



**ÇİFT YÖNLÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERİN
ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Alihan ŞEKER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Alihan ŞEKER

04/12/2024

ÇİFT YÖNLÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERİN ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Alihan ŞEKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Günümüzde elektronik cihazların artması ile enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin verimli bir şekilde kullanılması daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinin ve elektrikli araçların yaygınlaşması ile sadece enerjinin depolanması değil, depolanan bu enerjinin çevreyle de paylaşılması enerji verimliliğini artırmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemlerinde (güneş enerji panelleri vb.) depolanan enerjinin, şebekeyi besleyememesi durumunda ya da ana kaynağın kesilmesi durumunda şebekeyi kesintisiz bir şekilde besleyebilmesi gibi faktörler çift yönlü DC-DC dönüştürücülerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Çift yönlü dönüştürücülerde de elektromanyetik girişim problemleri her DC-DC dönüştürücüde olduğu gibi ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak tasarlanan dönüştürücüde tasarım performansının incelenmesi ve bununla beraber elektromanyetik girişim önlemlerinin alınması, alınan önlemlerin performansının izlenmesi bu konu hakkında bir fikir oluşmasını sağlayacaktır.

Bilim Kodu : 20206
Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik girişim, DC-DC Dönüştürücü, frekans, anahtarlama, batarya
Sayfa Adedi : 55
Danışman : Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU

INVESTIGATION OF THE ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE PERFORMANCE
OF BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER CIRCUITS

(M. Sc. Thesis)

Alihan ŞEKER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

Nowadays, with the increase in electronic devices, storing energy and using the stored energy efficiently has become more important. Especially with the spread of renewable energy systems and electric vehicles, not only storing energy but also sharing this stored energy with the environment increases energy efficiency. Factors such as the ability of the energy stored in renewable energy systems (solar energy panels, etc.) to feed the grid uninterruptedly if it cannot feed the grid or if the main source is cut off, have led to the emergence of bi-directional DC-DC converters. Electromagnetic Interference problems occur in bidirectional converters, as in every DC-DC converter. For example, performance of the designed device, as well as taking Electromagnetic Interference precautions and monitoring its performance will provide an idea on this subject.

Science Code : 20206
Key Words : Electromagnetic interference, DC-DC Converter, frequency, battery
Page Number : 55
Supervisor : Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasında, danıőmanım Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU 'ya, teknik altyapı ve gerekli alıőma ortamını sunduğu için BRENSAN ENERJİ VE SAVUNMA 'ya, son olarak da sevgili eőime ve aileme teőekkÖrlerimi iletmeyi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN ELEMANLAR.....	5
2.1. Kapasitörler	5
2.2. İndüktörler.....	6
2.3. MOSFET	7
3. DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ	9
3.1. Alçaltıcı Dönüştürücü Devreler	9
3.2. Yükseltici Dönüştürücü Devreler.....	11
3.3. Alçaltıcı-Yükseltici Dönüştürücü Devreler.....	12
4. DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERDE EMI	15
4.1. Fourier Analizi	15
4.2. Elektromanyetik Girişim (EMI).....	16
4.2.1. İletim yoluyla yayılma	19
4.2.2. Radyasyon yoluyla yayılma	19
4.3. EMI Filtrelerin Tasarımı	19
4.4. CE102 Testi.....	24
5. ÇİFT YÖNLÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	27

	Sayfa
6. TASARIM VE UYGULAMA	33
6.1. ÇYD Tasarım ve Uygulama.....	33
6.2. Filtre Tasarımı ve Uygulama	41
7. SONUÇ	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Güç akış şeması	2
Şekil 2.1. Kapasitör sembolik gösterimi	6
Şekil 2.2. İndüktör sembolik gösterimi.....	7
Şekil 2.3. Terminallerine gerilim uygulanmış bir MOSFET	7
Şekil 2.4. N Kanal ve P Kanal yapısına sahip MOSFET'lerin gösterimi.....	8
Şekil 3.1. Alçaltıcı dönüştürücü devre yapısı	9
Şekil 3.2. Alçaltıcı devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre.....	10
Şekil 3.3. Yükseltici dönüştürücü devre yapısı.....	11
Şekil 3.4. Yükseltici devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre	12
Şekil 3.5. Alçaltıcı-yükseltici devre yapısı	12
Şekil 3.6. Alçaltıcı-yükseltici devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre.....	14
Şekil 4.1. MOSFET'in parazitik elemanlarının gösterimi	17
Şekil 4.2. Filtre türleri	20
Şekil 4.3. Genel bir pasif EMI Filtre.....	21
Şekil 4.4. İndüktör frekans ve empedans eğrisi	22
Şekil 4.5. Kapasitör frekans ve empedans eğrisi	22
Şekil 4.6. Pasif EMI filtre şematik diagramı.....	23
Şekil 4.7. CE102 testi limit eğrisi	25
Şekil 4.8. CE102 testi ölçüm düzeneği	25
Şekil 5.1. ÇYD devre yapısı	27
Şekil 5.2. Terminal 1 uçlarına 24V uygulanmış yükseltme modunda çalışan bir ÇYD.....	28
Şekil 5.3. Terminal 2 uçlarına 32V uygulanmış alçaltıcı modunda çalışan bir ÇYD.....	30
Şekil 6.1. BQ25756 genel şematik çizimi.....	36
Şekil 6.2. EMI Filtre şematik çizimi.....	46

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Bir kare dalganın Fourier serisi açılımı	16
Resim 4.2. MOSFET kapı terminallerinde oluşan osilasyon	18
Resim 4.3. Synqor firmasına ait bir EMI Filtre	20
Resim 5.1. ÇYD yükseltici modu anahtarlama (mavi anahtarlama, yeşil SW noktası)	29
Resim 5.2. ÇYD yükseltici modu indüktör gerilimi	29
Resim 5.3. ÇYD yükseltici modu indüktör akımı.....	29
Resim 5.4. ÇYD alçaltıcı modu anahtarlama (mavi anahtarlama, yeşil SW noktası)	31
Resim 5.5. ÇYD alçaltıcı modu indüktör gerilimi	31
Resim 5.6. ÇYD alçaltıcı modu indüktör akımı	31
Resim 6.1. Düşürücü modunda HDRV1 sinyali osiloskop ölçümü.....	37
Resim 6.2. Düşürücü modunda LDRV1 sinyali osiloskop ölçümü	37
Resim 6.3. Düşürücü modunda L1 indüktörü gerilimi osiloskop ölçümü.....	38
Resim 6.4. Düşürücü modunda Q3 MOSFET'i kapı terminalinin osiloskop ölçümü.....	38
Resim 6.5. Yükseltici modunda HDRV1 sinyali osiloskop ölçümü.....	39
Resim 6.6. Yükseltici modunda LDRV1 sinyali osiloskop ölçümü	40
Resim 6.7. Yükseltici modunda Q3 MOSFET'i kapı terminalinin osiloskop ölçümü....	40
Resim 6.8. ÇYD filtre eklenmemiş DM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod	42
Resim 6.9. ÇYD filtre eklenmemiş CM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod	43
Resim 6.10. ÇYD filtre eklenmemiş DM gürültü ölçümü, yükseltici mod	44
Resim 6.11. ÇYD filtre eklenmemiş CM gürültü ölçümü, yükseltici mod	45
Resim 6.12. ÇYD filtre eklenmiş DM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod.....	47
Resim 6.13. ÇYD filtre eklenmiş CM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod	48
Resim 6.14. ÇYD filtre eklenmiş DM gürültü ölçümü, yükseltici mod	49
Resim 6.15. ÇYD filtre eklenmiş CM gürültü ölçümü, yükseltici mod	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB	Desibel
Hz	Hertz
Ma	Miliamper
T	Periyot
T_{off}	Anahtar kapalı kalma süresi
T_{on}	Anahtar açık kalma süresi
V	Volt
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

BDK	Baskı Devre Kartı
CCM	Sürekli İletim Modu
CM	Ortak Mod
ÇYD	Çift Yönlü DC-DC Dönüştürücü
DM	Diferansiyel Mod
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	Elektromanyetik Girişim
EUT	Test Edilen Elektronik Cihaz

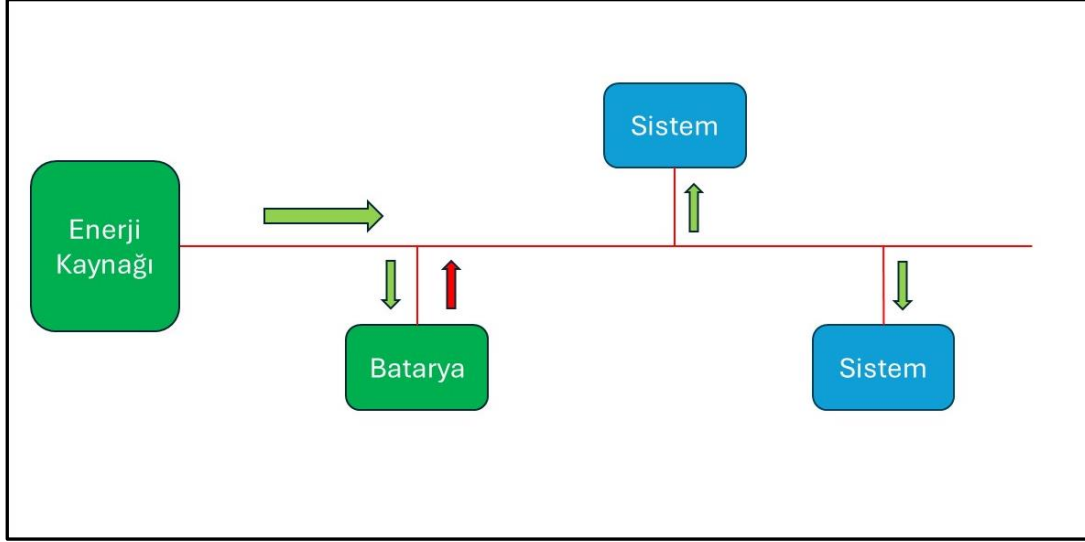
1. GİRİŞ

Küresel ısınmanın etkilerinin artması ile birlikte birçok ülke fosil yakıtların kullanımını azaltmaya çalışmaktadır [1]. Fosil yakıtların kullanımının azaltılmaya çalışılması yenilenebilir enerji kaynakları ve enerjinin depolanması üzerine yapılan çalışmaların artmasına sebep olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları hava şartları ve ortam koşullarından fazlasıyla etkilenmekte, bu durum dengesiz ve öngörülemeyen güç üretimine neden olmaktadır. Bunun için batarya gibi enerji depolama cihazları sıklıkla kullanılmaktadır [2]. Fotovoltaik panellerden üretilen elektrik enerjisinin ana hatta verilebilmesi için sabit gerilim üretilse bile bir gerilim dönüşümü yapılması gerekmektedir [3]. Bu tür uygulamalarda enerji tasarrufu ve kullanımında batarya sistemi gibi bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır[4]. Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devreler tek bir devre yapısını kullanarak iki yönlü güç dönüşümü yapabilen elektronik devrelerdir [5]. Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devreler, ana hattan aldığı giriş gerilimini çıkışında bulunan bir bataryayı şarj etmek için kullanılabilir. Ana hatta gücün kesilmesi ile birlikte, bataryadan ana hattı besleyecek şekilde iki yönlü güç akışını sağlayabilirler.

Güneş enerjisi panellerinden elde edilen elektrik enerjisi hem ana güç hattına hem de enerji depolama sistemine aktarılır. Aktarılan bu enerji, depolama sisteminde bulunan bataryaları şarj eder. Güneşin konumunun sürekli değişmesi ve hava koşulları gibi faktörler üretilen gücün dengesiz olmasına neden olur. Bu dengesiz güç üretiminin önüne geçmek ya da güneşten enerji üretilmeyen durumlarda enerji depolama sistemlerindeki güç ana hattı beslemeye başlar. Çift yönlü dönüştürücü devreler bu gibi durumlarda sistemin kesintisiz olarak çalışmasını sağlayacaktır. Şekil 1.1. Bir enerji kaynağından üretilen enerjinin sistemi beslemesini ve aynı zamanda bataryanın şarj edilmesini göstermektedir. Görüldüğü üzere batarya hem ana hattan şarj olmakta hem de ana hatta gücün yetersiz kalması durumunda destek olmaktadır. Gücün tamamen kesilmesi durumunda ise ana hattı besleyen kaynak olacaktır.

Güç elektroniğinde DC bir gerilim seviyesini başka bir DC gerilim seviyesine dönüştüren devreler sıklıkla kullanılır. Bu dönüştürücü devrelerin en sık kullanılanı verimlilik ve performans göz önüne alındığında anahtarlamalı dönüştürücülerdir. Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devreler alçaltıcı dönüştürücü ve yükseltici dönüştürücü devrelerin birlikte kullanılması ile oluşturulur. Giriş kısmında çift yönlü dönüştürücü alçaltıcı modda çalışır ve

giriş gerilimini düşürerek bataryayı şarj eder. Giriş gücünün kesilmesi ile batarya gerilimi yükseltici mod için kullanılır ve çıkış gerilimine yükseltilerek ana hatta güç sağlar.



Şekil 1.1. Güç akış şeması

Güç elektroniği devreleri yüksek frekanslı anahtarlama sinyalleri kullanarak gerilim dönüşümü yapar. Bu yüksek frekanslı anahtarlama sinyali elektromanyetik girişim problemlerinin oluşmasında başlıca rol oynar. Elektromanyetik girişim elektronik cihazların çalışmasının kötü yönde etkilenmesine neden olur. Bu tür kötü senaryoların meydana gelmemesi için uluslararası sivil, askeri ve uzay gibi alanlarda çeşitli gereksinimler tanımlanmıştır. Bu gereksinimlerin tanımlanması elektronik cihazların ortamdaki elektromanyetik alandan etkilenmemesi ya da ortamdaki cihazların elektromanyetik alana maruz bırakmaması için belirli sınırlamalar ortaya koyar. 1967'de Vietnam kıyılarında, uçak gemisi U.S.S. Forrestal'a inen bir donanma jeti, güvertede tam donanımlı ve yakıt dolu bir avcı uçağına isabet eden komuta edilmeyen mühimmat atışı yaşadı. Sonuç olarak, patlamalarda 134 denizcinin ölümüne neden oldu. Öte yandan uçak gemisinde ve uçakta ciddi hasarlar meydana geldi. Kazaya sebep olan etken ise iniş yapan uçağın, elektromanyetik girişim yoluyla silah sistemine istenmeyen bir sinyalin gönderilmesi ve bunun sonucunda silah sisteminin aktif hale gelmesine neden olmuştur [6].

Çift yönlü DC-DC dönüştürücü devrelerin ana hattan güç alması ve gerekli durumlarda ana hattı besleyebilmelerinden dolayı elektromanyetik girişim konusuna önem verilmelidir. Bu tez çalışmasında temel seviyede bir çift yönlü dönüştürücü devre tasarlanmış ve bir bataryayı şarj etmesi, güç kesintisinde ise bataryadan sağlanan güç ile ana hatta güç sağlaması

amaçlanmıştır. Tasarımın önemli noktalarından ölçümler alınmıştır. Dönüştürücü tasarımından sonra filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Filtrenin eklenmesinden önce ve sonra dönüştürücünün iletim yoluyla girişim ölçümü alınmıştır.

2. DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN ELEMANLAR

Elektronik devrelerde, gerekli durumlarda, giriş geriliminin başka bir seviyeye yükseltilmesi ya da düşürülmesi gerekir. Bu yöntemi gerçekleştiren devreler DC-DC dönüştürücü devreler olarak adlandırılır.

DC-DC dönüştürücü devrelerde, sabit olan giriş gücü, daha yüksek ya da daha alçak bir gerilim seviyesine dönüştürülürler. Elektrikli araçlar, şarj cihazları ve daha birçok alanda DC-DC dönüştürücü devrelerin kullanımları mevcuttur.

Bu tür dönüştürücü devrelerde yer alan elektronik elemanlar; indüktörler, kapasitörler ve bir anahtarlama elemanıdır (genellikle MOSFET).

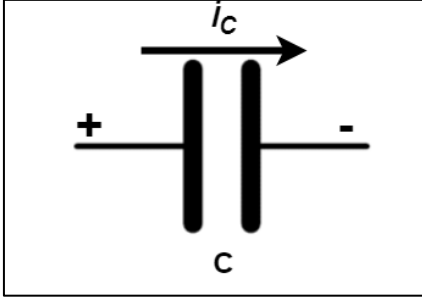
2.1. Kapasitörler

Kapasitörler elektrik devrelerinde enerji depolayabilen cihazlardır. Genellikle elektrik devrelerinde “C” ile gösterilirler. Birimi Farad’dır ve F harfi ile gösterilir.

İki iletken levha arasına dielektrik bir malzemenin yerleştirilmesiyle birlikte basit bir kapasitör elde edilmiş olur. Kapasitörün devre sembolü de bu tanıma uygun şekilde gösterilmektedir (bkz. Şekil 2.1). Bu koşul, elektrik yükünün kapasitör tarafından iletilmediğini açıkça belirtmektedir. Kapasitörün uçlarına gerilim uygulanmasına rağmen, yük dielektrik üzerinden hareket edemez, dielektrik içindeki bir yükü yer değiştirir. Gerilim zamanla değiştiğinde, yükün yer değiştirmesi de zamanla değişecektir ve bu yer değiştirme akımının oluşmasına neden olacaktır.

Terminallerden bakıldığında, yer değiştirme akımı, iletim akımından farksızdır. Akım, kapasitörün geriliminin değişim hızı ile orantılıdır.

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. Kapasitör sembolik gösterimi

Eş. 2.1' de görüldüğü üzere kapasitörler ani değişimlere karşı hızlı bir tepki gösteremezler [7].

$$v(t) = \frac{1}{C} \int i d\tau + v(t_0) \quad (2.2)$$

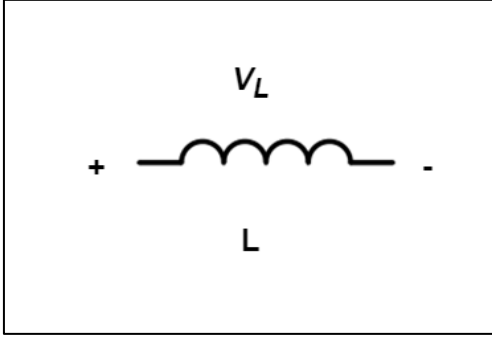
Eş. 2.2'de görüldüğü üzere, kapasitör üzerindeki gerilim değişimi zamanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Kapasitör üzerindeki gerilim zamanın bir fonksiyonu olduğu için ani şarj ya dadeşarj olamaz. Bu özelliğinden dolayı gerilim salınımlarını önlemek, istenmeyen gürültülerin devreden uzaklaştırılması gibi amaçlar doğrultusunda anahtarlamalı güç devrelerinde sıklıkla kullanılırlar.

2.2. İndüktörler

Endüktans, indüktörü tanımlamak için kullanılan devre parametresidir. L ile gösterilir, birimi Henry'dir(H). İndüktörün devre gösterimi bir sarım şeklindedir (bkz. Şekil 2.2) bu da endüktansın manyetik alanla bağlaşıklık bir iletkenin sonucu olduğunu hatırlatır. Referans akım yönünü belirledikten sonra, indüktörün uçları arasındaki gerilim Eş. 2.3 kullanılarak hesaplanır.

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

v'nin birimi Volt, L'nin birimi Henry, i'nin birimi amper ve t'nin birimi saniyedir.



Şekil 2.2. İndüktör sembolik gösterimi

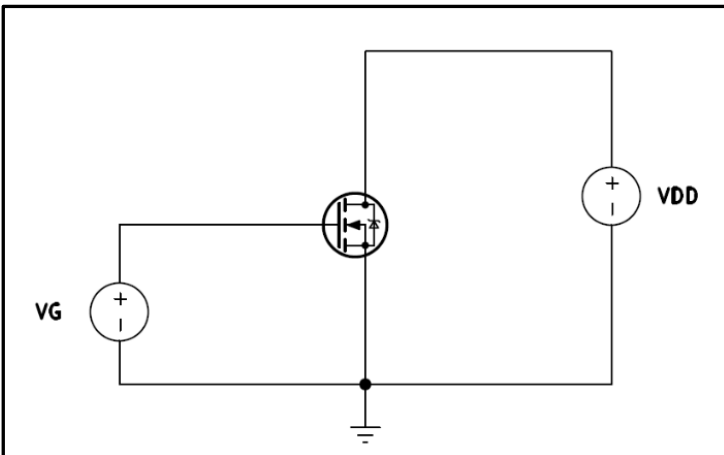
Eş. 2.3'e bakıldığında indüktörün uçları arasındaki gerilimin, akımın zamanla değişim hızına orantılı olduğu görülecektir. Akım sabitse ideal indüktör üzerindeki gerilim sıfır olacaktır. Bu durumda sabit yani doğru akım varken indüktördeki akım ani olarak değişemez [7].

$$i = \frac{1}{L} \int v d\tau + i(t_0) \quad (2.4)$$

Eş. 2.4 indüktör akımının zamanın bir fonksiyonu olarak gerilim ile olan ilişkisini vermektedir. İndüktörler enerji depolayabilme özelliklerinden dolayı anahtarlamalı güç devrelerinde sıklıkla kullanılan cihazlardır.

