



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BUCK TİPİ DC/DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER İÇİN**  
**EMI FİLTRE TASARIMI VE UYGUNLUK**  
**ÖLÇÜMLERİ**

**Gülcan YİĞİT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Eylül - 2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Gülcan YİĞİT tarafından hazırlanan “Buck Tipi DC/DC Dönüştürücüler için EMI Filtre Tasarımı ve Uygunluk Ölçümleri” adlı tez çalışması 26/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof.Dr. Ramazan AKKAYA

#### Danışman

Prof.Dr. Ercan YALDIZ

#### Üye

Doç.Dr. Hulusi KARACA

### İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Gülcan YİĞİT

Tarih:26.09.2022

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### BUCK TİPİ DC/DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER İÇİN EMI FİLTRE TASARIMI VE UYGUNLUK ÖLÇÜMLERİ

**Gülcan YİĞİT**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ercan YALDIZ  
Yıl 2022, 69 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA  
Prof. Dr. Ercan YALDIZ  
Doç. Dr. Hulusi KARACA**

Anahtarlamalı güç kaynaklarında elektromanyetik girişimin (EMI) bastırılması, elektronik sistemlerin kullanıldığı ticari ve askeri alanlar için büyük önem taşımaktadır. Anahtarlamalı kaynakların çoğalmasının en büyük yan etkisi ürettikleri EMI gürültüsüdür. Yüksek frekanslı gürültünün sistemdeki diğer cihazlara iletilerek hassas analog veya dijital sinyal devrelerinin performansını düşürmesi sorun haline gelmektedir. Bu nedenle anahtarlamalı güç kaynaklarına giriş filtreleri uygulanır. Giriş filtresi kullanımının iki ana amacı vardır: biri güç kaynağından gelen gürültü ve dalgalanmayı bastırmak, diğeri ise aynı gücü kullanan diğer cihazlar için anahtarlama frekansındaki parazit sinyalini azaltmaktır. Bu çalışmada, 150 kHz anahtarlama frekansında çalışan yüksek verimli anahtarlamalı bir DC/DC Buck dönüştürücü incelenmiştir. DC/DC Buck dönüştürücüye giriş filtresi uygulanmış ve güç hatlarında meydana gelen EMI sorunlara rağmen uyumlu bir şekilde çalışabilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada MIL-STD-461G standartlarında CE 102 testine uygun ortak mod ve diferansiyel mod EMI bastırma filtreleri tasarlanarak simüle edilmiştir. Tasarlanan filtreler en iyi sonucu alabilmek için LTspice programında optimize edilmiştir. DC/DC Buck dönüştürücü 12V, 5V ve 3.3V olmak üzere 3 farklı voltaj seviyesine getirilerek simülasyon programı üzerinden grafikler elde edilmiştir. Tasarım devre haline getirilerek 3 farklı voltaj seviyesinde iletim hatlarındaki emisyon ölçümü ve testleri yapılmıştır. Filtre içeren ve filtresiz sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Elektromanyetik Girişim Filtresi, EMI, EMC, DC/DC Dönüştürücü, Güç Dönüştürücüsü, Ortak Mod Tıkama Bobini, Fark Modu Filtresi, MIL-STD-461G, CE 102 Testi

## ABSTRACT

## MS THESIS

### EMI FILTER DESIGN AND COMPATIBILITY MEASUREMENTS FOR BUCK TYPE DC/DC CONVERTERS

**Gülcan YİĞİT**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Electrical-Electronic Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ercan YALDIZ  
Year 2022, 69 Pages**

#### **Jury**

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA  
Prof. Dr. Ercan YALDIZ  
Assoc. Prof. Dr. Hulusi KARACA**

The suppression of electromagnetic interference (EMI) in switched-mode power supplies is of great importance for commercial and military areas where electronic systems are used. The biggest side-effect of the proliferation of switched sources is the EMI noise which is produced by them. It becomes a problem that high frequency noise is transmitted to other devices in the system, reducing the performance of sensitive analog or digital signal circuits. For this reason, input filters are applied to switched-mode power supplies. The use of an input filter has two main purposes: one is to suppress noise and ripple from the power supply, and the other is to reduce the interference signal at the switching frequency for other devices using the same power. In this study, a high efficiency switched DC/DC Buck converter operating at 150 kHz switching frequency is investigated. An input filter has been applied to the DC/DC Buck converter and it is aimed to operate harmoniously despite the EMI problems occurring in the power lines. In this study, common mode and differential mode EMI suppression filters are designed and simulated in accordance with CE 102 test in MIL-STD-461G standards. The designed filters are optimized in LTspice program to get the best results. The DC/DC Buck converter was brought to 3 different voltage levels as 12V, 5V and 3.3V, and graphics were obtained through the simulation program. Emission measurements and tests on transmission lines at 3 different voltage levels were carried out by putting the design into circuit. Results with and without filter were compared.

**Keywords:** Electromagnetic Interference Filter, EMI, EMC, DC/DC Converters, Power Converter, Common Mode Choke, Differential Mode Filter, MIL-STD-461G, CE 102 Test

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmamda emeği geen baőta danıőmanım Prof. Dr. Ercan YALDIZ'a olmak üzere, alıőmalarımnda yardımcı olan MilTest'e, Best Grup Savunma'ya, TUSAŐ'a, her türlü desteklerini üzerimde hissettiğim canım aileme ve eőime en içten teőekkürlerimi sunuyorum.

Gülcan YİğİT  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Elektromanyetik Girişim .....	2
1.2 EMI ve EMC ile ilgili Bazı Standartlar .....	4
1.2.1 MIL-STD-461G Standardı CE 102 Testi .....	5
1.2.2. EMI Gürültü Türleri .....	7
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>9</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>17</b>
3.1. Anahtarlamalı DC/DC Çeviricilerin İncelenmesi.....	17
3.1.1. Giriş Kapasitörünün Seçilmesi .....	21
3.1.2. İndüktör Seçimi .....	23
3.1.3. Çıkış Kapasitörünün Seçilmesi.....	25
3.1.4. Diyodun Seçilmesi.....	27
3.2. EMC Uyumluluk Gereklilikleri.....	27
3.2.1. EMC Standartlarını Karşılacak Bileşenler.....	28
3.2.2. Temel EMI Filtre Topolojileri .....	29
3.2.2. EMI Gürültü Ölçümü İçin LISN Cihazı .....	30
3.3.4. EMI Filtre Tasarım Prosedürü .....	31
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>37</b>
4.1. LTspice Tasarım Aracını Kullanarak Tasarımın Oluşturulması ve Simülasyon Sonuçları .....	37
4.2. Deneysel Sonuçlar.....	47
4.3. Ölçüm Sonuçları ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması .....	57
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>60</b>
5.1. Sonuçlar .....	60
5.2. Öneriler .....	61
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>62</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>66</b>
EK-1 LM2596 Teknik Özellikleri .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$C_{CM}$	: Ortak Mod Kapasitörü
$C_{DM}$	: Diferansiyel Mod Kapasitörü
$C_{RSS}$	: Ters Transfer Kapasitansı
$D$	: Doluluk Oranı
$f_{CM}$	: Diferansiyel Mod Frekansı
$f_{DM}$	: Ortak Mod Frekansı
$f_{SW}$	: Anahtarlama Frekansı
$I_{O\_CM}$	: Ortak Mod Çıkış Akımı
$I_{O\_DM}$	: Diferansiyel Mod Çıkış Akımı
$I_{S\_CM}$	: Ortak Mod Kaynak Akımı
$I_{S\_DM}$	: Diferansiyel Mod Kaynak Akımı
$L_{CM}$	: Ortak Mod Endüktansı
$L_{DM}$	: Diferansiyel Mod Endüktansı
$Q_G$	: Gate Şarjı
$R_{DS(ON)}$	: MOSFET'in İç Direnci
$w$	: Omega Sembolü
$\Delta I_L$	: İndüktör Anlık Akım Değişimi

### Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
AEF	: Aktif EMI Filtresi
CM	: Ortak Mod (Common Mode)
CISPR	: International Special Committee on Radio Interference
CST MWS	: Computer Simulation Technology Microwave Studio
DC	: Doğru Akım
DM	: Fark Modu (Differential Mode)
DOD	: Department of Defense
EEC	: European Economic Consortium



EM	: Elektromanyetik
EMI	: Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compability)
EPC	: Eşdeğer Paralel Kapasitans (Equivalent Parallel Capaticance)
ESL	: Eşdeğer Seri İndüktans (Equivalent Series Inductance)
ESR	: Eşdeğer Seri Direnç (Equivalent Series Resistance)
EUT	: Test Edilen Cihaz
FCC	: Federal Communications Commission
GaN	: Galyum Nitrat
HV	: Yüksek Voltaj
IEC	: International Electrontechnical Commission
LISN	: Hat Empedansını Dengeleme Devresi (Line Impedance Stabilization Network)
LV	: Düşük Voltaj
ODEF	: EMI Filtrelerinin Optimize Edilmiş Tasarımı
PCB	: Baskı Devre Kartı
PFC	: Güç Faktörü Düzeltmesi
PID	: Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RF	: Radyo Frekans
RMS	: Karekök Ortalama (Root Mean Square)
SiC	: Silisyum Karbür
SMPS	: Anahtarlamalı Güç Kaynağı (Switch Mode Power Supply)
THD	: Toplam Harmonik Bozulma
YF	: Yüksek Frekans
ZVT	: Sıfır Gerilim Geçişi (Zero Voltage Transition)

## 1. GİRİŞ

Çevresel elektromanyetik kirlilik, elektronik ve elektrikli ekipmanlarda yıllardır süregelen ciddi bir sorundur. Bütün elektrikli veya elektronik cihazlar çevresi için potansiyel bir gürültü kaynağıdır. Bu cihazlar çalışırken çevreye bir miktar elektromanyetik enerji yayarlar (Chen, 2004). Ortaya çıkan veya ortamda var olan bu enerjiden cihazların veya sistemlerin etkilenmesine “Elektromanyetik Girişim” (EMI, Electromagnetic Interference) denir. “Elektromanyetik Uyumluluk” (EMC, Electromagnetic Compatibility) ise Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı’nın 2 Ekim 2016 tarihinde resmi gazetede yayımladığı yönetmeliğe göre; bir donanımın kendi elektromanyetik ortamında, aynı ortamda bulunan donanımlarda tolere edilemeyen elektromanyetik bozulmaya yol açmaksızın tatminkâr bir şekilde çalışabilme yeteneğidir (Aksoy, 2014). Başka bir deyişle yüksek enerji seviyeli elektromanyetik parazitler ortak bir elektromanyetik ortamda elektrikli ve elektronik cihazların veya sistemlerin fonksiyonlarında hatalara neden olabilir. Cihazların uyum içinde, birlikte bozulmadan çalışabilmeleri için elektromanyetik uyumluluk (EMC) önemli bir mühendislik disiplini haline gelir.

Anahtarlama güç kaynakları, temel olarak yüksek verimli güç dönüşümleri nedeniyle modern elektronik sistemlerde ve askeri alanlarda kullanılmaktadırlar. Anahtarlama kaynaklarının çoğalmasının en büyük yan etkisi ürettikleri EMI gürültüsüdür (Miloudi ve ark., 2012). Yüksek frekanslı gürültünün sistemdeki diğer cihazları etkileyerek hassas analog veya dijital sinyal devrelerinin performansını düşürmesi sorun haline gelmektedir. Elektronik sistemlerde oluşan EMI gürültünün engellenmesi veya azaltılması bu alanları doğrudan olumlu etkilemektedir.

Anahtarlama güç kaynakları doğaları gereği, potansiyel bir elektronik gürültü kaynağıdır. Güç kaynağından yayılan EMI, anahtarlama sırasında daha yüksek frekanslarda üretilir. Örneğin, tipik bir DC/DC dönüştürücünün anahtarlama akımı, yüksek parazit içeren titreşimli bir akımdır. Güç MOSFET’lerinin hızlı bir şekilde açılıp kapanması, akım akışında ani kesintiler oluşturarak yüksek frekanslı voltaj değişimi ve ani yükselmelere neden olur.

Anahtarlama güç kaynağının gürültüsü diğer devre ve sistemlere üç yolla iletilebilir. Bunlar yayılan emisyonlar (anten), giriş tarafında iletilen emisyonlar ve çıkış

tarafında iletilen emisyonlardır. İletilen emisyonlar filtreler yardımıyla azaltılabilir. Filtrenin yalnızca belirli bir frekans aralığında gürültüyü azaltmak için optimize edilmesi gerekmez, aynı zamanda tüm güç kaynağının kararlılığını da etkiler.

Elektronik cihazların EMI performanslarında kabul edilebilir sınırlar koymak için birçok standart ortaya çıkmıştır. Anahtarlamalı güç kaynaklarında bu limitleri karşılamak için, önce EMI performansını ölçmek ve gerekirse EMI'yi azaltmak için uygun giriş EMI filtrelemesi eklemek gerekir. Ne yazık ki, EMI analizi ve filtre tasarımı, genel olarak zaman alıcı nitelikte yeniden tasarım, oluşturma, test etme ve tasarıma baştan başlama sürecini gerektiren zor bir görev olabilir.

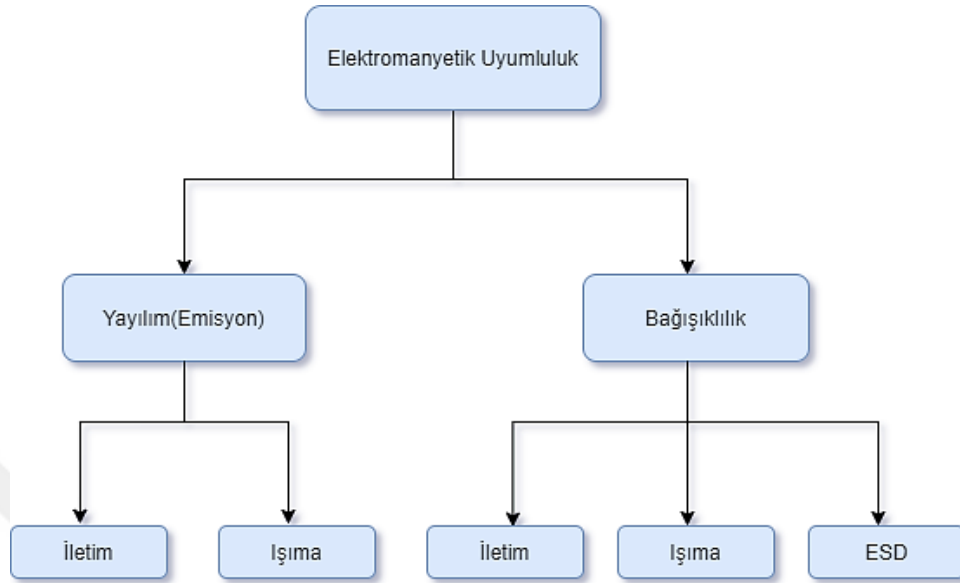
## 1.1. Elektromanyetik Girişim

EMI elektronik bir cihaz bir elektromanyetik alana maruz kaldığında meydana gelebilecek bir olgudur. İçerisinde elektronik devresi olan herhangi bir cihaz EMI'ye duyarlı olabilir. EMI, elektromanyetik enerjinin kaynaktan çıkıp, kuplaj yoluyla ilerleyerek alıcıya ulaşmasıdır. Kaynaktan gelen elektromanyetik enerji yol boyunca yayılır ve alıcının çalışmasına müdahale eder. Herhangi bir EMI sorunu olması için üçünün de var olması gerekir.

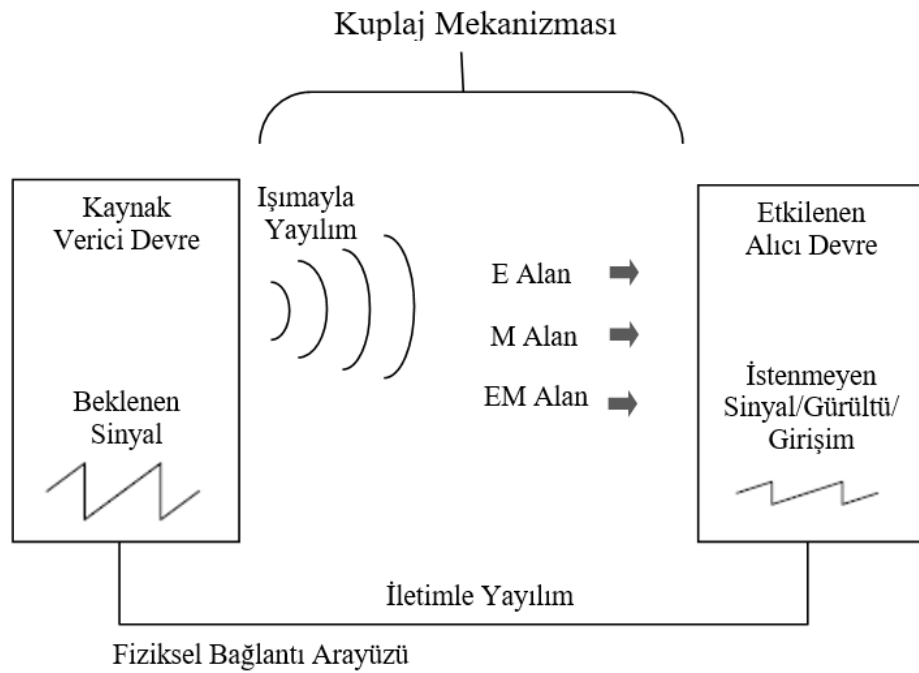
Ürün tasarımı gerçekleştirilirken ürünün sahip olduğu elektronik sistemin daha az EMI'ye ve daha iyi EMC'ye sahip olması hedeflenmektedir. EMC'nin amacı, ürünü elektromanyetik bir ortamda düzgün bir şekilde çalıştırmaktır. Şekil 1.1'de EMC'ye ait sınıflandırmayı içeren tablo yer almaktadır.

İletkenler elektronik ekipmanların içerisinde elektrik sinyalleri taşımaktadır. Elektrik akımı taşıyan tüm iletkenler çevresinde bulunan elektronik ve elektromanyetik cihazlara elektromanyetik alan şeklinde enerji veren antenler olarak işlev görürler. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi enerjinin kaynaktan etkilenen alıcı devreyle elektrik veya manyetik alanlar yoluyla birleştirilmesi, beklenen sinyale istenmeyen gerilimler veya akımlar eklenmesine neden olur. Aynı ekipman içerisinde yer alan sistemlerde, etkilenen alıcı devre üzerinde indüklenen akım veya istenmeyen voltaj, hem kaynağın hem de kurbanın sinyal bütünlüğünü bozabilir. Meydana gelen EMI yayılım ortamına göre ışımayla yayılım (radiated emission) ve iletimle yayılım (conducted emission) olmak

üzere iki şekilde oluşur. Işımayla yayılım havadan gerçekleşirken iletim ile yayılım da bağlı oldukları hat üzerinden gerçekleşir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik sınıflandırma



Şekil 1.2. Elektromanyetik Yayılım Biçimleri

Anahtarlamalı dönüştürücüler, iletilen EMI'den etkilenebildiğinden, EMI hat filtresi, İletilen EMI'yi azaltmak için tasarlanmıştır.

EMI filtre yapısı, doğrusal olmayan yarı iletken malzemelerin anahtarlama sırasında geniş bantta ürettiği gürültüleri çeşitli indüktörler ve kapasitörler kullanılarak bastırmaya dayanmaktadır.

## 1.2 EMI ve EMC ile ilgili Bazı Standartlar

EMC standartlarına genel olarak bakılacak olursa, öncelikle uygulandığı sektöre göre askeri EMC standartları ve sivil EMC standartları gibi bir ayırım olduğu görülür. Dünyada kabul görmüş birçok laboratuvar ve test merkezi bulunmaktadır. Türkiye’de de bu testleri yapan test birimleri bulunmaktadır. Ancak ülkemizde sivil cihazların üretimini yapan firmaların sayısı askeri alanda cihaz üreten firmalardan daha fazla olduğu için sivil cihazları test eden merkezlerin sayısı daha fazladır. TS EN 55022 ve TS EN 61204-3 sivil cihazlarda uygulanan test standartlarıdır.

Günümüzde askeri araçların içerisinde bulunan birçok cihaz, araç güç dağıtım sistemini oluşturan akü ve jeneratör grubundan beslenmektedir. Araç içerisinde kullanılan birimlere ve cihazlara bağlı olarak değişiklik gösteren gerilim ve güç ihtiyaçları DC/DC dönüştürücüler kullanılarak elde edilmektedir. DC/DC dönüştürücüler anahtarlama işlemleri dolayısıyla sistemi gürültü açısından tehdit eden, iletim yoluyla oluşan EMI gürültü kaynaklarının başında gelmektedir. DC/DC dönüştürücülerin bulunduğu güç sistemleri ele alındığında, askeri çalışmalarda kullanılan standartlardan bazıları MIL-STD-461G, CISPR22 ve CISPR25 standardıdır. Çizelge 1.1’de Uluslararası EMI standartları ve bu standartların tanımları yer almaktadır.

Geliştirilen tasarımın ilk prototipi hazır olana kadar ölçümler gerçekleştirilemez. Bu nedenle, güç kaynağı kontrol çipi satıcıları, tasarımcılara herhangi bir donanım mevcut olmadan önce sonuçları tahmin edebilmek için çeşitli EMI filtre tasarım araçları sunar. Bu devam eden trend, güç kaynağı tasarımcılarına her türlü ölçümü gerçekleştirmek için prototip hazır olmadan önce tasarım konseptleri hakkında daha derin bilgiler edinme fırsatı vermektedir. Bu yaklaşımla tasarımcıların, tasarımın henüz başındayken tasarımın farklı yönleri hakkında kapsamlı bir fikir edinmelerini sağlar. Böylece daha güvenilir bir tasarım geliştirilmesine olanak sağlanmış olur. Ek olarak, tasarımların simülasyonlarının yapılabilmesi, geliştirme döngüsünün oldukça kısaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Çizelge 1.1 Uluslararası EMI Standartları

<b>Standart:</b>	<b>Tanım:</b>
<b>FCC BÖLÜM 15, ALT BÖLÜM J</b>	FCC Dijital elektronik için genel standart
<b>EN55011</b>	Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi ekipman için AB standardı
<b>EN55013</b>	Yayın alıcıları için AB standardı
<b>EN55014</b>	Motorlar, termal cihazlar ve elektrikli aletler için AB standardı
<b>EN55015</b>	Elektrik aydınlatması için AB standardı
<b>EN55022</b>	Bilgi teknolojisi (IT) ekipmanı için AB standardı
<b>CISPR 22</b>	Dijital elektronik için CISPR standartları
<b>CISPR 25</b>	Motorlu araçların elektronik donanımları için CISPR standartları
<b>MIL-STD-461G</b>	Elektrikli cihazlar için DOD standartları

Uygulanacak olan testlerin belirli bir disiplin dahilinde tanımlanmış olması gerekir. Bunları tanımlayan ve gerekleri çerçeveleyen EMC standartlarıdır. Standartlar, ürünlerin kalitesini belirleyen temel unsurlardır. Standartların belirtmesi gereken iki önemli konu testlerin sınır değerleri ve test yöntemleridir.

### 1.2.1 MIL-STD-461G Standardı CE 102 Testi

MIL-STD-461, ekipmanın elektromanyetik uyumluluk açısından nasıl test edileceğini açıklayan bir Birleşik Devletler Askeri Standardıdır. Bugüne kadar MIL-STD-461'in çeşitli revizyonları yayınlanmıştır. Askeri sözleşmelerin çoğu, MIL-STD-461E'ye uygunluk gerektirmektedir. 2015 itibarıyla en son revizyon "MIL-STD-461G" olarak yayınlanmıştır. MIL-STD-461 uyumluluğu askeri kullanımının dışında teknik olarak gerekli olmasa da birçok sivil kuruluşta bu belgeyi kullanmaktadır. Elektromanyetik uyumluluk test laboratuvarlarında, cihazların MIL-STD-461'e testlerini gerçekleştirebilmek için yansız odalar MIL-STD-461'e uyacak şekilde kurulmaktadır.

MIL-STD-461G standartları, İletilen Emisyonlar, İletilen Duyarlılık, Yayılan Emisyonlar ve Yayılan Duyarlılık konularını ele alan kapsamlı bir belgedir. Emisyon, bir

cihazın bağı olduğu kaynağı etkilerken ürettiği gürültüyü ifade eder. Duyarlılık, bir sistemin gelen gürültüye karşı savunmasızlığıdır. Çizelge 1.2’de, alt standartlarından bazıları ve bunların gereklilikleri gösterilmektedir (MIL-STD-461G, 2015).

**Çizelge 1.2** Uluslararası EMI Standartları

<b>Test Prosedürü:</b>	<b>Tanım:</b>
<b>CE 101</b>	İletilen Emisyonlar, Güç Kabloları, 30Hz - 10kHz
<b>CE102</b>	İletilen Emisyonlar, Güç Kabloları, 10kHz - 10MHz
<b>CS101</b>	İletilen Duyarlılık, Güç Kabloları, 30Hz - 150kHz
<b>CS116</b>	İletilen Duyarlılık, Sönümlü Geçici Sinüzoidal Sinyaller, Kablolar ve Güç Kabloları, 10kHz - 100MHz
<b>RE101</b>	Yayılan Emisyonlar, Manyetik Alan, 30Hz - 100kHz
<b>RE102</b>	Yayılan Emisyonlar, Elektrik Alan, 10kHz - 18GHz
<b>RS101</b>	Yayılan Duyarlılık, Manyetik Alan, 30Hz - 100kHz
<b>RS103</b>	Yayılan Duyarlılık, Elektrik Alan, 2MHz - 40GHz

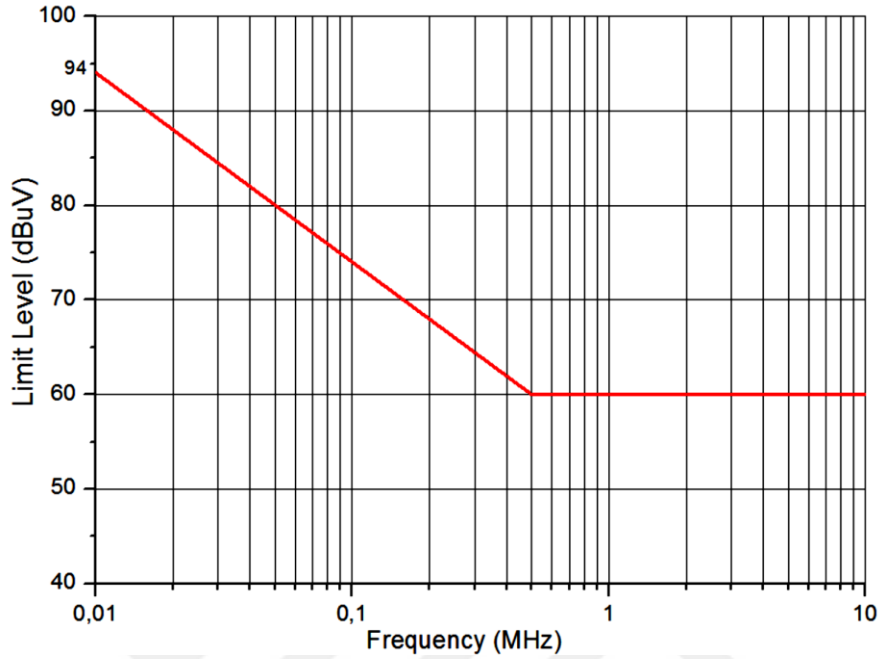
EMI ölçümü iki kısma ayrılır:

- İletilen EMI Ölçümleri
- Yayılan EMI Ölçümleri

İletilen EMI Ölçümleri, test edilen cihazın kablolarında standartta belirtildiği şekilde akan gerilimin veya akımın ölçümleridir. Ortak mod iletilen gürültü akımı, modülün hem pozitif hem de negatif girişlerinde aynı yönde ilerleyen akımdır. Bu akım, güç girişi kabloları aracılığıyla dönüştürücüden DC kaynağına aktarılır ve çıkış kablosu bağlantıları aracılığıyla dönüştürücüye geri döner. Diferansiyel mod iletilen gürültü akımı, giriş güç terminalindeki akımın yönü veya fazı birbirine göre zıt ilerleyen akımdır.

