA-bara kaçak endüktansların azaltılması ve kapasitif etki oluşturmak amacıyla üst üste olacak şekilde imal edilmiştir. Ayrıca, IGBT elemanlarını kesim esnasında yüksek gerilimlerden korumak amacıyla her birinin DA uçlarına paralel bastırma kondansatörleri bağlanmıştır. 4-kollu PAF ve 4-kollu SAF AA hat endüktansları olarak 2,5 mH, 25 A toroid nüve üzerine sarı filtre bobinleri ve 2350  $\mu$ F (2x4700  $\mu$ F, 450 V seri bağlı) DA kondansatör kullanılmıştır. Şekil 5.14’de 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin soğutucuya montajı yapılan güç devresi fotoğrafı görülmektedir.

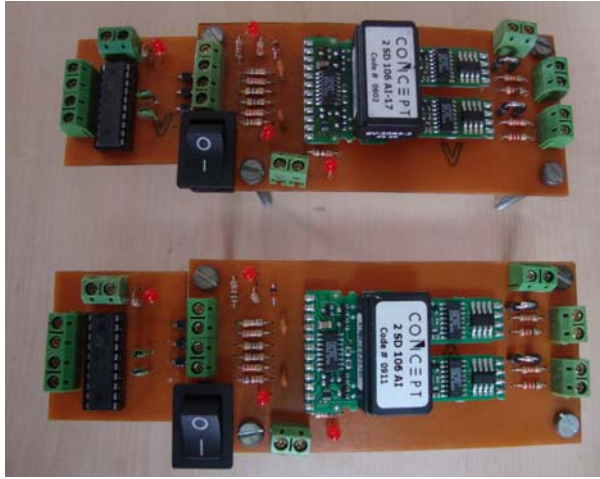


Şekil 5.14: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin güç devresi fotoğrafı

### 5.3.2. IGBT sürücü kartı

4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde DSPACE DS113 kontrol geliştirme kartı kullanılarak üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT’lerin sürülmesi için iki adet 6-kanal (CONCEPT 6SD106EI) ve iki adet 2-kanal (CONCEPT 2SD106AI) IGBT sürücü modülleri kullanılmıştır. Bu sürücü modülleri ile tüm anahtarlama sinyallerinin elektriksel izolasyonu, her bir IGBT için kısa devre ve aşırı akımdan koruma sağlanmıştır. Ayrıca IGBT sürücüler yarım köprü modunda çalıştırılarak aynı kolda

bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları (dead band) otomatik olarak üretilmiştir. Böylece denetim devresinden 4-kollu GKE'nin sadece üstteki IGBT'leri için DGM çıkışları üretmek yeterli olmuştur. Alttaki IGBT'lere uygulanan DGM sinyalleri ölü zaman eklenerek IGBT sürücü katı tarafından oluşturulmuştur. Bu amaçla IGBT sürücü modülleri ile istenilen fonksiyonları yerine getirecek şekilde IGBT sürücü devre kartları tasarlanmıştır. 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi için tasarlanan iki adet 6-kanal IGBT sürücü modül 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi için de kullanılmıştır. Şekil 5.15'de 4-kollu PAF ve 4-kollu SAF güç devresinin 4. kolları için gerçekleştirilen 2-kanal IGBT sürücülerin fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 5.15: Gerçekleştirilen 2-kanal IGBT sürücü kartları fotoğrafı

IGBT sürücü girişinde bir tampon entegre, açma kapama anahtarı ve uyarı ledleri bulunmaktadır. Uyarı ledleri ile devrenin besleme, çalışma ve hata durumu gözlemlenebilmekte ve açma kapama anahtarı ile anahtarlama sinyalleri elle kesilebilmektedir. Ayrıca tüm bağlantılar klemensler ile modüler biçimde yapılmıştır. IGBT sürme devresi sinyal bağlantılarında elektriksel girişimi önlemek için tüm giriş çıkış bağlantılarında ekranlı kablolar kullanılmıştır.

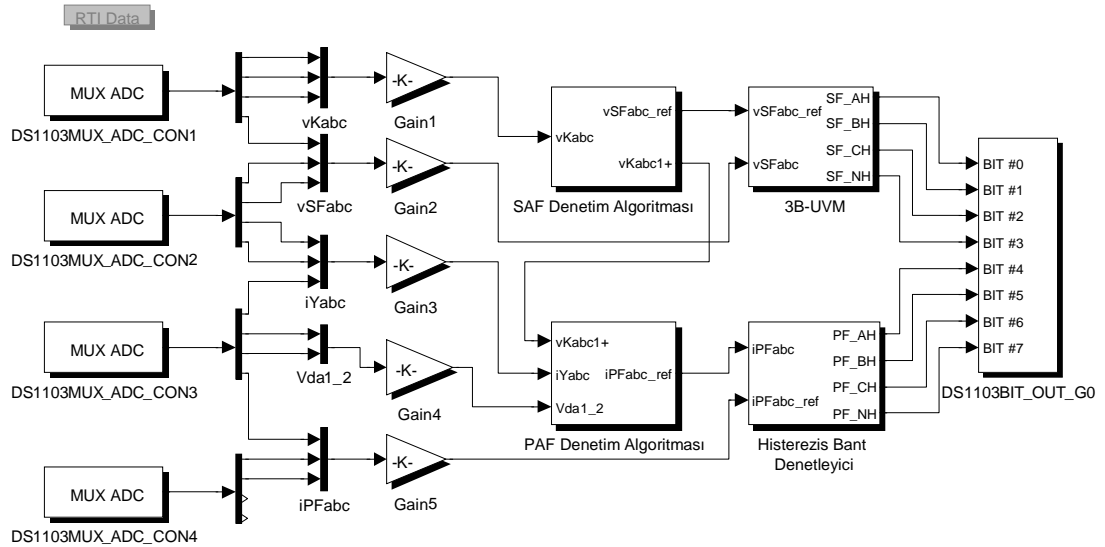
### 5.3.3. DSPACE tabanlı gerçek zamanlı denetim sistemi

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin denetimi için 3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sistemi için kurulan model tabanlı gerçek zamanlı dSPACE kontrol sistemi kullanılmıştır. Şekil 5.16'da 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink



ortamında dSPACE DS1103 denetleyici kartının ana işlemci RTI blokları kullanılarak oluşturulan gerçek zamanlı denetim blok diyagramı gösterilmektedir. CLP1103 bağlantı paneli aracılığıyla DS1103 denetleyici kartının analog girişlerinden DS1103MUXADC\_CON blokları kullanılarak Matlab/Simulink ortamına alınan akım ve gerilim sinyalleri kazanç (gain) ile çarpılıp normalize edilerek 4-kollu SAF ve PAF denetim algoritmalarında kullanılmıştır.

4-kollu SAF denetim algoritmasında, sistemden ölçülen kaynak gerilimleri kullanılarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi tabanlı referans gerilim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen referans gerilim değerlerinden taşıyıcı tabanlı 3B-UVM gerilim denetleyici aracılığıyla anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Bu anahtarlama sinyalleri DS1103BIT\_OUT\_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla SAF'ye ait IGBT sürücüyeye gönderilmiştir.



Şekil 5.16: 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan gerçek zamanlı denetim blok diyagramı

4-kollu PAF denetim algoritmasında ise, sistemden ölçülen yük akımları ve DA bara gerilimi kullanılarak geliştirilmiş aktif olmayan güç teorisi tabanlı referans akım değerleri belirlenmiştir. Elde edilen referans akımlar, histerezis bant akım denetleyicide PAF'den geçen akım değerleri ile karşılaştırılarak PAF anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Bu sayısal sinyaller DS1103BIT\_OUT\_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla PAF'ye ait

IGBT sürücüyü gönderilmiştir. IGBT sürücüsü de kolların üst tarafında bulunan IGBT'ler için gönderilen 4 anahtarlama sinyaline ölü zaman gecikmesi ekleyerek kolların alt tarafındaki IGBT'ler için otomatik olarak üretmiştir.

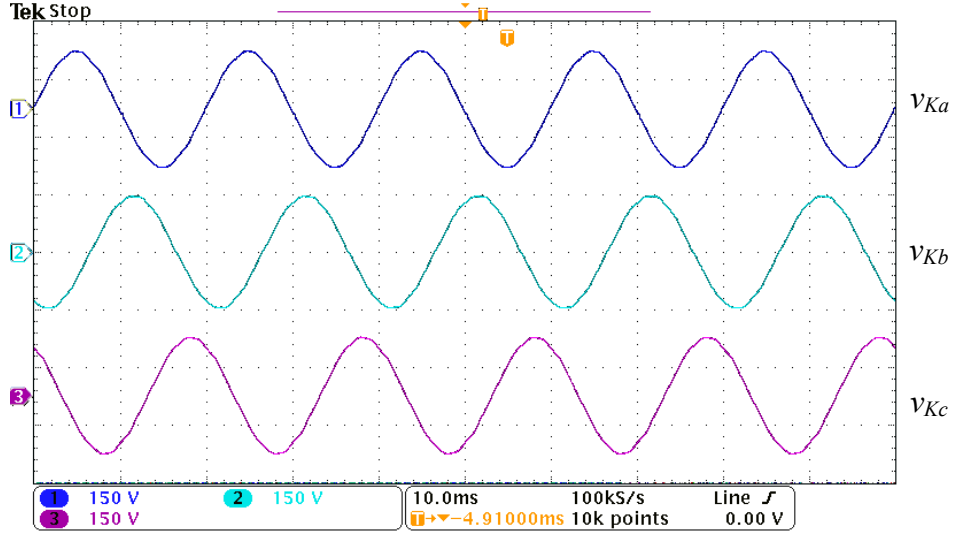
#### **5.4. Deneysel Sonuçlar**

Önerilen genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemleri ile dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu, kaynak gerilim harmoniği ve kaynak gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu çalışmaları deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen dalga şekilleri Tektronix DPO3054 osiloskop ile kaydedilmiştir. Harmonik analizi sonuçları ise Fluke 434 güç kalite analizörü ile alınmıştır. Bu kompanzasyonlarda elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

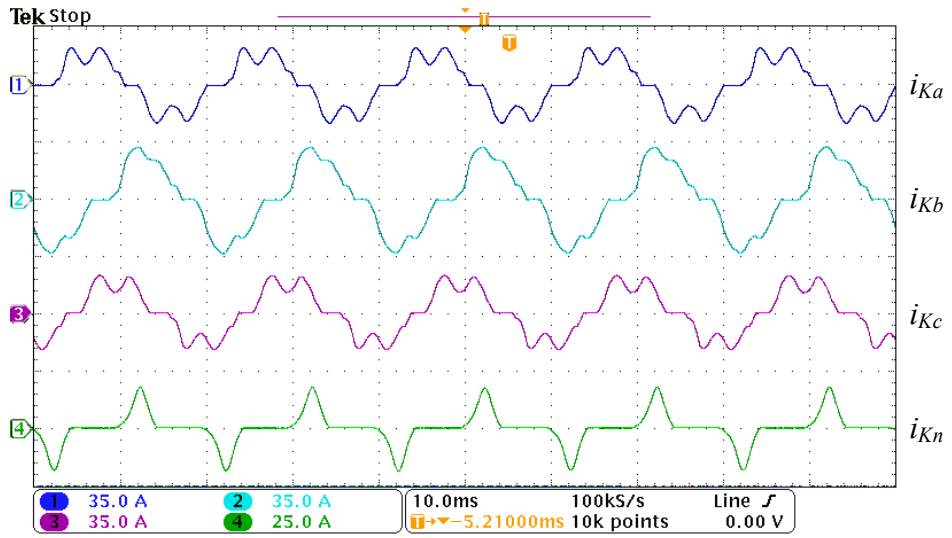
##### **5.4.1. Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu**

4-kollu 4-telli BSPAF sistemi deneysel çalışmalarında, dengesiz ve doğrusal olmayan yük olarak Şekil 5.11'de gösterildiği gibi doğrusal olmayan yük-1 grubu olarak ateşleme açısı  $\alpha=30^\circ$  olan  $RL$  yüklü 3-faz yarı denetimli doğrultucu,  $RC$  yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu ve  $b$ -faza bağlanan  $RC$  yüklü tek-faz diyotlu doğrultucu kullanılmıştır. Şekil 5.17'de dengesiz ve doğrusal olmayan akım kompanzasyonuna ait deneysel dalga şekilleri gösterilmektedir. PAF biriminde GKE'nin 4. kolunun etkisini göstermek üzere 4. kol sonradan devreye alınmıştır.

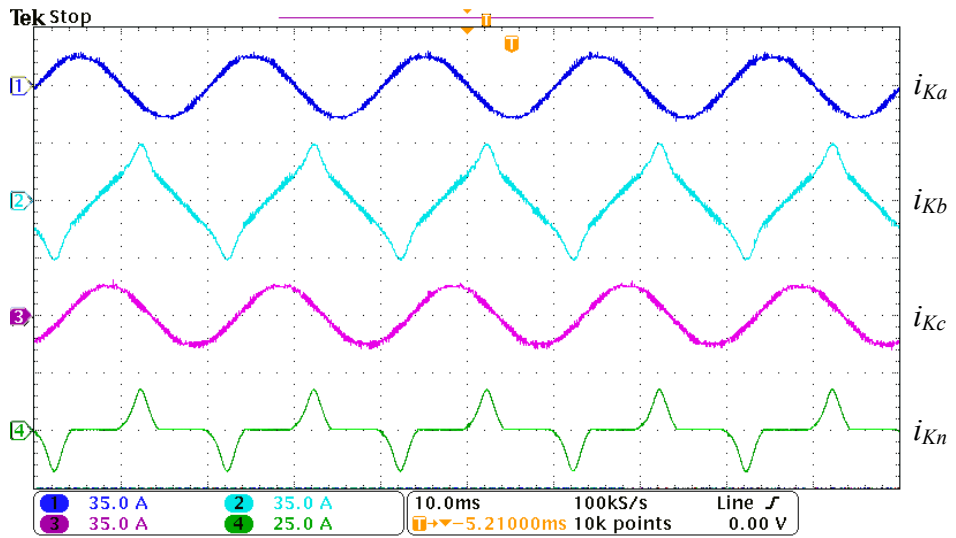
Şekil 5.17a'da kaynak gerilimi dalga şekilleri ve Şekil 5.17b'de kompanzasyondan önce dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı dalga şekilleri görülmektedir. Periyodik akım dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde PAF biriminin öncelikle 3-kolu devreye alındığında kaynak akımı dalga şekilleri Şekil 5.17c'de görülmektedir. Bu bağlantıda  $b$ -fazında bulunan tek-fazlı yükün neden olduğu 3 ve 3'ün katı harmonikler içeren nötr akımının kompanze edilemediği görülmektedir.