2.3. MOSFET

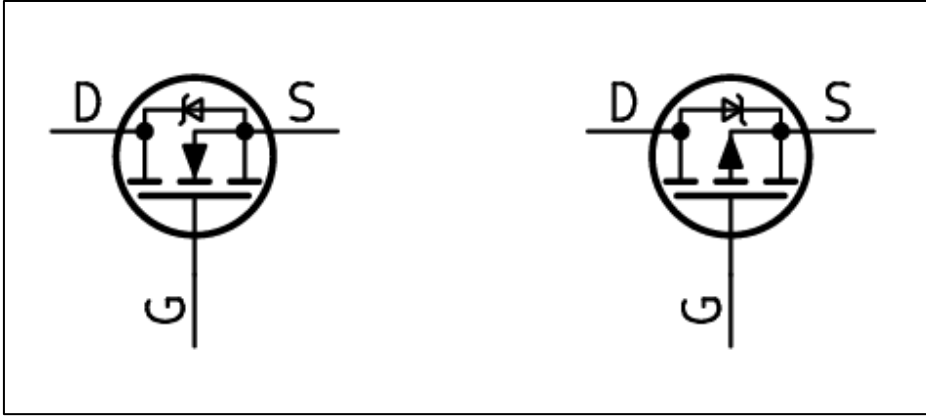
MOSFET'ler (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör), anahtarlamalı güç devrelerinde sıkça kullanılan cihazlardır. MOSFET'ler bir N-tipi ve iki P-tipi yarıiletkenin bir araya gelmesi veya bir P-tipi ve iki N-tipi yarıiletkenin bir araya gelmesinden oluşurlar.



Şekil 2.3. Terminallerine gerilim uygulanmış bir MOSFET

Şekil 2.3'te artırım tipi bir MOSFET' in eğilimlenmesi gösterilmektedir. Temel olarak MOSFET'ler iki türe ayrılır: Arttırım Tipi MOSFET'ler ve Azaltım Tipi MOSFET'ler. Arttırım Tipi MOSFET'lerde iletim kanalı normal durumlarda kapalıdır ve kapı-kaynak arasına bir gerilim uygulanana kadar da kapalı kalacaktır. Kapı ve kaynak arasına $V_{GS(TH)}$ geriliminden yüksek bir gerilim uygulandığı takdirde iletme geçeceklerdir [8].

Azaltım Tipi MOSFET'ler de iletim kanalı normalde açıktır. Kapı-kaynak arasına bir gerilim uygulandığı takdirde iletim kanalı uygulanan gerilime göre daralmaya başlayacak ve bir süre sonra da tamamen iletme kapalı hale gelecektir. Günümüzde anahtarlama yapısı olarak kullanılan MOSFET'lerin çoğu Arttırım Tipi MOSFET'lerdir ve kapı-kaynak arasına uygulanan küçük gerilimler ile cihaz iletme geçer veya kapalı durumda kalır [8].



Şekil 2.4. N Kanal ve P Kanal yapısına sahip MOSFET'lerin gösterimi

$V_{GS} = 0V$ yapılır ve akaç ile kaynak arasına bir gerilim uygulanırsa, çok sayıda serbest taşıyıcı barındıran n kanalının olmamasından dolayı akım 0A olur. Akaç ve kaynaktaki çok sayıda taşıyıcının (elektron) bulunması (n katkılı bölgelerden dolayı) yeterli değildir çünkü bu ikisi arasında bir yol yoktur. $V_{GS} = 0V$ iken V_{DS} pozitif bir gerilim ise ve SS terminali doğrudan kaynağa bağlı ise, iki n katkılı bölge ile p tipi alttaş arasında iki ters eğilimlenmiş p-n eklemi vardır ve bu da akaç ve kaynak arasında herhangi bir kayda değer akışa direnir [8].

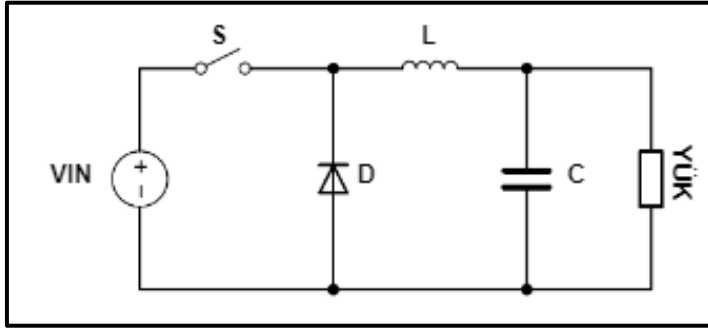
Fakat kapı ve kaynak arasına pozitif bir gerilim uygulanmaya başlanırsa, akaç ve kaynak arasında bir iletim kanalı oluşmaya başlar. V_{GS} arasındaki gerilim eşik gerilimi adı verilen değere eşit veya daha büyük bir gerilime ulaşırsa, MOSFET tamamen iletme geçmiş olacaktır.

3. DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ

DC-DC dönüştürücü devreler farklı topolojiler sayesinde giriş gerilimini yükseltmek veya alçaltmak gibi fonksiyonları yerine getirirler. Birçok farklı topoloji mevcut olmasına rağmen en sık kullanılan üç farklı topoloji vardır.

3.1. Alçaltıcı Dönüştürücü Devreler

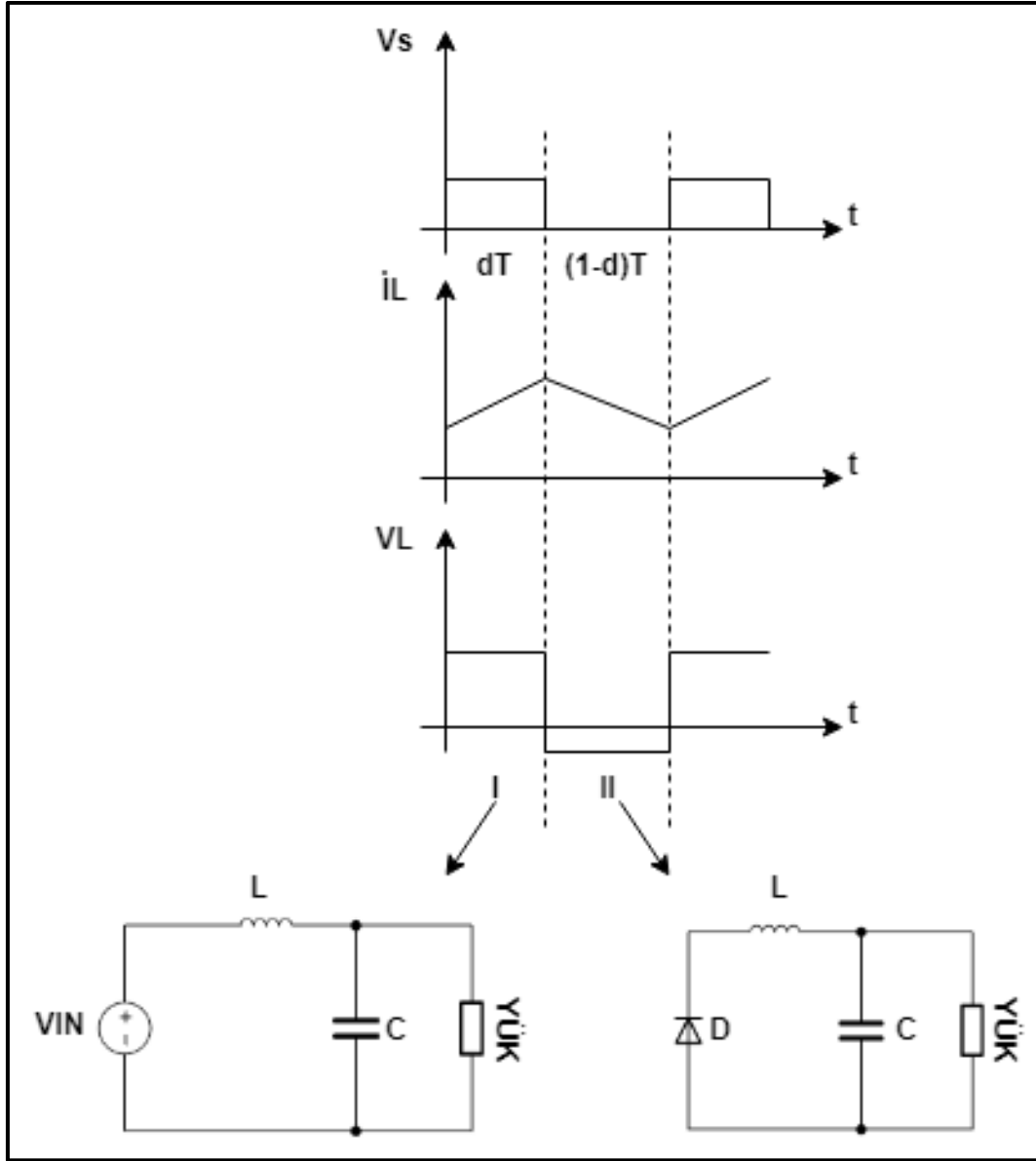
Alçaltıcı dönüştürücü devreler, giriş gerilimini daha düşük bir gerilim değerine dönüştüren devrelerdir. Bir anahtarlama elemanı, bir indüktör, bir kapasitör ve bir diyottan oluşurlar.



Şekil 3.1. Alçaltıcı dönüştürücü devre yapısı

Şekil 3.1’de giriş gerilimi V_{IN} , anahtarlama elemanı S, diyot D, indüktör L ve kapasitör C olmak üzere bir alçaltıcı dönüştürücü devre yapısı gösterilmektedir. Şekil 3.2’de S anahtarının durumuna göre indüktör akımı i_L , indüktör gerilimi v_L ve eşdeğer devreleri gösterilmiştir. S anahtarının kapalı olduğu durumda, indüktör üzerindeki gerilim $v_L = V_{IN} - V_{YÜK}$ olacaktır. S anahtarının kapalı olduğu durumda ise indüktör akımı i_L D diyotu üzerinden devreyi tamamlayacaktır. Böylece indüktör gerilimi V_L ve çıkış gerilimi $V_{YÜK}$ arasında $v_L = -v_{YÜK}$ eşitliği sağlanacaktır [9].

İndüktör voltajının bir anahtarlama periyodundaki integralinin sıfır olması gerektiğinden kararlı durum Eş. 3.1 ile ifade edilebilir.



Şekil 3.2. Alçaltıcı devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre [9]

$$\int_0^T V_L dt = \int_0^{dT} (V_{IN} - V_O) dt + \int_{dT}^T (-V_O) dt = 0 \quad (3.1)$$

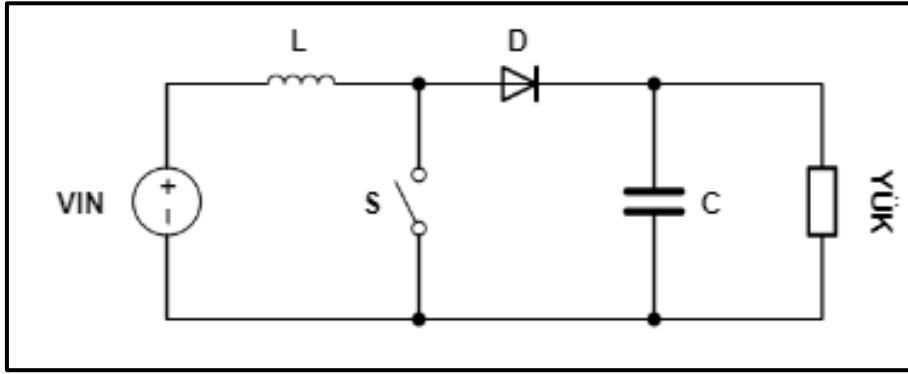
Alçaltıcı düşürücünün ortalama çıkış gerilimi Eş. 3.2 kullanılarak hesaplanır. d katsayısı, doluluk oranı olarak adlandırılır ve t_{ON} , bir periyottaki açık kalma süresi ve T bir tam periyot olarak ele alınırsa Eş. 3.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$v_{YÜK} = d v_{IN} \quad (3.2)$$

$$d = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.3)$$

3.2. Yükseltici Dönüştürücü Devreler

Yükseltici dönüştürücü devreler, giriş gerilimini daha yüksek bir gerilim değerine dönüştüren devrelerdir. Bir anahtarlama elemanı, bir indüktör, bir kapasitör ve bir diyottan oluşurlar.



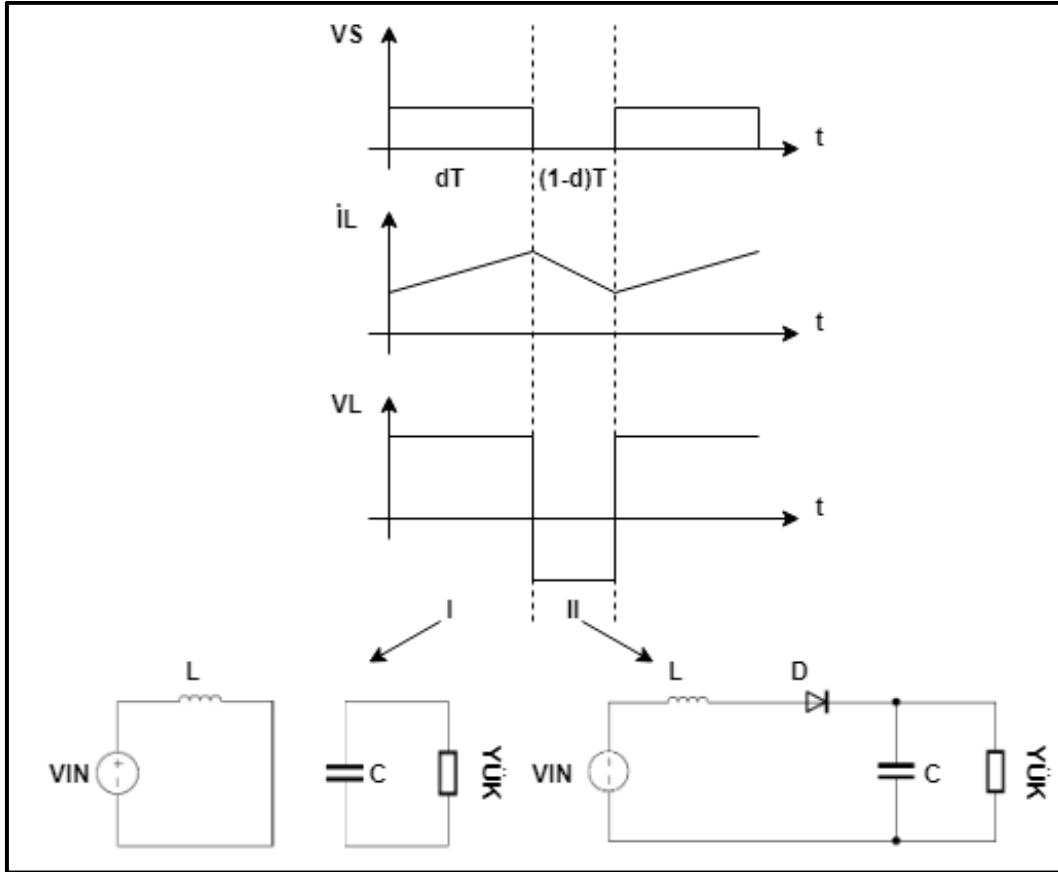
Şekil 3.3. Yükseltici dönüştürücü devre yapısı

Şekil 3.3.'te giriş gerilimi V_{IN} , anahtarlama elemanı S, diyot D, indüktör L ve kapasitör C olmak üzere bir yükseltici devre yapısı gösterilmektedir. Bu dönüştürücü topolojisinde, indüktörün manyetik enerjisi, enerjiyi daha düşük gerilimli bir giriş kaynağından daha yüksek gerilime sahip çıkışa dönüştürür [3]. Şekil 3.4'te S anahtarının kapalı veya açık olma durumuna göre indüktör akımı i_L , indüktör gerilimi v_L ve eşdeğer devreleri gösterilmiştir. S anahtarı açıldığında, giriş güç kaynağı V_{IN} ve çıkış kapasitörü C sırasıyla indüktöre ve yüke enerji sağlar (Eş. 3.4).

$$\int_0^{dT} V_{IN} dt + \int_{dT}^T (V_{IN} - V_{YÜK}) dt = 0 \quad (3.4)$$

Yükseltici dönüştürücü devrelerin ortalama çıkış gerilimi Eş.3.5' de gösterildiği gibi hesaplanır.

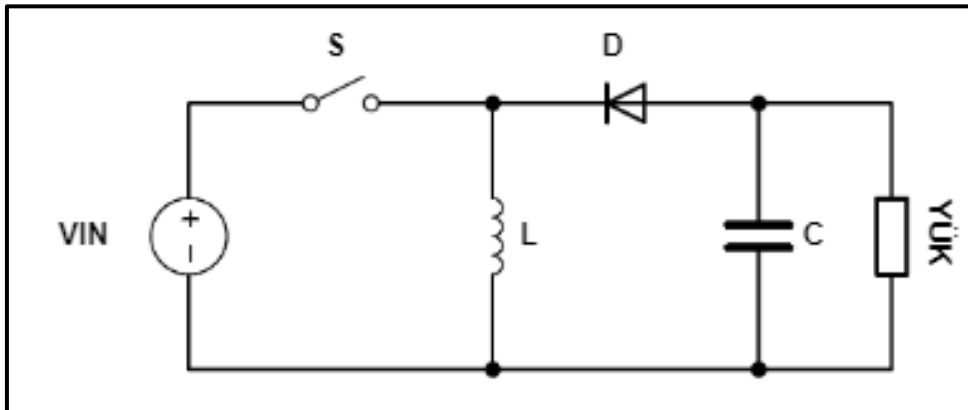
$$V_{YÜK} = \frac{V_{IN}}{1-d} \quad (3.5)$$



Şekil 3.4. Yükseltici devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre [9]

3.3. Alçaltıcı-Yükseltici Dönüştürücü Devreler

Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü devreler, giriş gerilim seviyesinden daha düşük veya yüksek çıkış gerilimi sağlayan devrelerdir. Çıkış gerilim seviyesine göre giriş gerilimini düşürmek ya da yükseltmek yoluyla sabit bir çıkış gerilimi elde etmek için kullanılırlar.