MIL-STD-461 standardı CE 102 testi test edilen cihazdan gelen elektromanyetik emisyonların, akımın kaynaktan çıkıp toprak hattına giden dönüşleri de dahil güç girişi kabloları için belirtilen gereksinimleri aşmadığını doğrulamak için yapılır. Bu test, 10 kHz – 10 MHz frekans aralığında uygulanmaktadır. CE102 testi, dB $\mu$ V cinsinde orta frekanslı bir voltaj ölçüm testidir. Emisyon seviyeleri, LISN'nin çıkış portunda bulunan voltaj ölçülerek belirlenir. Sınırlar, test edilen cihazın kaynak voltajına bağlıdır. Geçti/Kaldı kriteri, test edilen cihazın voltaj gereksinimlerinde belirtilen sınıra bağlıdır.

Şekil 1.3'te CE 102 testinde kullanılan DC/DC dönüştürücünün voltaj gereksinimlerine karşılık gelen sınır değerleri yer almaktadır.

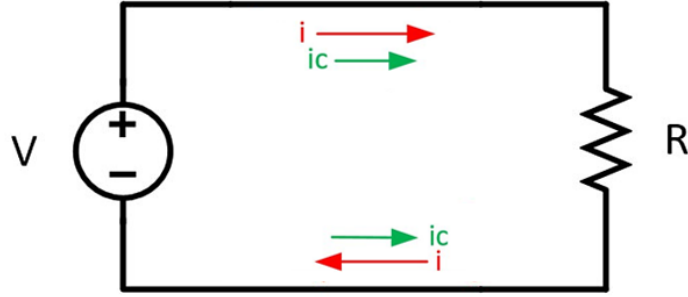


Şekil 1.3 CE 102 Testi için Gereken Limit Değerleri (MIL-STD-461G, 2015)

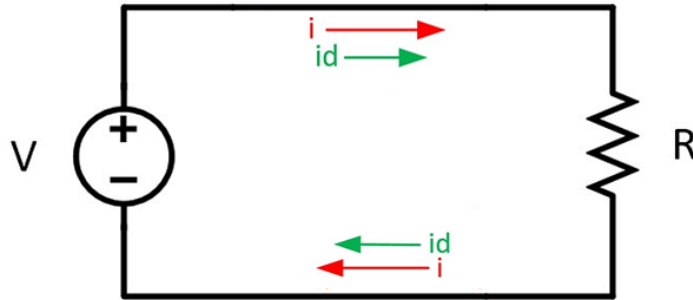
### 1.2.2. EMI Gürültü Türleri

EMI gürültüsü yayılan ve iletilen gürültü olarak ikiye ayrılır. İletilen EMI gürültüsü genellikle ortak mod (CM) ve diferansiyel mod (DM) gürültüsü olarak ikiye ayrıştırılır. CM gürültüsü, güç devresi ile toprak arasında akan gürültü olarak tanımlanırken, DM gürültüsü, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi güç dağıtımı ile aynı yolu izleyen gürültü olarak tanımlanır. CM ve DM gürültüsünü, bir gürültü ayırıcı ile ölçülen gürültüden ayırmak mümkündür. Her bir mod bağımsız olarak tasarlanabilmektedir. Böylece tasarım basitleştirilerek bundan birçok fayda elde edilir. Hangi modun standardı karşılamadığını doğrudan bilme imkanı ile soruna anında müdahale edilebilmektedir. Henüz tasarım aşamasındayken yapılan müdahaleler ile en iyi sonuçlar elde edilebilir. Böylece hata sayısı ciddi oranda azaltılabilmektedir (Hegarty, 2018). Şekil 1.4'te güç kaynağıyla test edilen cihaz arasında CM ve Şekil 1.5'te DM girişimlerine neden olabilecek gürültü yolları gösterilmiştir.





Şekil 1.4 CM gürültü yolları



Şekil 1.5 DM gürültü yolları

İletilen EMI, ortak mod (CM) ve diferansiyel mod (DM) gürültüsü dahil, anahtarlamalı güç dönüştürücüsünün iletilen giriş akımındaki hızlı değişikliklerden kaynaklanır. İletilen emisyonlar için standartlar, genellikle yayılan emisyonlardan daha düşük bir frekans aralığını, yani 150 kHz'den 30 MHz'e kadar kapsar. Giriş tarafındaki iletilen EMI'yi ölçmek için, regülatörün girişine standart giriş kaynağı empedansı sağlayan bir hat empedansı stabilizasyon ağı (LISN) yerleştirilir. İletilen CM gürültüsü, giriş hattı ile toprak arasında ölçülür (Giglia ve ark., 2018).

DM gürültüsü, iki giriş hattı arasındaki fark olarak ölçülür. İletilen DM gürültüsü, anahtarlamalı güç kaynağının değişken giriş akımından kaynaklanır. Diğer EMI türlerinin aksine değişken giriş akımı, giriş kapasitörlerinde ve LISN devresinde üretilen nispeten düşük frekanslı EMI, LTspice gibi bir yazılım tarafından kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde güç dönüştürücülerinde karşılaşılan EMI problemleri ve EMI filtre ile gürültü bastırma yöntemleri sunulmuştur. Sunulan literatür çalışmalarında EMI filtre ile ilgili tasarım argümanları da yer almaktadır.

Abinaya (2017) çalışmasında, Hat Empedans Stabilizasyon Ağının tasarım çalışmalarını sunmaktadır. LISN kullanımının amacından, tanımlamasından ve testlerdeki işlevinden bahsetmektedir. Giriş empedansını stabilize etmek için 50 Hz frekans aralığında düşük geçişli filtre tasarımı kullanmıştır. Ayrıca CISPR-22 standardını takiben sadece 0,15-30 MHz aralığında normalleştirilmiş frekansını geçiren bant geçiren filtre kullanmıştır. Ölçüm sonuçlarını elde etmek için LISN portuna bağlanabilmek amacıyla spektrum analizörünün gerekli olduğunu söylemiştir.

Aksoy (2014) çalışmasında, DC/DC çeviricilerin sebep olduğu EMI problemlerini incelemiş, MIL-STD-461E standardında yer alan CE102 testine ve MIL-STD-1275D standardına uygun EMI filtre tasarımı yapmıştır. Gürültü kaynağı olarak bir askeri cihaz kullanmış, cihazın iletim hatlarına yaydığı 10kHz-10MHz frekans bandındaki gürültüleri incelemiştir. Bu gürültünün filtrelenmesi için gerekli tasarım ve benzetimler yapılmıştır. Kart cihazla birlikte çalıştırılmış ve CE102 testinden başarıyla geçtiği görülmüştür. Ayrıca platformlardaki devre kesicilerden veya diğer cihazlardan kaynaklı yüksek genlikli işaretlerin, cihaza zarar vermemesi için uygun tasarım ve benzetimler de yapılmıştır. Tasarım baskı devre kartına dönüştürülerek birlikte test edilmiştir. MIL-STD-1275D standardı ile uyumlu hale geldiği görülmüştür.

Asmanis ve ark. (2015) çalışmalarında, 3 boyutlu elektromanyetik alan modelleme yazılımı olan CST MWS kullanılarak fark modu EMI güç filtresinin modellenmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarımda iki senaryo göz önünde bulundurulmuştur: indüktör kapasitörlere paralel ve dikey olarak konumlandırılmıştır. Çalışmalarında ölçüm ve modelleme sonuçları birbirine uyumludur.

Chen (2004) çalışmasında güç elektroniği dönüştürücüleri, anahtarlama nedeniyle yakınında bulunan ekipmanlar için potansiyel EMI gürültü kaynağı olduğundan bahsetmiştir. Elektromanyetik uyumluluğu sağlamak için EMI filtrelerinin gerekli olduğunu söylemiştir. EMI filtrelerinin genellikle farklı şekillerde, boyutlarda ve formda çok sayıda bileşenden oluştuğunu bildirmiştir. EMI filtrelerinin ana işlevinin,

anahtarlama frekansındaki ve harmoniklerindeki enerjiyi yaymak yerine azaltmak olduğundan, gerekli teknoloji ve tasarım hedefleri diğer bileşenlerinkinden çok farklı olduğundan bahsetmiştir. Eşdeğer seri endüktansı (ESL) ve eşdeğer paralel kapasitansı (EPC) azaltılarak, yüksek frekans kayıplarını azaltmak yerine artırmayı içeren uygun entegrasyon teknolojileri geliştirilmiştir.

Di Capua ve ark. (2019), sönümlenme indüktörünün sargı direncini filtre ve sönümlenme endüktansları arasındaki oranla eşleştirerek optimum sönümlenmeyi sağlayan parametrik tablolara dayanan yeni bir EMI filtre tasarımı yaklaşımını önermektedir. Önerilen yaklaşım, zayıflatma ve verimlilik gereksinimlerine uygun elektronik bileşenlerin seçimini basitleştirir. Makalede sunulan deneysel sonuçların, önerilen modeli ve tasarım yöntemini doğruladığı bildirilmiştir.

Esfetanj ve ark.'nın (2020) yaptıkları çalışma, elektronik bileşen boyutlarını azaltmak ve tek fazlı aralıklı güç faktörü düzeltmesi (PFC) hedefi olan DM EMI filtresinin tasarımı için kapsamlı bir araştırma içermektedir. Farklı çalışma modlarının (sürekli ve süreksiz iletim modu) ve anahtarlama frekansının parazitlerdeki azalmayı ve EMI filtre elemanlarının boyutunu nasıl etkileyebileceğini göstermişlerdir. 2 kW aralıklı tek fazlı güçlendirme PFC dönüştürücüsünden elde edilen deneysel sonuçlar, önerilen optimum faz kaydırma yönteminin etkinliğini doğrulamaktadır.

Giglia (2017), EMI filtre tasarımını otomatik olarak optimize eden ODEF (EMI Filtrelerinin Optimize Edilmiş Tasarımı) yazılımı geliştirmiştir. Ayrıca geliştirilen uygulama, farklı EMI filtre tasarımlarını eşzamanlı olarak analiz etmeye ve karşılaştırmaya olanak tanıyan bir grafik arabirim sağlar. Optimizasyon algoritması bir EMI filtre tasarım aracı olarak kullanılabilir gibi, EMI filtrelerinin performansının analizi için de kullanılabilirliği bildirilmiştir.

Giglia ve ark. (2018) çalışmalarında, güç yoğunluğu kavramına dayalı, güç dönüştürücüleri için EMI filtrelerinin otomatik tasarımını hedefleyen bilgisayar destekli bir prosedür tasarlamışlardır. Bu prosedür ticari veri sayfalarında bulunan pasif bileşenler hakkındaki bilgileri dikkate alarak oluşturulmuş uygun veri tabanlarını kullanır. Tasarlanan filtrenin otomatik olarak dahil edildiği bu sistem kullanıldığında elektromanyetik uyumluluk standartları limitlerini karşıladığı rapor edilmiştir.

Hegarty (2018) çalışmasında, hem diferansiyel mod (DM) hem de ortak mod (CM) tarafından iletilen emisyon gürültü bileşenleri için kaynaklar ve yayılma yollarını

anlatarak DC/DC dönüştürücünün neden olduğu iletilen EMI hakkında bilgilendirme yapmaktadır. Bu çalışmada toplam gürültü ölçümünden DM ve CM gürültülerinin ayrıştırılması açıklanmıştır ve bir otomotiv uygulamasında bulunan ana CM gürültü iletim yollarını göstermek için örnek bir dönüştürücü kullanılmıştır.

Iftikhar ve ark. (2007) çalışmalarında, giriş filtresi ile etkileşim durumunda olan DC/DC dönüştürücülerdeki dengesizlik sorununu ele almışlardır. Ayrıca sistem boyutlarının artmadan sistemi stabilize edebilmek için R-C paralel sönümleme devresini kullanarak sistematik bir giriş filtresi tasarım prosedürü önermişlerdir. Bilgisayar simülasyonları ve deneysel sonuçların bu çalışmanın teorik sonuçlarını doğruladığını bildirmişlerdir.

Kumar ve ark. (2021) çalışmalarında, DC/DC dönüştürücünden düzenli ve stabil bir çıkış voltajı elde etmek için bir kontrolör tasarlamışlardır. Bu makalede, Buck dönüştürücünün adım yanıtına dayalı bir PID denetleyici tasarımı yapılmıştır. Buck dönüştürücünün PID etkinliğini değerlendirmek için giriş voltajı, referans voltajı ve çıkış yükünün değişimini içeren simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmalar, doğrusal ve doğrusal olmayan dönüştürücülerin PID etkinliğini simülasyon modeli üzerinde denenmesini içermektedir. Simülasyon sonuçlarına bakarak, PID parametrelerinin DC/DC dönüştürücüdeki çıkış voltajını düzenli ve stabil hale getirmek için ideal olduğu sonucuna varmışlardır.

Kotny ve ark. (2010) çalışmalarında, DC/DC dönüştürücüler için EMI filtrelerinin tasarımını önermişlerdir. Frekans domeninde filtrenin simülasyonun yapıldığı EMI filtresi tasarım yönteminden bahsetmişlerdir. Önerilen sistemde filtre bileşenlerinin yüksek frekanslı modellerini kullanmışlardır. Elde edilen modelleri test etmişler ve 9 kHz'den 30 MHz'e kadar geniş bir frekans aralığında iyi sonuçlar verdiğini rapor etmişlerdir.

Kotny ve ark. (2014) çalışmalarında, güç dönüştürücülerinde kullanılan Silikon Karbür güç elemanları (SiC-JFET ve SiC diyot) için EMI filtre tasarımını önermişlerdir. Bu çalışmada kullanılan DC/DC dönüştürücü, 100 kHz çalışma frekansına sahiptir ve anahtarlama elemanı olarak kullanılan JFET'in açılma ve kapanma sürelerini 10 ns olacak şekilde ayarlamışlardır. Bu çalışmada, simülasyon yaklaşımına dayalı EMI filtre tasarım yöntemi önerilmiştir. Bunun için, sistemin tüm empedanslarını hesaba katan, filtrenin elektriksel eşdeğer devresine dayanan bir yüksek frekans modeli önerilmiştir. Elde edilen

EMI filtresi dahil edilmeden ve filtre kullanarak yapılan emisyon ölçümlerinin önerilen tasarım yönteminin etkinliğini doğruladığını bildirmişlerdir.

Kotny ve ark. (2016) çalışmalarında, sadece GaN-transistör ve SiC-diyot entegre edilmiş buck dönüştürücü tarafından indüklenen iletilen emisyonları incelemişlerdir. EMI filtrelerini simüle edebilmek için, elektriksel eşdeğer bir devreye dayalı modelleme yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, filtre tasarımlarında genellikle ihmal edilen ortak mod empedansının dikkate alınmasını sağlamaktadır. Buck dönüştürücünün EMI filtresi dahil edilmeden ve filtrelili gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarıyla emisyon ölçümleri sonuçlarının karşılaştırılmasının, önerilen yaklaşımın geçerliliğini doğruladığını rapor etmişlerdir.

Li ve See (2015) çalışmalarında, hat empedans stabilizasyon ağının (LISN) EMI ölçümü üzerindeki etkisini göstermek ve ortak mod gürültüsü ve fark modu gürültüsünü çıkarmak için endüktif kuplaj yaklaşımına dayalı bir devre içi empedans bulma yöntemi geliştirmişlerdir. Gerçek çalışma koşullarında LISN'nin EMI ölçümü üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Son olarak, bu değerlendirme, LISN ile birlikte ve LISN olmadan ölçülen EMI akımları ile doğrulanmıştır.

Liu ve ark. (2009) çalışmalarında, EMI filtreleri saçılma parametreleri (S-parametreleri) ile modellemişlerdir. Ayrıca S-parametrelerini kullanan EMI dijital filtre tasarım yöntemlerini de ele almışlar. Tasarım yaklaşımını doğrulamak için simülasyon çalışmaları yapmışlardır.

Maillet (2008) çalışmasında, DC beslemeli bir motor sürücüsünde pasif filtre kullanarak hem diferansiyel mod (DM) hem de ortak mod (CM) gürültüsünü azaltmak için çeşitli stratejiler sunmaktadır. Ayrıca bu çalışma, EMI filtresinin topraklama şemasını analiz etmek ve daha spesifik olarak tek veya çok aşamalı filtrelerin topraklanmasını incelemek için iyi bir kaynaktır. Toplam filtre boyutunu en aza indirmek için temel filtre araştırması yapılmıştır. Nano kristal çekirdek farklı sarım tekniği ve yeni entegre yöntemler kullanarak CM bobinini geliştirmek için fikirler önermiştir. Ferrit çekirdek ve nano kristal çekirdek arasında bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Ferrit çekirdeğin orta boşluk alanını maksimize eden ve aynı çekirdek üzerinde hem CM hem de DM endüktanslarını birleştirerek sızıntı endüktansını artıran yeni bir entegre filtre yapısını ele almıştır. Düşük ve yüksek frekanslarda etkinliği değişmeden boyutlarda küçültme yapılarak oluşturulan bu yapının geçerliliğini doğrulamak için küçük ve büyük

sinyal deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak, temel filtrenin hacmini üç kat azaltan, güç testlerindeki performansları iyileştiren son bir filtre versiyonu önerilmiştir.

Majid ve ark. (2012) çalışmalarında, yaptıkları çalışmada yüksek frekanslı güç dönüştürücülerinde iletilen girişimleri bastırmak için bir hat filtresinin uygulanmasının sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, benzer koşullar altında 200 kHz ve 2 MHz Buck dönüştürücüler için EMI filtre tasarımını karşılaştıran elektronik simülasyonlara dayanmaktadır.

Mrad (2014) çalışmasında ilk olarak, D-sınıfı amplifikatörlerin EMI'sini simüle etmek için modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu model, filtre yanıtını optimize etmek ve ayrıca bir EMI filtresinin getirdiği ek güç kayıplarını azaltmak için bir algoritmaya dayalı bir optimizasyon döngüsünde uygulanmıştır. EMI filtresinin ses kanalında uygulanması, ses frekansı bandında doğrusal olmayan bir davranış ekler. Bu nedenle, manyetik malzemeler için Jiles-Atherton ferrit boncuk modellemesi kullanılmıştır. Bundan sonra, zaman ve frekans domeni sinyalleri üzerindeki etki simüle edilmiş ve ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Son olarak, toplam harmonik bozulma (THD) farklı sinyal genlikleri için hesaplanmış ve bir ses analizörü kullanılarak ölçülen THD ile karşılaştırılmıştır. Çok çeşitli sinyal genlikleri için doğru sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir.

Makda ve Nymand (2013) çalışmalarında, yakıt hücresinden güç alan izole edilmiş tam köprü DC/DC dönüştürücü için DM EMI filtresi tasarlamak için pratik bir öneri sunmuşlardır. Diferansiyel mod gürültüsünü, 3 kW / 400 V Boost dönüştürücü için analitik olarak analiz etmişler; simülasyon ve deneysel sonuçları yayınlamışlardır.

Makda ve Nymand (2014) diğer çalışmalarında, düşük giriş voltajlı yüksek akımlı izole DC/DC dönüştürücü için DM EMI filtresi tasarlamışlardır. DM gürültü modeli oluşturularak ve gürültü kaynağı voltaj dalga biçiminin harmonik analizine dayanarak, DM EMI filtresi tasarlamışlardır. Tasarlanan EMI filtresi 3kW izole bir DC/DC dönüştürücü için filtre rezonans sönümlenmesini de içermektedir. Gürültü modeli ve teorik analizin deneysel sonuçlarla doğrulandığını bildirmişlerdir.

Miloudi ve ark. (2012) çalışmalarında, Flyback anahtarlamalı güç kaynaklarında iletilen EMI için karakterizasyon yaklaşımını önermişlerdir. Anahtarlamalı güç kaynağı tasarımında EMI sorunlarını dikkate almadan bir tasarım yapıldığında, önemli düzeyde EMI oluştuğundan ve hem ana devre içerisinde hem de yakındaki diğer elektronik

ekipmanda sorunlara neden olduğundan bahsetmişlerdir. Bilgisayar destekli tasarım programındaki ve cihaz modellerindeki gelişmelerin, anahtarlama güç kaynağı içindeki dalga biçimlerinin doğru bir şekilde simüle edilmesine önemli katkı sağladığını belirtmişlerdir. Bu makalede, Flyback dönüştürücü için iletilen EMI'yi simülasyon yoluyla ölçmek için verimli bir yöntem sunmuşlardır.

Mukharjee ve Gadoura (2012) çalışmalarında, düşük gürültülü bir tasarım geliştirmek amacıyla endüstriyel elektronikte kullanılan DC/DC dönüştürücülerin giriş filtrelerini incelemiş ve analiz etmişlerdir. Buck, Boost ve Buck-Boost DC/DC dönüştürücülerinin giriş filtrelerinde EMI'yi bastırmak için toplu devre tabanlı gürültü modeli geliştirerek gürültü azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu model, temel bir Buck dönüştürücüye uygulanmış ve zayıflatma tekniklerini doğrulamak için simülasyon yapılmıştır.

Narayanasamy (2016) tarafından test ortamındaki olası gürültü kaynakları belirlenmiş ve ardından bu harici gürültü kaynaklarının gerçekleştirilen emisyon ölçümleri üzerindeki etkilerini azaltmak için bir prosedür ortaya konmuştur. Bu prosedür, giriş kısmında 3 fazlı bir sistemlerde EMI filtre tasarımı için topoloji seçimiyle başlamaktadır. Bu yöntemi, literatürdeki önceki çalışmalara dayanan filtre tasarımı için benimsenen metodoloji izlemektedir. Daha sonra test sonuçlarıyla birlikte bir tasarım örneği oluşturulmuştur. Aktif EMI filtre (AEF) topolojisi, empedans uyumlama kriterlerine göre seçilmiştir. DM AEF için anahtarlama modeli geliştirilmiş ve seçilen AEF filtre topolojileri için simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir.

Narayanasamy ve Luo (2019) çalışmalarında, literatürde sunulan farklı AEF'lerin ve bunların farklı güç dönüştürücüleri için uygulamalarının kapsamlı bir incelemesini yapmışlardır. Gürültü algılama, gürültü işleme ve gürültü engelleme devrelerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Ayrıca, farklı dönüştürücüler için ortak mod ve diferansiyel mod gürültüleri içeren AEF'ler tarafından sağlanan zayıflamanın bir karşılaştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, yardımcı güç kaynağı, güç kaybı ve AEF için koruma yöntemleri gibi AEF'lerin diğer yönleri de ele alınmıştır. Bu çalışma, hem endüstri alanında hem de akademik alandaki güç dönüştürücü tasarımcıları için faydalı bir referans kaynak niteliğindedir.

Qiu, ve ark. (2012) çalışmalarında, tüm sistemi stabilize etmek için kullanılan seri R-C sönümlenme devresine dayanarak, yeni bir sönümlenmeli filtre türü önermişler ve

optimum sönümlenme tasarım parametrelerini elde etmişlerdir. Buck dönüştürücünün giriş ve çıkış filtresi için kullanılan yeni filtre türü, sistemin kararlılığını ve çıkış dalga biçimini korumak için faydalı olduğu bildirilmiş; yeni filtre türünün avantajları MATLAB kullanarak gösterilmiş ve doğrulanmıştır.

Sun ve ark. (2016) çalışmalarında, MHz seviyesinde anahtarlama frekansına sahip Galyum Nitrür (GaN) tabanlı LLC yarım köprü rezonanslı DC/DC dönüştürücü için EMI koruma yöntemi araştırmışlar ve filtre tasarımı incelemişlerdir. Hem CM hem de DM için genel elektromanyetik kuplaj etkilerini dikkate alan yüksek frekans modeli önermişlerdir. Önerilen EMI filtresinin hem teorik analizlerle hem de pratik deneylerle EMI gürültüsünü büyük ölçüde bastırmak için uygun maliyetli bir yaklaşım olduğu doğrulanmıştır.

Tyagi ve ark. (2017) çalışmalarında, MIL-STD 461E'ye uygun, yüksek frekanslı ve yüksek güçlü DC/DC dönüştürücüler için EMI filtresi yaklaşımı ve ölçümleri yapmışlardır. İletilen emisyon (CE102) testleri MIL-STD-461E'ye göre gerçekleştirilmiştir. EMI filtresi ve DC/DC dönüştürücü LTspice'da simüle edilmiştir, CM-DM değerlerini hesaplamak için yüksek frekanslı eşdeğer CM-DM modeli kullanmışlardır. Önerilen filtre, 250-300 kHz anahtarlama frekansında ve 500 W çıkış gücünde çalışan yüksek frekanslı güçlü bir DC/DC dönüştürücü için tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Wang (2018) çalışmasında ilk olarak, motor sürücü sisteminin SPICE modelini oluşturmuştur. Simülasyon modeline ve voltajın zamana bağlı ani artışına dayanarak, anahtarlama frekansı, modülasyon indeksi ve EMI gürültüsü üzerindeki etkilerini incelemiştir. EMI gürültü spektrum zarfının frekans bandındaki matematiksel açıklaması da analiz edilir. Daha sonra CM filtre tasarım prosedürü ayrıntılı olarak göstermiştir. CISPR 25 standardını karşılamak ve ortak mod empedansını hesaplamak için frekans bandındaki eşdeğer CM devresi kullanmıştır. AC tarafı için LC filtre tasarımı ve optimizasyon prosedürü açıklanmıştır. AC tarafı için LC filtre hacmi ve anahtarlama frekansı arasındaki ilişkiyi göstermiştir.

Yang ve ark. (2014) çalışmalarında tam köprü DC/DC dönüştürücüsünde DM EMI gürültüsünü azaltmak için özel olarak kullanılan yeni bir aktif EMI filtresi (AEF) topolojisi sunmuşlardır. Bu çalışmada, büyük bir ekleme kaybı elde etmeyi amaçlayan voltaj geri beslemesi DM AEF geliştirmek için DM emisyon iletme mekanizması ve tam



köprü DC/DC dönüştürücü modellemesini birleştirmişlerdir. Önerilen AEF'nin performansını gösteren deneysel sonuçları sunmuşlardır.