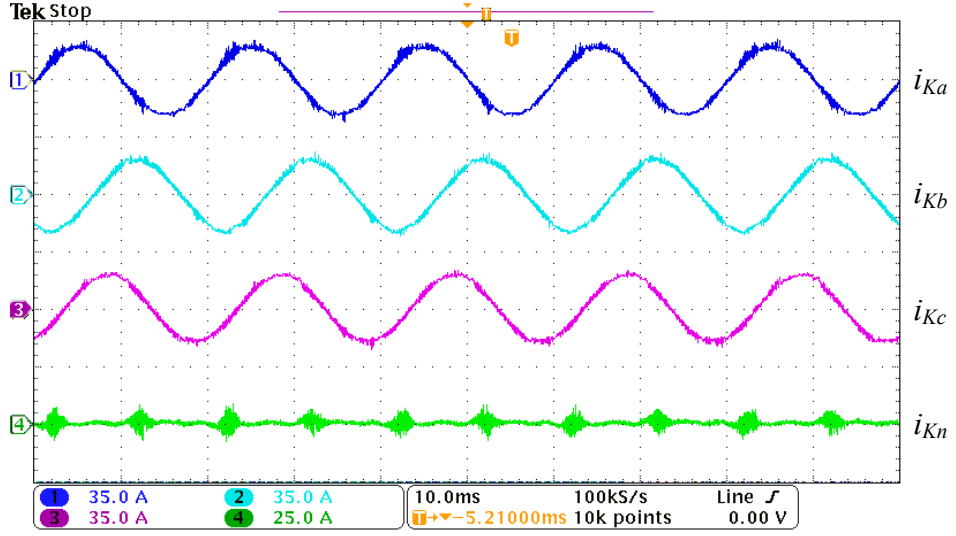
(a) Kaynak gerilimi dalga şekilleri



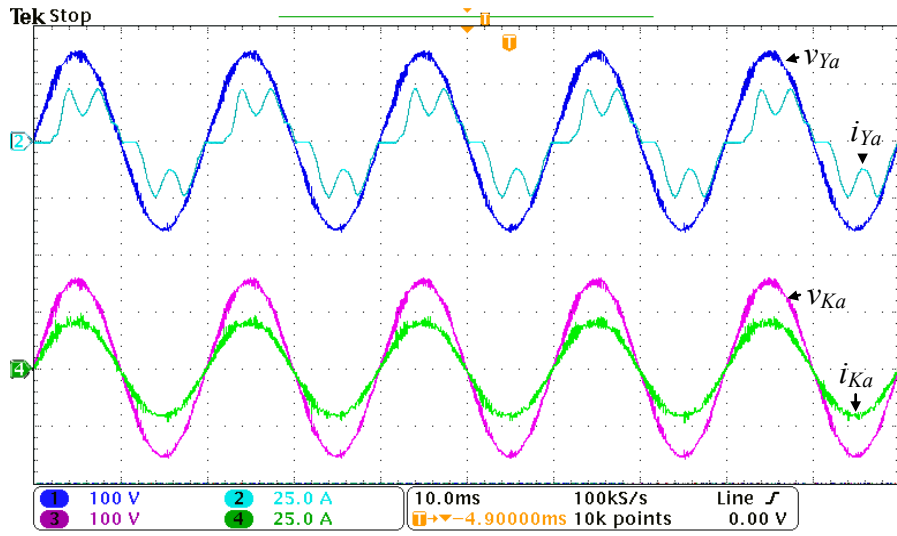
(b) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri



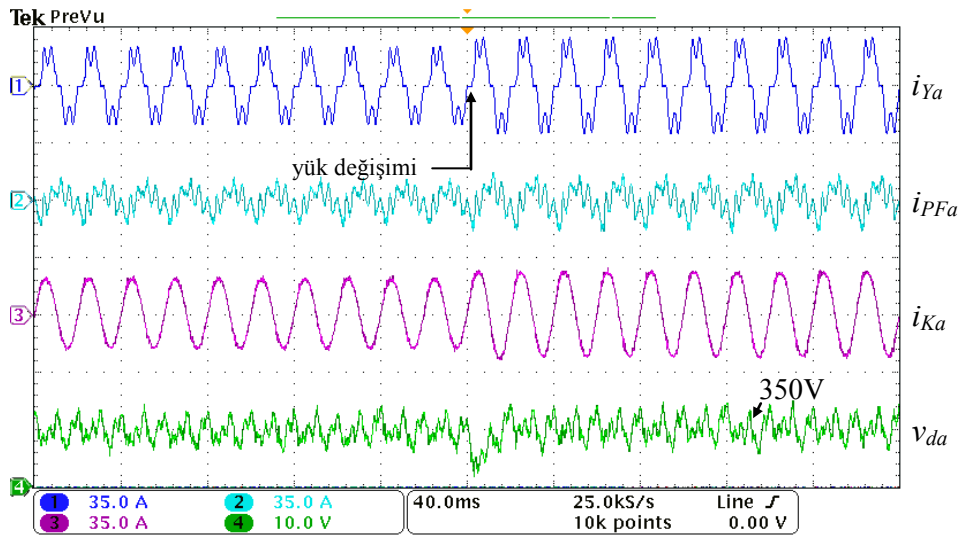
(c) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri (3-kol devrede)



(d) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri (4-kol devrede)



(e) Reaktif güç kompanzasyonu

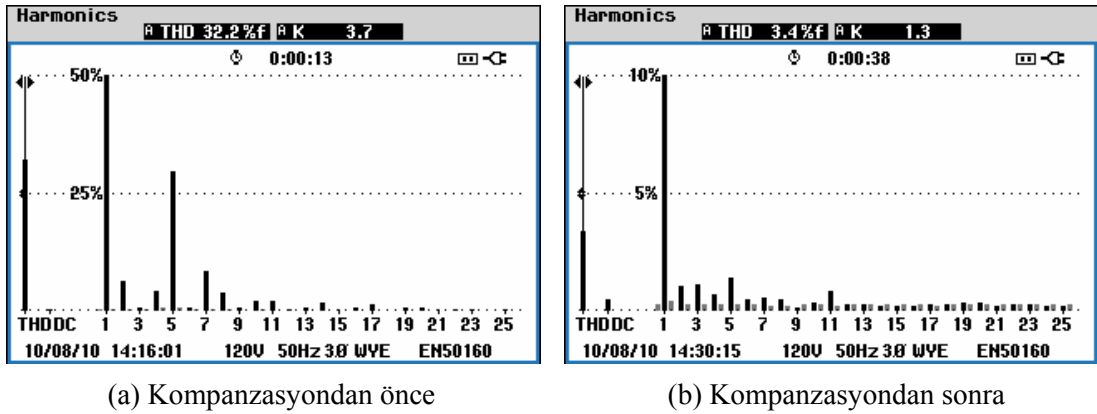


(f) Sistemin yük değişimi koşulunda performansı

Şekil 5.17: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 5.17d'de PAF biriminin 4. kolu da devreye alınarak *b*-fazında bulunan 3 ve 3'ün katı harmonikler içeren nötr akımı da kompanze edilerek kaynak akımlarının dengeli ve sinüzoidal dalga şekline benzediği gösterilmektedir. Şekil 5.17e'de *a*-fazı yük gerilimi ile yük akımı (üst şekil) ve kaynak gerilimi ile kaynak akımı (alt şekil) arasındaki faz farkı gösterilerek reaktif güç kompanzasyonu performansı incelenmektedir. PAF birimi kaynak gerilimi ile kaynak akımını aynı faza getirerek yükün reaktif gücünü kompanze etmektedir.

Şekil 5.17f'de yük değişimi koşulunda üstten alta doğru *a*-fazı kaynak akımı, PAF akımı, kompanze edilen kaynak akımı ve DA-bara gerilimi ( $v_{da1}+v_{da2}$ ) görülmektedir. PAF birimi yük değişimi sırasında DA-bara gerilimini regüle ederek yaklaşık 1 periyotta referans değerine oturtmaktadır. Şekil 5.18'de kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı *a*-fazı harmonik dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.18: Kaynak akımı *a*-fazı harmonik dağılımı

Tablo 5.6'de dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel sonuç özeti verilmektedir. Kaynak akımlarının ortalama THB akım değeri kompanzasyon öncesi %30,2'den sonrasında %3,6'ya düşürülerek IEEE 519 standardında belirtilen %5'ten daha küçük bir değere indirilmektedir. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 14 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 6,7 A'den 1,1 A'ye azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,91'den 0,99'a yükseltilmektedir.

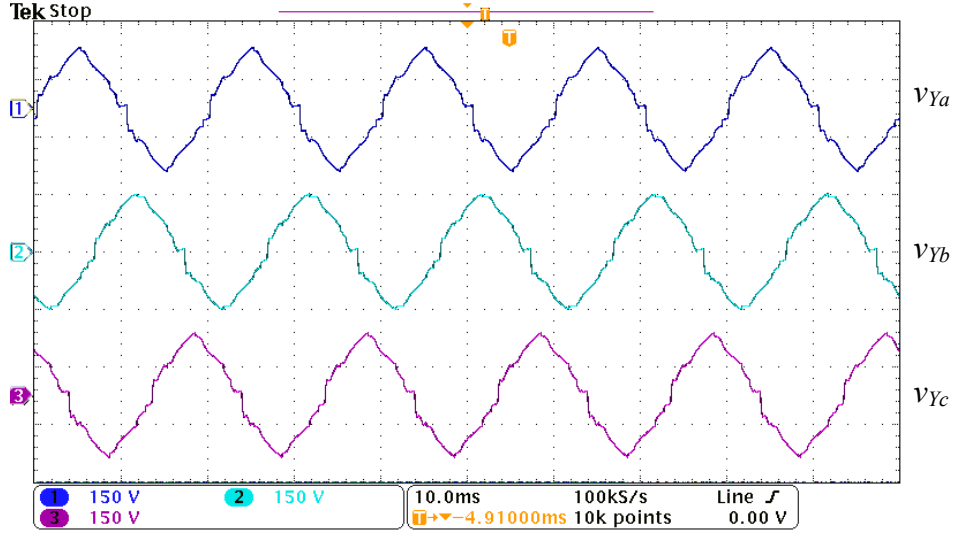
Tablo 5.6: Dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_k$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	<i>a</i> -fazı	13,7	14,2
	<i>b</i> -fazı	18,5	14,5
	<i>c</i> -fazı	13,5	13,9
	nötr	6,7	1,1
THB (%)	<i>a</i> -fazı	32,2	3,4
	<i>b</i> -fazı	26,7	3,9
	<i>c</i> -fazı	31,5	3,6
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	11,2	1,5
	Sıfır bileşen	11,7	1,1
Güç Faktörü		0,91	0,99

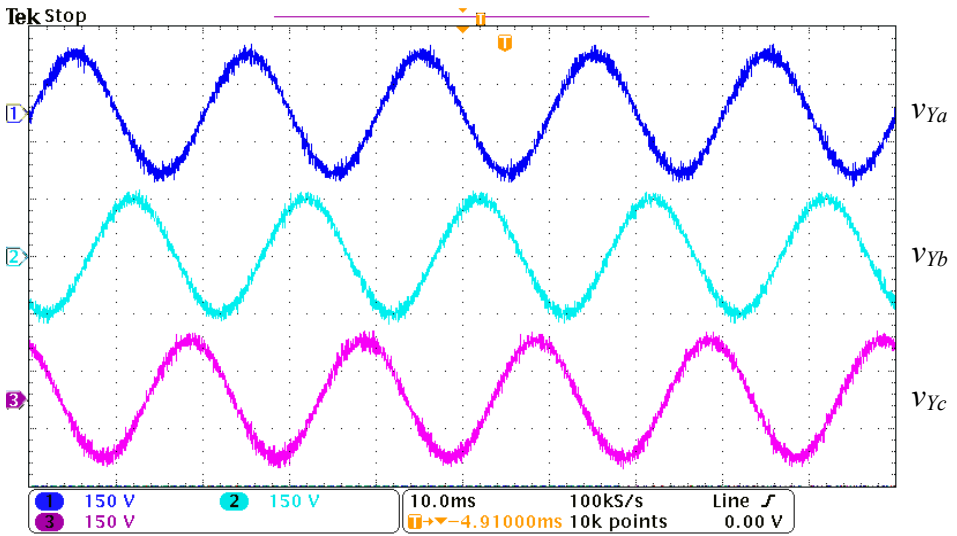
#### 5.4.2. Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

Şekil 5.19'da 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi ile kaynak gerilim harmoniği ve aynı zamanda dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 5.11'de görüldüğü gibi sistem empedansı  $59 \mu\text{H}$ 'den  $3,6 \text{ mH}$ 'ye yükseltilecek ve OBN'ye bağlanan *RC* yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu (doğrusal olmayan yük-2) tarafından çekilen harmonik akımlar kaynak tarafında gerilim harmoniklerini % 9 düzeyine yükseltmektedir. Böylece test çalışmalarında kullanılmak üzere gerilim harmonikleri meydana getirilmiştir.

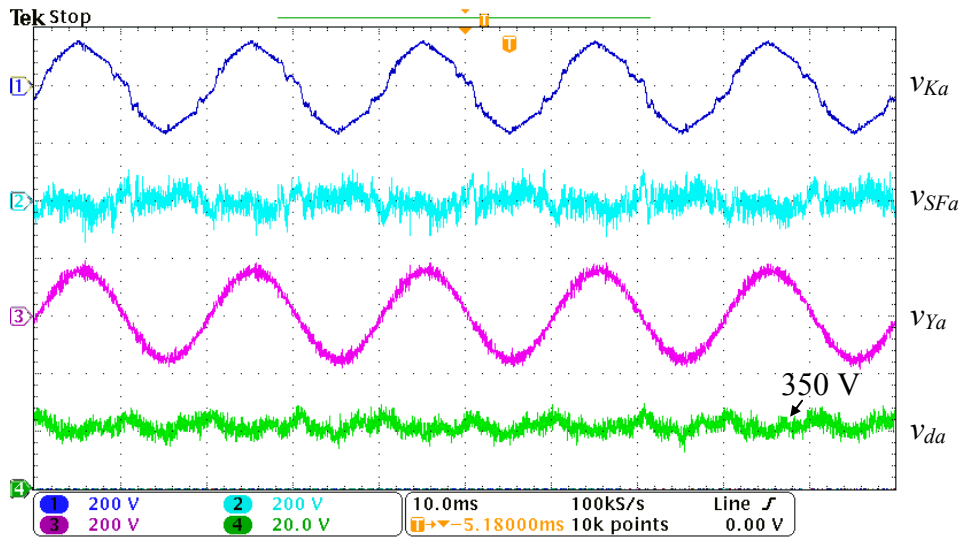
Şekil 5.19a'da kompanzasyondan önce 3-faz harmonik içeren yük gerilimleri görülmektedir. Periyodik akım ve gerilim dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 5.19b'de gösterildiği gibi kompanzasyondan sonra harmonik içeren yük gerilimleri kompanze edilerek sinüzoidal dalga şekline benzetilmektedir. Şekil 5.19c'de üstten alta doğru, *a*-fazı kaynak gerilimi, SAF gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi ve DA-bara gerilimi gösterilmektedir. DA-bara geriliminin istenilen  $350 \text{ V}$  değerine oturduğu görülmektedir.



