

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN BESLENEN
SİSTEMLERDE KULLANILAN İNVERTER DEVRESİNİN
VERİMİNİN ARTTIRILMASINA YÖNELİK DEVRE TASARIMI**

HAKAN AKÇA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. UĞUR SAVAŞ SELAMOĞULLARI**

İSTANBUL, 2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN BESLENEN
SİSTEMLERDE KULLANILAN İNVERTER DEVRESİNİN
VERİMİNİN ARTTIRILMASINA YÖNELİK DEVRE TASARIMI**

HAKAN AKÇA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALİ
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. UĞUR SAVAŞ SELAMOĞULLARI**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN BESLENEN
SİSTEMLERDE KULLANILAN İNVERTER DEVRESİNİN
VERİMİNİN ARTTIRILMASINA YÖNELİK DEVRE TASARIMI

Hakan AKÇA tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilimdalı’da **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan MEŞE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yaşar BİRBİR

Marmara Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2010-04-02-KAP03 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Enerjide dışa bağımlılığı ve fosil yakıt kullanarak çevreye zarar veren elektrik santrallerinin kötü etkilerini azaltmak, çevre dostu enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ile mümkün olmaktadır. Ayrıca bu kaynaklardan elde edilen enerjinin verimli şekilde kullanılması da bu duruma katkı sağlamaktadır. Bu amaçla tezde bir evin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının (yakıt hücresi, güneş enerjisi gibi) kullanılması durumunda elde edilen DA gerilimin, evde ihtiyaç duyulan AA gerilime dönüştürülmesi aşamasında güç dönüşüm sisteminin bir parçası olan inverter devresinin veriminin artırılmasına yönelik bir hibrit anahtar kullanımı incelenmektedir. Artan verim ile kısıtlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı sağlanmaktadır.

Bu çalışmada dijital sinyal kontrol birimi(DSK) kullanılarak bir yarım köprü inverter devresi kurulmuştur. Farklı anahtar(MOSFET, IGBT) modelleri için farklı anahtarlama teknikleri denenmiştir. Bu amaçla, inverter devresinde yaygın olarak kullanılan yarıiletken IGBT yerine IGBT-MOSFET(paralel) hibrit anahtar kullanımı ve bu anahtarların bir DSK ile yardımı ile kontrolü incelenmiştir. Uygun kontrol ile inverter devrelerinde, özellikle düşük güçteki verim arttırılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile verimli bir sistem yapısına ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada her türlü desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. U. Savaş SELAMOĞULLARI'na, çalışmalarında her konuda destek olan değerli hocam Doç.Dr. Erkan MEŞE'ye, her zaman maddi ve manevi desteklerini sürdürerek bana sabır gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2011

Hakan AKÇA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMA LİSTESİ	Vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	Viii
ÇİZELGE LİSTESİ	X
ÖZET	Xi
ABSTRACT.....	Xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
DA/AA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE KONTROL YÖNTEMLERİ.....	7
2.1 Tek Fazlı Kare Dalga İnverterler	8
2.1.1 Yarım köprü kare dalga inverter	8
2.1.2 Tam köprü kare dalga inverter	9
2.2 Tek Fazlı SDGM İnverterler	10
BÖLÜM 3	
DİJİTAL SİNYAL KONTROLÖRLER ve PROGRAMLAMA	14
3.1 eZdspTM F28335'ye Genel Bakış	16
3.2 eZdspTM F28335 Programlama	18
3.2.1 Code composer studio.....	18
3.2.2 Matlab/Simulink model	19
BÖLÜM 4	
İNVERTER DEVRESİNDE HİBRİT ANAHTAR KULLANIMI	21
BÖLÜM 5	
BENZETİM ÇALIŞMALARI	28

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
6.1 Akım Sinyali Geri Besleme Devresi	32
6.2 Gerilim Sinyali Geri Besleme Devresi.....	34
6.3 MOSFET/IGBT Sürücü Devresi	34
6.4 DA/AA Güç Devresi	35
6.5 Filtre Endüktansı ve Kondansatörü Seçimi	36
6.6 DA Bara Kondansatörü	39
6.7 Veri Ölçüm Sistemi	39
6.8 Kod Hazırlama İşlemi	40
6.9 Deneysel Sonuçlar	45

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMA LİSTESİ

DA	Doğru Akım
AA	Alternatif Akım
DA/AA	Doğru Akımdan Alternatif Akıma
AA/DA	Alternatif Akımdan Doğru Akıma
DSİ	Dijital Sinyal İşleyici
DSK	Dijital Sinyal Kontrolör
GND	Toprak
ADD	Analog Dijital Dönüştürücü
DAD	Dijital Analog Dönüştürücü
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SDGM	Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	İnverter blok şeması.....	7
Şekil 2.2	Tek faz yarım köprü inverter.	8
Şekil 2.3	Kare dalga modu çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri [21].....	8
Şekil 2.4	Tek faz tam köprü inverter.	9
Şekil 2.5	Tam köprü inverter kare dalga modu çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri [21].....	9
Şekil 2.6	Sinüs darbe genişlik modülasyonu prensib şeması	11
Şekil 2.7	Sinüs ve üçgen sinyallerin karşılaştırılması.	12
Şekil 2.8	Tam köprü inverter sinüs DGM modu çıkış gerilimi dalga şekilleri.....	12
Şekil 3.1	Mikroişlemci blok diyagramı	15
Şekil 3.2	eZdspTM F28335 kartı.....	16
Şekil 3.3	eZdspTM F28335 blok diyagramı [22]	17
Şekil 3.4	eZdspTM F28335 blok diyagramı [22]	18
Şekil 3.5	Code composer arayüzü [22].....	19
Şekil 4.1	Tipik bir inverter devresine ait verim eğrisi [19]	21
Şekil 4.2	Bir evdeki günlük elektrik güç talebine ait histogram (Güç ölçümleri 100 ms aralıklarla alınmıştır) [19]	22
Şekil 4.3	Bir ev için olası en kötü yüklenme durumuna ait güç zaman grafiği [19]	23
Şekil 4.4	Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması	24
Şekil 4.5	(a) Yarım köprü inverter devresi (b) Önerilen hibrit anahtar	25
Şekil 4.6	DA/AA dönüştürücü blok diyagramı	27
Şekil 5.1	Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması	29
Şekil 5.2	MOSFET-IGBT yarıiletken anahtarlı hibrit DA/AA evirici.....	29
Şekil 5.3	Benzetim çalışmalar sonucu elde edilen Verim-Güç grafiği.....	30
Şekil 6.1	Deney devresi blok diyagramı.....	32
Şekil 6.2	LAX 100 np ve bağlantı şeması	33
Şekil 6.3	Analog işaret bindirme devresi.....	33
Şekil 6.4	Amveco gerilim sensörü ve iç yapısı.....	34
Şekil 6.5	DSK'dan gelen sinyalin izole edilmesi	35
Şekil 6.6	IGBT, MOSFET sürücü kartı	35
Şekil 6.7	DA/AA güç devresi	36
Şekil 6.8	Filtre devresi	36
Şekil 6.9	Bir yarım köprü inverter devresine ait 4400 W yüklenme durumu için Çıkış akım(3) ve gerilim(1) dalga şekilleri[13].	37
Şekil 6.10	LC filtre devresi.....	39
Şekil 6.11	DA bara kondansatörü	39
Şekil 6.12	(a) Akım probu (b) Osiloskop (c) Gerilim probu	40

Şekil 6.13	Deney seti	40
Şekil 6.14	Matlab/Simulink üzerinden DSK için kod üretme akış diyagramı [22]....	41
Şekil 6.15	Kontrol sinyalleri üretmek için kurulan Matlab/Simulink modeli	42
Şekil 6.16	Hibrit anahtarlı inverter devresi.....	42
Şekil 6.17	MOSFET anahtarlandığında MOSFET ve IGBT kapılarına uygulanan sinyaller	43
Şekil 6.18	IGBT anahtarlandığında MOSFET ve IGBT kapılarına uygulanan sinyaller.....	43
Şekil 6.19	MOSFET-IGBT geçişi sırasında anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller	44
Şekil 6.20	IGBT-MOSFET geçişi sırasında anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller	44
Şekil 6.21	%50 akımda anahtar seçimi ve anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller.....	45
Şekil 6.22	%90 akımda anahtar seçimi ve anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller.....	45
Şekil 6.23	Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması	46
Şekil 6.24	(a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (95.92 Ω yük durumunda).....	47
Şekil 6.25	(a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (23.98 Ω yük durumunda).....	48
Şekil 6.26	(a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (13.70 Ω yük durumunda).....	49
Şekil 6.27	(a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (9.69 Ω yük durumunda).....	50
Şekil 6.28	Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen Verim-Güç grafiği	51
Şekil 7.1	Benzetim ve Deneysel çalışmaları sonucu elde edilen Verim-Güç grafikleri.....	53

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Bir evin günlük yük talebinin zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzdeler [19].....	4
Çizelge 4.1	Bir evin günlük yük talebinin zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzdeler [19].....	22
Çizelge 6.1	Şekil 6.24’de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri.....	47
Çizelge 6.2	Şekil 6.25’te verilen grafiklere ait değerler ve verimleri.....	48
Çizelge 6.3	Şekil 6.26’de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri.....	49
Çizelge 6.4	Şekil 6.27’de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri.....	50

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDAN BESLENEN SİSTEMLERDE KULLANILAN İNVERTER DEVRESİNİN VERİMİNİN ARTTIRILMASINA YÖNELİK DEVRE TASARIMI

Hakan AKÇA

Elektrik Mühendisliği Anabilimdalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

Tez çalışmasında bir evin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının (yakıt hücresi, güneş panelleri gibi) kullanılması durumunda elde edilen DA gerilimin, evde ihtiyaç duyulan AA gerilime dönüştürülmesi aşamasında güç dönüşüm sisteminin bir parçası olan inverter devresinin veriminin artırılmasına yönelik bir hibrit anahtar kullanımı incelenecektir. Her ne kadar böyle bir sistemde kullanılacak inverter devresi karşılanması gereken maksimum güç dikkate alınarak tasarlansa da, bir evin elektrik yük talebinin gün boyunca değişkenliği de inverter devresinin tasarımında ve kontrolünde dikkate alınmalıdır.

Bir eve ait deneysel olarak elde edilmiş elektriksel yük profili incelendiğinde, evin elektrik talebinin gün boyunca geniş bir aralıkta değiştiği ve 0-500 W aralığındaki yük talebinin, günlük talebin %85'ini oluşturduğu görülmüştür. Bunun yanında, bir inverter devresinin tipik verim eğrisi incelendiğinde: verimin belli bir aralıkta maksimum olduğu, fakat düşük ve yüksek güç bölgelerinde maksimum verimden daha düşük olduğu görülmektedir. Evin elektrik ihtiyacının büyük bir bölümü düşük güç bölgesinde olduğundan inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki veriminin artırılması büyük miktarda enerji kazanımı sağlayacaktır.

İnverter devrelerinde yaygın olarak kullanılan IGBT anahtarının yerine paralel bağlı IGBT-MOSFET anahtar (hibrit anahtar) kullanımı ve bu hibrit anahtarın anlık yük akımı geri beslemeli kontrolü ile inverter devresinin veriminin artırılacağı öngörülmektedir. MOSFET anahtarının IGBT anahtarından daha hızlı kesime gidebilmesi (turn-off) ve düşük akım değerlerinde iletim kayıplarının IGBT anahtarı iletim kayıplarından daha düşük olmasından dolayı inverter devresinin özellikle düşük güçlerde veriminin artırılabilmesi öngörülmektedir.

Verim artışı sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha etkin bir şekilde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, MOSFET, IGBT, hibrit anahtar (paralel IGBT-MOSFET), düşük güçlerde verimlilik

ABSTRACT

A NEW CIRCUIT DESIGN AND CONTROL TO IMPROVE EFFICIENCY OF A POWER INVERTER USED IN A RENEWABLE ENERGY SUPPLIED SYSTEMS

Hakan AKÇA

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Uğur Savaş SELAMOĞULLARI

This thesis aims to investigate a hybrid switch to improve the efficiency of an inverter circuit used in power conditioning systems that are designed to transform DC energy from renewable energy sources (fuel cells, solar systems, etc) to AC energy used in a residential house. Although the inverter circuit that is employed in such a system must be designed for peak power requirements, the variability of the daily load demand should also be considered in the design and control stage.

Experimentally measured daily load profile reveals that the residential electrical load demand varies within a wide range. The power demand between 0-500 W constitutes 85% of the daily load demand. When a typical efficiency curve of an inverter is examined it can be seen that the efficiency is around maximum for some power range while it is lower both at low power range and at high power range compared to maximum efficiency.

The low efficiency at light loads becomes a very important problem considering that the load demand stays low most of the time during a day in a stand-alone house. It is clear that increasing the inverter efficiency specially at light loads will provide considerable energy savings. With the increased inverter efficiency, the energy obtained from renewable energy sources will be utilized more efficiently. The commonly used switching component in inverter circuits are IGBTs. Here, a parallel IGBT-MOSFET switch combination (hybrid switch) is going to be used and the load current feedback will be employed to increase the inverter efficiency. Since MOSFETs are faster during

turn-off period compared to IGBTs and they have lower conduction losses at low currents compared to IGBTs, it is possible to increase the inverter efficiency. Renewable energy sources can be used more efficiently with the increased efficiency.

Key words: Renewable energy sources, MOSFET, IGBT, hybrid switch, light load efficiency

1.1 Literatür Özeti

Tezde inverter devresinin verimini artırmaya yönelik olarak önerilen hibrit anahtar, literatürde IGBT anahtarının kesime giderken meydana gelen anahtarlama kayıplarını (turn-off losses) azaltmak için önerilmiştir [1], [2]. Hofmann ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada MOSFET'ler basit bir direnç olarak, IGBT'ler ise direnç ve gerilim kaynağı olarak modellenmiştir. Bu çalışmada IGBT-MOSFET ve MOSFET-MOSFET anahtarlarının paralel bağlanması ile iki paralel çalışma şartı incelenmiştir. Kontrol algoritması olarak ilk anda iki anahtar aynı anda ilettime, kesim işlemi için ise öncelikle IGBT kesime, ardından MOSFET kesime sokulmuştur. Bu çalışma şartlarında elde edilen sonuçlara bakıldığında IGBT'nin kuyruk akımından kaynaklanan kesime girme güç kaybı azaltılmıştır. Ayrıca anahtarlar üzerinde paralel çalışma sırasında akım paylaşımının nasıl olduğu incelenmiştir [2]. Bu çalışmalarda her iki anahtar da iletimde iken IGBT anahtarı MOSFET anahtarına göre daha önce iletimden çıkarılarak IGBT anahtarının sıfır gerilim şartları altında kesime gitmesi sağlanmıştır. Paralel olarak kullanılan MOSFET anahtarı bu aralıkta tüm yük akımını taşımış ve böyle bir çalışma için gerekli kapı sürme devreleri oldukça karmaşık hale gelmiştir [1], [2].

Koerst ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada MOSFET ve IGBT'lerin paralel olarak kullanılması ile elde edilen bazı avantajlar incelenmiştir. IGBT'lerin iletim kayıplarının, MOSFET'lerin ise anahtarlama kayıplarının düşük olduğu için bu anahtarlara ait bu özellikler kullanılmaya çalışılmıştır. MOSFET ve IGBT'ler alt ve üst kolda paralel bağlanarak inverter devresi kurulmuştur. İlk anda iki anahtar birlikte ilettime sokulmuş, anahtara bağlı ters akım diyodunun ters toparlanma süresi kadar

beklenmiş ve MOSFET kesime sokulmuştur. İletim durumunda düşük iletim güç kaybı ile sadece IGBT iletimde kalmıştır. Kesime girme işlemi yapılmadan önce kesimde olan MOSFET tekrar iletime sokulmuştur. IGBT ilk olarak kesime sokulmuş, kuyruk akımı düşme süresi kadar beklenmiş ve MOSFET kesime sokulmuştur. Bu şekilde kesime girme işleminde sadece MOSFET'e ait anahtarlama kaybı oluşmuştur. MOSFET kesime sokulduktan sonra akım serbest akım geçiş diyoduna geçmesiyle işlem tamamlanmıştır. Bu şekilde IGBT'nin anahtarlama, MOSFET'in iletim kaybı azaltılmıştır [3].

Dean Liu ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada MOSFET'in yüksek anahtarlama frekansına çıkabilme, IGBTnin ise iletimde düşük güç kaybı özelliğinin kullanılması hedeflenmiştir. Bu iki avantajlı durumun aynı anda kullanılabilmesi için anahtarlar paralel bağlanmıştır. Bu çalışmada MOSFET ve IGBT aynı anda iletime sokularak her iki anahtar iletim konumunda kalmış, kesime sokulurken ise önce IGBT sonrasında MOSFET kesime sokulmuştur. Burada MOSFET daha iyi anahtarlama karakteristiğine sahip olduğu için IGBT önce kesime sokulmuş, IGBTnin içinden geçen akım sıfır oluncaya kadar beklenmiş, bu süre boyunca MOSFET iletimde kalmış ve bu süre sonunda MOSFET kesime sokulmuştur. Bu şekilde kesime girme işlemi sırasında IGBT'nin anahtarlamaındaki düşük performansı sonucu oluşacak güç kaybı azaltılmış, MOSFET'in yüksek anahtarlama performansı sayesinde bu kayıp çok aza düşürülmüştür. Buradaki toparlanma süresi için termistör geri beslemesi kullanılmıştır [4].

Kimball ve Chapman tarafından yapılan çalışmada MOSFET bir direnç olarak modellenirken, IGBT direnç ve gerilim kaynağı olarak modellenmiştir. Bu çalışmada bir yarım köprü inverter için üç farklı anahtar kombinasyonu denenmiştir. Bunlardan ilki üst kolda IGBT alt kolda hızlı bir serbest geçiş diyodu, ikincisi alt ve üst kolda birbirine paralel bağlı IGBT+MOSFET, üçüncüsü ise alt ve üst kolda ikişer adet MOSFET paralel bağlanması ile yapılmıştır. Sonuç olarak hibrit anahtarların iletim kayıpları incelenmiş ve iletim kayıplarının sadece IGBT kullanımı yerine paralel IGBT-MOSFET anahtarı kullanılarak düşürülebileceği gösterilmiştir [5]. Ancak bu çalışmada anahtarlama kayıpları incelenmemiştir.

Marinov ve Valchev tarafından yapılan çalışmada IGBT-MOSFET kombinasyonu kullanılacak inverter devresinde güç kaybının azaltılması üzerinde durulmuştur. İletime girme güç kaybının paralel bağlı anahtarlardan IGBT'ye ait serbest geçiş diyodu ile, kesime girme güç kaybının ise kuyruk akımına sahip olmayan MOSFET ile azaltılabileceği üzerine çalışılmıştır. MOSFET yapısında hızlı olmayan parazitik diyot bulundururken, IGBT'lerde bulunan diyotlar MOSFET diyotlarına göre daha hızlı ve daha kısa toparlanma süresine sahiptir. Anahtarların bu özellikleri kullanmak istenirse iletme girme anında serbest geçiş diyodu olarak IGBT'nin diyodu kullanılacak şekilde bir kontrol algoritması kurulur. Bu şekilde MOSFET'e ait parazitik diyottan kaynaklanan ve IGBT'nin kesime girme sırasındaki oluşan kuyruk akımından kaynaklanan güç kaybı azaltılmış olur. Bu çalışmada tam köprü inverter devresi kullanılmıştır [6].

O'Neill tarafından yapılan çalışmada üretilen SiC MOSFET'lerin performansı incelenmiş ve IGBT performansı ile karşılaştırılmıştır. MOSFET'lerin en büyük handikapının $R_{ds(on)}$ direncinin olduğu bilinmektedir. Yüksek bozulma geriliminde bu direnç yaklaşık olarak V_{ds} bozulma geriliminin karesi ile orantılı olarak artmaktadır. SiC MOSFET'lerde bu direnç değeri düşürülmüş, buna neden olan katmanlar ince hale getirilmiştir. Bu sayede IGBTnin yüksek verimle çalıştığı yüksek güç bölgelerinde SiC MOSFETlerin yüksek daha da yüksek verimle çalıştığı incelemeler sonunda görülmüştür [7]. Fakat bu yarı iletkenlere yeni olduğundan şu an yaygın olarak ulaşılamamaktadır.