Şekil 3.5. Alçaltıcı-yükseltici devre yapısı

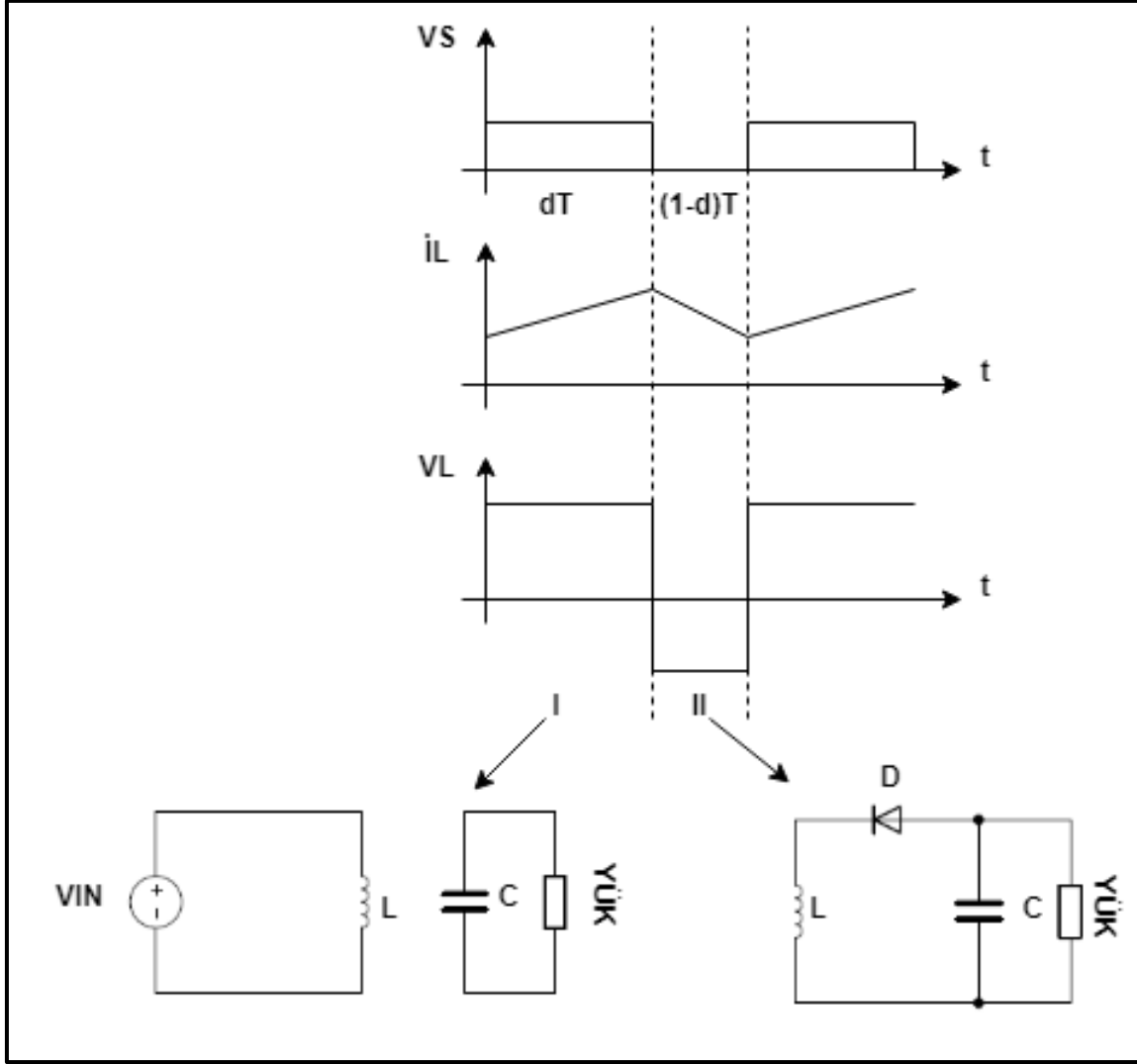
Şekil 3.5.'te giriş gerilimi V_{IN} , anahtarlama elemanı S, diyot D, indüktör L, kapasitör C olmak üzere bir alçaltıcı-yükseltici devre yapısı gösterilmektedir. Bu dönüştürücü topolojisinde, çıkış geriliminin seviyesine göre giriş gerilimi çıkış geriliminden yüksek ise alçaltıcı, düşük ise yükseltici devre topolojisi olarak çalışmaktadır.

S anahtarı kapatıldığında, L indüktörü giriş gerilim kaynağı V_{IN} ' den enerji depolar ve C kapasitörü ile çıkış gerilimini oluşturur. S anahtarı açık olduğu durumda i_L diyot üzerinden akar ve çıkış gerilimi L indüktörü üzerindeki gerilim ile sağlanır [3]. Şekil 3.6'da S anahtarının kapalı veya açık olma durumuna göre indüktör akımı i_L , indüktör gerilimi v_L ve eşdeğer devreleri gösterilmiştir. S anahtarı açıldığında, giriş güç kaynağı V_{IN} ve çıkış kapasitörü C sırasıyla indüktöre ve yüke enerji sağlar.

$$\int_0^{dT} V_{IN} dt + \int_{dT}^T (-V_{YÜK}) dt = 0 \quad (3.6)$$

$$V_{YÜK} = \frac{d}{1-d} V_{IN} \quad (3.7)$$

Alçaltıcı-yükseltici devre yapısının çıkış gerilimi Eş. 3.7' de gösterildiği gibi hesaplanır. Buna göre $d < 0,5$ ise devre alçaltıcı olarak çalışacaktır, $d > 0,5$ olması durumunda yükseltici olarak çalışacaktır. $d = 0,5$ olması durumunda giriş gerilimi çıkış gerilimine eşit olacaktır.



Şekil 3.6. Alçaltıcı-yükseltici devre anahtarlama durumu ve eşdeğer devre [9]

4. DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRELERDE EMI

4.1. Fourier Analizi

Fourier analizi periyodik olan sinyallerin trigonometrik olarak ifade edilmelerini sağlayan bir analiz türüdür. Fourier analizinde periyodik bir $f(t)$ fonksiyonu kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının bir toplamı şeklinde ifade edilir. Anahtarlamalı güç kaynakları, belirli bir frekansta anahtarlama yaparak çalıştığı için ve özellikle yüksek güçlü uygulamalarda anahtarlama frekansı ve katları olan harmoniklerde girişimler oluşabilir [10].

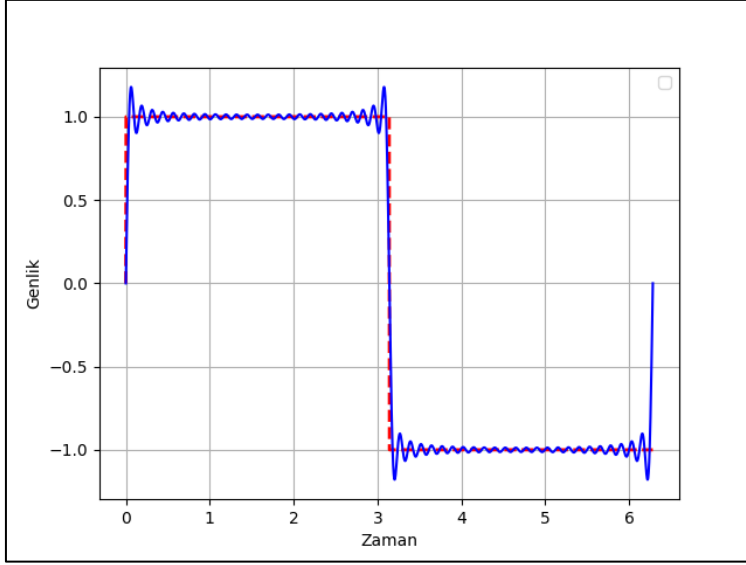
$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (4.1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (4.4)$$

Eş. 4.1'de periyodik bir fonksiyon olan $f(t)$ 'nin Fourier serisi açılımını göstermektedir. a_0 , a_n ve b_n katsayıları Eş. 4.2, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanır. Resim 4.1, periyodik bir kare dalga fonksiyonunun Fourier serisi olarak gösterimidir.



Resim 4.1. Bir kare dalganın Fourier serisi açılımı

Fourier dönüşümü, periyodik bir fonksiyonun zaman bölgesinden frekans bölgesinde incelenmesine olanak sağlayan bir dönüşümdür. Zaman bölgesinde olan bir fonksiyonun frekans bölgesinde incelenmesini sağladığı için EMI spektrum analizinde sıklıkla kullanılan bir dönüşümdür.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.5)$$

Eş. 4.5 kullanılarak zaman bölgesinde olan periyodik bir fonksiyon frekans bölgesine dönüştürülmüş olur. Fourier serisi açılımı ve Fourier dönüşümü yardımı ile anahtarlama dönüştürücü devrelerde anahtarlama frekansı ve katları olan harmoniklerin incelenmesi sağlanır.

4.2. Elektromanyetik Girişim (EMI)

EMI, bir elektromanyetik alanın, elektronik devrenin çalışmasını engellemesi ya da çalışmasını değiştirmesine verilen addır [11].

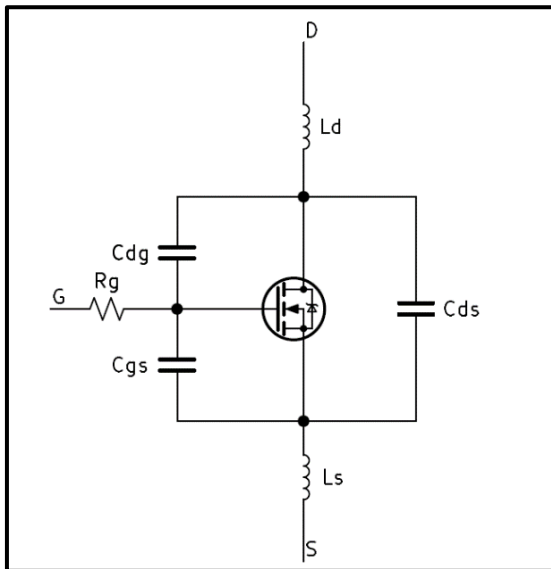
Güç elektroniğinde kullanılan anahtarlama dönüştürücü devreler, yapıları gereği yüksek frekanslarda anahtarlama frekansına bağlı çalışırlar. İster izole olsun ister izole olmasın, yüksek hızlı anahtarlama güç elektroniği devrelerinde istenmeyen girişim sinyallerinin oluşmasına neden olurlar. Bunun yanında devrenin yapısında kullanılan direnç, kondansatör,

indüktör gibi pasif devre elemanları da yapıları gereği istenmeyen girişim sinyallerinin oluşmasına neden olurlar.

Elektronik devrelerde birçok direnç, kapasitör, indüktör, transformatör ve aktif anahtarlama elemanları kullanılır. Devreye gerilim uygulandığında bu elemanların etrafında bir elektrik alan oluşur. Ayrıca devreden akım aktığında elektriksel bağlantısı olan tüm elemanlarda manyetik alan oluşacaktır. Elektrik alanın en yoğun olduğu devre elemanı yapıları gereği kapasitörlerdir. Kapasitörler, iki terminali arasında yüksek bir elektrik alan barındırırlar. Manyetik alanın en çok yoğunlaştığı devre elemanı ise indüktörler ve transformatörlerdir. Üzerinden akım geçen bir indüktör, etrafında en çok manyetik alan oluşturan komponent olacaktır. Elektronik devrelerde elektrik ve manyetik alan oluştuğu sürece EMI ortaya çıkacaktır [12].

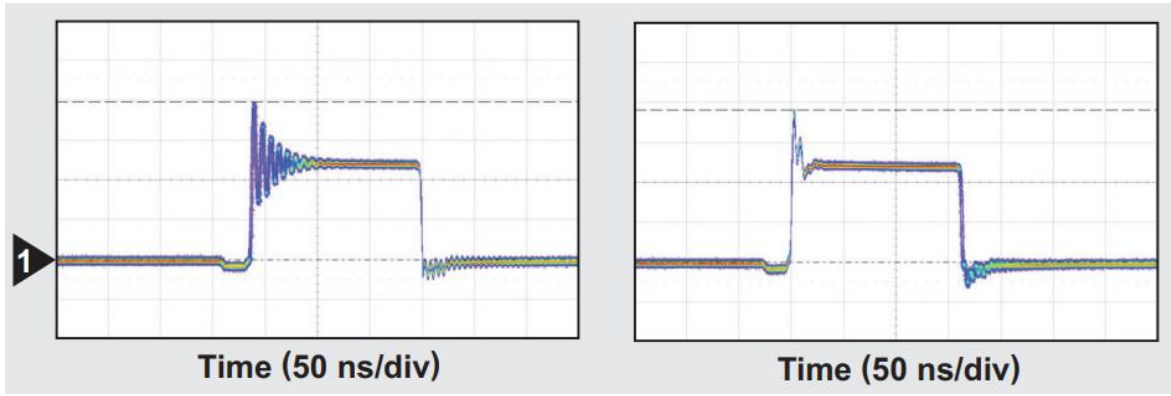
Güç elektroniği devresinin çalışması esnasında, di/dt ve dv/dt ile ilişkili olarak akım darbeleri ve gerilim piklerinin oluşması başlıca EMI sebepleri arasında yer almaktadır [13].

Bölüm 2.3'de bahsedildiği üzere MOSFET'ler güç elektroniğinde anahtarlama elemanı olarak kullanılan elemanlardır. Fakat pratik uygulamalarda MOSFET'ler açma-kapama durumlarında EMI için dikkat edilmesi gereken unsurlar arasındadır.



Şekil 4.1. MOSFET'in parazitik elemanlarının gösterimi

Şekil 4.1’de bir MOSFET’in parazitik elemanları ile gösterimi mevcuttur. L_d ve L_s , terminal bağlantısından kaynaklanan indüktif büyüklüklerdir. C_{ds} , C_{gs} ve C_{dg} MOSFET’in kendi iç yapısından kaynaklanan ve P-N bileşiminin oluşturduğu kapasitans değerleridir. R_g ise kapı terminalinin kendi iç direncidir. Bu parazitik bileşenler MOSFET’in kendi iç yapısının oluşturduğu bileşenlerdir. Ani açılma durumlarında parazitik kapasitanslar hızlıca deşarj olacaktır ve yüksek akım pikleri görünecektir. Ani kapanma durumlarında ise parazitik indüktanslar, parazitik kapasitanslar üzerinden deşarj olacak ve yüksek gerilim piklerinin oluşmasına neden olacaktır. Yüksek akım piklerinin oluşması ve bunun sonucunda da yüksek gerilim piklerinin oluşması yüksek frekanslı parazitik osilasyonları oluşturacaklardır (bkz. Resim 4.2) [12].



Resim 4.2. MOSFET kapı terminallerinde oluşan osilasyon [14]

EMI emisyonu güç elektroniğinde, yüksek çıkış akımı ve geriliminin hızlıca anahtarlanması ve yüksek frekanslı anahtarlama elemanlarının kullanılmasıyla birlikte (MOSFET’ler) dikkat edilmesi gereken bir konu haline almıştır [15].

Aslında her DC-DC dönüştürücü, bulunduğu elektronik sistemde arızalanmalara ya da düzgün çalışmamasına yol açan çok sayıda yüksek frekanslı girişim üretir. Bu iletim emisyonlarını azaltmanın en önemli çözümü EMI filtrelerin kullanmaktır [16].

Elektronik devrelerde çalışmayı engelleyen iki türlü ana unsur vardır.

- İletim Yoluyla Yayılma
- Radyasyon Yoluyla Yayılma

4.2.1. İletim yoluyla yayılma

İletim yoluyla oluşan girişimler, genellikle fiziksel bağlantılardan oluşan girişimlerdir. Genellikle 30 MHz altındaki daha düşük frekanslarda meydana gelir. Bu girişimlerin oluşturduğu gürültüler Diferansiyel Mod (DM) Gürültü ve Ortak Mod (CM) Gürültü olmak üzere ikiye ayrılır [17].

CM kaynaklı gürültüler yük empedansı ile alakalı gürültüler olmakla beraber, DM kaynaklı gürültüler akımın anahtarlanması ile oluşan gürültülerdir. İletim yoluyla oluşan girişimleri önlemek için genellikle pasif filtreleme metotları ve bazı anahtarlama teknikleri kullanılır.

4.2.2. Radyasyon yoluyla yayılma

Radyasyon yoluyla oluşan girişimler, devredeki elektrik alan ve manyetik alandan kaynaklanan gürültülerdir. Tasarlanan elektronik kartın tasarımı ve empedansından kaynaklanırlar. Radyasyon yoluyla oluşan girişimleri önlemek için ilk olarak tasarım aşamasında gereken önem verilmelidir. Sonrasında oluşan girişimlerin ekranlama ile önüne geçilmeye çalışılır.

4.3. EMI Filtrelerin Tasarımı

İletim yoluyla oluşan girişimleri önlemek için filtreleme sık kullanılan bastırma yöntemlerinden birisidir.

Güç elektroniğinde girişi besleyen kaynaktaki gürültü ve istenmeyen sinyallerin, bağlı ve çalışan sistemin işleyişini engellemesini önlemek ve tam tersi olarak sistemin çalışmasının kaynağın sağlıklı bir şekilde çalışmasını engellemesini önlemek temel esaslardandır. Bu tür gereksinimleri karşılayan ulusal ve uluslararası standartlar mevcuttur.

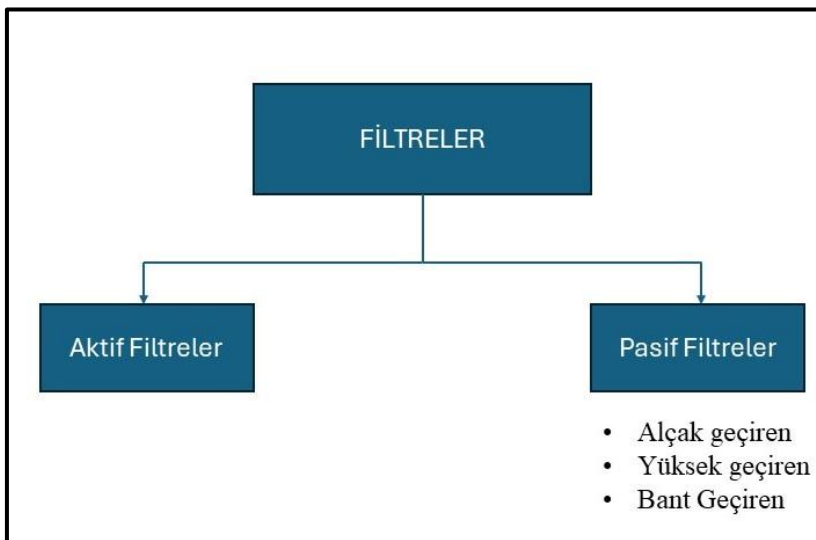
DC-DC dönüştürücü sistemler günümüzde daha az alan kaplaması ve verimli olması için yüksek frekanslarda çalışmaktadır. Diğer taraftan yüksek hızlı anahtarlamaların yapılması akım ve gerilimin hızlı değişimi anlamına gelmektedir ve EMI nedenlerinin başında gelmektedir [18].



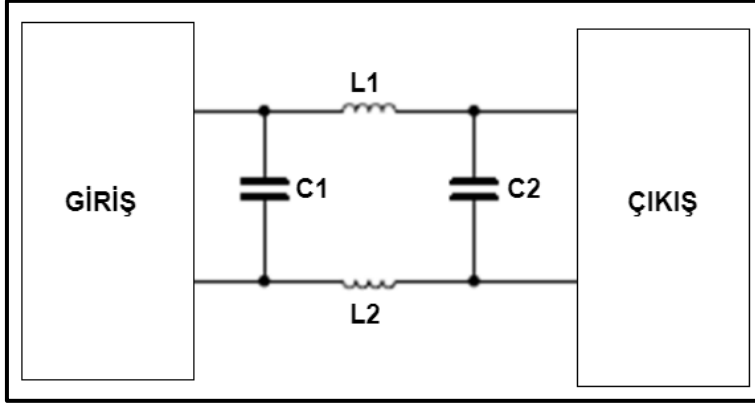
Resim 4.3. Synqor firmasına ait bir EMI Filtre [19]

Resim 4.3'te Synqor firmasına ait, DC-DC dönüştürücü devrelerde kullanılan pasif bir EMI filtre gösterilmektedir. Çeşitli EMI standartları için tasarlanmış olan bu cihaz, standartlarda belirtilen aralıklardaki sinyalleri bastırarak iletim yolu ile oluşan girişimlerin önüne geçmektedir.

Şekil 4.2'de filtreleme türleri gösterilmiştir. Tasarım kolaylığı ve uygun maliyetli olması bakımından pasif filtreler en sık kullanılan filtreleme türleridir. İndüktör, kapasitör ve direnç ile bir pasif filtre elde etmek mümkündür. Filtrelenecek sinyale göre pasif filtre tasarlanır ve tasarımın girişine eklenir.



Şekil 4.2. Filtre türleri



Şekil 4.3. Genel bir pasif EMI Filtre

Şekil 4.3'te pasif komponentlerden oluşmuş bir EMI filtrenin genel görüntüsü gösterilmiştir. İki adet indüktör (L1 ve L2) ve iki adet kapasitör (C1 ve C2) filtrelemede kullanılan pasif komponentlerdir. İndüktörler yüksek frekanslarda yüksek empedans uygulayarak sönümleyecektir. Kapasitörler ise yüksek frekanslarda kısa devre gibi davranarak sinyallerin girişe ulaşmasını engelleyecektir.