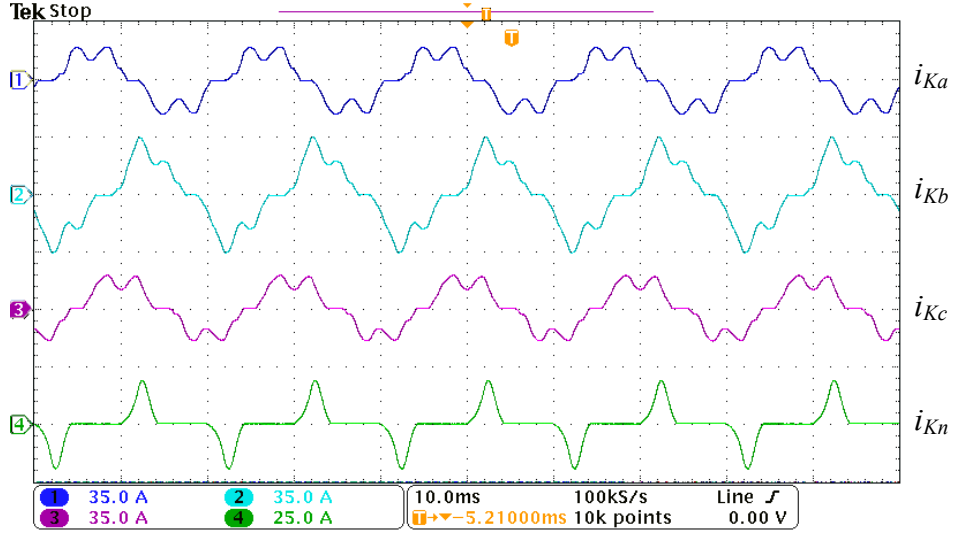
(a) Kompanzasyondan önce yük gerilimi dalga şekilleri



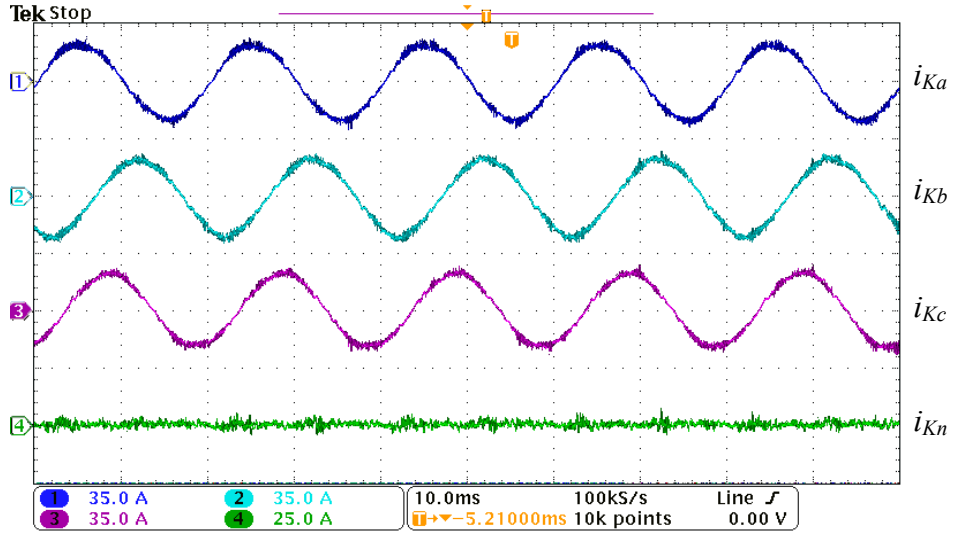
(b) Kompanzasyondan sonra yük gerilimi dalga şekilleri



(c) Kaynak, SAF, yük ve DA gerilim dalga şekilleri



(d) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri

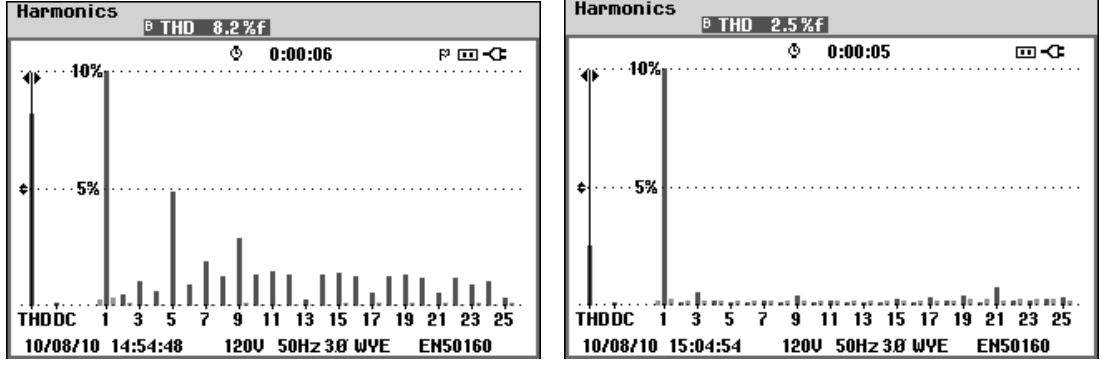


(e) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri

Şekil 5.19: Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 5.19d’de kompanzasyondan önce 3-faz kaynak ve nötr akımı dalga şekilleri görülmektedir. Tek-fazlı yük nedeniyle faz akımlarının farklı değerler aldığı açıkça görülmektedir. Şekil 5.19e’de kompanzasyondan sonraki 3-faz kaynak ve nötr akımı dalga şekilleri incelendiğinde faz akımlarının dengelendiği ve nötr akımın azaldığı açıkça gösterilmektedir. Kompanzasyondan önce ve sonra yük gerilimi  $b$ -fazı harmonik dağılımı Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Harmonik dağılımdan özellikle düşük değerli harmoniklerin oldukça azaltıldığı açıkça görülmektedir. Kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı  $b$ -fazı harmonik dağılımı Şekil 5.21’de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde akım harmoniklerinin de başarılı biçimde azaltıldığı gösterilmektedir.

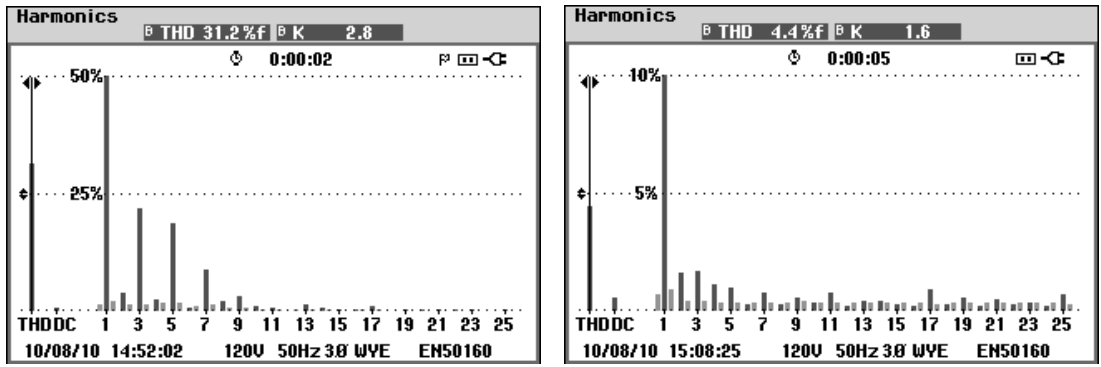




(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 5.20: Yük gerilimi *b*-fazı harmonik dağılımı



(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 5.21: Kaynak akımı *b*-fazı harmonik dağılımı

Kaynak gerilim harmoniği ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel sonuç özetleri sırasıyla Tablo 5.7 ve Tablo 5.8'de verilmektedir. Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyondan önce yük gerilimlerinin ortalama THB değeri %8,9 iken kompanzasyondan sonra %2,5 olmakta ve hedeflenen %5 standardının altına düşürülmektedir. Ayrıca yük gerilimleri 110 V değerine regüle edilerek dengelenmektedir.

Tablo 5.7: Kaynak gerilim harmoniği kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	<i>a</i> -fazı	104,7	110,2
	<i>b</i> -fazı	104,5	109,1
	<i>c</i> -fazı	105,9	109,6
THB (%)	<i>a</i> -fazı	9,6	2,6
	<i>b</i> -fazı	8,2	2,5
	<i>c</i> -fazı	9,1	2,5

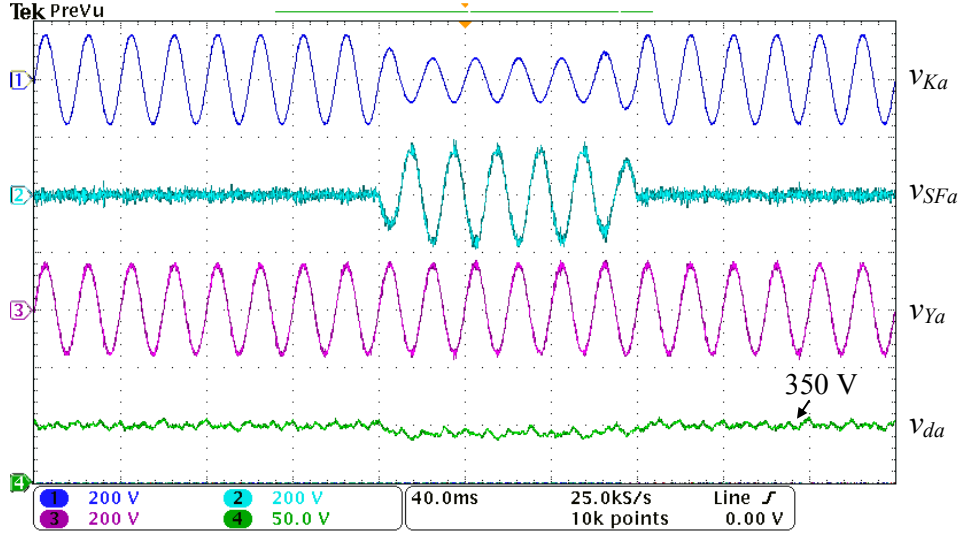
Tablo 5.8: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_k$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	<i>a</i> -fazı	12,3	15,6
	<i>b</i> -fazı	17,2	15,7
	<i>c</i> -fazı	12,1	15,4
	nötr	6,7	1,3
THB (%)	<i>a</i> -fazı	29,9	4,5
	<i>b</i> -fazı	31,2	4,4
	<i>c</i> -fazı	28,5	4,5
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	11,8	1,1
	Sıfır bileşen	12,2	0,7
Güç Faktörü		0,90	0,99

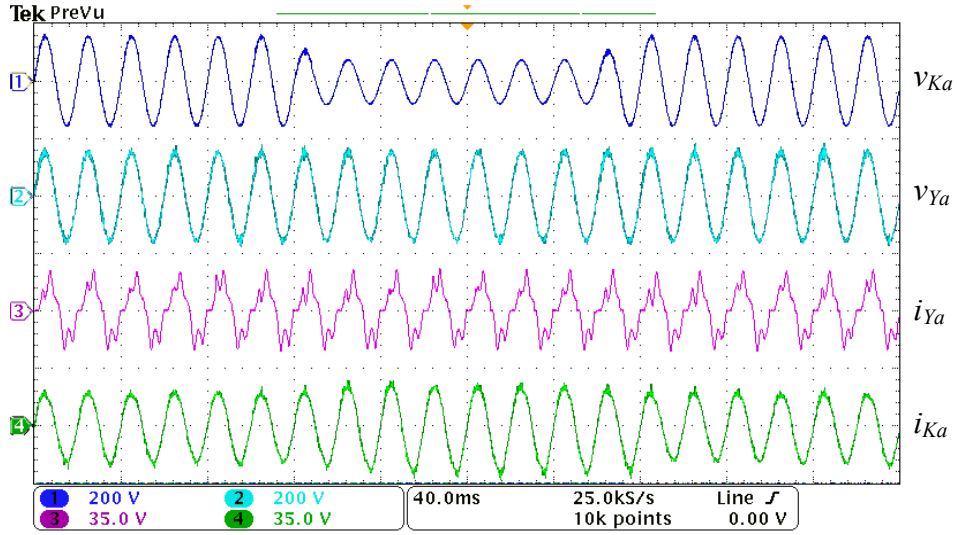
Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kaynak akımlarının ortalama THB değeri kompanzasyondan önce %29,8 iken kompanzasyondan sonra %4,46 olmakta ve hedeflenen %5 standardının altına indirilmektedir. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 15 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 6,7 A'den 1,3 A'e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,90'dan 0,99'a yükseltilmektedir.