Literatürde yakıt hücresi ve güneş enerji tabanlı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen DA çıkış geriliminin evlerde kullanılan AA gerilime dönüştürülmesinde kullanılan güç elektroniği devreleri (DA-DA dönüştürücüler, inverterler) hakkında genel bilgi [8],[9]'da verilmiştir. Bunun yanında literatürde yenilenebilir enerji kaynakları için tasarlanmış birçok güç elektroniği devre topolojilerini bulmak mümkündür. DSİ tabanlı bir kontrol [10], süper kapasitelerin güç dönüştürücü birimde kullanılması [11], yaygın olarak kullanılan DA bara kullanımı yerine bir AA bara kullanılması [12], düşük DA gerilim seviyeli bir SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) yakıt hücresinden 120/240V 60 Hz çıkış elde etmek amacıyla 10 kW'lık inverter tasarımı [13], 1 kVA'lık yakıt hücre tabanlı bir UPS tasarımı [14], yakıt hücreli sistemler için Z-kaynak (Z-source) inverter tasarımı bunlara örnek olarak verilebilir. Bu devrelerde

süper kapasitelerden bir DA link elde edilmiş [15],[16], enerji depolama cihazları olarak bataryalar ve/veya süper kapasiteler kullanılarak transiyent cevabı ve giriş gerilimindeki değişkenlik için çözümler üretilmiştir [11], [13], [17]. Bu çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynaklı bir güç sisteminin giriş tarafına ait karakteristikler yapılan tasarımlarda dikkate alınmıştır. Genel olarak DA-DA dönüştürücülerin çıkışında elde edilen yüksek DA gerilim klasik inverter devreleri kullanılarak istenilen AA gerilime dönüştürülmüştür. Ancak literatürde bir evin yük karakteristiği dikkate alınarak bir inverter tasarımı incelenmemiştir. Bir evin yük karakteristiği oldukça önemlidir ve iyi bir sistem tasarımı için mutlaka dikkate alınmalıdır [18].

Çizelge 1.1’de belirtilen her bir güç aralığındaki güç talebinin gün içinde ne kadar sürdüğü ve buna karşılık gelen yüzde değerleri verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta bir evdeki elektrik güç talebinin 24 saatin yaklaşık 20 saatinde 0–500 W aralığında kaldığıdır. Bu oldukça önemli bir yük karakteristiğidir ve bu yük karakteristiği böyle bir evde kullanılacak inverter devresinin tasarımında dikkate alınmalıdır. Belli bir çalışma gücü için optimize edilmiş bir tasarım, bir ev için uygun bir seçim olmayacaktır. Literatürde yapılan çalışmalarda yükün bu karakteristiği dikkate alınmamıştır.

Çizelge 1.1 Bir evin günlük yük talebinin zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzdelere [19]

Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüzde (%)
$P < 500$	20.40	85.01
$500 \leq P \leq 1000$	0.570	2.36
$1000 \leq P \leq 1500$	2.140	8.91
$1500 \leq P \leq 4500$	0.892	3.72

Tezde önerilen hibrit anahtar kullanımı ve yük akımı geri beslemeli kontrolü ile inverter devresinin verimini artırmaya yönelik tasarım bu açıdan literatüre katkı sağlamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışmasında yenilenebilir (yakıt hücreleri, güneş panelleri gibi) enerji kaynaklarının konutlarda elektrik ihtiyacını karşılamak amacı ile kullanılması durumunda, DA-AA enerji dönüşümünü sağlayan sistemin bir parçası olarak kullanılan inverter devresinin veriminin artırılması hedeflenmektedir.

Yapılan bir çalışmada Amerika’da dört kişilik bir aileye ait bir evde bir gün boyunca yüksek örnekleme (1000 örnek/saniye) oranı ile deneysel olarak elde edilmiş günlük elektriksel güç kullanımı incelendiğinde elektrik talebinin gün boyunca 20 saat civarında 0–500 W aralığında kaldığı tespit edilmiştir[19]. Türkiye’deki bir evin güç talebinin de aynı karakteristiğe sahip olduğu kabul edilmiştir. Yükün bu karakteristiğinin farkına varılarak inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesinde veriminin artırılması oldukça büyük miktarda enerji kazanımı anlamına gelecektir. Daha verimli bir inverter kullanılması ile yakıt hücreli bir güç sisteminde aynı güç talebi daha az hidrojen kullanımı ile karşılanabilir. Benzer şekilde artan verim güneş enerjili bir sistemde daha az PV panel alanı anlamına gelecektir. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde fayda sağlanacaktır. Bu tip sistemler ileride yaygın bir şekilde kullanılacağından, elde edilecek en küçük miktardaki verim artışı bile toplamda büyük miktarda enerji kazanımı anlamına da gelecektir.

1.3 Hipotez

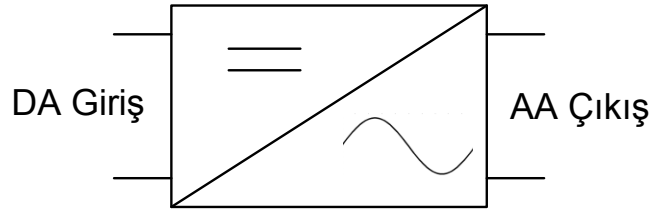
Tez ile yenilenebilir enerji kaynaklarından (yakıt hücresi, güneş panelleri gibi) beslenen evlerde/sistemlerde kullanılan güç dönüşüm birimlerinde yaygın bir şekilde kullanılacak yeni bir inverter tasarımı ve kontrol algoritması geliştirilecektir. İnverter devrelerinde yaygın olarak kullanılan IGBT anahtarı yerine paralel bağlı IGBT-MOSFET hibrit anahtarı kullanılarak ve bu hibrit anahtarın anlık yük akımı geri beslemeli kontrolü ile inverter devresinin özellikle düşük güç bölgesindeki veriminin artırılacağı öngörülmektedir. Artan verim ile aynı miktarda girdi için daha fazla çıktı sağlanabilecektir. Bu daha az fosil yakıt kullanımı anlamına da geleceğinden çevre açısından da katkı sağlanmış olacaktır. Böylece ekonomiye katkı sağlanacaktır.

MOSFET’in yüksek anahtarlama frekansına çıkabilme, IGBTnin ise iletimde düşük güç kaybı özelliklerine sahiptirler. MOSFET düşük yük akımlarında yüksek anahtarlama özelliğinden dolayı yüksek verimlere çıkabilirken. IGBT düşük yük akımlarında MOSFET’e göre daha düşük performans sergilemektedir. Fakat belli bir akımın üstüne çıktığımızda MOSFET’in $R_{ds(on)}$ direncinden kaynaklanan güç kaybından dolayı verim IGBT anahtarın veriminden daha düşük hale gelmektedir. Bu iki anahtar modeli için bahsedilen iki özellik kullanılacak şekilde, anahtarlar paralel bağlanacak ve uygun kontrol algoritması uygulanacaktır. Yeni tasarım ile gelen verim artışı sayesinde

yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji daha verimli olarak kullanılabilir.

DA/AA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE KONTROL YÖNTEMLERİ

İnverterlere ait bazı topoloji ve kontrol yöntemleri ile tezde güç devresini gerçeklemek için kullanılacak topoloji ve kontrol yöntemleri bu bölümde incelenecektir.



Şekil 2.1 İnverter blok şeması

İnverter olarak bilinen, DA gerilimden AA gerilim üreten DA-AA dönüştürücüler ait blok şeması Şekil 2.1’de verilmiştir. Dönüştürücünün çıkış geriliminin genliği ve frekansı ayarlanabilir. Tek faz, üç faz veya daha fazla faz çıkışına sahip olan topolojiler mevcuttur. Elektrik enerjisi genellikle DA terminalden AA terminale doğru akmaktadır, fakat bazı durumlarda bunun tersi de gerçekleşebilir. Girişi DA gerilim kaynağı olan bu tip inverterler gerilim kaynaklı inverterler (GKİ) olarak bilinir. Diğer bir çeşidi ise DA kaynak olarak DA akım kaynağının olduğu akım kaynaklı (AKİ) inverterlerdir [20].

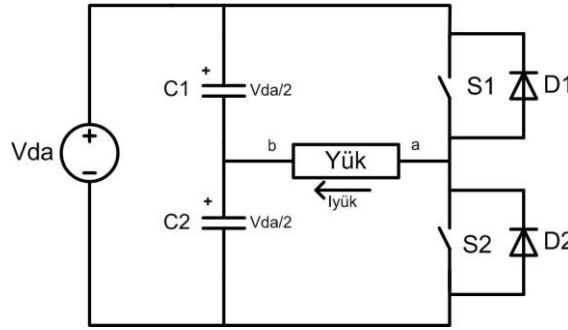
İnverterleri ayrıca kontrol yöntemleri bakımından farklı gruplara ayırabiliriz. En çok kullanılan kontrol yöntemleri kare dalga ve darbe genişlik modülasyonu (DGM) kontrol yöntemleridir. Bu bölümde kare dalga inverterler üzerinde çalışma prensibi açıklanacak ve tezde kullanılan tek fazlı sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) kontrolü, yapılan dönüştürücü üzerinde durulacaktır.

DA/AA dönüştürücüler; ayarlanabilir hız sürücüler, kesintisiz güç kaynakları, statik VAR kompensatörleri, aktif filtreler, yüksek gerilim DA iletim hatları vb. gibi birçok alanda kendine yer bulur.

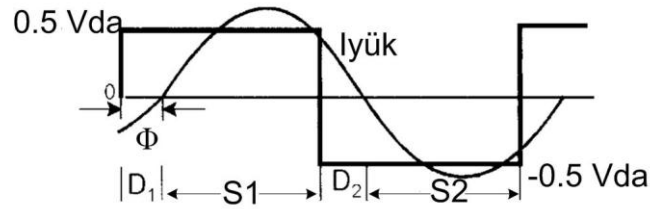
2.1 Tek Fazlı Kare Dalgı İnverterler

2.1.1 Yarım köprü kare dalgı inverter

İnverter örneklerinden birisi de Şekil 2.2’de devre yapısı ve Şekil 2.3’te dalgı şekilleri verilen tek fazlı yarım köprü dönüştürücü devresidir. Dönüştürücü, DA kaynak karşısında birbiri ile seri bağı iki anahtar ve iki kondansatör içermektedir. Yüğü a-b noktaları arasına bağlanmıştır. Ayrıca anahtarların yapısında bulunan veya ayrıca bağlanan diyotlar da gösterilmiştir. S1 ve S2 anahtarları yarı periyodu π olacak şekilde kapatılıp açılarak kare dalgı çıkış gerilimini üretirler [21].



Şekil 2.2 Tek faz yarım köprü inverter.



Şekil 2.3 Kare dalgı modu çıkış gerilim ve akım dalgı şekilleri [21]

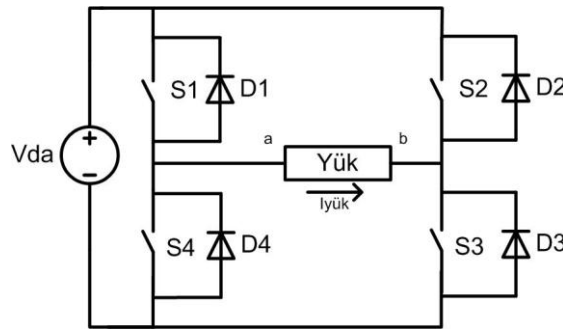
Yükün endüktif karakteristikte olduğu kabul edilirse Şekil 2.3’te verilen gerilim ve akım dalgı şekilleri elde edilir. Akımda endüktif yükten dolayı Φ açısı kadar bir gecikme oluşur. Şekilde S1 ve S2 anahtarları ile D1 ve D2 diyotlarının iletim aralıkları görölmektedir.

S1 anahtarı kapatıldığında a’dan b’ye doğru S1 anahtarı ve C1 kondansatörü üzerinden bir akım akar. S1 kesime sokulunca akmakta olan akım yine aynı yönde D2 ve C2

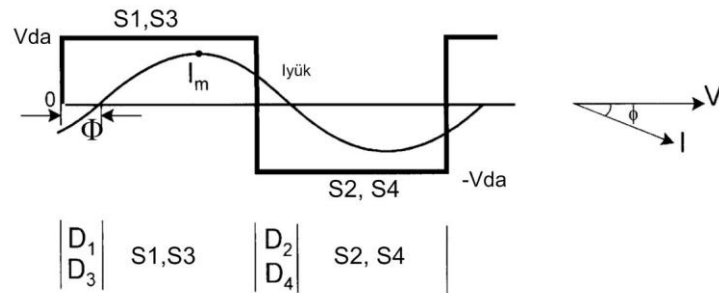
üzerinden sıfır oluncaya kadar akmaya devam eder. Bu şekilde pozitif yarı periyot oluşur. S2 anahtarı iletime sokulursa akımın yönü b'den a'ya doğru olur. S2 anahtarı kesime sokulunca akmakta olan akım yine aynı yönde D1 ve C1 üzerinden sıfır oluncaya kadar akmaya devam eder. Bu şekilde negatif yarı periyot oluşur. Çıkış gerilimin maksimum değeri giriş kaynak geriliminin yarısı olacak şekilde $\pm V_{da}/2$ olacak şekilde değişir.

2.1.2 Tam köprü kare dalga inverter

İki yarım köprü inverter paralel olarak tam köprü inverter oluşturmak için Şekil 2.4'teki gibi bağlanabilir. Tam köprü inverterde DA bara kondansatörlerine gerek yoktur. Yük aynı şekilde a-b noktaları arasına bağlanır. S1-S3 ve S2-S4 anahtar çiftleri çıkışta kare dalga gerilim üretecek şekilde kapatılıp açılır.



Şekil 2.4 Tek faz tam köprü inverter.



Şekil 2.5 Tam köprü inverter kare dalga modu çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri [21]

Yükün endüktif karakteristikte olduğu kabul edilirse Şekil 2.5'te verilen gerilim ve akım dalga şekilleri elde edilir. Akımda endüktif yükten dolayı Φ açısı kadar bir gecikme oluşur. Şekilde S1, S2, S3 ve S4 anahtarları ile D1, D2, D3 ve D4 diyotlarının iletim aralıkları görülmektedir.

S1 ve S3 anahtarları kapatıldığında a'dan b'ye doğru S1 anahtarı ve S3 anahtarı üzerinden bir akım akar. S1 ve S3 kesime sokulunca akmakta olan akım yine aynı yönde D2 ve D4 üzerinden sıfır oluncaya kadar akmaya devam eder. Bu şekilde pozitif yarı periyot oluşur. S2 ve S4 anahtarları kapatıldığında a'dan b'ye doğru S2 anahtarı ve S4 anahtarı üzerinden bir akım akar. S2 ve S4 kesime sokulunca akmakta olan akım yine aynı yönde D1 ve D3 üzerinden sıfır oluncaya kadar akmaya devam eder. Bu şekilde negatif yarı periyot oluşur. Çıkış gerilimin maksimum değeri giriş kaynak geriliminin yarısı olacak şekilde $\pm V_{da}$ olacak şekilde değişir [20].

2.2 Tek Fazlı SDGM İnverterler

Bu gruptaki dönüştürücüleri de yarım ve tam köprü olarak sınıflandırmak mümkündür. Bunların çalışma prensibi önceki başlıklarda anlatılanlar (kare dalga inverter) ile aynıdır. Bu başlıkta darbe genişlik modülasyonu ve bu anahtarlama tekniği kullanılması durumunda elde edilecek akım- gerilim karakteristikleri üzerinde durulacaktır.

İnverterdeki anahtarlama elemanlarının sabit frekans altında doluluk oranının değiştirilerek(duty ratio) çıkış geriliminin genliğinin ayarlanmasını sağlayan kontrol yöntemine Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) denir. Doluluk oranı (D) ayarlanan t_{on} süresinin $T=t_{on}+t_{off}$ periyot süresine oranı anahtar çalışmasındaki darbe periyot oranını belirler aşağıdaki formül ile hesaplanır.

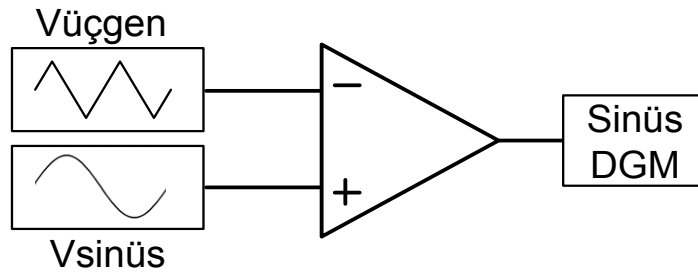
$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.1)$$

Literatürde birçok DGM tekniği vardır. Bunlarla ilgili sınıflandırma aşağıda verilmiştir [21]:

- Sinüzoidal DGM
- Seçilmiş harmonik eliminasyonu DGM
- Minimum dalga akım DGM
- Uzay vektör DGM
- Random DGM

- Histerizis bandı akım kontrolü DGM
- Anlık akım kontrollü sinisoidal DGM

İnverterdeki yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirlemek ve eş zamanlamayı sağlayabilmek için sinüzoidal PWM en çok kullanılan metotlardan birisidir. Şekil 2.6’da kontrol blok şemasında gösterildiği gibi inverter çıkışı gerilim ve frekansını belirleyecek bir sinüs referans işareti, frekans ve genliği sinüs işaretinden daha büyük bir üçgen dalga işaret ile karşılaştırılır. Bu iki işaretin kesiştiği noktalarda inverter içindeki aynı koldaki anahtarlama elemanları durum değiştirirler.



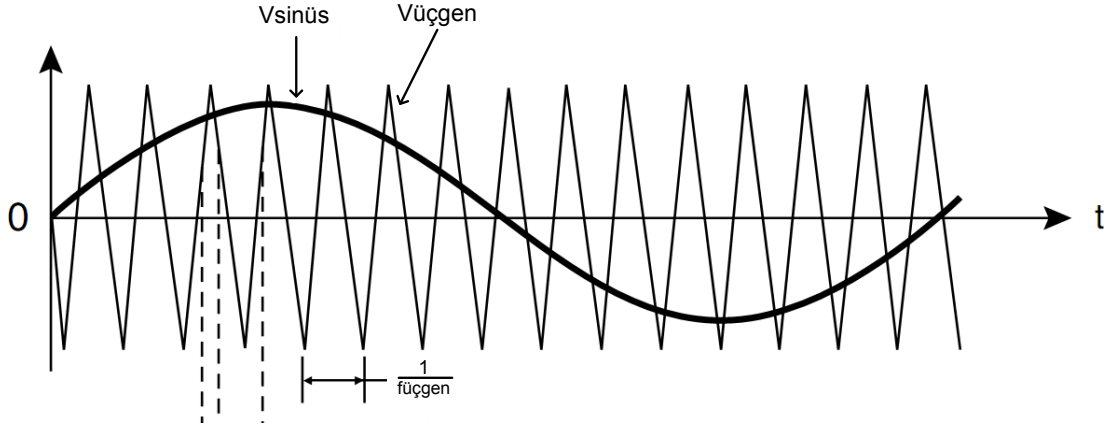
Şekil 2.6 Sinüs darbe genişlik modülasyonu prensib şeması

İnverter çıkış gerilimi ve frekansı değerinin değiştirilmesi için referans işareti (kontrol işareti) genliğinin ve frekansının değiştirmesi yeterli olacaktır. SDGM inverter çıkış gerilimin ayarlanmasında etkin olan iki büyüklük vardır. Bunlar modülasyon indeksi (M) ve taşıyıcı oranı (M_f) ‘dir ve eşitlikleri;

$$M_f = \frac{f_t}{f_r} \quad \begin{array}{l} M_f : \text{Taşıyıcı oranı} \\ f_t : \text{Taşıyıcı işaretin frekansı} \\ f_r : \text{Referans işaretin frekansı} \end{array} \quad (2.2)$$

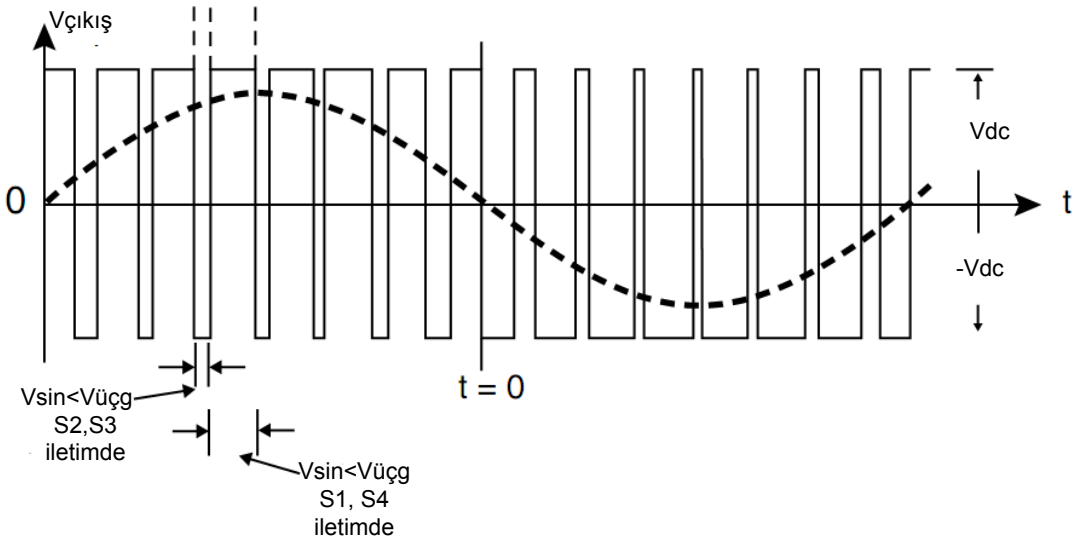
$$M = \frac{V_r}{V_t} \quad \begin{array}{l} M : \text{Modülasyon indeksi} \\ V_t : \text{Taşıyıcı işaretin genliği} \\ V_r : \text{Referans işaretin genliği} \end{array} \quad (2.3)$$

$$V_{AA} = M \times V_{DA} \quad \begin{array}{l} V_{AA} : \text{İnverter çıkış gerilimi} \\ V_{DA} : \text{İnverter giriş gerilimi} \end{array} \quad (2.4)$$



Şekil 2.7 Sinüs ve üçgen sinyallerin karşılaştırılması.