Zhai ve ark. (2020) çalışmalarında, araçlar için yüksek voltaj/düşük voltaj (HV/LV) DC/DC dönüştürücüsünün iletilen girişim voltajının CISPR25-2016 standardını aşması sorununu çözmek amacıyla, HV güç kaynağı için iki farklı EMI filtre tasarım yöntemi önermişlerdir. İlk yöntem, DC/DC dönüştürücünün yüksek voltaj giriş portunda geniş bantlı bir EMI filtresi tasarlamaktır. Önerilen diğer yöntem, rezonans tepe noktalarının bastırılmasına dayalı olarak PCB düzeyinde bir EMI filtresi tasarlamaktır. Simülasyon ve deney sonuçlarından, yukarıdaki iki yöntemle tasarlanan filtrelerin girişimleri etkili bir şekilde azalttığını bildirmişlerdir.

Zaidi ve ark. (2019) çalışmalarında, EMI filtrelerinin genel olarak ortak mod (CM) indüktörü nedeniyle genel maliyeti ve hacmi önemli ölçüde artıran elektromanyetik uyumluluk kısıtlamalarına uymak için güç elektroniği sistemlerinde yaygın olarak kullanıldığından bahsetmişlerdir. Bu çalışmada, CM indüktörün optimal hacmini hesaplamak için yeni bir yöntem önerilmiştir. İndüktör hacmini ve filtre performanslarını büyük ölçüde etkileyebilecek temel doygunluk sorunlarını hesaba katmışlardır. Sonuç olarak, bazı durumlarda endüktans değerinin optimize edilmesinin, filtre zayıflamasını daha da artırmanın yanı sıra filtre hacmini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, farklı şekillere sahip en optimum indüktör geometrik parametrelerinin elde edilebileceğini de göstermişlerdir. Böylece filtreleri enerji dönüşüm sistemine dahil ederken tasarımcılara önemli bilgiler sağladığını bildirmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde EMI sorunlarını giderebilmek ve elektronik devrelerin voltaj ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla kullanılacak olan DC/DC Buck dönüştürücü incelenmiştir. Kullanılan DC/DC dönüştürücü LTspice tasarım aracı yardımıyla modellenmiş ve simülasyonda çalıştırılmıştır.

DC/DC dönüştürücüdeki EMI sorunlarını en aza indirmek için kullanılan EMI giriş filtresi tasarımı sunulmuştur. EMI filtresi DC/DC Buck dönüştürücünün güç ihtiyaçlarını karşılayabilecek özelliktedir ve aynı zamanda MIL-STD-461G standardının güç hatları için olan CE 102 prosedürüne uygun olarak tasarlanmıştır. EMI giriş filtresi ve DC/DC dönüştürücü LTspice tasarım aracında birlikte modellenerek simüle edilmiştir. CE 102 ölçümünü gerçekleştirmek için kullanılan LISN devresi de simülasyona eklenmiştir.

CE 102 gürültü ölçümleri laboratuvarında test ortamında gerçekleştirilmiştir. DC/DC dönüştürücünün çıkışı üç ayrı (3.3, 5 ve 12V) voltaj seviyesine getirilerek LISN cihazı üzerinden EMI Alıcısı aracılığıyla ölçümler alınmıştır. Dönüştürücünün girişine EMI filtre entegre edilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Filtreli ve filtresiz sonuçlar karşılaştırılmıştır.

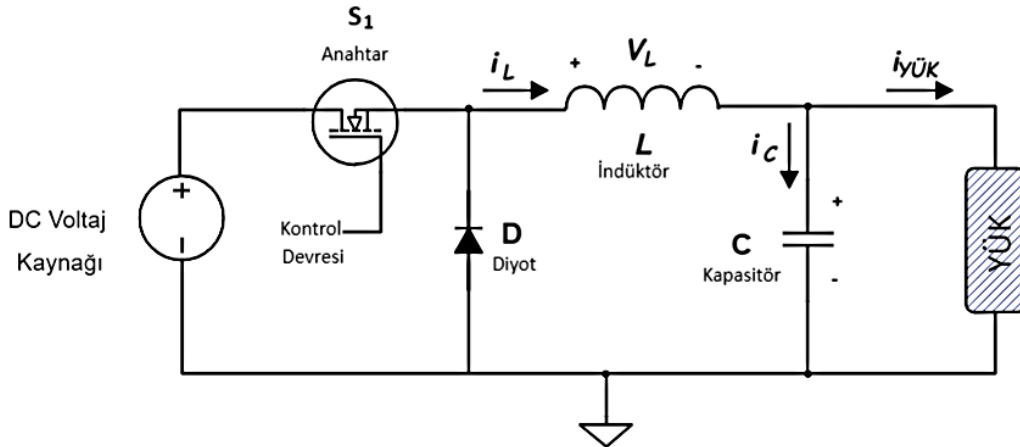
#### 3.1. Anahtarlamalı DC/DC Çeviricilerin İncelenmesi

Anahtarlamalı güç kaynakları hemen hemen her alanda karşımıza çıkmaktadır. Anahtarlamalı güç kaynaklarının güç yoğunluğunun iyileştirilmesi son yıllarda üzerinde en çok çalışılan konular arasında yer almaktadır. Güç kaynaklarındaki EMI sorunları, normal çalışma koşullarını bozabilecekleri için her alanda ve özellikle de askeri alanlarda kritik öneme sahiptir (Aksoy, 2014). Bu nedenle, elektromanyetik uyumluluk standartlarının gereksinimlerini karşılamak için ortaya çıkan EMI'nin tolere edilebilir bir seviyenin altına düşürülmesi gerekmektedir (Majid, 2012). Öncelikle kararlı bir yapıda çalışan, elektronik devrelerde bulunan voltaj gereksinimlerini karşılamak amacıyla belirlenen DC/DC dönüştürücünün tasarımı incelenmiştir. Mikroişlemci veya haberleşme

modülleri gibi elemanlar voltaj gereksinimleri açısından çok hassastırlar. Regüleli, kararlı ve sabit bir DC akımla beslenmeleri düzgün çalışmaları için çok önemlidir.

Halihazırda DC/DC dönüştürücüler büyük yük ve besleme voltajı değişimlerine maruz kalırlar, bu nedenle çıkış voltajının regülasyonu zayıftır (Kumar ve ark, 2021) Standart olarak tasarlanmış bir güç kaynağı sisteminde, sistemdeki hızlı değişikliklere cevap verebilmeleri için gerekli dinamik yanıt yavaştır. Yüksek hızlı cihazların getirdiği ani yük değişiklikleri, sistemin güç kaynaklarında hızlı dinamik yanıt verme ihtiyacını önemli ölçüde artırmıştır (Kumar ve ark, 2021). Bu nedenle, değişimlerin üstesinden gelmek ve hızlı dinamik yanıt sağlamak için uygun bir kontrolör kullanmak önemlidir.

Buck dönüştürücü olarak da bilinen DC/DC dönüştürücü, uygulanan giriş voltajına göre çıkış voltajını düşürmek için kullanılan bir güç dönüştürücüsüdür. Buck Dönüştürücü devresi, anahtarlamalı güç kaynağı olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Öncelikle temel bir Buck dönüştürücü devresi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



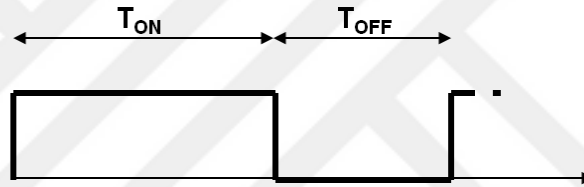
Şekil 3.1 Temel Buck Dönüştürücü Devresi

Buck Dönüştürücü, düzensiz DC voltaj girişini düzenli ve daha düşük bir seviyede DC çıkış voltajına düşürmek için kullanılır. Anahtar AÇIK konuma getirildiğinde, indüktörde depolanan enerji diyot yardımıyla çıkış kapasitörüne akarak onu şarj eder. Kapasitör üzerindeki voltaj anında yükselmediğinden ve indüktör şarj akımını sınırladığından, anahtarlama döngüsü sırasında kapasitör üzerindeki voltaj, kaynağın voltajına eşit değildir. Anahtar KAPALI konuma getirildiğinde devre iletimdedir. İndüktördeki akım aniden değişmeyeceğinden, indüktör üzerinde bir voltaj oluşur. Bu voltaj, anahtar kapatıldığında kapasitörü şarj eder ve yükü diyot üzerinden besler böylece

anahtarlama döngüsü boyunca çıkış akımını korur. Çıkış akımındaki dalgalanmayı bastırmak ve filtreleme yapmak için çıkış kondansatörü kullanılmalıdır.

Anahtarlama doluluk oranı indüktörün artı kutbundaki gerilim kare dalgadır. Doluluk oranı, çıkış voltajını kontrol etmek için değiştirilir. Şekil 3.2’deki grafikte gösterildiği gibi sabit (sırasıyla, pozitif ve negatif) bir indüktör voltajının varlığı sebebiyle indüktör akımı lineer (yukarı veya aşağı eğim) davranış gösterir.  $T_{on}$  sırasında mevcut artan değeri,  $T_{off}$  sırasındaki mevcut düşüş değerine eşitlenir. Diyot ve ileri anahtarlama gerilimleri ihmal edilerek, giriş ve çıkış arasında doğrusal bir ilişki elde edilir.

Çıkış voltajı  $V_{OUT}$ , giriş voltajı  $V_{IN}$ ’e kıyasla daha düzenlidir. Öte yandan, çıkış voltajı, görev döngüsünün değerine bağlı olarak giriş voltajı seviyesinden düşüktür. Çıkış ve giriş voltajı arasındaki ilişki Denklem 3.1’e eşittir:



Şekil 3.2 Doluluk oranı

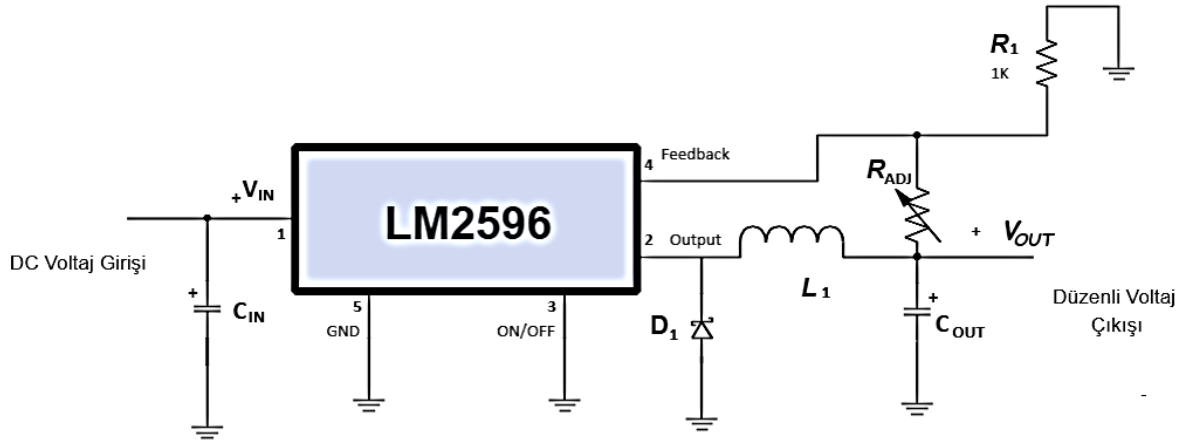
$$V_{OUT} = DV_{IN} , D = \frac{T_{on}}{T} \quad (3.1)$$

Burada  $t_{on}$ , anahtarın iletimde kaldığı süreyi belirtir. Denklemde görüldüğü gibi, çıkış voltajı ile giriş voltajı arasında bir doluluk oranı vardır ( $0 < D < 1$ ). Doluluk oranı 1’den küçük olduğu için çıkış voltajı her zaman girişten daha düşük olacaktır. Tablo 3.1’de Buck dönüştürücünün tasarım kriterleri yer almaktadır.

Bu çalışmada Texas Instruments firmasının üretici parça numarası LM2596 olan anahtarlama güç kaynağı regülatörü kullanılmıştır. LM2596 serisi regülatörler, hat ve yük regülasyonu ile 3A’lık bir yükü besleyebilen, Buck dönüştürücü anahtarlama regülatörü için tüm aktif fonksiyonları sağlayan monolitik entegrelerdir. Şekil 3.3’te girişim bastırma amacıyla devreye filtre ilavesi yapılacak olan regülatör devresine ait devre şeması yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Buck Dönüştürücü Tasarım Kriterleri

Parametreler	Değer:
Maksimum DC giriş voltajı, $V_{IN}$	40 V
DC çıkış voltajı, $V_{OUT}$	3.3 V, 5 V, 12 V
Maksimum çıkış akımı	3 A
Anahtarlama frekansı	150 kHz
Yüksüz Durgun Akım	80 $\mu$ A
Kapatma Besleme Akımı	10 $\mu$ A

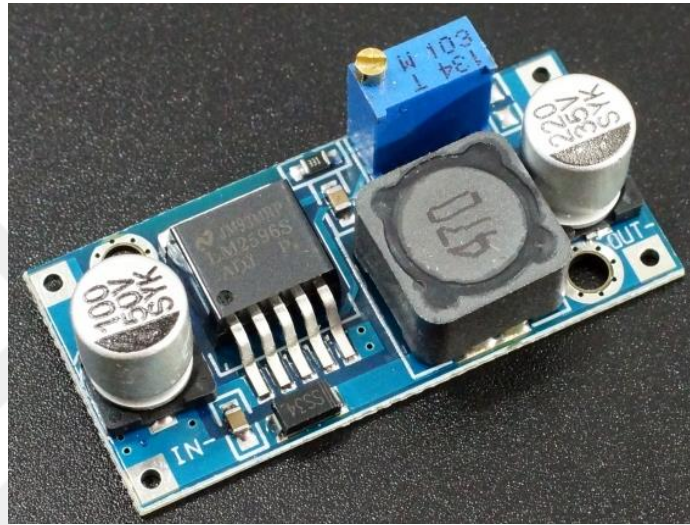


Şekil 3.3 DC/DC Buck Dönüştürücü Devre Şeması

LM2596 serisi ile kullanım için optimize edilmiş birkaç farklı üreticinin ürünlerinin de yer aldığı standart bir indüktör serisi mevcuttur. Bu özellik, anahtarlama güç kaynaklarının tasarımını büyük ölçüde basitleştirir.

Belirtilen giriş voltajı ve çıkış yükü koşulları altında çıkış voltajında  $\pm\%4$  ve osilatör frekansında  $\pm\%15$  tolerans bulunmaktadır. 80  $\mu$ A durgun yük akımına sahip harici kapatma özelliği bulunmaktadır. Kendini koruma özelliği, çıkış anahtarı için iki aşamalı frekans düşürücü akım limitini ayarlar ve aşırı sıcaklık artışında cihazın kapatılmasını içerir.

LM2596 Simple Switcher regülatör, 40 V'a kadar geniş bir giriş voltajı aralığına sahiptir. Kullanımı oldukça kolay, senkronize olmayan, kademeli bir DC/DC voltaj dönüştürücüdür. 3.3 V, 5 V, 12 V gibi sabit çıkışlı voltaj verebilen tipleri de bulunmaktadır. Bu çalışmada ayarlanabilir çıkış üreten versiyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan DC/DC dönüştürücü modül halinde satılmakta olup piyasada kolaylıkla bulunabilecek bir dönüştürücüdür. Şekil 3.4'te kullanılan dönüştürücü modülü yer almaktadır.



Şekil 3.4 LM2596 Buck Dönüştürücü Modülü

### 3.1.1. Giriş Kapasitörünün Seçilmesi

Giriş pimi ile topraklama pimi arasına düşük ESR'ye sahip alüminyum veya tantal baypas kapasitörü gereklidir. Bu kapasitör, girişte büyük voltaj geçişlerinin oluşmasını engeller ve anahtarı AÇIK konuma her gelişindeki gerekli olan anlık akımı sağlar. Giriş kapasitörü için önemli parametreler voltaj seviyesi ve RMS akım seviyesidir. Bir kapasitörün RMS akım seviyesi, kapasitörün güç seviyesi olarak görülebilir.

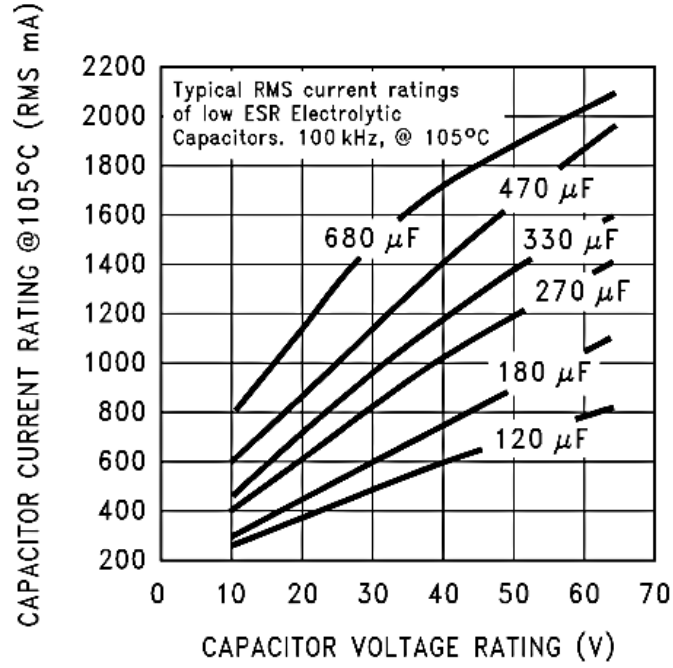
Kapasitörlerin dahili ESR'sinden akan RMS akımı, güç tüketimi yaparak kapasitörün iç sıcaklığının yükselmesine neden olur. Bir kapasitörün RMS akım seviyesi, iç sıcaklığı 105°C'lik bir ortam sıcaklığının yaklaşık 10°C üzerine çıkarmak için gereken akım miktarı ile belirlenir (EK-1). Kapasitörün bu ısıyı yayma yeteneği, güvenli bir şekilde sürdürebileceği akım miktarını belirlemektedir. Belirli bir kapasitör değeri için,

daha yüksek voltajlı bir elektrolitik kapasitör, düşük voltajlı bir kapasitörden fiziksel olarak daha büyüktür. Bu nedenle daha fazla ısı yayabilir ve daha yüksek bir RMS akım seviyesine sahiptir.

Bir elektrolitik kondansatörün RMS akım seviyesinin üzerinde çalıştırılmasının sonuçları, çalışma ömrünün kısalmasına neden olur. Daha yüksek sıcaklıklar, kapasitörün elektrolitinin buharlaşmasını hızlandırır ve sonuçta kısa ömürlü olmasına neden olmaktadır (EK-1).

Bir giriş kapasitörünün seçilmesi, izin verilen maksimum RMS dalgalanma akımını öğrenmek için üreticinin veri sayfasının incelenmesi gerekir. 40°C'lik bir maksimum ortam sıcaklığı için, DC yük akımının yaklaşık %50'si kadar bir dalgalanma akımına sahip bir kapasitör seçmek gerekir. 70°C'ye kadar olan ortam sıcaklıkları için, DC yük akımının %75'lik bir dalgalanma akımı, iyi bir seçimdir. Kondansatör voltaj değeri, maksimum giriş voltajından en az 1.25 kat daha büyük olmalıdır ve RMS akım gereksinimlerini karşılamak için daha yüksek voltajlı bir kapasitör gerekmektedir (EK-1).

Şekil 3.5'te elektrolitik kapasitör değerinin, voltaj seviyesi ve RMS akımı arasındaki ilişkiyi gösterir. Standart elektrolitik kapasitörler daha yüksek ESR değerine ve daha düşük RMS akımına sahiptir. Bu sebeple çalışma ömrü diğerlerinden daha kısadır.



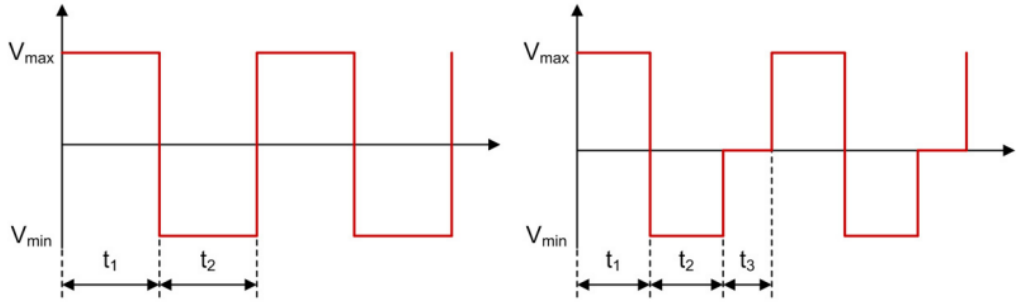
Şekil 3.5 Düşük ESR'ye Sahip Elektrolitik Kapasitörler için RMS Akım Seviyeleri (EK-1)

### 3.1.2. İndüktör Seçimi

Tüm anahtarlama regülatörlerinin iki temel çalışma modu vardır; sürekli çalışma modu ve süreksiz çalışma modu. İki çalışma modu arasındaki fark, indüktör akımının sürekli akıp akmadığı veya normal anahtarlama döngüsünde bir süre sıfıra düşüp düşmediği ile ilgilidir. Her çalışma modunun, regülatörün performansını ve gereksinimlerini etkileyebilecek belirgin şekilde farklı çalışma özellikleri vardır. Kullanılan Buck regülatörlerin çoğu, yük akımı düşük olduğunda süreksiz modda çalışmaktadır. LM2596 hem sürekli hem de süreksiz çalışma modları için kullanılabilir.

Çoğunlukla tercih edilen çalışma modu, daha yüksek çıkış gücü gereken durumlarda, daha düşük anahtarlama akımı, daha düşük indüktör ve diyot akımları sunan ve daha düşük çıkış dalgalanma voltajına sahip olan sürekli moddur. Aynı zamanda sürekli mod, özellikle düşük çıkış yük akımlarında veya cihaza yüksek giriş voltajı uygulandığında indüktör akımının sürekli olarak akmasını sağlamak için daha büyük indüktör değerleri gerektirir. Şekil 3.6'da sürekli modda ve süreksiz modda bobin üzerindeki voltaj grafikleri yer almaktadır.



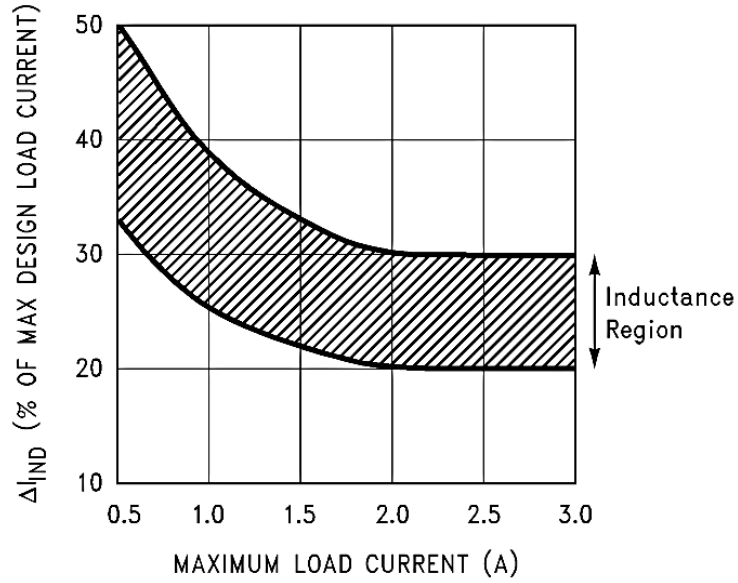


**Şekil 3.6** Anahtarlama Sırasında Bobin üzerindeki Voltaj seviyeleri, Sırasıyla Sürekli Mod ve Süreksiz Mod

LM2596 teknik özellikler dokümanında indüktör seçim sürecini basitleştirmek için bir indüktör seçim kılavuzu tasarlanmıştır. Bu kılavuz, regülatörün sürekli moda çalıştığını varsayarak tepeden tepeye indüktör dalgalanma akımının maksimum tasarım yük akımının belirli bir yüzdesi olmasına izin verecek bir indüktör seçilmesini önerir. Tepeden tepeye indüktör dalgalanma akımı yüzdesi sabit değildir, ancak farklı yük akımları seçildikçe akım yüzdesi de değişebilmektedir. Şekil 3.7’de yük altında indüktörde meydana gelen dalgalanma akımı yüzdesel olarak gösterilmiştir.

Düşük yük akımları için indüktör dalgalanma akımının yüzdesinin artmasına izin verilerek, indüktörün değeri ve boyutu nispeten düşük tutulabilir. Sürekli moda çalışırken, girişe uygulanan voltaja bağlı olarak indüktör akımının dalga biçimi üçgenden testere dişi dalga biçimine doğru değişir ve bu akım dalga biçiminin ortalama değeri çıkıştaki yük akımına eşittir. Toroid, E-nüvesi ve benzeri gibi farklı stillerde ve ayrıca ferrit ve toz demir gibi farklı çekirdek malzemelerinden üretilmiş indüktörler mevcuttur.

Bunlardan maliyeti en düşük olanı bobin, çubuk veya çubuk şeklinde bir çekirdeğin üzerine sarılmış telden oluşur. Bu tür bir yapı, ucuz bir indüktör sağlar, ancak manyetik akı tamamen çekirdek içinde bulunmadığından, daha fazla EMI üretir. Bu manyetik akı, yakındaki baskı devre yollarında voltaj indükleyebilir, böylece hem anahtarlama regülatörünün çalışması hem de yakındaki hassas devreler ile ilgili sorunlara neden olabilir.



Şekil 3.7 Yük Altında İndüktör Dalgalanma Akımı (EK-1).

Aynı PCB üzerinde birden fazla anahtarlama regülatörü bulunduğunda, açık çekirdekli manyetikler, özellikle yüksek akımlarda iki veya daha fazla regülatör devresi arasında parazite neden olabilir. Bu durumlarda bir toroid veya E-çekirdekli indüktör (kapalı manyetik yapı) kullanılmalıdır. Teknik Özellikler dokümanında önerilen indüktörler arasında Schottky için ferrit E-çekirdek yapısı, Renco, Coilcraft ve Würth Elektronik için ferrit bobin çekirdeği ve Pulse Engineering için toz demir toroid bulunur.

İndüktörün maksimum akım seviyesini aşmak, bakır tel kayıpları nedeniyle indüktörün aşırı ısınmasına veya çekirdek doymasına neden olabilir. İndüktör doymaya başlarsa, indüktans hızla azalır ve indüktör üzerinde direnç görünmeye başlar (sargının DC direnci). Sargı direncinin oluşması anahtarlama akımının çok hızlı yükselmesine neden olabilir ve anahtarı çevrim-döngü akım sınırına zorlayarak DC çıkış yük akımını azaltılabilmektedir (EK-1). Bu sebep ayrıca indüktörün veya regülatörün aşırı ısınmasına neden olabilir. Farklı indüktör tipleri farklı doyma özelliklerine sahiptir, bu nedenle bir indüktör seçerken bunun göz önünde bulundurulması gerekir.