#### 5.4.3. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

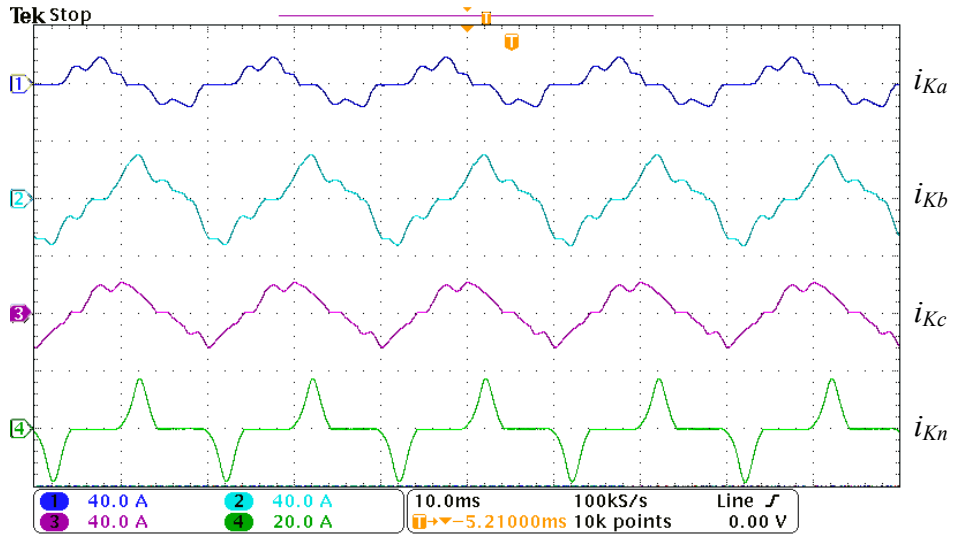
Şekil 5.22'de tek-faz kaynak gerilim çökmesi ve aynı zamanda dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel dalga şekilleri gösterilmektedir. Periyodik akım ve gerilim dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir. Şekil 5.22a'da yukarıdan aşağıya doğru *a*-fazı kaynak gerilimi, SAF gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi ve DA-bara gerilimi gösterilmektedir. BSPAF sistemi ile *a*-fazı kaynak gerilim çökmesi durumunda yük uçlarındaki gerilim anma etkin değerine regüle edilmektedir.



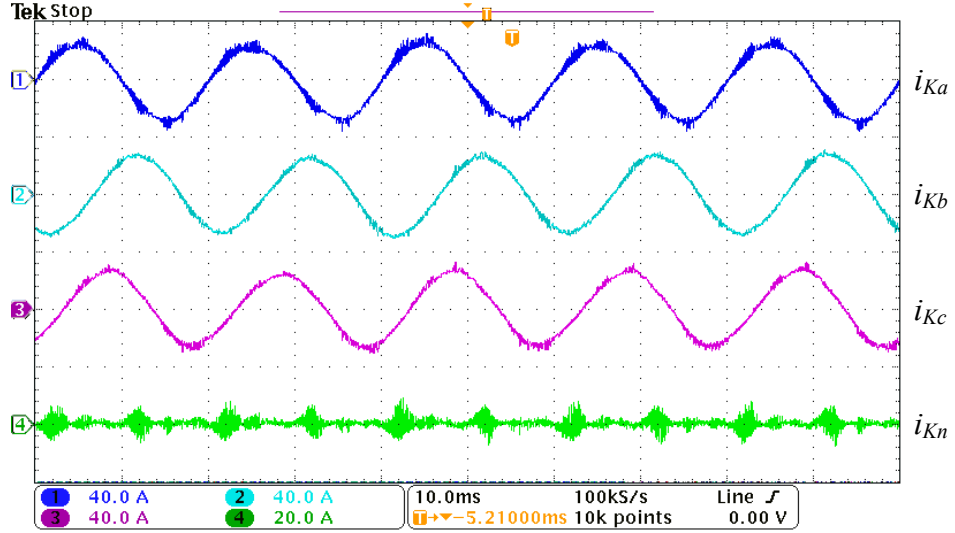
(a) Kaynak gerilimi, SAF gerilimi, yük gerilimi ve DA bara gerilimi dalga şekilleri



(b) Kaynak gerilimi, yük gerilimi, yük akımı ve kaynak akımı dalga şekilleri



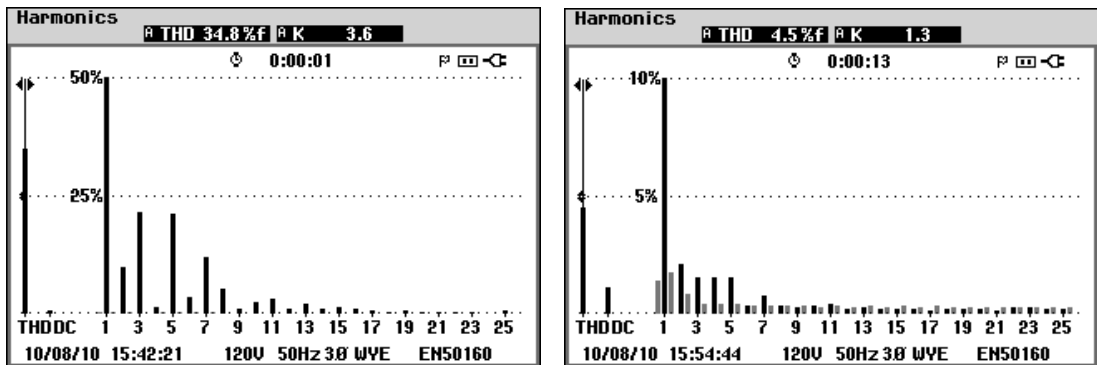
(c) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri



(d) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri

Şekil 5.22: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 5.22b’de yukarıdan aşağıya doğru  $a$ -fazı kaynak gerilimi, kompanse edilen yük gerilimi, yük akımı ve kompanse edilen kaynak akımı gösterilmektedir. Açıkça görüldüğü gibi kısa süreli çökme anında yük geriliminin kompanzasyonu için gerekli güç kaynaktan sağlanmaktadır. Bu sebeple kaynak akımları genliği artmaktadır. Şekil 5.22c’de kompanzasyondan önce dengesiz doğrusal olmayan kaynak akımları görülmektedir. Şekil 5.22d’de görüldüğü gibi kompanzasyondan sonra kaynak akımları dengeli-sinüzoidal biçimde olmakta ve nötr akımı da azaltılmaktadır. Şekil 5.23’de kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı gösterilmektedir. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özetleri sırasıyla Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da verilmektedir.



(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 5.23: Kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı

Tablo 5.9: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_Y$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	<i>a</i> -fazı	53,9	110,1
	<i>b</i> -fazı	108,9	109,8
	<i>c</i> -fazı	109,7	107,8
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	20,1	1,1
	Sıfır bileşen	20,6	1,1

Tablo 5.10: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_K$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	<i>a</i> -fazı	9,2	18,3
	<i>b</i> -fazı	16,4	18,3
	<i>c</i> -fazı	13,1	18,0
	nötr	6,6	1,5
THB (%)	<i>a</i> -fazı	34,8	4,5
	<i>b</i> -fazı	29,8	3,7
	<i>c</i> -fazı	19,6	4,7
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	25,4	1,2
	Sıfır bileşen	13,7	0,6
Güç Faktörü		0,92	0,99

Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde çökme görülen *a*-faz gerilimi 53,9 V, *b* ve *c*-faz gerilimi ortalama olarak 109 V değerinde iken değerindedir. Kompanzasyon sonrasında dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen gerilimler kompanze edilerek yük gerilimleri ortalama olarak 109,2 V değerine yükseltilmekte ve dengelenmektedir. Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde *a*-fazı için % 34,8, *b*-fazı için %29,8 ve *c*-fazı için de %19,6 olan THB akım değerleri, kompanzasyon sonrasında %5 düzeyinin altına indirilmektedir. Böylece BSPAF sistemi ile kompanzasyon sonrasında tüm faz akımları IEEE 519 standardında belirlenen sınır değerinin altında THB değerine sahip olmaktadır. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 18 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 6,6 A'den 1,5 A'e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,92'den 0,99'a yükseltilmektedir.

## 5.5. Ultra-Kapasitör Enerji Depolama Sistemi

Mikro şebeke uygulamaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından güç üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte artan güç talebini karşılamak için enerji verimliliğinin yanında gerekli enerji tamponu olarak görev yapacak sistemler ve verimli enerji depolama sistemleri oldukça önem kazanmıştır. Ultra-kapasitör veya süper-kapasitör olarak adlandırılan büyük kapasite değerine sahip kondansatörler günümüzde yeni bir enerji depolama elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ultra-kapasitör ile oluşturulan enerji depolama sistemi, enerji tamponu görevi dışında aynı zamanda şebekenin güç kalitesinin iyileştirilmesini de sağlamaktadır.

Güç ve enerji yoğunluğu açısından batarya ve geleneksel alüminyum elektrolitik kondansatör arasındaki boşluğu dolduran yeni nesil bir enerji depolama elemanı olan ultra-kapasitörler literatürde, çift katmanlı elektriksel kondansatör veya süper-kapasitör olarak da adlandırılmaktadır. Ultra-kapasitörlerin kapasiteleri birkaç Farat'tan başlayarak binlerce Farat'a kadar geniş olmakla birlikte, güç yoğunlukları da bataryalardan 10 kat daha fazladır.

Ultra-kapasitörün enerji depolama kapasitesi elektrolitik kondansatörlerden 2.000 ve 6.000 kat daha fazla olup daha hızlı şarj deşarj olabilmekte, işletme sıcaklığı daha geniş bir aralıkta ve çevrim ömrü de daha uzundur. Özellikle birkaç milisaniyeden birkaç dakikaya kadar yüksek güç deşarjı gerektiren tüm uygulamalar için ultra-kapasitör kullanımı uygun olmaktadır. Ultra-kapasitörler, oldukça yüksek güç yoğunlukları nedeniyle (18 kW/kg) çok kısa bir süre içinde güç sistemine yüzlerce hatta binlerce amper akım verebilmektedir. Böylece kısa sürede yüksek güç gerektiren güç kalitesi problemlerinin çözümünde önemli rol alabilmektedirler.

Ultra-kapasitörler, kimyasal bir reaksiyon olmadan doğrudan elektriği depolayabildiklerinden çok kısa sürede şarj ve deşarj olabilmektedir. Bataryalar normal şarj sırasında saatler, hızlı şarj durumunda bile onlarca dakikada şarj olabilirken, ultra-kapasitör birkaç saniyede şarj olabilmektedir. Bununla birlikte bataryaların tersine ultra-kapasitörler bakımsız olarak çok uzun ömürlüdürler. Ayrıca normal kullanımda sıcaklık etkilenmeleri de oldukça düşüktür. Ultra-kapasitör,

-40 °C ile +85 °C arasında çalışabilmektedir. Örneğin 583 F, 15 V, 400 A boyutlarında bir ultra-kapasitör bankası sıfır gerilim düzeyinden maksimum şarj gerilimine sabit 400 A akım altında 22 saniyede gelebilmektedir [124]. Tablo 5.11’de ultra-kapasitör, batarya ve uçan tekerlek (flywheel) enerji depolama elemanlarının karşılaştırması verilmektedir [125].

Tablo 5.11: Enerji depolama elemanlarının karşılaştırması

Özellik	Ultra Kapasitör	Batarya	Uçan tekerlek (Flywheel)
Deşarj Süresi	1 - 30 s	0,3 - 3 saat	0,5 - 2 saat
Şarj Süresi	1 - 30 s	1 - 5 saat	0,5 - 2 saat
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	1 - 10	20 - 100	5 - 50
Güç Yoğunluğu (W/kg)	7000 - 8000	50 - 200	180 - 1800
Ömür çevrimi	10 <sup>6</sup> kez	10 <sup>3</sup> kez	10 <sup>6</sup> kez
Verim	%95	%80- 85	%90 - 95
Bakım	çok iyi	iyi	orta
Maliyet (birim değer: pu)	20	1	8
Güvenlik	İyi	iyi	iyi değil

Gerilim çökmeleri birçok fabrika ekipmanının maruz kaldığı çok sıklıkla görülen bir güç kalitesi problemidir. Özellikle PLC, anahtarlamalı güç kaynağı ve motor sürücü gibi hızlı cevap süresi olan elektronik ekipmanlar, kaynak geriliminde görülen gerilim çökmelerine dayanması için yeterli dahili enerji kaynağına sahip değildir. Ultra-kapasitörler, bu tip cihazların gerilim çökmesine karşı dayanımı için ideal bir enerji depolama çözümü sunabilmektedir.

Ultra-kapasitörler, normal kondansatörlere göre oldukça yüksek enerji yoğunluğu (elektrolitik bir kondansatörün yaklaşık 1000 katı) sağlar, anlık olarak çok yüksek güçleri iletebilir ve bataryaların tersine herhangi bir şartlandırmaya gerek duymadan işletim geriliminde yıllarca çalışmasını sürdürebilir. Ultra-kapasitörlerin en önemli üstünlükleri, uzun işletim ömürleri, esnek gerilim düzeyi, yüksek akım gücü olarak sayılabilir. Ultra-kapasitör, bir kondansatör gibi kimyasal bir reaksiyon olmadan çalışabilmekte, 10 yıldan fazla işletim süresi ile milyonlarca çevrim yapabilmektedir [126].

Ultra-kapasitörlerin en önemli dezavantajları ise,

- doğrusal deşarj gerilimi tüm enerjinin kullanımını sınırlamaktadır,
- enerji yoğunluğu bataryalara göre 1/5 veya 1/10 kadar düşüktür,
- tek bir hücre gerilimleri düşüktür (2,5-3 V), yüksek gerilimler için seri bağlama gerilim dengelenmesi sorunlarına yol açabilir,
- kendi kendine deşarj olurlar,
- watt başına maliyetleri oldukça yüksektir,
- normal şartlar altında kullanılmaz ise elektrolit kaçağı olabilir,
- gelişmiş elektronik kontrol ve anahtarlama elemanları gerektirmektedir.

Akıllı şebeke (Smart Grid) teriminin sıklıkla gündeme geldiği günümüzde ultra-kapasitör uygulamalarının çok yüksek hızla enerji depolama kapasiteleri ile güç kalitesi iyileştirmeye yönelik olarak aktif filtre uygulamalarında kullanımının artması da beklenmektedir. Ultra-kapasitörler, çok yüksek güçleri çok hızlı depolayıp geri verebildikleri için özellikle güç sistemlerinde meydana gelen gerilim çökmesi veya kısa süreli kesintiler gibi geçici durumların giderilmesinde önemli görevler alabilmektedir. Ayrıca kesintiler sırasında yaşanan geçişlerde gerilim kararlılığını sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada, 4-kollu 4-telli BSPAF isteminin DA barasına bir ultra-kapasitör enerji depolama sistemi bağlanarak, kısa süreli gerilim çökmesi problemlerine karşı çözüm üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Maxwell teknolojiye ait BPAK0058 B01 serisi 30 adet 15 V 58 F ultra-kapasitör paketi kullanılmıştır. Tablo 5.12’de BPAK0058 B01 ultra-kapasitör paketinin teknik özellikleri verilmektedir.