Burada genliği değişken sinüsoidal referans işareti, daha yüksek frekanslı üçgen dalga taşıyıcı işaretin karşılaştırılması yapılarak oluşan kesişme noktaları oluşur. Bu şekilde doluluk oranları yani elemanların anahtarlama süreleri belirlenir. Sinüs dalgasının genliğininin değiştirilmesi ile çıkışta elde edilen PWM işaretinin doluk oranlarının ya da darbe genişliklerinin değişmesi, temel bileşenin genliğinde değişme sağlar.



Şekil 2.8 Tam köprü inverter sinüs DGM modu çıkış gerilimi dalga şekilleri

Taşıyıcı üçgen dalga işaretinin frekansı tek periyotta yarı iletkenlerin kaç kez anahtarlanaacağını sayısını belirler. İnverterin çıkış sinyalinin frekans değeri referans sinüs dalgasının frekansına eşit olmaktadır.

Dönüştürücünün çıkışındaki gerilimin genliğini değiştirmek için doluluk oranı değiştirilirken, frekansı değiştirmek için referans sinüs işaretinin frekansı değiştirilerek istenilen genlikte ve frekansta çıkış gerilimi elde edilmiş olur.

Yapılan çalışmada SDGM yöntemi ve tek fazlı yarım köprü inverter topolojisi kullanılacaktır. Taşıyıcı üçgen dalga için 20 kHz, sinusoidal dalga için 50 Hz'lik frekans değeri kullanılacaktır. Anahtarlama frekansının yüksek olması çıkış filtresinin boyutunun küçülmesini sağlamaktadır.

DİJİTAL SİNYAL KONTROLÖRLER ve PROGRAMLAMA

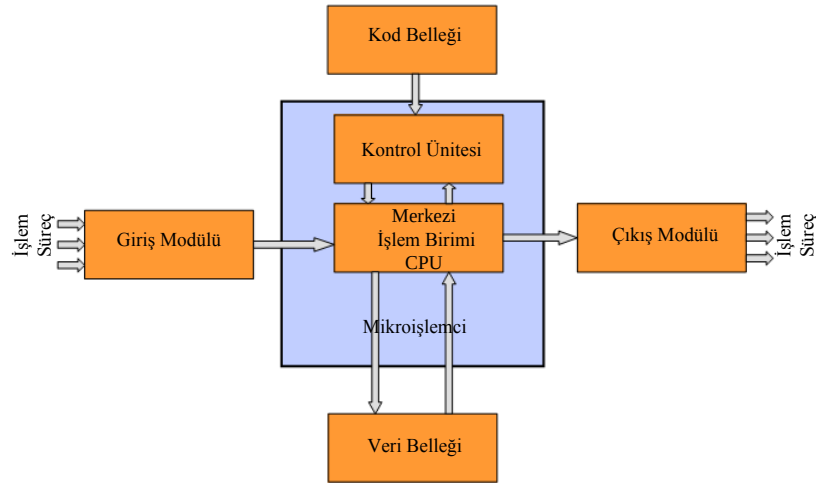
Tez çalışmasında kurulacak güç devresinin kontrolünün güvenilir bir şekilde kontrol sinyalleri ile yapılması gerekmektedir. Bu nedenle günümüzde birçok uygulamada kendine yer bulan Dijital Sinyal Kontrolör (DSK) kullanılacaktır. Üzerinde Texas Instrument firmasına ait C2000 serisi TMS320F28335 işlemci bulunan, Spectrum Digital firmasının yapmış olduğu eZdspTM F28335 uygulama geliştirme kartı uygulamamızda kullanılmıştır.

Dijital kontrol veya hesaplama işlemlerinden konuşacağımız zaman oldukça sık kullanılan bazı kelimeler;

- Mikroişlemci (μP),
- Mikro Bilgisayar,
- Mikrodenetleyici (μC),
- Dijital Sinyal İşleyici (DSİ),
- Dijital Sinyal Kontrolör (DSK)

olarak verilebilir. Hesaplama işlemlerinde kullanılan elektronik cihazların çeşitlerini belirtmek için “Mikroişlemci (μP)”, “Mikrobilgisayar” veya “Mikrodenetleyici (μC)” kelimeleri kullanılır. Dijital sinyal işleme için tercih edilen isim “Dijital Sinyal İşleyici (DSİ)”dir. Texas Instrument TMS320F28335 32-bit kayan noktalı (floating point) işlemcisi ise “Dijital Sinyal Kontrolör (DSK)” grubunda yer alır. Spectrum Digital tarafından deneysel kullanımlar için geliştirilmiş emülasyon kartı olan eZdsp TMS320F28335 DSK, bilgisayarların USB portu üzerinden Code Composer Studio (CCS) program arayüzü ile programlanabilmektedir

Dijital sinyal kontrolör (DSK), işlem gücü dijital sinyal işleyici (DSİ) tarafından sağlanan yeni bir mikrodenetleyici (μC) çeşididir. Dijital sinyal denetleyici, dijital sinyal işleyici ve single-çip hesaplama sisteminin gömülü çevre birimlerinin her iki işlem gücünü birleştiren tek bir yongadan oluşur. Matematiksel hesaplamaların, gelişmiş gerçek zamanlı kontrol sistem uygulamaları için dijital sinyal kontrolörler ilk tercihtir. Dijital sinyal kontrolörlerin avantajlarından dolayı silikon üreticisi firmalar bu tip kontrolörleri geliştirmektedir. Mikroişlemci (μC) ve dijital sinyal işleyicilerden (DSİ) kısaca bahsedebiliriz.



Şekil 3.1 Mikroişlemci blok diyagramı

Mikroişlemciler mikrobilgisayar sistemlerinin merkezi birimleridir. Mikroişlemciler basit sıralı prosedürel yaklaşıma dayanmaktadır; kod belleğinden sıradaki makine kodunu oku, yapısını çöz, opsiyonel operandları veri belleğinden oku, talimatı yerine getir ve sonucu yaz. Bu olaylar dizisi sonsuz bir şekilde çalışır. Mikroişlemciler kontrol ünitesi ve merkezi işlem ünitesinden oluşur (Şekil 3.1). Merkezi işlem ünitesi dahili hafıza hücreleri, aritmetik lojik ünite (ALU), yapısal kaydediciler, yapısal kod çözücüler ve adres ünitelerini içerir. Kontrol ünitesi ve merkezi işlem birimi giriş sinyallerini işleyerek gerekli işlemleri gerçekleştirir ve çıkış sinyallerini bu doğrultuda günceller. Şekil 3.1’de mikroişlemci ve çevre birimleri görülmektedir [22].

Dijital sinyal işleyiciler (DSİ) tipik matematiksel işlemler etrafında, sinyal sensörleri tarafından ölçülen dijital verileri işlemek için tasarlanmış özel birimlerdir. Buradaki amaç gerçek zamanlı olarak mümkün olduğunca hızlı bir şekilde verinin işlenerek veri akışının sağlanabilmesidir. DSP’ler mikroişlemciler gibi hesaplama sistem çekirdeğine

sahiptir. Ek olarak karmaşık matematiksel işlemleri hızlandırıcı birimlere sahiptirler [22].

3.1 eZdspTM F28335'ye Genel Bakış

TMS320F28335 DSK ile birlikte gelen eZdspTM F28335 modülü yazılım geliştirme ve çalıştırma konusunda kullanıcı için mükemmel bir platformdur. Kod geliştirmenin kolaylaştırılması ve hata ayıklamanın daha kısa sürede yapılması için C2000 Code Composer Studio TM sürücülerini sağlanmıştır. Buna ek olarak JTAG bağlantıları emulator için assembly ve 'C' yüksek seviye hata ayıklama dili ile birlikte ara yüz oluşturmaktadır [22].



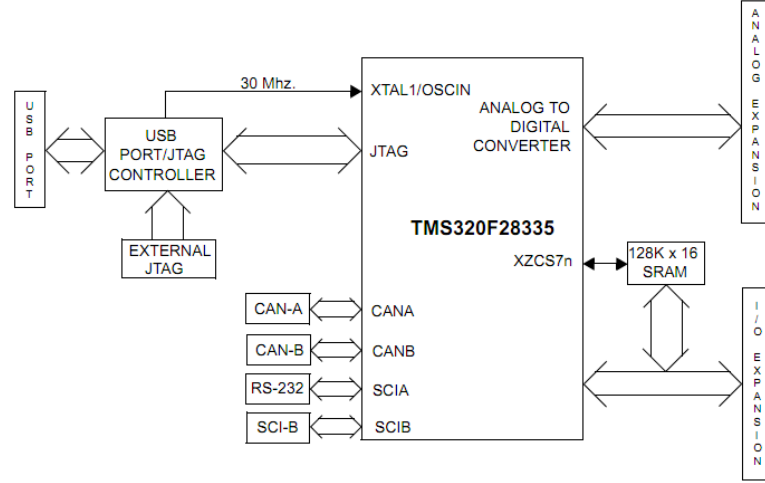
Şekil 3.2 eZdspTM F28335 kartı

eZdspTM F28335 aşağıda sıralanan özelliklere sahip olduğu için bu denetleyicinin kullanılması uygun görülmüştür.

- TMS320F28335 Dijital Sinyal Denetleyici
- 150 MHz Çalışma Hızı
- On-chip 32-bit kayan noktalı (floating point unit) birim
- 68K bytes on-chip RAM
- 512K bytes on-chip Flash hafıza
- 256K bytes off-chip SRAM hafıza
- 16 giriş kanallı on-chip 12 bit Analog Dijital (A/D) dönüştürücü
- 18 kanallı 16 bit PWM modülü
- Kart üzerinde CAN 2.0 arayüz ünitesi, sürücüsü ve konektörü ile birlikte

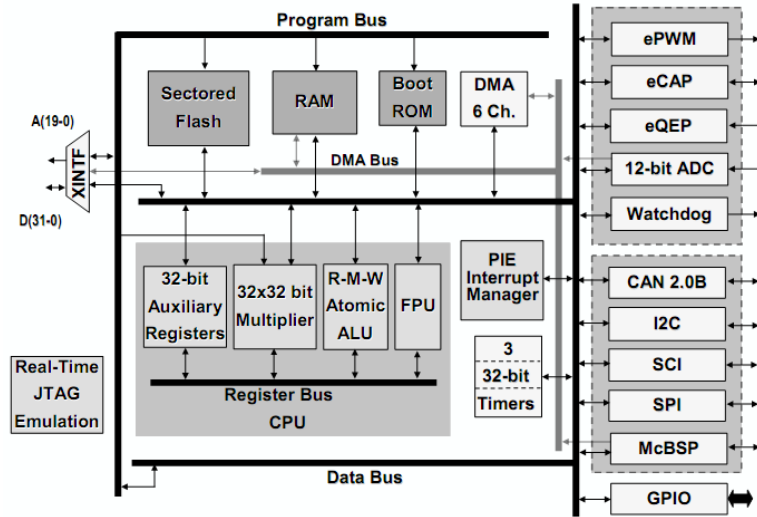
- Çoklu genişletme konnektörleri(analog, I/O)
- Kart üzeri gömülü USB JTAG Denetleyici
- CCS, C/C++ , Matlab, VISSIM desteği

bulunmaktadır. Şekilde 3.3'te eZdspTM F28335'ye ait maddeler halinde verilen özelliklerden bazıları görülmektedir.



Şekil 3.3 eZdspTM F28335 blok diyagramı [22]

Şekilde 3.4'te eZdspTM F28335 için ayrıntılı şekilde modüller arası iletişimin gösterilmiştir. Bu şekilde ALU ünitesiyle FPU ünitesi bulunmaktadır. FPU ünitesi kayan noktalı işlemler için donanımsal desteği göstermektedir. İşlemciler genelde sabit(fixed) ve kayan(floating) noktalı olmak üzere ayrılırlar. Sabit noktalı olanlar tam sayılı işlemler için kayan noktalı olanlar kesirli ve tam sayılı işlemler için uygundur. Ama yazılım desteği ile sabit noktalı işlemciler de kayan noktalı işlemleri yapabilmektedir. Burada ortaya çıkan sorun yazılım desteği ile yapılan kayan noktalı işlemin donanım desteği ile yapılan sabit noktalı işleme göre daha fazla zamanda yapılmasıdır. Örneğin: Bir işi yapmak için yazılım desteği ile yapılan kayan noktalı işlem 120 çevrim iken aynı işi yapmak için donanım destekli sabit noktalı işlem 4 çevrimde tamamlanmaktadır. TMS320F28335 DSK donanımsal olarak kayan ve sabit noktalı işlemler desteklenmektedir. Bu sayede yapılacak işlemler kısa sürede tamamlanmaktadır. Ayrıca IQ math isimli kütüphane desteği ile yazılım desteği de ayrıca sağlanmaktadır.



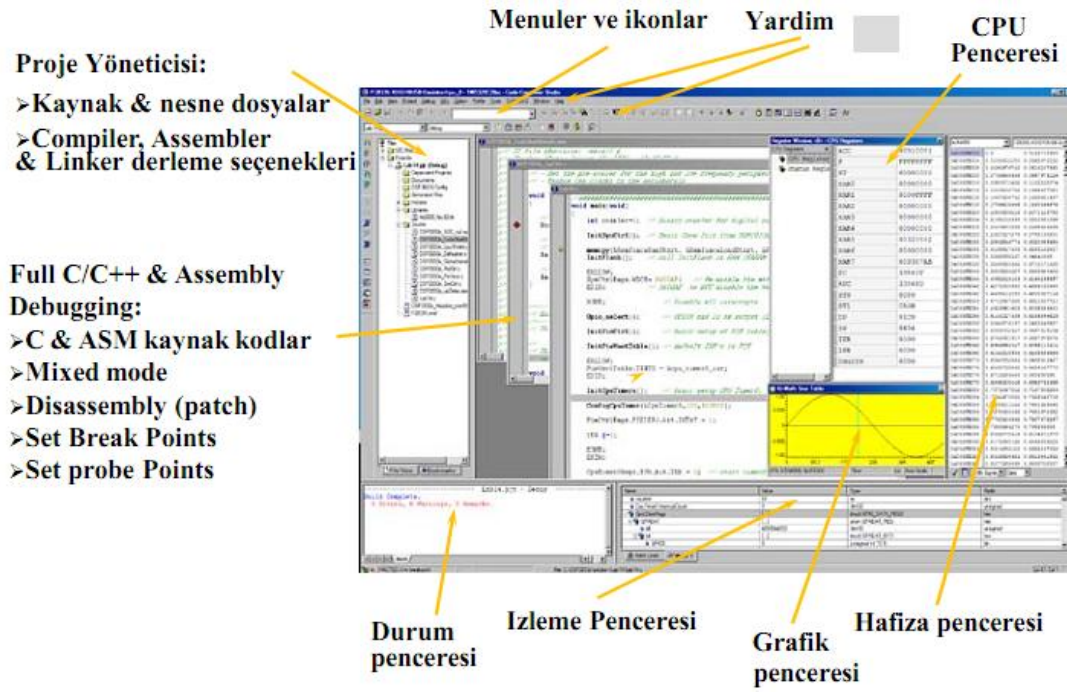
Şekil 3.4 eZdspTM F28335 blok diyagramı [22]

3.2 eZdspTM F28335 Programlama

3.2.1 Code composer studio

Spectrum Digital'in ürettiği eZdspTM F28335 dijital sinyal kontrolör Code Composer Studio(CCS) ile birlikte gelmektedir. CCS programı ile kontrolörün programlanması kolayca yapıldıktan sonra ister simülatör kullanılarak denenebilir ya da gerçek zamanlı uygulamasının görülebilmesi için geliştirme kartına program yüklenerek çalıştırılabilir. Kontrolörün programlanması CCS içinde yazılan C ve ASM gibi dillerle yapılabilirdiği gibi tezde kullandığımız Matlab/Simulink ile ya da VISSIM gibi bazı programlarla da yapılabilir.

Özel programlar ile programlama yapıldığında, yine kodun kontrolöre atılması için CCS arayüzüne ihtiyaç duyulmaktadır. Özel programda model oluşturulup derlendiğinde CCS otomatik olarak çağrılarak açılır ve kontrolöre bağlanır. Bu şekilde programlama yapılmış olur. Programın yükleneceği hafıza için iki seçenek vardır. Derlenen program FLASH hafıza ya da RAM hafızaya atılarak programın çalıştırılması sağlanır. Matlab/Simulink programı ile hazırlanıp derlenen program tez çalışmasında RAM hafızası kullanılarak çalıştırılmıştır. Şekil 3.5'te CCS v3.3 sürümüne ait bir ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5 Code composer arayüzü [22]

Kontrolörün çalışması sırasında, program değişkenlerinin durumu izleme penceresinden incelenebilir ve değerleri değiştirilebilirken, grafik penceresinden de çeşitli grafik formatlarında gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir.

3.2.2 Matlab/Simulink model

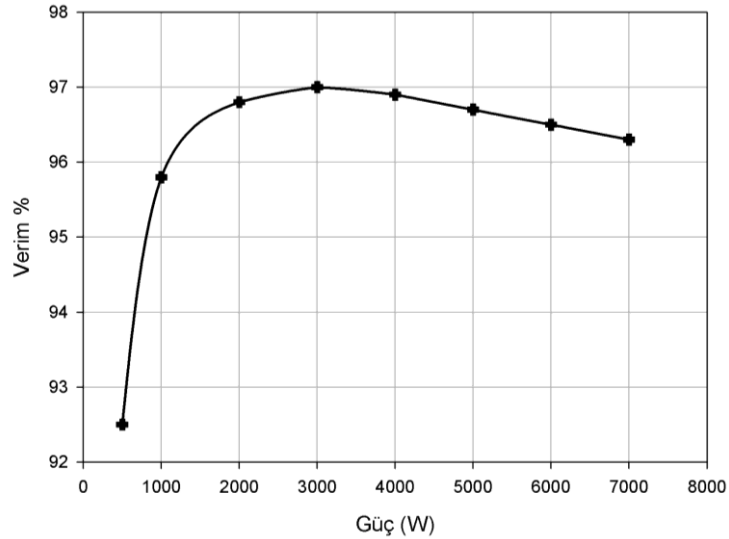
Matlab/Simulink Texas Instruments C2000 ailesi DSİ'ler için özel bloklar içermektedir. Kullandığınız DSİ için uygulama tasarımı normalde kullanılan blokların çek bırak mantığına dayanarak kolayca yapılır. Matlab ile TI uygulamaları geliştirebilmek için programın “Embedded Target for TI C2000 DSP” araç çubuğuna sahip olması gerekmektedir [23].

“Embedded Target for TI C2000 DSP” araç çubuğunda DSİ'ye uygun giriş/çıkış, DGM, ADD, CAN, CAP, QEP, interrupt vb. blokları bulunur. Bu bloklar kullanılarak normalde kullanılan modelleme mantığı ile sistem tasarlanır. Bu bloklar yanında normalde Simulink kütüphanesinde bulunan bloklar da uygun şekilde model oluşturulurken kullanılabilir. Her bir blok CCS'de karşılığı olan kod yerine geçmektedir. Model oluşturulup derlendikten sonra CCS içinden bu koda ulaşım incelemek ve izlemek mümkündür.

Tez çalışmasında MATLAB/Simulink paket yazılımı kullanılarak DSK için algoritma geliştirilmiş ve derlenmiş, CCS programı ile oluşturulan bu kod DSK'nın RAM hafızası kullanılarak yüklenmiştir.

