

T.C
Ege Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Lisans Bitirme Projesi Sonuç Raporu

Güç Dönüştürücülerİ İçin Aktif EMI Filtre Tasarımı ve Analizi
Design and Analysis of Active EMI Filter for Power
Converters

Emrullah GÜNAY
05190000477, emrullahgunayy@gmail.com, +90 538 207 01 73

Turan DEMİR
05190000440, turan1802@gmail.com, +90 534 203 24 26

Görkem TANIR
05190000464, gorkemtanir1@gmail.com , +90 554 689 95 71

Proje Danışmanı: Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE

Bornova, İZMİR, Haziran 2024

E.Ü. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
BÖLÜMÜ
LİSANS BİTİRME PROJESİ BİLGİ FORMU

1- Projenin Yapıldığı Dönem: HAZİRAN 2024	2- Rapor Tarihi: 27.05.2024
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 19.10.2024 – 27.05.2024	
4- Projenin Adı: Güç Dönüştürücüler için Aktif EMI Filtre Tasarımı ve Analizi Project Title: Design and Analysis of Active EMI Filter For Power Converters	
Projenin Toplam Maliyeti: Yaklaşık 40000TL	
5. Proje çalışma takımınızı belirtiniz. (Birini işaretleyiniz.) <input checked="" type="checkbox"/> Disiplin içi takım çalışması, <input type="checkbox"/> Çok disiplinli takım çalışması, <input type="checkbox"/> Bireysel çalışma	
6- Projeyi gerçekleştirecek öğrenciler ve iletişim bilgileri: Emrullah GÜNAY – Mevlana Mahallesi, 1711/2. Sokak, No:4, Daire:2, Bornova/İzmir +90 538 207 01 73 Turan DEMİR – Mevlana Mahallesi, 1711/2. Sokak, No:4, Daire:2, Bornova/İzmir, +90 534 203 24 26 Görkem TANIR – Egekent Mahallesi, 8050. Sokak No:87, Daire:3, Çiğli/İzmir, +90 554 689 95 71	
7- Projenin Yürüttüğü Kuruluş: Ege Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi – Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	
8- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı, Adresi ve Destek Miktarı: TÜBİTAK, Tunus Caddesi No:80 06680 Kavaklıdere/ANKARA, Destek Mikarı: 16000 TL TUSAŞ, Fethiye Mh. Havacılık Blv. No:17, 06980 Kahramankazan, Ankara/Türkiye, Destek Miktarı:23000 TL	
9- Öz: Bu tez çalışmasında, güç dönüştürücüler için hem pasif filtrelerin hem de aktif filtrelerin farklılıklarını incelenip araştırılarak bir Aktif EMI Filtresi tasarlanmıştır. Çalışmada filtre için İleri Beslemeli - Gerilm ALgilamalı Akım Enjekte edilen devre topolojisi (FB-VSVI) seçilmiştir. Pasif filtrelerin sonucunda elde edilen değerler standartlara uyum sağlayamadığı için amplifikatörlü bir devre ile aktif filtre tasarlanmıştır, istenilen değerlere çok rahat ulaşılmıştır.	
Anahtar Kelimeler: Aktif EMI Filtresi, Ortak Mod Bobini, Gerilm ALgilamalı Akım Enjekte Topolojisi, Elektromanyetik Girişim, EMI, EMC, AEF	
12- Danışmanının Öğretim Üyesi Adı/Soyadı ve Görüşü: Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE	
13- Bölüm Kurulu Görüşü:	
14- Projenin Başarı Durumu:	Projenin Aldığı Not:

ÖNSÖZ

Son yıllarda, teknolojik gelişmelerle birlikte birtakım problemler de ortaya çıkmaya başlamıştır. Yüksek anahtarlama frekansına sahip veya daha ufak tasarımlara sahip elektronik kartlarda EMI problemiçoğalmıştır ve bu durum hem cihazın kendisi için hem de çevre güvenliği için bir sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada özellikle güç dönüştürÜÜleri olmak üzere, test edilecek ekipmanlar için sistemde bulunan gürültünün azaltılması amaçlanmıştır. Farklı topolojiler ve çalışmalar incelenerek, aralarındaki en uygun gürültü azaltışını ve standartların gereksinimlerini sağlayan topoloji seçilip Aktif Elektromanyetik Girişim Filtresi tasarlanmıştır.

Çalışmamızda her türlü yardımı ve desteği sağlayan danışman hocamız Sayın Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE'ye ve Sayın Arş. Gör. Seçkin SOLA'ya teşekkürlerimizi borç biliriz.

Bu tez çalışmamız maddi olarak Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ. (TUSAŞ) tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve TUSAŞ kurumlarına şükranlarımızı sunuyoruz.

HAZİRAN 2024

EMRULLAH GÜNEY

TURAN DEMİR

GÖRKEM TANIR

ÖZET MAKALE

GÜC DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ İÇİN AKTİF EMI FİLTRE TASARIMI VE ANALİZİ

DESIGN AND ANALYSIS OF ACTIVE EMI FILTER FOR POWER CONVERTERS

Emrullah Günay
Elektrik – Elektronik
Mühendisliği
Ege Üniversitesi
İzmir, Türkiye
emrullahgunay@gmail.com

Turan DEMİR
Elektrik – Elektronik
Mühendisliği
Ege Üniversitesi
İzmir, Türkiye
turan1802@gmail.com

Görkem TANIR
Elektrik – Elektronik
Mühendisliği
Ege Üniversitesi
İzmir, Türkiye
gorkemtanir1@gmail.com

Prof. Dr. Mutlu Boztepe
Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Ege Üniversitesi
İzmir, Türkiye
mutlu.boztepe@ege.edu.tr

Ayşe Özgül Ertan AKGÜL
TUSAŞ- Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
Ankara, Türkiye
ozgul.ertanir@tai.com.tr

I. BÖLÜM

Öz: Bu çalışmada ortak modda iletilen gürültüleri azaltmak için, güç hatlarına bağlanan yüksek frekanslı (HF) güç amplifikatörü ve pasiffiltre bileşenleri bulunan aktiffiltre üzerine bir tasarım yapılmıştır. Topoloji seçiminde ise literatür taraması yapılmış ve pratik uygulamalar sonucunda yüksek frekanslı güç amplifikatörü ihtiyaçları belirlenerek, VSCI (Voltage Source Current Injection) topolojisi kullanılmıştır. Topoloji seçilmiştir. Buradaki amplifikatörün kullanım amacı: Aktif EMI Filtre için kapasitör gibi modellenerek filtrelenmemeyi artırmaktır. Ayrıca aktiffiltre kullanılarak elde edilen gürültü 180 derece döndürülerek geri enjekte edilmiş ve pasiffiltrenin boyutu %30 azaltılmıştır. Çalışmadaki aktiffiltreleme (AEF) yapısı sayesinde, induktör değeri beş kat azaltılmıştır. Ayrıca, geri besleme için sınırlamalar da göz önünde bulundurularak gereken stabilite için bir prototip hazırlanmıştır. Tasarlanan devre, simülasyon ortamında (hem PSIM hem de LTSpice programlarında) test edilmiş ve istenen sonuca ulaşılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen devre, pasiffiltreye kıyasla 150 kHz frekansta 57dB daha fazla filtrelenmemeyi sağlamıştır.

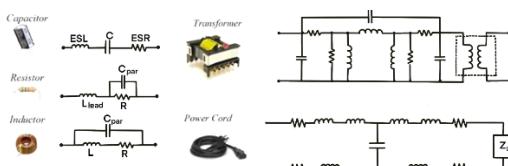
Anahtar Kelimeler: EMI Filtre, Aktif Filtreleme, Ortak Mod Gürültü

Abstract: In this study, a design was made for an active filter consisting of a high-frequency (HF) power amplifier connected to power lines and passive filter components to reduce common-mode transmitted noise. During the topology selection, a literature review was conducted, and the needs for a high-frequency power amplifier were determined through practical applications, leading to the use of the VSCI (Voltage Source Current Injection) topology. The purpose of the amplifier here is to enhance filtering by being modeled as a capacitor for the Active EMI Filter. Additionally, the noise obtained using the active filter was inverted by 180 degrees and re-injected, reducing the size of the passive filter by 30%. Thanks to the Active Filtering (AEF) structure in the study, the value of the inductor was reduced fivefold. Additionally, considering the limitations for feedback, a prototype was prepared to ensure the required stability. The designed circuit was tested in a simulation environment (using both PSIM and LTSpice programs) and successfully implemented. The implemented circuit provided 57dB more filtering at 150 kHz compared to the passive filter.

Keywords: EMI Filter, Active Filtering, Common Mode Noise

II. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

Her geçen gün artan elektronik cihazların kullanımı sebebiyle Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) standartlarının önemi gitgide artmaktadır. Çünkü EMC Standartları elektrikli ve elektronik cihazlarda Elektromanyetik Girişimi (EMI) kontrol etmekte ve sınırlamaktadır. EMI; cihazların ve sistemlerin doğru çalışmasını engelleyebilir, veri kaybına ya da hatalı iletişime neden olabilir, sinyal kalitesini düşürebilir ve hatta ciddi güvenlik riskleri (Patlama veya Yangın gibi) oluşturabilmektedir. Oluşan EMI problemi filtreler ile çözülmeye çalışılmaktadır. EMI problemi, genellikle güç dönüştürücülerinden tarafından oluşmaktadır. EMI probleminin ana kaynakları olarak; sistemdeki yüksek $\frac{dv}{dt}$, yüksek $\frac{di}{dt}$, kontrol devreleri ve doğrusal olmayan bileşenler söylenebilir. Ayrıca anahtarlamalı güç kaynaklarında da; MOSFET'ler, transistörler ve sistem çıkışında bulunan doğrultuculardan da kaynaklanmaktadır. Sistemlerde kullanılan; direnç, kapasitör, indüktör, transformator ve iletken tellerin sahip oldukları yapısal özellikleri yüzünden (ESR) de EMI oluşmaktadır. Örneğin Şekil.1'de, devrelerde genellikle kullanılan komponentlerin aslında ne tür bir davranış gösterdiğini anlatan şematikleri gösterilmektedir. [1]



Şekil.1 Komponentlerin Gerçek Ölçümleri
Esnasında Asıl Davranış Şematikleri

Her ne kadar yüksek hızda ve yüksek freksnlarda çalışılırsa, o kadar gürültü oluşmaktadır. Çünkü her anahtarlama yapıldığında sisteme akan akım ve gerilim bir miktar dalgalanmaktadır. Ancak sistemlerde daha yüksek anahtarlama frekansında çalışıldığı zaman daha yüksek bir gürültü olacağı için, bu gürültüyü filtrelemek için bir o kadar da büyük filtre kullanılması gerekmektedir. Bu durum bazı sistemlerin hacimsel olarak %30'unu veya daha fazlasını

kaplayabilmektedir. EMI problemi çözülmmediği sürece, geçmiş yıllarda yaşanan kötü olaylar gibi durumlar tekrardan yaşanabilir. Örneğin, 1967 yılında çevrede oluşan EMI yüzünden Forrestal uçak gemisinde, bir füze patlamış ve 134 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu yüzden EMI için kurallar, standartlarca katı bir şekilde belirlenip düzenli olarak kontrolleri yapılmaktadır.

Elektromanyetik Gürültü oluşturgunda 2 türde sistemleri etkileyebilmektedir. Cihazın içinden geçen elektriksel yol (İletilen EMI) ile veya hava üzerinden (Yayılan EMI) etkileşime girmektedir. İletkenlik boyunca varlığını korumaktadır. Sistemdeki iletken teller, kablolar ve PCB yönlendirmeleri tarafından oluşmaktadır. İletilen EMI da ikiye ayrılmaktadır: Ortak Mod Gürültüsü (Common Mode Interferences – CM) ve Diferansiyel Mod (Diferential Mode Interferences – DM) Gürültüsü. Elektromanyetik enerjinin doğrudan cihazdan radyasyon yoluyla yani boşluk veya dielektrikler aracılığıyla aktarılmasından kaynaklanmaktadır. Bu EMI, anahtarlamalı güç kaynağındaki CM ve DM akımlarından oluşmaktadır ve CM akımı bu gürültü üzerinde daha baskındır. [2] EMI probleminin etkili bir çözümü olarak da iki türde filtre kullanılmaktadır: Pasif ve Aktif EMIfiltresi. Pasif filtreler, aktif filtreye göre daha büyük hacimli ve ağırdır. Ayrıca pasif EMI filtresinde kullanılan kapasitörler, EMC standartlarındaki kapasite üzerinden oluşan kaçak akım değerlerine göre 2nF'dan büyük olamayacağı için kullanılamaz. Bu yüzden bahsedilen durumlar incelendiği zaman pasif filtreler genellikle tercih edilmemektedir. Aktif EMI Filtrelerde ise bu tarz sıkıntılar yaşanmamaktadır. Çalışmada tasarlananfiltrede ise, kullanılan kapasitör ile standart sağlanarak, sistemdeki gürültünün azaltılması gerçekleşmiştir. [3]

Bu çalışmada, 150 kHz ile 30 MHz arasında olan Ortak Mod Gürültüsü incelenmektedir. Tasarlanan EMI filtresinin güç devresine bağlantısı, güç kaynağının olduğu taraftandır. Buradaki asıl amaç: Yüksek frekansa sahip olan ortak mod gürültüsünün yok edilmesi veya

zayıflatılmasıdır. Bu gürültünün azaltılması için, hat ile koruyucu toprak arasına Y-Kapasitörleri ve CM Bobinleri kullanılmaktadır. Standartları pasif EMIfiltresi sağlayamayacağı için çalışmada tasarlanan amplifikatörlü sistem sayesinde sistemde kullanılan kapasitörün kapasitif etkisi 100 kat artırılarak filtreleme işlemi sağlanmıştır. Bu sayede de filtre hacmi küçültülmüş olup, maliyet açısından tasarruf edilmiş ve bobin değeri de 5 kat azaltılmıştır.

Bu çalışmada, konvertör sistemlerdeki iletlen ortak mod gürültüsünü azaltmak için, AC güç hattına bağlanan yüksek frekanslı güç amplifikatörü ve pasif bileşenlere sahip aktif EMIfiltresi tasarlanmıştır. 4 farklı topoloji incelenerek, her birinin zorlukları tartışılmış ve sınırlamalar da göz önünde bulundurularak Gerilim Algılama Akım Geri Enjekteli (VSCI) topoloji seçilmiştir. [4]

Bu çalışmada, Texas Instruments tarafından tasarlanan DC/DC Buck kontrolcüsü hakkında bilgiler verilmektedir. Tasarlanan kontrolünün içerisinde, Aktif EMI Filtresi de bulunmaktadır ve bu sayede diferansiyel mod filtresinin boyutu yaklaşık olarak %40 gibi bir oranda azalmıştır. Bununla birlikte bütçe açısından da kazanç elde edilmiştir. [5] Bu kaynaka ise, güç dönüştürücülerini için kullanılan EMIfiltrelerine, hem boyut hem de bütçe açısından alternatif olarak aktif EMIfiltre tasarımını sunmaktadır. İçerisinde farklı entegre tipinde aktif EMIfiltre yapısı kullanarak, bu problemi çözmektedir. Çalışmada kullanılan entegre sayesinde sistemdeki gürültüyü yaklaşık olarak 55 dB μ V kadar düşürmeyi başarmıştır. Bu sayede genel hacim %75'e kadar azaltılabilmekte ve de tasarım karmaşıklığı problemini de çözümlemektedir. [6]

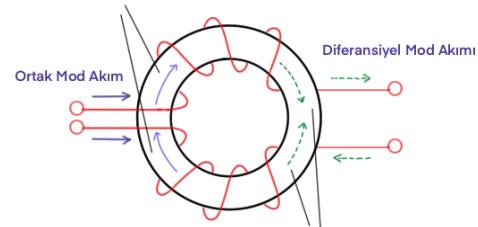
Bu çalışmada, pasiffiltrelerin yüksek hacim kapladığı için bazı sektörlerde de kısıtlı alan mevcut olduğu için aktiffiltreler tercih edildiğinden bahsetmektedir. Bu yüzden çeşitli topolojiler incelenip aralarındaki en avantajlı olan Geri beslemeli gerilim algılama akım iptali topolojisini seçilmiştir. Bu topoloji seçiminden sonra sistemdeki mevcut ortak mod gürültüsünü bastıran bobinlerin boyutlarında önemli ölçüde küçülme görülmüştür. Sonuç olarak pasiffiltreye göre hacimde %52'lik, maliyette %40'lık ve

ağırlıkta %41'lik bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca ek olarak daha düşük güç kaybı da sağlanmıştır.[7]

III. Bölüm Topoloji Seçimi ve Pasif Filtre

Elektromanyetik girişim filtreleri, elektrikle çalışan cihazlarda oluşan istenmeyen gürültülerin azaltmayı amaçlar. Devrelerde iki tür gürültü gözlenir. Bu gürültüler: diferansiyel mod gürültüsü ve ortak mod gürültüsüdür. Filtre devreleri, cihazların çalışmasını olumsuz etkileyen bu gürültülerin etkisini mümkün olan en az seviyeye indirir. Bu filtreleme işlemi, aktif veya pasif olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir.