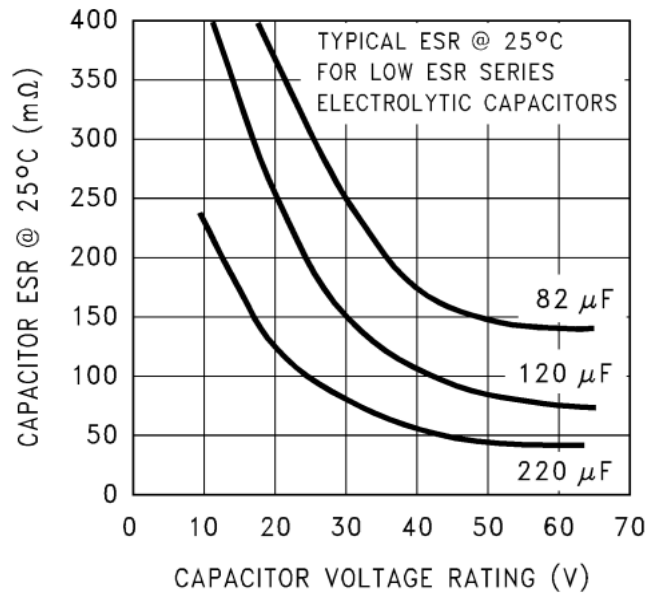
### 3.1.3. Çıkış Kapasitörünün Seçilmesi

Anahtarlama regülatörlerde çıkışı filtrelemek ve regülatör döngü stabilitesini sağlamak için bir çıkış kapasitörü gereklidir. Anahtarlama regülatör uygulamaları için

üretilmiş düşük empedanslı veya düşük ESR'ye sahip elektrolitik veya tantal kapasitörler kullanılmalıdır (EK-1). Bir çıkış kapasitörü seçerken, önemli kapasitör parametreleri 100 kHz'deki ESR değeri, voltaj seviyesi ve kapasitans değeridir. Çıkış kondansatörü için ESR değeri en önemli parametredir.

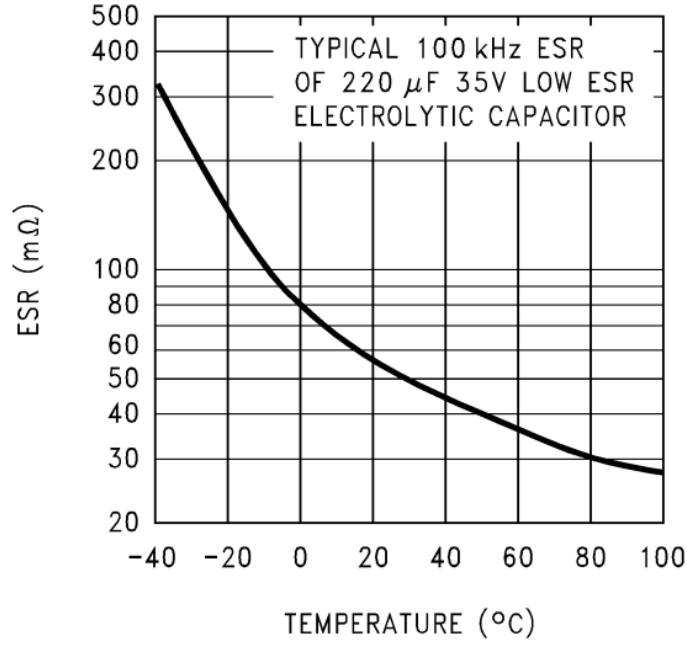
Çıkış kapasitörü, üst ve alt limitleri olan bir ESR değerine sahip olmalıdır. Çıkış voltajındaki küçük dalgalanmalar için düşük bir ESR değeri gereklidir. Ancak, seçilen kapasitörün ESR'si aşırı derecede düşükse, çıkışta bir salınımla sonuçlanan kararsız bir geri besleme döngüsü oluşur.

Alüminyum elektrolitik kapasitörlerin ESR değeri, kapasitansı ve voltaj seviyesine bağlıdır. Şekil 3.8'de yüksek voltajlı elektrolitik kapasitörlerin daha düşük ESR değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Genellikle, düşük çıkış dalgalanma voltajı için gereken düşük ESR değerlerini sağlamak için çok daha yüksek voltaj derecelerine sahip kapasitörler gerekebilir.



Şekil 3.8 Kapasitör Voltajına bağlı ESR Eğrisi (EK-1).

-25°C'nin altındaki sıcaklıklar için elektrolitik kapasitörler önerilmez. Şekil 3.9'da ESR'nin, düşük sıcaklıklarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında tantal kapasitörler, düşük sıcaklıklarda çalışan uygulamalar için çok daha iyi ESR özelliklerine sahiptir ve -25°C'nin altındaki sıcaklıklar için önerilir.



Şekil 3.9 Elektrolitik Kapasitördeki Sıcaklığa Bağlı ESR Değişimi (EK-1).

### 3.1.4. Diyodun Seçilmesi

Buck regülatörleri, anahtar kapalı konumdayken indüktör akımına dönüş yolu sağlamak için bir diyot gerektirir. Bu hızlı bir diyot olmalıdır ve devre üzerinde LM2596'ya en yakın konuma yerleştirilmelidir. Anahtarlama hızının yüksek olması ve düşük ileri voltaj düşüşü nedeniyle Schottky diyotları, özellikle düşük çıkış voltajı uygulamalarında (5V ve daha düşük) en iyi performansı sağlar (EK-1). Ultra hızlı kurtarma veya yüksek verimli doğrultucular da iyi bir seçimdir, ancak ani kapanma özelliğine sahip türleri kararsızlığa veya EMI sorunlarına neden olabilir.

## 3.2. EMC Uyumluluk Gereklilikleri

Bu tez çalışmasında, ticari ve askeri alanlarda sıklıkla kullanılan DC/DC dönüştürücülerde meydana gelen EMI sorunlarına yönelik DC/DC Buck dönüştürücü incelenerek bu dönüştürücüde EMI'nin bastırılması ve birlikte çalışan cihazlarla uyumlu hale getirilmesi amacıyla EMI giriş filtresi uygulanmıştır. EMI giriş filtresi genel filtre

yapıları ve CE 102 testinde yer alan sınır değerleri baz alınarak oluşturulmuştur. Filtre tasarımı LTspice programında benzetimi yapıldıktan sonra en iyi sonuçları alabilmek için deneme yanılma yöntemiyle simülasyon programı üzerinde kolayca optimize edilmiştir.

Ek olarak kullanılan DC/DC dönüştürücüdeki EMI filtre tasarım sürecini EMI gereksinimlerini karşılayacak şekilde hızlandırmak amacıyla EMI filtre tasarımının simülasyonu yapılarak zayıflamanın kolayca nasıl tahmin edilebileceği gösterilmektedir. Simülasyon sonuçlarını gerçek sonuçlarla kıyaslayabilmek için EMI filtre tasarımı, dönüştürücünün girişine entegre edilerek laboratuvar ortamında MIL-STD-461G standardının CE 102 testine tabi tutulmuştur. Testler farklı voltaj seviyelerinde tekrarlanmıştır. Filtre içeren ve filtresiz sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 3.2.1. EMC Standartlarını Karşılacak Bileşenler

EMC, önce dikkatli bir yerleşim ve ardından istenmeyen sinyallerin filtreleri ve sönümleyici olarak işlev gören devreye doğru bileşenlerin eklenmesiyle elde edilir. İstenmeyen sinyallerin azaltılmasında rol oynayabilecek bazı bileşenler şunlardır:

- Ferrit Boncuklar
- Ortak Mod Tıkama Bobinleri
- Filtre Kapasitörleri
- TVS (geçici voltaj bastırma) diyotları
- Varistörler

Ferrit boncuklar, belirli frekans aralıklarındaki sinyalleri sönümler ve üzerlerinde depoladıkları enerjiyi ısı olarak yayarlar. Akımları toprağa yönlendirmek için indüktörler ve kapasitörlerle birlikte kullanılır. Frekansa duyarlı voltaj bölücüler olarak işlev görürler ve bu nedenle malzeme özelliklerine, çalışma frekanslarına ve devre empedanslarına göre dikkatlice seçilmelidirler.

TVS diyotları devrelerin performansını etkilemeden anlık geçici voltaj bastırmaya yarar. Uygun korumayı sağlamak için sinyal hatlarının hızı, güç kapasitesi ve kapasitansı gibi özelliklerine dikkat ederek seçmek gerekir. Ethernet ve USB veri hatları buna iyi bir örnektir. Koruyucu olarak kullanılır ve düzgün uygulandığında yayılan gürültüyü etkili bir şekilde sınırlayabilir.

EMI filtre tasarımında kullanılan malzemeler, EMI akımlarına ve gerilimlerine karşı seri ya da paralel olarak bağlanırlar. Gürültülere karşı düşük veya yüksek empedans göstererek gürültüyü bastırmaktadırlar.

EMI filtreler genel olarak pasif bileşenlerden (kapasitör, indüktör, direnç vb.) oluşur. Kapasitör ve indüktör yüksek veya düşük frekanslarda farklı davranmaktadır. Kapasitörler, düşük frekanslarda yüksek empedans göstererek açık devre gibi davranırlar. Yüksek frekanslara karşı ise düşük empedans gösterirler. İndüktörler ise kapasitörlerden farklı olarak düşük frekanslarda düşük empedans gösterirler, yüksek frekanslarda yüksek empedans göstererek üzerlerinden akım geçmesini engellerler böylece açık devre özelliği göstermiş olurlar. Di Capua, G. ve ark. (2019), çalışmalarında bu pasif malzemeleri çeşitli kombinasyonlarda kullanarak, EMI gürültülerini filtrelemişlerdir. Seçtikleri kombinasyonla belirledikleri frekans aralığını geçirebilen veya istenmeyen frekansları bastırılabilen yapıda filtreler elde etmişlerdir.

Son yıllarda, güç elektroniği sistemlerinde kullanılan malzemelerin boyutlarını ve maliyetlerini iyileştirmek için elektronik malzeme üreticileri malzemeleri daha küçük boyutlarda üretmeye başladı ve bunun yanında elektriksel ve termal performanslarında artışlar sağlandı. Chen (2004) çalışmasında, gelişmiş yarı iletken malzemeler kullanarak anahtarlama frekansının arttırılabileceğinden ve elektronik malzemelerin paketleme boyutlarının geliştirilmesiyle yeni bir döneme girildiğinden bahsetmiştir. Anahtarlama frekansının yüksek olması dönüştürücülerin boyutunu, ağırlığını ve maliyetini azaltmaya yardımcı olsa da EMI'yi arttırır hale gelmiştir. Gelişmiş paketleme ve entegrasyon teknolojileri elektronik devrelerin güç tasarımı için EMI ile ilgili daha fazla dikkat edilmesi gereken unsurları küçük boyutlara sıkıştırılmayı mümkün kılmaktadır (Kotny ve ark., 2014).

### **3.2.2 Temel EMI Filtre Topolojileri**

Pasif EMI filtrelerinin tasarımı yeni değildir ve geçmişte bu konuda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların çoğu, düşük frekans gereksinimini karşılayan ancak yüksek frekansları hesaba katmayan bir tasarım süreci önermektedir. Bu nedenle, endüstriyel ve askeri uygulamalar genellikle EMC standartlarını karşılayacak şekilde EMI filtresini tasarlamak ve optimize etmek için uzun bir deneme yanılma yöntemine

dayanır. İletilen EMI, besleme hatlarından ve ara bağlantı kablolarından geçer ve Ortak Mod (CM) ve Diferansiyel Mod (DM) olarak ikiye ayrılır. Diferansiyel mod, giriş gücü ile aynı yolu takip ederken, ortak mod, toprak (şasi) üzerinden ilerleyen bir akım yoluna sahiptir (Miloudi ve ark., 2012). Norm sadece sistemin toplam gürültüsünü dikkate almak olsa bile, hem ortak mod (CM) hem de fark modu (DM) gürültüsünün azaltılması gerekir. CM gürültüsündeki bir artış, genellikle sistemin asimetrisinden dolayı DM gürültüsünün artmasına neden olur.

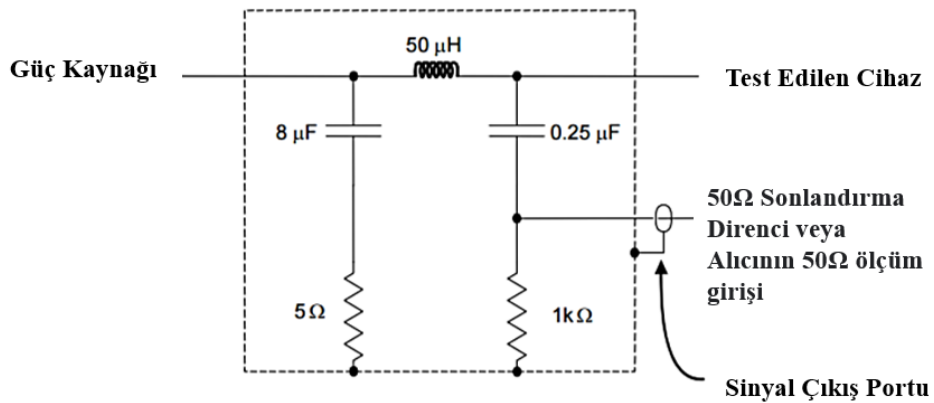
EMI'nin etkili olduğu frekans aralığı 10 kHz ile 10 MHz arasında olduğundan, tasarım sürecinde bileşenlerin parazitlerini ve yüksek frekanslardaki davranışlarını dikkate almak önemlidir. Bileşenlerin eşdeğer paralel kapasitansı (EPC), eşdeğer seri indüktörü (ESL) ve kapasitörlerin eşdeğer seri dirençleri (ESR) gibi parazitik etkiler, EMI filtresinin bastırma performansını değiştirir. Ayrıca, bir EMI filtresinin etkinliği, güç dönüştürücüsünün empedansına da bağlıdır. EMI filtresinin tasarımı, dönüştürücünün giriş empedansı bilinerek basitleştirilirse, bu empedansı analiz etmek ve ölçmek oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır.

EMI filtreleri için toprak bağlantıları çok önemlidir. CM gürültüsü için kötü yapılmış toprak bağlantıları filtrenin zayıflamasını azaltabileceği gösterilmiştir (Li ve See, 2015). Bir diğer yaklaşım da ise; bobinlerde meydana gelen sıcaklık artışı, doyunluk ve ferrit malzemenin yapısı gibi özellikler incelenerek filtrenin ortak mod bobinini iyileştirmek ve toplam hacmini azaltmak için çalışmalar yapılmıştır. Bobinin endüktans değeri ile hem CM hem de DM indüktörünün birleştirilmesine izin veren yeni bir entegre yapı incelenmiştir (Zaidi ve ark., 2019). Ayrıca, kapasitörlerin voltaj seviyesinin EMI gürültüsü üzerindeki etkisi incelenmiştir (Maillet, 2008).

### 3.2.2. EMI Gürültü Ölçümü İçin LISN Cihazı

LISN'ler, tasarlanan elektronik bir ürünün iletim yoluyla yayılan diferansiyel ya da common (ortak) mod akımlarından kaynaklı elektriksel gürültüyü toprağa karşı ölçmeye yarar. Test edilen cihaza giriş gücü sağlayan güç kaynaklarının empedansı, belirli bir test prosedüründe aksi belirtilmedikçe, tüm testler için Hat Empedans Stabilizasyon Ağları (LISN'ler) tarafından kontrol edilmektedir. LISN, test edilen cihazı ana şebekeden yalıtır. Test edilen cihaza sağlanan güç mümkün olduğunca temiz

olmalıdır. Aynı zamanda LISN, test edilen cihaz tarafından üretilen herhangi bir gürültünün ana beslemeye bağlanmasını da önler. LISN cihazı iletilen emisyon testini ölçmek için tanımlanmış bir empedans sağlamaktadır. Ek olarak iletilen emisyon seviyelerini belirlemek için de bir ölçüm portu sağlamaktadır (Abinaya, 2017). Şekil 3.10'da LISN ekipmanının içerisindeki temel devre elemanları gösterilmektedir. Cihazın girişine voltaj kaynağından çıkan ana besleme verilmektedir; test edilen cihaz yazılı kısım ise test edilecek ürünün bağlanacağı noktayı göstermektedir. Devre şemasında bakıldığında bobin, kapasitörler ve direnç gibi elemanlarından oluşan bir EMC filtresi olduğu görülebilir. Hattın artı ve eksi uçları simetrik devre elemanlarından oluşmaktadır. Yani devrenin giriş kısmı ile çıkış kısmı simetriktir. Sinyal çıkış portu EMI alıcı cihazının girişine giden ölçüm noktalarıdır. EMI alıcısı tarafından sırasıyla artı ve eksi uçlarından ölçümler alınır.



Şekil 3.10 LISN Devresi Şematik Gösterimi (MIL-STD-461G, 2015)

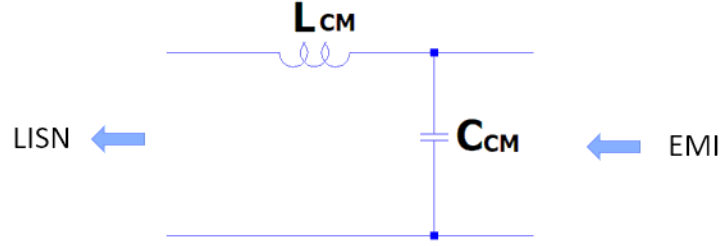
Voltaj kaynağından gelen yüksek frekanslı gürültüler devrenin sol tarafındaki komponentler ile filtrelenmekte ve ölçüm tarafını etkilememektedir. Benzer şekilde ölçüm altındaki cihazdan yayılan yüksek frekanslı gürültüler devrenin sağ tarafında yani EMI alıcısı tarafında kalmakta ve hatta yansımamaktadır.

### 3.3.4. EMI Filtre Tasarım Prosedürü

DC pasif filtrenin tasarımı oldukça yaygındır ve temel bir tasarım oluşturmak için filtrede kullanılan endüktans ve kapasitans gibi bileşenlerin yaklaşık değerlerini

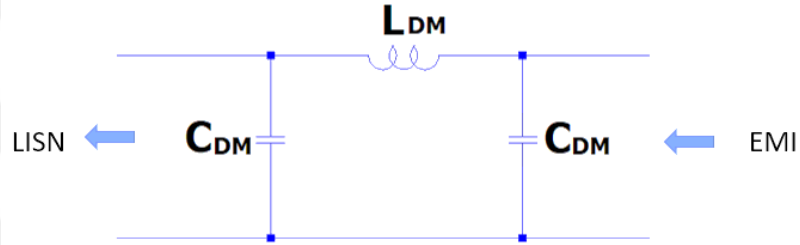






Şekil 3.12 CM Eşdeğer Devresi

Aksoy (2014), çalışmasında “π” tipi bir filtre topolojisinin kullanıldığı devrelerin bastırma oranının LC tipi topolojisine göre daha fazla bastırma sağladığını söylemektedir. Şekil 3.13’te LC tipi bir ortak mod filtre topolojisinin eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.13 DM Eşdeğer Devresi

Sistemin eşdeğer CM gürültü kaynağı, eşdeğer empedans  $Z_g$  ile seri bağlanarak MOSFET’in ortalama drain voltajı temsil edilebilir. LISN'nin her hat için  $50 \Omega$ 'luk bir dirençle karakterize edilir ve  $25 \Omega$  seri bağlı veya  $100 \Omega$ 'luk paralel bağlı iki direnç kullanılarak oluşturulur. Bu nedenle, Şekil 3.14’te gösterilen eşdeğer devre referans alındığında, ortak mod zayıflaması Denklem 3.2’deki gibi hesaplanabilir (Miloudi ve ark., 2012).

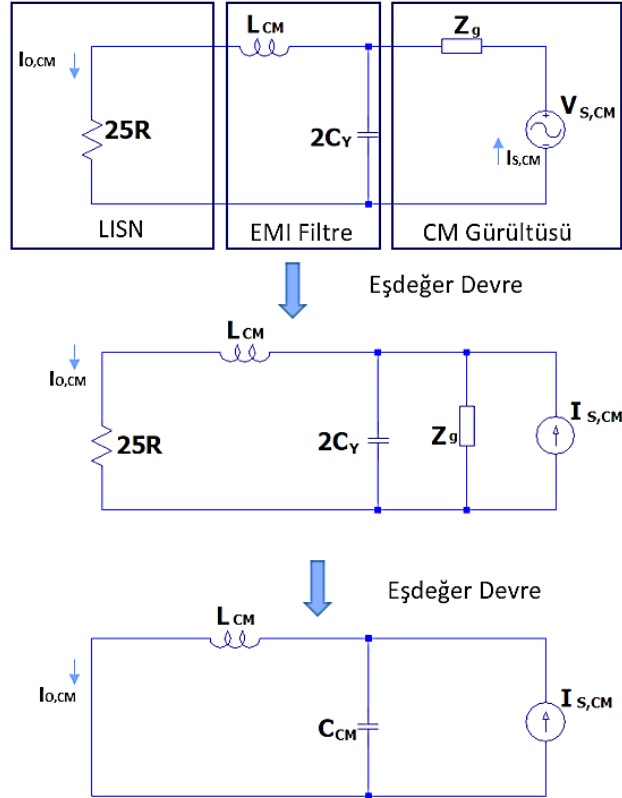
$$CM \text{ zayıflaması} \approx \frac{V_{LISN(filtresiz)}}{V_{LISN(filtreli)}} \approx \frac{I_{S\_CM(25)}}{I_{O\_CM(25)}}$$

$$\frac{I_{S\_CM(25)}}{I_{O\_CM(25)}} = \frac{Z_{L_{CM}} + Z_{C_{CM}}}{Z_{C_{CM}}} = \frac{j\omega L_{CM} + \frac{1}{j\omega C_{CM}}}{\frac{1}{j\omega C_{CM}}} = 1 + j^2 \omega^2 L_{CM} C_{CM}$$

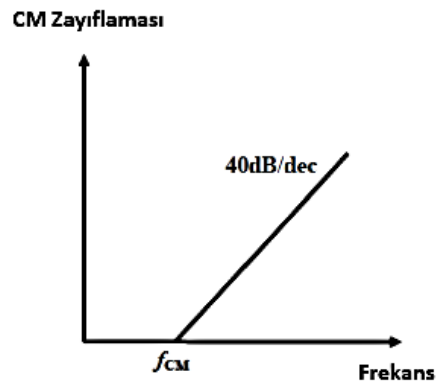
$$\frac{I_{S\_CM(25)}}{I_{O\_CM(25)}} = 0 = 1 - (2\pi f_{CM})^2 L_{CM} C_{CM}$$

$$f_{CM} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}}, \quad C_{CM} = 2C_y \quad (3.2)$$

Teorik olarak CM gürültü zayıflaması, Şekil 3.15'te gösterildiği gibi  $L_{CM}$  ve  $C_{CM}$ 'nin rezonansından geçen 40dB/dec'lik bir eğimle yaklaşık olarak hesaplanır. Aynı analiz DM gürültüsü için de yapılabilir; ancak, DM gürültüsü için gürültü kaynağını karakterize edebilmek, devrenin DM giriş empedansının hesabı nedeniyle tanımlanması daha karmaşıktır (Miloudi ve ark., 2012).



Şekil 3.14 CM Filtre Zayıflamasının Türetilmesi İçin Eşdeğer Devre



Şekil 3.15 Ortak Mod gürültü filtresi teorik zayıflama (Maillet, 2008)

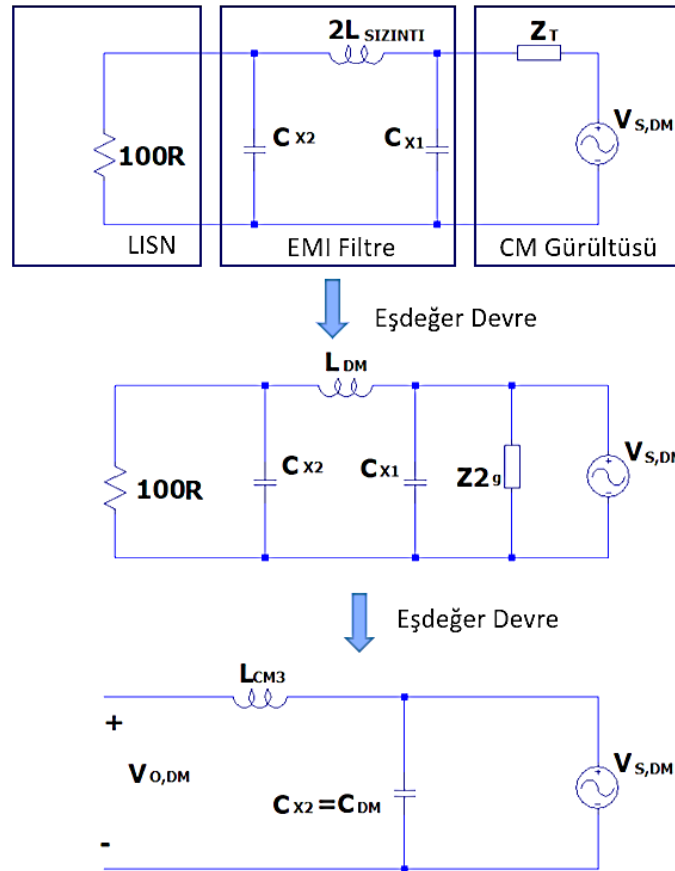
Şekil 3.16’da DM filtre zayıflamasının türetilmesi için örnek bir eşdeğer devre verilmiştir. Bu örnekten, diferansiyel mod zayıflaması Denklem 3.3’teki gibi hesaplanabilir (Maillet, 2008).

$$DM \text{ zayıflaması} \approx \frac{V_{LISN(filtresiz)}}{V_{LISN(filtreli)}} \approx \frac{I_{S\_DM(100)}}{I_{O\_DM(100)}}$$

$$\frac{I_{S\_DM(100)}}{I_{O\_DM(100)}} = \frac{Z_{L_{DM}} + Z_{C_{DM}}}{Z_{C_{DM}}} = 1 + j^2 \omega^2 L_{DM} C_{DM}$$

$$\frac{I_{S\_CM(25)}}{I_{O\_CM(25)}} = 0 = 1 - (2\pi f_{CM})^2 L_{CM} C_{CM}$$

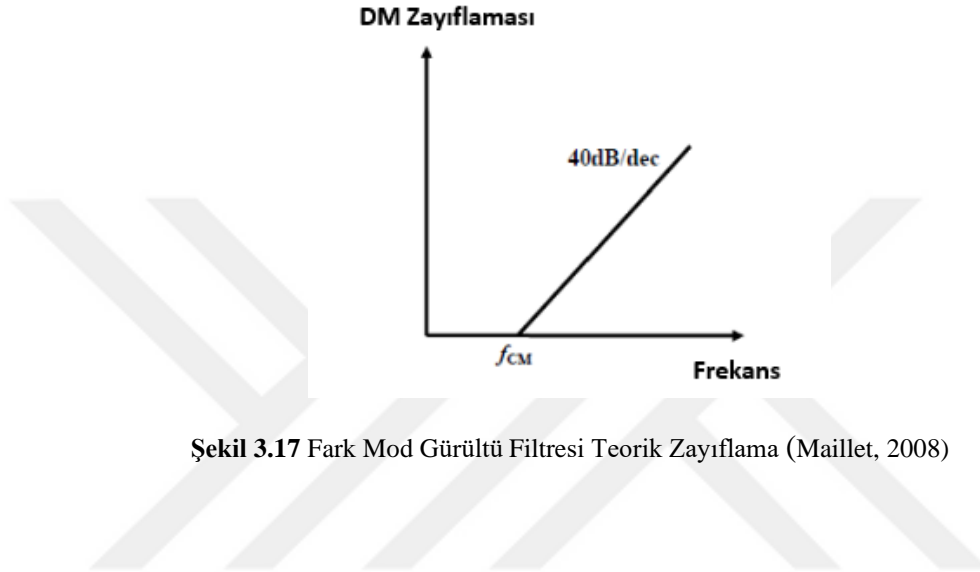
$$f_{DM} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{DM} C_{DM}}}, \quad C_{DM} = C_{x1} = C_{x2}, \quad L_{DM} = 2L_{SIZINTI} \quad (3.3)$$



Şekil 3.16 DM Filtre Zayıflamasının Türetilmesi İçin Eşdeğer Devre

Bu durumda  $C_{x1}$  kondansatöründen gelen teorik zayıflamanın önemsiz olduğunu, ancak gerçek gürültü kaynağının empedansı bilinmediğinden, bunun hesaba katılmasının tercih edildiğini belirtmek önemlidir (Miloudi ve ark., 2012).