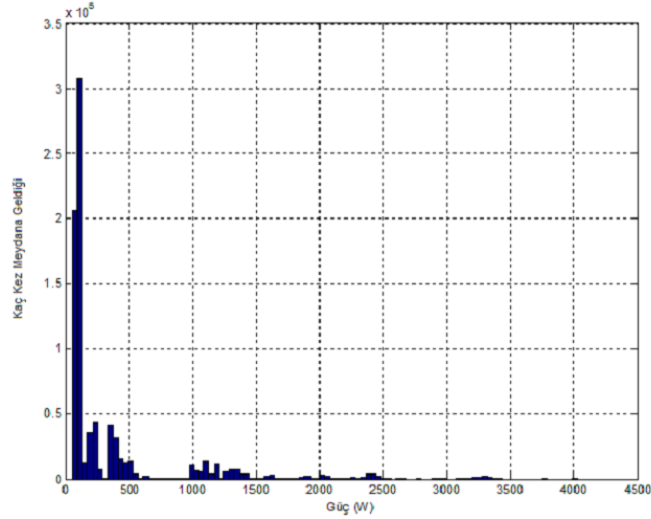
İNVERTER DEVRESİNDE HİBRİT ANAHTAR KULLANIMI

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi inverterler DA-AA enerji dönüşümünü sağlayan güç elektroniği devreleridir. İnverter devrelerinde anahtarlama elemanı olarak yarı-iletken IGBT anahtarı yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte MOSFET anahtarlarının gerilim seviyeleri de IGBT anahtarı gerilim seviyelerine ulaşmıştır. Yarı-iletken anahtarlar ideal olmadıklarından ilettime girme (turn-on), iletim (conduction) ve kesime girme (turn-off) anlarında kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıpların toplam çekilen güce göre değişimleri lineer olmadığından inverter devrelerinin verimleri yükte değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.1 Tipik bir inverter devresine ait verim eğrisi [19]

Tipik bir inverter devresine ait verimin yükün çektiği güce göre değişim eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu eğri benzetim çalışması sonucunda elde edilmiştir.



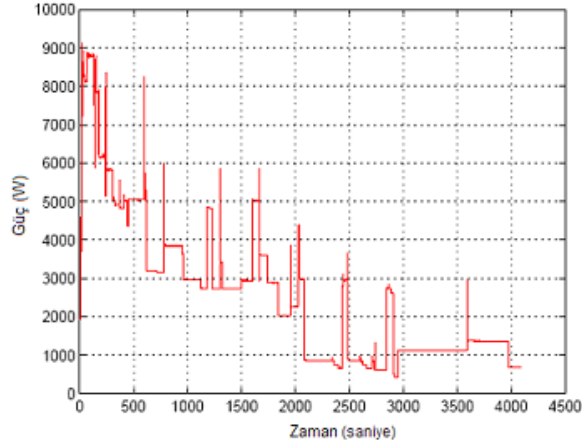
Şekil 4.2 Bir evdeki günlük elektrik güç talebine ait histogram (Güç ölçümleri 100 ms aralıklarla alınmıştır) [19]

Dört kişilik bir aileye ait bir evde bir gün boyunca yüksek örnekleme (1000 örnek/saniye) oranı ile yapılan verileri kullanılarak elde edilmiş olan elektrik talebine ait histogram Şekil 4.2’de verilmiştir[19]. Bu deneysel elektrik yük profiline ait histogram incelendiğinde, gün boyunca elektrik talebinin geniş bir aralıkta değiştiği ve oldukça yüksek bir zaman aralığında düşük güçlerde kaldığı görülmektedir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Bir evin günlük yük talebinin zaman olarak dağılımı ve karşılık gelen yüzdelere [19]

Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüzde (%)
$P < 500$	20.40	85.01
$500 \leq P \leq 1000$	0.570	2.36
$1000 \leq P \leq 1500$	2.140	8.91
$1500 \leq P \leq 4500$	0.892	3.72

Çizelge 4.1’de belirtilen her bir güç aralığındaki güç talebinin gün içinde ne kadar sürdüğü ve buna karşılık gelen yüzde değerleri verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta bir evdeki elektrik güç talebinin 24 saatin yaklaşık 20 saatinde 0-500 W aralığında kaldığıdır. Bu oldukça önemli bir yük karakteristiğidir ve böyle bir evde kullanılacak inverter devresinin tasarımında dikkate alınmalıdır. Belli bir çalışma gücü için optimize edilmiş bir tasarım bir ev için uygun bir seçim olmayacaktır. Literatürde yapılan çalışmalarda yükün bu karakteristiği dikkate alınmamıştır.

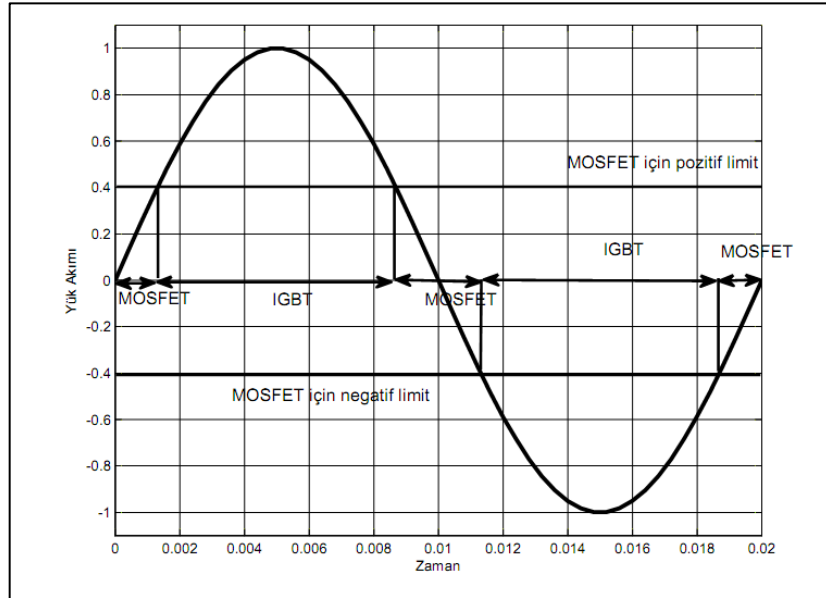


Şekil 4.3 Bir ev için olası en kötü yüklenme durumuna ait güç zaman grafiği [19]

Böyle bir ev için olası bir maksimum yüklenme durumu evde bulunan ana yüklerin (elektrikli fırın, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, buzdolabı, garaj kapı açarı, tost makinesi, mikrodalga fırın, vb.) hepsinin birlikte kullanıldığı düşünülerek elde edilmiştir (Şekil 4.3). Şekilden böyle bir evde kullanılacak inverter devresinin yaklaşık 10 kW'lık bir yükü karşılayacak bir şekilde tasarlanması gerektiği anlaşılmaktadır (Bir evdeki yükün büyük oranda rezistif olduğu kabul edilmiş ve güç değerleri kW olarak verilmiştir). Buradan kullanılacak yarı iletken anahtarın taşıması gereken akımın tepe değeri yaklaşık olarak 66 A ($10000/220 \cdot 1.44$) olacaktır. Buna uygun yarı iletken anahtar IGBT olacaktır. Ancak düşük akımlı bir MOSFET önerilen amaçla IGBT anahtarına paralel olarak bağlanabilir.

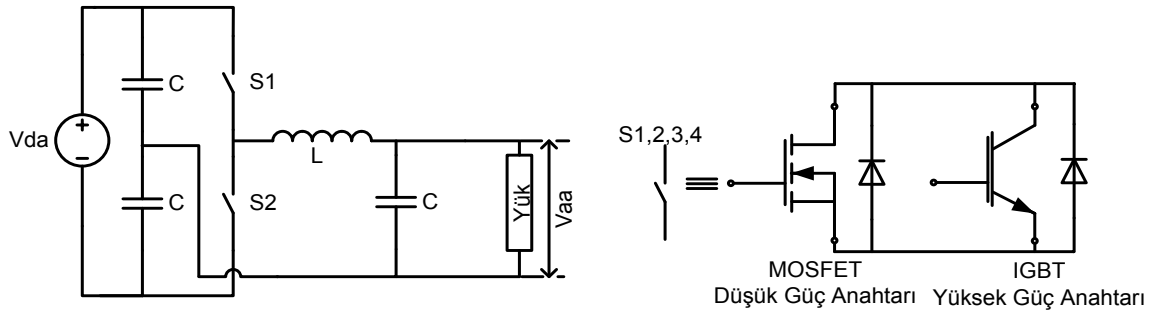
Çiezlge 4.1 incelendiğinde evden çekilen günlük güç talebinin 85%'i 0-500 W aralığındadır. Şekil 4.1'de verilen tipik verim eğrisine baktığımızda inverter devresinin oldukça verimsiz bir bölgede uzun bir zaman çalışması gerektiği açıkça görülebilir. Bu yüzden böyle bir evin yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenmesi durumunda kullanılacak inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki veriminin artırılması oldukça önemli hale gelmektedir. Eğer bu yapılabilirse gün boyunca büyük miktarda enerji kazanımı sağlanabilecektir. Bir örnek vermek gerekirse verim artışı yakıt hücreli bir güç sisteminde aynı güç talebinin daha az hidrojen kullanımıyla karşılanması anlamına gelecektir. Benzer şekilde güneş panelli bir sistemde daha az PV paneli alanı anlamına gelecektir.

Verim arttırma işlemi için önerilen hibrit yapı, iki adet inverter devresinin paralel bağlanması ile devre seviyesinde yapılabileceği gibi yarı iletken anahtar seviyesinde yapılabilir. Bu amaçla düşük akım değerine sahip bir yarı-iletken anahtar yüksek akım değerine sahip yarı-iletken anahtar ile paralel olarak bağlanabilir. Yük akımı geri beslemesi kullanılarak hangi anahtarın kullanılacağına karar verilebilir. İnverter devrelerinde yaygın olarak kullanılan anahtarlama elamanı IGBT'dir. Fakat son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte yüksek gerilim seviyelerinde MOSFET'ler üretilmiştir. MOSFET anahtarı IGBT anahtarı ile karşılaştırıldığında daha hızlı kesime gidebilir (turn-off) ve düşük akım değerlerinde iletim kayıpları daha azdır. Bu nedenlerden dolayı MOSFET anahtarının özellikle düşük güç (düşük akım) aralığında kullanılmak üzere IGBT anahtarına paralel olarak bağlanması ve hangi anahtarın kullanılacağına anlık yük akımı değerine göre karar verilmesi ile inverter devresinin verimi artırılabilir.



Şekil 4.4 Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması

Bu çalışmada hibrit anahtarın (paralel IGBT-MOSFET kombinasyonu) Şekil 4.4'te verilen anlık yük akımı geri beslemeli kontrol mantığı ile kontrol edilmesiyle elde edilebilecek verim artışı ortaya çıkarılmış olacaktır.



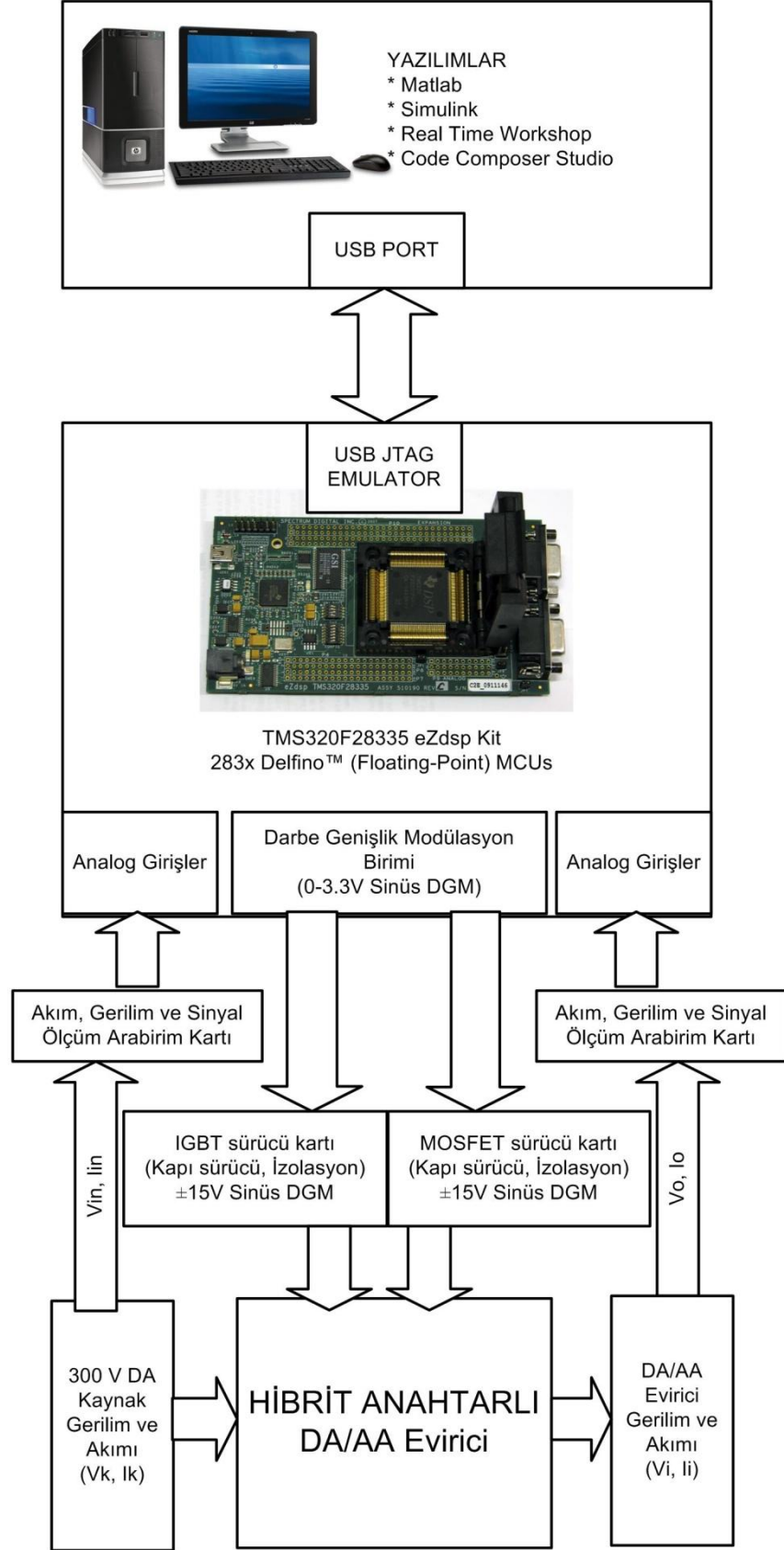
Şekil 4.5 (a) Yarım köprü inverter devresi (b) Önerilen hibrit anahtar

Şekil 4.5 (a)'da bir yarım köprü inverter devre topolojisi örnek olarak verilmiştir. Önerilen hibrit anahtar kullanılması durumunda Şekil 4.5 (a)'daki her bir anahtar Şekil 4.5 (b)'de gösterilen paralel IGBT-MOSFET anahtar kombinasyonu olacaktır. Tezde yakıt hücresinden ve/veya güneş panellerinden elde edilen değişken ve düşük seviyedeki DA gerilimin bir DA-DA dönüştürücü ile sabitlendiği ve inverter devresinin girişindeki yüksek DA gerilim seviyesine çıkarıldığı kabul edilmiştir. Bu gerilim şekilde V_{da} olarak gösterilmiştir. Çalışmada bu DA gerilim bir 3 fazlı varyak ve bir 3 fazlı doğrultucu kullanılarak elde edilecektir. Doğrultucu girişindeki varyak sayesinde deneysel çalışma için farklı DA gerilim seviyeleri rahatlıkla elde edilebilecektir.

Literatürde verilen hibrit anahtar çalışmalardan farklı olarak tez çalışmasında hibrit anahtarın kontrolü yük karakteristiği dikkate alınarak yapılacaktır. Bu amaçla anlık yük akımı geri beslemesi alınarak düşük akımlarda MOSFET anahtarı kullanılırken yüksek akımlarda IGBT anahtarı kullanılacaktır. Bu açıdan önerilen anlık yük akımı geri beslemeli kontrol mantığı özgün bir yöntemdir. Sinüzoidal olarak değişen bir yük akımı dikkate alındığında MOSFET anahtarının akımı limit değerine ulaşana kadar MOSFET anahtarı kullanılırken daha sonrasında IGBT anahtarına geçilecektir. Sonrasında yük akımı tekrar düşük değere geldiğinde yine MOSFET anahtarı kullanılacaktır. Bu durum her periyotta tekrar edilecektir (Şekil 4.4). Kullanılacak özgün kontrol mantığı ile hibrit anahtarda bulunan her bir anahtarın kendisi için uygun akım değerlerinde kullanılması sonucunda inverter devresinin özellikle düşük güçlerdeki verimi artırılacaktır. Şekil 4.4'te MOSFET anahtarı için belirtilen üst ve alt limitler iletim kayıpları dikkate alınarak belirlenebilir. Anahtar seçimi dijital sinyal kontrolör (Digital Signal Controlör (DSC)) ile kontrol edilen bir devrede bir anahtarlama periyodu içinde (20 kHz'lik anahtarlama frekansı için 50 μs 'de bir) kolaylıkla yapılabilir. Önerilen anlık yük akımı

geri beslemeli kontrol mantığı ile özel kapı sürme devreleri yerine basit bir sürme devresi kullanılacağından hibrit anahtarın kontrolü oldukça kolay olacaktır

Şekil 4.6'da hazırlanan sisteme ait bloklar görülmektedir. Şekilde bulunan bulunan DA/AA dönüştürücü, dijital sinyal kontrolör ve yazılım kısımları önceki bölümlerde açıklamıştır. Bunların dışında kalan bloklar(devreler, ara birim kartları vb.) deneysel kısımda anlatılacaktır. Tez çalışması benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Hibrit anahtar kullanımı sonuçları Matlab/Simulink programı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.6 DA/AA dönüştürücü blok diyagramı

BÖLÜM 5

BENZETİM ÇALIŞMALARI

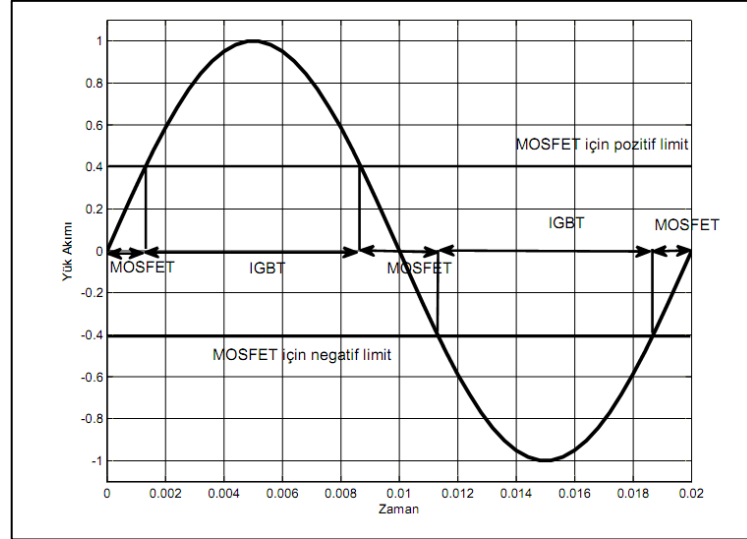
Tez çalışması için öncelikle benzetim yapılmıştır. Devrenin çalışma prensibi, kontrol sinyallerinin üretilmesi, yarı iletken anahtar parametrelerinin etkileri benzetim çalışması ile incelenmiştir.

İlk aşamada benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Anahtar modellerine ait teknik dökümanlardan anahtarlara ait parametreler(t_{on} , t_{off} , R_{dson} , V_{on}) benzetim çalışmasında kullanılmış ve gerçeğe yakın sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel olarak kurulumu ve kontrolü kolay olmasından dolayı benzetim çalışmalarında bir yarım köprü inverter devresi kullanılmıştır. Farklı anahtar modelleri için öncelikle her bir anahtarın tek başına kullanılması durumunda inverter devresinin verim değişimi elde edilmiştir. Böylece karşılaştırma yapabilmek için bir referans noktası elde edilmiştir. Anahtarların kapı sürme sinyallerini üretmek amacı ile sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) kullanılmıştır. Sonraki adımda, önerilen hibrit anahtar kullanımı ve anlık yük akımı geri beslemeli kontrolü benzetim çalışmasında kullanılmıştır.