Bu çalışmada 30 adet ultra-kapasitör paketi seri bağlanarak 450 V 1,93 F değerinde bir enerji depolama sistemi elde edilmiştir. Tüm sistemin bağlantıları ve mekanik montajı laboratuarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.24’de 58 F kapasiteli 15 V ultra-kapasitör paketi ve bu ultra-kapasitör paketlerinin delikli sac levhaya montaj işlemi gösterilmektedir. Şekil 5.25’de, montajı tamamlanan 1,93 F 450 V ultra-kapasitör bankası fotoğrafı görülmektedir. Şekil 5.26’de ultra-kapasitör bankasının 3-faz köprü doğrultucu ile her bir fazda 8  $\Omega$  ön-dirençler kullanılarak şarj edilirken gerilim ve akım eğrileri görülmektedir.



Tablo 5.12: BPAK0058 B01 ultra-kapasitör paketinin teknik özellikleri

Özellikler	Değer
Nominal kapasite	58 F
Kapasite toleransı	±%20
Gerilim	15 V
Maksimum işletim gerilimi	50 V
İzolasyon gerilimi	1100 V
Direnç (ESR), DC	19 mΩ
Direnç toleransı	±%25
Isıl direnç (Rth)	1,8 °C/W
Çalışma sıcaklığı	-40 °C~65 °C
Güç (Pd)	3000 W/kg
Güç (Pmaks.)	11200 W/kg
Enerji (Emaks.)	3,63 Wh/kg
Sızıntı akımı	1 mA
Kısa devre akımı (Isc)	1500 A
Maksimum sürekli akım	20 A
Maksimum tepe akım, 1 sn	80 A
Dengeleme	Aktif
Ağırlık	560g



(a)



(b)

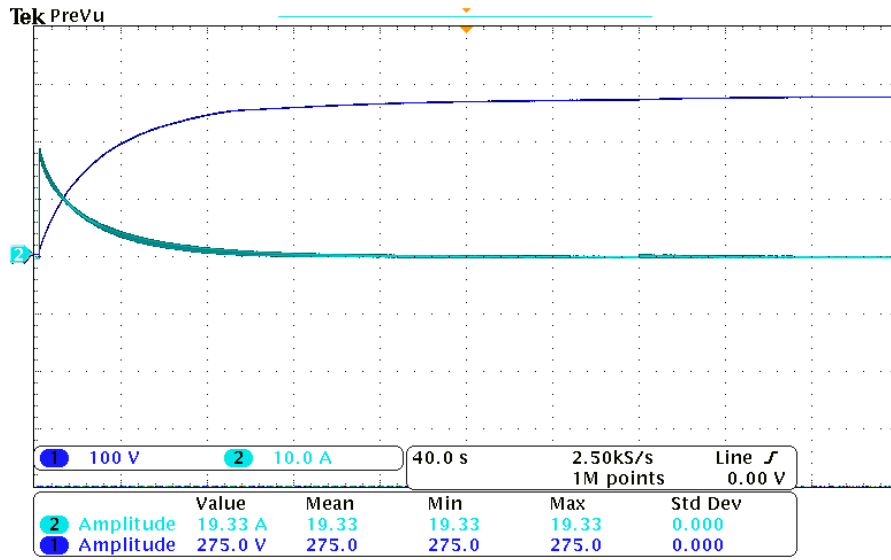


(c)

Şekil 5.24: a) 58 F kapasitesi ile 15 V ultra-kapasitör paketi b), c) ultra-kapasitör paketlerinin delikli sac levhaya montaj görünüşleri



Şekil 5.25: Paketlenmiş 450V 1,93F kapasiteli ultra-kapasitör bankasının a) ön ve b) yan görüşleri

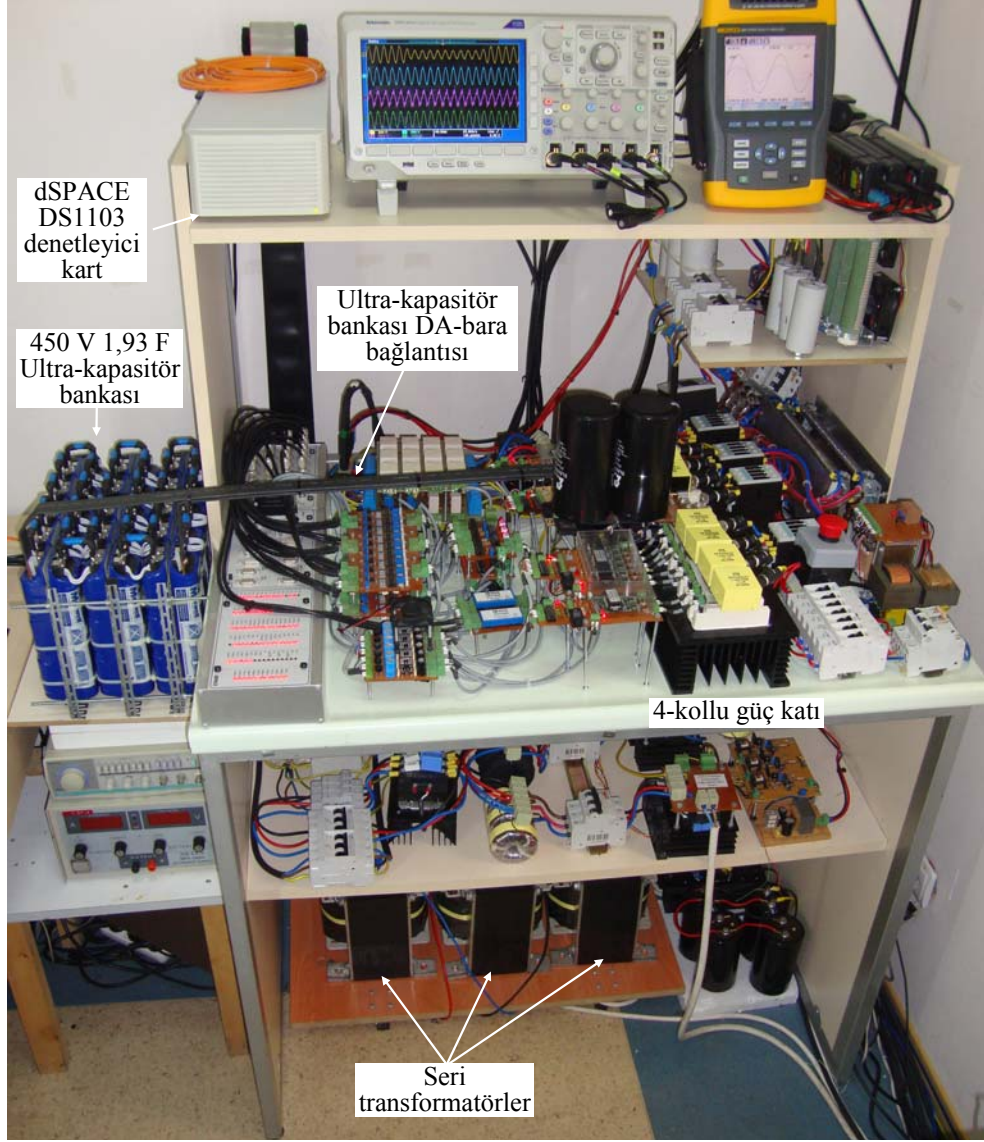


Şekil 5.26: Ultra-kapasitör bankasının şarj sırasındaki akım ve gerilim eğrileri

DA-barasında ultra-kapasitör sistemi bağlı olan 4-kollu 4-telli BSPAF güç sisteminin blok diyagramı Şekil 5.27’de verilmektedir. Denetim sistemi blok diyagramı Şekil 5.12’de verildiği gibi değişiklik yapılmadan kullanılmaktadır.



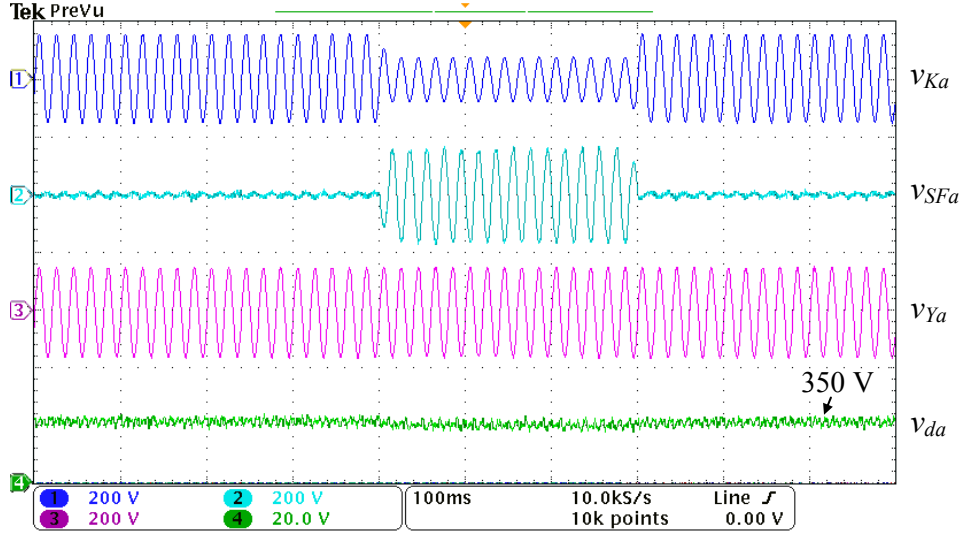
DA-barasına ultra-kapasitör enerji depolama sistemi bağlanan 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı Şekil 5.28’de görülmektedir.



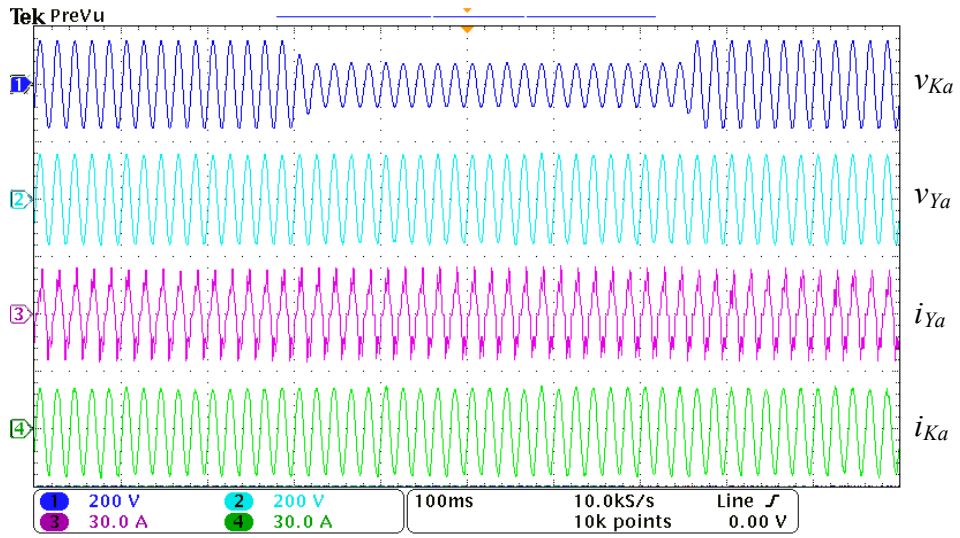
Şekil 5.28: Ultra-kapasitör ile 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi laboratuvar test platformunun fotoğrafı

### 5.5.1. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu

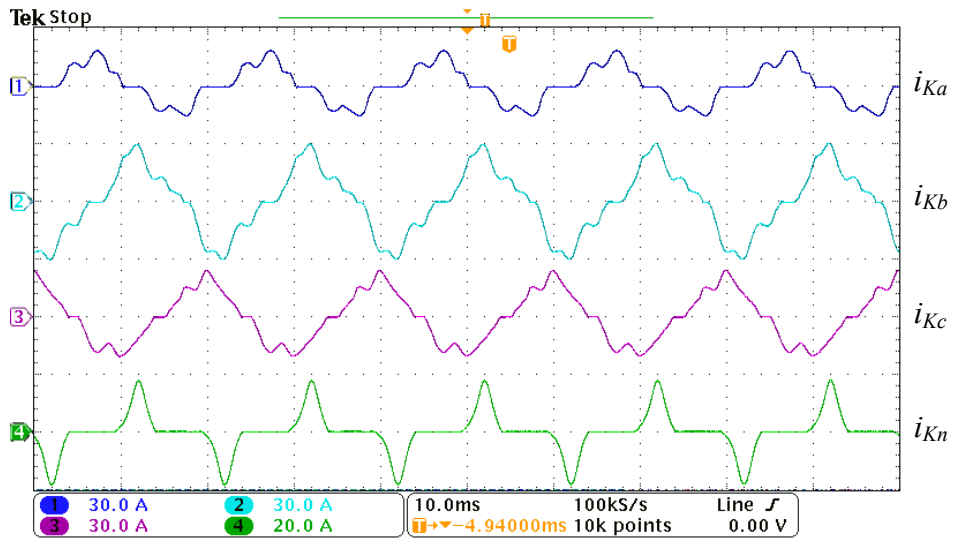
Şekil 5.29’da tek-faz kaynak gerilim çökmesi ve aynı zamanda dengesiz ve doğrusal olmayan akım kompanzasyonu deneysel dalga şekilleri gösterilmektedir. Periyodik akım ve gerilim dalga şekli kompanzasyonu yapıldığı için  $T_c$  ortalama zaman aralığı  $T/2$  seçilmiştir.