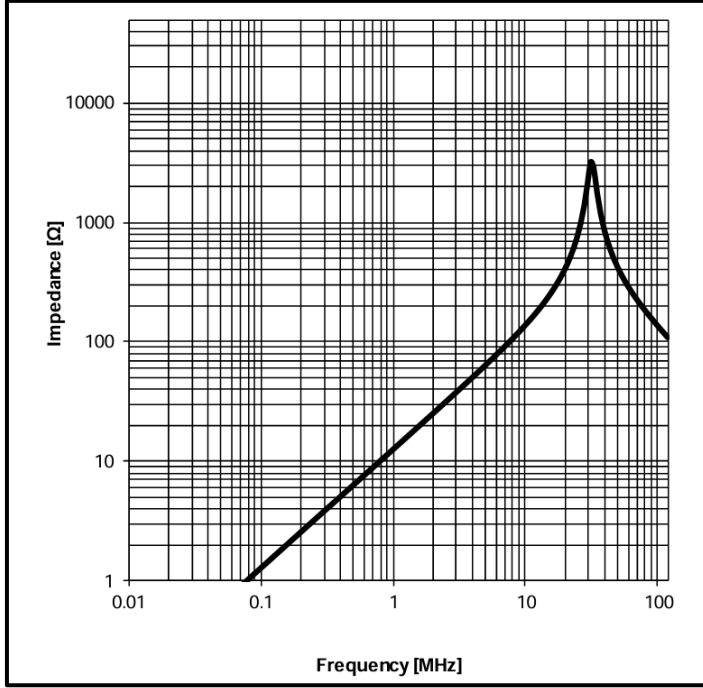
$$Z_L = j\omega L \quad (4.6)$$

Eş. 4.6 incelendiği takdirde sinyalin frekansı arttıkça, indüktörün sinyalin frekansına uyguladığı empedans artacaktır. Böylece yüksek frekanslarda, yüksek empedans uygulayacağı anlamı çıkacaktır.

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.7)$$

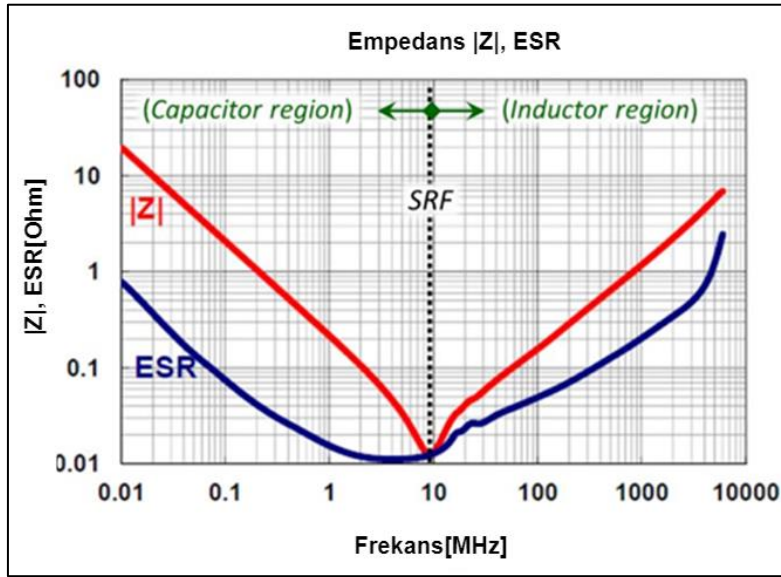
Eş.4.7 incelendiği takdirde sinyalin frekansı arttıkça, kapasitörün sinyalin frekansına uyguladığı empedans oldukça az olacaktır. Böylece yüksek frekanslı sinyaller için kısa devre durumu oluşacaktır.

Teorik olarak, indüktörler her ne kadar yüksek frekanslı sinyallere yüksek empedans uygulayacak gibi görünse de bunun pratik uygulamalarda bir sınır vardır.



Şekil 4.4. İndüktör frekans ve empedans eğrisi [20]

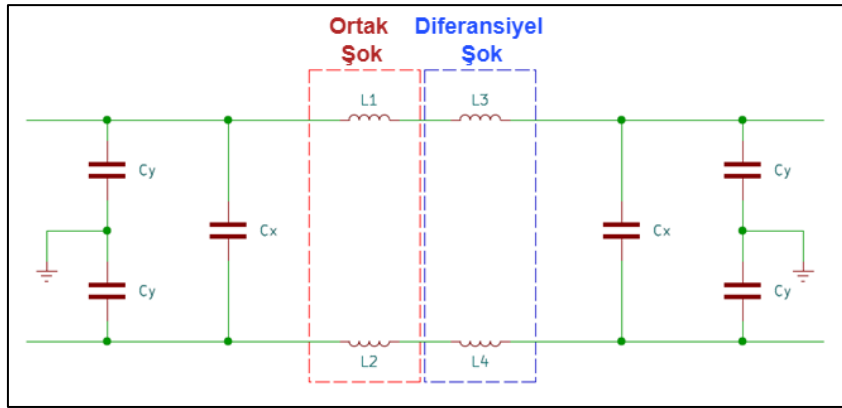
Şekil 4.4'te indüktörün frekans ve empedans grafiği görülmektedir [20]. Yaklaşık 30 MHz ile 35 MHz arasında indüktör, indüktör özelliğini kaybederek bir iletken gibi davranmaya başlar. Filtre için indüktör seçimi yapılırken, frekans-empedans grafiğinin incelenerek buna uygun bir seçim yapılmasıdır.



Şekil 4.5. Kapasitör frekans ve empedans eğrisi [21]

İndüktörler için geçerli olan yüksek frekansta özelliğinin değişmesi durumu kapasitörler için de geçerlidir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere belirli bir frekansın üstüne çıktığı zaman kapasitör artık bir kapasitör gibi değil bir indüktör gibi davranmakta ve yüksek frekanslı sinyaller için yüksek empedans uygulamaya başlamaktadır [21].

Pasif filtre tasarımlarında, indüktör ve kapasitörler için bu özellikler dikkate alınarak uygun devre elemanın seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.6. Pasif EMI filtre şematik diagramı

Şekil 4.6'da pasif bir EMI filtrenin şematik çizimi gösterilmektedir. CM kısmı için L1, L2, Cy ve DM kısmı için L3, L4, Cx bileşenlerinden oluşan tipik bir EMI filtre yapısıdır. Gürültünün bastırılma miktarı A_{req} , Eş. 4.8 olduğu gibi, gerçek ölçüm V_{mes} ile referans standardı V_{ref} arasındaki değişiklik olarak hesaplanabilir [5].

$$A_{req} = V_{mes} - V_{ref} - \Delta A_s \quad (4.8)$$

Matematiksel olarak CM ve DM frekansının hesabı Eş. 4.9 kullanılarak hesaplanır. f_{Pk}^I ifadesi, bastırılmak istenen frekansın ilk pik noktasıdır. Köşe frekansını bularak bileşen CM ve DM filtreleri için sırasıyla Eş. 4.10 ve 4.11 yardımıyla filtre değerleri kolayca belirlenebilir. L_1 , CM durumundaki kaçak indüktansı temsil eder [5].

$$f_r = f_{Pk}^I 10^{-\frac{(A_{req})_{dB}}{40}} \quad (4.9)$$

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 2C_y}} \quad (4.10)$$

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2L_3+L_1)C_x}} \quad (4.11)$$

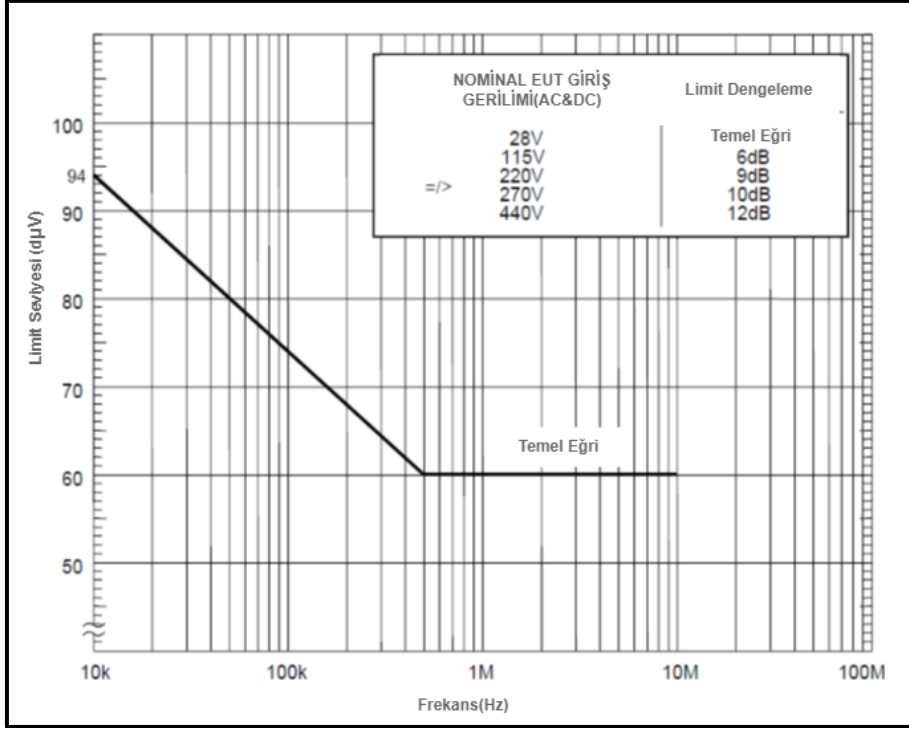
4.4. CE102 Testi

EMC, bir elektronik cihazın çalışmasının bulunduğu ortamdan etkilenmemesi ya da bulunduğu ortamda çalışan cihazların çalışmasını engellemeden çalışmasını tanımlayan bir terimdir. EMI/EMC için geliştirilen uluslararası birçok askeri, sivil ve havacılık standardı mevcuttur. Bunlardan en çok bilineni askeri EMI/EMC standartlarını tanımlayan MIL-STD-461 standardıdır.

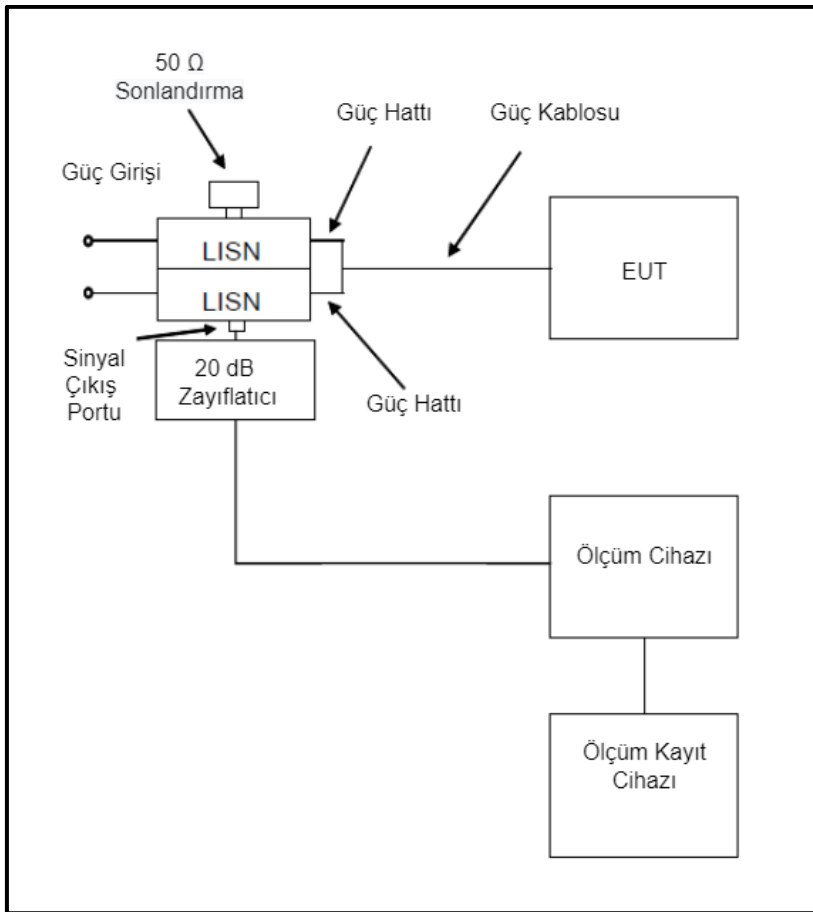
MIL-STD-461' de bir elektronik cihazın bozucu sinyallere dayanıklılığını ve cihazın ortama ne kadar bozucu sinyal yayabileceğinin sınır değerleri belirtilmiştir. EMI filtre uygulanmış ve ekranlanmış bir cihazın yapılan testler sonucunda gereksinimleri karşılması beklenmektedir.

CE102 testi, EUT'tan gelen elektromanyetik emisyonların, geri dönüşler de dahil olmak üzere güç girişi kabloları için belirtilen gereksinimleri aşmadığını doğrulamak için kullanılır.

Şekil 4.8'de gösterildiği şekilde ölçüm almak için sistem kurulur ve cihaz çalıştırılır. Test sonunda ölçülen sinyal dB μ V cinsinden Şekil 4.7'de gösterilen referans eğrinin altında olmalıdır. Tasarımı yapılacak olan filtre CE102 testi için amaçlanmıştır [22].



Şekil 4.7. CE102 testi limit eğrisi [22]

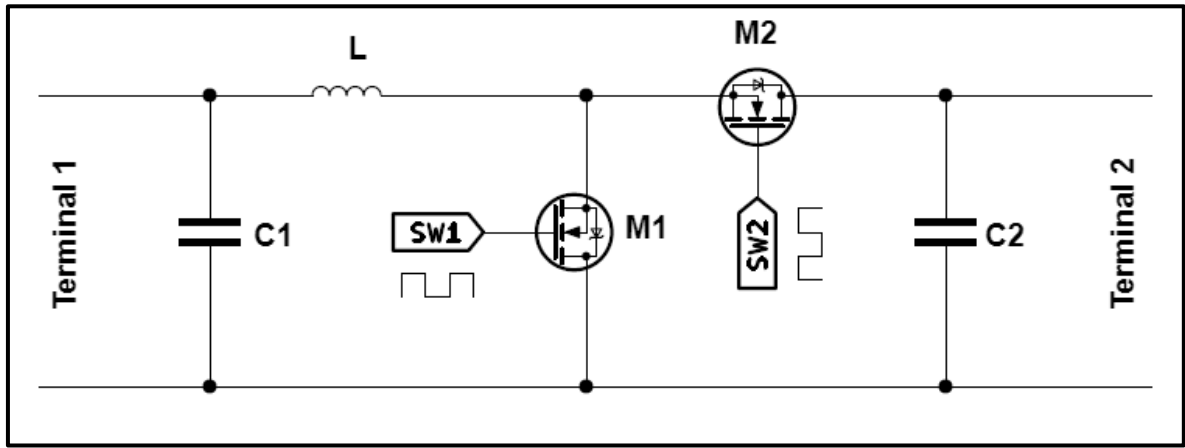


Şekil 4.8. CE102 testi ölçüm düzeneği

5. ÇİFT YÖNLÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Çift yönlü DC-DC dönüştürücüler, enerji kullanımının artması ile birlikte popüler hale gelmişlerdir. Yenilenebilir enerji sistemleri, kesintisiz güç kaynakları ve elektrikli araçlar gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar.

ÇYD'ler iki farklı çalışma moduna sahiptir. Birinci çalışma modunda alçaltıcı dönüştürücü olarak çalışır ve yüksek giriş geriliminden enerji depolama birimine güç sağlarlar. İkinci çalışma modunda yükseltici dönüştürücü olarak çalışırlar ve enerji depolama biriminden, DC hattı beslerler.



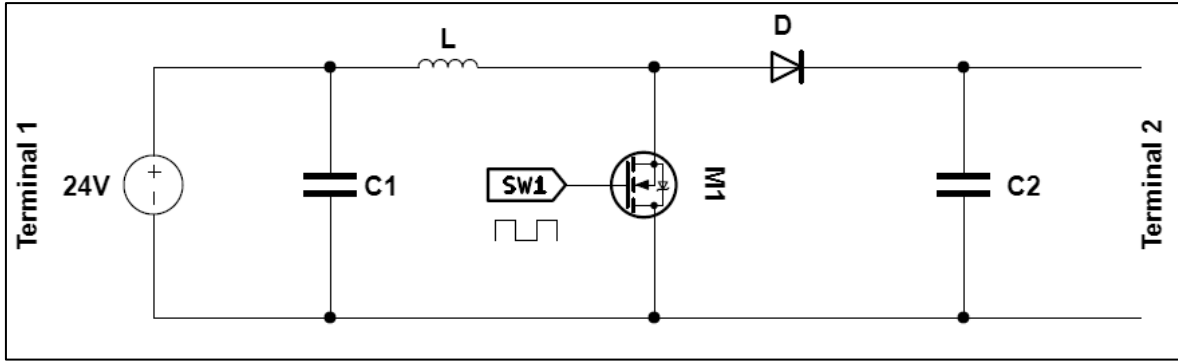
Şekil 5.1. ÇYD devre yapısı

Şekil 5.1'de ÇYD devre yapısı görülmektedir. Terminal 1 ve Terminal 2 sistemin dış dünyaya bağlantı noktalarıdır. Birinci çalışma modunda Terminal 1 tarafında bir giriş gerilimi vardır ve sistem yükseltici dönüştürücü modunda çalışmaktadır. Bu durumda Terminal 1 gerilimi, yükseltilerek C_2 kapasitörü üzerine düşecektir. Devrenin çıkış gerilimi Eş. 5.1 kullanarak hesaplanabilir. İkinci çalışma modunda Terminal 2 tarafından bir giriş gerilimi vardır ve sistem alçaltıcı dönüştürücü modunda çalışmaktadır. Bu durumda Terminal 2 giriş gerilimi, düşürülerek C_1 kapasitörü üzerine düşecektir. Çıkış gerilimi Eş. 5.2 kullanılarak hesaplanabilir. Hesaplanan ve simüle edilen yapı içi diyot ideal bir diyot olarak ele alınmıştır. Anahtarlama elemanı ideal bir anahtarlama elemanı olarak ele alınmıştır. L indüktör endüktansı $6,8\mu\text{H}$, C_1 ve C_2 kapasitörlerinin kapasitans değeri $100\mu\text{F}$ olarak ele alınmıştır.

$$V_{TERMINAL 2} = \frac{V_{TERMINAL 1}}{1-d_1} \quad (5.1)$$

$$V_{TERMINAL 1} = d_2 V_{TERMINAL 2} \quad (5.2)$$

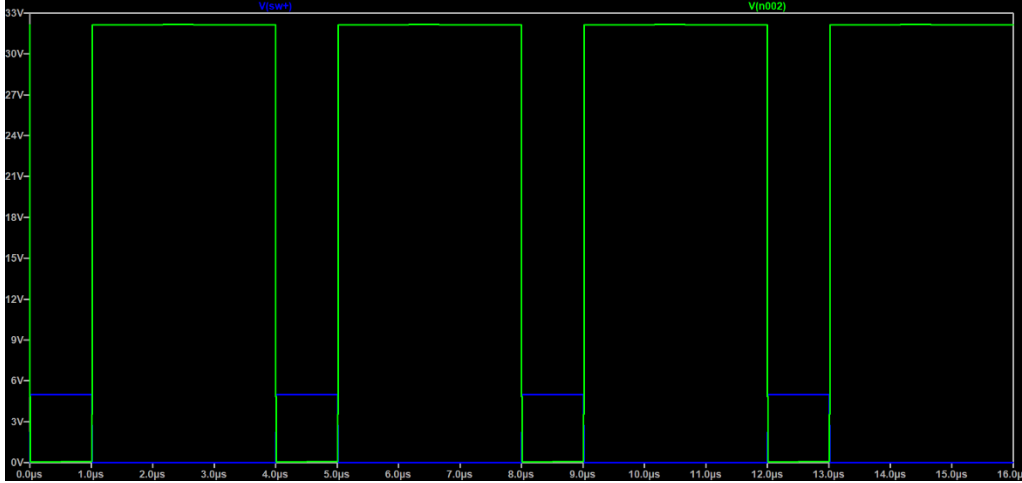
ÇYD birinci çalışma modunda M₁ MOSFET' i anahtarlama elemanı olarak çalışacaktır. M₂ MOSFET' inin kendi iç yapısında bulunan diyot ile de yükseltici dönüştürücü yapısı tamamlanacaktır.