Şekil 5.1’de verilen kontrol mantığı ile düşük yük akımı değerlerinde MOSFET anahtarı kullanılırken, yüksek yük akımı değerlerinde IGBT anahtarı kullanılmıştır. Herhangi bir anda sadece bir anahtar aktif durumda kalmıştır. Diğer bir algortima olarak düşük akımda IGBT kullanılırken yüksek akımda MOSFET kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

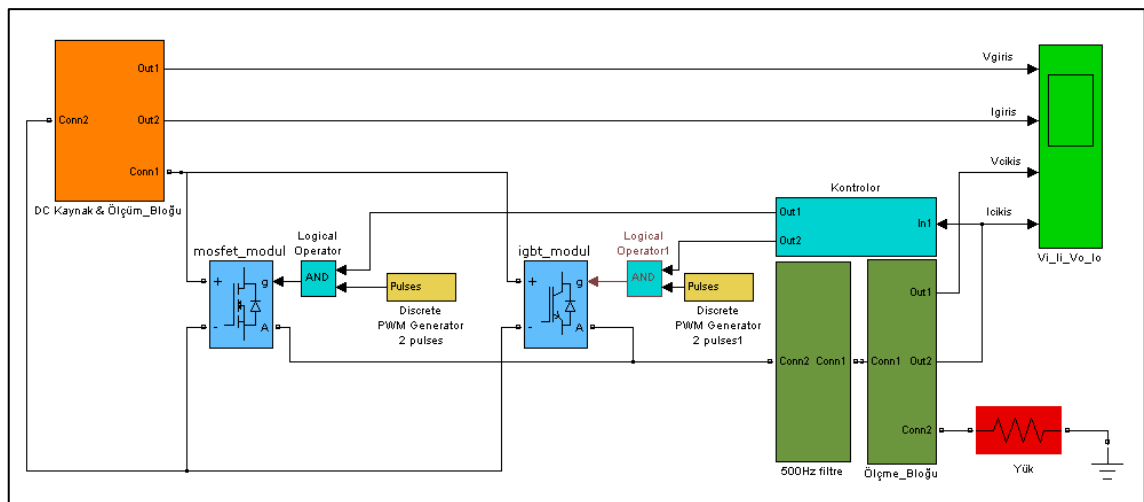
Elde edilen gerilim ve akım değerlerinin anlık değerleri kullanılarak Matlab’de yazılan program ile verim hesaplaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada 20 kHz anahtarlama frekansı kullanılmıştır. Algoritma olarak; sadece MOSFET, sadece IGBT, hibrit

MOSFET-IGBT-MOSFET ve hibrit IGBT-MOSFET-IGBT durumları kullanılmıştır. Modülasyon ineksi 0.85 alınmıştır. Hibrit kullanımda %50 akım değerinde anahtar değişimi yazılım ile sağlanmıştır. Anahtar değişimi için seçilen %50 akım sınırları Şekil 5.1’de “MOSFET için pozitif ve negatif limit” olarak gösterilen yerlerdir. Pozitif ve negatif alternensta akım mutlak değer olarak belirlenen referans değere ulaştığında anahtar seçimi belirlenen şekilde yapılmaktadır.



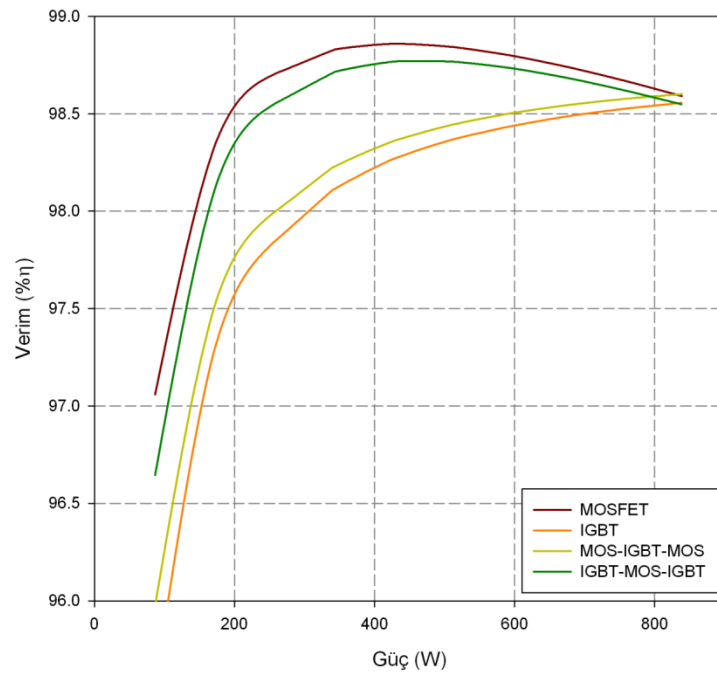
Şekil 5.1 Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması

Benzetim çalışması sonuçlarının elde edilmesinde Şekil 5.2’de verilen Simulink modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.2 MOSFET-IGBT yarıiletken anahtarlı hibrit DA/AA evirici

Şekil 5.3'te benzetim çalışması sonucu elde edilen verilerin matlab yardımıyla işlenmesi ile verim grafikleri dört farklı algoritma için çıkartılmıştır. MOSFET'e ait verim grafiği en yüksek çıkarken IGBT'ye ait verim grafiği en altta çıkmıştır. Fakat bu durum 800W seviyesine kadar sürmekte, bu noktadan sonra IGBT, MOSFET'e göre daha iyi hale gelmektedir. Hibrit kullanıma bakacak olursak; MOSFET-IGBT-MOSFET algoritması IGBT-MOSFET-IGBT algoritmasına göre düşük güçlerde daha kötü kalırken, 800 W seviyelerinde daha iyi hale gelmektedir. Hibrit kullanımlardan IGBT-MOSFET-IGBT algoritması belli güç aralığında IGBT'den yüksek durumda iken, MOSFET-IGBT-MOSFET algoritması IGBT'ye göre sürekli daha iyi verim vermektedir.



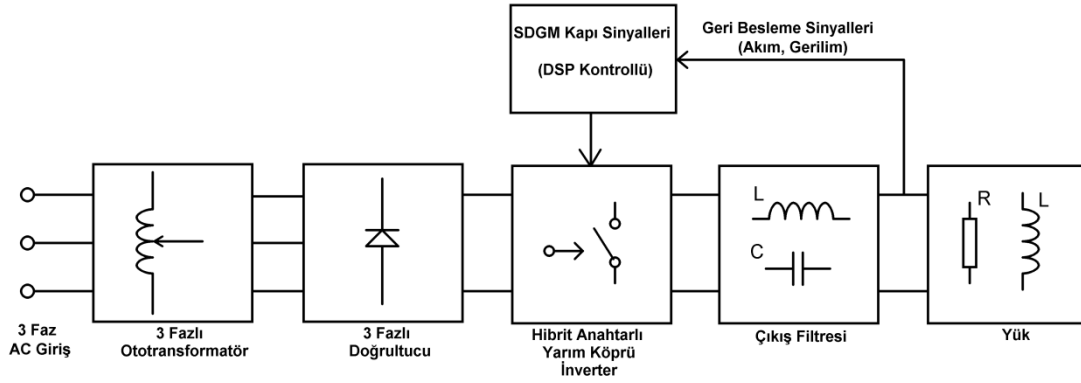
Şekil 5.3 Benzetim çalışmalar sonucu elde edilen Verim-Güç grafiği

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında önerilen hibrit anahtar kullanımı deneysel olarak da incelenmiştir. Bunun için akım-gerilim sinyalleri geri besleme devreleri, inverter devresi, kapı sürme devresi, filtre tasarımı, veri alma sistemi, simulink modeli oluşturularak DSK programlama adımlarının bir araya getirilmesiyle sistem kurulmuştur.

Deneysel çalışmada kolay kurulması ve kontrol edilebilmesi nedeniyle 2 kVA'lık bir prototip yarım köprü inverter devresi kurulmuştur. Benzetim çalışmalarında kullanılan anahtarlar temin edilmiştir. Bu anahtarlardan MOSFET için IRFP40N60K ve IGBT için IRG4PSC71UDPbF anahtar modelleri seçilmiştir. Yarım köprü inverter devresinin, kapı sürme devrelerinin, güç devresinin ve akım-gerilim geri besleme devrelerinin PCB tasarımları yapılmıştır. Deneyde kullanılan anahtarları kontrol etmek için gerekli kapı sürme sinyalleri (2010-04-02-KAP03 numaralı BAPK projesi kapsamında alınan) dijital sinyal kontrolör(DSK) tarafından üretilmiştir. Hibrit anahtarın anlık yük akımı geri beslemeli kontrolü için gerekli DSK programı yazılmış, önerilen kontrol algoritmasında hangi anahtarın kullanılacağı kararı için yük akımının anlık değerine ihtiyaç duyulacağından, yük akımını örnekleyecek devre(ler) kurulmuş ve DSK girişi için uygun bir sinyale dönüştürülmüştür. Kontrol algoritması öncelikle düşük gerilim değerlerinde test edilmiş ve hazır hale geldikten sonra deneysel çalışmaya geçilmiştir. Deneysel çalışmada da her bir anahtar için ayrı ayrı ve hibrit anahtar kullanımı ve hibrit anahtarın yük akımı geri beslemeli kontrolü durumu için 300V DA bara gerilim değeri, 20 kHz anahtarlama frekansı, 0.85 modülasyon indeksi ve farklı yüklenme durumları için verim eğrileri elde edilmiştir. Deneysel olarak kurulan sistemin blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Deney devresi blok diyagramı

İnverter devresinin girişinde değişken DA gerilim seviyeleri elde edebilmek için 3 fazlı varyak ve 3 fazlı doğrultucu devresi kurulmuştur. Böylece güç dönüşüm sistemlerinde inverter devresinin giriş gerilimini sabitleyen DA-DA dönüştürücünün kullanılmasına gerek kalmamıştır. Kullanılan DSK ile farklı anahtarlama senaryoları kolaylıkla elde edilmiştir.

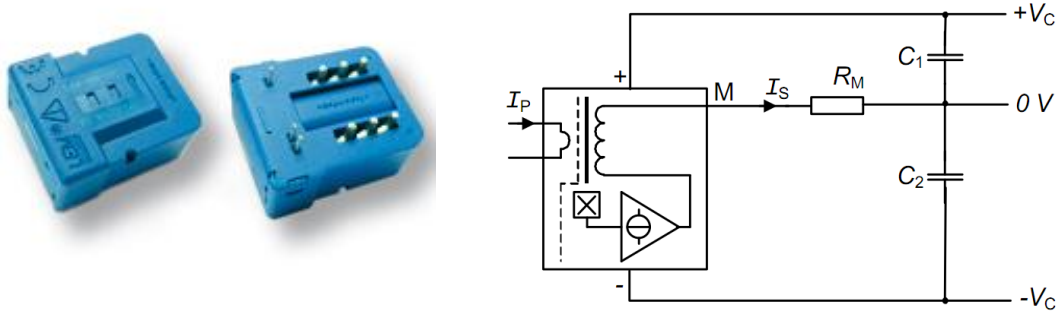
Aşağıda deney düzeneğinde kullanılan elemanlara ve devrelere ait özellikler verilmiştir.

6.1 Akım Sinyali Geri Besleme Devresi

Dönüştürücüye ait giriş ve çıkış akımlarını ölçmek için LEM firmasına ait LAX-100NP akım sensörü kullanılmıştır. Akım sensörü hall efekt prensibine göre çalışmakta ve yüksek çözünürlükte ($0,3\mu s$ cevap verme süresi) veri örnekleyebilmektedir.

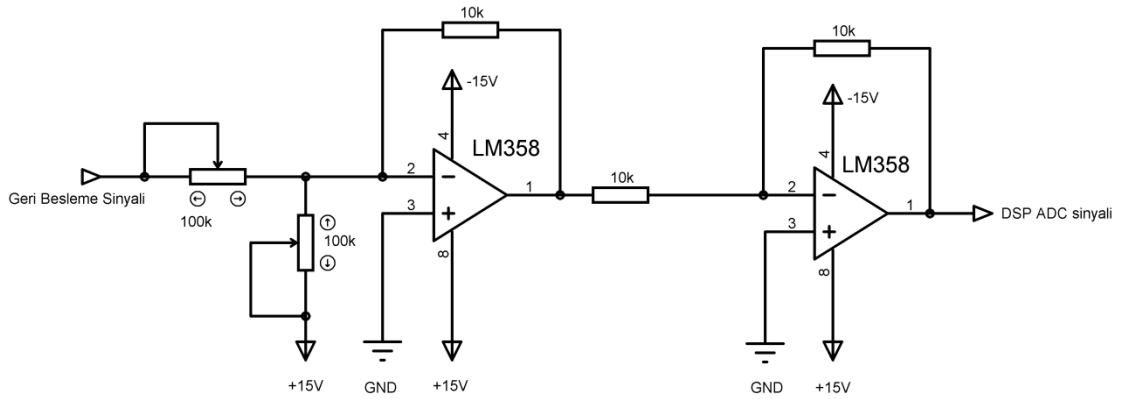
Şekil 6.2’de akım sensörünün bağlantı şekli verilmiştir. Burada bulunan R_m değeri $50\ \Omega$ ve C_{1-2} kondansatörlerine ait kapasiteler $100\ nF$ olarak seçilerek teknik dokümanında verilen değerler kullanılmıştır. $+15\ V$ ve $-15\ V$ gerilim değerine sahip simetrik bir DA kaynaktan beslemesi yapılmıştır.

Alınan değerlerin okunabilmesi için M ve $0\ V$ uçları arasından akım bilgisi gerilim eşdeğeri olarak elde edilmiş ve opamp devresine sokulmuştur.



Şekil 6.2 LAX 100 np ve bağlantı şeması

Okunan akım bilgisinin, DSK tarafından okunabilmesi için düzenlenmesi gerekmektedir. DSK'ye ait analog dijital çevirici modüle girilebilecek gerilim değeri 0-3V arası değişmekte ve sınırlandırılmaktadır. Her ne kadar DA akım okurken hep pozitif değer okunsa bile bu gerilim değerinin sınırlandırılması gerekmektedir. Devrenin çıkışında oluşacak zamanla pozitif ve negatif değer alan AA akım okunurken bu sinyalin belli bir gerilim değerinde sınırlandırılması ve işaretin negatif değer almayacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bunun için sinyale 1,5 V DA gerilim eklenerek AA akım sinyalinin pozitif değerde salınması sağlanmıştır. Bunu yapabilmek için aşağıdaki devre kurulmuştur.

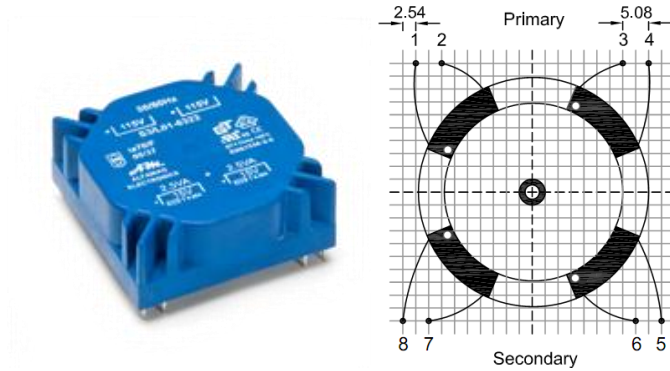


Şekil 6.3 Analog işaret bindirme devresi

Akım geri besleme devresinden alınan sinyalde aşırı derecede gürültü olduğundan, akım geri beslemeli kontrol uygulanamamıştır. Devre açık çevrim çalıştırılmıştır. Yük akımı geri beslemesine göre yapılacak anahtar seçim sinyali o yüklenme durumu için oluşacak yük akımının maksimum değerinin belli bir yüzdesi (%50, %90) olacak şekilde Simulink modeli içinde yazılımsal olarak yapılmıştır.

6.2 Gerilim Sinyali Geri Besleme Devresi

Dönüştürücü çıkışındaki gerilimi okumak için AMVECO firmasına ait 115/7 V dönüştürme ve 7VA güç değerine sahip gerilim sensörü kullanılmıştır. Yine akım sensöründen okunan AA sinyalin ADD'ye girerek DSK tarafından okunması için yapılan 0-3 V arası sınırlama ve 1,5 V DA değer ekleyerek y ekseninde öteleme işlemi burada da yapılmıştır.

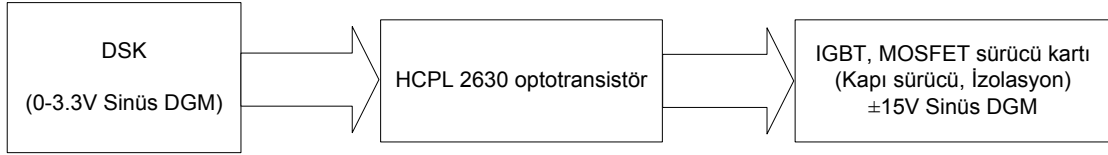


Şekil 6.4 Amveco gerilim sensörü ve iç yapısı

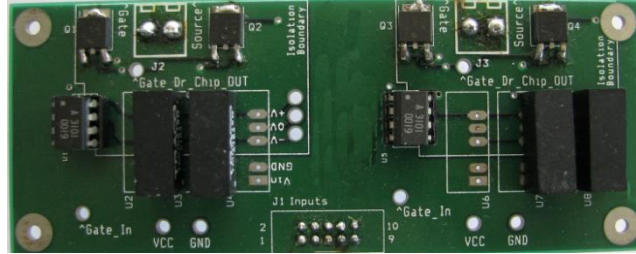
Gerilim geri besleme devresinden alınan sinyalde aşırı derecede gürültü olduğundan, gerilim geri beslemeli kontrol uygulanamamıştır. Devre açık çevrim çalıştırılmıştır. Gerilim geri beslemesi ile çıkış gerilimi modülasyon indeksi değiştirilerek sabit tutulur. Gerilim geri beslemesi kullanılmadığı için sadece modülasyon indeksi 0.85 değerinde tutularak deneysel çalışma yapılmıştır.

6.3 MOSFET/IGBT Sürücü Devresi

Sürücü devre olarak girişinden verilen sinyale göre on konumda +15V, off konumda -15V çıkış gerilimi veren ve +5V besleme gerilimine ihtiyaç duyan hazır kartlar kullanılmıştır. DSK'dan gelen sinyaller HCPL 2630 model optoeleman ile dış ortamdan izole edilerek sürücü kartlara gönderilmiştir. Şekil 6.5'te bu kısım blok halinde gösterilmiştir. Ayrıca sürücü kartların üzerinde bulunan HCPL 3101 model opto eleman ile izolasyon sağlanmıştır. Burada ayrıca HCPL 2630 kullanılmasının sebebi kapı sürme devresine ait toprak ve DSK'ya ait toprak uçlarının güvenlik açısından ayrı olmasını sağlamaktır.



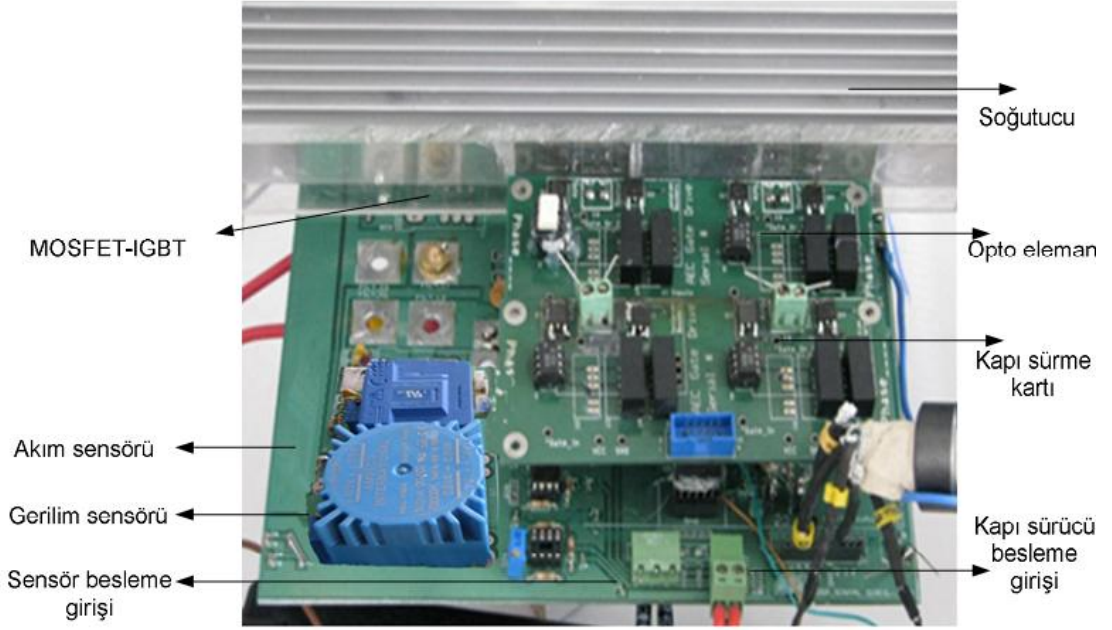
Şekil 6.5 DSK'dan gelen sinyalin izole edilmesi



Şekil 6.6 IGBT, MOSFET sürücü kartı

6.4 DA/AA Güç Devresi

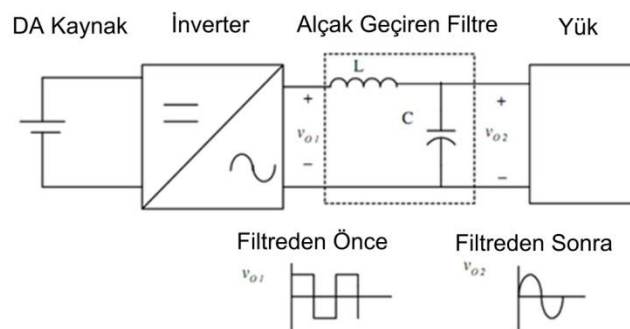
Dönüştürücüye ait güç elemanlarının bulunduğu devrenin PCB olarak basılması için önce şematiği tasarlanmış ve sonrasında baskısı yapılmıştır. PCB güç elemanları, DA giriş ucu, AA çıkış ucu, DA kapasite bağlantı uçları, akım-gerilim ölçme sensörleri, izolasyon elemanları ve sürücü kartların yerleştirilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde DSK'dan DGM sinyallerinin iletiminde ve akım-gerilim geri besleme sinyallerinin DSK'ye iletilmesinde uzun kablolardan oluşabilecek bir hataya önlem alınmıştır. Şekil 6.7'de hazırlanan inverter devresi verilmiştir.