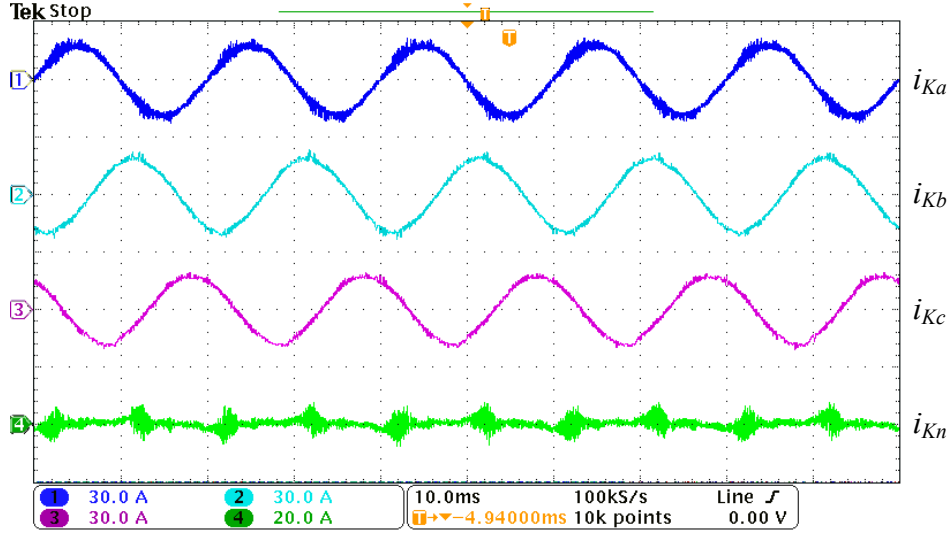
(a) Kaynak gerilimi, SAF gerilimi, yük gerilimi ve DA bara gerilimi dalga şekilleri



(b) Kaynak gerilimi, yük gerilimi, yük akımı ve kaynak akımı dalga şekilleri



(c) Kompanzasyondan önce kaynak akımı dalga şekilleri

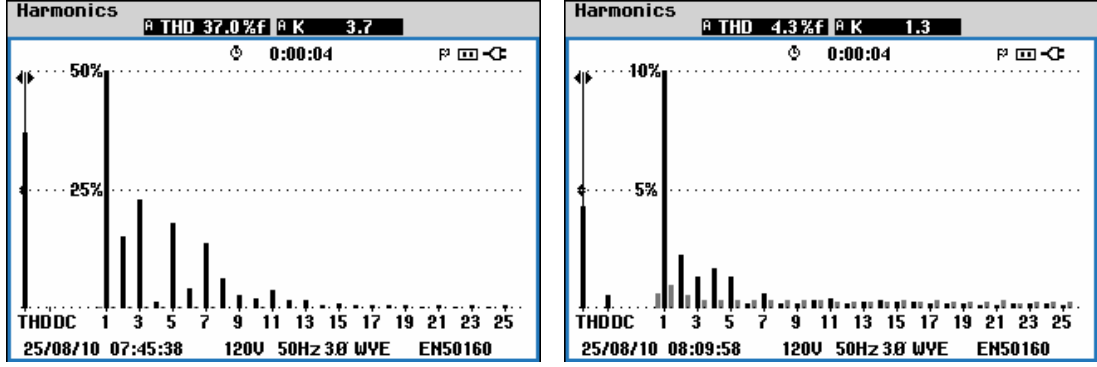


(d) Kompanzasyondan sonra kaynak akımı dalga şekilleri

Şekil 5.29: Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları

Şekil 5.29a'da yukarıdan aşağıya doğru  $a$ -fazı kaynak gerilimi, SAF gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi ve DA-bara gerilimi gösterilmektedir. BSPAF sistemi ile  $a$ -fazı kaynak gerilim çökmesi durumunda yük uçlarındaki gerilim anma etkin değerine regüle edilmektedir. Ayrıca Şekil 5.29b'de yukarıdan aşağıya doğru  $a$ -fazı kaynak gerilimi, kompanze edilen yük gerilimi, yük akımı ve kompanze edilen kaynak akımı gösterilmektedir. Tek-faz kaynak gerilim çökmesi sırasında yük geriliminin kompanzasyonu için gerekli güç ultra-kapasitör bankasından karşılandığı için DA-baradaki gerilim sabit tutulmakta ve bu sebeple kaynak akımları genliği artmamaktadır.

Kompanzasyondan önce dengesiz-doğrusal olmayan kaynak akımları Şekil 5.29c'de görülmektedir. Kompanzasyondan sonra Şekil 5.29d'de görüldüğü gibi kaynak akımları dengelenmekte, sinüzoidal dalga şekline benzemekte ve nötr akımı da azaltılmaktadır. Kompanzasyondan önce ve sonra kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı Şekil 5.30'da gösterilmektedir. Kaynak gerilim çökmesi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonuna ait deneysel sonuç özetleri sırasıyla Tablo 5.13 ve Tablo 5.14'de verilmektedir.



(a) Kompanzasyondan önce

(b) Kompanzasyondan sonra

Şekil 5.30: Kaynak akımı  $a$ -fazı harmonik dağılımı

Tablo 5.13: Kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Yük gerilimleri ( $v_L$ )		Önce	Sonra
RMS (V)	$a$ -fazı	54,1	110,8
	$b$ -fazı	109,1	110,0
	$c$ -fazı	109,7	107,8
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	19,9	1,1
	Sıfır bileşen	20,6	1,5

Tablo 5.14: Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuç özeti

Kaynak akımları ( $i_s$ )		Önce	Sonra
RMS (A)	$a$ -fazı	9,1	16,3
	$b$ -fazı	16,5	16,3
	$c$ -fazı	13,0	16,1
	nötr	6,8	1,2
THB (%)	$a$ -fazı	37,0	4,3
	$b$ -fazı	32,1	4,2
	$c$ -fazı	21,0	4,5
Dengesizlik (%)	Negatif bileşen	26,4	1,1
	Sıfır bileşen	14,1	0,8
Güç Faktörü		0,91	0,99

Ultra-kapasitör bankasının devreye alınmasıyla elde edilen kaynak gerilim çökmesi kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde çökme görülen  $a$ -faz gerilimi 54,1 V,  $b$  ve  $c$ -faz gerilimi ortalama olarak 109,4 V değerindedir. Kompanzasyon sonrasında dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen gerilimler kompanze edilerek yük gerilimleri ortalama olarak 109,5 V değerine

yükseltilmekte ve dengelenmektedir. Dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçlarına göre kompanzasyon öncesinde  $a$ -fazı için  $a$ -fazı % 37,  $b$ -fazı %32,1 ve  $c$ -fazı için %21 olan THB akım değerleri, kompanzasyon sonrasında %5 düzeyinin altına indirilmektedir. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları ortalama olarak 18 A değerinde dengelenmekte ve nötr akımı 6,8 A'den 1,2 A'e azaltılmaktadır. Güç faktörü ise 0,91'den 0,99'a yükseltilmektedir. Tablo 5.15'de simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılan 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi parametreleri verilmektedir.

Tablo 5.15: 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi parametreleri

Bileşenler		Sembol	Parametreler
Güç kaynağı	Gerilim, frekans	$V_{Kabc}, f_K$	110 V, 50 Hz
	Empedans	$L_K$	59 $\mu$ H
DA-bara	Kondansatör	$C$	2350 $\mu$ F (2x4700 $\mu$ F seri bağlı)
	Referans gerilim	$V_{da}$	350 V
PAF	Filtre	$L_{PF}, L_{PFn}, R_{PF}, C_{PF}$	3 mH, 3 mH, 5 $\Omega$ , 30 $\mu$ F
	Anahtarlama frekansı	$f_{ap}$	8 kHz
SAF	Filtre	$L_{SF}, L_{SFn}, R_{SF}, C_{SF}$	1 mH, 1 mH, 2 $\Omega$ , 50 $\mu$ F
	Anahtarlama frekansı	$f_{as}$	10 kHz
	Seri transformatör	$N_1/N_2, S$	2, 5,4 kVA
Doğrusal olmayan yük-1	3-faz tristörlü	$L_Y, L_{da}, R_{da}$	3 mH, 5,7 mH, 22 $\Omega$
	3-faz diyotlu	$L_Y, C_{da}, R_{da}$	3 mH, 100 $\mu$ F, 25 $\Omega$
	Tek-faz diyotlu	$L_Y, C_{da}, R_{da}$	2 mH, 330 $\mu$ F, 30 $\Omega$
Doğrusal olmayan yük-2	3-faz diyotlu	$C_{da}, R_{da}$	8800 $\mu$ F, 15 $\Omega$

Bu bölümde, genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisinin 3-faz 4-kollu ve 4-telli BSPAF sisteminin denetim stratejisinde kullanımı ve farklı güç kalitesi bozulmalarında performansının test edilmesi amacıyla yapılan simülasyon ve deneysel sonuçları verilmiştir. Ayrıca 450 V 1,93 F kapasiteli ultra-kapasitör bankasının 4-kollu BSPAF sisteminin DA-barasına bağlanmasıyla kısa süreli gerilim çökmesi kompanzasyonu durumunda elde edilen performans artışına ilişkin deneysel sonuçlar incelenmiştir.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 3-faz 4-telli güç sistemleri için geliştirilen 3-faz 3-kollu 4-telli ve 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sistemleri ile farklı şebeke ve yük çalışma koşullarında yüksek güç kalitesi sağlamak üzere denetim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, Matlab/Simulink simülasyonları ve 5 kVA gücünde tasarlanan laboratuvar test platformu ile deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Ayrıca 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin DA-barasına bağlanan ultra-kapasitör bankası ilavesi ile performans artışı deneysel olarak gözlenmiştir.

Tez çalışmasında, tek-fazlı veya 3-fazlı, sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, periyodik veya periyodik olmayan, dengeli veya dengesiz sistemlerde geçerli olan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda PAF denetimi için uygulanmış olan bu teori tez çalışmasında hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının yanı sıra gerilim çökmesi, reaktif güç, dengesizlik ve nötr akımı kompanzasyonu amacıyla 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin denetimi için önerilmiştir.

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminin gerilim denetiminde geri-besleme ilavesi ile geliştirilmiş SDGM ve akım denetiminde ise histerezis bant anahtarlama teknikleri uygulanmıştır. Ayrıca, bu yapıdaki DA-barada bulunan iki kondansatör üzerindeki gerilimlerin dengelenmesi problemini çözmek için DA-bara gerilim dengesizliğini azaltıcı denetim ilave edilmiştir. 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin gerilim denetiminde taşıyıcı tabanlı 3B-UVM ve akım denetiminde ise histerezis bant anahtarlama teknikleri uygulanmıştır. Ayrıca bu yapıda önerilen taşıyıcı tabanlı 3B-UVM tekniği ile DA-bara geriliminin %15 daha düşük belirlenmesi avantajı sağladığından 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminde DA-bara gerilimi 400 V iken 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde DA-bara gerilimi 350 V değerine indirilmiştir.

3-faz 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminde nötr iletkeni, DA-barada bulunan iki kondansatörün orta noktasına bağlandığından sıfır-sıralı bileşen akım DA-bara geriliminde ilave dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu dalgalanmaları azaltmak için DA-baraya daha büyük kapasiteli kondansatörler bağlamak gerekmektedir. 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde ise nötr iletkeni dördüncü kola bağlandığından sıfır-sıralı akımın dolaşımı bu yoldan sağlanmakta ve BSPAF sisteminin DA tarafı AA tarafından izole edilmektedir. Böylece DA-barada sıfır-sıralı akımın neden olduğu dalgalanmalar önlenmekte ve DA-baraya bağlanacak kondansatör kapasitesi daha küçük seçilebilmektedir. Matlab/Simulink simülasyonları yardımıyla 3-kollu 4-telli BSPAF sisteminde DA-barada bulunan iki kondansatörün her birinin kapasitesi 4700  $\mu\text{F}$  değerinde seçilirken, 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde DA-barada bulunan bir kondansatörün kapasitesi 2350  $\mu\text{F}$  (seri bağlı iki adet 4700  $\mu\text{F}$  kapasiteli kondansatör) değerinde seçilmiştir. Ancak 4-kollu 4-telli BSPAF sistemindeki 4. kollar için ilave yarım köprü IGBT modüller ve sürücü kartlar kullanılması gerekmiştir.

BSPAF sistemi test platformunun kurulması için 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli GKE tabanlı güç devreleri, 2-kanal ve 6-kanal IGBT sürücü kartları, akım-gerilim ölçüm kartı, sinyal koşullandırma ara birim kartı, DA-bara gerilim ölçüm kartı, aşırı akım ve gerilim koruma kartı ve besleme devresi kartı tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca tez çalışmasında, BSPAF sisteminin denetimi için model tabanlı gerçek zamanlı dSPACE kontrol geliştirme sisteminin kurulması ve test platformu ile ilişkilendirilmesi aşamaları açıklanmıştır. BSPAF sisteminin gerçek zamanlı denetimi amacıyla dSPACE DS1103 denetleyici kartı kullanılmıştır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan BSPAF sistemi denetim modelleri doğrudan dSPACE denetleyici donanımı ile uygulamaya aktarılmaktadır. Böylece BSPAF sistemi gerçek zamanlı olarak doğrudan, kolay ve hızlı bir şekilde test edilmiştir.

Tez çalışmasında önerilen genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemleri ile dengesiz-doğrusal olmayan yük akımlarının kompanzasyonu, kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal

olmayan akım kompanzasyonu ve gerilim çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan akım kompanzasyonu çalışmaları simülasyon ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

BSPAF sistemi laboratuvar platformunun deneysel olarak test edilebilmesi amacıyla şebeke kaynaklı (anlık gerilim çökmesi ve gerilim harmoniği) ve doğrusal olmayan yük kaynaklı (akım harmonikleri, dengesizlikleri ve nötr akımı) güç kalitesi bozucu etkenler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, BSPAF sistemi ile gerilim çökmesi düzeltimi performansının deneysel olarak test edilebilmesi için tek-faz %50 değerinde bir gerilim çökme üretici tasarlanmıştır. Ayrıca, 3-faz 4-telli sistemde tek-faz kaynak gerilimi çökmesi durumunda dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen gerilimler dikkate alınmıştır. Kaynak gerilim harmoniği düzeltimi performansının deneysel olarak test edilebilmesi için ise kaynak empedansı 59  $\mu\text{H}$ 'den 3,6 mH'ye yükseltilerek ve OBN'ye RC yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu bağlanarak, bu doğrultucunun çektiği harmonik akımlar ile dolaylı olarak kaynak tarafındaki gerilim harmonikleri %10 düzeyine yükseltilmiştir. BSPAF sistemi ile harmonik içeren dengesiz yük akımlarının kompanzasyonu ve nötr akımının eliminasyonu performansının deneysel olarak test edilebilmesi için doğrusal olmayan yük olarak ateşleme açısı  $30^\circ$  olan RL yüklü 3-faz yarı denetimli doğrultucu, RC yüklü 3-faz diyotlu doğrultucu ve b-faza bağlanan RC yüklü tek-faz diyotlu doğrultucu kullanılmıştır. Ayrıca, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar ile 3-faz yarı denetimli doğrultucunun çektiği akımlarda yarı dalga simetrisi olmadığından çift harmoniklerin de bulunduğu dikkate alınmıştır.