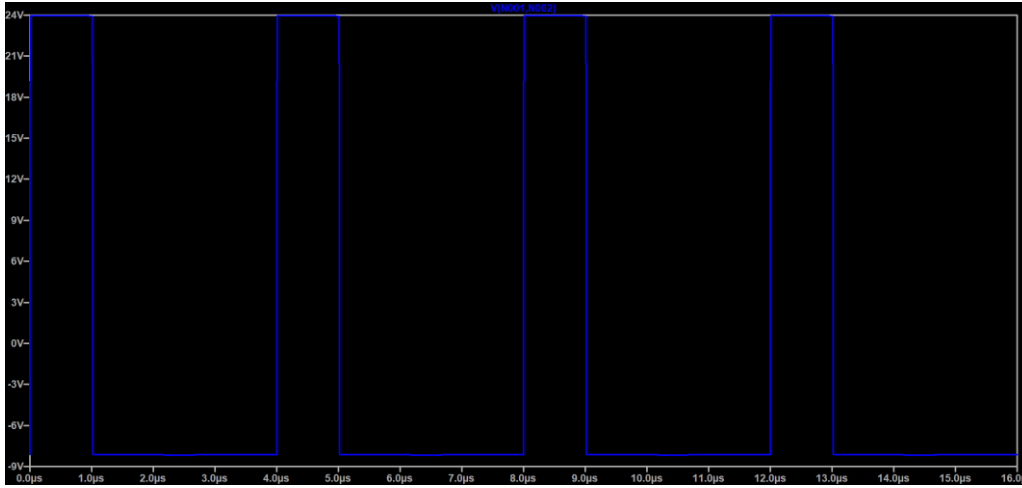
Şekil 5.2. Terminal 1 uçlarına 24V uygulanmış yükseltme modunda çalışan bir ÇYD

Şekil 5.2’de Terminal 1 uçlarına 24V uygulanmış, yükseltici modda çalışan bir ÇYD görülmektedir. M2 MOSFET’ inin kendi iç yapısında olan diyot sayesinde yükseltici devre mimarisi tamamlanmış olur. 24V giriş gerilimi SW1 anahtarlama periyodunun doluluk oranına göre yükseltilecektir. Uygulanan SW2 anahtarlama sinyalinin periyodu 4µs’dir. Uygulanan sinyalin doluluk oranı ise 0,25 olarak işleme alınacaktır. Terminal 2 uçlarında oluşan gerilim Eş. 5.1’ de gösterildiği üzere 32V olur. ‘

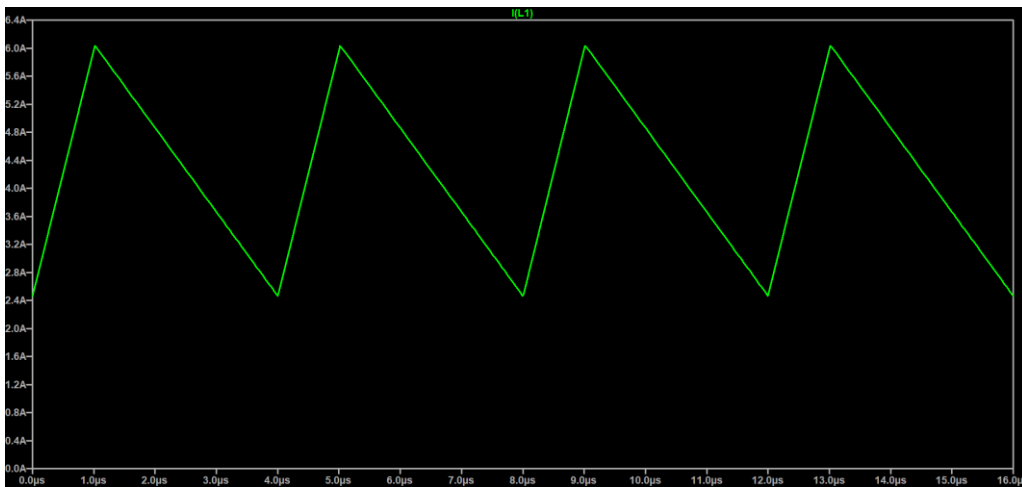
Resim 5.1’de ÇYD yükseltici modu anahtarlama (mavi anahtarlama, yeşil SW noktası)’de indüktörün ve M1 MOSFET’ inin düğüm noktası SW’ de ölçülen sinyallerin karşılaştırılması verilmiştir. Görüldüğü üzere MOSFET’ in açık olduğu durumda enerji depolamakta ve kapalı olduğu durumda bu enerjiyi yükseltici devre yapısında olduğu gibi kullanmaktadır.



Resim 5.1. ÇYD yükseltici modu anahtarlaması (mavi anahtarlama, yeşil SW noktası)



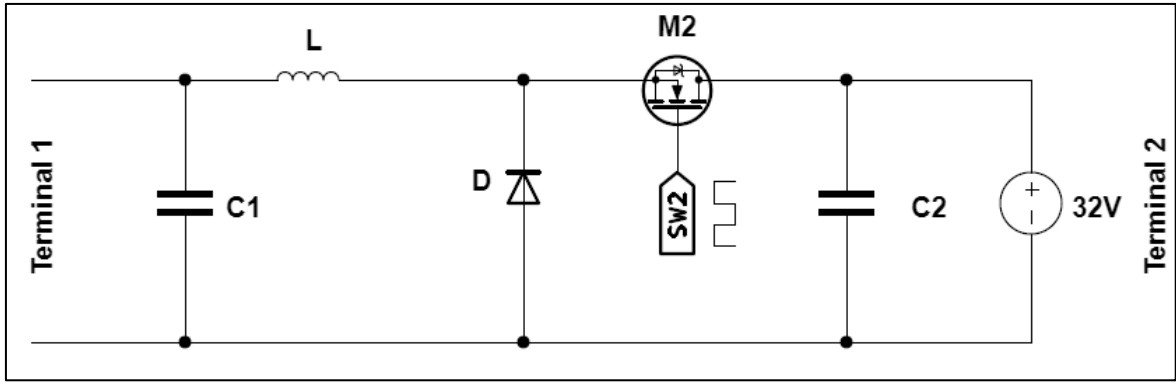
Resim 5.2. ÇYD yükseltici modu indüktör gerilimi



Resim 5.3. ÇYD yükseltici modu indüktör akımı

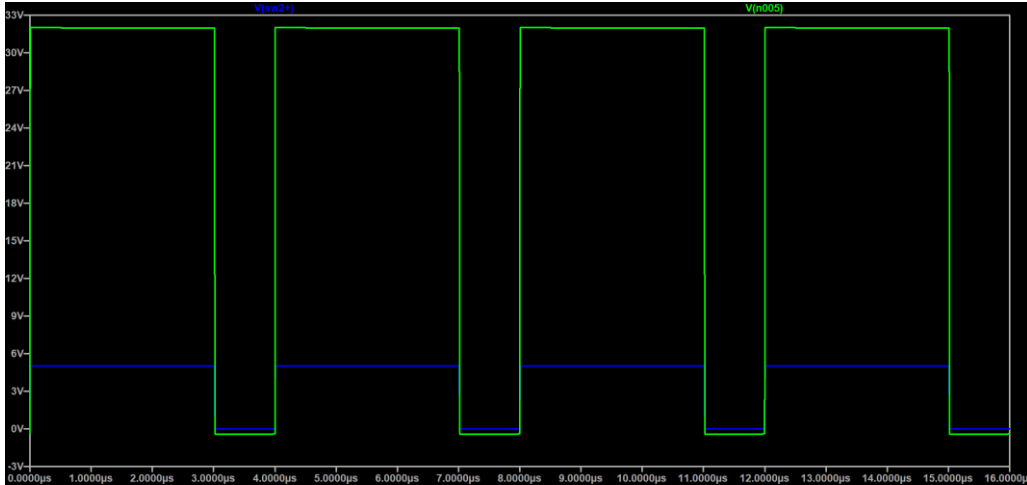
Resim 5.2. ve Resim 5.3.'te indüktör gerilimi ve akımının değişimi görülmektedir. İndüktör gerilim değeri tepe noktası 24V olduğuna ve akımın Eş. 2.4' de yer alan denklem ile uyumlu olduğuna dikkat edilmelidir. Doluluk oranının 0,25 olması, MOSFET' in açık kalma süresinin $1\mu s$ olduğu anlamına gelir. İndüktörün akımının tepe noktasına ulaşma süresinin de $1\mu s$ olduğuna dikkat edilmelidir.

ÇYD ikinci çalışma modunda Şekil 5.1'de görülen M1 MOSFET' i kendi iç yapısında bulunan diyot ile alçaltıcı dönüştürücü devre yapısındaki diyot rolünü üstlenecektir. M2 MOSFET' i ise alçaltıcı dönüştürücü devre yapısındaki anahtarlama elemanı rolünü üstlenecektir.

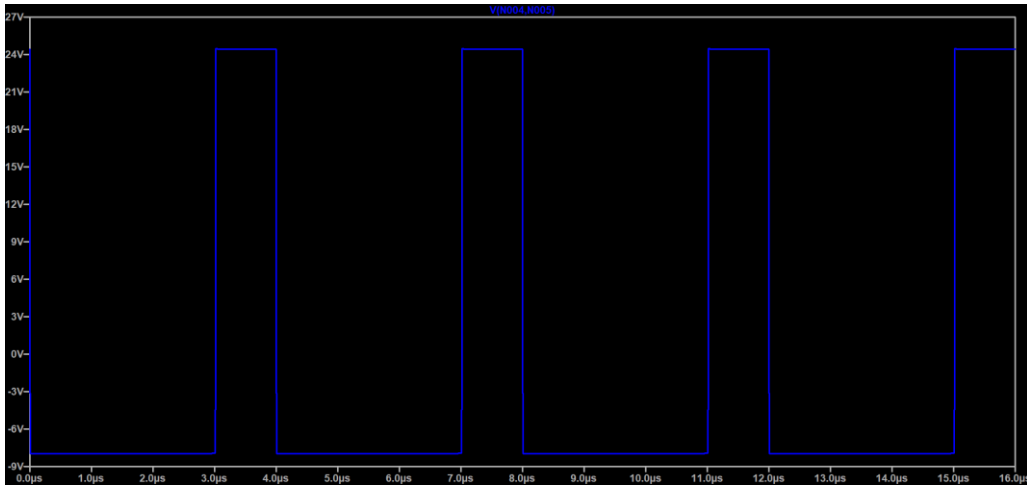


Şekil 5.3. Terminal 2 uçlarına 32V uygulanmış alçaltıcı modunda çalışan bir ÇYD

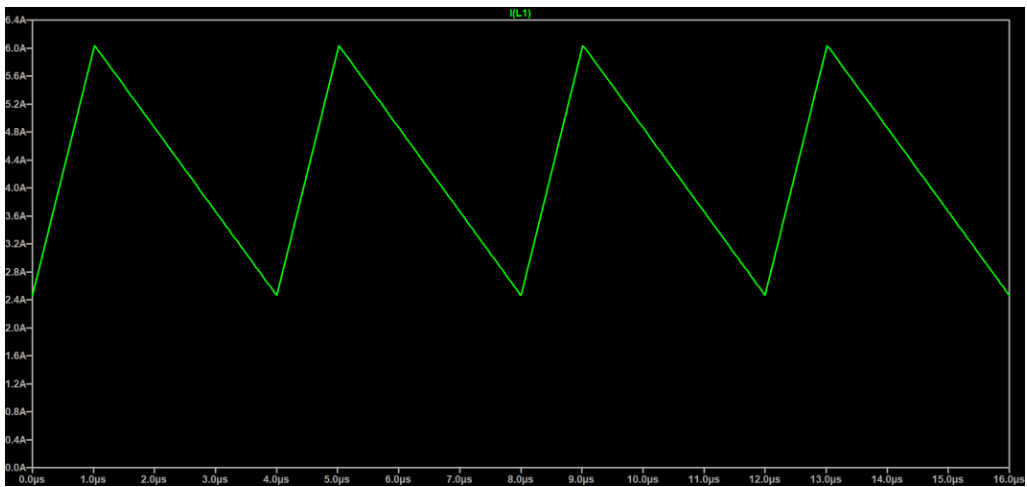
Şekil 5.3.'de Terminal 2 uçlarına 32V uygulanmış, alçaltıcı modda çalışan bir ÇYD görülmektedir. M1 MOSFET' inin kendi iç yapısında olan diyot sayesinde alçaltıcı devre mimarisi tamamlanmış olur. 32V giriş gerilimi SW1 anahtarlama periyodunun doluluk oranına göre düşürülecektir. Uygulanan SW2 anahtarlama sinyalinin periyodu $4\mu s$ 'dir. Uygulanan sinyalin doluluk oranı ise 0,75 olarak işleme alınacaktır. Terminal 1 uçlarında oluşan gerilim Eş. 5.1' de gösterildiği üzere 24V olur.



Resim 5.4. ÇYD alçaltıcı modu anahtarlaması (mavi anahtarlama, yeşil SW noktası)



Resim 5.5. ÇYD alçaltıcı modu indüktör gerilimi



Resim 5.6. ÇYD alçaltıcı modu indüktör akımı

ÇYD alçaltıcı devre modunda Terminal 2 uçlarından uygulanan giriş gerilimini düşürerek çıkış olarak Terminal 1 uçlarına verir. Resim 5.4'te SW noktası ve anahtarlama sinyalinin grafiği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yükseltici modun aksine anahtarlama sinyali ve SW noktası arasında bir faz farkı yoktur. Böylece indüktör gerilimi giriş geriliminin düşürülmesinde rol oynayacaktır. İndüktör üzerinde oluşan gerilim Resim 5.5'te görülebilir. Doluluk oranının 0,75 olması, MOSFET' in açık kalma süresinin $3\mu\text{s}$ olduğu anlamına gelir. İndüktörün akımının tepe noktasına ulaşma süresinin de $1\mu\text{s}$ olduğu Resim 5.6'da gösterilmiştir.

6. TASARIM VE UYGULAMA

Tasarımı yapılacak olan ÇYD çift yönlü güç akışı ihtiyacı olan sistemler için (enerji depolama birimleri vb.) hedeflenmiştir. Giriş gerilimi 36V olacaktır. Çıkış tarafında 16,8V 4S bir batarya olacaktır. Batarya şarj akımı 5A olarak ele alınacaktır. Anahtarlama frekansı 300 kHz olarak ele alınacaktır. Bataryadan girişe (ters yönlü güç akışı) sağlanan gerilim 36V olacaktır. Ters yönlü çıkış akımı (bataryadan) 5A seviyesinde olacaktır.

Tasarım aşamasında MOSFET'lerin, indüktörün ve diğer devre elemanlarının güç kayıpları dikkate alınacaktır. Dönüştürücü ile beraber EMI filtre tasarımı ayrı olarak uygulanmıştır. Anahtarlamanın daha düzgün ve kontrollü yapılabilmesi için Texas Instruments firmasına ait BQ25756 entegresi kullanılmıştır. Anahtarlama frekansının stabil olmasını ve analog devre yapısı ile daha hızlı tepki vermesi açısından böyle bir tercihte bulunulmuştur.

6.1. ÇYD Tasarım ve Uygulama

Şekil 6.1'de ÇYD devresine ait şematik çizim gösterilmiştir. J1 konnektörü sistemin ana besleme girişi olup, bataryanın şarjı için gerekli gücü sağlayan birimdir. J2 konnektörü bataryanın bağlandığı ve ana güç beslemesinin olmadığı durumda, ana güç hattına besleme sağlayacak giriş birimidir. Güç akışının J1 konnektöründen J2 konnektörüne olduğu durumda alçaltıcı dönüştürücü çalışma modunda batarya için şarj profili sağlanacaktır. Güç akışının J2 konnektöründen J1 konnektörüne olduğu durumda yükseltici dönüştürücü modunda sistemin ana beslemesine güç sağlanacaktır.

$$R_{BOT} = R_{TOP} \times \frac{V_{FB}}{V_{BATREG} - V_{FB}} + R_{FBG} \quad (6.1)$$

Batarya şarjı için çıkış gerilimi, Eş. 6.1 kullanılarak hesaplanır. V_{FB} , kullanılan entegrenin veri sayfasında belirtilmiş olup 1,536 V değerindedir. R_{FBG} , yine entegrenin veri sayfasında belirtilen bir parametre olup 33 Ω değerindedir. V_{BATREG} , şarj edilmek istenen bataryanın maksimum gerilim değeri olup, tasarımı yapılan devrede 16,8 V olarak alınmıştır. Tüm bu parametrelere ek R_{TOP} ve R_{BOT} direnç değerleri sistemin çıkışını 16,8V seviyesine ayarlamak için kullanılacak olan parametrelerdir. R_{TOP} direnç değerini 249 k Ω olarak seçerek R_{BOT} direncinin değeri bulunur. Şekil 6.1'de gösterilen şematik çizimde R_{18} , R_{TOP} direncini ve R_{19} ,

R_{BOT} direncini temsil etmektedir. Tüm bu çıkarımlar ele alınarak Eş. 6.2 sonucunda R_{19} direnci, 25,09 k Ω olarak bulunur [23].

$$R_{19} = R_{18} \times \frac{1,536 V}{16,8 V - 1,536 V} + 33\Omega \quad (6.2)$$

Kullanılan entegrenin anahtarlama frekansı, FSW_SYNC olarak gösterilen terminalden sistemin referans noktası GND arasına seri bir direnç yerleştirilerek ayarlanmaktadır. Eş. 6.3 kullanılarak seçilen anahtarlama frekansı için gerekli direnç değeri bulunabilir [23].

$$R_{FSW} = \frac{1}{10 \times ((f_{sw} \times 5 \times 10^{-12}) - (500 \times 10^{-9}))} \quad (6.3)$$

Şekil 6.1’de R_{14} direnci, R_{FSW} direncini temsil etmektedir. f_{sw} , 300 kHz olarak ele alınırsa Eş. 6.4 sonucunda R_{14} direnci 100 k Ω olarak bulunur.

$$R_{14} = \frac{1}{10 \times (300 \times 10^3 \text{ Hz} \times 5 \times 10^{-12}) - (500 \times 10^{-9})} \quad (6.4)$$

Eş. 6.2 ve 6.4 sonucunda elde edilen dirençler doğrultusunda sistemin anahtarlama frekansı 300 kHz ve batarya şarj gerilimi 16,8 V olarak ayarlanmıştır. Batarya şarj modunda maksimum giriş akımı ve maksimum çıkış akımı entegrede bulunan ICHG ve ILIM_HIZ kullanılarak bir direnç yardımıyla ayarlanabilir. Fakat bu uygulamada maksimum giriş ve maksimum çıkış akımı entegreye bilgisayar üzerinden ulaşılmasıyla ayarlanmıştır. Ayarlamalara göre maksimum çıkış akımı 5A ve maksimum giriş akımı 10 A olarak ayarlanmıştır. Belirtilen pinlerin kullanılmama nedeni, gerekli durumlarda giriş ve çıkış akımlarının değiştirilebilmesidir. Bu çalışma için entegre maksimum giriş akımı 10A ve maksimum çıkış akımı 5A olarak ayarlanmıştır. Ters yönlü güç aktarımında çıkış gerilimi 48V olarak ayarlanmıştır. Ters yön çıkış akımı 10A olarak ayarlanmıştır.