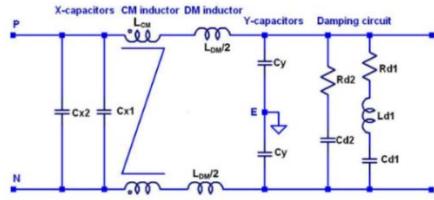
Pasif elektromanyetik girişim filtrelerinde, birinci dereceden filtreler yerine ikinci veya daha yüksek dereceli filtreler kullanılır. Bunun sebebi, filtre derecesi büyükçe bobin ve kondansatörlerin hacminin azalmasıdır. [8] Bu makalede kullanılacak olan pasiffiltre devresinde kullanılacak olan elemanlar: X kapasitörleri, Y kapasitörleri ve ortak mod şok bobini olacaktır. X kapasitörleri, diferansiyel mod gürültüsünü engellemek için kullanılır. X kapasitörleri hat-hat arasına bağlanarak devredeki arıza durumunda sigorta gibi devreyi korumaya alırlar. Y kapasitörleri, ortak mod gürültüsünü engellemek için kullanılır. Y kapasitörleri, ise hat-toprak arasına bağlanır. Y kondansatörleri de devredeki arıza durumunda açık devre gibi davranarak tehlikeyi önler. [9] Ortak mod şok bobini, ortak mod gürültüsünü engellemek için kullanılır.



Şekil.2 Ortak Mod Şok Bobini Akım Şeması

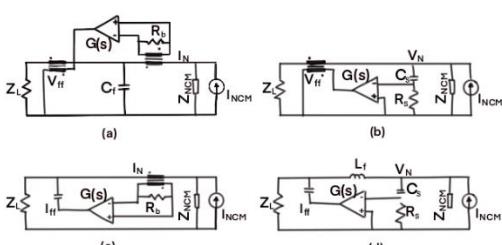
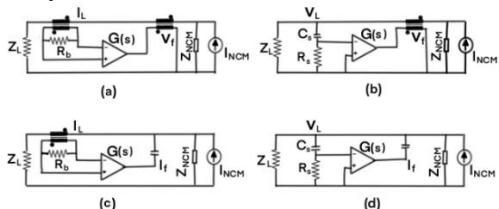
Şekil.2'de kesikli çizgiler diferansiyel mod gürültü akımını, sürekli çizgiler ortak mod akımını temsil eder. Ortak mod akımları aynı yönlü akarak bobinin içinde aynı yönde manyetik akı oluşturur ve bu akı bobinin empedans değerini artırarak ortak mod gürültüsüne karşı direnç gösterir. Diferansiyel mod gürültüsü bobine farklı yönlerden girdiği için bobin içerisinde oluşan manyetik akılar birbirini yok eder ve bobin

diferansiyel mod gürültüsüne karşı direnç göstermez. [10] Ortak mod şok bobini, X kapasitörü ve Y kapasitörleriyle oluşturululan pasif filtre devre şeması Şekil.2'de verilmiştir.



Topoloji seçimi:

Aktif elektromanyetik girişim filtresi, pasif filtreye göre çok daha az hacim kaplaması nedeniyle yeni nesil devrelerde çokça tercih edilir. Aktif filtre devrelerinde üç farklı başlık bulunur. Bunlar besleme tipi, algılama tipi ve iptal tipidir. Şekil.3'te geri beslemeli devre topolojileri verilmiştir.



Şekil.5 (a) İleri besleme akım algılama gerilim iptali, Şekil.5 (b) İleri beslemeli gerilim algılama gerilim iptali, Şekil.5 (c) İleri beslemeli akım algılama akım iptali, Şekil.5 (d) İleri besleme gerilim algılama akım iptali topolojileri verilmiştir.

Besleme tipi olarak ileri besleme seçilemez. Bunun sebebi ileri besleme tipinde amplifikatörün birim kazançta olmasının gereklisidir. Amplifikatör birim kazançta olursa, devrede oluşan parazitler amplifikatörün birim kazancını bozar. Geri beslemede Amplifikatör yüksek kazançta olmalıdır. Bu durum gürültünün daha iyifiltrelenmesine olanak tanır.

Algılama tipi seçiminde, akım algılama için çok büyük transformatöre ihtiyaç duyulur. Hacim artışı istenmeyen durum olduğu için akım algılama seçilmelidir. Gerilim algılama, gürültüyü algılamak için küçük bir kapasitöre ihtiyaç duyulur.

Iptal tipi için gerilim iptali çok büyük transformatöre ihtiyaç duyduğu için hacim artışı sebebiyle bu topoloji seçilmemelidir. Akım iptali için küçük bir kapasitöre ihtiyaç duyulur. Bu değerlendirmeler doğrultusunda Şekil.4 (d)'de verilen devre topolojisi kullanılacaktır. [11]

Algılama ve Enjeksiyon İşlemi:

Elektromanyetik girişim filtreleme devrelerinde gürültüyü algılamak ve yok etmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Algılama ve iptal işlemleri, bobin veya kapasitörler ile yapılmaktadır. Algılama ve iptal işlemleri: Gerilim algılama ve Gerilim iptali veya Akım algılama ve Akım iptali şeklinde olabilmektedir.

	Algılama	Enjeksiyon
Gerilim		
Akım		

Tablo.1 Algılama ve İptal Şemaları [12]

Tablo.1'de bobin ve kapasitör için algılama ve iptal metotları gösterilmiştir. Bu metodlar: bobin ile akım algılama, bobin ile gerilim iptali, kapasitör ile gerilim algılama, kapasitör ile akım iptali şeklindedir.

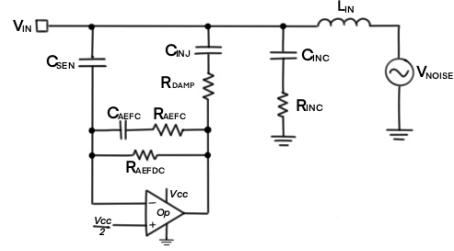
Tablo.1'deki gerilim algılama kapasitörü, yüksek frekanslı gerilim sinyallerine düşük direnç gösterdiği için yüksek frekanslı gerilim

sinyallerini geçirerek direnç üzerinden gerilimi algılamaktadır. Ayrıca filtre devresinde meydana gelen yüksek frekanslı gerilim sinyallerinin değişimini algılar. Gerilim enjekte etme işlemi ise bobin ile yapılmaktadır. Bobin, akım değişimine karşı direnç oluşturmaktır ve akım değişimini bobin üzerinde manyetik alan oluşturmaktadır. Bobinin oluşturduğu bu manyetik alan istenilen noktada gerilim oluşturur. Bobin ile akım algılama, bobinden alternatif akım geçtiği zaman kendisinin üzerinde manyetik alan oluşur ve oluşan bu manyetik alan bobin üzerindeki akım değişikliklerinden etkilenmektedir ve bobin üzerinde bir gerilim oluşmaktadır. Lenz yasası, bobin üzerinde zit yönde bir akım oluşacağını söylemektedir. Kapasitor ile akım enjekte etme, kondansatöre gerilim uygulandığı zaman plakaları arasında bir gerilim depolar. Daha sonra depoladığı bu gerilimi hedef bölgeye akım olarak enjekte eder.

IV. Bölüm Tasarlanan Devrenin Çalışma Prensibi

Aktif EMI Filtrelerinde (AEF) kapasitif güçlendirme konsepti, ortak mod (CM) gürültüsünü azaltmanın en etkili yollarından birini sunmaktadır. AEF devresi, ilgilenilen frekans aralığında, CM bobinlerinin görünen endüktansını veya Y-kapasitörlerinin görünen kapasitansını artırarak çalışır. CM gürültüsünün zayıflaması için tasarlanmış bir AEF devresinde, enjeksiyon kapasitoru (C_{INJ}) üzerindeki kapasitansı artırmak için devrede bir amplifikatör devresi kullanılır. Bu durum, CM bobinlerinin sistemdeki gürültüyü istenilen zayıflama seviyelerine ullaştırırken, CM bobinin daha düşük değerlere sahip olmasını sağlamaktadır.

Yüksek frekans istenmeyen sinyallerifiltrelemek için Alçak Geçiren Filtre kullanılabilir. Bu filtreler, yazıda daha öncesinde detaylıca açıklanmıştır. C_f kapasitörünün büyülüüğü hem boyut hem de kaçak akım testi gereği toplamda $2nF$ 'ın üstüne çıkması istenmemektedir. C_f 'nin boyutunu büyütmedigimizden CM bobin boyutu büyümese gerekliktedir. Bu da hem hacim hem de maliyet açısından istenmeyen bir durumdur.

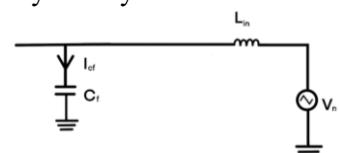


Şekil.6 Tasarlanan Aktif EMI Filtre Topolojisi [13]

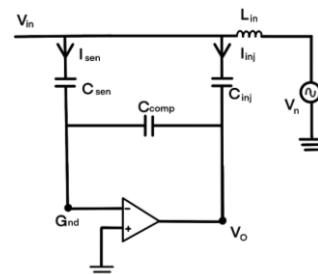
C_{IN} , güç dönüştürücülerinin giriş kapasitesini temsil eder ve L_{IN} diferansiyel mod indüktörüdür. C_{SEN} ve C_{inj} , algılama ve enjeksiyon kapasitörleridir ve amplifikatör devresini güç kaynağından izole etmektedirler. Stabilite ağının tasarımasına daha derinlemesine bakacak olursak, R_{AEFC} ve C_{AEFC} komponentleri sistemin düşük frekanslardaki stabilitesini sağlamaktadır. Yüksek frekanslarda ise, C_{INC} ve R_{INC} komponentleri devreye girer ve sistemin stabilitesini korumaktadır. Buna ek olarak, küçük bir direnç ile paralel bir kapasitörden oluşan Z_{DAMP} , AEF ile arasındaki rezonansı sökümlmek için kullanılan bir sökümleme ağıdır. Bu sökümleme ağı, rezonans durumlarında oluşabilecek olası genlik artışlarını engelleyerek sistemin kararlı çalışmasını sağlar. [13]

$$I_{cf} = C_f \cdot \frac{dV_{in}}{dt} \quad (1)$$

C_f kapasitörü, (1) denklemindeki kadar akım geçirmektedir ve bu kapasitörün kapasitörün kapasitif davranışını Amplifikatörlü aktif devre ile tasarlanacaktır. Bu sayede kapasitörün kapasitif değerinin boyutu büyütülebilecektir.



Şekil.7 Klasik LC Filtre Şeması



Şekil.8 AEF Yüksek Frekans Eşdeğer Devresi

$$I_{sen} = C_f \cdot \frac{V_{in}}{\frac{1}{sC_{sen}}} = s \cdot V_{in} \cdot C_{sen} \quad (2)$$

(2) numaralı denklemde bulunan akım C_{comp} üzerinden akacak akım olacaktır.

$$V_0 = -I_{sen} \cdot \frac{1}{sC_{comp}} = -V_{in} \cdot \frac{C_{sen}}{C_{comp}} \quad (3)$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{C_{sen}}{C_{comp}} = G \quad (4)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \frac{dV_{inj}}{dt} = C_{inj} \frac{d(V_{in} - (-V_{in} \cdot \frac{C_{sen}}{C_{comp}}))}{dt} \quad (5)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \cdot \frac{d(V_{in}(1 + \frac{C_{sen}}{C_{comp}}))}{dt} \quad (6)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \cdot (1 + G_{op}) \frac{dV_{in}}{dt} \quad (7)$$

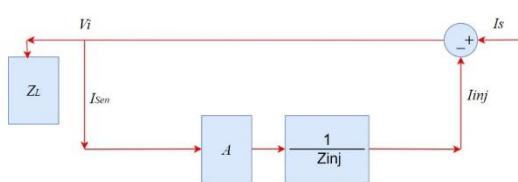
$$C_F = C_{inj} \cdot (1 + G_{op}) + C_{sen} \quad (8)$$

C_{sen} , büyülüüğü $C_{inj} \cdot (1 + G_{op})$ 'e göre çok küçütür ve $1 + G_{op} \approx G_{op}$ olarak varsayılabılır.

$$C_F = C_{inj} \cdot G_{op} \quad (9)$$

Bu şekilde C_F kapasitörünü aktif olarak gerçekleştirmek olmaktadır. CM gürültüsünü azaltmak için kullanılan kapasitif güçlendirme konseptinde, yüksek değerli kapasitif enjeksiyon, amplifikatör aşamasıyla sağlanır. Bu, hedeflenen zayıflamayı sağlamak için geleneksel pasif bileşenlere kıyasla daha küçük CM bobinleri kullanılmasına olanak verir. Şekil.8'e göre, (9) numaralı denklem enjeksiyon kapasitörünün (C_{inj}) etkin kapasitansının, amplifikatör çıkışının CM gerilim kazancı (G_{AEF}) ile etkili bir şekilde çarpıldığını gösterir. [15]

AEF Tasarımı



Şekil.9 Blok Diyagram

Sistem Tasarımı:

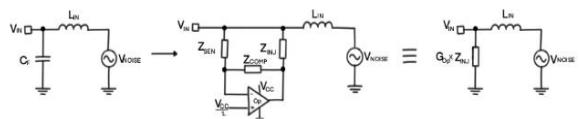
Şekil.9'da görülen blok diyagram, sistemin çalışma prensiplerini ve bileşenlerinin etkileşimini göstermektedir. Bu devrede, C_{sen} kapasitörü DC voltajını engellemekte ve istenmeyen yüksek frekanslı gürültüleri bastırarak algılama sürecini daha güvenilir hale getirmektedir. Devredeki Amplifikatör, kazancı artırmakta ve 180° faz kayması sağlayarak çıkış sinyalini uygun şekilde işleyip C_{inj} kapasitörüne enjekte etmektedir.

Kapasitör ve Direnç Seçimi:

Tasarım sürecinde, Algılama kapasitörleri olan C_{sen} ve C_{AEFC} dikkatle seçilmiştir. Öncelikle, Algılama kapasitörlerinin C_Y kapasitörlerinden büyük olması gerekmektedir. Bu, istenen kazancın elde edilmesi ve yüksek frekanslı sinyallerin doğru bir şekilde algılanması için kritik öneme sahiptir. İstenen kazancı elde etmek için C_{AEFC} kapasitörü ile R_{damp} direnci arasında belirli bir oran sağlanmalıdır. Bu oran, stabilité kontrolünden önce dikkatle incelenmiştir.

Stabilite Kontrolü ve Kararlılık :

Stabilite kontrolü, tasarım sürecinin kritik bir aşamasıdır. Şekil.6'daki devrede görülen R_{damp} direnci, sistemin Quality factor değerini 0.7-1 aralığında tutmak için ayarlanmıştır. Bu ayarlama, sistemin istenmeyen osilasyonlara karşı dayanıklı olmasını ve kararlı çalışmasını sağlar. MATLAB kullanılarak gerçekleştirilen kutupsız grafiği ve root-locus grafiği ile analizi yapılmış ve sistemin kararlı olduğunu doğrulamıştır. Bu analizde, sistemin transfer fonksiyonu ve bileşenlerinin etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil.10 Aktif EMI Filtre Şeması

Şekil.11'deki şemada gösterilen devrede R_{AEFDC} , C_{AEFC} düşük frekanslı geçiş noktalarını ayarlayan elemanlardır. C_{sen} gerilim algılama kapasitördür. C_{inj} , akımın enjekte edilmesi görevini sağlayan kapasitördür.

Alçak $f_{sw} < 1\text{MHz}$ altı için ve Yüksek $f_{sw} > 1\text{MHz}$ üstü için aşağıdaki tablo kullanılabılır.