Tez çalışmasında, BSPAF sistemi ile kompanzasyondan sonra kaynak akımları ve yük gerilimlerinin dengelenmesi, nötr akımının eliminasyonu, güç faktörünün bire yakın, akım ve gerilim THB değerlerinin ise IEEE 519 standardında belirtilen %5 sınırının altında olması amaçlanmıştır.

3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin PAF birimleri ile dengesiz ve doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları karşılaştırıldığında her iki BSPAF sistemi ile de akım THB değeri %5 sınırının altına indirilmiş, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze

edilerek kaynak akımları dengelenmiş ve güç faktörü 0,99 değerine yükseltilmiştir. Ancak 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi ile akım THB değerinin ve nötr akımının azaltılmasında daha yüksek performans sergilenmiştir.

3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin kaynak gerilim harmoniği ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları karşılaştırıldığında, her iki BSPAF sistemi ile de kaynak akımı ve yük gerilimi THB değerleri %5 sınırının altına indirilmiş, yük gerilimleri 110 V değerine yükseltilmiş, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları dengelemiş ve güç faktörü 0,99 değerine yükseltilmiştir. Ancak, 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi ile nötr akımının azaltılmasında daha yüksek başarımlar sağlanmıştır.

3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin tek-faz %50 değerinde kaynak gerilimi çökmesi ile birlikte dengesiz-doğrusal olmayan yük akımı kompanzasyonu deneysel sonuçları karşılaştırıldığında her iki BSPAF sistemi ile de dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen gerilimler kompanze edilerek yük gerilimleri nominal değerine yükseltilmiş, dengesizliğin neden olduğu negatif ve sıfır bileşen akımlar kompanze edilerek kaynak akımları dengelemiş ve güç faktörü 0,99 değerine yükseltilmiştir. Ancak 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin nötr akımı azaltımı yeteneğinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin DA-barasına ultra-kapasitör bankası bağlandığında gerilim çökmesi sırasında yük geriliminin kompanzasyonu için gerekli gücün ultra-kapasitör bankasından karşılanarak DA-baradaki gerilimin sabit tutulduğu ve bu sebeple DA-barasında ultra-kapasitör bankası olmayan 3-faz 4-kollu 4-telli BSPAF sisteminde görülen kaynak akımlarının artması probleminin oluşmadığı görülmüştür.

Tez çalışmasında teori ve simülasyonlar ile incelenen alt harmonik akım ve gerilim ile periyodik olmayan akım ve gerilim güç kalitesi problemleri, bu tip problemlerin laboratuvar ortamında oluşturulmasındaki zorluklar nedeniyle deneysel olarak incelenememiştir. Ancak ayrıntılı simülasyonlar ile genelleştirilmiş aktif olmayan

güç teorisi ile denetlenen 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin bu problemleri de etkin bir şekilde çözebildiği açıkça gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile hem şebekeden hem de yükten kaynaklanan güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde kullanılabilen 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiş simülasyon ve deneyler ile başarımları doğrulanmıştır. Ayrıca geliştirilen denetim ve anahtarlama teknikleri ile ultra-kapasitör kullanılarak gerçekleştirilen deneysel uygulamalarla literatüre yenilik getirilerek yeni teknolojiler geliştirilmiştir.

İleriki çalışmalarda, bu tez çalışmasında 3-faz 4-telli besleme sisteminde 110 V faz-nötr gerilimine göre tasarlanarak laboratuvar test platformu kurulan 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemlerinin 220 V faz-nötr nominal gerilim düzeyinde test edilmesine yönelik çalışmalara devam edilmesi planlanmaktadır. Böylece BSPAF sistemi gibi ileri teknolojik bir ürünün dağıtım sisteminde ve endüstriyel tesislerde kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

DSPACE kontrol geliştirme donanımı ile gerçek zamanlı denetimi yapılan 3-faz 3-kollu 4-telli ve 4-kollu 4-telli BSPAF sistemi test platformları için farklı denetim ve anahtarlama algoritmalarının geliştirilmesi ve yeni tekniklerin test edilmesi oldukça kolay hale geldiğinden gelecek dönemlerde de yeni çalışmalara devam edilmesi mümkün olacaktır.

BSPAF sisteminin güç katında çok seviyeli eviriciler kullanarak sistemin anahtarlama kayıplarının azaltılmasının ve kompanzasyondan sonra kaynak akım ve yük gerilim THB değerlerinde daha fazla iyileşme sağlanmasının araştırılması önerilmektedir.

4-kollu 4-telli BSPAF sisteminin DA-barasına ultra-kapasitör bankalarının yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar generatörleri, güneş panelleri) bağlanmasıyla şebekede oluşan kısa süreli gerilim çökmesi ve gerilim kesintileri önlenerek, özellikle endüstriyel tesislerin üretim kayıpları ve hassas tüketicilerin devreden çıkmasına neden olan bozucu etkiler azaltılmış olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Benysek, G., "Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy Using Power Electronics Systems", *Springer-Verlag Press*, 2-5, (2007).
- [2] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W., "Electrical Power Systems Quality", *McGraw-Hill*, 2nd Edition, (2002).
- [3] Ewald F.F., Mohammad A.S.M., "Power Quality in Electrical Machines and Power Systems", *Academic Press*, (2008).
- [4] Grady, W.M., Santoso, S., "Understanding Power System Harmonics", *IEEE Power Engineering Review*, 21, 11, 8-11, (2001).
- [5] Vedam, R.S., Sarma, M.S., "Power Quality Var Compensation in Power Systems", *CRC Press*, 1-5, (2009).
- [6] Moreno, A.M., "Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment", *Springer-Verlag Press*, 1-3, (2007).
- [7] Ward, D.J., "Power Quality and the Security of Electricity Supply", *Proceedings of the IEEE*, 89, 12, 1830-1836, (2001).
- [8] IEEE Std. 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, (1995).
- [9] IEEE Std. 100, The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, (1992).
- [10] Hanzelka, Z., Bien, A., "Power Quality Application Guide: Harmonics Interharmonics", *Copper Development Association*, (2004).
- [11] IEEE Interharmonics Task Force, Cigre 36.05/CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group, "Interharmonic in Power Systems", (1997).
- [12] Arthur, R., Shanahan, R.A., "Neutral Currents in Three Phase Wye Systems", *Power Systems Engineering Data, Bulletin 0104ED9501R8/96, Square D*, Oshkosh, Wisconsin, (1996).
- [13] Watanabe, E.H., Aredes, M., "Compensation of Nonperiodic Currents Using the Instantaneous Power Theory", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 994-999, (2000).

- [14] Gunther, E.W., "Interharmonics in Power Systems", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2, 813-817, (2001).
- [15] Tolbert, L.M., Xu, Y., Chen, J., Peng, F.Z, Chiasson, J.N., "Compensation of Irregular Currents With Active Filters", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1278-1283, (2003).
- [16] Czarnecki, L.S., "Non-Periodic Currents: Their Properties, Identification and Compensation Fundamentals", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 971-976, (2000).
- [17] Salor, O., Gultekin, B., Buhan, S., Boyrazoglu, B., Inan, T., Atalik, T., Acik, A., Terciyanli, A., Unsar, O., Altintas, E., Akkaya, Y., Ozdemirci, E., Cadirci, I., Ermis, M., "Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46, 1, 60-80, (2010).
- [18] ITIC (CBEMA) Curve Application Note, *Information Technology Industry Council*, (2000).
- [19] IEEE Std. 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, (1992).
- [20] Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, *EPDK*, 20.06.2007 tarihli ve 26558 sayılı Resmi Gazete, (2007).
- [21] Moran, S., "A Line Voltage Regulator/Conditioner for Harmonic Sensitive Load Isolation", *IEEE IAS Annual Meeting*, 947-951, (1989).
- [22] Gyugyi, L., "A Unified Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 139, 4, 323-331, (1992).
- [23] Kamran, F., Habetler, T.G., "Combined Deadbeat Control of a Series Parallel Converter Combination Used as a Universal Power Filter", *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 196-201, (1995).
- [24] Akagi, H., "New Trends in Active Filters for Power Conditioning", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32, 6, 312-322, (1996).
- [25] Ghosh, A., Ledwich, G., "A Unified Power Quality Conditioner (UPQC) for Simultaneous Voltage and Current Compensation", *Electric Power Systems Research*, 59, 55-63, (2001).
- [26] Haque, M.T., Ise, T., Hosseini, S.H., "A Novel Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner (UPQC)", *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, Cairns, Australia, 1, 94-98, 23-27 June, (2002).

- [27] Monteiro, L.F.C., Aredes, M., Neto, J.A.M., “A Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, 391-396, Rio de Janeiro, Brazil, 9-11 June, (2003).
- [28] Aredes, M., Neto, J.A.M., Ferreira, J.C.C., Monteiro, L.F.C., Fernandes, R.M., Siqueira, M.J.V., “A Simplified Control Strategy for a Unified Power Quality Conditioner Prototype”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 2592-2597, (2005).
- [29] Han, B., Bae, B., Kim, H., Baek, S., “Combined Operation of Unified Power-Quality Conditioner With Distributed Generation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21, 330-338, (2006).
- [30] Forghani, M., Afsharnia, S., “Online Wavelet Transform-Based Control Strategy for UPQC Control System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22, 481-491, (2007).
- [31] Basu, M., Das, S.P., Dubey, G.K., “Comparative Evaluation of Two Models of UPQC for Suitable Interface to Enhance Power Quality”, *Electric Power Systems Research*, 77, 821-830, (2007).
- [32] Djeghloud, H., Benalla, H., Bentounsi, A., “Supply Current and Load Voltage Distortions Suppression Using the Unified Power Quality Conditioner”, *5th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices, SSD*, 1-6, (2008).
- [33] Basu, M., Das, S.P., Dubey, G.K., “Investigation on the Performance of UPQC-Q for Voltage Sag Mitigation and Power Quality Improvement at a Critical Load Point”, *IET Generation Transmission Distribution*, 2, 3, 414-423, (2008).
- [34] Aredes, M., “Active Power Line Conditioners”, Ph.D. Dissertation, *Technischen Universitat*, Berlin, (1996).
- [35] Aredes, M., Klemens, H., Watanabe, E. H., “An Universal Active Power Line Conditioner”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13, 2, (1998).
- [36] Faranda, R., Valade, I., “UPQC Compensation Strategy and Design Aimed at Reducing Losses”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, 4, 1264-1270, (2002).
- [37] Silva, S.A.O., Donoso-Garcia, P., Cortizo, P.C., Seixas, P.F., “A Line-interactive UPS System Implementation With Series-Parallel Active Power-Line Conditioning for Three-Phase, Four-Wire Systems”, *Electrical Power and Energy Systems*, 26, 399-411, (2004).
- [38] Fan, N., Wong, M.C., Han, Y.D., “Analysis and Control of UPQC and its DC-Link Power by Use of p-q-r Instantaneous Power Theory”, *1st International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China, 43-53, (2004).



- [39] Li, X., Zhu, G., Duan, S., Chen, J., “Control Scheme for Three-Phase Four-Wire UPQC in a Three-Phase Stationary Frame”, *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, Taipei, Taiwan, 1732-1736, (2007).
- [40] Axente, I., Basu, M., Conlon, M.F., Gaughan, K., “Protection of Unified Power Quality Conditioner Against the Load Side Short Circuits”, *IET Power Electronics*, 3, 4, 542-551, (2010).
- [41] Axente, I., Ganesh, J.N., Basu, M., Conlon, M.F., Gaughan, K., “A 12-kVA DSP-Controlled Laboratory Prototype UPQC Capable of Mitigating Unbalance in Source Voltage and Load Current”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25, 6, 1471-1479, (2010).
- [42] Amini, J., “Novel UPQC Use Power Acceptability Curve in Voltage Disturbance Detection Intended for Losses Reduction”, *2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE*, 5, 77-82, (2010).
- [43] Chen, G., Chen, Y., Sanchez, L.F., Smedley, K.M., “Unified Power Quality Conditioner for Distribution System Without Reference Calculations”, *4th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC*, Xi’an, China, 1201-1206, (2004).
- [44] Khadkikar, V., Chandra, A., “A Novel Structure for Three-Phase Four-Wire Distribution System Utilizing Unified Power Quality Conditioner (UPQC)”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, 5, 1897-1902, (2009).
- [45] Ji, J., Kim, J., Sui, S., Kim, H., “A Novel Three-Phase Line-interactive UPS System With Parallel-Series Active Power-Line Conditioning Capabilities Using AC Line Reactor”, *IEEE IAS Annual Meeting*, 1861-1866, (2004).
- [46] Segura, A. N., Aguilar, G. M., “Four Branches Inverter Based Active Filter for Unbalanced 3-Phase 4-Wires Electrical Distribution Systems”, *IEEE IAS Annual Meeting*, Rome, Italy, 2503-2508, (2000).
- [47] Chen, G., Chen, Y., Smedley, K.M., “Three-Phase Four-Leg Active Power Quality Conditioner Without References Calculation”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, 587-593, (2004).
- [48] Haichun, L., Zhihui, D., Shaojun, X., “A Novel Hybrid Current Control Strategy Applied in Three-Phase Four-Leg APF”, *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC*, 2365-2370, (2009).
- [49] Singh, B., Adya, A., Mittal, A.P., Gupta, J.R.P., “Modeling and Control of DSTATCOM for Three-Phase, Four-Wire Distribution Systems”, *Industry Applications Conference, IAS*, 4, 2428-2434, (2005).
- [50] George, V., Mishra, M.K., “Design and Analysis of User-Defined Constant Switching Frequency Current Control Based Four-Leg DSTATCOM”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24, 9, 2148-2158, (2009).