Şekil 6.7 DA/AA güç devresi

6.5 Filtre Endüktansı ve Kondansatörü Seçimi

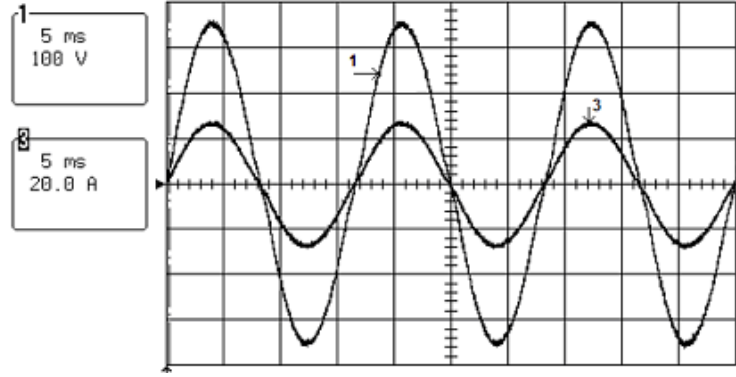
İnverter çıkışları farklı frekanslarda AA bileşenler(harmonikler) ve DA bileşen içerebilir. LC elemanlarının kullanılması ile yüksek frekanslı harmonikler azaltılabilir. Kesintisiz güç kaynağı gibi(KGK) gibi uygulamalarda saf sinüs işareti istenmektedir. Bu amaçla iyi bir filtreleme yapılmalıdır



Şekil 6.8 Filtre devresi

İnverter devrelerinin çıkışında kullanılan LC çıkış filtresi sayesinde inverter çıkışında elde edilen gerilim sinüzoidal olacaktır. Böylece çekilen akımda sinüzoidal olacaktır. Şekil 6.9'da yakıt hücreli bir güç sistemi için tasarlanan bir yarım köprü inverter

devresinde çıkış LC filtresinden sonra ölçülmüş akım (3) ve gerilim (1) dalga şekilleri verilmiştir [13]. Anahtarlama frekansı 20 kHz ve çıkış LC filtresinin değerleri 16µF ve 93µH'dir [13]. Şekil 6.9'da da görüldüğü gibi akım dalga şekli sinüzoidal olarak değişmektedir.



Şekil 6.9 Bir yarım köprü inverter devresine ait 4400 W yüklenme durumu için çıkış akım(3) ve gerilim(1) dalga şekilleri[13].

Kontrol teorisinde filtre frekansı çalışma frekansının 10 katı olacak şekilde seçilir[24]. Kurulacak inverter 50 Hz'lik bir sinüzoidal çıkış üreteceği için filtre tasarımı 500 Hz'e göre yapılmıştır.

LC filtrenin bobin değeri çalışılacak görünür güce göre bulunan empedansın %3 değerine göre seçilmiştir. Tasarlanan inverter için görünür güç 2 kVA ve çalışma gerilimi 120 V_{rms}'tir. Buna göre çıkışta olabilecek maksimum akım değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$I_{rms} = \frac{S}{V_{rms}} \quad (6.1)$$

$$I_{rms} = \frac{2000}{120} = 16.6 \text{ A} \quad (6.2)$$

$$I_{max} = \sqrt{2} \times 16.6 = 23.47 \text{ A} \quad (6.3)$$

Filtre endüktansında 23.47 A değerine göre iletken seçilir. Devrenin Z empedansını hesaplayarak %3 empedans değerini bulmak için;

$$Z = \frac{V_{rms}^2}{S} \quad (6.4)$$

$$Z = \frac{120^2}{2000} = 7.2\Omega \quad (6.5)$$

$$X_L = \%3 \times Z \quad (6.6)$$

$$X_L = \%3 \times 7.2 = 216m\Omega \quad (6.7)$$

Bulunan bu %3'lük değer endüktansa ait endüktif reaktans olacaktır. Bu değerden L endüktans değeri çekilirse;

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (6.8)$$

$$L = \frac{216 \times 10^{-3}}{2\pi \times 50} = 0.687mH \quad (6.9)$$

L endüktansının değeri bulunmuş olur. 500 Hz'lik filtre tasarımında kullanılacak kondansatör değeri ise;

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.10)$$

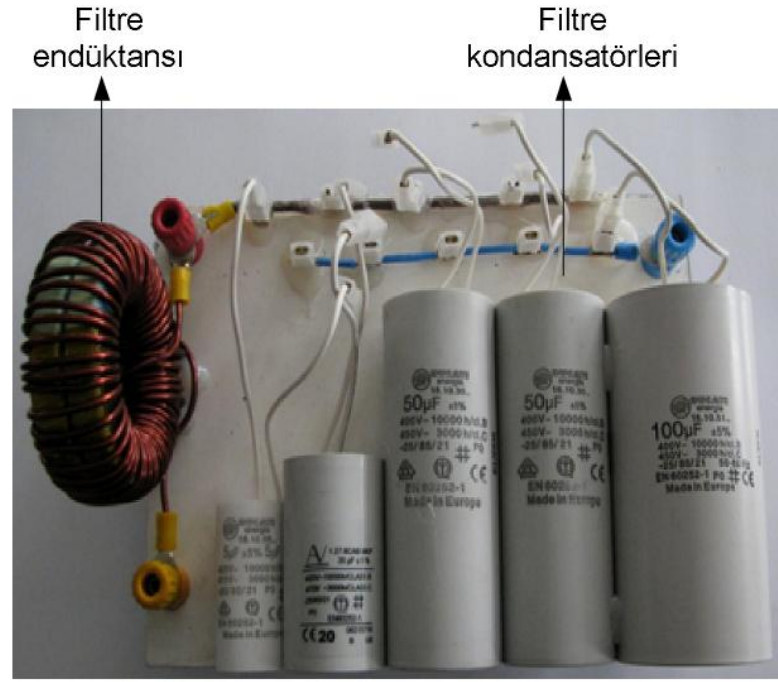
formülünden hesaplanabilir. Burada, C değeri;

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L f^2} \quad (6.11)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \times 0.687 \times 10^{-3} \times 500^2} = 147\mu F \quad (6.12)$$

olarak elde edilir.

Şekil 6.10'da deney devresinde kullanılan LC filtresi gösterilmiştir.



Şekil 6.10 LC filtre devresi

6.6 DA Bara Kondansatörü

Kurulan sistemde kullandığımız kondansatörler 400 V_{DA} gerilim ve 2700 µF kapasite değerine sahiptir. Alt ve üst kolda ikişer adet olmak üzere toplam 4 adet kullanılmıştır. Ayrıca doğrultucu çıkışına da iki adet aynı özellikte kondansatör paralel bağlanarak, oluşabilecek herhangi bir gerilim dalgalanmasının önlemi alınmıştır.



Şekil 6.11 DA bara kondansatörü

6.7 Veri Ölçüm Sistemi

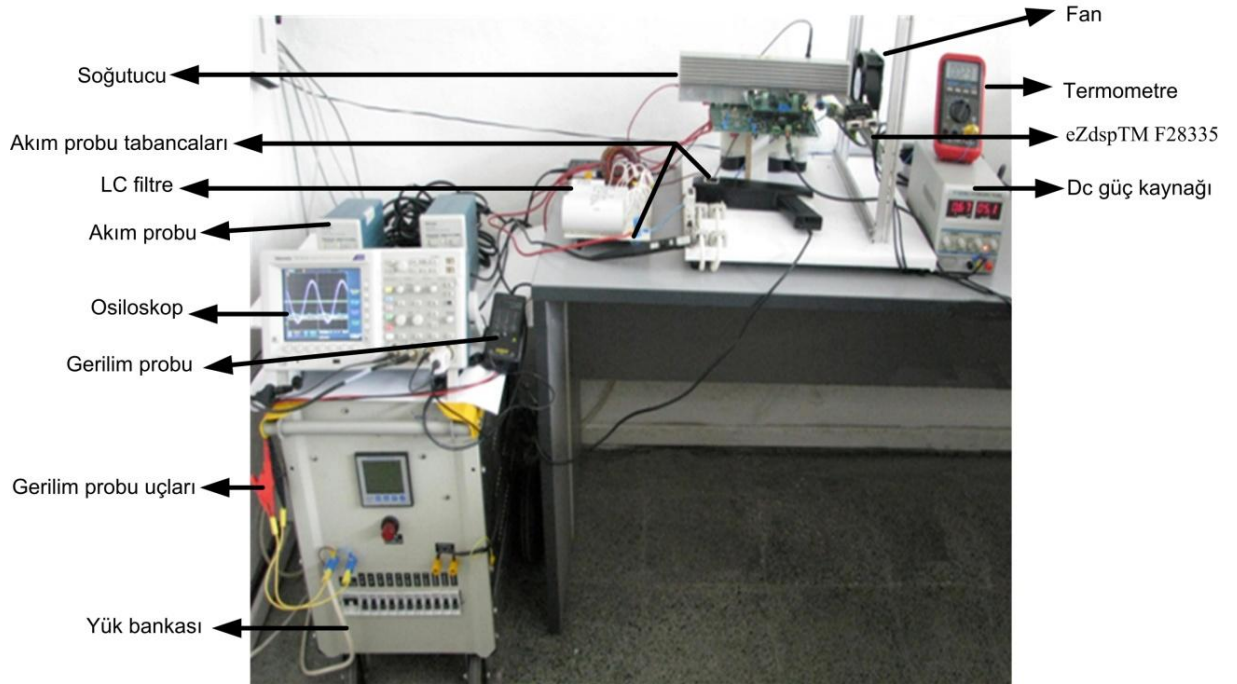
Veri ölçüm ve veri alıp işleme için akım gerilim sensörlerine ek olarak Tektronix marka osiloskop ile Tektronix akım ve gerilim sensörleri kullanılmıştır. Bu sayede

dönüştürücüden alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılmış, alınan veriler Matlab/Simulink ile hazırlanan model işlenmiş ve yazılan bir m-file verim analizi yapılmıştır. Kullanılan akım ve gerilim probu ile osiloskoba ait fotoğraflar Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12 (a) Akım probu (b) Osiloskop (c) Gerilim probu

Kurulan deney devreleri Şekil 6.13’te bir bütün olarak verilmiştir.

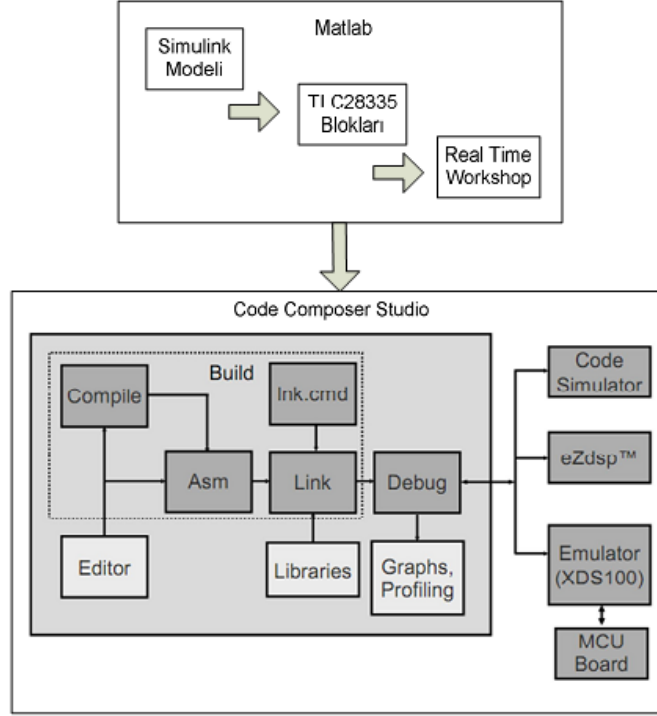


Şekil 6.13 Deney seti

6.8 Kod Hazırlama İşlemi

Matlab/Simulink, birçok sistem için içerdiği bloklarla model tabanlı gelişime ortamı sağlamaktadır. Kullanılan DSİ’ye ait blokların olduğu Simulink DSİ algoritmaları, Real Time Workshop (RTW), Link for Code Composer Studio Development Tools ve

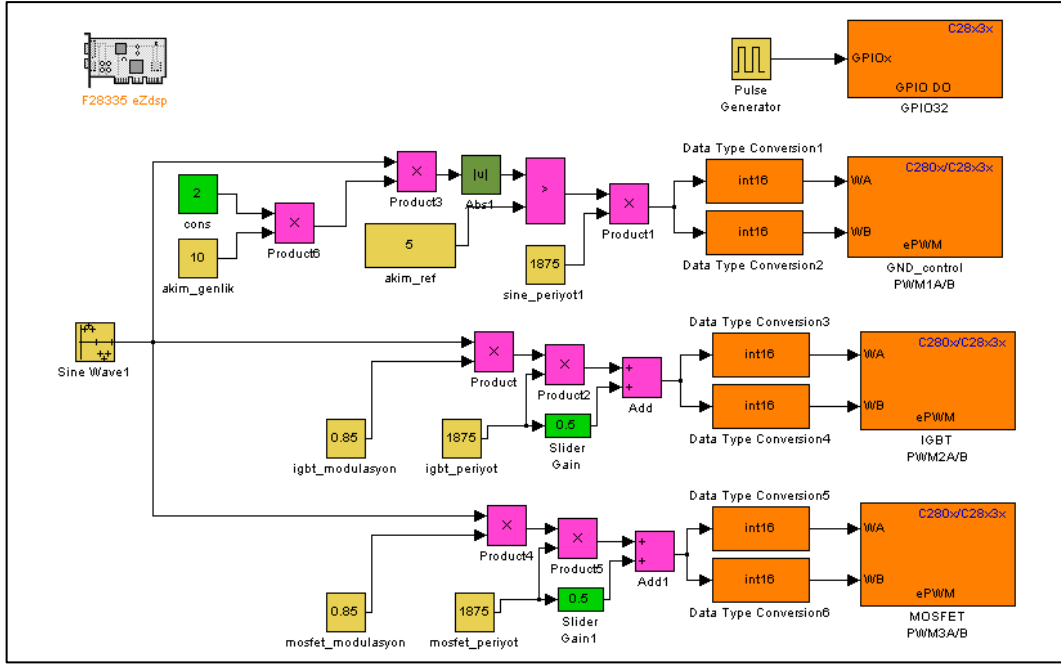
Embedded Target for TIC2000 DSP alt yazılımları ile Şekil 6.14'te görüldüğü gibi hedef DSI işlemcileri için ASM diline çevrilmekte, kodun doğrulması yapılmakta ve hedef cihaz üzerinde gerçek zamanlı olarak çalıştırılarak sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 6.14 Matlab/Simulink üzerinden DSK için kod üretme akış diyagramı [22]

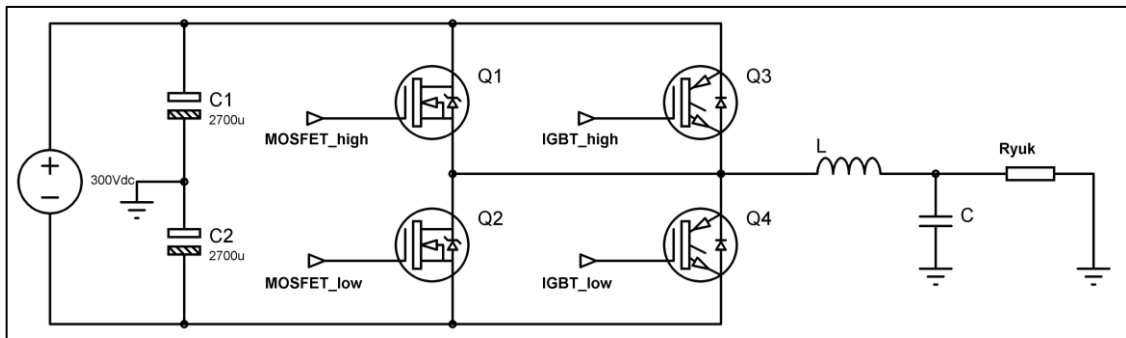
Simulink ortamındaki algoritmaların otomatik olarak RTW (Real Time Workshop) ile elde edilen kodları TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSK yazılım geliştirme ortamına aktarılır. CCS ortamında DSK'nın fiziksel donanımlarına vb. erişimi sağlayan bazı destek dosyaları simulink ortamından gelen kodlara eklenmekte ve bilgisayarın USB portuna bağlı F28335 DSK'nın üzerindeki emülatör aracılığı ile yüklenmektedir. CCS içindeki izleme penceresinden simulink bloklarına ait parametrelere kolayca erişilip değiştirilme imkanı vardır.

Matlab/Simulink ortamında SDGM algoritmasını üretecek ve hibrit çalışma durumunda anahtar seçimini yapacak bir model tasarlanmıştır (Şekil 6.15). Model tamamlandıktan sonra “Tools-Real Time Workshop-Build model” seçeneği ile kod derlenmeye başlanır. Derleme bittikten sonra Matlab, CCS ile bağlantı kurar ve kodları buraya aktarır. CCS bu koda bazı destek dosyalarını ekler, yazılım DSK içine yüklenir ve otomatik olarak çalıştırılabilir [24].



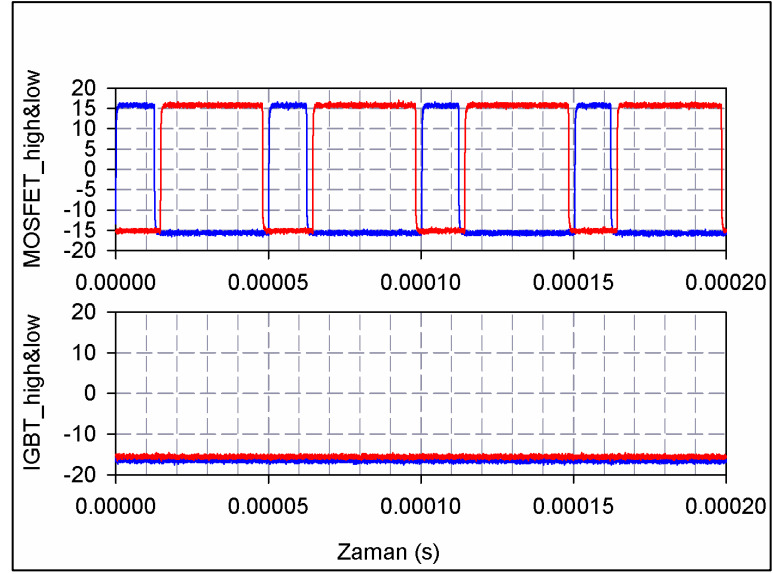
Şekil 6.15 Kontrol sinyalleri üretmek için kurulan Matlab/Simulink modeli

Bu modelde 50 Hz referans, 20 kHz taşıyıcı sinyali üretilmiştir. 0.85 modülasyon indeksi kullanılmıştır. Kapı sinyalleri arasında ölü zaman bırakmak için PWM bloğunun içinde uygun parametreler girilmiştir. Bu sayede iki anahtarın aynı anda ilettime girip kısa devreye yol açması engellenmiştir. Şekil 6.16’da hibriti anahtarların bulunduğu yarım köprü inverter devresinin şematik gösterimi verilmiştir.