	Alçak	Yüksek
C_{sen}	0.1 uF	0.1 uF
R_{AEFC}	1kΩ	200Ω
C_{AEFC}	1nF	5 nF

Tablo.2 Alçak ve Yüksek Frekans İçin Komponent Değerleri

Devre tasarımında iki şartın sağlanması beklenmektedir:

$$R_{AEFDC} \gg R_{AEFC} + \frac{1}{sC_{AEFC}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{sC_{AEFC}} \gg R_{AEFC} \quad (11)$$

11 numaralı denklemde Z_{AEFC} den büyük olması gerektiği için $R_{AEFDC} = 100k\Omega$ gibi yüksek bir değer seçilmelidir.

$$Z_{comp} = (R_{AEFC} + \frac{1}{sC_{AEFC}}) // R_{AEFDC} \quad (12)$$

$$Z_{sen} = \frac{1}{sC_{sen}} \quad (13)$$

$$G = \frac{Z_{con}}{Z_{sen}} = \frac{C_{sen}}{C_{AEFC}} \quad (14)$$

Dolayısıyla devremiz bu şartlar altında kapasitör gibi modellenmiştir. [15]

Sönümleme:

Filtre devrelerinde sökütleme işlemi, devrenin performansını iyileştirmek veya istenmeyen rezonansları kontrol altına almak için önemlidir. Bu çalışmada olduğu gibi, yüksek frekanslı uygulamalarda da rezonans yüzünden belli frekanslarda aşırı genlikli salınımlar oluşabilmektedir. Bu salınımlar, istenmeyen bozulmalara ve gürültülere yol açabilir. Sistemin kararlılığı da bu sebepten dolayı etkilenebilmektedir. Bu yüzden, tasarlanan devrede sökütleme metodları kullanılması önemlidir. 2 çeşit metot vardır:

a) Seri Sönümleme Metodu:

Şekil.6'daki şemada gösterilen devrede

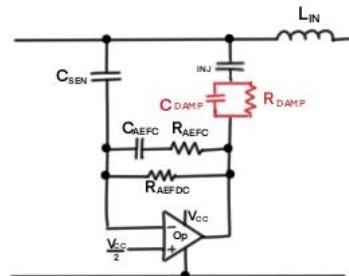
verilmiştir.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (15)$$

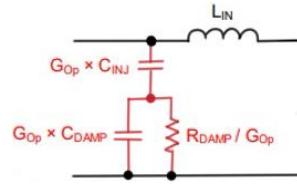
Kalite Faktörü (Quality Factor) 0,7 ile 1 arasında olmalı ki, aşırı sökümlü bir alçak geçiren devresi olamasın. $Q = 1$ olarak alırsak:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow \frac{R_{damp}}{G_{op}} = \sqrt{\frac{L_{in}}{G_{op} \cdot C_{inj}}} \quad (16)$$

b) Paralel Sönümleme:



Şekil. 11 Paralel Sönümleme Devresi Şeması



Şekil. 12 Paralel Sönümleme Modellemesi

$$Z_{damp} = \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{R_d})^2 + (2\pi f_{sw} C_d)^2}} \quad (17)$$

$$Z_{damp} = \sqrt{\frac{L_{in}}{G \cdot C_{inj}}} \quad (18)$$

$$R_{damp} = G_{op} \sqrt{\frac{L_{in}}{G_{op} \cdot C_{inj} - (2\pi f_{sw} \cdot C_{damp})^2}} \quad (19)$$

$$R_{damp} \approx \sqrt{\frac{C_{sen}}{C_{AEFC}} \cdot \frac{L_{in}}{C_{inj}}}, C_{damp} = \frac{1}{2} C_{inj} \quad (20)$$

C_{inj} değerinin hesaplanması:

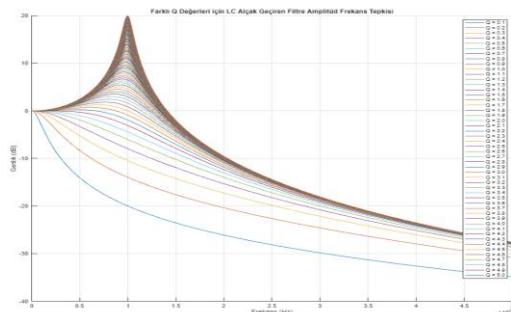
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{in} \cdot C}} \quad (21)$$

$$L_{in} \cdot C_f = \frac{1}{(2\pi f_c)^2} \quad (22)$$

$$C_F = C_{inj} \cdot G_{op} \quad (23)$$

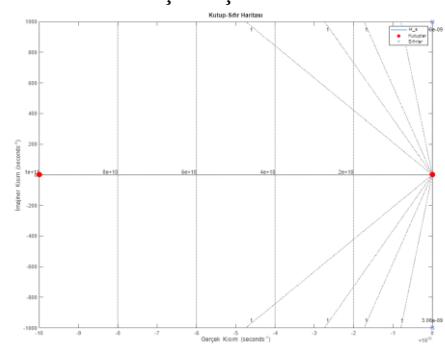
$$L_{in} \cdot C_{inj} = \frac{1}{G_{op} \cdot (2\pi f_c)^2} \quad (24)$$

Stabilite Analizi

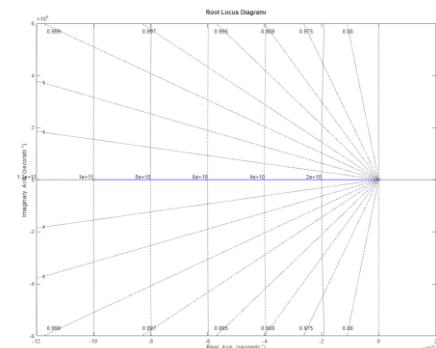


Şekil.13 Alçak Geçiren Filtre Kalite Faktörü Grafiği

Farklı Q değerleri için LC filtresinin genlik logaritmik frekans değeri Şekil A'da verilmiştir. Q değeri arttıkça filtre daha keskin bir şekilde frekansları ayırt edebilir. Bu sebepten Q değeri, yani kalite faktörü, uygun bir aralıktır olmalıdır. Bu çalışmada Q değeri 0.75 olarak seçilmiştir.



(a)



(b)

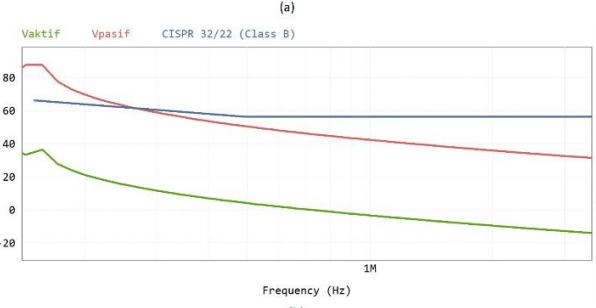
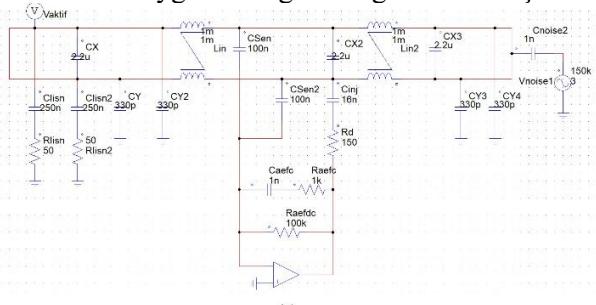
Şekil.14 (a) Sistemin Kutup Sıfır Grafiği, (b) Sistemin Root Locus Grafiği

Şekil.15 (a)'da kutup-sıfır haritasında, kutupların gerçek kısmının sol tarafında kalması sistemin kararlı olduğunu gösterir. Şekil.15

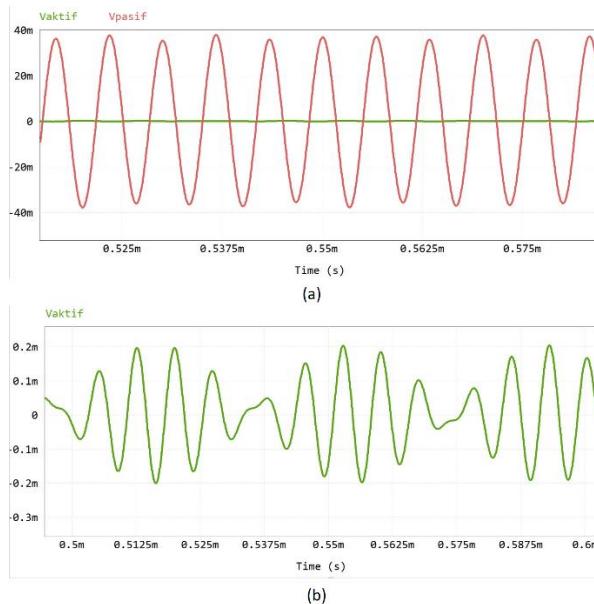
(b)'deki root-locus diyagramı ise değişen kazanç değerleri için sistemin kararlılığını sürdürdügünü ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, MATLAB kodumuzun çıktısından da görülebileceği Şekil.49 görüldüğü üzere sistemimiz kararlıdır. Gerçek hayatta yapılan testlerde de sistemin kararlı olduğu görülmüştür. Bu, tasarladığımız sistemin güvenilir ve doğru çalıştığını doğrular.

Simülasyon Sonuçları ve Gerçek Sonuçlar

Tasarlanan devre, hem LTspice hem de PSIM simülasyon programları kullanılarak test edilmiştir. Bu simülasyonlar, devrenin performansını ve kararlılığını doğrulamak amacıyla yapılmıştır ve sonuçlar oldukça tutarlı bulummuştur. Gürültü modeli olarak girişe 3Vpp (tepeden tepeye) sinüs dalgası uygulanmıştır ve güç dönüştürücüsü 1nF kapasitor ile modellenmiştir. Şekil.14(a)'da devrenin simülasyon çizimi sunulmuştur. Simülasyonların Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) sonuçlarına bakıldığından (Şekil.16 (b)), gürültünün 57dB kadar zayıflatıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, Şekil.16(b)'de CISPR 32 Class B standartlarına uygun olmayan filtre kapaklıken gürültünün standartlara uygun hale getirildiği belirlenmiştir.

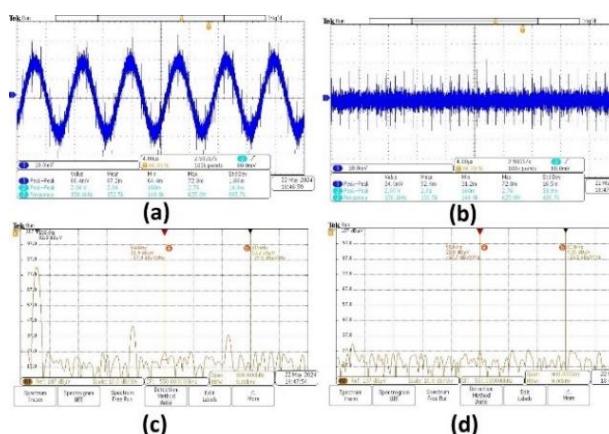


Şekil.15 (a) Devrenin Simülasyon Çizimi, (b) Tasarlanan Aktif ve Pasif Filtrenin FFT Analiz Sonucu



Şekil.16 (a) Aktif Filtre Kapalı İken Görültü Seviyesi, (b) Aktif Filtre Açık İken Görültü Seviyesi

Şekil.17 (a)'da aktif devre kapatıldığında görülen 79mV gürültü ölçülmüştür. Aktif devre açıldığında (Şekil.17 (b)), bu değerin yaklaşık 0,5mV kadar düşüğü ve yaklaşık 160 kat daha iyifiltreleme sağlandığı görülmüştür. Gerçek devreye bakıldığında, Şekil.16 (a)'da aktif devre kapalıken 79mV gürültü gözlenmiştir. Aktif devre açıldığında ise bu değerin 35mV civarında düşüğü belirlenmiştir. Ancak, bu değerin yüksek olduğu ve ölçüm problemlerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu yanlışlık, Şekil.16 (b)'de aktif devre kapalıken elde edilen düşük gürültü düzeylerini gösteren dBV frekans grafiğinde açıkça görülmüştür. Aktif devre açıldığında, simülasyon sonuçlarına benzer şekilde 56dB kadar bir zayıflama gözlenmiştir. Bu, simülasyon sonuçları ile gerçek devrenin sonuçlarının tutarlılığını göstermektedir.



Şekil.17 Tasarlanan Devrenin Gerçeklenmiş Halinin Çıktısı

CISPR 32 Class B standardı, elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından son derece katı bir standarttır ve özellikle konut, ticari ve hafif sanayi ortamlarında kullanılacak cihazlar için önemlidir. Bu standart, cihazların elektromanyetik girişimlerini (EMI) kabul edilebilir seviyelerde tutarak diğer elektronik cihazların sorunsuz çalışmasını sağlamayı amaçlar. Devrenin bu yüksek standartlara uyumlu olması, tasarımin kalitesini ve etkinliğini göstermektedir. CISPR Class B standartına uygunluğu, devrenin geniş bir uygulama yelpazesinde güvenle kullanılabileceğini ve yüksek elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini karşılayabileceğini ortaya koymaktadır.

V. Bölüm Sonuç ve Tartışma

Sonuçlar, projenin simülasyon ve gerçeklenmiş projenin sonuçlarının birbirleri arasında uyumlu olduğu göstermiştir. Bu tutarlılık, tasarımin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Bu çalışmada aktif olarak C_{sen} kapasitörü modellenmiş ve aktif olarak algılanan gürültü 180° ters çevrilerek gürültü minimum seviyeye getirilmiş, bobinin endüktans büyülüğu ise 5 kat azaltılmıştır. Pasif devrenin boyutu hacimsel olarak %30 azaltılmıştır. Bu başarıda, her türlü yardım ve desteği sağlayan Danışman Hocamız Sayın Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE'ye ve yaptığı yardımlar için Sayın Arş. Gör. Seçkin SOLA'ya teşekkürlerimizi sunuyoruz. Projemizde Sanayi Danışmanı olarak yardımlarda bulunan Sayın Ayşe Özgül Ertanır AKGÜL'e de teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Oneriler kapsamında da daha hassas ekipmanlarla ölçümler alınarak devrenin performansı daha detaylı bir şekilde incelenebilir. Ayrıca, devrenin elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı korunması için tasarım yoluyla eklemeler yapılabılır ve Yayılan EMI için yeni güncellemeler eklenebilir. Bu konu, tez yazısında ele alınmış olup, ileride EMI konusunun yasal düzenlemelere tabi olabileceği öngörmektedir. Dolayısıyla, daha fazla bilgilendirme ve çalışma yapılması önerilmektedir.

VI. Bölüm Yazarlar:



Emrullah GÜNAY, Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği öğrencisidir ve 2024'te mezun olacaktır. 3.20 GNO'ya sahiptir ve Vestel'de Yazılım Mühendisi olarak çalışmaktadır. Erdemir ve Smart Moles Yuluğ Mühendislik'te staj yapmıştır. C, C++, Proteus, Cube ID, Matlab bilmektedir. Türkçe, İngilizce ve Almanca dillerini konuşmaktadır. Ege Elektromobil ve Ege GateWay projelerinde yer almıştır.



Turan DEMİR, Ege Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği öğrencisidir ve 2.84 not ortalamasına sahiptir. Vestel'de yarı zamanlı Gömülü Sistemler Yazılım Mühendisi olarak çalışmakta ve klima wifi modülleri üzerinde yazılım geliştirmektedir. Öğrenci Konseyi Başkan Yardımcısı ve Gateway Kariyer Topluluğu Başkanıdır. Türkçe, İngilizce, Almanca bilmektedir.



Görkem TANIR, Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğrencisidir. TUSAŞ iş birliğiyle Ekim 2023'te "Active EMI Filter" projesi yapmıştır. CST, KiCAD, LTspice, STM32, Proteus, C, C++, MATLAB, Psim programlarına hakimdir. İngilizce bilgisi iyidir. Müzik ve sporla ilgilenmektedir ve Nokia'nın "Computer Networks" dersine katılacaktır.



Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE, 1991 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1992-1994 yılları arasında EPSİS Elektronik'te saha mühendisi olarak çalışmaktan sonra, 1995 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. Bu süreçte, güneş hücreleriyle çalışan bir Peltier soğutucu tasarımını üzerine tezini yazdı. 2002 yılında Ege Üniversitesi'nde doktorasını tamamlayarak, İzmir'de şebekeye bağlı bir fotovoltaik güç

sistemi tasarımları ve analizi üzerine yoğunlaştı. Akademik kariyerine 1994 yılında Ege Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak başladı ve 2003-2006 yılları arasında aynı bölümde öğretim görevlisi olarak devam etti. 2006-2013 yılları arasında yardımcı doçent olarak görev yaptı ve 2013 yılında doçent unvanını aldı. 2021 yılında profesörlüğe yükseldi. 2012 ve 2014 yıllarında İspanya'daki Polytechnics University of Catalunya'da misafir araştırmacı ve misafir profesör olarak bulundu. Elektrik Güç Sistemleri Anabilim Dalı Başkanlığı görevini 2004-2011 yılları arasında yürüttü. Yenilenebilir enerji, güç elektroniği ve fotovoltaik sistemler üzerine birçok ulusal ve uluslararası yayını bulunan Boztepe, Ege Üniversitesi'nde lisans ve yüksek lisans düzeyinde dersler vermektedir. Google Scholar'a göre toplamda 1054 atıf almış olan Boztepe, alanında önemli katkılarında bulunmaya devam etmektedir.