- [51] Vilathgamuwa, D.M., Wijekoon, H.M., “Mitigating Zero Sequence Effects in Dynamic Voltage Restorers”, *Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 3079-3085, (2007).
- [52] Naidu, S.R., Fernandes, D.A., “Dynamic Voltage Restorer Based on a Four-Leg Voltage Source Converter”, *IET Generation Transmission Distribution*, 3, 5, 437-447, May (2009).
- [53] Han, B., Bae, B., Kim, H., Baek, S., Jang, G., “New Configuration of UPQC for Medium-Voltage Application”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21, 3, (2006).
- [54] Geethalakshmi, B., Dananjayan, P., “Investigation of Performance of UPFC Without DC Link Capacitor”, *Electric Power Systems Research*, 78, 4, 736-746, (2007).
- [55] Fujita, H., Akagi, H., “The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13, 2, (1998).
- [56] Elmitwally, A., Abdelkader, S., El-kateb, M., “Universal Power Quality Manager With a New Control Scheme”, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 147, 3, 183-189, (2000).
- [57] Elnady, A., El-khattam, W., Salama, M.M.A., “Mitigation of AC Arc Furnace Voltage Flicker Using the Unified Power Quality Conditioner”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, USA, 735-739, (2002).
- [58] Graovac, D., Katic, V., Rufer, A., “Power Quality Problems Compensation With Universal Power Quality Conditioning System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22, 2, (2007).
- [59] Esfandiari, A., Parniani, M., Emadi, A., Mokhtari, H., “Application of the Unified Power Quality Conditioner for Mitigating Electric Arc Furnace Disturbances”, *International Journal of Power and Energy Systems*, 28, 4, 364-371, (2008).
- [60] Tolbert, L.M., Habetler, T.G., “Survey of Active and Non-Active Power Definition”, *IEEE International Power Electronics Congress, CIEP*, Acapulco Mexico, (2000).
- [61] Montano, J.C. Salmeron, P., “Instantaneous and Full Compensation in Three-Phase Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13, 4, 1342-1347, (1998).
- [62] Akagi, H., “Active Filters and Energy Storage Systems Operated Under Non-Periodic Conditions”, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 965-970, (2000).

- [63] Farghal, S.A., Kandil, M.S., Elmitwally, A., “Evaluation of a Shunt Active Power Conditioner With a Modified Control Scheme Under Nonperiodic Conditions”, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 149, 6, 726-732, (2002).
- [64] Xu, Y., Tolbert, L.M., Peng, F.Z., Chiasson, J.N., Chen, J., “Compensation-Based Non-Active Power Definition”, *IEEE Power Electronics Letters*, 1, 2, 45-50, (2003).
- [65] Xu, Y., Tolbert, L.M., Chiasson, J.N., Campbell, J.B., Peng, F.Z., “A Generalised Instantaneous Non-Active Power Theory for STATCOM”, *IET Electric Power Applications*, 853-861, (2007).
- [66] Byung, M.H., Bae, B., “Unified Power Quality Conditioner With Supercapacitor for Energy Storage”, *European Transactions on Electrical Power*, 18, 327-343, (2008).
- [67] Ortuzar, M.E., Carmi, R.E., Dixon, J.W., Moran, L., “Voltage-source Active Power Filter Based on Multilevel Converter and Ultracapacitor DC Link”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53, 2, 477-485, (2006).
- [68] Molina, M.G., Mercado, P.E., “Dynamic Modeling and Control Design of DSTATCOM With Ultra-Capacitor Energy Storage for Power Quality Improvements”, *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES*, 1-8, (2008).
- [69] Srithorn, P., Sumner, M., Yao, L., Parashar, R., “A STATCOM With Supercapacitors for Enhanced Power System Stability”, *4th IET Conference on Power Electronics Machines and Drives, PEMD*, 96-100, (2008).
- [70] Parkhideh, B., Bhattacharya, S., Chong, H., “Integration of Supercapacitor With STATCOM for Electric Arc Furnace Flicker Mitigation”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 2242-2247, (2008).
- [71] Abbey, C., Joos, G., “Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43, 3, 769-776, (2007).
- [72] Allegre, A., Bouscayrol, A., Delaure, P., Barrade, P., Chattot, E., El-Fassi, S., “Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, doi: 10.1109/TIE.2010.2044124, (2010).
- [73] Kim, S.M., Sul, S.K., “Control of Rubber Tyred Gantry Crane With Energy Storage Based on Supercapacitor Bank”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21, 5, 1420-1427, (2006).
- [74] Emadi, A., Nasiri, A., Bekiarov, S.B., “Uninterruptible Power Supplies and Active Filters”, *New York, CRC Press*, 73-111, (2005).

- [75] Akagi, H., Watanabe, E.H., Aredes, M., “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning”, *IEEE Press*, (2007).
- [76] Amaç, A.E., “Yeni Aktif Filtre Topolojileri Kullanılarak Akım ve Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması ve Kesintisiz Güç Kaynağı Sistemlerine Uygulanması”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2003).
- [77] Bayındır, K.Ç., “Modeling of Custom Power Devices”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2006).
- [78] Hava, A.M., Şentürk, O.S., “Yük ve Şebeke Dostu Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisinin Yapısı, İşlevleri, Güç Akışı ve Güç Kalitesinin Denetimi”, *II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, Kocaeli, 99-104, 17-18, Mayıs, (2007).
- [79] Hava, A.M., Şentürk, O.S, Özkaya, H., Uslu, M. “Üç Fazlı 10 kVA Birleşik Güç Kalite Düzelticisinin Geliştirilmesi”, *Proje Sonuç Raporu, Proje No: 104E141*, Ankara, Mart, (2008).
- [80] Hava, A. M., Şentürk, O. S., “Yük Akım Harmoniklerinin ve Şebeke Gerilim Çökmelerinin Birleşik Güç Kalitesi Düzelticiyle Düzeltimi”, *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, ELECO*, 26-30 Kasım 2008, Bursa, 321-325, (2008).
- [81] Kesler, M., Özdemir, E., “Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC) Denetim Algoritmasının Geliştirilmesi ve PSIM Ortamında Simülasyonu”, *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, ELECO*, 26-30 Kasım 2008, Bursa, 301-305, (2008).
- [82] Kesler, M., Özdemir, E., Karabacak, M., “Şebeke Gerilim ve Yük Akım Harmoniklerinin Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi ile Düzeltimi”, *3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, İzmit, 21-22 Mayıs 2009, 291-296, (2009).
- [83] Kesler, M., Ozdemir, E., “A Novel Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC) Under Non-Ideal Mains Voltage and Unbalanced Load Conditions”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, 21-25 February 2010, Palm Springs CA, 374-379, (2010).
- [84] Kesler, M., “Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisinin Senkron Referans Yapı Tabanlı Uygulama Tasarımı ve Analizi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2010).
- [85] Şentürk, O.S., “Series Active Filter Design, Control, and Implementation With A Novel Load Voltage Harmonic Extraction Method”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).

- [86] Özkaya H., “Parallel Active Filter Design, Control, and Implementation”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
- [87] Çetin, A. “Design and Implementation of a Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering”, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
- [88] Kale, M., “Paralel Aktif Güç Filtresi için Yeni Bir Denetim Yönteminin Geliştirilmesi ve Gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2009).
- [89] Uçak, O., “Design and Implementation of a Voltage Source Converter Based Hybrid Active Power Filter”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
- [90] Kocabaş, İ., “10kVA Gücünde DSP (Digital Signal Processor) Tabanlı Gerilim Kaynaklı Aktif Güç Filtresi Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
- [91] Peng, F.Z., “Application Issues of Active Power Filters”, *IEEE Industry Applications Magazine*, 21-30, September, (1998).
- [92] Singh, B., Al-Haddad, K., Chandra, A., “A Review of Active Power Filters for Power Quality Improvement”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45, 5, 960-971, (1999).
- [93] Habrouk, M.E., Darwish, M.K., Mehta, P., “Active Power Filters: A Review”, *IEE Proceedings Electrical Power Applications*, 147, 5, 403-413, (2000).
- [94] Khadkikar, V., Chandra, A., Barry, A.O., Nguyen, T.D., “Analysis of Power Flow in UPQC During Voltage Sag and Swell Conditions for Selection of Device Ratings”, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE*, 867-872, May, (2006).
- [95] Xu, Y., “A Generalized Instantaneous Nonactive Power Theory for Parallel Nonactive Power Compensation”, Ph.D. Thesis, *University of Tennessee*, Knoxville, May, (2006).
- [96] Fryze, S., “Active, Reactive, and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems”, *Przeglad Elektrot.*, 7, 193-203, (1931).
- [97] Kusters, N.L., Moore, W.J.M., “On the Definition of Reactive Power Under Non-Sinusoidal Conditions”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-99*, 1845-1854, (1980).
- [98] Willems, J.L., “A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Non-Sinusoidal Three-Phase Situations”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41, 523-527, (1992).

- [99] Rossetto, L., Tenti, P., “Evaluation of Instantaneous Power Terms in Multi-Phase System: Techniques and Applications to Power-Conditioning Equipment”, *European Transactions on Electrical Power, ETEP*, 4, 469-475, (1994).
- [100] Peng, F.Z., Lai, J.S., “Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45, 293-297, (1996).
- [101] Dai, X., Liu, G., Gretschek, R., “Generalized Theory of Instantaneous Reactive Quantity for Multiphase Power System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19, 965-972, (2004).
- [102] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components”, *IEEE Transactions on Industry Applications, IA-20*, 625-631, (1984).
- [103] Czarnecki, L.S., “On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power  $p-q$  Theory”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19, 828-836, (2004).
- [104] Kim, H., Blaabjerg, F., Bak-Jensen, B., Choi, J., “Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r Theory”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, 701-710, (2002).
- [105] Depenbrock, M. “The FBD Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 8, 381-387, (1993).
- [106] Enslin, J.H.R., Van Wyk, J.D., “Measurement and Compensation of Fictitious Power Under Nonsinusoidal Voltage and Current Conditions”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 37, 403-408, (1988).
- [107] Ferrero, A., Superti-Furga, G., “A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems Under Non-Sinusoidal Conditions”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 40, 568-577, (1991).
- [108] Nabae, A., Tanaka, T., “A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11, 3, 1238-1243, (1996).
- [109] Peng, F.Z., Tolbert, L.M., Qian, Z., “Definitions and Compensation of Non-Active Current in Power Systems”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, Cairns, Australia, 1779-1784, (2002).
- [110] Peng, F.Z., Tolbert, L.M., “Compensation of Non-Active Current in Power Systems-Definitions from Compensation Standpoint”, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, Washington, 983-987, (2000).

- [111] Ucar, M., Ozdemir, S., Ozdemir, E., “A Combined Series-Parallel Active Filter System Implementation Using Generalized Non-Active Power Theory”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE APEC*, 21-25 February 2010, Palm Springs CA, 367-373, (2010).
- [112] Malesani, L., Mattavelli, P. Tomasin, P., “High-Performance Hysteresis Modulation Technique for Active Filters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12, 5, 876-884, (1997).
- [113] Tolbert, L., Xu, Y., Peng, F.Z., Chen J., Chiasson J., “Definitions for Non-Periodic Current Compensation”, *10th European Conference on Power Electronics and Applications*, EPE in Toulouse, France, September 2-4, (2003).
- [114] Hava, A.M., Şentürk, O., Meşe, H., “Basit Yapılı 3-SSR’li Bir Şebeke Gerilim Çökmesi Üreteci”, *3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, 21-22 Mayıs, Kocaeli, 66-70, (2009).
- [115] DSPACE GmbH, “Catalog 2008”, Paderborn, Germany, (2008).
- [116] DSPACE GmbH, “ControlDesk Experiment Guide for ControlDesk 3.2”, Release 6.2, Germany, (2008).
- [117] Holmes, D.G., Lipo, T.A., “Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice”, John Wiley & Sons, Inc., (2003).
- [118] Rajendra, R.S., Mukul, C.C., “A Multifunctional Four-Leg Grid-Connected Compensator”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, 1, 249-259, (2009).
- [119] Quinn, C.A., Mohan, N., “Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase Four-Wire Systems With Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, Boston, Massachusetts, USA, February 23-27, (1992).
- [120] Gruz, T.M., “A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26, 4, July/August, 719-725, (1990).
- [121] Zhang, R., Prasad, V.H., Boroyevich, D., Lee, F.C., “Three-dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, 3, 314-326, (2002).
- [122] Kim, J.H., Sul, S.K., “A Carrier-based PWM Method for Three-Phase Four-Leg Voltage Source Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19, 1, 66-75, (2004).
- [123] Zhang, R., Prasad, V.H., Boroyevich, D., Lee, F.C., “Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, 314-325, (2002).

[124] Thounthong, P., Davat, B., Raeli S., “Drive Friendly: Fuel Cell/Super Capacitor, Hybrid Power Sources of Future Automotive Power Generation”, *IEEE Power & Energy Magazine*, 69-76, (2008).

[125] Wei, H., Xin, W. Jiahuan, G., Jianhua, Z., Jingyan, Y., “Discussion on Application of Super Capacitor Energy Storage System in Microgrid”, *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN*, 1-4, (2009).

[126] Maxwell Technologies, “Voltage Sags; a Little Storage Can Do a Long Way”, *White Paper*, (2009).



## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

1. **Ucar, M.**, Ozdemir, S., Ozdemir, E., “A Unified Series-Parallel Active Filter System For Non-Periodic Disturbances”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, doi:10.3906/elk-1006-472, (2010), (Kabul edildi).
2. **Uçar, M.**, Özdemir, Ş., Özdemir, E., “Elektrik Güç Kalitesi Düzeltimi İçin Birleşik Seri Paralel Aktif Filtre Sistemi Geliştirilmesi”, *Ar-Ge Proje Pazarı 2010*, Kocaeli Üniversitesi, (Poster), Nisan, (2010).
3. **Ucar, M.**, Ozdemir, S., Ozdemir, E., “A Combined Series-Parallel Active Filter System Implementation Using Generalized Non-Active Power Theory”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, 21-25 February 2010, Palm Springs CA, 367-373, (2010).
4. **Uçar, M.**, Özdemir, Ş., “Periyodik Olmayan Koşullarda Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi Temelli Kompanzasyon”, *3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, 21-22 Mayıs, Kocaeli, 164-169, (2009).
5. **Ucar, M.**, Ozdemir, S., Ozdemir, E., “A Control Strategy for Combined Series-Parallel Active Filter System Under Non-Periodic Conditions”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ*, 14-17 Valencia, Spain, April, (2009).
6. **Uçar, M.**, Özdemir, Ş., Özdemir, E., “Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi ile Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre Sisteminin Denetimi”, *Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, ELECO*, 26-30 Kasım 2008, Bursa, 306-310, (2008).
7. **Uçar, M.**, Özdemir, Ş., “Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre Parametrelerinin Genetik Algoritma Kullanılarak Optimizasyonu”, *Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, BMYS*, Eskişehir, 15-17 Ekim, 721-726, (2008).
8. **Uçar, M.**, Özdemir, Ş., “Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre ile 3-Fazlı 4-Telli Sistemlerde Güç Kalitesi Düzeltimi”, *Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu, UMES*, Kocaeli, 238-242, (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet UÇAR, 1978 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden 2002 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak birincilikle mezun oldu. 2002-2005 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2002-2010 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 2010 yılı Eylül ayından itibaren Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksek Okulu Elektrik programında Öğretim Görevlisi olarak görev yapmakta olup, evlidir.