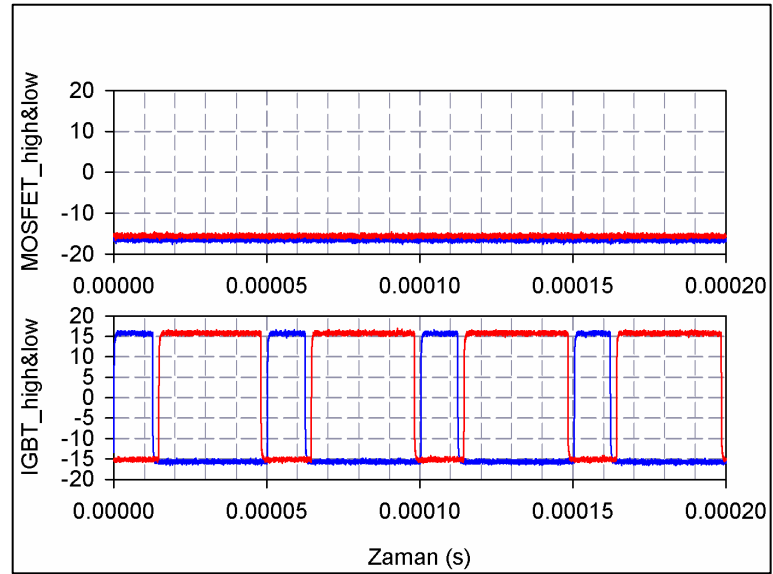
Şekil 6.16 Hibrit anahtarlı inverter devresi

Şekil 6.17’de sadece MOSFET’in iletimde olacağı durumda paralel bağlı iki yarım köprü inverteri oluşturan MOSFET ve IGBT’lerin kapılarına uygulanan sinyaller göstermiştir. Bu aralıkta MOSFET kapısına SDGM sinyalleri uygulanırken IGBT kapıları -15 V gerilim altında tutularak herhangi bir şekilde ilettime girmesi engellenmiştir.



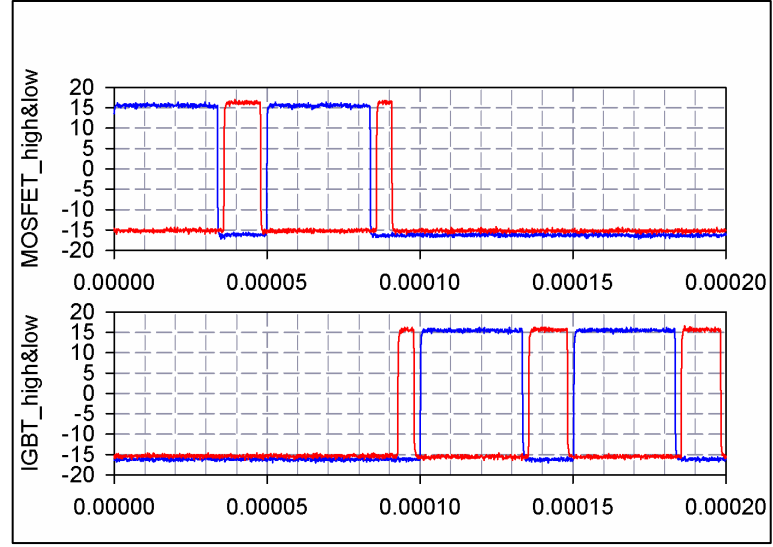
Şekil 6.17 MOSFET anahtarlandığında MOSFET ve IGBT kapılarına uygulanan sinyaller

Şekil 6.18’de sadece IGBT’nin iletimde olacağı durumda paralel bağlı iki yarım köprü inverteri oluşturan MOSFET ve IGBT’lerin kapılarına uygulanan sinyaller göstermiştir. Bu aralıkta IGBT kapısına SDGM sinyalleri uygulanırken MOSFET kapıları -15 V gerilim altında tutularak herhangi bir şekilde iletime girmesi engellenmiştir.



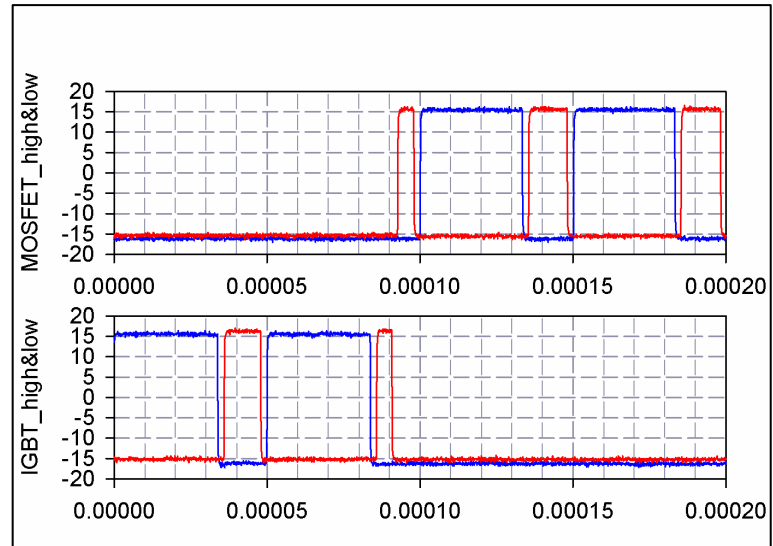
Şekil 6.18 IGBT anahtarlandığında MOSFET ve IGBT kapılarına uygulanan sinyaller

Şekil 6.19’da ise hibrit çalışma durumu MOSFET-IGBT geçişi için anahtar kapılarına uygulanan sinyaller gösterilmiştir.



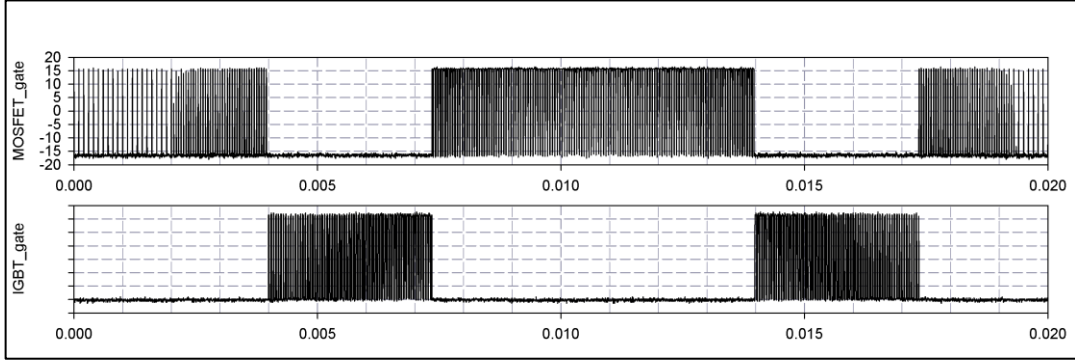
Şekil 6.19 MOSFET-IGBT geçişi sırasında anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller

Şekil 6.20’de ise hibrit çalışma durumu IGBT -MOSFET geçişi için anahtar kapılarına uygulanan sinyaller gösterilmiştir.

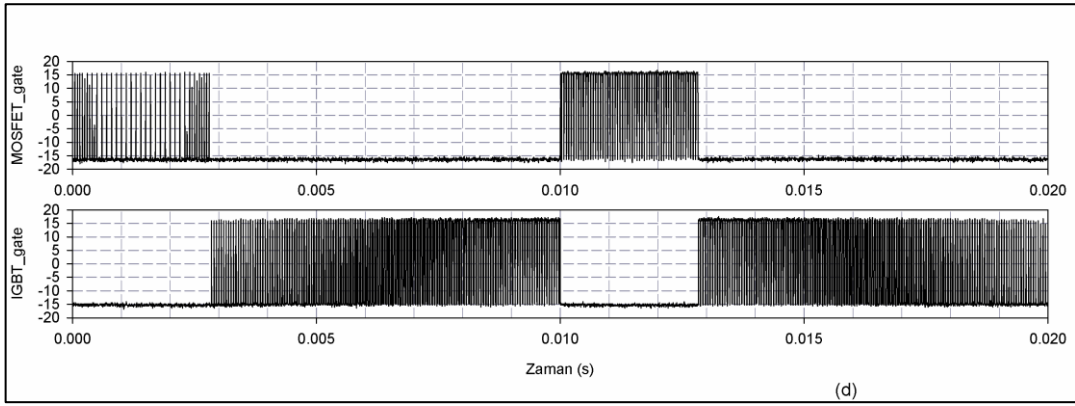


Şekil 6.20 IGBT-MOSFET geçişi sırasında anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller

Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de anahtar geçişi için sırasıyla %50 ve %90 akım sınırları için anahtarların iletimde olduğu aralıklar ve bu aralıklarda anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller göstermiştir. %50 akım sınırı için MOSFET’in anahtarlandığı aralık büyük iken bu süre %90 akım sınırında iken daha küçük olmaktadır.



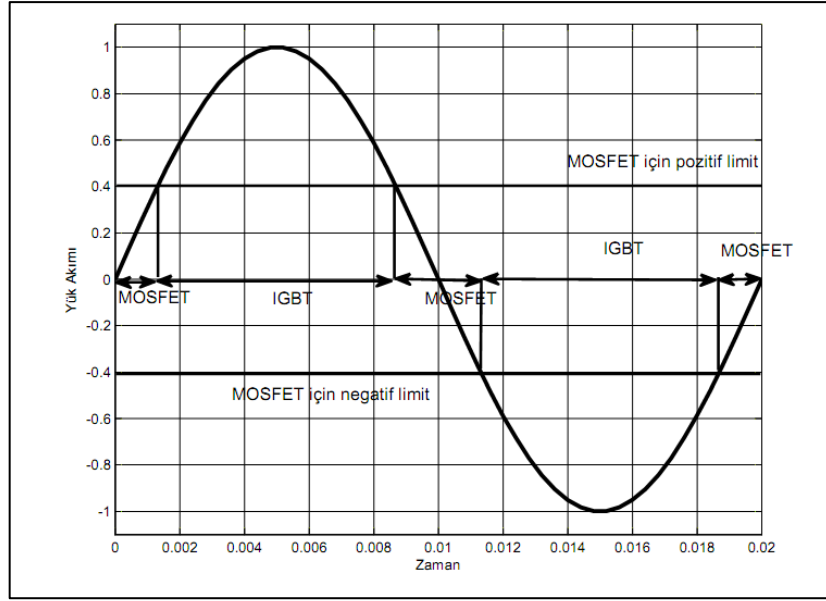
Şekil 6.21 %50 akımda anahtar seçimi ve anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller



Şekil 6.22 %90 akımda anahtar seçimi ve anahtarların kapılarına uygulanan sinyaller

6.9 Deneysel Sonuçlar

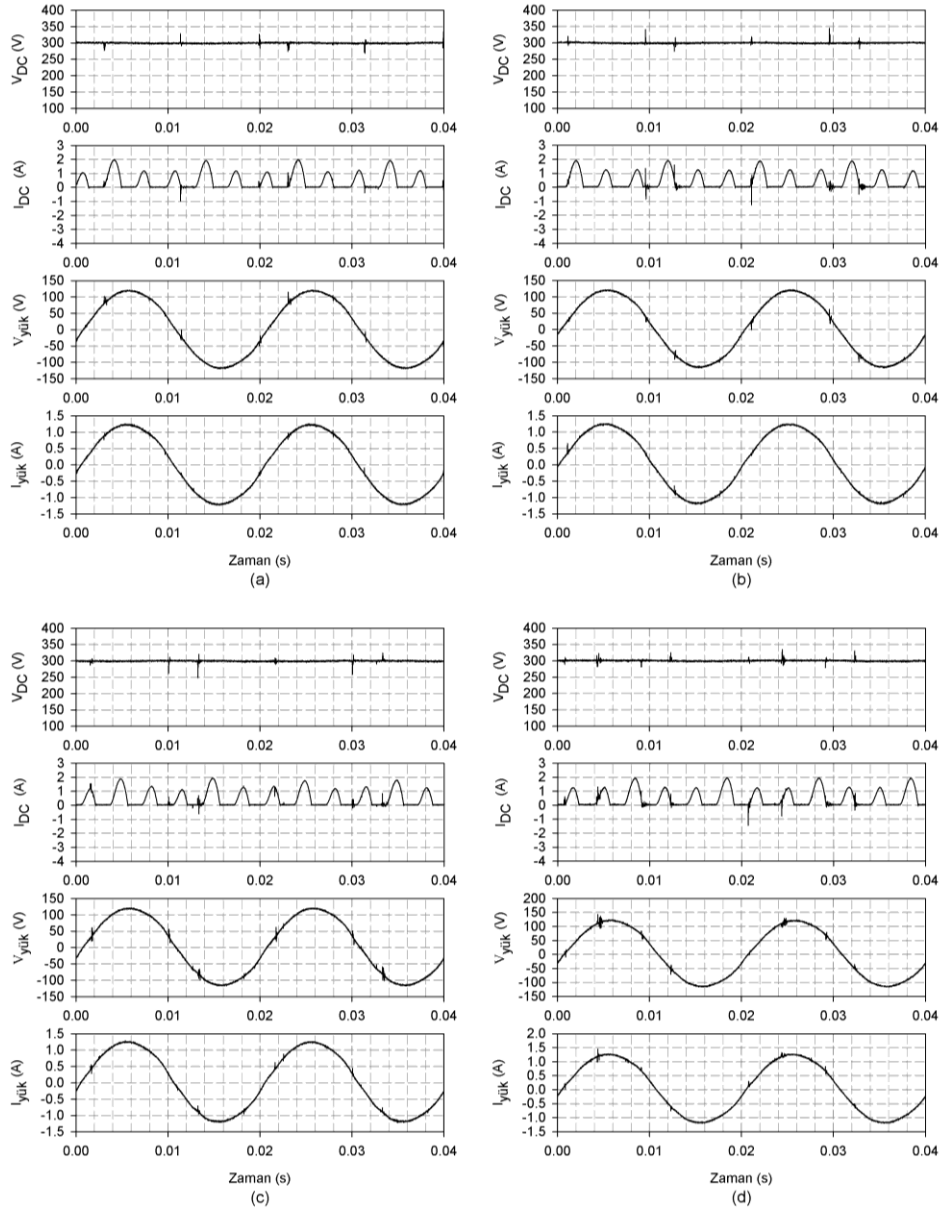
Deneylerde DA bara gerilimi, DA baradan çekilen akım, yük uçlarındaki gerilim ve yük akımı ölçümleri alınmıştır. Çıkış gücü ve giriş gücü bu verileri kullanarak hesaplanmış ve $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ ile verim hesabı yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen verim değerleri benzetim çalışmalarından elde edilen verim değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.23 Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtar algoritması

Şekil 6.23'te yapılmak istenen anahtar seçiminin nasıl yapılacağını göstermektedir. Yukarıda bahsedilen %50 ve %90 akım sınırları Şekil 6.23'te "MOSFET için pozitif ve negatif limit" olarak gösterilen değerleri ifade etmektedir. Pozitif ve negatif alternensta akım mutlak değer olarak belirlenen referans değere ulaştığında anahtar seçimi belirlenen şekilde yapılmaktadır. Bu sayede istenilen hibrit çalışma şartı sağlanmaktadır.

Şekil 6.24, Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de dört farklı yük durumu için dört farklı algoritmanın uygulanması ile elde edilen giriş ve çıkış akım gerilim değerleri verilmiştir.

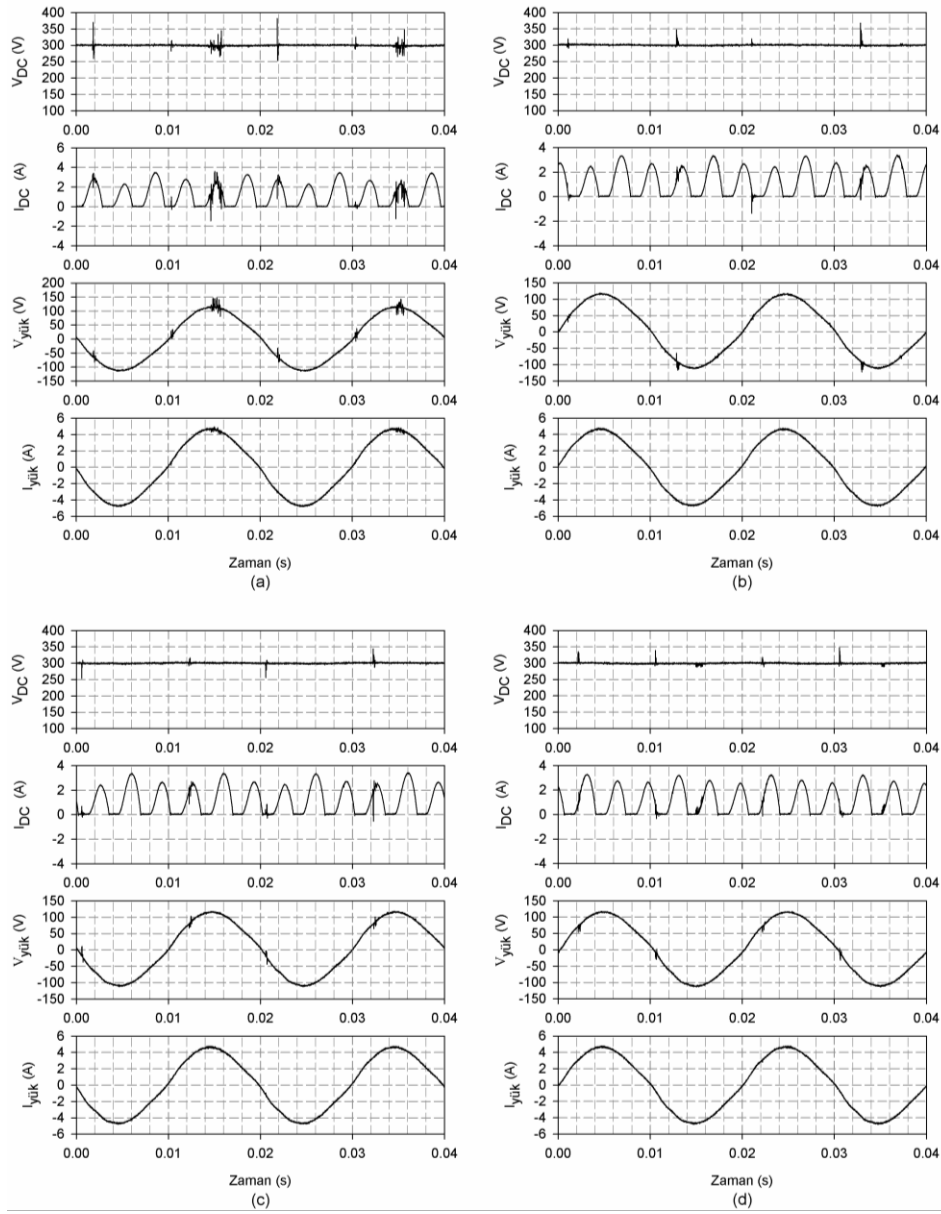


Şekil 6.24 (a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (95.92 Ω yük durumunda)

İnverter çıkışında 95.92 Ω 'luk yük bağlıken inverterden 75 W'lık bir güç çekilmektedir. Bu güç seviyesinde IGBT tek başına en düşük verime sahipken hibrit kullanımlardan daha iyi verim elde edilmiştir.

Çizelge 6.1 Şekil 6.24'de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri

	Yük (ohm)	V_{DCort} (V)	I_{DCort} (A)	$V_{yük_{rms}}$ (V)	$I_{yük_{rms}}$ (A)	P_g (W)	P_o (W)	Verim (%)
a	95.92	300.05	0.45	85.56	0.88	133.94	75.05	56.03
b		299.73	0.47	84.96	0.87	140.55	74.02	52.67
c		299.54	0.46	84.90	0.88	137.45	74.54	54.23
d		300.12	0.48	85.00	0.88	143.80	74.57	51.85

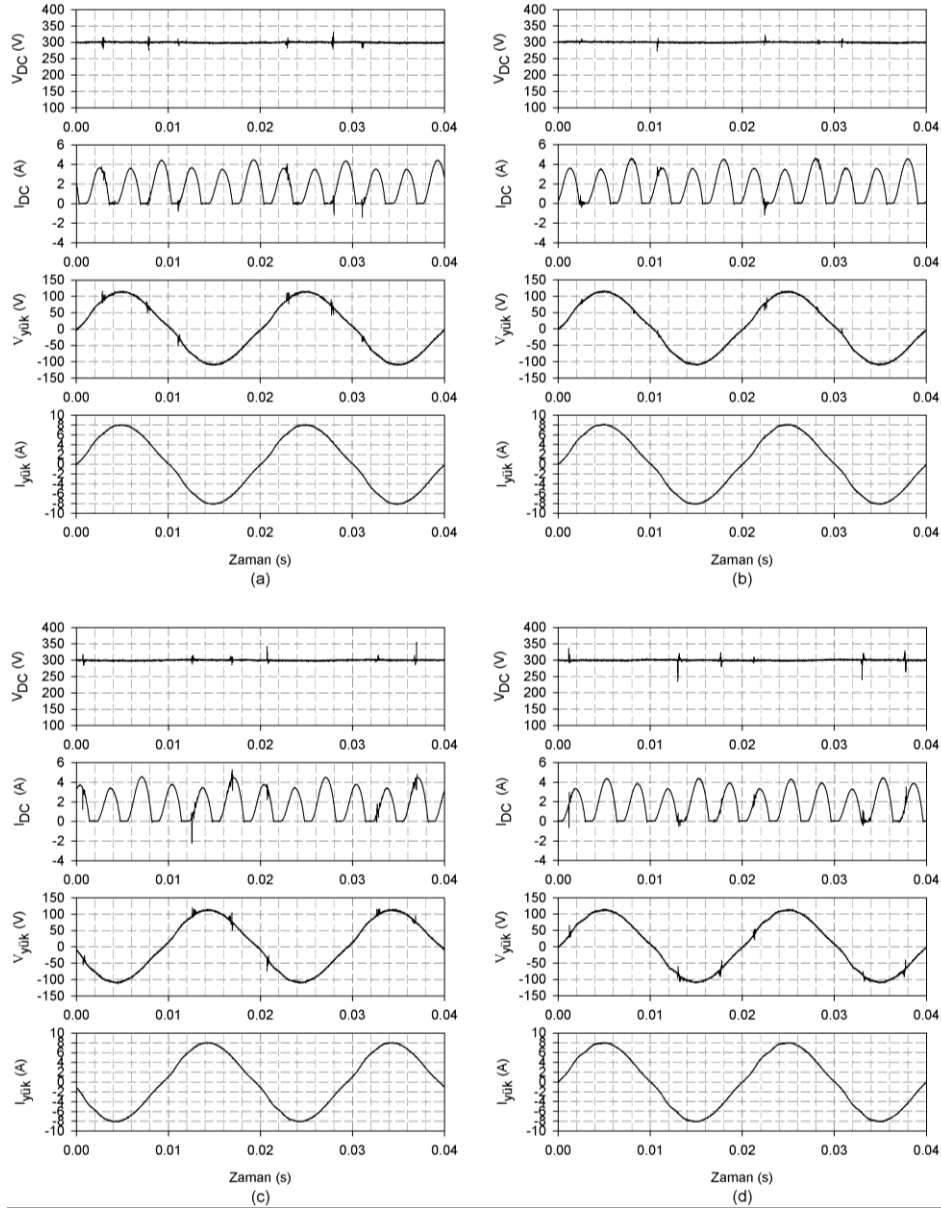


Şekil 6.25 (a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (23.98 Ω yük durumunda)

İnverter çıkışında 23.98 Ω 'luk yük bağlıken inverterden 260 W'lık bir güç çekilmektedir. Bu güç seviyesinde IGBT tek başına hibrit kullanıma göre daha iyi verimlere ulaşmıştır.