Ayşe Özgül Ertanır Akgül, elektromanyetik uyumluluk ve yarı iletken proseslerinde geniş bir tecrübe sahip bir mühendistir. Kariyerine TÜBİTAK'ta araştırmacı olarak başlayan Akgül, burada yarı iletken cihazların üretimi ve testi üzerine çalışarak önemli deneyimler kazanmıştır. TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası'nda elektrik ve elektronik sistemlerin test mühendisliğini yapmış, ardından Turkish Aerospace'de çeşitli pozisyonlarda görev almıştır. Turkish Aerospace'deki kariyerine telemetri mühendisi olarak başlayıp, uçuş test veri sistemleri kıdemli mühendisi ve elektromanyetik uyumluluk mühendisi olarak devam etmiştir. Ekim 2021'den bu yana Elektromanyetik Uyumluluk Baş Mühendisi olarak çalışmaktadır. Başkent Üniversitesi'nde Elektrik ve Elektronik Mühendisliği alanında doktora yapmakta olup, İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği alanında yüksek lisans ve Elektronik Mühendisliği alanında lisans derecelerine sahiptir. Radyo frekansı, EMC uyumluluğu, yarı iletken prosesleri ve sistem testi gibi konularda uzmanlaşmış olan Akgül, hem akademik hem de profesyonel kariyerinde birçok önemli projede yer almıştır. Halen Turkish Aerospace'de Elektromanyetik Uyumluluk Baş Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

VII. Bölüm Kaynakça

- [1] Electromagnetic Engineering. "EMC Testing - Basics and Standards". YouTube. [Online]. Available:
<https://www.youtube.com/watch?v=YNNU3MRQoac>. [Accessed: Mar 23, 2024].
- [2] K. Manjula, S. Bhuvaneswari, "A Review of Analysis and Design of EMI Filters for Power Electronic Converters", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 2, no. 8, Nov 2015.
- [3] Review of Modeling and Suppression Techniques for Electromagnetic Interference in Power Conversion Systems
- [4] M. L. Heldwein, H. Ertl, J. Biela, and J. W. Kolar, "Implementation of a Transformerless Common-Mode Active Filter for Offline Converter Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 5, pp. 1772-1786, May 2010. [Online]. Available:
<http://hdl.handle.net/20.500.12708/167025>
- [5] Texas Instruments, "LM5149-Q1 80-V Automotive, Synchronous, Buck, DC/DC Controller with Ultra-Low IQ and Integrated Active EMI Filter," Datasheet, Rev. C, December 2022. [Online]. Available:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5149-q1.pdf>. [Accessed: Mar 24, 2024].
- [6] Texas Instruments, "Using an Active EMI Filter in Power Converters to Reduce EMI Filter Size and Cost," Application Report SLVAE25, Apr. 2021. [Online]. Available:
<https://www.ti.com/lit/an/slvae25/slvae25.pdf>. [Accessed: Mar 27, 2024].
- [7] Texas Instruments, "How Active EMI Filter ICs Mitigate Common-Mode Emissions and Increase Power Density in Single- and Three-Phase Power Systems," SLVAFJ9, Mar. 2023. Submit Document Feedback.
- [8] "Using LC filter instead of RC filter in mains powered circuits," Electrical Engineering Stack Exchange. [Online]. Available:
<https://electronics.stackexchange.com/questions/234695/using-lc-filter-instead-of-rc-filter-in-mains-powered-circuits>. [Accessed: Feb 16, 2024].
- [9]"Safety Capacitor (Class X and Class Y Capacitors)". All About Circuits. [Online]. Available:<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/safety-capacitor-class-x-and-class-y-capacitors/>. [Accessed: Mar 19, 2024].
- [10] "Differential ve Common Mode Gürültü." [Online]. Available:
<https://caginturkoglu.blogspot.com/2021/05/differential-ve-common-mode-gurultu.html>. [Accessed: Mar 16, 2024].
- [11] K. Mainali, "ANALYSIS AND MITIGATION OF CONDUCTED EMI IN SWITCHED-MODE POWER SUPPLIES", National University of Singapore, Jan. 24, 2011. [Online] Available:
<https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/27899>. [Accessed Apr 09 2024].
- [12] L. Dai, W. Chen, X. Yang, M. Zheng, Y. Yang, and R. Wang, "A Multi-Function Common Mode Choke Based on Active CM EMI Filters for AC/DC Power Converters," IEEE Access, vol. 7, pp. 29548-29556, Mar. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2904951.
- [13] J. Hertz, "TI's Active EMI Filters to Slash Size of Power Supply Designs," All About Circuits, Mar. 22, 2023. [Online]. Available:<https://www.allaboutcircuits.com/news/tis-active-emi-filters-to-slash-size-of-power-supply-designs/>. [Accessed: May 12, 2024].
- [15]Texas Instruments, "How Active EMI Filter ICs Mitigate Common-Mode Emissions and Increase Power Density in Single- and Three-Phase Power Systems," SLVAFJ9, Mar. 2023. Submit Document Feedback.

İçindekiler

Güç Dönüştürücülerı İçin Aktif EMI Filtre Tasarımı ve Analizi	1
ÖNSÖZ	3
ÖZET MAKALE	4
ŞEKİL LİSTESİ	17
GRAFİK LİSTESİ.....	20
KISALTMA LİSTESİ	21
SİMGİ LİSTESİ	22
ÖZ	23
ABSTRACT	24
GİRİŞ.....	25
Konu problem tanımı:.....	25
Literatür Özeti.....	26
GELİŞME	27
1. EMI Nedir?	27
1.1 EMI Türleri	29
1.2 EMI Tarihçesi	30
1.3 EMI oluşumunun sebepleri.....	31
1.4 EMI Türleri	39
1.5 EMI Modellenmesi.....	42
1.6 İletilen EMI'daki CM ve DM in verdiği problemler	43
1.7 EMC (Electromagnetic Compability):.....	44
1.8 EMI Ölçümü ve Tespiti.....	47
1.8.1 LISN.....	47
2. Pasif Filtre.....	52
2.2 Kapasitör seçimi.....	56
2.3 İndüktör Seçimi.....	57
2.1.5 Pasif Filtre Çalışma Mekanizması	58
2.4 Pasif Filtre Tasarımı	59
2.5 Gerekli Zayıflamanın Tespiti	60
2.6 İndüktör Tasarımı	62
3. EMI Filtre	65
3.1 Pasif EMI Filtre	65
3.2 Aktif EMI Filtre	66

3.3 AEF Topolojisinin Seçilmesi	70
3.3 AEF Tasarımı	77
3.4 Aktif EMI Filtresi Kullanılma Sebepleri.....	82
3.5 EMI İçin Dizayn Çözümleri	83
3.6 Stabilite Analizi	85
Devrenin Simülasyon Sonuçları ve Gerçek Sonuçlar.....	89
EK-1	92
Kaynakça.....	96

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil.1 EM Dalgası (Elektrik Alan ve Manyetik Alanın Birleşmesi)	27
Şekil.2 EMI, İnsan yapımı ve doğal kaynaklı elektromanyetik alanlardan kaynaklanmaktadır.	28
Şekil.3 Güç Dönüşürücüsü İçin Gürültülü Gerilim ve Akım Grafikleri	32
Şekil.4 Filtrede Kullanılan Komponentlerin Gerçek Ölçümler Esnasında Asıl Davranış Şematikleri ..	33
Şekil.5 MOSFET'te EMI Oluşan Kısım	33
Şekil.6 Anahtarlama Yapıldığı Esnada Gerilim ve Akım Grafiğinde Gözlemlenen Atmalar.....	34
Şekil.7 Bir Zaman Sinyalinin Fourier Dönüşümü	35
Şekil.8 Gürültü Spektrumu ve Yönetmelikler.....	36
Şekil.9 İletilen EMI/EMC için Hiyerarşik Ölçüm Diyagramı	36
Şekil.10 EMI Sınıflandırılması ve Yöntemleri.....	38
Şekil.11 Yayılan ve İletilen EMI Gürültüsü İçin Bir Gösterim.....	39
Şekil.12 Diferansiyel Mod Gürültü Akımının Devre Şeması	40
Şekil.13 Ortak Mod Gürültü Akımının Devre Şeması	41
Şekil.14 (a) CM ve (b) DM Gürültülerin Eşdeğer Devresi	42
Şekil.15 Diferansiyel Mod Gürültüsünün Modellenmesi.....	42
Şekil.16 Güç Elektronigi Açısından Temel EMC Kategorileri	45
Şekil.17 CISPR/EN 55022/32 Class A ve Class B'deki İletilen EMI Limitleri (Conducted Emission Limits)	46
Şekil.18 LISN Detaylı İç Yapısı	47
Şekil.19 Spektrum Analizörü	48
Şekil.20 EMI Gürültüsünün Ölçülmesi İçin Oluşturulmuş Tipik Bir Ölçüm Şema Diyagramı	49
Şekil.21 Yansımasız Oda	50
Şekil.22 Yayılan Emisyon Test Görüntüsü	51
Şekil.23 İletilen Gürültü Ölçümü	51
Şekil.24 Elektrostatik Deşarj Test Görüntüsü	52
Şekil.25 RC ve RL Alçak Geçiren Filtresi Devre Şeması	53
Şekil.26 RC ve RC Yüksek Geçiren Filtresi Devre Şeması	53
Şekil.27 LC Alçak Geçiren Filtresi Devre Şeması	54
Şekil.28 CLC ve LCL Filtrelerinin Devre Şeması	55
Şekil.29 X ve Y Kapasitörlerinin Bağlantı Şeması	56
Şekil.30 Ortak Mod Bobini Akım Şeması.....	57
Şekil.31 Normal Bobin ve Ortak Mod Şok Bobini Sinyal Kalitesi Farkı	58
Şekil.32 Diferansiyel Mod ve Ortak Mod Pasif Filtresinin Beraber Kullanım Şeması	58
Şekil.33 CLC Filtre Devre Şeması.....	59
Şekil.34 Akım Dalgasının Kare Dalga Olarak Modellemesi	60
Şekil.35 Tek Faz Çift Katmanlı Pasif EMI Filtre Şeması	66
Şekil.36 Devrenin EMI Filtre Eklenmiş ve Eklenmemiş Halinin Eşdeğer Devresi	68
Şekil.37 Aktif EMI Filtre Topolojileri (a) Geri Beslemeli Akım Algılama Gerilim İptali, (b) Geri Beslemeli Gerilim Algılama Gerilim İptali, (c) Geri Beslemeli Akım Algılama Akım İptali, (d) Geri Beslemeli Gerilim Algılama Akım İptali	71
Şekil.38 Aktif EMI Filtre Topolojileri (a) İleri Besleme Akım Algılama Gerilim iptali, (b) İleri Beslemeli Gerilim Algılama Gerilim İptali, (c) İleri Beslemeli Akım Algılama Akım İptali, (d) İleri Besleme Gerilim Algılama Akım İptali	71
Şekil.39 CM Filtre ve Enjekte Kapasitörünün Birleştirilmiş Halinin Basitleştirilmiş Şematığı	73
Şekil.40 Tasarlanan Aktif EMI Filtre Topolojisi	75
Şekil.41 LC Filtresi Yapısı.....	75
Şekil.42 Algılama ve Enjekte Kısmı	76
Şekil.43 Blok Diyagram	77
Şekil.44 Tasarım Prosedürü	77
Şekil.45 Aktif EMI Filtre Şeması.....	78
Şekil.46 Paralel Sönümleme Devresi Şeması.....	80
Şekil.47 Paralel Sönümleme Devresi İçin Basitleştirilmiş Hali	80

Şekil.48 CM Filtreme Devresinin Tek Fazlı Bir Sistemde Şeması	81
Şekil.49 Manyetik Alanın Muhafaza ile Yönlendirilmesi.....	84
Şekil.50 Alçak Geçiren Filtre Quality Factor Grafiği	85
Şekil.51 (a) Sistemin Kutup Sıfır Grafiği, (b) Sistemin Root Locus Grafiği	88
Şekil.52 Tasarlanan Filtrerin LTspice Uygulamasındaki Çizimi	89
Şekil.53 Gerçeklenen Devrenin Sonuçları	91
Şekil.54 KiCad Uygulamasında Devrenin Şematik Çizimi	92
Şekil.55 Komponentlerin Ebatlarının Ölçülmesi	93
Şekil 56 Komponentlerin Ayak İzi Çizimleri.....	93
Şekil.57 Amplifikatör İçin Ayak İzi Çizimi	94
Şekil.58 Ayak İzi Atamaları.....	94
Şekil.59 PCB Yollarının Çizimi.....	95

TABLO LİSTESİ

Tablo.1 CISPR ve FCC Standartlarının Özellikler	45
Tablo.2 CISPR İletim Yoluyla Gürültü Yayılma Limitleri	46
Tablo.3 Ortak Mod Bobini Büyüklük / Faz Tablosu	64
Tablo.4 Algılama ve İptal Şemaları	72
Tablo.5 Alçak ve Yüksek Frekans İçin Komponent Değerleri.....	78

GRAFİK LİSTESİ

Grafik.1 Kaskad Devrelerin Derecelere Göre Eğim Oranı Grafiği	55
Grafik.2 Bir Sistemde Sönümleme Devresinin Kullanılmış ve Kullanılmamış Haldeki Çıkış Empedansları Grafiği.....	62
Grafik.3 CM Bobini için Frekansa göre Büyüklük / Faz Grafiği.....	64
Grafik.4 Topolojilere Göre Kategorileştirilmiş AEF Grafiği.....	70
Grafik.5 Yapılan Sistemin Bode Diyagramı	89
Grafik.6 Tasarlanan Devrenin Giriş ve Çıkış Sinyalinin Ölçülmesi	90
Grafik.7 Aktif ve Pasif Devrenin Sonucunda Elde Edilen Gürültü Azaltımı Grafiği	90

KISALTMA LİSTESİ

EMI	Electromagnetic Interference / Elektromanyetik Girişim
EMG	Elektromanyetik Girişim
OM	Ortak Mod
DM	Diferansiyel Mod
SMPS	Switch Mode Power Supply / Anahtarlama Güç Kaynakları
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques / Uluslararası Radyo Parazitleri Komitesi
ASCII	American Standard Code for Information Interchange / Amerikan Bilgi Değişim Standardı Kodu
EBCDIC	Extended Binary Coded Decimal Interchange Code / Genişletilmiş İkili Kodlanmış Ondalık Bilgi Değişim Kodu
WBG	Wide Bandgap / Geniş Bant Aralıklı Güç Yarı İletkenleri
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor / Yalıtım Kapılı Bipoler Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor / Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistor
FFT	Fast Fourier Transform / Fourier Dönüşümü
DFT	Discrete Fourier Transform / Ayırık Fourier Dönüşümü
CM	Common Mode / Ortak Mod
DM	Differential Mode / Diferansiyel Mod
AEF	Active EMI Filter / Aktif Elektromanyetik Girişim Filtresi
PEF	Passive EMI Filter / Pasif Elektromanyetik Girişim Filtresi
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
EMC	Electromagnetic Compatibility / Elektromanyetik Uyumluluk
PCB	Printed Circuit Board / Baskılı Devre Kartı
TC	Elektromanyetik Uyumluluk Teknik Komitesi
CST	CST Studio Suite
EUT	Equipment Under Test / Test Edilen Cihaz
LISN	Line Impedance Stabilization Network / Hat Empedansı Stabilizasyon Ağrı
AC	Alternative Current / Alternatif Akım
DC	Direct Current / Doğru Akım
IEC	International Electrotechnical Commission / Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
FCC	Federal Communications Commission / Federal İletişim Komisyonu
IEEE	International Electric Electronic Engineering (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
ANSI	The American National Standards Institute / Amerikan Ulusal Standartlar Entitüsü
MILSTD	Military Standard
MME	Multimedya Ekipmanı
ESD	ElectroStatic Discharge / Elektrostatik Boşalma
ESR	Eritrosit Sedimentasyon Hızı
VSCI	Voltage Sensoring Current Injection
FB-VSVI	Forward Back – Voltage Sensoring Current Injection

SİMGE LİSTESİ

L	Hat
N	Nötr
E	Toprak
f_s	Anahtarlama Güç Elektroniği Devresinin Anahtarlama Frekansı
D	Görev Oranı
IL	İnsertion Loss
V_{AC}	AC Gerilim
V_{DC}	DC Gerilim
V_{IN}	Anahtarlama Devresindeki Giriş Gerilimi
V_{max}	Standartın İzin Verdiği En Yüksek dB cinsinden Gürültü Değeri
$V_{IN-Ripple-p2p}$	Anahtarlama Devresindeki Dalgalanmanın Tepe-Tepenin Değeri Farkı
V_{source}	Kaynak Gerilimi
V_1	Giriş Gerilimi
V_2	Çıkış Gerilimi
V_{AEF}	Test Edilen Cihazın Gerilimi
V_{NOISE}	Gürültü Gerilimi
I_{cm}	Ortak Mod Akımı
I_{dm}	Diferansiyel Mod Akımı
I_s	Laplace Düzlemindeki Akım
I_{Zdm}	DM Filtrenin Akımı
$I_r(s)$	Thevenin Eş Değer Devre Akımı
I_1	Giriş Akımı
I_2	Çıkış Akımı
I_{INJ}	Enjekte Edilen Akım
Z_{cm}	Ortak Mod Empedansı
Z_{dm}	Diferansiyel Mod Empedansı
Z_{AC}	Gerilim Kaynağının Empedansı
Z_s	Kaynak Empedansı
Z_{dm}	DM Filtresinin Empedansı
Z_r	LISN Cihazının Empedansı
Z_{source}	Kaynak Empedansı
Z_{load}	Yük Empedansı
L_{cm}	Ortak Mod Bobini
L_{lk}	Leakage Bobini
L_{dm}	Diferansiyel Mod Bobini
L_f	LC filtresinin elemanı
C_x	X-Kapasitörü
C_y	Y-Kapasitörü
C_f	LC filtresinin elemanı
C_{IN}	Anahtarlama Güç Elektroniği Devresinin Giriş Kapasitans Değerinin Eşdeğeri
C_o	Bağlantı Kapasitörü
C_{test}	Test Kapasitörü
C_{SEN}	Algılama Kapasitörü
C_{AEFC}	Aktif Filtre Kapasitörü
G_{amp}	Kapasitif Yükselteç
G_{AEF}	Aktif Filtrenin Kazancı

ÖZ

Güç Dönüştürücülerı İçin Aktif EMI Filtre Tasarımı ve Analizi

Emrullah GÜNEY

Turan DEMİR

Görkem TANIR

Bitirme Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE

Haziran 2024, 100 Sayfa

Bu tez çalışmasında, güç dönüştürücülerı için hem pasif filtrenin hem de aktif filtrenin farklılıklarını incelenip araştırılarak, standartlara uygun şekilde Aktif EMI Filtresi tasarlanmıştır.

Elektronik güç dönüştürücülerı; endüstriyel, ticari ve evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu cihazlar çalışırken, istenmeyen gürültü ve sinyaller üreterek, çevresinde elektrikle çalışan diğer cihazların güvenilirliği ve performansını olumsuz etkileyen Elektromanyetik Girişime (EMI) neden olurlar. EMI, elektrik devrelerindeki akım ve gerilim dalgalanmaları, parazitler, harmonikler, yansımalar gibi istenmeyen etkileri ifade eder. EMI, cihazların çalışmasını bozabilir, veri kaybına veya hatalı iletişime yol açabilir, sinyal kalitesini düşürebilir ve hatta yanın veya patlamalara neden olabilir. Bu yüzden EMI'ın etkili bir şekildefiltrelenmesi veya bastırılması önemli bir konudur. EMI'yı bastırmak için iki türde filtre kullanılabilmektedir: Pasif ve Aktif filtre. Pasif filtreler büyük boyutlu ve ağır olduğu için ve ayrıca kapasite değerleri kaçak akım değerlerinin standartlara göre $2nF$ 'dan daha büyük olamayacağı için çalışmada aktif EMI滤re tasarlanmıştır. Amplifikatör, pasif filtredeki koruma kapasitörü değerinin düşük seçilmesine ve ardından bu kapasitörün kapasitif etkisini kendi üzerinden 100 kat artırarak devrede kullanılmasını sağlamaktadır. Bu sayede filtrenin hacmi küçültülmüş olup, maliyet açısından tasarruf edilmiştir ve bobin değeri de 5 kat azaltılmıştır.