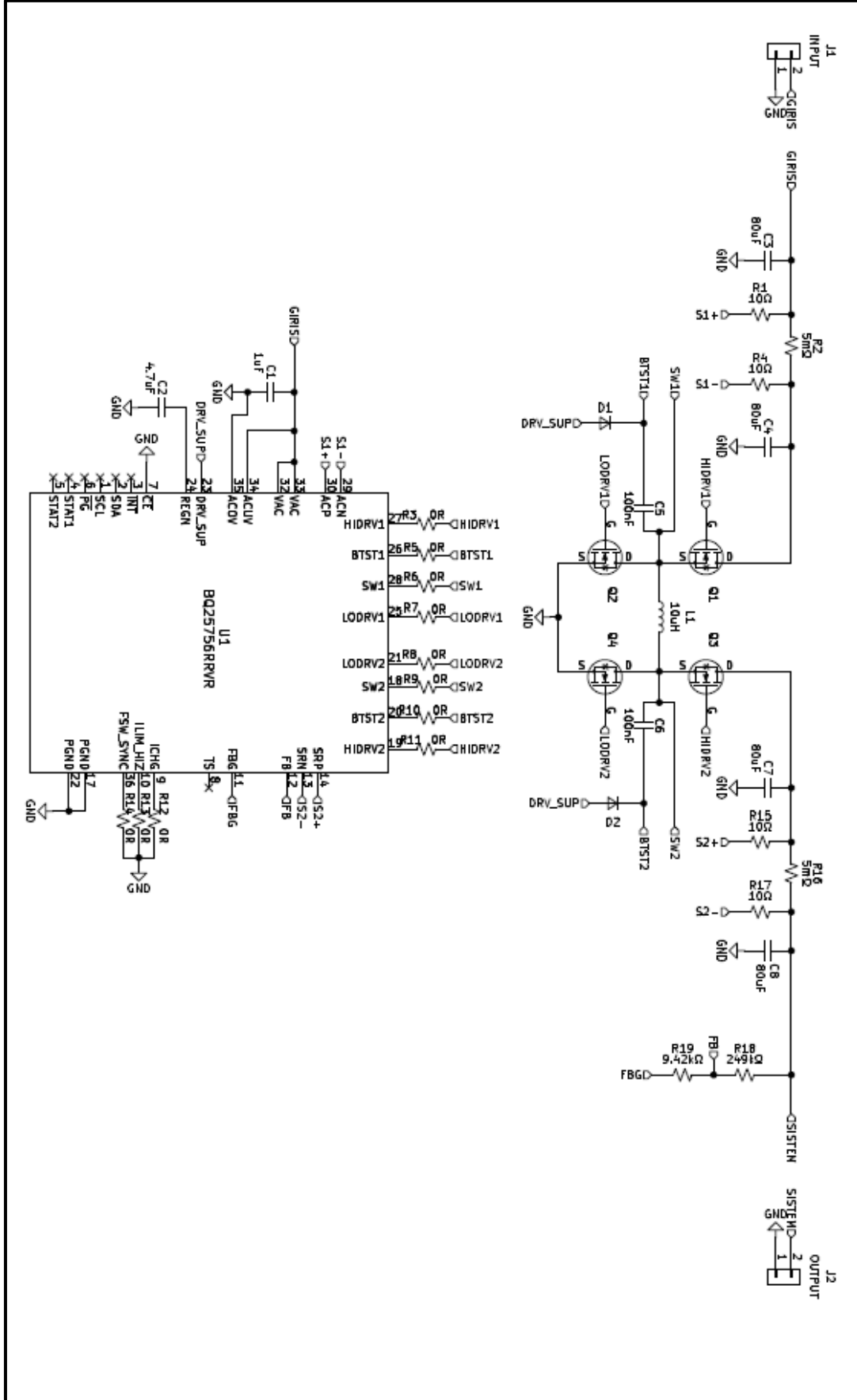
Tasarımı yapılan devre, batarya şarjı için güç verildiğinde bataryayı 4,88 A ile şarj ettiği ölçülmüştür. Bununla beraber dönüştürücü sinyallerinin ölçümleri alınmıştır.

Resim 6.1’de gösterilen görsel dönüştürücünün alçaltıcı modunda çalışırken, Q1 MOSFET’inin anahtarlama sinyaline aittir. Aynı şekilde senkron anahtarlama modunda çalıştığı için Q2 MOSFET’ine ait anahtarlama sinyali Resim 6.2’de gösterilmiştir. Dönüştürücü düşürücü modunda çalıştığı için Q3 MOSFET’i sürekli açık, Q4 MOSFET’i

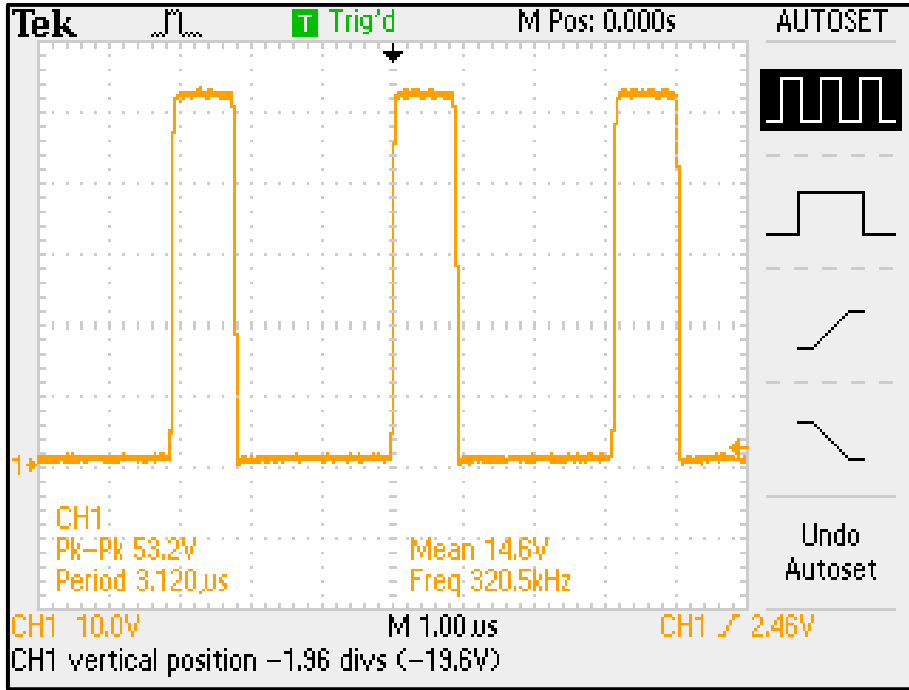
sürekli kapalı olacaktır. Resim 6.3’de bu anahtarlama sinyallerinin oluşturduğu L1 gerilimine ait ölçüm yer almaktadır. Resim 6.4’de görüldüğü üzere Q3 MOSFET’inin kapı terminalinin sürekli olarak 24.4V seviyesinde tutulması ile sürekli iletim halinde olması amaçlanmıştır. Aynı şekilde Q4 MOSFET’i kapı terminalinin gerilim seviyesi MOSFET’in kapalı kalmasını sağlamak için 0V’a yakın bir seviyede tutulmuştur.

Q1 ve Q2 MOSFET’lerinin anahtarlama sinyalleri incelendiğinde anahtarlama frekansının 320 kHz seviyelerinde olduğu görülebilir. Kullanılan direncin toleransından kaynaklı olarak anahtarlama frekansında bir miktar sapma olmuştur.

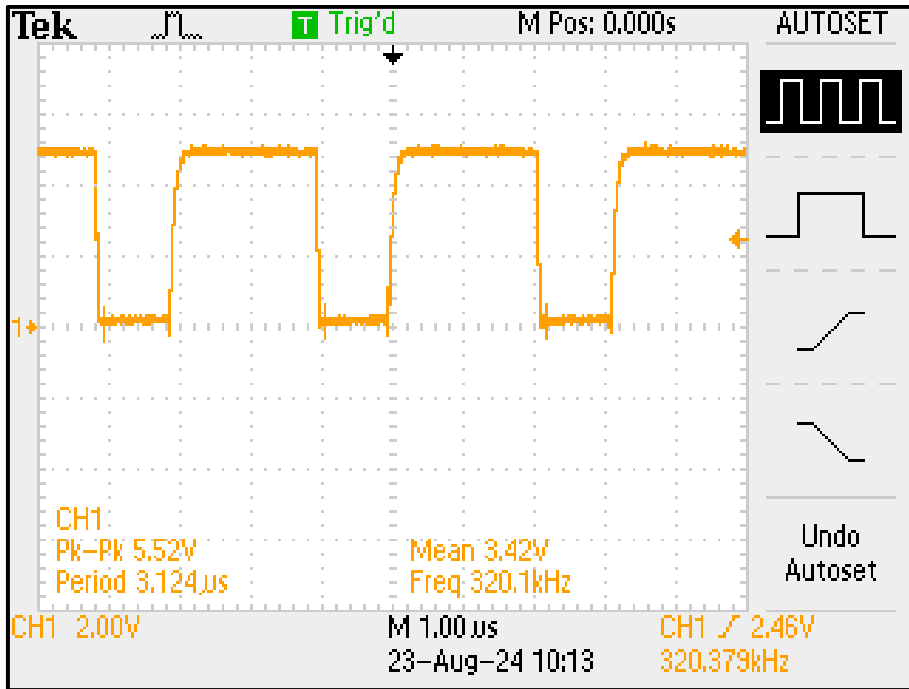
Q2 MOSFET’inin anahtarlama sinyali incelendiğinde EMI sorununa yol açabilecek bir salınım olduğu görülebilir. MOSFET’in çok hızlı açılıp kapanması sonucu veya lehimleme işleminden kaynaklı olarak bu tür salınımlar görülebilir.



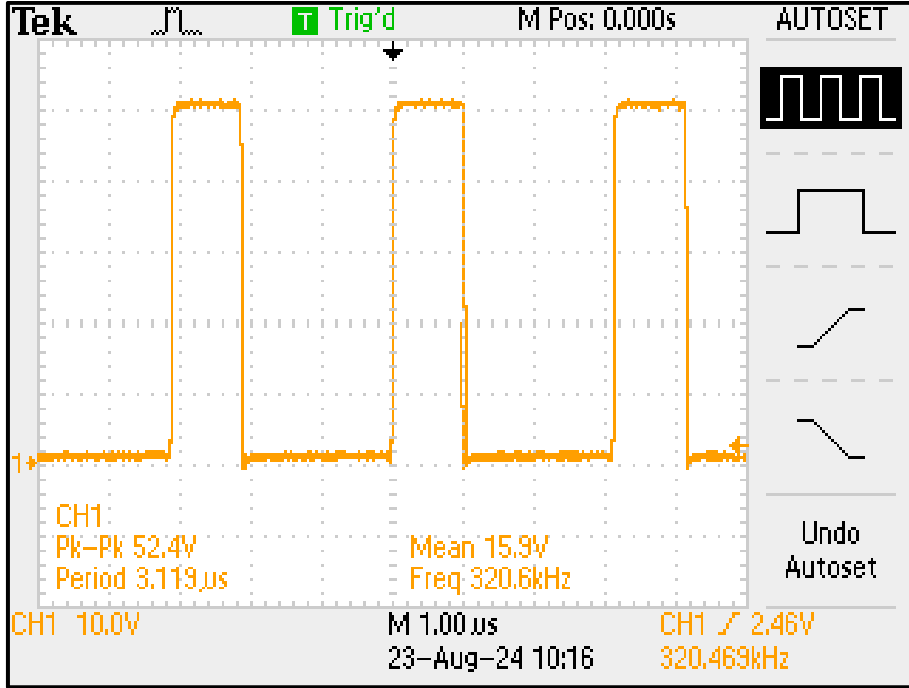
Şekil 6.1. BQ25756 genel şematik çizimi



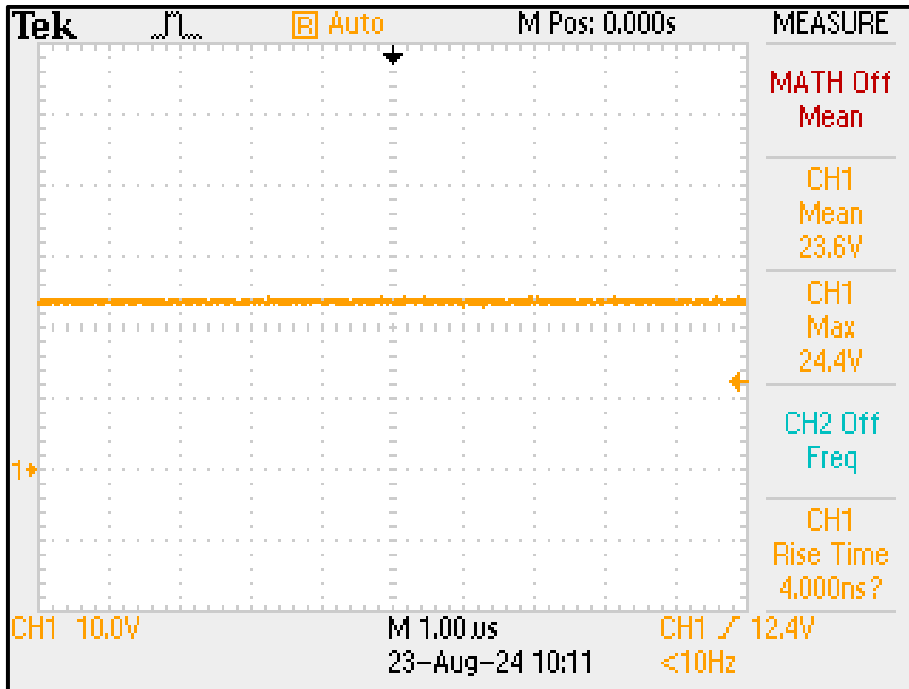
Resim 6.1. Düşürücü modunda HDRV1 sinyali osiloskop ölçümü



Resim 6.2. Düşürücü modunda LDRV1 sinyali osiloskop ölçümü



Resim 6.3. Düşürücü modunda L1 indüktörü gerilimi osiloskop ölçümü

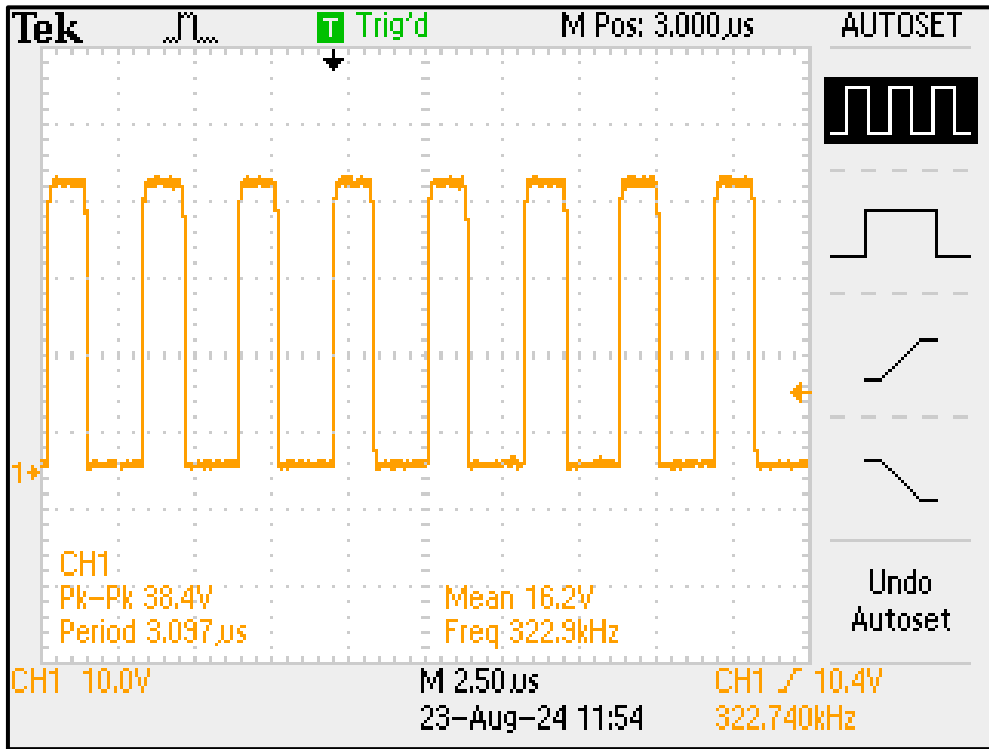


Resim 6.4. Düşürücü modunda Q3 MOSFET'i kapı terminalinin osiloskop ölçümü

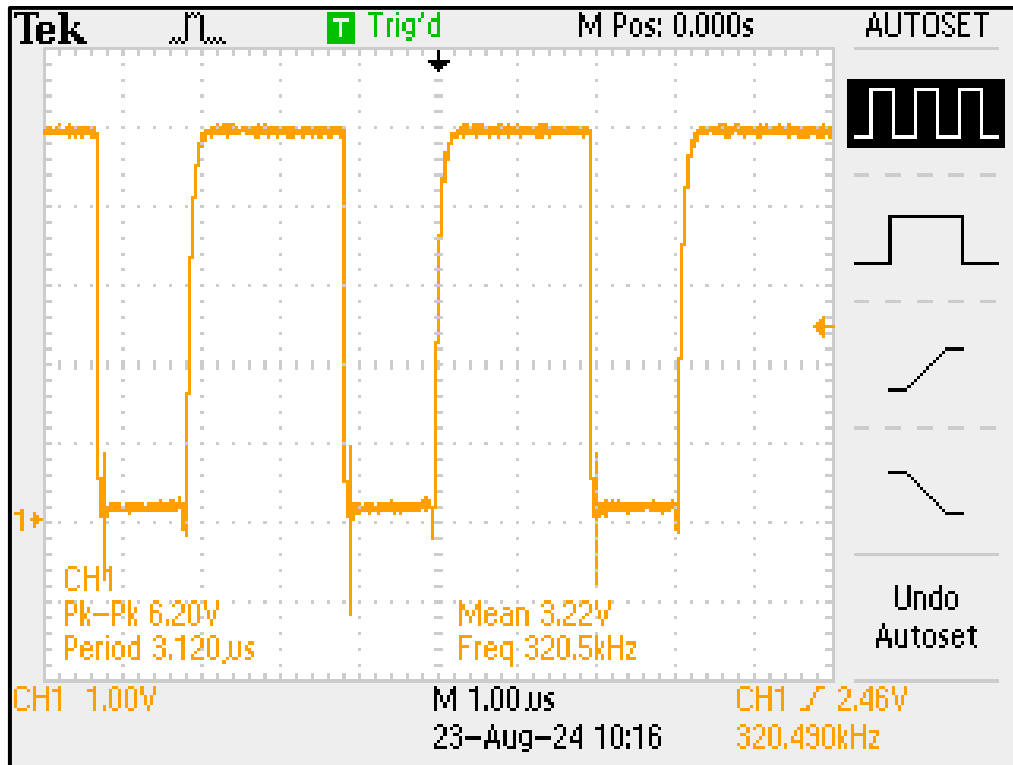
Giriş gücü kesildiğinde tasarlanan dönüştürücü, J2 konnektöründen J1 konnektörüne (bataryadan girişe) doğru yükseltici moda çalışmaya başlayacaktır. Batarya gerilimi düşük şarj seviyesinde olduğu için 14,1 V olarak ölçülmüştür. Yükseltici dönüştürücü modunda

14,1V olan batarya gerilimi, J1 konnektöründe 48,1V olarak ölçülmüştür. J1 konnektöründen 18 Ω değerinde bir direnç kullanılarak 2,6 amper akım çekilmiştir.

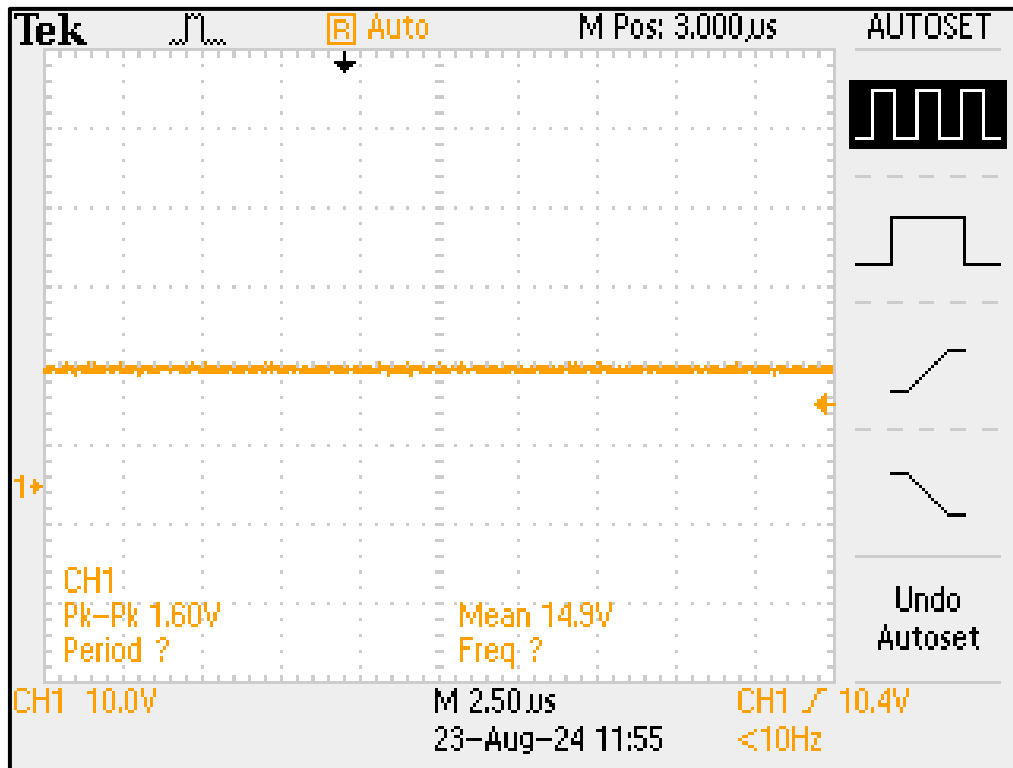
Resim 6.5’de gösterilen görsel dönüştürücünün yükseltici modunda çalışırken, Q1 MOSFET’inin anahtarlama sinyaline aittir. Aynı şekilde senkron anahtarlama modunda çalıştığı için Q2 MOSFET’ine ait anahtarlama sinyali Resim 6.6’da gösterilmiştir. Dönüştürücü yükseltici modunda çalıştığı için Q3 MOSFET’i sürekli açık, Q4 MOSFET’i sürekli kapalı olacaktır. Q3 MOSFET’inin sinyali Resim 6.7’de görülebilir.