Şekil 3.17'de gösterildiği gibi  $L_{DM}$  ve  $C_{DM}$ 'nin rezonansından geçen 40dB/dec'lik bir eğimle yaklaşık olarak hesaplanır. Gerçek empedans bilinmediği için, temel filtre için hesaplamalar yapılır ve kapasitans değeri ayarlanır.



Şekil 3.17 Fark Mod Gürültü Filtresi Teorik Zayıflama (Maillet, 2008)

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

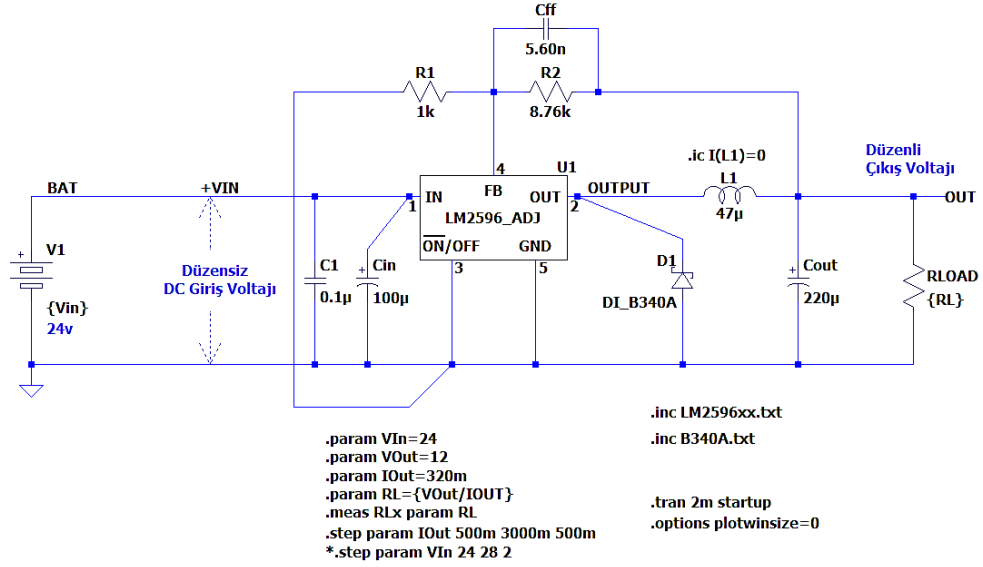
Bu bölümde önceki bölümlerde incelenen DC/DC dönüştürücü ve bu dönüştürücüye entegre edilen CM ve DM EMI filtreleri ile EMI seviyesi kabul edilebilir sınırlar içerisine düşürülmüştür. Gerçekleştirilen filtre tasarım yöntemi klasik yöntemlerle kıyaslanınca zaman ve maliyet açısından oldukça tasarruflu olduğu ve gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

EMI filtreleri, dönüştürücülerin dinamik performansı ve kararlılığı üzerinde de oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Normalde dönüştürücülere uygulanan giriş filtreleri, kararlı güç kaynakları için hesaplanan transfer fonksiyonlarını etkiler (Makda ve Nymand, 2014). DM gürültüsünün EMI filtresinin boyutu ve SMPS güç yoğunluğu üzerinde büyük etkisi vardır (Di Capua ve ark, 2019). Teorik olarak CM bobinlerinin parazitik endüktansı, EMI filtrelerinin bileşen sayısını, maliyetini ve güç kayıplarını azaltmak için DM filtre endüktansı yerine kullanılabilir (Yang ve ark., 2014). Bu yaklaşımın en önemli dezavantajlarından biri de CM bobinlerinin parazitik endüktans belirsizliği ve değerinin küçük olması nedeniyle, DM gürültüsünün yetersiz oranda zayıflaması ve büyük değerli kapasitörler gerektirmesidir. Bu nedenle, bu çalışmada CM filtresi ve DM filtresi birbirine entegre bir yapıda oluşturulmuştur. Ayrıca filtrenin devreye ilavesinden sonra alınan simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

##### 4.1. LTspice Tasarım Aracını Kullanarak Tasarımın Oluşturulması ve Simülasyon Sonuçları

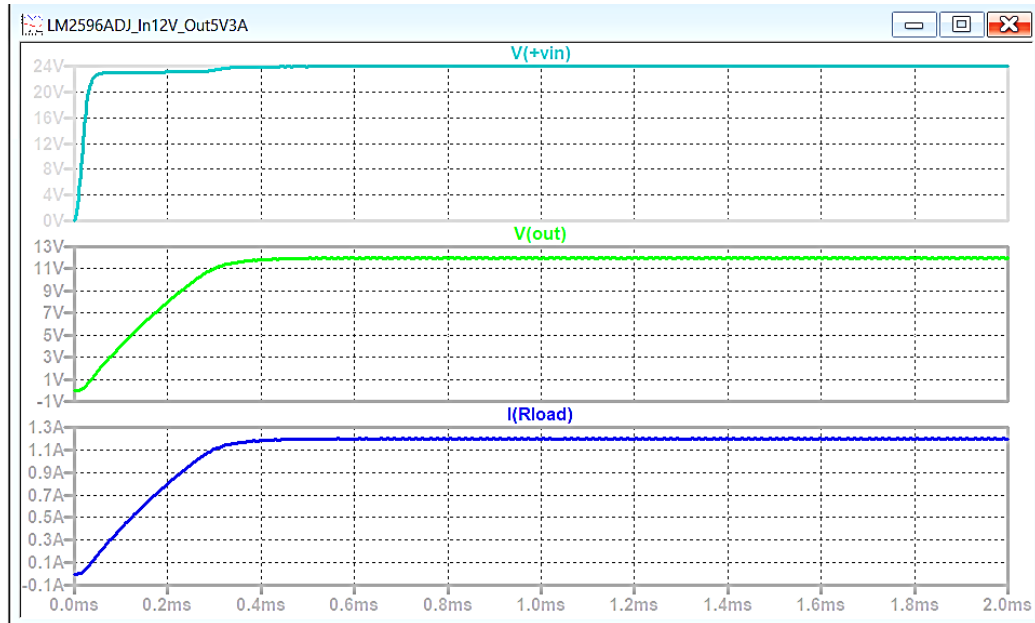
Bu çalışmada kullanılacak olan DC/DC dönüştürücünün önceki bölümlerde incelemesi yapılmıştır. İncelemesi yapılan DC/DC dönüştürücü çevre malzemeleriyle birlikte LTspice programında devre şemasına aktarılmıştır. Şekil 4.1'de DC/DC dönüştürücünün devre şeması yer almaktadır.

**TI LM2596-ADJ Adjustable Output Regulator  
SIMPLE SWITCHER Power Converter 150 KHz 3A Step-Down Voltage Regulator**



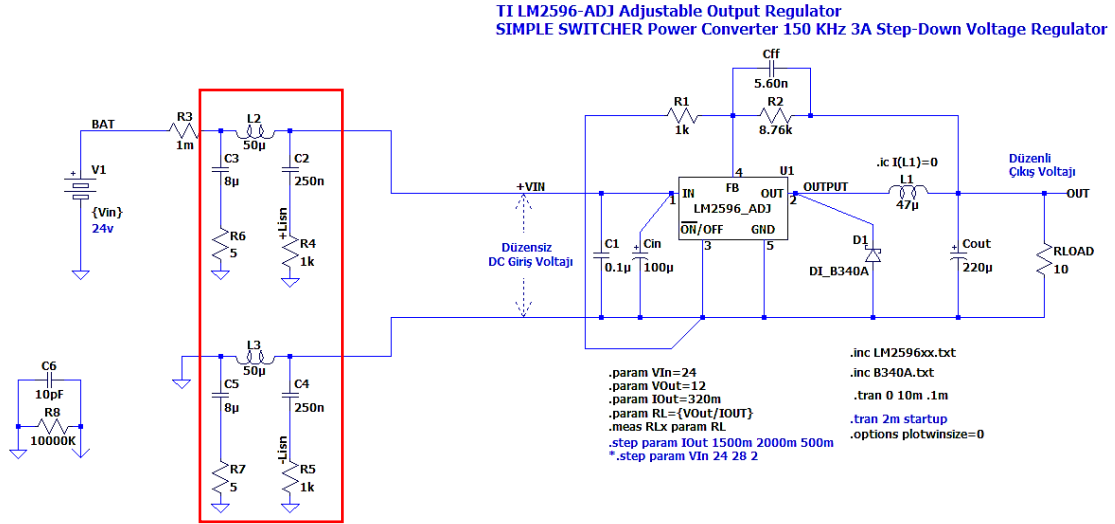
Şekil 4.1 LM2596 LTspice Şematik Devresi

Dönüştürücünün FB pinine bağlı R2 direnci ayarlanabilir direnci temsil etmektedir. Bu direnç sayesinde çıkış voltajı istenen seviyeye ayarlanabilmektedir. 3.3 V çıkış için bu direncin değeri 1.68K, 5V çıkış için R2 direnci 3.09K ve 12V çıkış için R2 direnci 8.76K olarak hesaplanmıştır. DC/DC dönüştürücü çıkış voltajı 12V'a ayarlanmış olup voltaj ve akım grafikleri Şekil 4.2'de yer almaktadır.



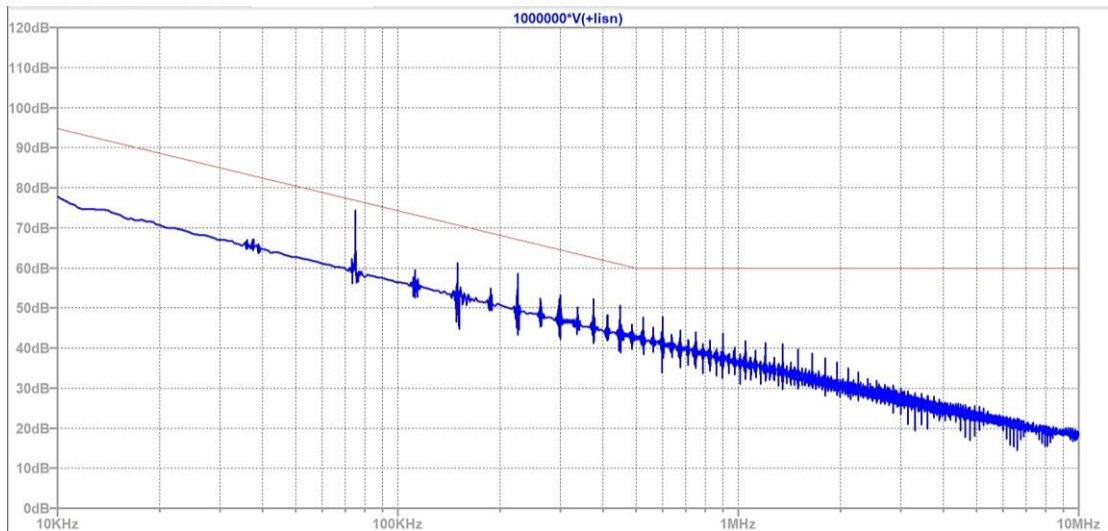
Şekil 4.2 LM2596 LTspice Voltaj ve Akım Dalga Biçimleri

Devreye gürültü ölçümlerini alabilmek için kaynağın çıkışının artı ve eksi uçlarına daha önceki bölümlerde anlatılmış LISN devresi entegre edilmiştir. Ölçümler R4 ve R5 dirençleri üzerindeki +Lisn ve – Lisn etiketlerinden yapılmaktadır. Şekil 4.3'te LISN devresi ve dönüştürücünün şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.3 Şematiğe LISN Devresinin Eklenmesi

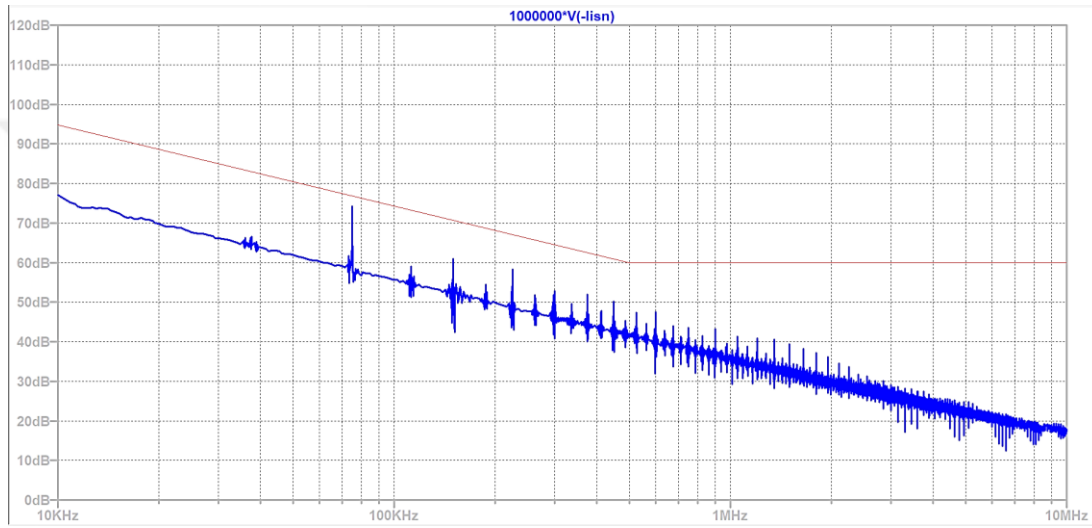
Sistemin şasi bağlantısı 10 pF ve 10M ohm dirençleri üzerinden toprağa akacak şekilde simüle edilmiştir. DC/DC dönüştürücünün çıkış gerilimi 12V olarak ayarlanmıştır. CM ve DM filtreleri eklenmeden önce hattın gürültü seviyesi ölçülmüştür. Şekil 4.4'te LISN üzerinden alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Çıkış 12V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)



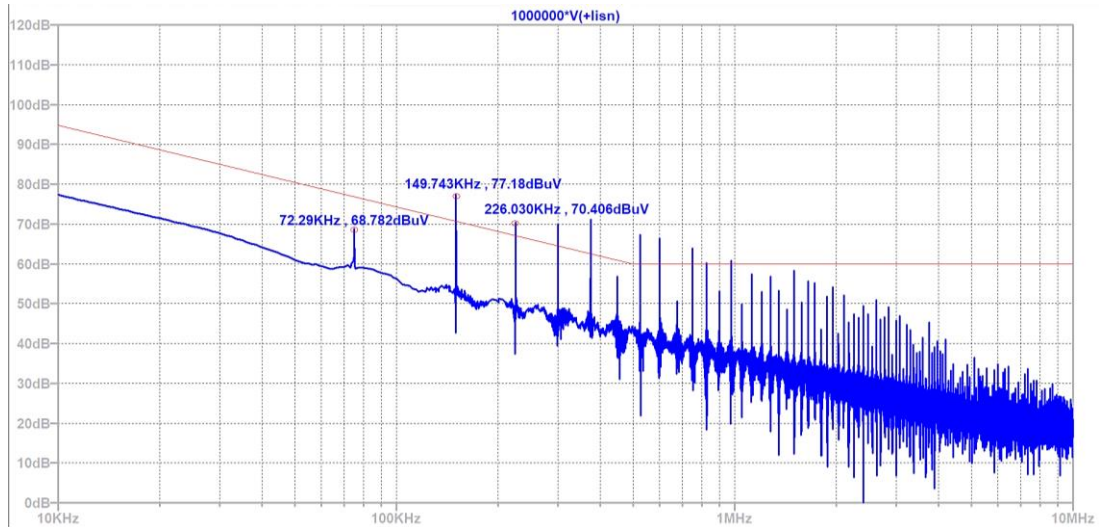
Simülasyonda mavi çizgiler hattın pozitif giriş hattının toplam gürültüsünü göstermekte olup +Lisn etiketinden ölçülmüştür. Kırmızı çizgiler CE 102 standardının limit değerlerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre hat filtre eklemesi olmadan bile gürültü seviyesi kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır. Normalde grafik sonuçları dBV cinsinden vermektedir. Ancak gerçek sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için ölçüm sonuçları 1000000 ile çarpılarak dB $\mu$ V cinsine dönüştürülmüştür. Şekil 4.5'te LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



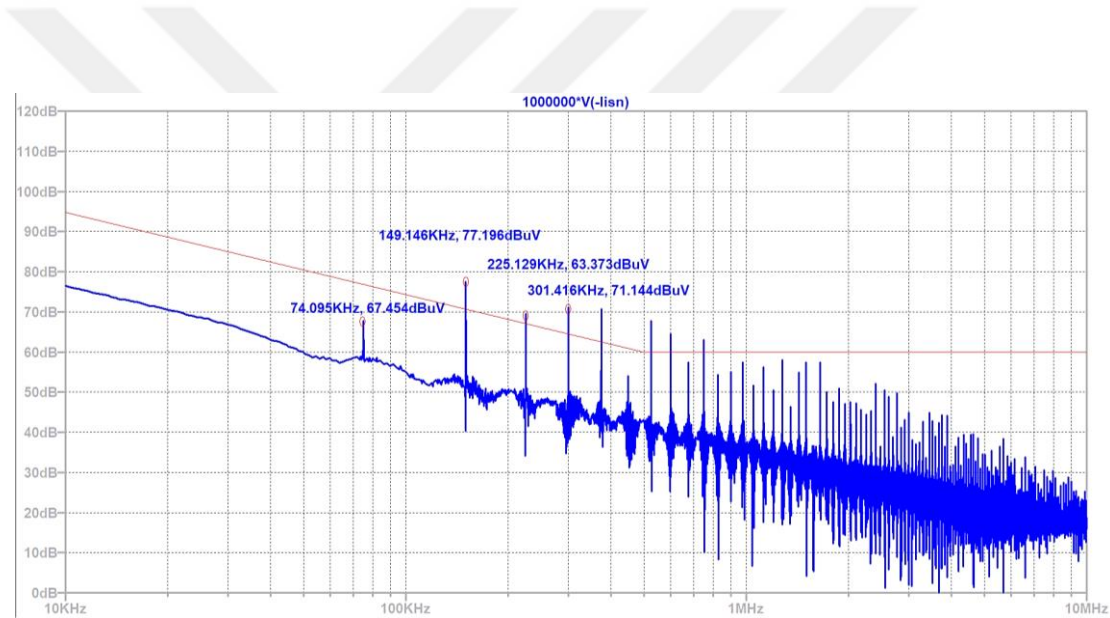
Şekil 4.5 Çıkış 12V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)

Negatif hattan alınan sonuçlar pozitif hattan alınan sonuçlara oldukça yakındır. R2 direncinin değeri değiştirilerek dönüştürücünün çıkışı 5V olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.6'da LISN devresinin pozitif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.

Dönüştürücünün çıkış voltajının değişmesiyle hattın toplam gürültüsü limit çizgilerinin üzerine yükselmiştir. Bir önceki simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanınca hattın toplam gürültüsünün arttığı gözlemlenmiştir. Limiti aşan frekans değerleri işaretlenmiştir. Limiti aşan frekans değerlerinin birbirinin yaklaşık harmonikleri şeklinde olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.7'de LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



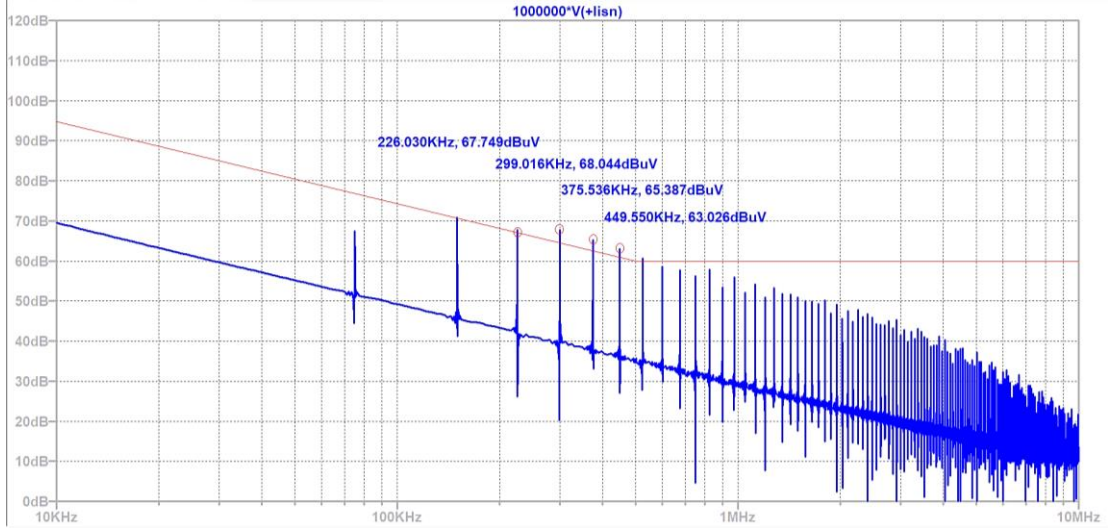
Şekil 4.6 Çıkış 5V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)



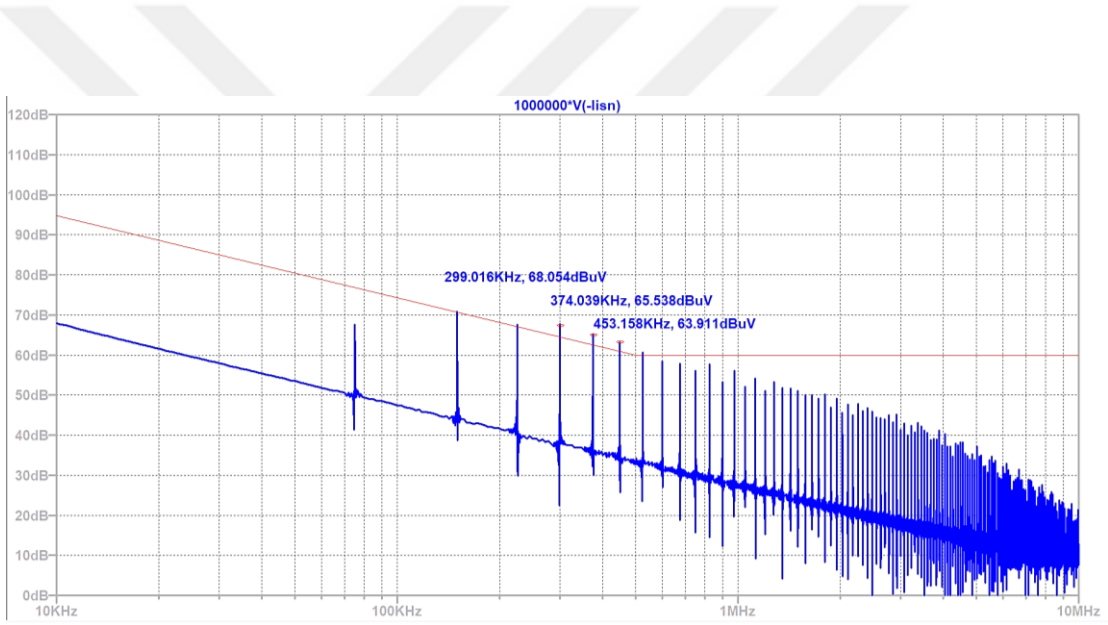
Şekil 4.7 Çıkış 5V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)

Negatif hattan alınan sonuçlar pozitif hattan alınan sonuçlara oldukça yakındır. R2 direncinin değeri değiştirilerek dönüştürücünün çıkışı 3.3V olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.8’de LISN devresinin pozitif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.

Bu ölçüm sonuçları, dönüştürücü 5V çıkışa ayarlıyken alınan sonuçlara yakınlık göstermektedir. Hattın gürültüsü limit değerlerinin üzerindedir. Şekil 4.9’da LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Çıkış 3.3V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)

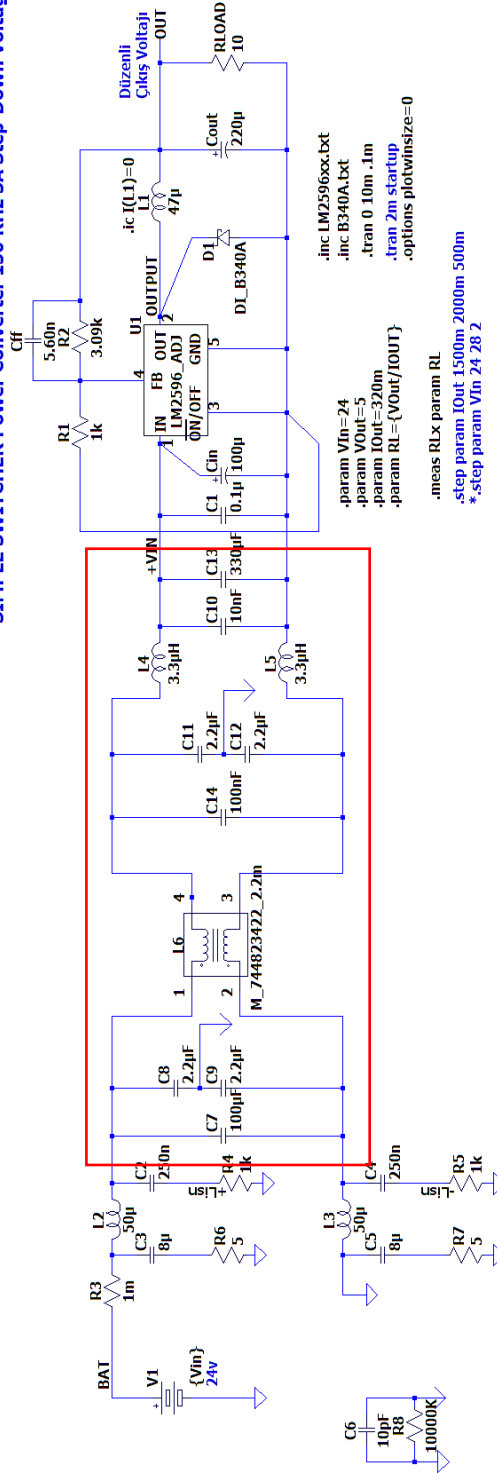


Şekil 4.9 Çıkış 3.3V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtresiz)

Negatif hattın alınan sonuçlar pozitif hattın alınan sonuçlara oldukça yakındır. Sonuçlar aynı zamanda endüstriyel ve askeri alanlarda düşük voltaj uygulamaları için filtrenin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ortak mod ve diferansiyel mod filtreleri hattın toplam gürültüsünü azaltması amacıyla sisteme entegre edilir. Şekil 4.10'da yer alan devre şemasında filtre yapısı da devreye eklenmiştir.