Projede, gürültünün algılanıp fazını ters çevirerek devreye geri enjekte eden bir aktif filtre tasarımı önerilmektedir. Bu şekilde, gürültü tamamen ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Bu tasarım, daha önce yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Gürültü kaynağının akım ve gerilim karakteristikleri taklit edilerek, gürültü algılanmış ve fazını ters çevirerek devreye geri enjekte edilmiştir. Bu şekilde, gürültü kaynağı ile filtre arasında bir akım dengesi sağlanmış ve gürültü bastırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif EMI Filtresi, Elektromanyetik Girişim, AEF, EMC, EMI, Ortak Mod Bobini, Diferansiyel Mod Bobini, CM, DM

ABSTRACT

Design and Analysis of Active EMI Filter for Power Converters

Emrullah GÜNAY

Turan DEMİR

Görkem TANIR

Graduation Thesis, Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE

June 2024, 100 Pages

In this thesis, the differences between passive and active filters for power converters were examined and researched, and an Active EMI Filter was designed in compliance with standards.

Electronic power converters are widely used in industrial, commercial, and domestic applications. However, when these devices operate, they generate unwanted noise and signals, causing Electromagnetic Interference (EMI) that negatively affects the reliability and performance of other electrical devices in their vicinity. EMI refers to unwanted effects such as current and voltage fluctuations, interferences, harmonics, and reflections in electrical circuits. EMI can disrupt device operation, lead to data loss or erroneous communication, degrade signal quality, and even cause fires or explosions. Therefore, effectively filtering or suppressing EMI is an important concern. Two types of filters can be used to suppress EMI: passive and active filters. Due to the large size and weight of passive filters, and because the capacitance values must not exceed the leakage current standards of $2nF$, an active EMI filter was designed in this study. The Opamp allows for the selection of a low-value protection capacitor in the passive filter and then increases the capacitive effect of this capacitor one hundredfold through itself for use in the circuit. This reduces the volume of the filter, provides cost savings, and reduces the inductor value by five times.

In the project, an active filter design is proposed that detects noise, inverts its phase, and re-injects it into the circuit. In this way, the noise is attempted to be completely eliminated. This design is based on previous studies. By mimicking the current and voltage characteristics of the noise source, the noise is detected, its phase is inverted, and it is re-injected into the circuit. This creates a current balance between the noise source and the filter, thereby suppressing the noise.

Keywords: Active EMI Filters, Electromagnetic Interferences, AEF, EMC, EMI, Common Mode Choke, Differential Mode Inductor, CM, DM

GİRİŞ

Her geçen gün artan elektronik cihazların kullanımı sebebiyle Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) standartlarının önemi gitgide artmaktadır. Elektromanyetik Girişim (EMI), cihazların doğru çalışmasını engelleyebilir ve hatta ciddi güvenlik riskleri oluşturabilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için EMI filtreleri kritik bir rol oynamaktadır. Ancak mevcut kullanılan pasif EMI filtreleri, özellikle yüksek frekanslarda yeterli performans sağlamak için büyük kapasitör değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu kapasitörlerin fiziksel boyutları, kartların minyatürleştirilmesi için zorluk çıkartmaktadır ve bu durum da üreticileri yeni filtre tasarımlarına yöneltmektedir.

Bu çalışmada, geleneksel pasif EMI filtrelerinin yerini alabilecek alternatif aktif EMI filtreleri (AEF) üzerine yoğunlaşılmıştır. AEF'ler, özellikle ortak mod gürültüsü için tasarlanmış ve 20V'a kadar olan gürültü seviyelerinde, pratik olarak test edilerek başarıyla uygulanmıştır. 3V gibi düşük gürültü seviyelerinde bile, CISPR 32 Class B standartlarına uygun çıktılar elde edilmiştir ki bu durum filtre tasarımındaki başarının bir göstergesidir. AEF devresinin tasarımında, özellikle hacim üzere diğer birçok avantajı da sunan VSCI topolojisi tercih edilmiştir. Bu topoloji sayesinde, kapasite olarak modellenen AEF ile ortak mod bobinin boyutu beş kat azaltılmıştır. Ayrıca, standartlarca belirlenen Y kapasitörü değerinin sınırlı olması nedeniyle artan bobin boyutları, tasarlanan AEF sayesinde önemli ölçüde küçültülmüştür. Bu, hem maliyet hem de alan tasarrufu açısından önemli bir gelişmedir.

Son olarak, tasarlanan devre gerçeklenmiş ve simülasyon sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, AEF tasarımının sadece teoride değil, pratikte de etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, EMI filtre tasarımında yeni bir yaklaşım sunmakta ve elektronik cihazların daha küçük, daha verimli ve daha güvenli hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Konu problem tanımı:

Hızlanan anahtarlama ve elektronik cihazların yaygın kullanımıyla birlikte, $\frac{dv}{di}$ ve $\frac{di}{dt}$ gibi türevsel terimlerin artmasıyla EMI sorunları da artmaktadır. Bu durum, elektronik cihazların birbirleriyle etkileşimi ve dışarıdan gelen parazitlere karşı daha hassas hale gelmesine sebep olmaktadır. Günümüzde, daha yüksek frekanslı ve daha yoğun veri iletimi gerçekleştiren sistemlerde bu durum daha da önemli hale gelmektedir. Genellikle EMI problemi, pasif filtreler aracılığıyla bastırılmaya çalışılmaktadır. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi, pasif filtrelerin kullanımı devrelerin büyülüğünü artırmakta ve tasarım sürecini de karmaşıklaştırmaktadır. Bu sebeple, pasif filtre yerine aktif filtreleme yöntemleri giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Literatür Özeti

Literatürdeki aktif EMI filtreleriyle ilgili yapılan çalışmalar genel olarak 2021 yılından bu yana gerçekleştirmiştir olup çalışma sayısı da sınırlıdır. EMI'ınfiltrelenmesi, hızla artan anahtarlanma teknolojisi ile $\frac{di}{dt}$ ve $\frac{dv}{di}$ değişimlerinden dolayı gerekli hale gelmiştir. Pasif filtreler, EMI filtreleme işlevini başarılı bir şekilde yerine getirmektedir ancak boyutları ciddi bir şekilde büyük olduğundan dolayıfiltreleme için aktif filtreleme yöntemlerine dönülmüştür. Pasif filtreler üzerine yazılan kitapta, EMI çok iyi bir şekilde açıklanmış ve çeşitli pasif filtre tipleri verilmiştir. [1]

EMI, CM ve DM olmak üzere iki çeşide ayrılmaktadır. CM ve DM filtreleme için hangi topolojinin daha mantıklı olduğuyla ilgili bir çalışma [2] dergisinde bulunmuş ve aynı zamanda [3]tezde de açıkça ele alınmıştır. Pasif filtreleri kapsayan ve kapsamlı hesaplamalar ile grafikleri içeren bu tez çalışması, çalışmalarımızı aydınlatmak için oldukça faydalı olmuştur. Aynı zamanda, bu tezde bobin tasarımları ile ilgili güzel açıklamalar yapılmış ve gerekli durumlarda bobin tasarımımızda kullanılmıştır.

DM gürültüsünüfiltreleme için kullanılan VSCC feedback topolojisini [3] bu tezde ele alan kişi, daha sonra VSCC feedback kullanıp ardından Twin Circuit (çift devre) topolojisine geçmektedir. Aynı kişinin yayınladığı başka bir makalede [4], farklı bir Amplifikatör modeli ve stabilitesi artırılarak farklı bir kompanzasyon şekli kullanılmıştır. EMI'ıfiltrelemede, optimizasyonla ilgili 4 detaylı çalışmanın yapıldığı bu kitap ve dergide, EMC standartlarıyla ilgili detaylı açıklamalar yapılmış ve devrenin CISPR32/22 Class B standartlarına uygun olması amaçlanmıştır.

EMI probleminin bir diğer sebebi olan CM gürültüsü için VSCC FF topolojisinin seçildiği ve bu topolojinin faydalarını ve transfer fonksiyonunu anlatan bu tezden yararlanılarak kullanıldığı belirtilemiştir [5]. Reduction (Kesinti) için VSCC-FF topolojisi kullanılarak yapılan bu tezde, transfer fonksiyonları ve çalışma prosedürleri bakımından zengin olduğundan dolayı faydalانılmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada, bobine paralel R ve C komponentleri eklenerek çalışmanın işleyişi düzeltilemiştir. [6]

Bu çalışmada, konvertör sistemlerdeki iletilen ortak mod gürültüsünü azaltmak için, AC güç hattına bağlanan yüksek frekanslı güç amplifikatörü ve pasif bileşenlere sahip aktif EMI filtersi tasarlanmıştır. 4 farklı topoloji incelenerek, her birinin zorlukları tartışılmış ve sınırlamalar da göz önünde bulundurularak Gerilim Algılama Akım Geri Enjekteli (VSCI) topoloji seçilmiştir. [7]

Bu çalışmada, Texas Instruments tarafından tasarlanan DC/DC Buck kontrolcüsü hakkında bilgiler verilmektedir. Tasarlanan kontrolünün içerisinde, Aktif EMI Filtresi de bulunmaktadır ve bu sayede diferansiyel mod filtresinin boyutu yaklaşık olarak %40 gibi bir oranda azalmıştır. Bununla birlikte bütçe açısından da kazanç elde edilmiştir. [8]

Bu kaynacta ise, güç dönüştürücülerini için kullanılan EMI filtrelerine, hem boyut hem de bütçe açısından alternatif olarak aktif EMI filtre tasarımını sunmaktadır. İçerisinde farklı entegre

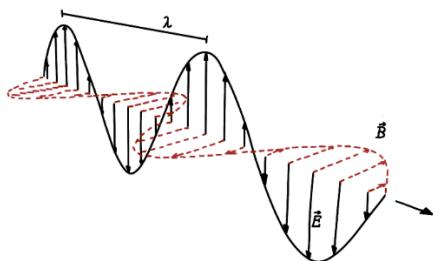
tipinde aktif EMI filtre yapısı kullanarak, bu problemi çözmektedir. Çalışmada kullanılan entegre sayesinde sistemdeki gürültüyü yaklaşık olarak $55 \text{ dB}\mu\text{V}$ kadar düşürmeyi başarmıştır. Bu sayede genel hacim %75'e kadar azaltılabilmekte ve de tasarım karmaşıklığı problemini de çözümlemektedir. [9]

Bu çalışmada, pasif filtrelerin yüksek hacim kapladığı için bazı sektörlerde de kısıtlı alan mevcut olduğu için aktif filtreler tercih edildiğinden bahsetmektedir. Bu yüzden çeşitli topolojiler incelenip aralarındaki en avantajlı olan Geri beslemeli gerilim algılamalı akım iptali topolojisi seçilmiştir. Bu topoloji seçiminden sonra sisteme mevcut ortak mod gürültüsünü bastıran bobinlerin boyutlarında önemli ölçüde küçülme görülmüştür. Sonuç olarak pasif filtreye göre hacimde %52'lik, maliyette %40'luk ve ağırlıkta %41'luk bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca ek olarak daha düşük güç kaybı da sağlanmıştır. [10]

GELİŞME

1. EMI Nedir?

Elektromanyetik Alan: Elektrik Alan [**E**] ve Manyetik Alan [**B**] olmak üzere iki temel bileşeni vardır ve günlük hayatı da bu elektromanyetik dalgayı üreten birçok cihaz bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgalar da çevresindeki birçok cihazın çalışmasını ve performanslarını negatif etkilemektedirler. Bu elektromanyetik alanın etrafındaki cihazları etkilenmesine de Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference – EMI) denmektedir. [11] Bütün elektrikli, elektronik ve elektromekanik cihazlarda (Bilgisayarlar, mikroişlemciler, anahtarlamalı güç kaynakları (SMPS), AC/DC motorlar gibi) yaygın olarak kullanılan yüksek frekanslı devreler güç yoğunluğu açısından üstün olmalarına rağmen gerekli önlemler alınmaz ise ürün ve ortam güvenliği açısından sorunlara neden olan bir miktar elektromanyetik enerjiyi ortaya çıkarmaktadırlar.



Sekil.1 EM Dalgası (Elektrik Alan ve Manyetik Alanın Birleşmesi)

Elektromanyetik girişim, cihazların havaya yaydığı uzaysal ışıma ile gerçekleşebileceği gibi cihazın içinden geçen kablolarдан yani iletkenlik yoluyla da oluşabilir. [11] Elektrikli ve elektronik cihazların çalışmaları esnasında çevreye, standartlarca belirlenen limitlerin üstünde yayınınının oluşması veya bu yayının karşısında olması gerekenden daha fazla alinganlık göstermesi de EMI olarak değerlendirilebilmektedir. [12] Cihazların bu EMI etkileşimlerini oluşturmamasına yayının (Emission), etkilenmelerine ise bağışıklık (Immunity) denir.

Daha önce bahsettiğimiz EMI, hemen hemen elektroniğin olduğu her alanda olduğu gibi doğada kendiliğinden yani doğal olarak da EMI oluşabilmektedir. Örneğin: Güneş ışınları, yıldızımlar, kozmik kaynaklar gibi bunlardan daha sonradan bahsedeceğiz. Doğada oluşan EMI sonrasında, kullanılan elektronik cihazların fonksiyonlarını geçici veya kalıcı olarak kaybetme/yerine getirememeye gibi problemler gözlemlenebilmektedir. [13]

Son yıllarda gerek maliyet gerekse mevcut sınırlı kaynaklar nedeniyle güç elektroniği sistemlerinin; boyut, ağırlık ve maliyetlerini azaltmak için ve aynı zamanda da performanslarını da iyileştirmek amacıyla çeşitli topolojiler, entegrasyonlar, modülleştirmeler ve standartlar gibi değişiklikler yapılarak ilerlemeye çalışılmıştır. Lakin bu iyileştirilmiş topolojiler veya yeni üretilen/geliştirilen yarı iletken komponentler sayesinde elde etmiş olduğumuz yüksek anahtarlama frekansları, her ne kadar istenen bir durum olsa da, aynı zamanda EMI problemini de artırmaktadır. Bu yüzden sistemlerde kullanılan gelişmiş entegrasyon teknolojileri ile birlikte sistemlerin daha küçük komponentlerle üretilmiş olması; küçük kartların tasarımindan, EMI faktörünü oldukça önemli bir hale getirmektedir. [14]

Bahsetmiş olduğumuz Elektromanyetik Girişim, radyo frekansı aralığında bulunmaktadır. EMI'ın olmasını türlere göre bölecek olursak 3 tür'e bölebiliriz:



Sekil.2 EMI, İnsan yapımı ve doğal kaynaklı elektromanyetik alanlardan kaynaklanmaktadır.

1.1 EMI Türleri

a. Üretim Kaynağına göre EMI türleri

- **Yapay EMI:** Beşeri olarak oluşan yani üretilen, elektronik devrelerde büyük akımların değişmesinden kaynaklı gürültü. [15] Evinizdeki eşyalardan veya endüstriyel sektörde kullanılan ekipman ve cihazlar yüzünden oluşmaktadır.

Evlerde oluşan EMI'in kaynağı genellikle kablosuz sinyalle çalışan cihazlardır. Ancak bu EMI çok fazla hasara neden olmamaktadır. Bu cihazlara örnek verecek olursak: Dizüstü bilgisayarlar, Wifi Cihazları, Floresanlar ve Mikrodalga Fırınlar gibi.

Endüstriyel veya ticari alanlarda oluşan EMI, genellikle daha geniş alanları kapsadığı için evlerde oluşan EMI'dan daha büyük gürültülere sebebiyet vermektedir. Bu kısımda oluşan EMI; hastaneleri, askeri üs ve operasyonları, TV/Radyo istasyonlarını ve olduğu yerin yakınındaki diğer ekipmanları etkileyebilmektedir. Endüstriyel EMI oluşturan cihazlara örnek verecek olursak: Uydu iletişim ağları, yüksek gerilim hatları, endüstriyel elektrik motorları ve jeneratörleri, MRI, X-Ray ve radyasyon tedavisinde kullanılan tıbbi görüntüleme sistemleri gibi. [16]

- **Doğal EMI:** Doğal olarak meydana gelen yani; yıldırım, atmosferik olaylar, kozmik gürültü, güneş patlamalarından dolayı oluşan gürültü. Örneğin güneş, herhangi bir uydunun arka kısmında ise yarattığı gürültü yüzünden uydudan gelen iletişimini engelleyebilmektedir. [15]

b. Girişim süresine göre EMI türleri

- **Sürekli Olan Girişim (Continuous Interference):** Devrede sürekli olarak üretilen sinyal. Bu gürültüye sürekli olarak çalışan bir motor veya elektronik devrelerde karşılaşabiliriz. Genellikle evlerimizde kullandığımız aydınlatma ve güç kaynakları gibi düşük gerilimli cihazlarda rastlanmaktadır.

- **Darbe Gürültüsü (Impulse Noise):** Beşeri veya doğal olarak herhangi bir sebepten dolayı anlık oluşan gürültü. Örneğin, bir elektrik fırtınası, güneş patlaması veya elektrostatik boşalma durumlarında karşımıza çıkabilmektedir.

c. Bant genişliğine göre EMI türleri

- **Dar Bant:** İntermodülasyon ve verici distorsiyonu nedeniyle oluşan gürültü. Sinyallerin frekans bant genişliği dar olduğu için dar bantlıdır. Bir radyo vericisi veya osilatörden dolayı oluşabilmektedir. Bu gürültü elektronik ekipman üzerinde büyük bir etki yaratmasa da kontrol edilebilir sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir.