Resim 6.5. Yükseltici modunda HDRV1 sinyali osiloskop ölçümü



Resim 6.6. Yükseltici modunda LDRV1 sinyali osiloskop ölçümü



Resim 6.7. Yükseltici modunda Q3 MOSFET'i kapı terminalinin osiloskop ölçümü

6.2. Filtre Tasarımı ve Uygulama

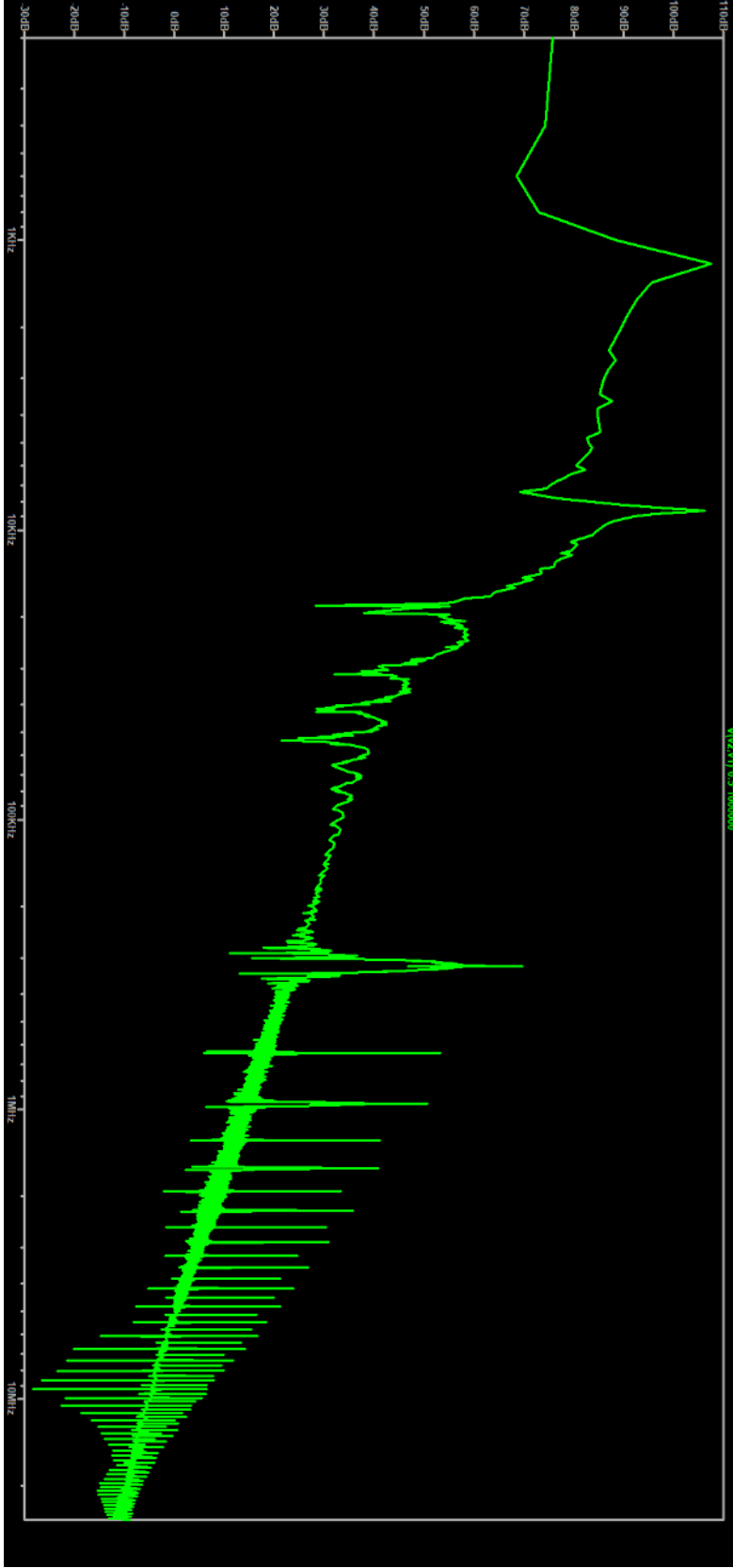
Filtre tasarımı, güç elektroniği ve haberleşme sistemleri gibi alanlarda gerekli önemin verilmesi gereken bir konudur. Düzgün bir filtre tasarımı, sistemin iletim yoluyla yayılma ve iletim yoluyla bağışıklık konularında daha güvenli çalışmasına olanak sağlayacaktır.

Güç elektroniğinde filtre tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken temel unsur, anahtarlama elemanına uygulanan sinyalin frekansıdır. Anahtarlama güç kaynakları elektronik devrelerdeki temel girişim kaynaklarını oluşturduğu için tasarımın bu tarafının dikkate alınması büyük önem taşımaktadır [24]. Güç elektroniğinde girişimleri önlemek için öncelikle tasarımın BDK aşamasında yolların ve bağlantı noktalarının dikkatli bir şekilde çizilmesi gerekir. BDK aşamasında gerekli önlemler alındıktan sonra devrenin giriş kısmına filtre eklenmesi EMI'yi önlemek için atılacak bir başka adımdır.

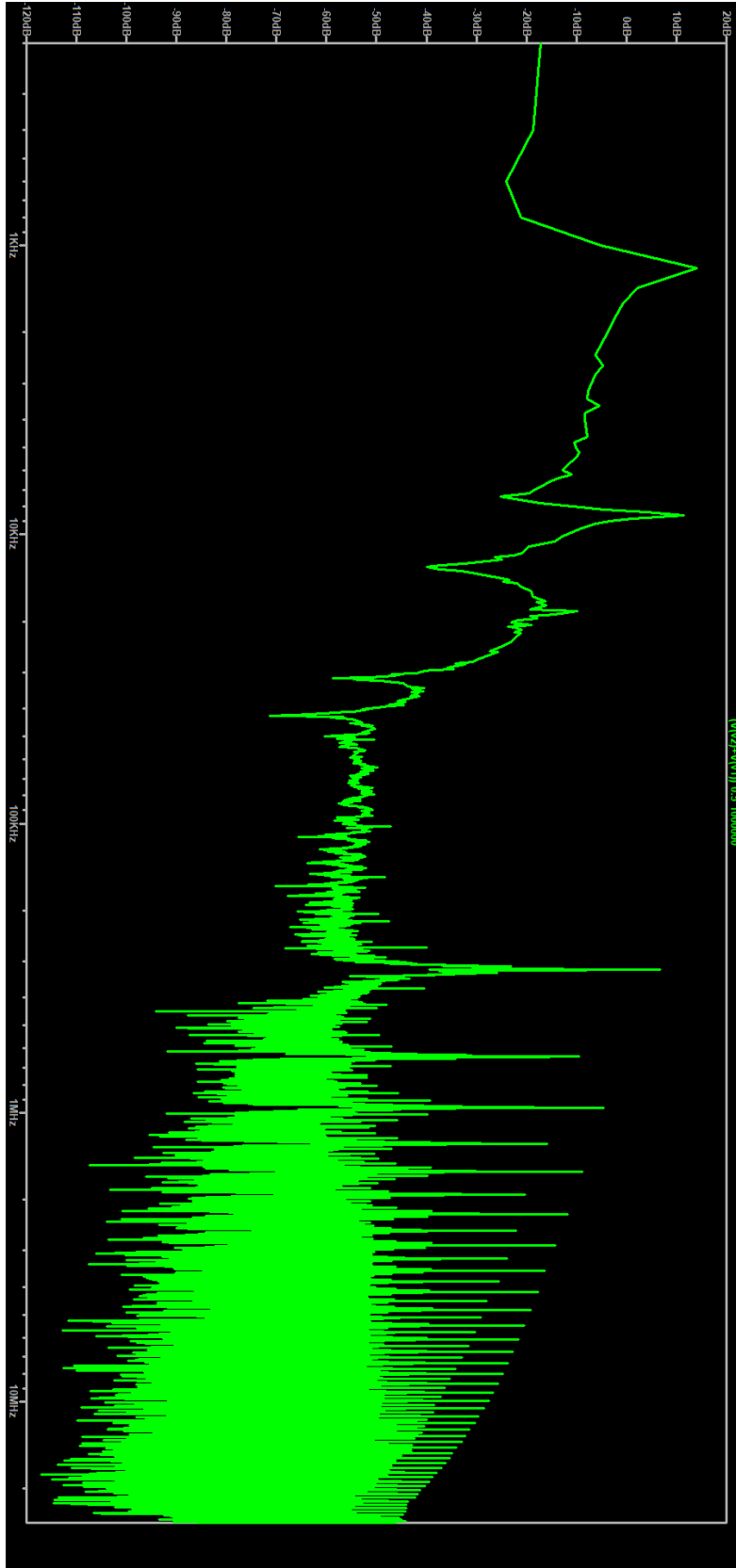
6.1'de ÇYD tasarımı yapılırken, hesaplanan anahtarlama frekansı 300 kHz olarak hesaplanmıştı. Fakat yapılan ölçüm sonuçlarında direnç toleransları ile frekansın 320 kHz olduğu görülmüştü. Filtre uygulaması olmadan sadece BDK kurallarına dikkat edilerek bir ÇYD'nin iletim yoluyla yayılma ölçüm sonuçlarında ortak mod ve diferansiyel mod girişimlerin 320 kHz ve katları olan harmoniklerde pik noktasına ulaşılacağı bir sonuçtur.

Simülasyon yardımıyla, herhangi gerçek bir ölçüm almadan, bir elektronik cihazın EMI ölçümleri tasarım aşamasında bir öngörü oluşturabilir. Bu öngörü zaman ve maliyet kayıplarının azaltılmasını sağlayacaktır. Bir sorun tespit edilmesi halinde, sorunun çözüme kavuşturulmasıyla gerçek testlere tabi tutulabilir. Filtre uygulanmadan 4.4'te bahsedilen iletim yoluyla yayılma testi uygulanması sonucu elde edilen ortak mod ve diferansiyel mod gürültü ölçümleri yükseltici mod ve alçaltıcı mod çalışma durumları için yapılan iletim yoluyla yayılma simülasyon sonuçları Resim 6.8, Resim 6.9, Resim 6.10 ve Resim 6.11 filtre eklenmeden ölçüm uygulandığında alınan ölçümlerin görselleridir. Harmoniklerinin oluşturduğu gürültüler bu görsellere bakılarak anlaşılabilir. ÇYD girişine bir CM ve DM filtreleme yapısı uygulandığında bu piklerin belirli bir oranda bastırılması beklenir. Anahtarlama frekansında yaklaşık olarak 70 dB μ V pik yaptığı gözlenmiştir.

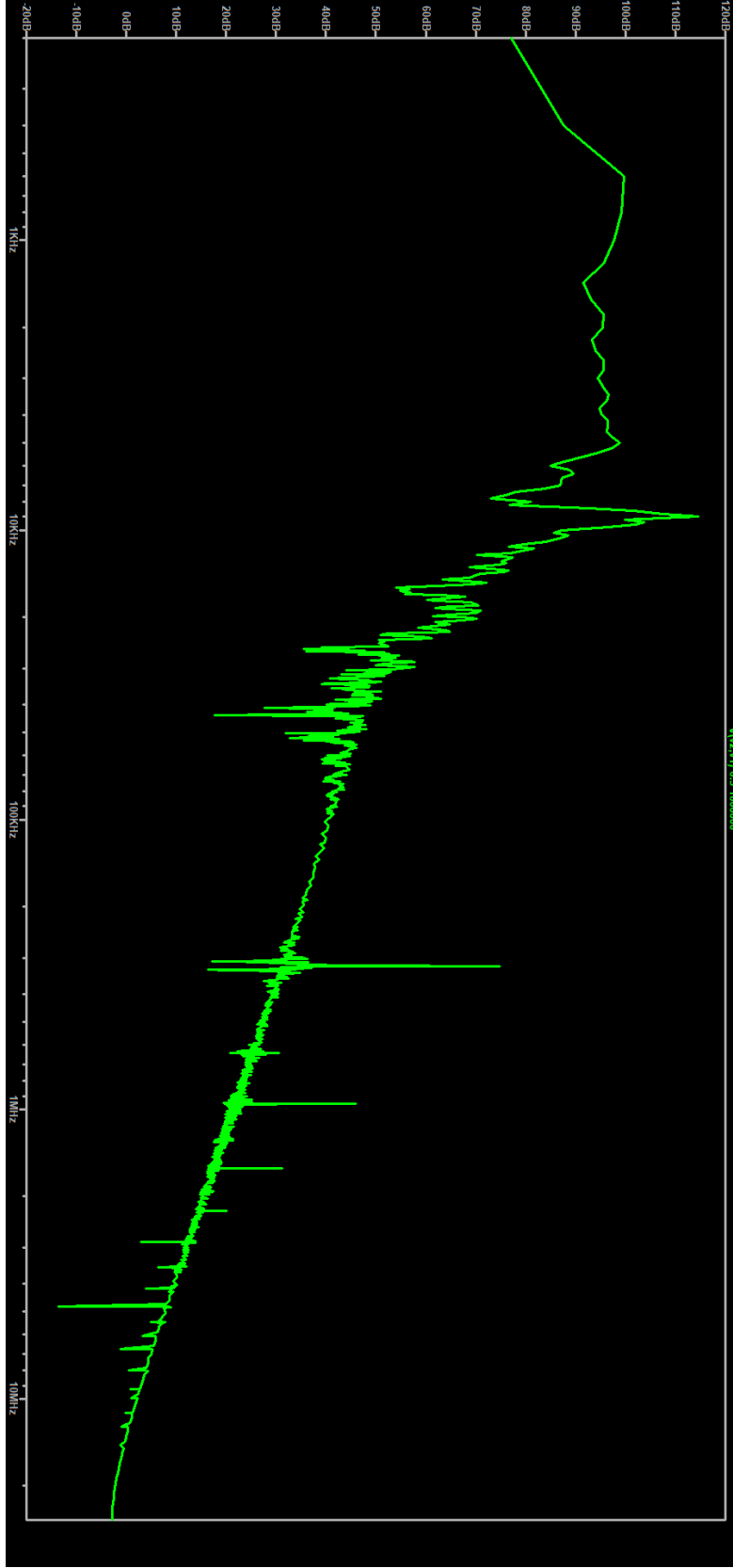
Ölçüm simülasyonu yapılırken öncelikle giriş ve dönüş arasına LISN'ler yerleştirilir. Bu LISN'ler aracılığı ile CM ve DM gürültü ölçümleri ayrı ayrı alınabilir [25].



Resim 6.8. ÇYD filtre eklenmemiş DM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod

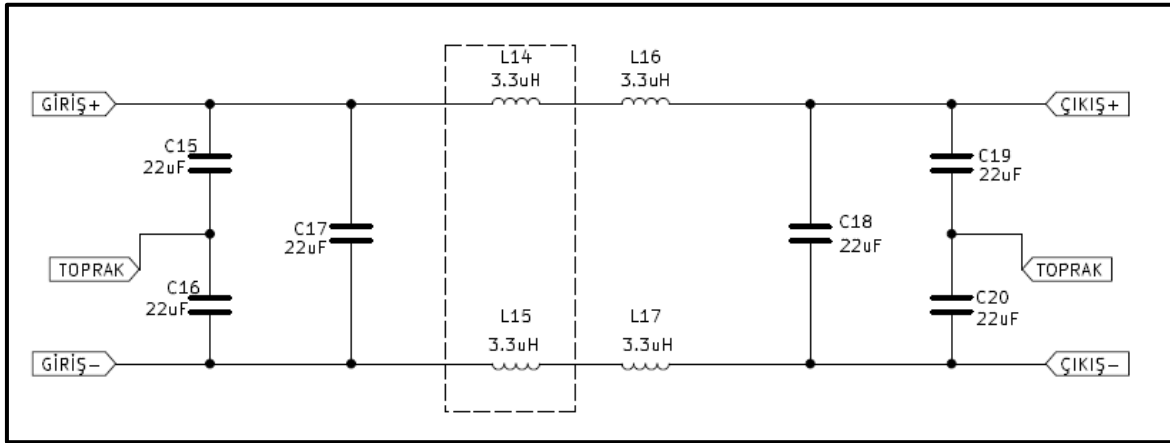


Resim 6.9. ÇYD filtre eklenmemiş CM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod



Resim 6.10. ÇYD filtre eklenmemiş DM gürültü ölçümü, yükseltici mod

Filtre tasarımı için öncelikle kaç dB μ V bastırılması gerektiğine karar verilmelidir. Yaklaşık 20 dB μ V bir bastırmak bu gürültünün kabul edilebilir seviyelere indirilmesini sağlayacaktır. Filtre tasarımı için CM ve DM için kapasitör ve indüktör değerleri ayrı ayrı seçilmelidir. Şekil 6.2’de tasarlanan ve ÇYD girişine uygulanan EMI filtrenin şematik çizimi görülmektedir. C15 ve C16 kapasitörleri ile C19 ve C20 kapasitörleri CM gürültünün yüksek frekansta, düşük empedans göstererek toprak tarafına aktarılmasını sağlayacaktır. L14 ve L15 indüktörleri CM gürültünün yüksek frekansta, yüksek empedans uygulayarak gürültünün bastırılmasını sağlayacaktır. C17 ve C18 kapasitörleri DM gürültünün yüksek frekanslarda, düşük empedans göstererek çıkışa ulaşmasını engelleyecektir. L16 ve L17 DM gürültünün, yüksek frekanslarda yüksek empedans uygulayarak bastırılmasını sağlayacaktır. Eş. 4.10 ve Eş. 4.11 kullanılarak CM ve DM gürültülerin kesme frekansı belirlenebilir. Eş. 6.5 ve Eş. 6.6 sonucunda CM gürültü kesme frekansı yaklaşık olarak 42 kHz civarındadır. DM gürültü kesme frekansı yaklaşık olarak 104 kHz civarındadır.