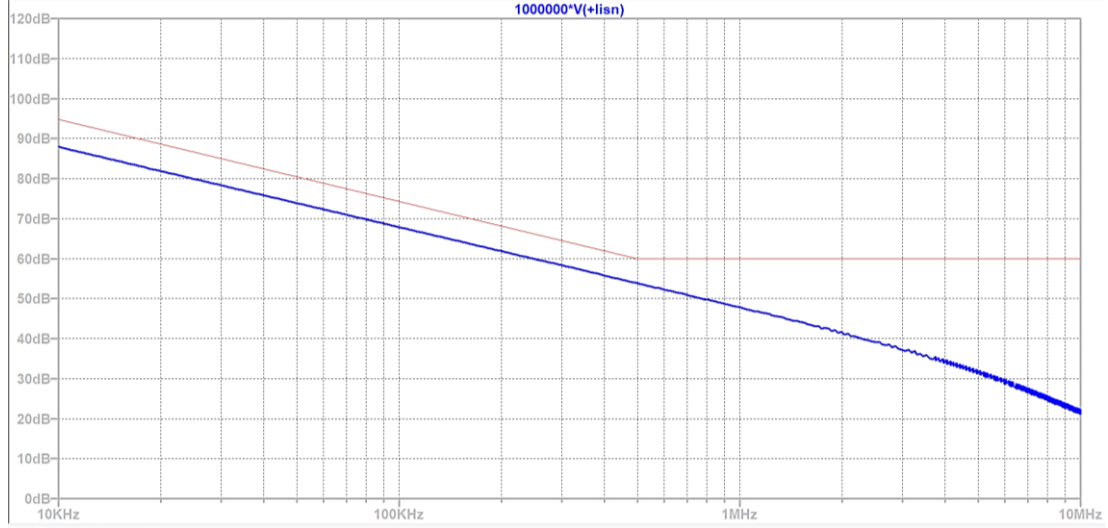
TI LM2596-ADJ Adjustable Output Regulator  
SIMPLE SWITCHER Power Converter 150 KHz 3A Step-Down Voltage Regulator



Şekil 4.10 Şematiğe CM ve DM Filtre Devresinin Eklenmesi

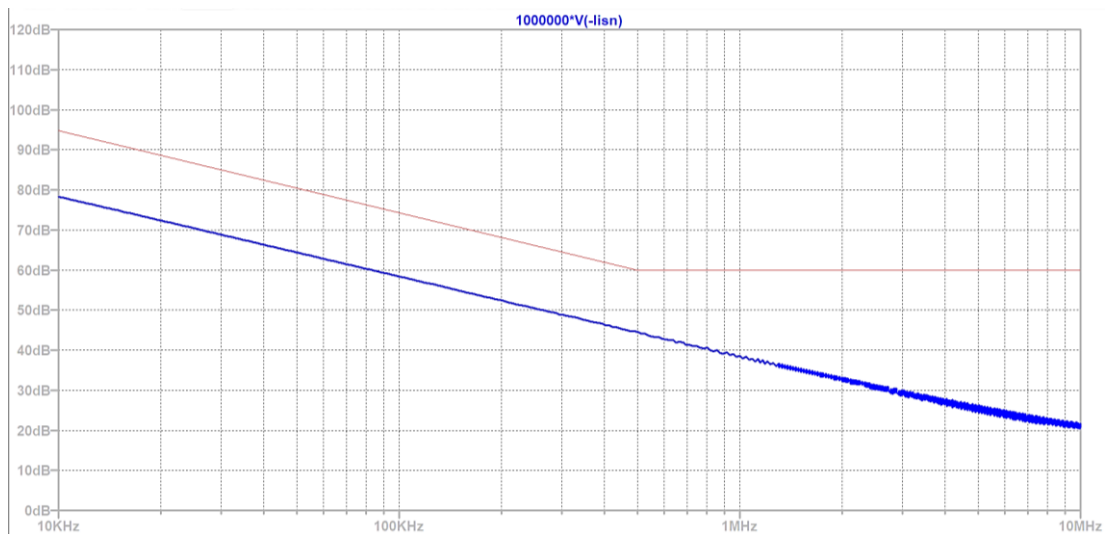
Şekil 4.10'daki filtre yapısına göre L6 CM filtresi için ortak mod tıkama bobinini göstermektedir. C7 ve C14  $C_{X1}$  ve  $C_{X2}$  kapasitörlerini göstermektedir. C8, C9, C11 ve C12  $C_y/2$  kapasitörlerini göstermektedir. L4 ve L6 bobinleri ise DM filtre bobinlerini

göstermektedir. Devre yapısı kurulduktan sonra R2 direnci yardımıyla dönüştürücünün çıkışı 12V olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.11’de LISN devresinin pozitif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



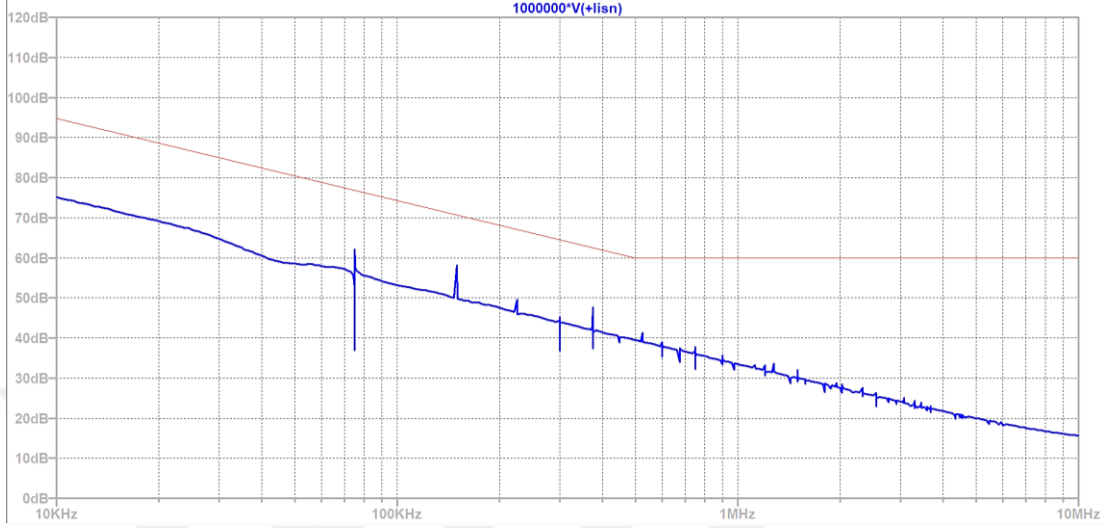
Şekil 4.11 Çıkış 12V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Dönüştürücünün çıkış voltajı 12V'a ayarlıyken alınan filtresiz grafikte gürültü seviyesi limit değerlerinin altında olduğu gözlemlenmişti. Filtre ilavesinden sonra gürültü seviyesinin filtresiz sonuca benzer şekilde limit değerlerinin altında olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.12’de LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



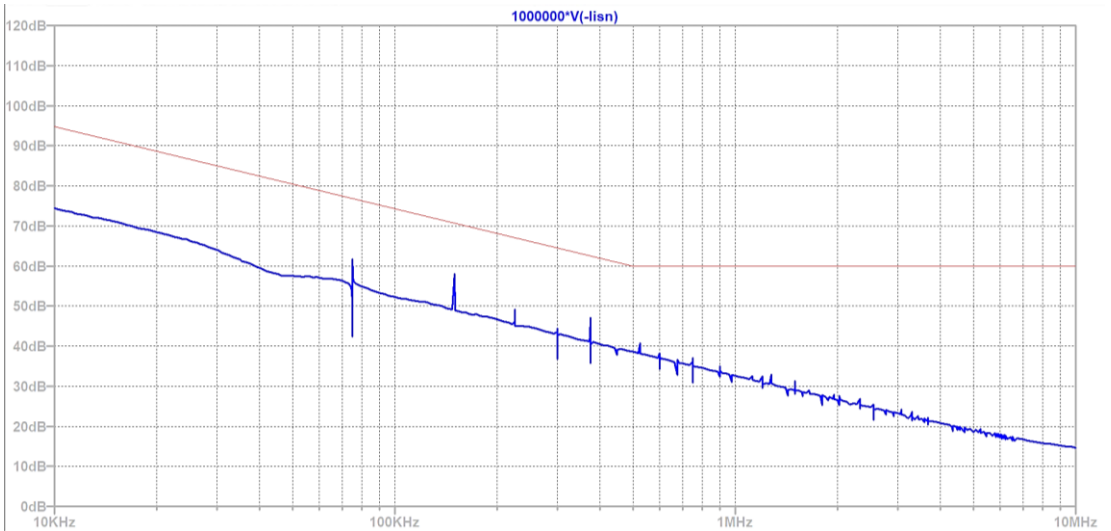
Şekil 4.12 Çıkış 12V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Negatif hattan alınan sonuçlar pozitif hattan alınan sonuçlara oldukça yakındır. R2 direncinin değeri değiştirilerek dönüştürücünün çıkışı 5V olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.13’de LISN devresinin pozitif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



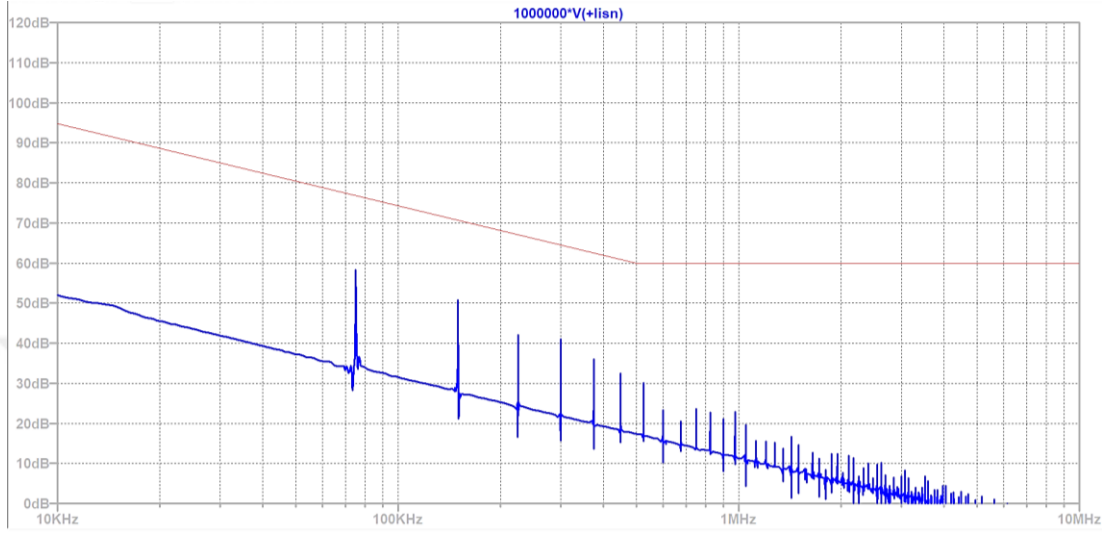
Şekil 4.13 Çıkış 5V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Dönüştürücünün çıkış voltajı 5V'a ayarlıyken alınan filtresiz grafikte gürültü seviyesi limit değerlerinin üzerinde olduğu gözlemlenmişti. Filtrenin etkisiyle gürültünün kabul edilebilir sınırlar içerisine düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'te LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



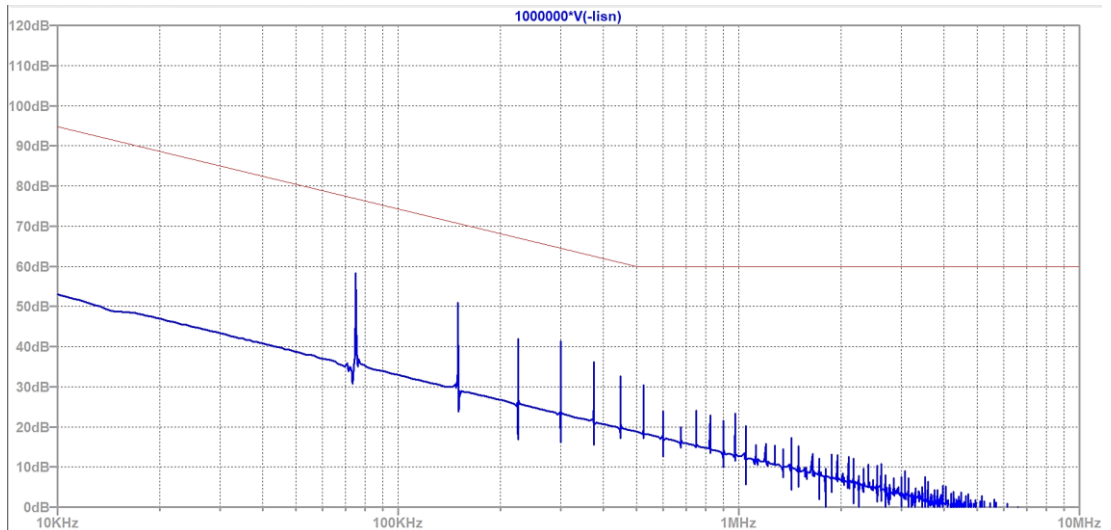
Şekil 4.14 Çıkış 5V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Pozitif hattan alınan sonuçlar gibi negatif hattan alınan sonuçlarda da gürültü seviyesi kabul edilebilir sınırlar içerisinde düşürülmüştür. R2 direncinin değeri değiştirilerek dönüştürücünün çıkışı 3.3V olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.15’de LISN devresinin pozitif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.15 Çıkış 3.3V iken Pozitif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Filtre Uygulanmış 5V çıkış devresinde gözlemlendiği gibi 3.3V çıkış için de hattın gürültüsü kabul edilebilir sınırlar içerisinde düşürülmüştür. Şekil 4.16’da LISN devresinin negatif portundan alınan gürültünün grafiği gösterilmektedir.

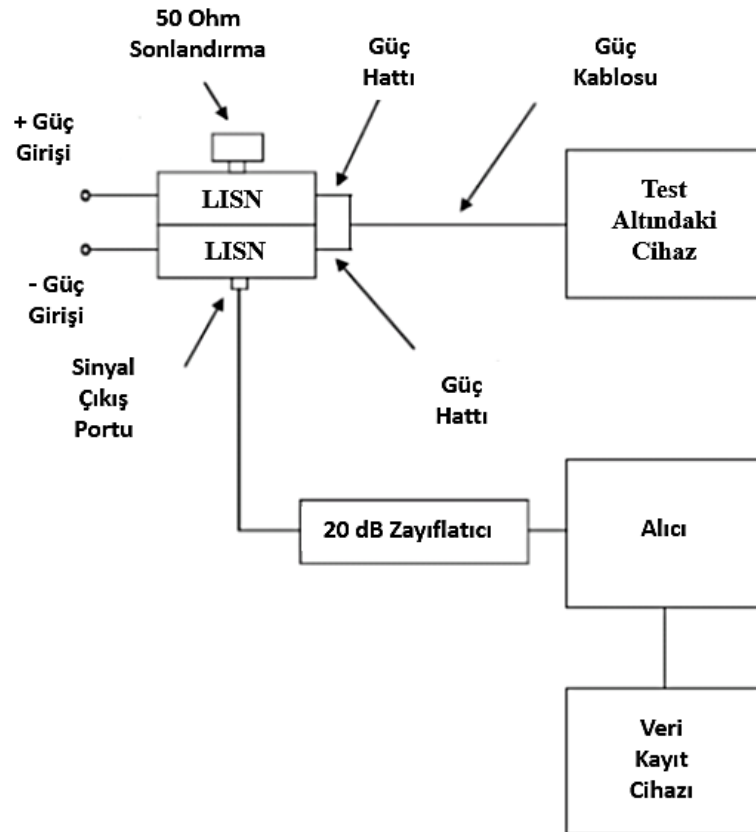


Şekil 4.16 Çıkış 3.3V iken Negatif Hattın Gürültü Simülasyonu (Filtreli)

Negatif hattan alınan sonuçlarda gürültü seviyesi kabul edilebilir sınırlar içerisine düşürülmüştür. Simülasyon sonuçlarında, DC/DC dönüştürücü düşük voltajlarda çalışırken devreye eklenen filtre devresinin hattın toplam gürültüsünü düşürmekte ne kadar etkili olabileceği gözlemlenmiştir.

#### 4.2. Deneysel Sonuçlar

Belirlenen voltaj seviyelerinde iletilen emisyon seviyelerini ölçmek için gereken kurulum Şekil 17’de gösterilmiştir. Kurulumda LISN cihazı, bir ölçüm alıcısı ve veri kayıt cihazı, pozitif hat LISN’den 50  $\Omega$  sonlandırma ve EMI ölçüm portunun girişinde 20 dB’lik bir zayıflatıcı, bir güç kaynağı, LISN ve alıcı bağlantısı için bir koaksiyel kablo ve güç hatları için güç kabloları bulunmaktadır.

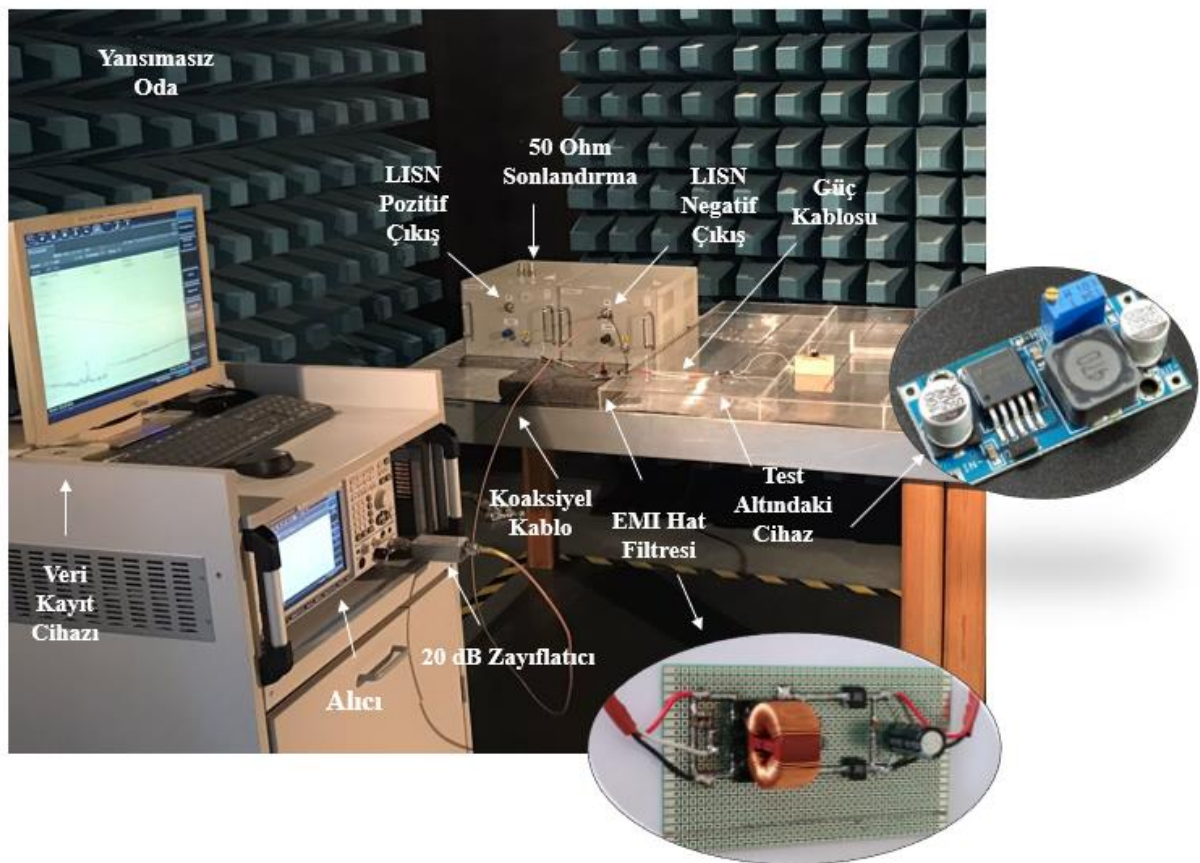


Şekil 4.17 CE102 Ölçüm Sistemi Kurulum Şeması (MILSTD-461G, 2015)



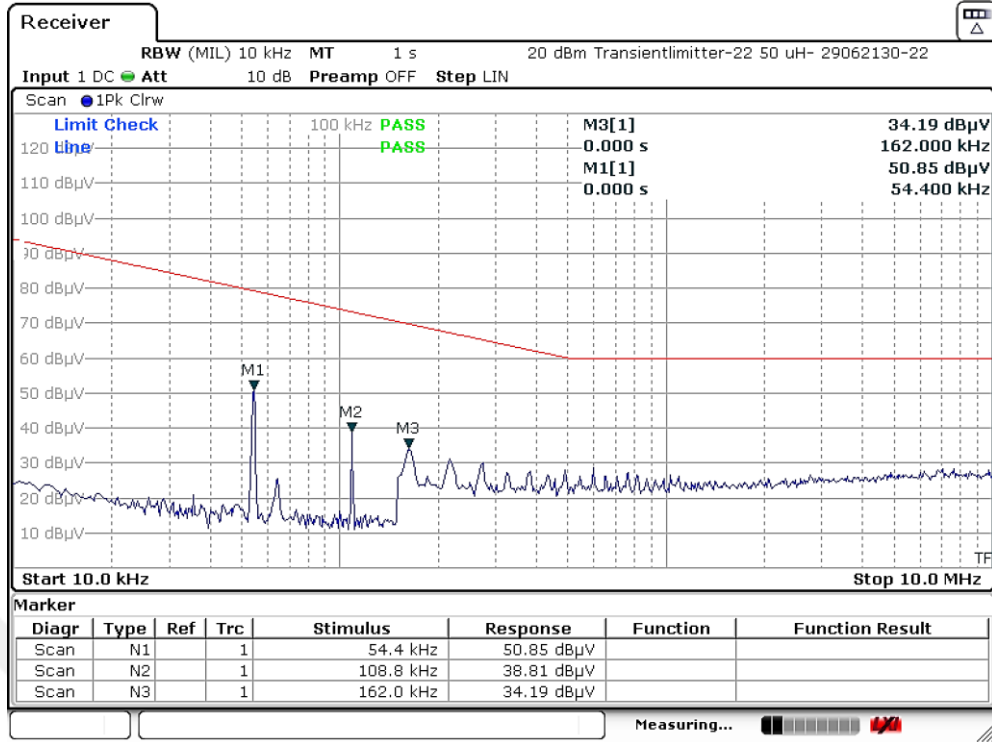
MILSTD-461G standardında bulunan test düzeneği laboratuvar ortamında Şekil 4.18'deki gibi kurulmuştur. DC/DC Dönüştürücü laboratuvar ortamında filtre devreden çıkarılarak LISN cihazına bağlanmıştır. LISN cihazından çıkan veriler 20 dB'lik zayıflatıcıdan geçtikten sonra alıcı tarafından ölçülmektedir. Ölçüm sonuçları bilgisayar ortamında görüntülenebilmekte ve kaydedilmektedir.

Test edilen cihazı yük altında çalıştırabilmek için DC/DC dönüştürücünün çıkışına bir yük direnci bağlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün çıkışı 12V voltaj seviyesine ayarlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün girişine LISN cihazının pozitif ve negatif besleme portları bağlanmıştır. Bu şartlar altında pozitif hattan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.19'da gösterilmektedir.

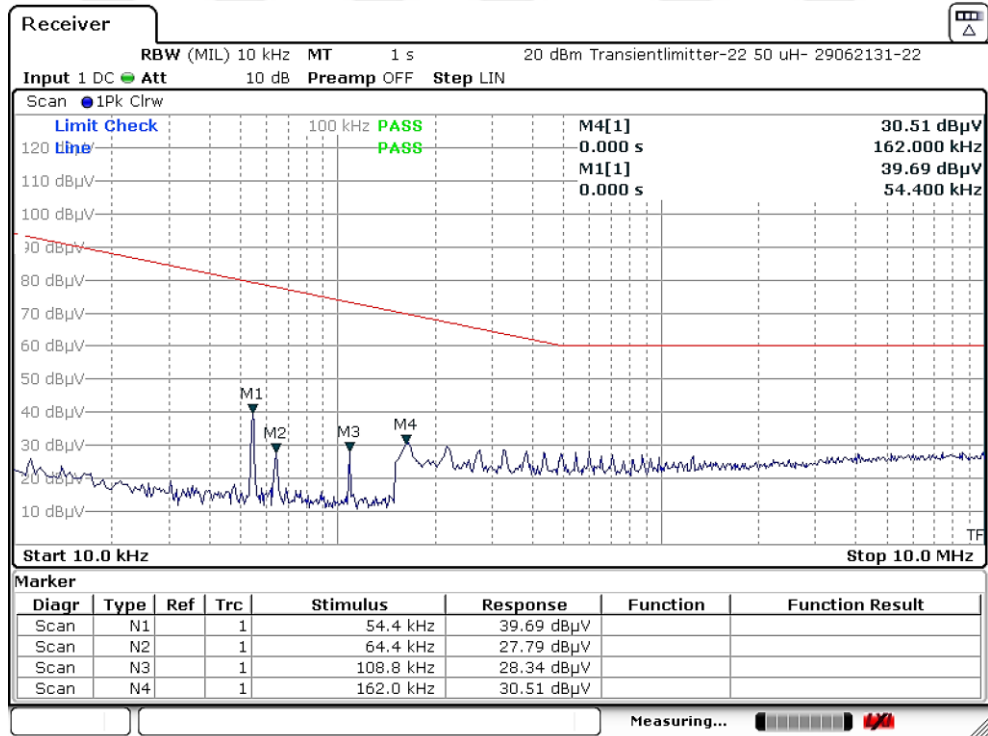


Şekil 4.18 CE102 Laboratuvar Ölçüm Sistemi

Şekil 4.19'de yer alan sonuçlar EMI'nin DM ve CM filtreleri devreye eklenmeden de kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir. Şekil 4.20'de negatif hattan alınan ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Çıkış 12V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

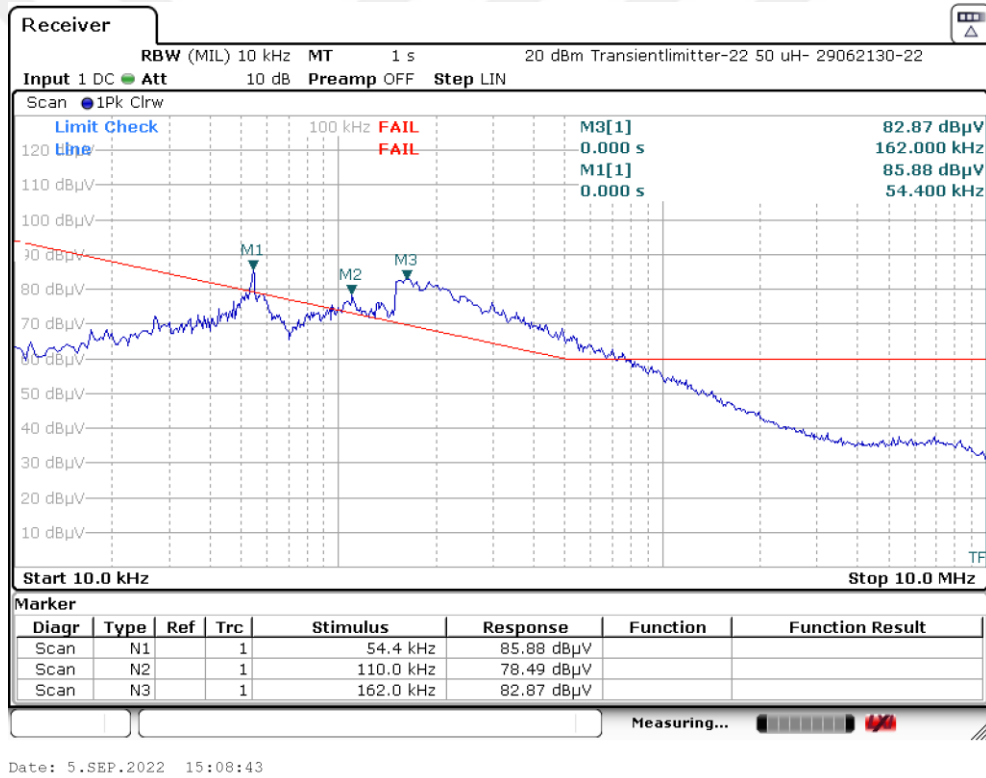


Şekil 4.20 Çıkış 12V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

Negatif hattan alınan ölçümlerde ölçülen EMI seviyesindeki maksimum tepe (peak) değerleri, pozitif hattan alınan ölçümlerle kıyaslanınca daha aşağıda kalmaktadır.