- **Geniş Bant:** İnsan yapımı olan ark kaynağı veya doğal güneş kaynağından kaynaklanan gürültü. Frekans spektrumunun büyük bir bölümünü ve birçok farklı frekansı etkilemektedir. Genellikle arızalı ekipmanlardan kaynaklanmaktadır. Örneğin gerilim regülatörleri, ateşleme sistemleri ve darbe üreteçleri gibi cihazlarda rastlanabilmektedir. [15]

1.2 EMI Tarihçesi

Maxwell 1865 yılında elektrik ve manyetik alanların özelliklerini ve etkileşimlerini sistemli bir şekilde açıklamıştır lakin o dönem ilk defa keşfedildiği için herhangi bir gürültü olarak tanım yapılmamaktadır. Ardından 1888 yılına kadar ‘Hertz’ dediğimiz elektromanyetik dalgaların varlığını kanıtlayan deneyler gerçekleştirmiştir. Ve bir nevi bu tarihten sonra elektromanyetik dalgalar üzerine yapılacak olan analiz ve uygulamaları hakkında birçok çalışmanın öünü açmıştır. [17]

Elektromanyetik Girişim ile ilgili ilk sorunlar 1930’lu yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu dönemde sıkça kullanılan radyo alıcılarının oluşturduğu elektromanyetik emisyonun, elektrikli motorlar ve benzinli motorlar gibi cihazları etkilediği görülmüştür. Bu nedenle ilk zamanlarda karşılaşılan bu durum Radyo Frekans Girişimi (RFI) olarak adlandırılmaktaydı. [18] EMI’yi düzenlemek için ise 1933 yılında Uluslararası Radyo Parazitleri Komitesi (CISPR) kurulmuş ve kullanılması planlanan EMI ölçüm cihazları ile uygulanması gereken yöntemleri belirlemiştir. [17] İkinci Dünya Savaşı döneminde yoğun bir şekilde kullanılan radar ve telsizlerin, haberleşmeleri esnasında yakınlarındaki farklı sistemler ile aralarındaki girişim olayının oldukça fazla arttığı görülmüştür. Son yüzyıl içinde yaşanan bazı olayların nedenlerinin araştırılması ile elektromanyetik girişimin büyük felaketlere neden olabileceği anlaşılmıştır. Örneğin Forrestal adındaki uçak gemisinde, 1967 yılında çevredeki oluşan EMI yüzünden füze patlaması sonucunda 134 kişi hayatını kaybetmiştir. 1984 yılında ise ABD’de 911 imdat çağrılarının cevaplandığı binanın girişinde kullanılan telsiz telefonlarına, çevrede oluşan EMI yüzünden ağda meydana gelen ASCII ve EBCDIC kodlarının sebep olduğu, aramaların çoğunun anlamsız çağrılar haline geldiği bir olay yaşanmıştır. Bir başka yaşanmış olan kötü tecrübe ise radyo kontrollü bir vinç, ortamdaki EMI yüzünden beklenmedik bir anda kepçe dolusu erimiş çeliği işçilerin üzerine dökmüştür. Yapılan incelemelerde, sistemde kullanılan radyo linki ile orijinal açma-kapama düğmesinin kontrolünün birbirine karışlığı ve kazaya bu durumun sebep olduğu bulunmuştur. Türkiye’de yaşanan bir durum ise 2005 yılında Balıkesir jet üssünden havalandan F16 savaş uçağının dönüşü esnasında kuleyle iletişimini koptuğu görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda, bölgede bulunan uydu alıcılarının neden olduğu girişim nedeniyle uçak ile kulenin irtibatı koptuğu anlaşılmıştır. Bunun durum üzerinde de Türk Telekomünikasyon Kurumu, uydu alıcısı üreticileriyle birlikte bir toplantı düzenlemiştir ve kullanılan uydulardaki EMC ölçümlerinin yapılmasını istemiştir. 1990’lı yıllarda kablosuz iletişim sistemlerinin yaygın bir şekilde kullanıma başlanması ile birlikte elektromanyetik girişim üzerine resmi

önlemler alınmış ve belirli standartlar çerçevesinde bu önlemler uygulanmaya başlanmıştır. Avrupa Birliği EMC Direktifi (EEC 89/336) bu önlemlere örnek olarak verilebilir. [18]

Son yıllarda gelişmelerden de bahsedelecek olursak, anahtarlama işlemeye dayanan güç dönüştürücülerinde Silisyum Karbür (SiC) ve Galyum Nitrür (GaN) bazlı geniş bant aralıklı (WBG) güç yarı iletken cihazları kullanılmaktadır. Çünkü bu WBG güç cihazları, geçmişte kullanılan IGBT'lere (Yalıtım Kapılı Bipolar Transistörlere) göre en az 10 kat daha hızlı anahtarlama yapabilmektedirler. Sonuç olarak daha yüksek verim ve daha küçük boyutlarda işlemler yapmaktadır. Lakin daha yüksek hızla ve yüksek frekansla çalışılması beraberinde geniş banda sahip yüksek frekanslı EMI'ı de getirmektedir. Şu an mevcut uluslararası standartlara göre 150 kHz olan sınırının önumüzdeki yıllarda daha da genişletilmesi konusu aktif olarak gündemdedir. Önümüzdeki süreçte birkaç kHz'den başlayarak 100 MHz'e veya daha fazlasına sahip olan bir bant genişliğindeki güç dönüştürücülerinin EMI'ın bastırılması beklenmektedir. [19]

Günümüzde artık vazgeçilmez bir hale gelen elektrikli ve elektronik birçok cihaz bulunmaktadır. Bu cihazların hem kendi kondisyonları için hem de etrafındaki diğer cihaz ve canlıların sağlıklarını için düzgün bir şekilde çalışmaları gerekmektedir. Bu şartlar içinse belirlenen standartlara göre üretilmesi ve çalışması planlandığı gibi faaliyet göstermesi beklenmektedir. Eğer ki bir cihazın belirlenen gürültü düzeyinde çalışmaması gibi bir problem meydana geliyorsa öncelikle problemin kaynağında çözülmesi beklenir. Bu durum mümkün olamıyor veya istenen düzeye kadar bir çözüm üretilemiyorsa artık bir filtre kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden Elektromanyetik Gürültü Filtresi kullanılmalıdır. Böylece hem cihazın sağlığı ve işleyişi için hem de çevresi için önemli bir çözüm gerçekleştirilebilmektedir. EMI Filtresi kullanıldığı taktirde gürültü, kaynaktan çözülmüş veya azaltılmış olacaktır. Gürültü azaldığında da etrafta herhangi bir tehdit unsuru olmayacağından emin olmayıacaktır. Sonuç olarak, 1900'lü yıllarda yaşanmış birçok kötü olay gibi bir olay bundan sonra gerçekleşmeyecektir.

1.3 EMI oluşumunun sebepleri

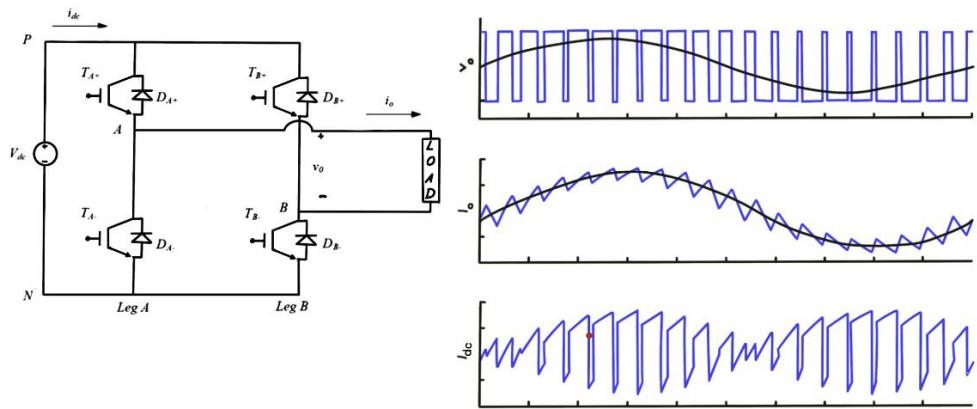
Güç elektroniği dönüştürücülerindeki ***ana EMI problemi***, eskiden daha sık kullanılan lineer güç kaynak sistemleri yerine daha iyi olan, hızla anahtarlama yapabilen güç kaynağı sistemlerine yani Anahtarlama Modlu Güç Kaynaklarına (SMPS) geçiş yapılmasından kaynaklanmaktadır. Anahtarlamalı güç kaynakları, daha önceden kullanılan lineer güç kaynaklarına nazaran daha küçük boyutlardadır. Fakat Elektromanyetik Girişime de sebep olmaktadır. [20]

Güç elektroniği dönüştürücülerindeki ***ana EMI kaynakları*** ise anahtarlama geçişleri esnasındaki yüksek $\frac{dv}{dt}$, yüksek $\frac{di}{dt}$, kontrol devreleri ve doğrusal olmayan bileşenlerdir. Anahtarlamalı güç kaynakları içerisindeki EMI'in çoğu; MOSFET'ler, transistörler ve sistem çıkışındaki doğrultucular

gibi ana anahtarlama cihazlarından kaynaklanmaktadır. İletilen gürültü, güç elektroniği sistemlerinin büyük çoğunluğunda önemli bir sorun teşkil edip, birtakım problemlere sebep olmaktadır. Örneğin, yüksek $\frac{di}{dt}$, ye sahip olan sistemlerde akım döngülerinin kaçak endüktansı, dönüştürücüde aşırı gerilime sebep olabilir. Bunların, akım geçici darbeleri güç sisteme anlık ciddi bozukluklar yaratabilir. Veya devrede sargı var ise sarginın çerçevesi ile arasındaki kaçak kapasitif bağlantıda yüksek $\frac{dv}{dt}$ ile birlikte manyetik elemanlarda ve elektrik motorlarında büyük bir kaçak akıma sebebiyet verebilir. Kontrol devreleri ise yüksek frekanslı darbeli sinyaller yüzünden EMI oluştururken, doğrusal olmayan bileşenler de devrenin sinyalini bozmaktadır. [15]

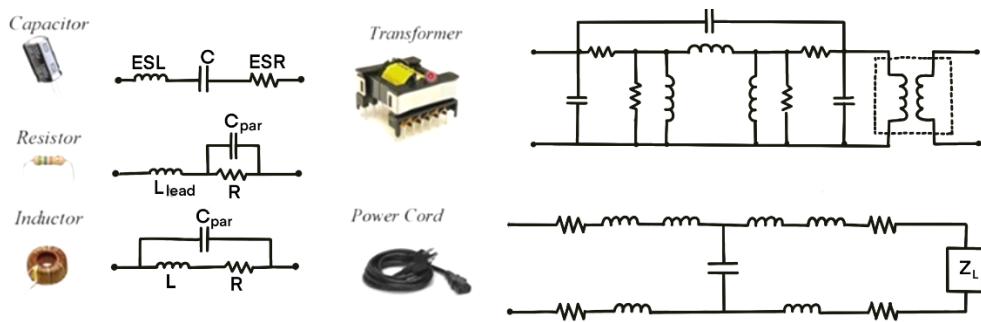
Anahtarlamalı dalga formları, anahtarlama gerilimi ve akımıdır. Şekil.3'te de görüldüğü gibi (komponentler ideal kabul edildiği zaman ortaya çıkan) gerilim ve akım çok keskin bir şekilde değişim göstermektedir. Normal şartlarda gerçek hayatı hiçbir şekilde bu şekilde bir ölçüm alınamamaktadır. Ve bu ölçüm sonucu ile FFT alırsak, frekanslarda oldukça fazla harmonikle karşılaşırız. Açıma kapama süremiz ne kadar az yani sinyalimizin keskinliği ne kadar fazla ise ölçüm sonucunda elde edeceğimiz frekans spektrumumuzdaki iletilen ve yayılan EMI aralığımız bir o kadar yüksek içeriye sahip olacaktır.

Sistemimizde bulunan kapasitörler, ölçümlerimizde akım gürültüsü olarak karşımıza çıkarken; direnç ve indüktörlerimiz ise gerilim gürültüsü olarak karşımıza çıkmaktadırlar.



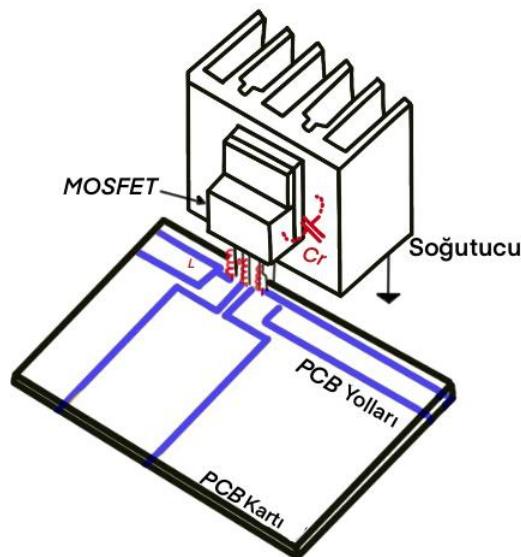
Şekil.3 Güç Dönüştürücüsü İçin Gürültülü Gerilim ve Akım Grafikleri

Örneğin bu dönüştürücüye girişinden tam sinüzoidal bir dalga formu verilmektedir. Görseldeki en üstteki volt grafiğinde ise girişten verilen sinüzoidal dalga ile anahtarlamayı görmekteyiz. Anahtarlama frekansı nedeniyle sistemde bir gürültü oluşmaktadır. Bu gürültü sonucunda Şekil.3'teki orta kısımda görülen sinyal çıktısını görmekteyiz yani tam sinüzoidal dalganın üzerine eklenen gürültü ile beraber olan hali görülmektedir. Sonuç olarak sisteme vermiş olduğumuz sinüzoidal sinyal üzerinde oluşan gürültü ile çıktıyı şekildeki en alt grafikte görüyoruz. [21]



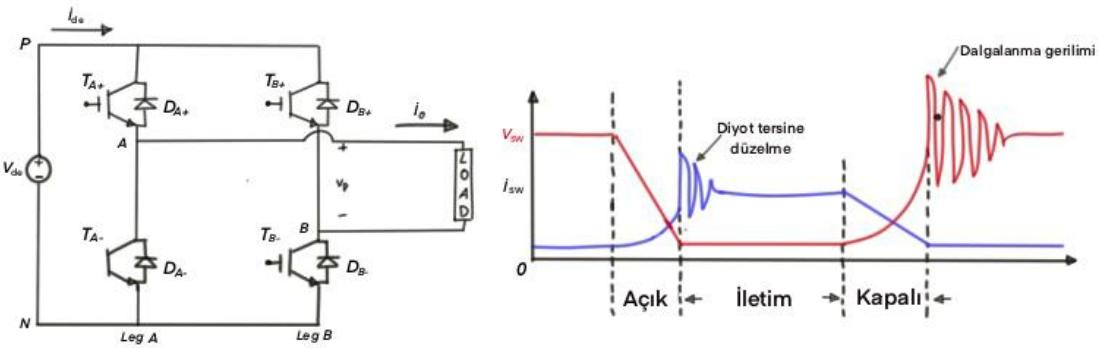
Şekil.4 Filtrede Kullanılan Komponentlerin Gerçek Ölçümler Esnasında Asıl Davranış Şematikleri

Devrede kullanılan; direnç, kapasitör, indüktör, transformatör ve iletken teli analiz ederken tek başlarına analiz etmememiz gerekmektedir. Aslında hepsi analiz esnasında bir RLC devresi gibi tepki vermektedirler. Bunlar komponentlerin ESR'sidir. Asıl parazitik etkiyi Şekil.4'teki komponentlerin davranış şematikleri üretmektedir. [21]



Şekil.5 MOSFET'te EMI Oluşan Kısım

PCB kart tasarımlarında kullanılan MOSFET'ler bir Heat-Sink yani soğutucuya beraber kullanılmaktadır. Bu soğutucu da toprağa bağlanmaktadır. Burada MOSFET ile soğutucu arasında fiziksel temas olmayan yani havada EMI oluşturmaktadır. Ve bu EMI, iletilen EMI'nin büyük bir çoğunluğunu içermektedir çünkü CM gürültüsü buradan geçmektedir. Gene aynı şekilde IGBT'lerde ise üç terminal arasında gözle görülmeyen bir kapasitans olduğunu söyleyebiliriz ve bu durum da EMI'ı oluşturmaktadır. Çünkü herhangi iki nokta arasında bir potansiyel fark var ve bu iki nokta arasında dielektrik ortam bulunuyorsa burada kapasitif bir etki oluşmaktadır.