Çizelge 6.2 Şekil 6.25'te verilen grafiklere ait değerler ve verimleri

	Yük (ohm)	V_{DCort} (V)	I_{DCort} (A)	$V_{yük_{rms}}$ (V)	$I_{yük_{rms}}$ (A)	P_g (W)	P_o (W)	Verim (%)
a	23.98	300.35	1.14	79.58	3.28	341.16	260.59	76.38
b		300.29	1.15	79.22	3.26	346.17	257.44	74.37
c		300.22	1.15	78.98	3.25	345.78	255.93	74.02
d		299.70	1.15	79.20	3.26	344.72	257.65	74.74

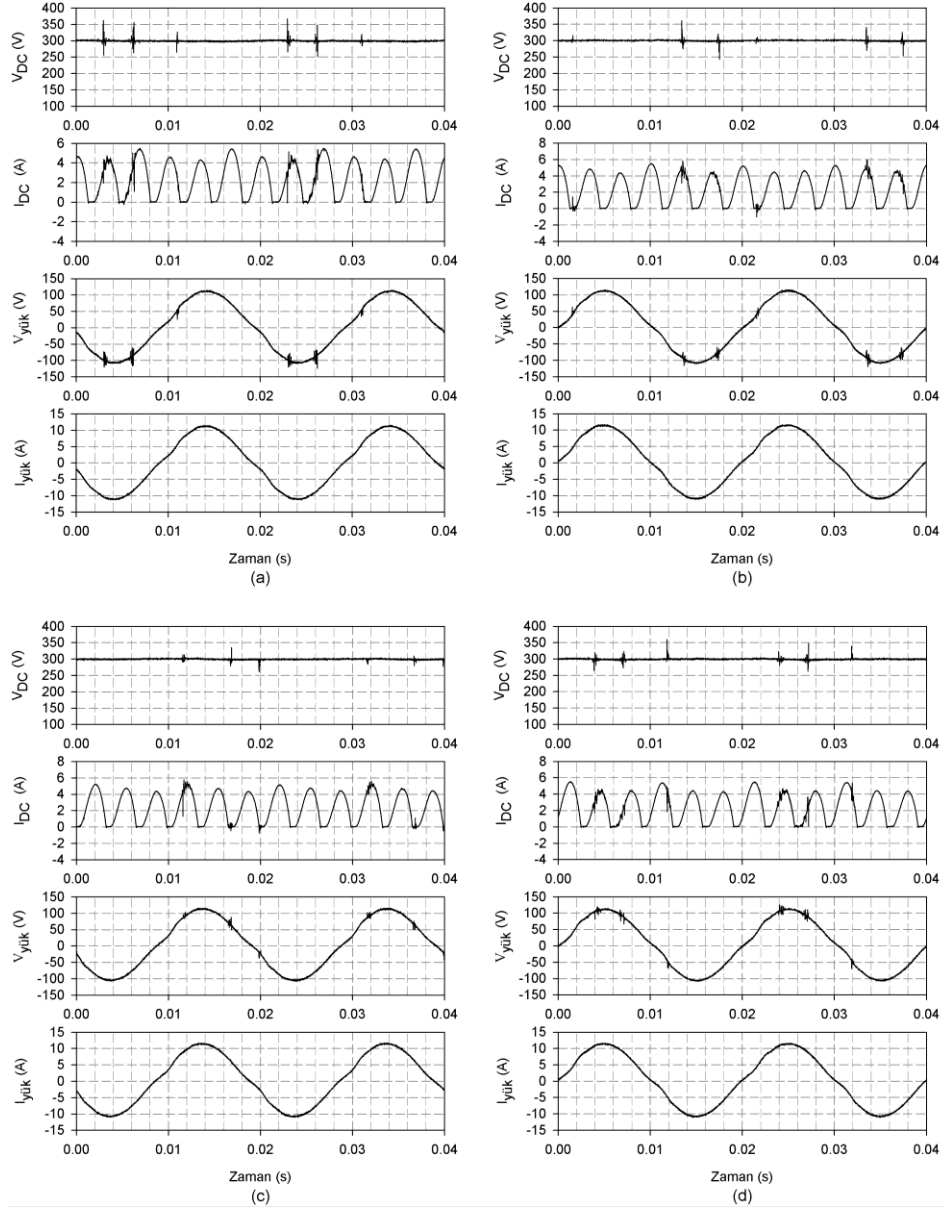


Şekil 6.26 (a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (13.70 Ω yük durumunda)

İnverter çıkışında 13.70 Ω 'luk yük bağlıyken inverterden 426 W'lık bir güç çekilmektedir. Bu güç seviyesinde IGBT tek başına kullanıldığı duruma göre MOSFET-IGBT-MOSFET kullanımı daha iyi sonuç vermiştir.

Çizelge 6.3 Şekil 6.26'de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri

	Yük (ohm)	V_{DCort} (V)	I_{DCort} (A)	$V_{yük_{rms}}$ (V)	$I_{yük_{rms}}$ (A)	P_g (W)	P_o (W)	Verim (%)
a	13.70	300.04	1.77	77.04	5.54	530.10	426.34	80.43
b		299.89	1.79	77.09	5.54	537.90	426.74	79.33
c		299.66	1.78	76.53	5.51	533.59	420.99	78.90
d		299.83	1.77	76.55	5.51	531.89	421.52	79.25



Şekil 6.27 (a) MOSFET (b) IGBT (c) MOSFET-IGBT-MOSFET ve (d) IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları için V-I grafikleri (9.69Ω yük durumunda)

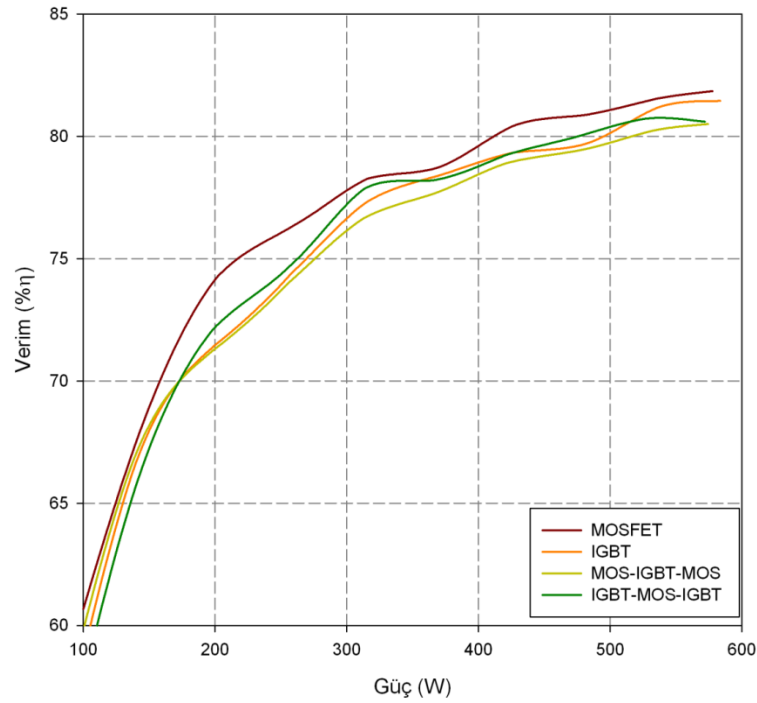
İnverter çıkışında 9.69Ω 'luk yük bağlıyken inverterden 577 W 'lık bir güç çekilmektedir. Bu güç seviyesinde IGBT tek başına kullanıldığı duruma göre MOSFET-IGBT-MOSFET kullanımı daha iyi sonuç vermiştir.

Çizelge 6.4 Şekil 6.27'de verilen grafiklere ait değerler ve verimleri

	Yük (ohm)	V_{DCort} (V)	I_{DCort} (A)	$V_{yük_{rms}}$ (V)	$I_{yük_{rms}}$ (A)	P_g (W)	P_o (W)	Verim (%)
a	9.69	299.70	2.36	75.47	7.66	705.72	577.61	81.85
b		300.37	2.39	75.89	7.70	716.44	583.52	81.45
c		299.59	2.38	75.30	7.63	713.36	574.28	80.50
d		299.53	2.37	75.07	7.63	709.43	571.77	80.60

Yukarıdaki tablolardan görüldüğü üzere hibrit anahtar kullanımı iyi sonuçlar vermiştir. Genel olarak uygulanan dört algortma için, güç seviyesi arttıkça verim artmıştır.

Şekil 6.28’de deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerin matlab ile işlenmesi ile verim grafikleri dört farklı algortma için çıkartılmıştır. MOSFET’e ait verim grafiği en yüksek çıkarken IGBT’ye ait verim bu grafiğin altında çıkmıştır. Hibrit kullanıma bakacak olursak; IGBT-MOSFET-IGBT algortması MOSFET-IGBT-MOSFET algortmasına göre düşük güçlerde daha iyi durumdadır. Benzetimde 800 W seviyelerinde elde edilen kesişme aynı şartlarda deneysel çalışmada görülememiştir. İnverterden çekilen güç arttıkça dönüştürücünün verimi artmıştır.



Şekil 6.28 Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen Verim-Güç grafiği

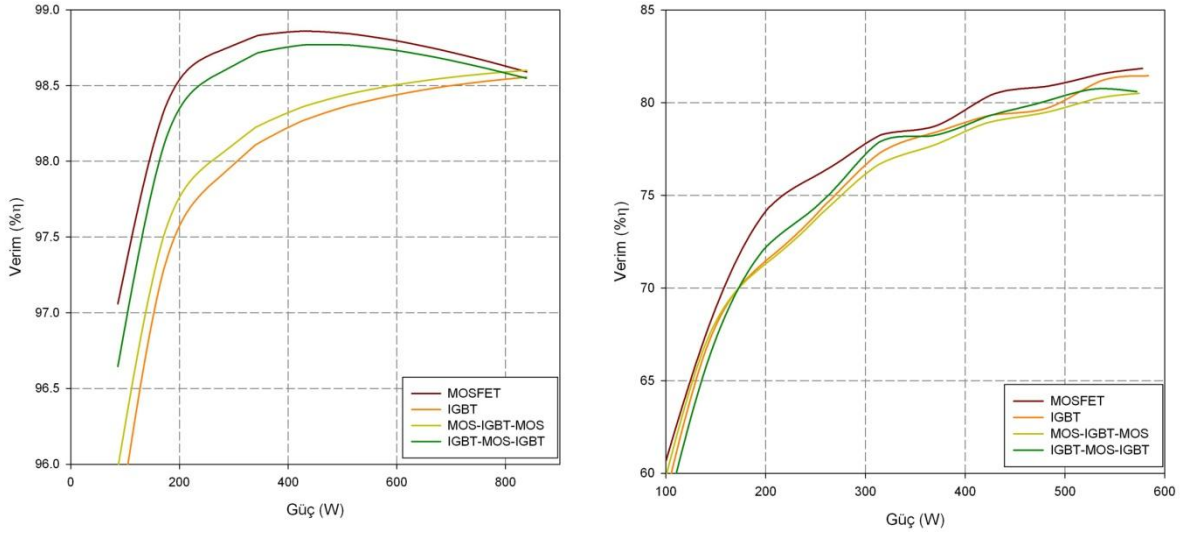
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hibrit anahtar kullanımı ile inverter devresinin veriminin artırılmasına yönelik bir tasarım incelenmiştir. İnverter devrelerinde yaygın olarak kullanılan IGBT anahtarı yerine paralel bağlı MOSFET-IGBT hibrit anahtar kullanımı ve bu anahtarın yük akımı geri beslemeli kontrolü hem benzetim hem de deneysel çalışmada incelenmiştir. Bu inverterin kontrolünde Texas Instrument eZdsp™ F28335 DSK kullanılmış ve bu DSK'nın Matlab/Simulink ile programlanması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin verim üzerine etkisini incelemek için farklı anahtarlama algoritmaları denenmiştir. Bu algoritmalar sadece MOSFET, sadece IGBT, hibrit MOSFET-IGBT-MOSFET ve hibrit IGBT-MOSFET-IGBT çalışma şartları olarak belirlenmiştir.

Deneylerde DA bara gerilimi, DA baradan çekilen akım, yük uçlarındaki gerilim ve yük akımı ölçümleri alınmıştır. Çıkış gücü ve giriş gücü, gerilim ve akım değerlerinin anlık olarak çarpılmasıyla hesaplanmış ve $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ ile verim hesabı yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen verim değerleri benzetim çalışmalarından elde edilen verim değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında benzetim çalışması ve deneysel çalışmada tek başına MOSFET kullanılan durumda verim düşük güçler için en yüksek çıkmıştır. Hibrit çalışma durumu için IGBT-MOSFET-IGBT algoritması her iki çalışmada düşük güçlerde IGBT'nin tek kullanıldığı duruma göre daha iyi verime ulaşmıştır (Şekil 7.1). Böyle bir inverter devresinin evlerde kullanılacağı düşünüldüğünde düşük güçlerdeki verim artışı oldukça önemli hale gelmektedir. Çünkü deneysel olarak elde edilen bir eve ait elektrik kullanımı incelendiğinde talebin günün 20 saatinde 500 W altında olduğu

görülmüştür. Bu çalışmada önerilen hibrit anahtar kullanımı ve bu anahtarların farklı kontrolü ile özellikle düşük güçlerde inverter devresinin veriminin iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Şekil 7.1’de benzetim ve deneysel çalışma sonucu elde edilmiş Güç-Verim grafikleri bulunmaktadır.



Şekil 7.1 Benzetim ve Deneysel çalışmaları sonucu elde edilen Verim-Güç grafikleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ile en küçük verim artışı bile toplamda oldukça büyük bir enerji kazanımı anlamına gelecektir. Önerilen hibrit anahtar kullanımı şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlere de uygulanabilir. Uygulanabilir şekilde düzenlenerek yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin daha etkin kullanımı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Jiang Y., Hua G. C., Yang E. ve Lee F. C., (1993). "Soft-switching of IGBTs with the Help of MOSFETs in Bridge-type Converters", 24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 1993, 151-157.
- [2] Hoffmann K. F. ve Karst J. P., (2005). "High Frequency Power Switch-Improved Performance by MOSFETs and IGBTs Connected in Parallel", European Conference on Power Electronics and Applications, September 2005.
- [3] Hoffmann K. F. ve Karst J. P., (2005). "High Speed Complementary Drive of a Hybrid MOSFET and IGBT Power Switch", European Conference on Power Electronics and Applications, Hamburg.
- [4] Yee H. P. ve Liu D., (1997). "An ASIC to Control the Paralleling of an IGBT with a MOSFET", 20th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 1997, 1: 151-155.
- [5] Kimball J. W. ve Chapman P. L., (2004). "Evaluating Conduction Loss of a Parallel IGBT-MOSFET Combination", 39th Industry Applications Conference, October 2004, 2: 1233-1237.
- [6] Marinow A. ve Valchev V., (2009). "Power Loss Reduction in Electronic Inverters Thorough IGBT-MOSFET Combination", The 6th International Conference on Mining Science & Technology, 1539-1543.
- [7] O'Neill, Silicon Carbide MOSFETs Challenge IGBTs, www.powerelectronics.com, Power Electronic Technology, September 2008
- [8] Blaabjerg F., Zhe Chen ve Kjaer S.B., (2004). "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, 19: 1184-1194.
- [9] Xue Y., Chang L., Kjar S., Bordonou J. ve Shimizum T., (2004). "Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators-An Overview", IEEE Transactions on Power Electronics, 19: 1305-1314.
- [10] Todorovic M. H., Palma L., Choi W., Dowling C., Humphrey D., Tarbell D., Enjeti P. ve Howze J., (2003). "Development of a Low Cost Fuel Cell Inverter System with DSP Control", Fuel Cell Seminar Proceedings, 27-32.
- [11] Nergaard T.A., Ferrell J.F., Leslie L.G. ve Jih-Sheng Lai, (2002). "Design Considerations for a 48 V Fuel Cell to Split Single Phase Inverter System with Ultra-capacitor Energy Storage", IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 4: 2007-2012.

- [12] Krein P. T. ve Balog R., (2002). "Low Cost Inverter Suitable for Medium-Power Fuel Cell Sources", IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 1: 321-326.
- [13] Jinhee Lee, Jinsang Jo, Sewan Choi ve Soo-Bin Han, (2006). "A 10-kW SOFC low-Voltage Battery Hybrid Power Conditioning System for Residential Use", IEEE Transaction on Energy Conversion, Issue 2, June 2006, 21: 575-585.
- [14] Choi W., Howze Jo. W. ve Enjeti P., (2006). "Fuel-cell Powered Uninterruptible Power Supply Systems- Design Considerations", Journal of Power Sources, 157: 311-317.
- [15] Zhan Y., Zhu J., Guo Y. ve Wang H., (2008). "Intelligent Uninterruptible Power Supply System with Backup Fuel Cell-Battery Hybrid Power Sources", Journal of Power Sources
- [16] Zubietta L. ve Panza G., (2006). "A Wide Input Voltage and High Efficiency DC-DC Converter for Fuel Cell Applications", 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 2005, 1: 85-89.
- [17] Kim Y., Moon H., Kim S., Cheong E. ve Won C., (2004). "A Fuel Cell System with Z-source Inverters and Ultra-capacitors", The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, August 2004, 3: 1587-1591.
- [18] Selamoğulları U. S., Willemain T. R. ve Torrey D.A., (2007). "A systems Approach for Sizing a Stand-alone Residential PEMFC Power System", Journal of Power Sources, 171: 802-810.
- [19] Selamoğulları U. S., Willemain T. R. ve Torrey D.A., (2010). "A systems Approach for Sizing a Stand-alone Residential Fuel Cell Power Inverter Design", IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2010, 25: 741-749.
- [20] Skvarenina T.L., (2002). Power Electronic Handbook, CRC Press LLC, Purdue University, West Lafayette
- [21] Bose B. K., (2002). Modern Power Electronics and AC Drives, Prantice Hall PTR, The University of Tennessee, Knoxville
- [22] Texas Instrument Teaching CD-ROM, <http://www.ti.com/lit/zip/ssqc019> (C2000 Teaching CD-ROM), 2 Haziran 2011
- [23] Texas Instrument Teaching CD-ROM, <http://www.ti.com/lit/zip/ssqc016> (C2000 Teaching CD-ROM), 2 Haziran 2011
- [24] Cuma, M. U., Teke A., Tümay M, Bayındır K. Ç. ve Özgür M. S., (2009). "Experimental Architecture of a DSP Based Signal Generation for PWM Inverter", Wiley Inter Science.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hakan AKÇA
Doğum Tarihi ve Yeri : 25/05/1986 Ödemiş
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hakanakca1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	...
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Selçuk Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Ödemiş Lisesi	2003