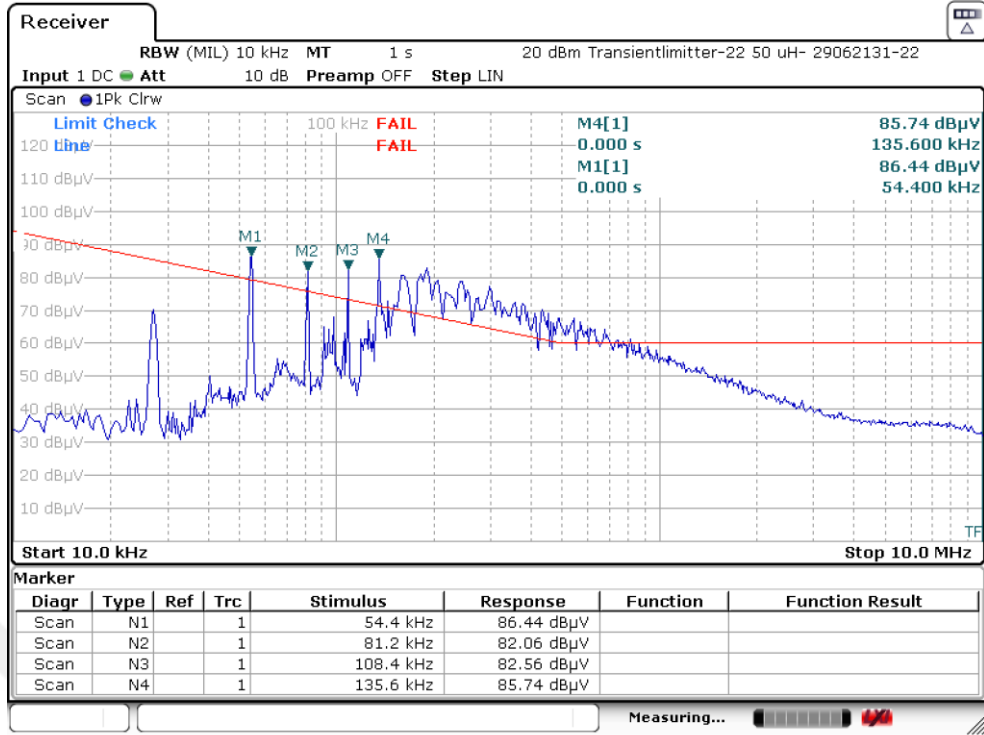
DC/DC Dönüştürücünün çıkış voltajı 5V olarak ayarlanıp yeniden test ortamında test edilmiştir. LISN cihazının pozitif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.21’de gösterilmektedir.

Dönüştürücünün doluluk oranı değiştikçe EMI seviyesinin de değiştiği görülmüştür. Anahtarlama frekansı azaldıkça EMI seviyesi kabul edilebilir sınırların üzerine çıkmıştır. Tepe noktası oluşan frekans değerlerinin harmonikler şeklinde oluştuğu görülmüştür. LISN cihazının negatif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Çıkış 5V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

12V çıkışta olduğu gibi, negatif hattan alınan ölçümlerde ölçülen EMI seviyesindeki maksimum tepe değerleri, pozitif hattan alınan ölçümlerle kıyaslanınca daha aşağıda kalmaktadır. 12V ölçümlerin tepe noktası oluşturduğu frekans değerleri 5V ölçümleriyle aynı frekans aralığındadır.

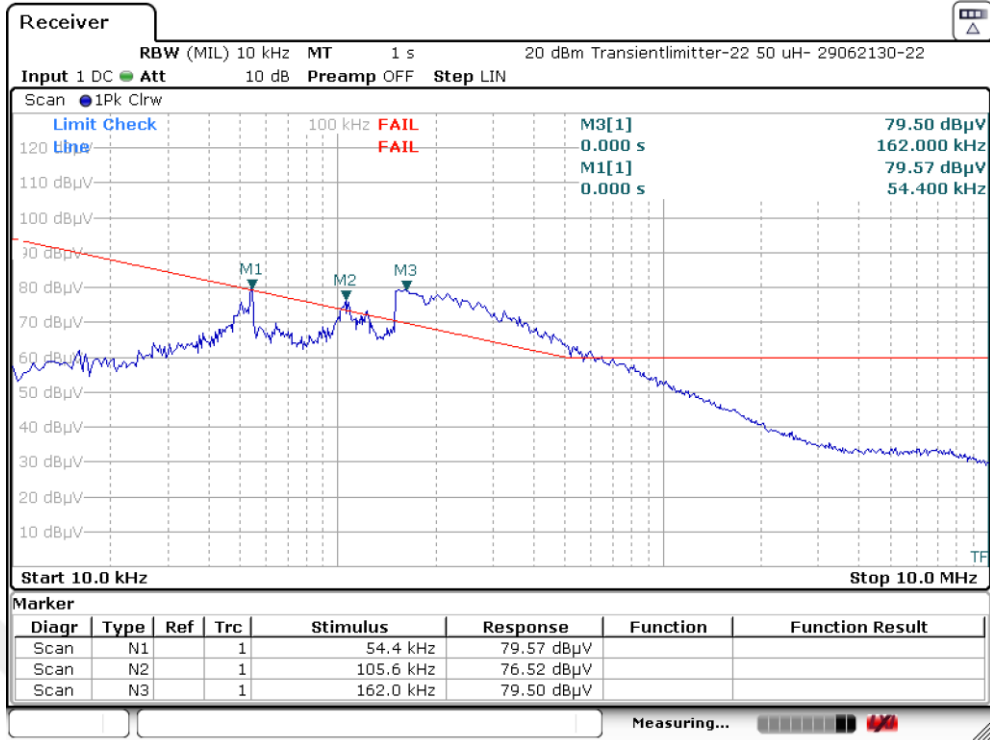


Şekil 4.22 Çıkış 5V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

DC/DC Dönüştürücünün çıkış voltajı 3.3V olarak ayarlanıp yeniden test ortamında test edilmiştir. LISN cihazının pozitif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.23'te gösterilmektedir.

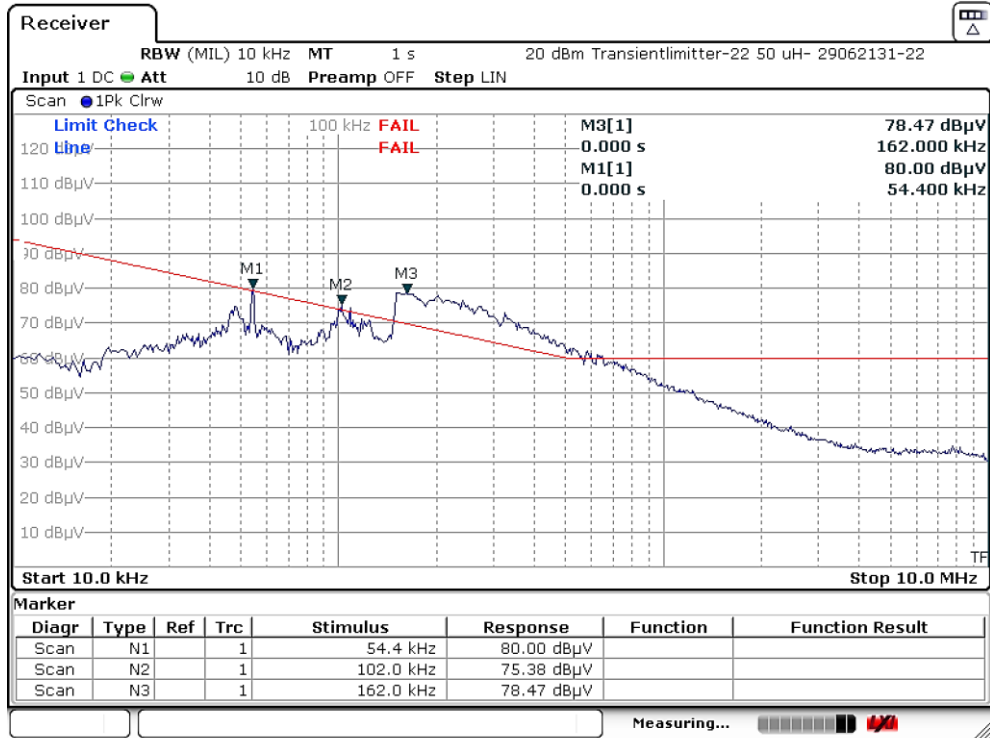
Dönüştürücünün doluluk oranı değiştikçe EMI seviyesinin de değiştiği görülmüştür. EMI seviyesi kabul edilebilir sınırların üzerine çıkmıştır. Dönüştürücü 3.3V çıkışa sahipken alınan sonuçlar dönüştürücü 3.3V çıkışa sahipken alınan sonuçlardan daha az gürültüye sahiptir.

LISN cihazının negatif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



Date: 5.SEP.2022 15:15:18

Şekil 4.23 Çıkış 3.3V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

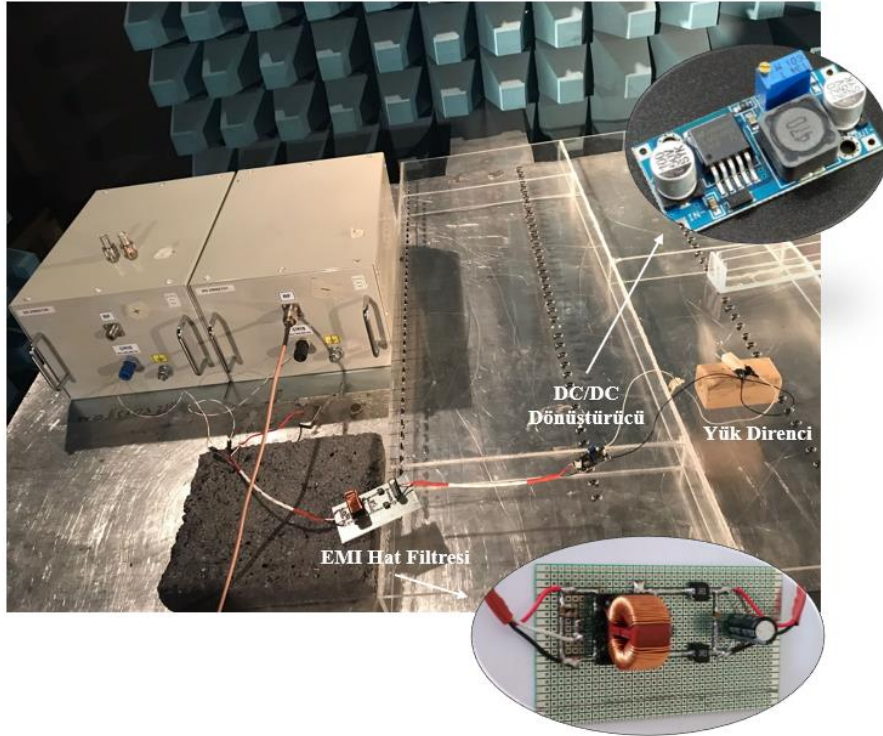


Şekil 4.24 Çıkış 3.3V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtresiz)

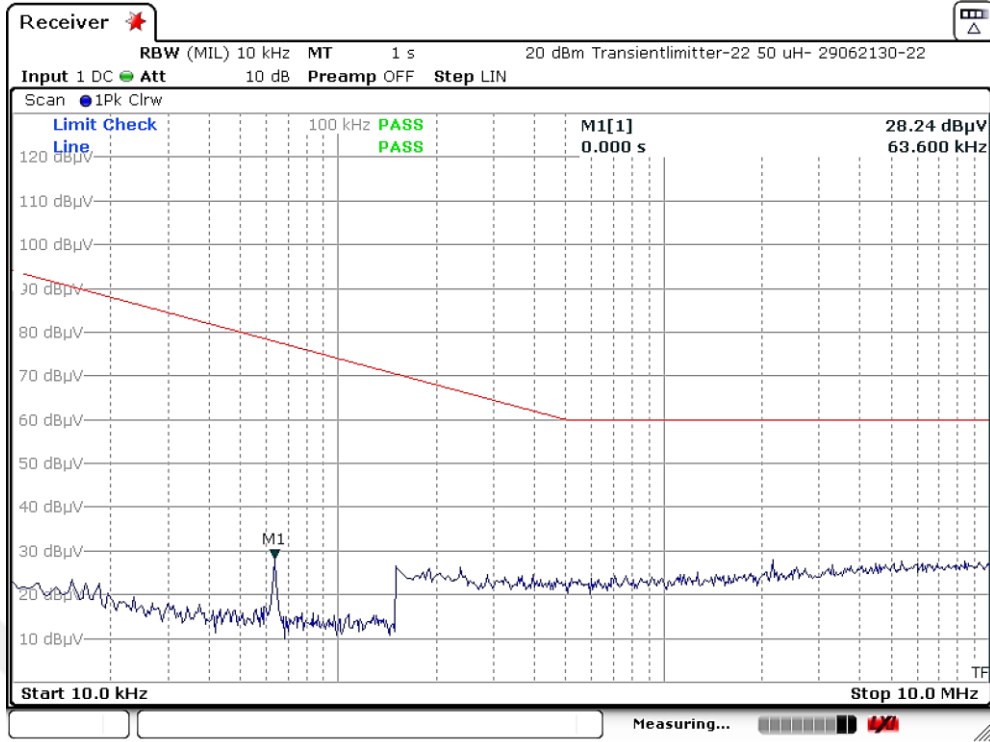
3.3V çıkışta alınan ölçümlerde ölçülen EMI seviyesindeki maksimum tepe noktası değerleri, pozitif hattan alınan ölçümlerle kıyaslanınca daha aşağıda kalmaktadır. Ama oldukça yakın sonuçlar içermektedir.

Tasarlanan EMI hat filtresi test ortamına getirilerek Şekil 4.25'teki gibi devreye bağlanmıştır. EMI hat filtresi Test edilen cihazı yük altında çalıştırabilmek için DC/DC dönüştürücünün çıkışına bir yük direnci bağlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün çıkışı yeniden 12V voltaj seviyesine ayarlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün girişine LISN cihazının pozitif ve negatif besleme portları bağlanmıştır. Bu şartlar altında pozitif hattan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.26'da gösterilmektedir.

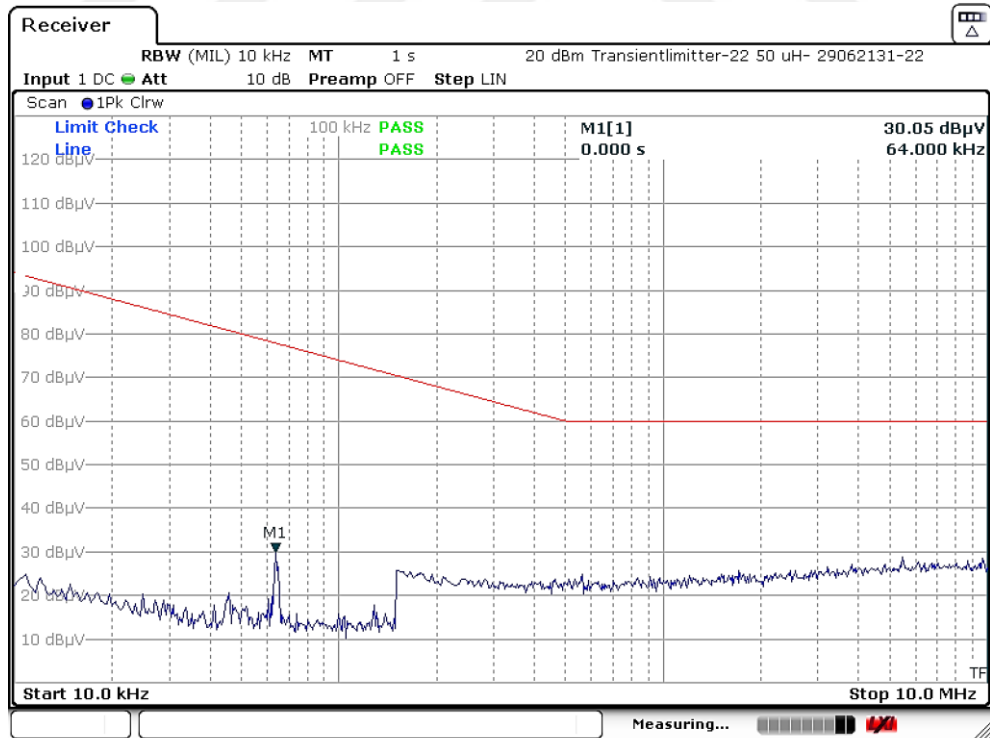
Şekil 4.26'da yer alan sonuçlar, DM ve CM filtreleri eklendikten sonra da alınan sonuçların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir. Filtresiz sonuçlarla kıyaslanınca tepe değerlerinin oldukça azaldığı görülmüştür. Şekil 4.27'de negatif hattan alınan ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.25 CE102 EMI Hat Filtresi Ölçüm Sistemi



Şekil 4.26 Çıkış 12V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)

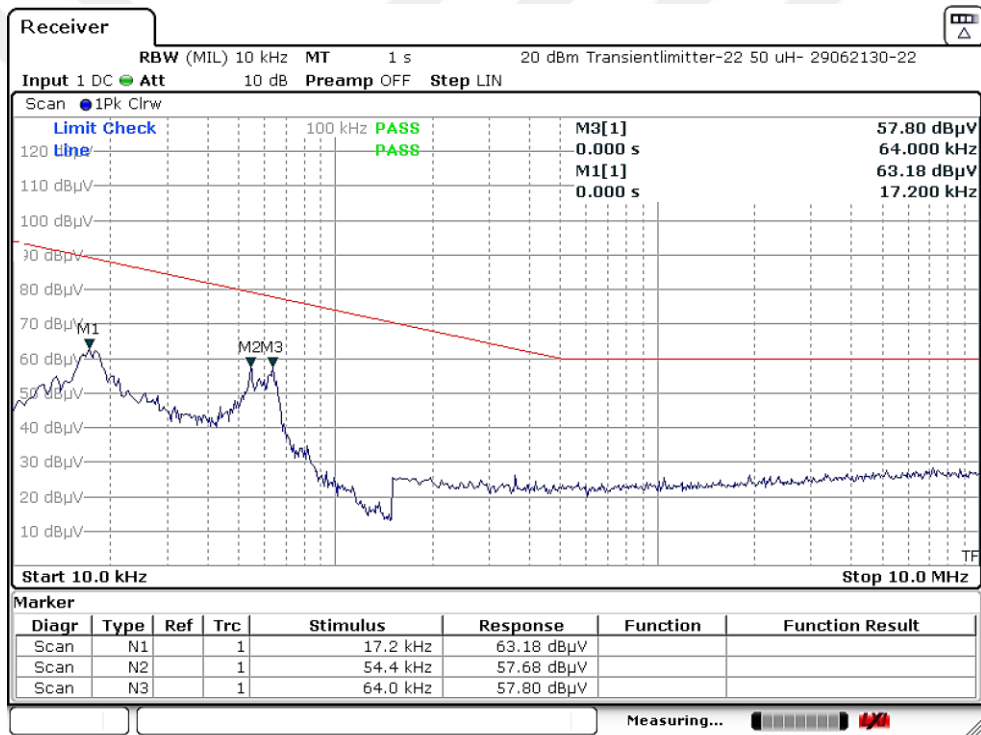


Şekil 4.27 Çıkış 12V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)

Negatif hattan alınan ölçümlerde ölçülen EMI seviyesindeki maksimum tepe değerleri, pozitif hattan alınan ölçümlerle neredeyse aynıdır. Filtresiz ölçümle kıyaslanınca harmonik tepe değerlerinin sönümlendiği görülmektedir.

DC/DC Dönüştürücünün girişine CM ve DM filtreleri eklendikten sonra çıkış voltajı 5V olarak ayarlanıp yeniden test ortamında test edilmiştir. LISN cihazının pozitif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.28’de gösterilmektedir.

Sisteme eklenen filtreye birlikte alınan ölçüm sonuçları kabul edilebilir seviyeye gerilemiştir. Filtreli ve filtersiz sonuçlar kıyaslandığında 22.7 dB $\mu$ V miktarında bastırma olduğu gözlenmektedir. LISN cihazının negatif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.29’da gösterilmektedir.

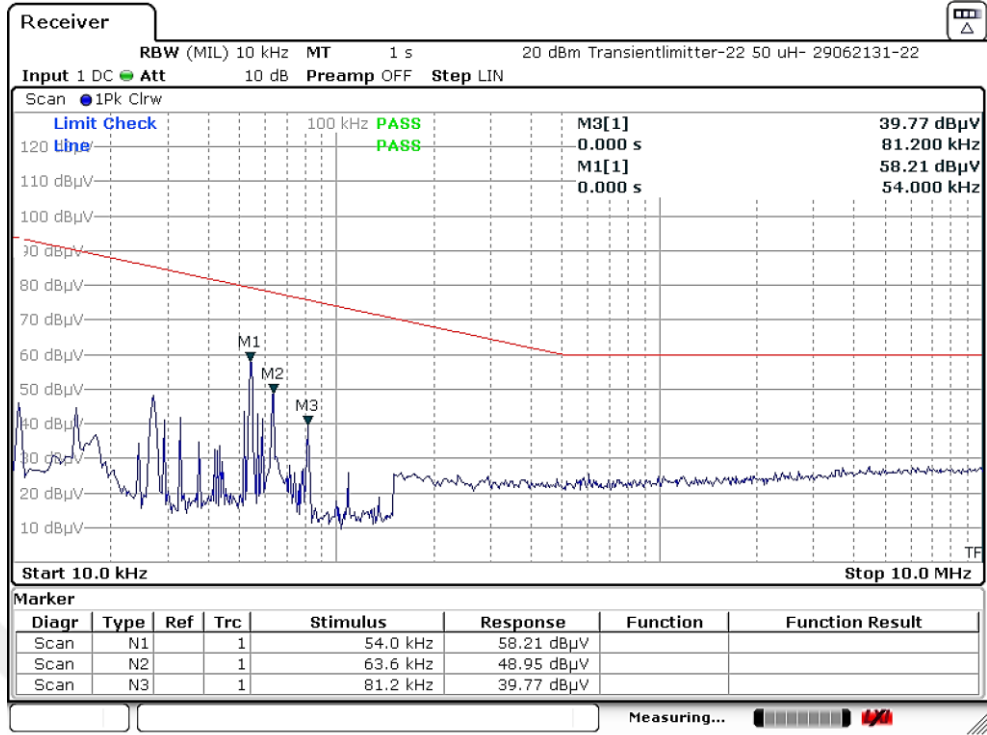


Şekil 4.28 Çıkış 5V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)

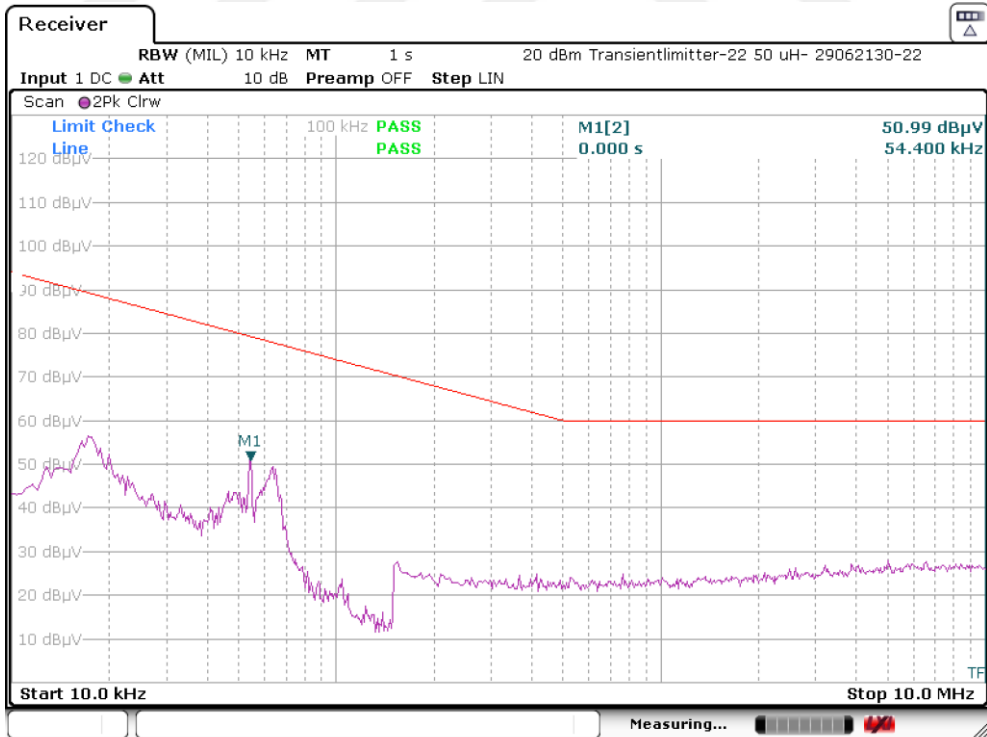
Şekil 4.29’da görüldüğü gibi negatif hattan alınan ölçümlerin de filtersiz sonuçlarla kıyaslanınca kabul edilebilir sınırlar içerisine gerilemiştir. Filtreli ve filtersiz sonuçlar kıyaslandığında 28.23 dB $\mu$ V miktarında bastırma olduğu gözlenmektedir. Ancak tepe noktası oluşan frekans sayısı artmıştır.