Şekil.6 Anahtarlama Yapıldığı Esnada Gerilim ve Akım Grafiğinde Gözlemlenen Atmalar

Anahtarlama frekansımız ne kadar yüksek ise o kadar EMI oluştuğunu biliyoruz. Şekil.6'da da bu durum ifade edilmektedir. Anahtar açıldığı ve kapandığı zaman sinyalimizde bir dalgalanma meydana gelmektedir. Bu dalgalanmalar bizim FFT sonucumuzun temelini oluşturmakta ve içerisinde birçok farklı frekansa sahip harmonikler bulundurmaktadır. [21]

Genel olarak yüksek anahtarlama frekanslarında çalışmak, büyük PCB'lerde ve uzun bağlı kablolarla Yayılan (Radiated) EMI'ı artırmaktadır. Çözüm olarak, tasarlanan kartlarda simetrik tasarım mimarisi ile veya devrede kullanılan komponentlerin yerleştirme yönergelerini takip ederek ve ayrıca önerilen uzaklıktaki bölgelere komponentleri yerleştirerek, daha fazla iyileştirme elde edebiliriz. [22] Veya bu gürültü, hızlı anahtarlama geçişlerinden yani yüksek anahtarlama hızından kaynaklandığı için geçişlerin yavaşlatılması durumunda da EMI'in azalması görülecektir. Tabi ki bu durum daha yüksek frekans aralığında çalışıldığı taktirde daha çok etki göstermektedir. [17] Bir SMPS'in çalıştığı frekans değerinin, birkaç katı frekansındaki önemli emisyonlarının olması gayet normaldir ve oluşturduğu bu emisyonların, iletlenen ve yayılan biçimdeki gürültülerini kendiliğinden engelleyebilir. Ancak çoğu zaman ortaya çıkan gürültü için ek filtre gerekmektedir. Bu filtre de büyük bir hacme sahip olduğu için güç kaynağını daha büyük ve maliyetli duruma getirmektedir. [20]

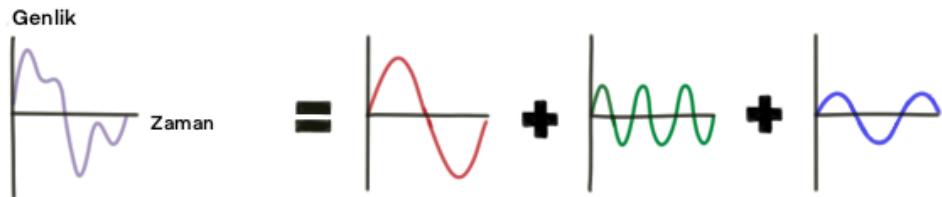
1.4 FFT ve Freq Spec Nedir?

Alternatif akım güç sistemlerinde genellikle elektrik enerjisi sinüzoidal bir düzgün dalga halinde, sabit frekansta olması beklenmektedir. Lakin gerçek hayatı böyle olmamaktadır. Çünkü gerek devredeki lineer olmayan komponentler gerekse kullanılan dönüştürücüler ile发电机lerin yapısı nedeniyle tam sinüzoidal dalga şekli gözlemlenmemektedir. Bu dalgadaki sapmaların olması da genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması şeklinde ifade edilir. Harmoniklerin oluşum sebepleri ise, başlıca lineer olmayan komponentler olmak üzere, demir çekirdek içeren elemanlar (Generator, transformator, motor, bobin gibi), Tristörler ve IGBT'lerin (Insulated Gate Bipolar Transistor) davranışlarıdır. Sonuç olarak elde edilen sinüzoidal olmayan yani bozuk sinüs halindeki dalgaların da

Fourier Serisi açıldığı zaman (varsayımsa), frekansı temel frekansa denk olan bir temel bileşen ile frekansı temel frekansın katları olan elimizdeki sinyalin, harmoniklerinin toplamını elde edebiliriz. Basit olarak anlatmak gerekirse herhangi bir fonksiyonun, içerisindeki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamı halinde yazılmasıdır. [23]

Fourier dönüşümü iki türden oluşmaktadır: Ayrık Fourier Transform (DFT) ve Hızlı Fourier Transform (FFT). DFT, ayrık bir zaman diliminde, rastgele veri noktasından oluşan herhangi bir zaman sinyalidir. FFT ise, hesaplama olarak DFT işlemini yapan algoritmadır.

Örnek bir FFT: (Aşağıdaki Şekil.7'te gösterildiği gibi elimizdeki karmaşık sinyalin içerisinde barındırdığı farklı frekans ve genlikteki sinyallerin toplamı şeklindedir.) [13]



Şekil.7 Bir Zaman Sinyalinin Fourier Dönüşümü [13]

Sinyalde oluşan harmonikler istenen bir şey değildir. Gerilimdeki harmonikler, lineer olmayan yükün meydana getirdiği harmonik akımlara ve şebeke parametrelerine doğrudan bağlıdır. Burada oluşan harmonikler şebeke ve alıcı için çok ciddi sıkıntı yaratmaktadır. Harmoniklere örnekler verecek olursak: aşırı yüklenme, sistemin hatalı ölçümü, sistemin aşırı ısınması gibi. Şebeke tarafında oluşan rezonans, kondansatörlere zarar verebilir ve sistemi işlevsiz hale getirebilir. Ayrıca sistemin kaybını da yüksek oranda attırıp, koruma sisteme de zarar vermektedir. [23]

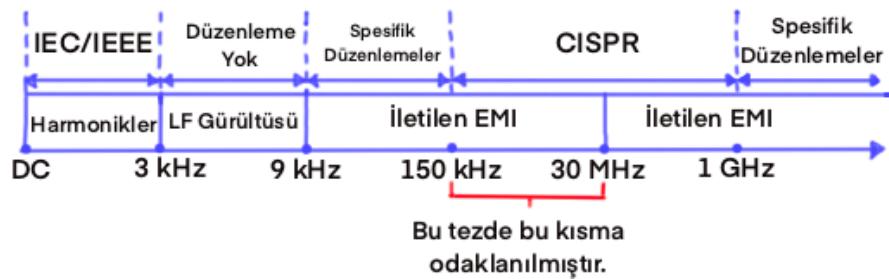
Şebeke harmoniklerin etkisini sınırlamak için hem akım hem de gerilim için geçerli olan 'Toplam Harmonik Distorsyonu' (THD) yöntemi kullanılmalıdır. Bu yöntem mevcut harmoniklerin tek tek temel bileşene göre yüzdesi cinsinden kullanılmaktadır. Ayrıca harmonikleri etkisiz hale getirmek için de uygun filtre sistemleri kullanılabilir.

Kullanılacak filtreler için öncelikle sistem analiz edilmelidir. Sisteme birkaç tane gerilim ve akım örneklemeleri alınır. Ardından bu değerler kullanılarak tüm parametrelerin fazları, toplam ve ortalama değerleri ile birlikte analiz için gerekli olan büyüklükler hesaplanmaktadır. Bu eyleme de 'Hızlı Fourier Transformu' (FFT) denmektedir. [13]

Frekans Spektrumu: Elektromanyetik Spektrum ya da Frekans Spektrumu içerisinde temel bir frekansı baz alarak birçok sinyalin frekansını, dalga boyalarına veya enerjilerine göre hepsinin tek bir

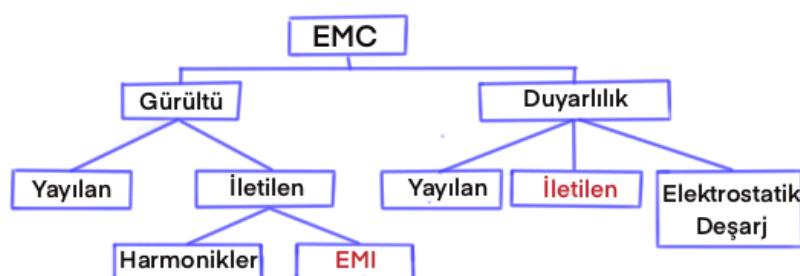
çatı altında toplanmasıdır. Sinyalin içindeki her bir frekansın tane tane gösterilmesi ve en sonunda birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu spektrumda herhangi bir fiziksel ortama ihtiyacımız yoktur yani elektromanyetik alanla sürekli olarak etkileşim içindedirler. Herhangi bir materyalin frekans spektrumu, bize o materyalin çevresine yaydığı farklı frekanslardaki sinyallerini göstermektedir.

Frekansı ana kategoriler halinde bölecek olursak 3 parçaaya bölmemiz gerekmektedir: Radyo dalgaları, Mikrodalgalar ve 300GHz'in üzerindeki frekanslar. Radyo dalgaları, 3 Hz'den 300 MHz'e kadar giden frekanslardır. Genellikle bilgi iletiminde kullanılmaktadır. Mikrodalgalar, 300 MHz'den 300 GHz'e kadar giden frekanslardır. Genellikle uydu yayını, cep telefonu ve internet gibi dünya kapsamında yayın için kullanılmaktadır. 300 GHz'in üzerindeki frekanslar ise, X işinleri ve gama işinleri gibi frekanslarda yayılan sinyallerdir. [24]



Sekil.8 Gürültü Spektrumu ve Yönetmelikler

Biz de frekans spektrumumuzu PSIM ve LTSpice uygulamaları üzerinden çizdiriyoruz. Çalışmış olduğumuz tezde kullandığımız dönüştürücü ile kendimize referans aldığımız standartlar neticesinde frekans spektrumumuz 150 kHz ile 30 MHz arasında oluşturmaktadır.



Sekil.9 İletilen EMI/EMC için Hiyerarşik Ölçüm Diyagramı [15]

Şekil.9'da gösterilen, EMC için hiyerarşik ölçüm diyagramında da gördüğümüz gibi bizim için önemli olan oluşan EMI'yı ölçülebilen halde ayıabileceğimiz 2 türü vardır:

1. Kablolar aracılığıyla yani **iletim yoluyla oluşan EMI (Conducted interferences)**, genellikle 10kHz ile 30MHz arasındadır. İletken boyunca akan ve yolun sonundaki diğer çalışan cihazları etkileyen

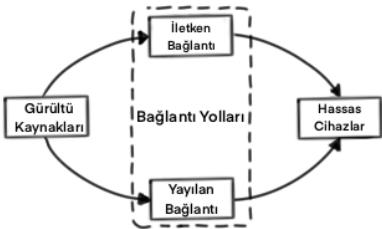
gürültü akımlarından kaynaklanmaktadır. Örneğin teller, kablolar ve PCB yönlendirmesi gibi fiziksel bağlantılar. Böylece cihazın enerji hatlarında akan gürültü akımı tüm enerji dağıtım şebekesine ulaşarak daha fazla elektromanyetik enerji yayabilir. İletilen EMI da Ortak Mod (Common Mode – CM) ve Diferansiyel Mod (Differential Mode – DM) olarak ikiye ayrılmaktadır.

İletilen EMI Modelleme (Conducted EMI): İletilen EMI modelleme sırasında iki yöntem kullanılmaktadır: Zaman düzleminde modelleme ve frekans düzleminde modelleme. Zaman düzleminde modelleme yapılırken, sistemdeki tüm komponentlerin ayrıntılı bilgileri ile geniş bant modellemesi incelenir. Simülasyonları yapılrken sonucu genellikle uzun süreleri bulmaktadır. Frekans düzleminde modellemede ise gürültü kaynaklarının matematiksel modelleri üzerinden bir analiz yapılmaktadır. Bu modellemede de iki farklı yöntem kullanılır: Davranışsal modelleme ve Filtre tasarımlı odaklı modelleme. Davranışsal modelleme, sistemin davranışına dayalı bir modelleme tipidir. Davranışsal modelleme EMI gürültünün olduğu yerlerde yani iletken yollarıyla ilgilenmez, direkt olarak güç dönüşümünün olduğu yere ve ayrıca ekstra olarak devreye dahil edilecek devreler de dahil edilecek biçimde, gürültü kaynağı ile toplam empedansı kullanarak hesaplama yapar. Sonuç olarak AC çıkışını belirlenir. Bu yöntem bizlere EMI tahminini yüksek oranlarda doğru tahmin edebilmemizi sağlayabilmektedir. Filtre tasarımlı odaklı modelleme ise filtrelerin tasarımlarına dayanmaktadır. İletim hatları ve de iletkenlik durumlarını ayrı ayrı inceleyerek滤re tasarlanması ile yapılmaktadır. Modelde CM ve DM gürültüleri için ayrı modeller mevcuttur. Ancak son yıllarda, bu modelleme kullanılırken CM ve DM eşdeğer devreleri ayrı düşünülmeden, karışık modlu elektromanyetik gürültü olarak düşünülmektedir. Tahminsel olarak bakıldığı zaman diğer modellemeye nazaran daha düşük netlikte tahminler elde edilebilmektedir.

Bu gürültünün tespiti sırasında, en yaygın olarak kullanılan Uluslararası Elektromanyetik Uyumluluk Standartlarının çoğu, radyo girişimi üzerine olan Uluslararası Radyo Parazitleri Komitesi (CISPR) ve Elektromanyetik Uyumluluk Teknik Komitesi (TC) tarafından geliştirilmektedir. Bu standartların çoğu 9 kHz üzerindeki frekanslar için oluşturulmuştur. İletilen EMI ölçümleri esnasında, genellikle maksimum olduğu nokta istenir. Yani sinyalin tepe (peak) yapmış olduğu kısmı incelenir.

CISPR 11: Yüksek güçlü elektronik sistemler ve ekipmanlar için İletilen EMI ile ilgili test standartlarını belirler. Test bandı 150 kHz ile 30 MHz arasında ve karışık limit değerlerine sahiptir.

CISPR 16: İletilen EMI için, test yöntemleri, test ekipmanları, test düzenlemeleri ve test noktaları için düzenlenmiştir.



Sekil.10 EMI Sınıflandırılması ve Yöntemleri

EMI daha önce de bahsedildiği gibi 2 yolla yayılabilir olmaktadır. Sekil.10'da ise bu durum bir şekil üzerinden gösterilmiştir. Üst kısmında İletken Bağlantı yoluyla yayılan EMI, alt kısmında ise Yayılan Bağlantı yoluyla yayılan EMI gösterilmektedir. EMI, gürültü kaynağından çıkararak etrafındaki diğer cihazlara ulaşmaktadır ve şiddetine göre farklı tepkiler oluşturmaktadır.

2. Radyasyon yani *elektromanyetik yol ile yayılan EMI (Radiated interferences)*, 30MHz ile 1GHz arasındadır. Elektromanyetik enerjinin doğrudan cihazdan radyasyon yoluyla yani boşluk veya dielektrikler aracılığıyla aktarılmasıından kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik enerjinin bu transferi esnasında herhangi bir iletken bir materyal gerekmemektedir. [20] Bu EMI, anahtarlama güç kaynağındaki CM ve DM akımlarından oluşmaktadır ve CM akımı daha baskındır. Gürültü üzerinde analiz yapıldığı zaman, yayılan gürültünün (Conducted EMI) iletim halindeki gürültüye (Radiated EMI) göre kapasitör ve bobin hesapları daha karmaşık olduğu için modellenmesi ve analizi daha zor yapılmaktadır. [20]

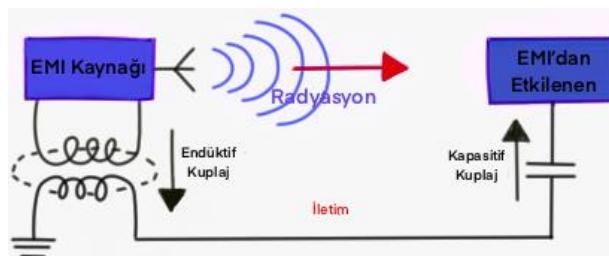
Yayılan EMI Modellemesi (Radiated EMI): Yarı iletken cihazların açılıp kapanma sürecindeki anlık gerilim ve akım değişimleri, elektriksel ve manyetiksel olarak değişikliklere sebep olacaktır. Anahtarlama cihazlarında oluşan yüksek frekanslı akım döngüleri, bizim bildiğimiz tipik manyetik alan kaynağı gibidir. Yayılan EMI da yakın ve uzak alan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. [26] Yakın olan yayılan EMI, ölçüm noktası ile kaynak arasındaki mesafesi $< \frac{\lambda}{6}$, dir (λ , EMI'ın dalga boyu). Uzak olan yayılan EMI ise ölçüm noktası ile kaynak arasındaki mesafe $> \frac{\lambda}{6}$, dir. [18] Devrenin bileşenlerinin yayma modellemeleri için, ilk öncelikle kapasitör ve induktörlerin üç boyutlu modellemelerinin CST yazılımında kurulması gerekmektedir. Ardından devrenin üç boyutlu bir modeli üzerinden elektromanyetik alan modeli ile gürültüyü yayma karakteristiklerinin analizi, simülasyon yardımıyla bulunabilir. Bu EMI için, bant genişliği çok önemlidir çünkü güç dönüştürücüsünün anahtarlama frekansı 240 kHz'ten küçük ise; yayılan EMI analizi, PCB'nin hatları için empedanslar ihmali edilemez düzeydedir. Yapılan bir çalışmada, Buck dönüştürücüsü kullanılarak oluşturulmuş PCB kartlardaki oluşan EMI'larda; devredeki iletim hatlarının uzunluğunun, oluşturulan karttan daha uzak alanlara doğru oluşan EMI'ın yayılmasında daha büyük bir etken olduğunu ve devre kablosundaki CM akımının yayılan EMI üzerinde ana etmen olduğu bulunmuştur. Genel anlamda yayılan EMI

için CM gürültüsünden kaynaklandığı söylenebilir. Bu gürültünün azaltılması için CM indüktörü ile Y-kapasitörünün özenle seçilmesi gerekmektedir.

Bu gürültünün ölçümlü esnasında 3 farklı ölçüm ve hesaplama yapılmaktadır: Dönüştürücü haricinde oluşan yayılan EMI ölçümlü, dönüştürücüdeki yayılan EMI ölçümlü ve girişim için EMI ölçümlü. Yayılan EMI için de birtakım sınırlamalar ve standartlar bulunmaktadır.

CISPR 16-1-4, CISPR 16-2-3, CISPR 11 ve IEC 61000 gibi birkaç farklı standart referans alınarak ölçümler alınmaktadır.