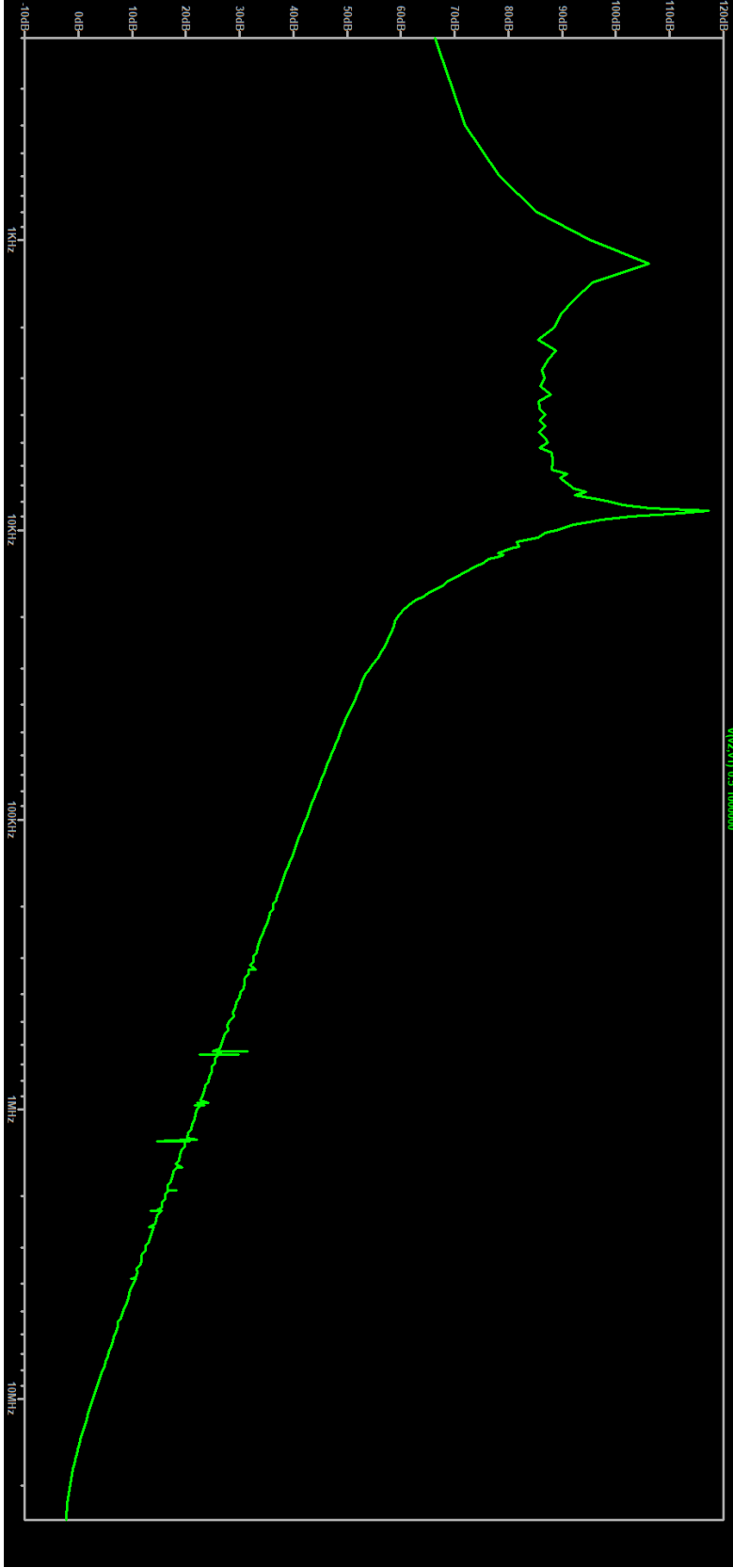


Şekil 6.2. EMI Filtre şematik çizimi

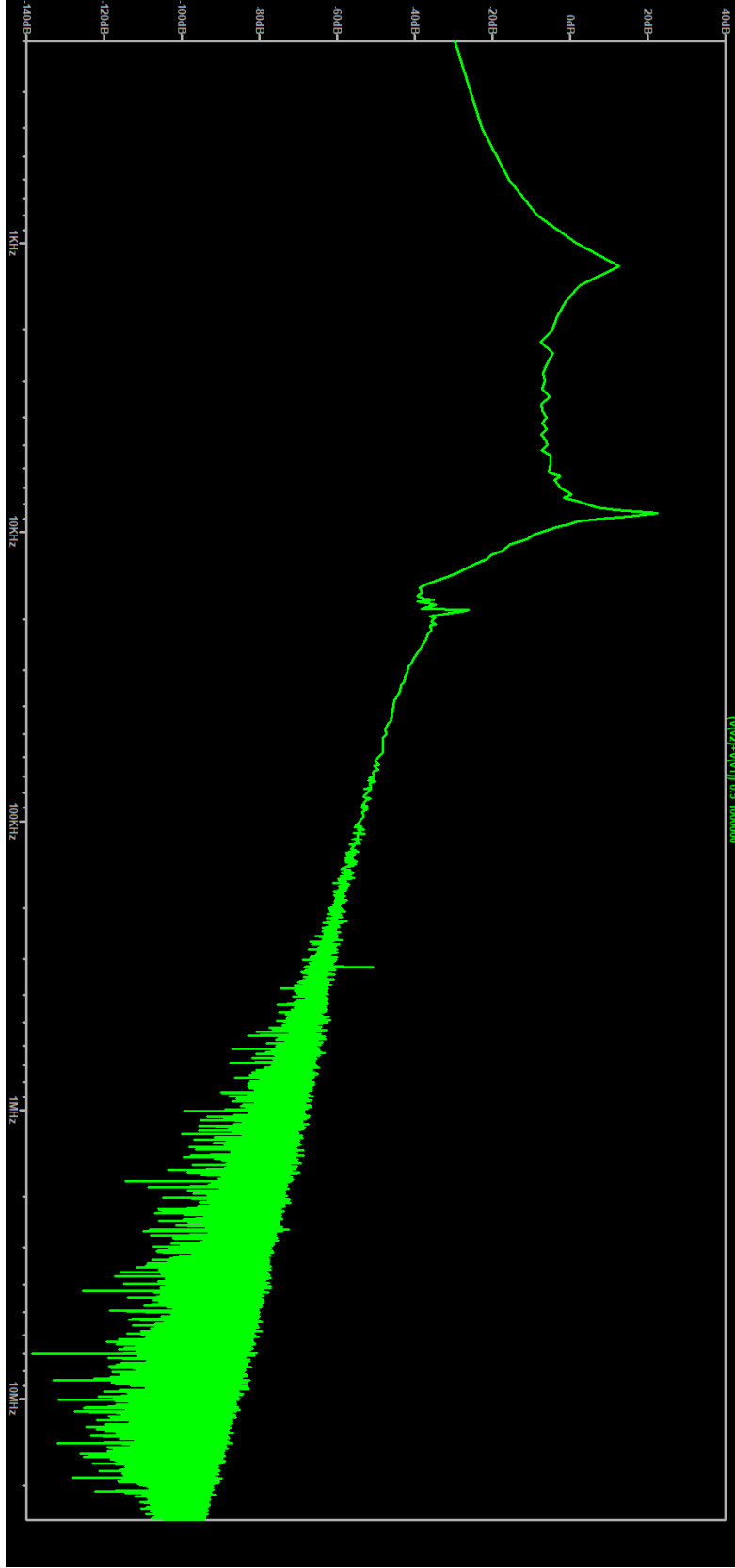
$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.3\mu H \times 2 \times 22\mu F}} \quad (6.5)$$

$$f_{R,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2 \times 3.3\mu H + 4\mu H) \times 22\mu F}} \quad (6.6)$$

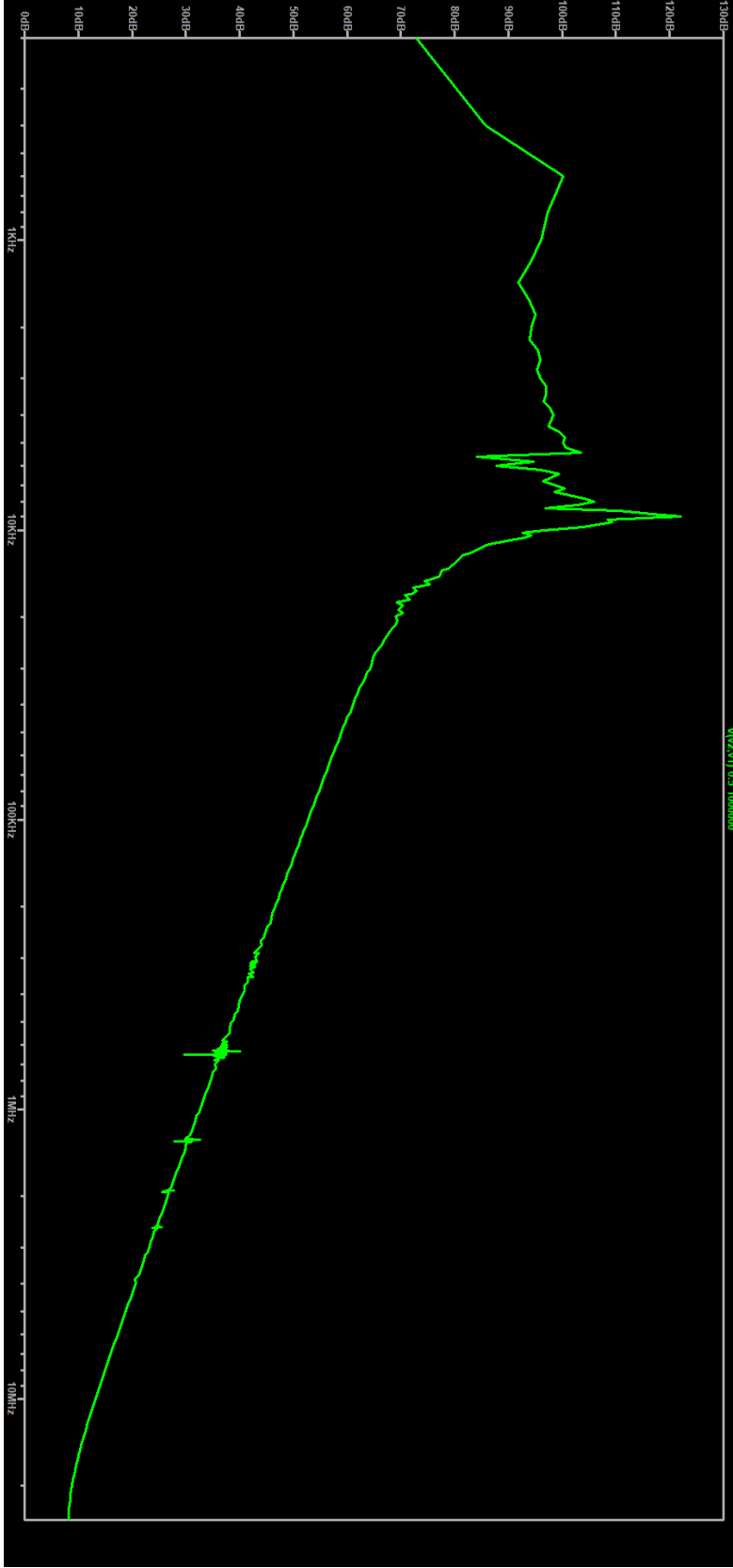
Şekil 6.1’de Giriş kısmına uygulanmıştır. Filtre uygulandıktan sonra ölçüm sonuçları Resim 6.12, Resim 6.13, Resim 6.14 ve Resim 6.15’te gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere filtre uygulanmasıyla 40dB μ V seviyesinde bir bastırılma görülmüştür. Bu bastırılma oranı ile birlikte ÇYD MIL-STD-461 CE102 testinden sorunsuz bir şekilde geçebilir.



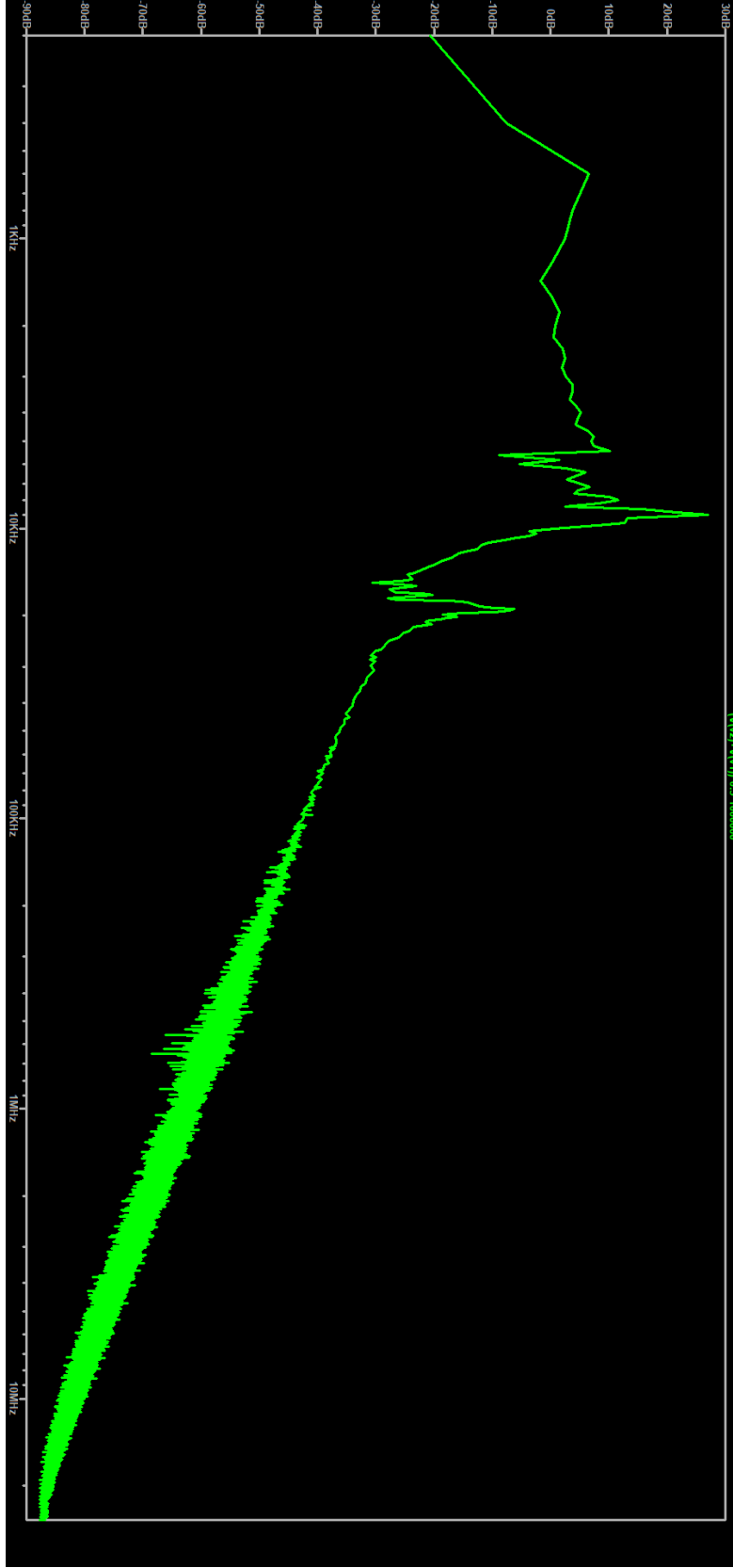
Resim 6.12. ÇYD filtre eklenmiş DM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod



Resim 6.13. ÇYD filtre eklenmiş CM gürültü ölçümü, alçaltıcı mod



Resim 6.14. ÇYD filtre eklenmiş DM gürültü ölçümü, yükseltici mod



Resim 6.15. ÇYD filtre eklenmiş CM gürültü ölçümü, yükseltici mod

7. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında, bir ÇYD tasarlanmış ve bu ÇYD'nin çalışma durumu incelenmiştir. ÇYD 48V giriş geriliminde çalışırken alçaltıcı dönüştürücü modunda çalışmakta ve çıkışında bulunan 4S'lik bir bataryayı şarj edebilmektedir. Ana güç kaynağında oluşan bir kesintiden kaynaklı olarak şarj durumunda olan batarya, ÇYD'nin yükseltici dönüştürücü modunda çalışması ile deşarj durumunda olacaktır. Böylece ÇYD ana hatta 48V gerilim sağlayabilecek ve ana sistemde güç kesintisi olmayacaktır. Tez çalışmasında üzerinde durulan bir diğer konu ise ÇYD'nin ana güç hattı üzerindeki EMI performansının incelenmesi ve iyileştirilmesidir. İlk olarak yapılan iletim yoluyla yayılma testinde anahtarlama frekansı ve katları olan harmoniklerinde pikler görülmüştür. Oluşan bu piklerin seviyesinin düşürülmesi için ÇYD ana güç girişine EMI filtre yapısı eklenmiştir. Eklenen bu filtre yapısı ile iletim yoluyla yayılan girişimlerin CM ve DM olarak bastırılması amaçlanmıştır. Filtre yapısının eklenmesi ile iletim yoluyla yayılma testi tekrarlanmış ve anahtarlama frekansı ve katları olan harmoniklerin bastırıldığı gözlenmiştir.

Simülasyon metodu kullanılarak bir DC-DC dönüştürücü türü olan ÇYD'lerin EMI performansının filtreli ve filtresiz olarak sonuçları değerlendirilmiştir. Gerçek testler öncesinde yapılacak simülasyon çalışmasının, gerçek testlerde ortaya çıkabilecek problemlere karşı bir öngörü oluşturabilir. Bu öngörü sayesinde testlerin maliyeti ve süresi ciddi anlamda azalacaktır. Filtrenin kaç dB bastırma uygulayacağı, sinyallerinin girişim oluşturma seviyesi gibi parametreler bu tür simülasyonlar sayesinde görülebilir ve genel önlemlerin alınmasını sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Rezaii, R., Nilian, M., Khalili, R., Safayatullah, M. ve Batarseh, I. (2022, August). *A hybrid bidirectional dc-dc converter for electric vehicles applications*. 2022 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Shanghai, China, 1-6.
2. Liu, K.-B., Liu, C.-Y., Liu, Y.-H., Chien, Y.-C., Wang, B.-S., ve Wong, Y.-S. (2016). Analysis and Controller Design of a Universal Bidirectional DC-DC Converter. *Energies*, 9(7), 501-502.
3. Mesalam, Y. I., Awdallh, S., Gaied, H., ve Flah, A. (2024). Interleaved bidirectional DC-DC converter for renewable energy application based on a multiple storage system. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(2), 13329-13334.
4. Eom, J., Kim, J., Kim, J., Oh, S., Jung, Y., ve Won, C. (2012). Analysis of a novel soft switching bidirectional DC-DC converter. *Journal of Power Electronics*, 12(6), 859-868.
5. Song, M.-S., Son, Y.-D., ve Lee, K.-H. (2014). Non-isolated bidirectional soft-switching SEPIC/ZETA converter with reduced ripple currents. *Journal of Power Electronics*, 14(4), 649-660.
6. Internet: Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference. URL-1: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960009442/downloads/19960009442.pdf>, Son Erişim Tarihi: 10.09.2024.
7. Nilsson, J. W. ve Riedel, S. A. (2014) *Elektrik Devreleri* (8. Baskı). Ankara: Palme Yayınevi, 188-195.
8. Boylestad, R. L., Naselsky, L. (2011) *Elektronik Cihazlar ve Devre Teorisi* (10. Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 392-400.
9. Qiu, D. ve Zhang, B. (2014) *Sneak circuits of power electronic converters* (First Edition). New Jersey, ABD: Wiley-IEEE Press, 60-103.
10. Keller, R. B. (2022) *Design for electromagnetic compatibility—in a nutshell theory and practice*. New York: Springer, 4-36.
11. Azgın, I., Inan, A., Çeliktas, S., Acar, K. B., Taplamacioglu, M. C., ve Demirci, M. (2022). *EMI filter design with passive components for power lines*. 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 1-6.
12. Zhang, B. ve Wang, X. (2014). *Chaos analysis and chaotic EMI suppression of DC-DC converters*. New York: John Wiley & Sons, 93-108.
13. Li, L. ve Zhang, X. (2022). EMI analysis of a switching power supply. *Journal of Physics: Conference Series*, 2246(1), 012048.

14. Internet: Controlling switch-node ringing in synchronous buck converters. URL-2: https://www.ti.com/lit/an/slyt465/slyt465.pdf?ts=1724588532019&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F Son Erişim Tarihi: 25.08.2024.
15. Vimala, R., Baskaran, K., ve Britto, K. R. A. (2012). Modeling and filter design through analysis of conducted EMI in switching power converters. *Journal of Power Electronics*, 12(1), 632-642.
16. Kotny, J. L., Duquesne, T., ve Idir, N. (2010). *Design of EMI filters for DC-DC converter*. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France, 1-6.
17. Natarajan, S., Babu, T. S., Balasubramanian, K., Subramaniam, U., ve Almahles, D. J. (2020). A State-of-the-art review on conducted electromagnetic interference in non-isolated DC to DC converters. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 8(1), 2564-2577.
18. Serrao, V., Lidozzi, A., Solero, L., ve Napoli, A. D. (2008). *Common and differential mode EMI filters for power electronics*. 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 918-923.
19. Internet: MCOTS-F-28-P-HP Passive Filter Hafı Brick. URL-3: <https://www.synqor.com/products/mil-cots/mcots-f-28-p-hp> Son Erişim Tarihi: 24.08.2024.
20. Internet: Würth Elektronik Datasheet. URL-4: <https://www.w-online.com/components/products/datasheet/74438366022.pdf> Son Erişim Tarihi: 10.08.2024.
21. Internet: Samsung Electro-Mechanics Datasheet. URL-5: https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/41/CL32B225KCJS_NNE_Spec.pdf Son Erişim Tarihi: 10.08.2024.
22. Internet: Requirements For The Control Of Electromagnetic Interference Characteristics Of Subsystems And Equipment. URL-6: <https://cecas.clemson.edu/cvel/pdf/MIL-STD-461F.pdf> Son Erişim Tarihi: 26.08.2024.
23. Internet: BQ25756: Standalone/I2C Controlled, 1- to 14-Cell Bidirectional Buck-Boost Battery Charge Controller. URL-7: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq25756> Son Erişim Tarihi: 10.08.2024.
24. Nagrial, M. H. ve Hellany, A. (1999). *EMI/EMC issues in switch mode power supplies (SMPS)*. International Conference and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, York, UK, 180-185.
25. Internet: S. L. (2021). How to Get the Best Results Using LTspice for EMC Simulation—Part 1. URL-6: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/how-to-get-the-best-results-using-ltspice-part-1.html> Son Erişim Tarihi: 27.08.2024.



Gazili olmak ayrıcalıktır