CM ve DM EMI filtresi sisteme entegre edildikten sonra DC/DC dönüştürücünün çıkış voltajı 3.3V olarak ayarlanıp yeniden test ortamında test edilmiştir. LISN cihazının pozitif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.30’da gösterilmektedir.





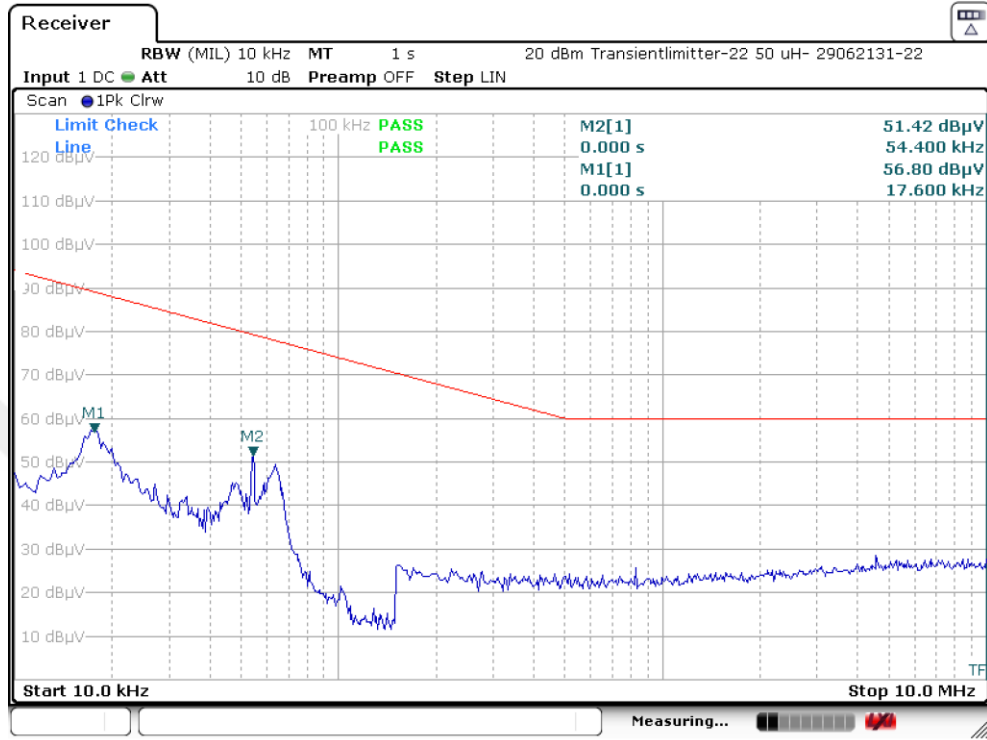
Şekil 4.29 Çıkış 5V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)



Şekil 4.30 Çıkış 3.3V iken Pozitif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)

5V çıkışta gözlemlendiği gibi, 3.3V çıkış için alınan ölçümler, sisteme eklenen filtreye birlikte alınan ölçüm sonuçları kabul edilebilir seviyeye gerilediğini

göstermektedir. Filtreli ve filtresiz sonuçlar kıyaslandığında 28.58 dB $\mu$ V miktarında bastırma olduğu gözlenmektedir. LISN cihazının negatif portundan alınan ölçüm sonuçları Şekil 4.31’de gösterilmektedir.



Şekil 4.31 Çıkış 3.3V iken Negatif Hattın Gürültü Ölçümleri (Filtreli)

Pozitif hatta gözlemlendiği gibi negatif porttan alınan ölçüm sonuçları da EMI seviyesinin kabul edilebilir sınırlar içerisine gerilediğini göstermektedir. Filtreli ve filtresiz sonuçlar kıyaslandığında 28.58 dB $\mu$ V miktarında bastırma olduğu gözlenmektedir. Bastırma miktarı pozitif hattan elde edilen sonuçla aynıdır.

### 4.3. Ölçüm Sonuçları ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

LTspice simülasyon programından alınan sonuçların, laboratuvar ortamında alınan ölçümlerle karşılaştırmasını içeren tablo Çizelge 4.1’de yer almaktadır. Alınan ölçümler grafiklerin maksimum tepe noktası değerleri baz alınarak tabloda yer almaktadır. Maksimum tepe noktası görülen frekans değerleri de tabloda yer almaktadır.

Çizelge 4.1 Farklı Voltaj Seviyelerinde Alınan Gürültü Ölçümlerinin Karşılaştırılması

SONUÇLAR	ÖLÇÜM	SİMÜLASYON SONUÇLARI		LABORATUVAR SONUÇLARI	
		Tepe noktası Oluşan Frekans Değeri (kHz)	Gürültü Seviyesi (dB $\mu$ V)	Tepe noktası Oluşan Frekans Değeri (kHz)	Gürültü Seviyesi (dB $\mu$ V)
<b>FİLTRESİZ SONUÇLAR</b>	12v (+ LISN)	76.763	74.762	54.40	50.85
	12v (- LISN)	76.38	76.59	54.40	39.69
	5v (+ LISN)	149.743	77.18	54.40	85.88
	5v (- LISN)	149.146	76.196	54.40	86.44
	3.3V (+ LISN)	298.016	68.044	54.40	79.57
	3.3v (- LISN)	299.018	68.054	54.40	80.00
<b>FİLTRELİ SONUÇLAR</b>	12v (+ LISN)	10	86.68	63.60	28.24
	12v (- LISN)	10	78.82	64.00	30.05
	5v (+ LISN)	73.14	62.65	17.2	63.18
	5v (- LISN)	73.04	61.29	58.21	58.30
	3.3V (+ LISN)	72.89	57.368	54.40	50.99
	3.3v (- LISN)	73.76	58.154	54.40	51.42

Ölçüm ve simülasyon sonuçlarına göre dönüştürücünün çıkışı 12V olarak ayarlandığında pozitif hattın gürültüsü ve negatif hattın gürültüsü sınır değerlerinin altında kalmaktadır. Filtrenin sisteme uygulanmasının ardından alınan sonuçlarda da pozitif hattın ve negatif hattın gürültü seviyeleri limit değerlerinin altında kalmaktadır.

DC/DC dönüştürücünün çıkış voltajı 5V seviyesine getirilerek tekrarlanan test sonuçlarına göre pozitif hattın ve negatif hattın gürültü seviyeleri limit değerlerinin üzerine çıkmıştır. LTspice programından alınan simülasyon sonuçlarında da gürültü seviyelerinin sınır değerlerinin üzerine çıktığı görülmüştür. Filtre devresi sisteme bağlanmadan önce alınan laboratuvar ölçümlerinde gürültü seviyesi daha düşük frekans aralığında tepe değerine ulaşmıştır. Simülasyon sonuçlarında ise daha yüksek frekanslarda tepe noktaları görülmüştür. DC/DC dönüştürücünün çıkış voltajı 3.3V seviyesine getirilerek tekrarlanan test sonuçları ise 5V çıkış seviyesinde alınan sonuçlar gibi gürültü seviyelerinde limit değerlerini aşmalar görülmüştür. Her iki voltaj seviyesinde de filtre devresinin sisteme bağlanmasıyla gürültü seviyelerinde azalmalar olduğu görülmektedir.

Simülasyon sonuçları her ne kadar laboratuvar sonuçlarına benzese de grafiklerde bazı farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıkların sebebi gerçek ortamdan iletim hatlarında meydana gelen bozulmaların tam anlamıyla tahmin edilememesi ve yüzde yüz doğrulukla simülasyon ortamına aktarılamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak yaklaşık olarak benzer sonuçlar alınması devre tasarımı yapılırken simülasyon programının varlığı gürültü seviyesinin azalmasında önemli bir rol oynamıştır. Bu tahminlerin sürekli tekrarlamaya gerek kalmayan bir yöntemle kolayca yapılmış olması tasarımcılara zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayabilmektedir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, DC/DC anahtarlama güç kaynakları için ortak mod ve diferansiyel mod EMI filtrelerinin tasarımının nasıl kolayca optimize edilebileceği gösterilmektedir. EMI filtreleri ile ilgili detaylı kaynak araştırması yapılmıştır. Öncelikle EMI sorunlarını gidermek amacıyla tezde kullanılan DC/DC dönüştürücünün güç gereksinimleri incelenmiştir. DC/DC dönüştürücüde kullanılacak malzemelerin seçiminde etkili olan parametreler incelenmiştir. Malzemelerin hangi kriterlere göre seçileceğinden bahsedilmiştir.

Daha sonra temel EMI filtre topolojilerinden bahsedilmiştir ve MIL-STD-461G standardının CE102 prosedürüne uygun EMI hat filtresi tasarımı yapılmıştır. Tasarım LTspice programında simüle edilmiştir. En iyi sonuçları almak için simülasyon programındaki malzemeler ve parametreler kolayca değiştirilerek tasarım optimize edilmiştir. DC/DC dönüştürücünün 12V, 5V ve 3.3V çıkış voltajı seviyelerinde besleme hattının pozitif ve negatif terminallerinden filtre içeren ve filtresiz ölçümler alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre çıkış voltajı düşürüldüğünde EMI filtrenin gürültü bastırmada ne kadar önemli bir rol oynadığı görülmüştür.

Filtre devresi prototip haline getirilerek laboratuvar ortamında test edilmiştir. Filtre devresi entegre edilmeden önce DC/DC dönüştürücünün çıkışı 12V, 5V ve 3.3V olmak üzere üç ayrı voltaj seviyesine ayarlanarak devrenin pozitif ve negatif terminallerinden hattın toplam gürültüsü ölçülmüştür. Filtre devresi hatta dahil edilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Laboratuvar sonuçlarına göre kullanılan DC/DC dönüştürücü için filtre devresi kullanımının özellikle 5V ve 3.3V çıkış voltajlarında oldukça gerekli olduğu görülmüştür.

Sistemin laboratuvar ortamında alınan sonuçlarıyla simülasyon sonuçları arasında görülen farklılıkların gerçek ortamın simülasyon ortamına aktarılırken tüm bozucu etkilerin doğru bir şekilde tahmin edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarla DC/DC dönüştürücülerin EMI performansını iyileştirebileceğini göstermektedir. Böylece gerçek sistemler için sonuç

üretmek bu sistemlerin verimliliğini ve performansını artırarak meydana gelen sorunlara çözüm üretebilir. Simülasyon ortamında ön tahminde bulunmak amacıyla, alınan grafikler sayesinde gerçek bir laboratuvar ortamında alınan sonuçların kolay bir şekilde tahmin edilebilmesini sağlamıştır. Bu sayede, gerçek bir sisteme de uygulanabilir olduğu görülmüştür. Bu yöntem simülasyon programı kullanmadan yapılan, gerçek hayattaki deneme yanılma yöntemlerini geride bırakabilir. Ancak unutulmamalıdır ki, her yöntem her alanda ve her problemde iyi sonuç vermeyebilir.

## 5.2. Öneriler

Simülasyon yöntemlerinin kullanım alanı oldukça yaygındır. Özellikle mühendislik alanında fazla modifikasyona gerek duymadan problemlerin optimizasyonunda kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, tekrarlayıcı ve süreç alan deneme yanılma yöntemlerinin yerine kullanılmıştır. Kullanılan filtre yapısına ekstra filtreleme elemanları eklenerek daha fazla zayıflama elde edilebilir. Bu sayede farklı askeri standartlar veya sivil standartlar için gereken limitler karşılanabilir.

Kullanılan filtre farklı güç ihtiyaçlarına göre optimize edilerek farklı dönüştürücü tipleriyle de denenebilir. Örneğin, cep telefonları gibi bataryadan beslenen veya pille çalışan yapılarda farklı voltaj dönüşümleri kullanılabilir. Farklı dönüştürücü tiplerine EMI filtre uygulaması yapılarak cihazların EMI performansında kolayca iyileştirme elde edilebilir. Ancak tekrar vurgulamak gerekirse bir yöntem her alanda veya her problemde en iyi sonuç bulmak zorunda değildir.

## KAYNAKLAR

- Abinaya, A. B., (2017). Design of Low Cost Line Impedance Stabilization Network Using Rlc Components for ITE. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 4(3), 1179-1185.
- Aksoy, H. Ç., 2014, Elektromanyetik Girişim Filtre Tasarımı, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Asmanis, G., Ribickis, L., Stepins, D., & Asmanis, A. (2015, October). Differential mode II-type EMI filter modeling using CST MWS. *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) IEEE*.
- Chen, R. (2004). Integrated EMI filters for switch mode power supplies. *Virginia Polytechnic Institute and State University*..
- Di Capua, G., Femia, N., & Stoyka, K., (2019, July), Design of differential-mode input filters for DC-DC switching regulators, *16th Int. Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 15-18 July 2019, Lausanne, Switzerland, 165-168.
- Esfetanaj, N. N., Saad, Y., Sakaria, O. A., Wang, H., & Davari, P., (2020), Differential mode EMI filter analysis for interleaved boost PFC converters considering optimal phase shifting, *22<sup>nd</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, Lyon, France, 2020
- Giglia, G. (2017). Power density optimization of EMI filters for power electronic converters, Dottorato di ricerca in Energia e Tecnologie dell'Informazione, Università degli Studi di Palermo.
- Giglia, G., Ala, G., Di Piazza, M. C., Giaconia, G. C., Luna, M., Vitale, G., & Zanchetta, P. (2018). Automatic EMI filter design for power electronic converters oriented to high power density. January 2018, *Electronics*, 7(1)
- Hegarty, T. (2018). The engineer's guide to EMI in DC/DC converters (part 4): radiated emissions. *How2Power Today*, April.

- Iftikhar, M. U., Sadarnac, D., & Karimi, C. (2007). Input filter damping design for control loop stability of DC-DC converters. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 353-358.
- Kumar, N. N., Patil, S. R., Srikanth, S., & Ravichandran, S. (2021). Feedback Controller Design For A DC-DC Buck Converter. *2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, IEEE.
- Kotny J. L., Duquesne T., Idir N. (2010). Design of EMI filters for DC-DC converter. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6.
- Kotny, J. L., Duquesne, T., & Idir, N. (2014). Modeling and design of the EMI filter for DC-DC SiC-converter. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 1195-1200. IEEE.
- Kotny, J. L., Duquesne, T., & Idir, N. (2016). Filter design method for GaN-Buck converter taking into account of the common-mode propagation paths. *IEEE 20<sup>th</sup> Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)*, 1-4.
- Li, K. R., & See, K. Y. (2015). Evaluation of conducted EMI measurement without LISN using two-port ABCD network approach for EMI filter design under real operating condition. *2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) (632-635)*. IEEE.
- Liu, S., Zhang, Y., & Yu, D. (2009). Research and design of EMI digital filters using scattering parameters. *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, 1-5.
- Maillet, Y. (2008). High-density discrete passive EMI filter design for Dc-Fed motor drives (Doctoral dissertation, Virginia Tech), PhD Thesis.2008.
- Majid, A., Saleem, J., & Bertilsson, K. (2012). EMI filter design for high frequency power converters. *11<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 586-589.
- Makda, I. A., & Nymand, M. (2013). Differential mode EMI filter design for ultra-high efficiency partial parallel isolated full-bridge boost converter. *IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 99-103.



- Makda, I. A., & Nymand, M. (2014). Differential mode EMI filter design for isolated DC-DC boost converter. *16<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications*, 1-8.
- Miloudi, M., Bendaoud, A., Miloudi, H., Nemmich, S., & Slimani, H. (2012,). Analysis and reduction of common-mode and differential-mode EMI noise in a Flyback switch-mode power supply (SMPS). *2012 20th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 1080-1083. IEEE.
- Mrad, R. (2014). Conducted EMC modeling and EMI filter design integrated class-D amplifiers and power converters, Doctoral dissertation, Université de Lyon.
- Mukharjee, I., & Gadoura, I. A. (2012). Simple, low EMI-noise input-filter design for DC/DC power regulators. *7<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 948-953.
- MIL-STD-461G 11 December 2015
- Narayanasamy, B. (2016). Impedance mismatching based design of passive and active EMI filters for power converters, Doctoral dissertation, The Ohio State University.
- Narayanasamy, B., & Luo, F. (2019). A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61(6), 2040-2049.
- Qiu, Z., Lu, H., Cui, Y., & Mei, Y. (2012). Design of a new type of the damped filter for system stability of DC-DC converter. *International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE'12)*, 22-26 Oct. 2012, Xian, China, 1082-1085.
- Sun, J., Chen, W., & Yang, X. (2016). EMI prediction and filter design for MHz GaN based LLC half-bridge converter. *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 297-304.
- Tyagi, A., Jayapal, R., Venkatesh, S. K., & Singh, A. (2017). Design and Implementation of a practical EMI filter for high frequency-high power DC-DC converter according to MIL-STD-461E, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 04 Issue: 03, 2585-2591.
- Wang, X. (2018). The EMI filter design for GaN HEMT based two-level voltage source inverter, Doctoral dissertation, The Ohio State University.

- Yang, Y., Chang, X., Chen, W., & Yang, X. (2014). Design of a differential mode active EMI filter based on conducted emission analysis used in DC/DC converter. *XXXI<sup>th</sup> URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 1-4.
- Zhai, L., Hu, G., Lv, M., Zhang, T., & Hou, R. (2020). Comparison of two design methods of EMI filter for high voltage power supply in DC-DC converter of electric vehicle. *IEEE Access*, 8, 66564-66577.
- Zaidi, B., Videt, A., & Idir, N. (2019). Optimization method of CM inductor volume taking into account the magnetic core saturation issues. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(5), 4279-4291.



## EKLER

### EK-1 LM2596 Teknik Özellikleri

#### 7 Specifications

##### 7.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>

		MIN	MAX	UNIT
Maximum supply voltage ( $V_{IN}$ )			45	V
SD/SS pin input voltage <sup>(3)</sup>			6	V
Delay pin voltage <sup>(3)</sup>			1.5	V
Flag pin voltage		-0.3	45	V
Feedback pin voltage		-0.3	25	V
Output voltage to ground, steady-state			-1	V
Power dissipation		Internally limited		
Lead temperature	KTW package	Vapor phase (80 s)	215	°C
		Infrared (10 s)	245	
	NDZ package, soldering (10 s)	280		
Maximum junction temperature			150	°C
Storage temperature, $T_{stg}$		-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) Voltage internally clamped. If clamp voltage is exceeded, limit current to a maximum of 1 mA.

##### 7.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
$V_{ESD}$	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup>	±2000	V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

##### 7.3 Operating Conditions

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage		4.5	40	V
Temperature		-40	125	°C

##### 7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC <sup>(1)</sup>		LM2596		UNIT
		KTW (TO-263)	NDZ (TO-220)	
		5 PINS	5 PINS	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>	See <sup>(4)</sup>	50	°C/W
		See <sup>(5)</sup>	—	
		See <sup>(6)</sup>	—	
		See <sup>(7)</sup>	—	
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	2	2	°C/W

A feedforward capacitor, shown across R2 in [Table 9-6](#), is used when the output voltage is greater than 10 V or when  $C_{OUT}$  has a very low ESR. This capacitor adds lead compensation to the feedback loop and increases the phase margin for better loop stability. For  $C_{FF}$  selection, see the [Section 9.2.2.2](#) section.

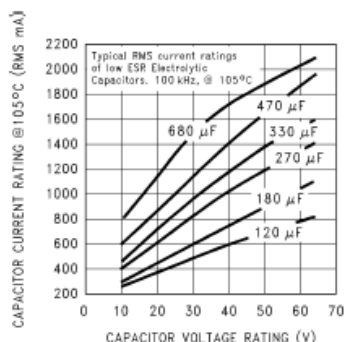


Figure 9-1. RMS Current Ratings for Low ESR Electrolytic Capacitors (Typical)

### 9.1.3 Output Capacitor ( $C_{OUT}$ )

An output capacitor is required to filter the output and provide regulator loop stability. Low impedance or low-ESR electrolytic or solid tantalum capacitors designed for switching regulator applications must be used. When selecting an output capacitor, the important capacitor parameters are the 100-kHz ESR, the RMS ripple current rating, voltage rating, and capacitance value. For the output capacitor, the ESR value is the most important parameter.

The output capacitor requires an ESR value that has an upper and lower limit. For low output ripple voltage, a low ESR value is required. This value is determined by the maximum allowable output ripple voltage, typically 1% to 2% of the output voltage. But if the selected capacitor's ESR is extremely low, there is a possibility of an unstable feedback loop, resulting in an oscillation at the output. Using the capacitors listed in the tables, or similar types, will provide design solutions under all conditions.

If very low output ripple voltage (less than 15 mV) is required, see [Section 9.1.6](#) for a post ripple filter.

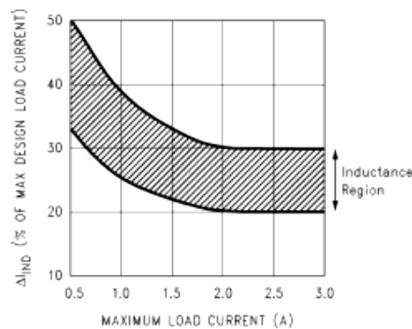
An ESR value of the aluminum electrolytic capacitor is related to the capacitance value and its voltage rating. In most cases, higher voltage electrolytic capacitors have lower ESR values (see [Figure 9-2](#)). Often, capacitors with much higher voltage ratings may be required to provide the low ESR values required for low output ripple voltage.

The output capacitor for many different switcher designs often can be satisfied with only three or four different capacitor values and several different voltage ratings. See [Table 9-3](#) and [Table 9-4](#) for typical capacitor values, voltage ratings, and manufacturers capacitor types.

Electrolytic capacitors are not recommended for temperatures below  $-25^{\circ}\text{C}$ . The ESR rises dramatically at cold temperatures and is typically three times as large at  $-25^{\circ}\text{C}$  and as much as 10 times as large at  $-40^{\circ}\text{C}$ . See [Figure 9-3](#).

Solid tantalum capacitors have a much better ESR specifications for cold temperatures and are recommended for temperatures below  $-25^{\circ}\text{C}$ .

To simplify the inductor selection process, an inductor selection guide (nomograph) was designed (see [Figure 9-5](#) through [Figure 9-8](#)). This guide assumes that the regulator is operating in the continuous mode, and selects an inductor that will allow a peak-to-peak inductor ripple current to be a certain percentage of the maximum design load current. This peak-to-peak inductor ripple current percentage is not fixed, but is allowed to change as different design load currents are selected (see [Figure 9-4](#).)



**Figure 9-4. ( $\Delta I_{IND}$ ) Peak-to-Peak Inductor Ripple Current (as a Percentage of the Load Current) versus Load Current**

By allowing the percentage of inductor ripple current to increase for low load currents, the inductor value and size can be kept relatively low.

When operating in the continuous mode, the inductor current waveform ranges from a triangular to a sawtooth type of waveform (depending on the input voltage), with the average value of this current waveform equal to the DC output load current.

Inductors are available in different styles such as pot core, toroid, E-core, bobbin core, and so forth, as well as different core materials, such as ferrites and powdered iron. The least expensive, the bobbin, rod or stick core, consists of wire wound on a ferrite bobbin. This type of construction makes for an inexpensive inductor, but because the magnetic flux is not completely contained within the core, it generates more Electro-Magnetic Interference (EMI). This magnetic flux can induce voltages into nearby printed-circuit traces, thus causing problems with both the switching regulator operation and nearby sensitive circuitry, and can give incorrect scope readings because of induced voltages in the scope probe (see [Section 9.1.7](#)).

When multiple switching regulators are located on the same PCB, open-core magnetics can cause interference between two or more of the regulator circuits, especially at high currents. A toroid or E-core inductor (closed magnetic structure) should be used in these situations.

The inductors listed in the selection chart include ferrite E-core construction for Schottky, ferrite bobbin core for Renco and Coilcraft, and powdered iron toroid for Pulse Engineering.

Exceeding the maximum current rating of the inductor can cause the inductor to overheat because of the copper wire losses, or the core may saturate. If the inductor begins to saturate, the inductance decreases rapidly and the inductor begins to look mainly resistive (the DC resistance of the winding). This can cause the switch current to rise very rapidly and force the switch into a cycle-by-cycle current limit, thus reducing the DC output load current. This can also result in overheating of the inductor or the LM2596. Different inductor types have different saturation characteristics, so consider this when selecting an inductor.

The inductor manufacturer's data sheets include current and energy limits to avoid inductor saturation.

For continuous mode operation, see the inductor selection graphs in [Figure 9-5](#) through [Figure 9-8](#).

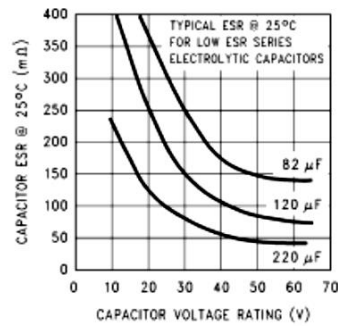


Figure 9-2. Capacitor ESR versus Capacitor Voltage Rating (Typical Low-ESR Electrolytic Capacitor)

#### 9.1.4 Catch Diode

Buck regulators require a diode to provide a return path for the inductor current when the switch turns off. This must be a fast diode and must be placed close to the LM2596 using short leads and short printed-circuit traces.

Because of their very fast switching speed and low forward voltage drop, Schottky diodes provide the best performance, especially in low output voltage applications (5 V and lower). Ultra-fast recovery, or high-efficiency rectifiers are also a good choice, but some types with an abrupt turnoff characteristic may cause instability or EMI problems. Ultra-fast recovery diodes typically have reverse recovery times of 50 ns or less. Rectifiers such as the 1N5400 series are much too slow and should not be used.

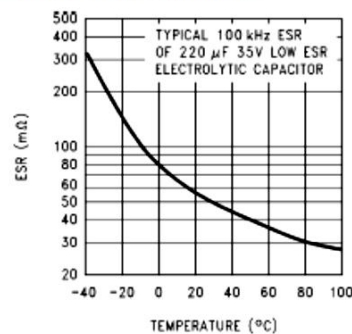


Figure 9-3. Capacitor ESR Change versus Temperature

#### 9.1.5 Inductor Selection

All switching regulators have two basic modes of operation; continuous and discontinuous. The difference between the two types relates to the inductor current, whether it is flowing continuously, or if it drops to zero for a period of time in the normal switching cycle. Each mode has distinctively different operating characteristics, which can affect the regulators performance and requirements. Most switcher designs will operate in the discontinuous mode when the load current is low.

The LM2596 (or any of the SIMPLE SWITCHER family) can be used for both continuous or discontinuous modes of operation.

In many cases the preferred mode of operation is the continuous mode, which offers greater output power, lower peak switch, lower inductor and diode currents, and can have lower output ripple voltage. However, the continuous mode does require larger inductor values to keep the inductor current flowing continuously, especially at low output load currents or high input voltages.