Ayrıca her bir cihaz farklı özelliklere sahip olduğu için EMI uygunluğu her zaman için zorunlu bir hal almamaktadır. Çünkü yüksek gerilimli DC, $AC = 1000V$ veya $DC = 1500V$ 'tan daha yüksek güç elektroniği ekipmanları için CISPR 11 standartları mevcut değildir. [26]



Sekil.11 Yayılan ve İletilen EMI Gürültüsü İçin Bir Gösterim

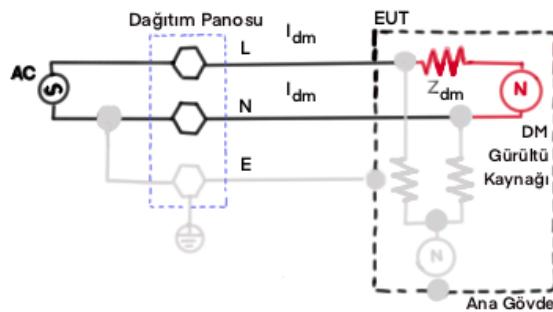
1.4 EMI Türleri

Diferansiyel Mod Gürültüsü

Güç elektroniği devrelerinde gürültü oluşması büyük bir problem yaratmaktadır. Oluşan gürültü sinyalleri gerçek sinyalin üzerine binerek, çıkışta istenmeyen sinyallerin oluşmasını sağlar. Bunun sonucunda da devre istediği gibi çalışmaz ve dolayısıyla verimliliği düşer. Gürültünün asıl sinyali bozduğu bu devrelerde, filtreleme büyük önem taşımaktadır. Filtreleme yapmak için önce devrede oluşan gürültüyü tanımlamak gereklidir. Eğer devredeki gürültüyü net olarak tanımlamadanfiltrelemeye geçirilirse büyük hata yapılır ve asıl sinyalin daha da bozulmasına sebep olunabilir. Elektromanyetik girişim devrelerindeki gürültüler diferansiyel mod ve ortak mod gürültüsüdür. Bu gürültüleri birbirinden ayırmayı en iyi yolu devreden geçen akımlara bakmaktır.

Diferansiyel mod gürültüsü, devredeki anahtarlama elemanlarının çok yüksek frekanslı anahtarlamalarından yani yüksek $\frac{di}{dt}$ değerlerinden kaynaklanmaktadır. Anahtarlama elemanlarının anahtarlama frekansı genellikle 2 MHz bandının altında olduğu için diferansiyel mod gürültü de genellikle 2MHz bandının altında kalır. Diferansiyel mod gürültüsü, L ve N hatlarından farklı yönde

akmaktadır. Bu gürültü, L veya N hatlarının birinden girerek diğerinden geri döner ve iki akımın da genlikleri birbirine eşittir. Diferansiyel mod gürültüsünü belirlemek için L veya N hatlarının birinden geçen akım '-' ile çarpılır ve diğer hattan geçen akımla toplanır. Ardından elde edilen sonuç ikiye bölündüğü zaman diferansiyel mod gürültüsünün genlik değerine ulaşılmış olur. Diferansiyel mod gürültüsünü engellemek için pasif filtre devreleri ve aktif filtre devreleri kullanılabilir. Diferansiyel mod gürültüsü yüksek frekanslarda meydana geldiği için, pasif alçak geçiren filtreler bu gürültüyü engellemeye yardımcı olur. Ayrıca bu gürültüyü engellemek için diferansiyel mod bobinleri kullanılabilir. Gürültünün nasıl filtreleneceği tezin ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır.



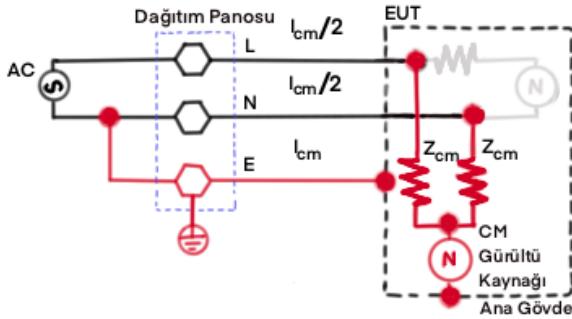
Şekil.12 Diferansiyel Mod Gürültü Akımının Devre Şeması

Şekil.12'de Hat 'L' işaretini ile, Nötr 'N' işaretini ile, Toprak ise 'E' işaretini ile gösterilir. 'EUT' ekipman altında Test Edilen Cihazı temsil eder. Görselde görüldüğü gibi, diferansiyel mod gürültü akımı devreye L hattından girerek N hattından geri döner ve toprak hattı üzerinden herhangi bir akımı görürmez. L hattından akan diferansiyel mod gürültü akımının ters işaretlisi N hattından akar. [27]

Ortak mod gürültüsü:

Ortak mod gürültüsü, devredeki L ve N hattından aynı yönde olarak geçer. Devredeki elemanlar ile devre hattının toprağı arasında görünmez bir kapasite oluşmaktadır. Oluşan bu kapasite, ortak mod gürültüsünün toprak üzerinden geri dönerek iletim yolunu tamamlamasına neden olur. Diferansiyel mod gürültüsüne yüksek $\frac{di}{dt}$ değerleri sebep olurken, ortak mod gürültüsüne yüksek $\frac{dv}{dt}$ değerleri sebep olmaktadır. Ortak mod gürültüsünü belirlemenin en iyi yolu, diferansiyel mod gürültüsünde olduğu gibi devrenin L ve N hattından geçen akımlar ölçülmektir. Devrenin L veya N hatlarının birinden geçen akımlar, diferansiyel mod gürültüsü ve ortak mod gürültüsünün yarısının toplamına eşittir. Diğer hattan geçen gürültü akımı ise diferansiyel mod gürültü akımının negatif işaretlisi ve ortak mod gürültüsünün yarısının toplamına eşittir. Devrenin L ve N hatlarından geçen akımlar toplanırsa, negatif işaretli ve pozitif işaretli diferansiyel mod gürültü akımı birbirini yok ettiği için elimizde kalan akım sadece ortak mod akımı olur. Gerçek güç elektroniği devrelerinde hat empedansları genellikle eşit olmaz. Eğer dönüştürücünün çıkışında bir ortak mod gürültüsü varsa ortak mod gürültüsü, yüksek frekanslı

diferansiyel mod gürültüsüne dönüşecektir. Bu yüzden devrenin girişinde ortak mod gürültüsünü azaltmak gerekmektedir. Daha sonra hat empedansları eşitlenmelidir. Ortak mod gürültüsü, ortak mod bobini ve çeşitli pasif filtre komponentleri aracılığıyla engellenebilir. Ortak mod gürültüsünün filtrelenme metotları çözümü tezin ilerleyen kısımlarında tartışılacaktır.



Şekil.13 Ortak Mod Gürültü Akımının Devre Şeması

Şekil.13'te I_{cm} ortak mod gürültüsünü, I_{dm} ise diferansiyel mod gürültüsünü temsil etmektedir. Ortak mod gürültüsü, L hattından ve N hattından aynı yönlü olarak akar. L ve N hatlarından akan akımın değeri ortak mod gürültü akımının yarı genliğine eşittir. [27]

Şekil.12 ve Şekil.13'te verilen diferansiyel mod gürültüsü ve ortak mod gürültüsünün nasıl ölçülebileceğini bir örnek üzerinden inceleyelim. Örneğin Şekil.13'teki devrede L hattından $2\mu A$, N hattından $5\mu A$ akım geçtiğini ölçersek, bu ölçümlerden yola çıkarak CM ve DM bileşenlerini hesaplayabiliriz.

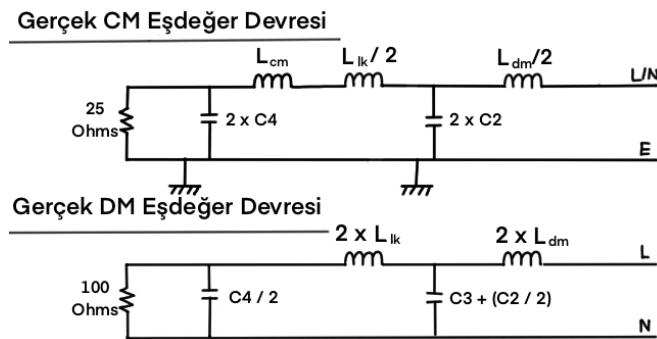
$$I_L = \frac{I_{cm}}{2} - I_{dm} = 2\mu A \quad (1)$$

$$I_N = \frac{I_{cm}}{2} - I_{dm} = -5\mu A \quad (2)$$

$$I_{dm} = -3,5\mu A \quad (3)$$

$$I_{cm} = 3\mu A \quad (4)$$

I_{cm} ve I_{dm} akımlarını bu şekilde hesaplamış oluruz. [27]

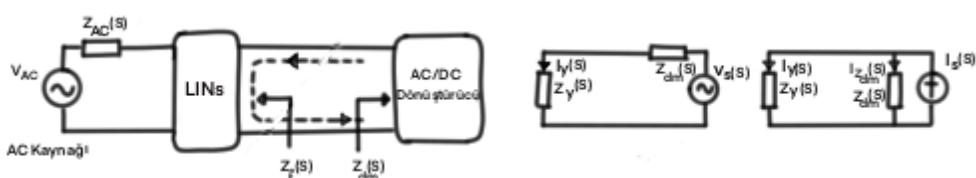


Şekil.14 (a) CM ve (b) DM Gürültülerin Eşdeğer Devresi

Şekil.13'te görüldüğü gibi ortak mod gürültüsü L ve N hattından aynı yönde akar ve Şekil.14 (b)'de gösterildiği gibi bu iki hat sanki birleşmiş gibi kabul edilmektedir. Ortak mod gürültüsü için LISN cihazındaki iki adet 50 ohm değerindeki dirençler paralel olarak davranışır ve eşdeğer empedansı 25 ohm olur. Bunun sebebi L ve N hattının ikisinin de akımı aynı yönde geçirmesi ve ikisinin de toprak hattına bağlanmasıdır. Bunun sonucunda L ve N hattı tek bir hat gibi davranışır. Diferansiyel mod gürültüsünün eşdeğer devresini oluşturacak olursak Şekil.14 (a)'daki gibi diferansiyel mod gürültüsü devreye L hattından girip N hattından çıkar ve bu akım LISN cihazındaki iki adet 50 ohm değerindeki dirençleri seri olarak görüp ve toplamda 100 ohm değerinde bir direnç değeri oluşturmaktadır. [27]

1.5 EMI Modelleme

Gürültü kaynaklarının filtrelenmesi ne kadar büyük bir öneme sahipse gürültü kaynaklarının modelleme de aynı derecede öneme sahiptir. Diferansiyel mod gürültüsünü daha iyi analiz edebilmek için bu gürültü kaynağının modelleme de inceleneciktir.



Şekil.15 Diferansiyel Mod Gürültüsünün Modelleme

Şekil.15'te güç dönüştürücüsünün kaynağa nasıl bağlı olduğu gösterilmiştir. Şekil.15'teki (b) ve (c) devreler, diferansiyel mod gürültüsünün thevenin ve norton eşdeğer devresidir. Thevenin ve norton eşdeğer devreleri, diferansiyel mod gürültüsünü daha anlaşıılır kılacaktır. Şekil.15 (b)'deki devrede gürültü, gerilim kaynağı ve gürültü empedansı seri olarak modellenir. Şekil.15 (c)'deki devrede ise

gürültü, akım kaynağı ve gürültü impedansı paralel olarak modellenir. Şekil.15 (c)'deki açık döngü kazancı ise $G(ol)$ ile temsil edilir ve denklemi:

$$G(ol) = I_r(s) = \frac{Z_{dm}(s)}{Z_{dm}(s) + Z_r(s)} \quad [28]--- \quad (5)$$

1.6 İletilen EMI'daki CM ve DM in verdiği problemler

Daha öncesinde sistemde oluşan Ortak Mod Gürültüsü ve Diferansiyel Mod Gürültüsünden bahsetmiştik. Bu gürültüler yüksek hızda anahtarlamalar esnasında, belirlenen gürültü sınırlarını aşip bağlantı yolu boyunca kayıplara sebep olacaklardır. Devrede oluşan gürültüler nedeniyle eğer yüksek derecelerde gürültü oluşuyorsa, filtre ve diğer çözüm yöntemlerinin maliyetleri de artış gösterecektir. Her ikisi de sistemde istenmeyen sıcaklıklara çıkışmasına neden olabilir. Bu gürültüler olduğu zaman sistemlerde istenmeyen yüksek kaçak akımlar oluştuğundan ve de hem induktörlerin hacminin azaltılması hem de kapasitörün hacminin fazla artış göstermemesi için EMI Filtre kullanımı oldukça önemlidir. [17]

Ortak Mod Gürültüsü genellikle büyük bir alanı içermekte ve sisteme farklı gürültüler eklemektedir. Sistem içinde yanlış iletişim hatalarına, çeşitli bozulmalara ve sahte iletilen sinyaller sebep olmaktadır. Ölçüm esnasında da hassas ölçüm cihazlarını arızalandırabilir veya gürültüyü sanki doğru veriymiş gibi yorumlamamıza sebep olabilir. Bu gürültü daha çok güç kaynağı hatlarındaki gürültü gerilimi yerine, güç kaynağı hattı ile referans arasında bir gürültü gerilimi oluşturmaktadır.

Diferansiyel Mod Gürültüsü ise sinyal veya güç hattında gürültü gerilimi oluşturmakta ve AC gerilimi bozmaktadır. Bu gürültü ise bir döngü içinde olduğu için, sistemde sürekli bir halde bulunmakta ve sistemi yormaktadır. [28]

Sistemlerde oluşan EMI yüzünden istenilen performansa ulaşılamayabilir. EMI yüzünden; kullanılması planlanan veya istenilen güçte azalmalar ve kayıpların artması, aşırı ısnımalar, aşırı akımların oluşması, sistemin bozulması, komponentlerin arızalanması, iletilmesi istenilen bilgilerin iletilememesi gibi problemler oluşmaktadır. Bazı durumlarda, oluşan bu EMI'yi yok etmek için kullanılan filtreler ve topraklamalar yetmeyebilir. Bu tarz problemlerden dolayı EMI filtre kullanılmalıdır. Kullanışı hem rahat olup, istenildiği zaman devreye alınabildiği gibi hem de çözüm olarak diğer çözüm yollarından daha uyguna gelebilmektedir. Ayrıca üretilen cihazların da güvenlik amaçlı sahip olmaları gereken standartlar yüzünden EMI filtrenin kullanılması gerekmektedir. Kullanıldığı taktirde sistemlerin güvenilirliğini ve ömrülerini arttırmayı ve bakım maliyetlerinde de kar sağlamaktadır. [29]

1.7 EMC (Electromagnetic Compability):

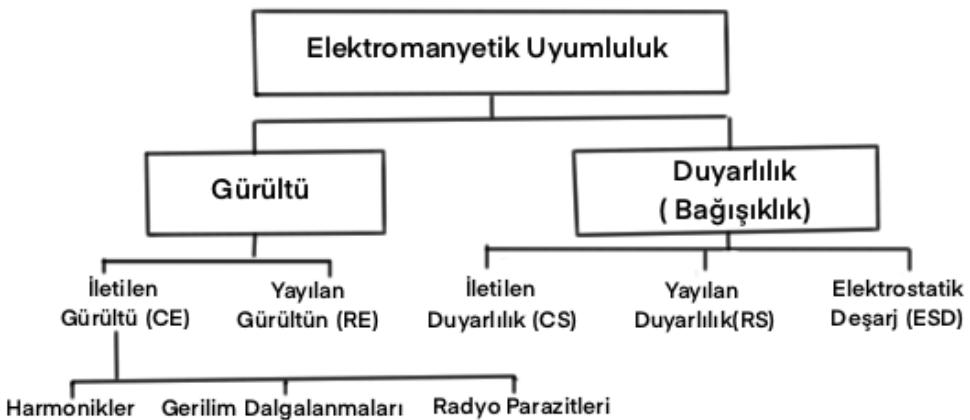
EMC dediğimiz kavram Türkçe karşılığı Elektromanyetik Uyumluluktur. EMC, elektrikli veya elektronik cihazların çalışıkları esnada etrafındaki etkileşime girebilecek cihazlar var iken birbirleriyle etkilenmeyecek şekilde ve çalışması planlandığı gibi uyumlu çalışmasıdır. Yani burada öncelik olarak elektriksel gürültü olarak sistemin güvenliği söz konusudur. Elektromanyetik girişim olarak bahsettiğimiz gürültü 2 farklı halde iletildiğinden bahsetmiştim. Şekil.16'da ise EMC'nin alt kolları ile birlikte bir oluşum haritası bulunmaktadır. EMI oluşturan cihazların, güvenliğini veya etkileşimlerini incelemek için çeşitli EMC testleri yapılmaktadır. Bu sayede standartlarda istenen kriterlerin uygunluğu doğrulanabilmektedir. EMC testleri, cihazların; üretim, paketleme ve satış süreçlerinde dahi yapılmaktadır. Bu testler sayesinde, sistemlerde oluşan gürültü azaltılır ve oluşan problemler üzerinde bağışıklık sistemlerinin geliştirilmesi için teknik ve teknolojik kurallar belirlenmektedir. EMC için 2014/30 EU Direktifi tarafından çözüm yönergeleri verilmektedir ve bu direktif baz alınmaktadır. Temel amaçları: Mümkin olduğunda tüm emisyonların düşük olması ve de bağışıklıkların yüksek olmasıdır. EMC ile ilgili temel olarak verilen direktifler genel olarak şunlardır:

- Ekipmanlar piyasaya sürüldüğü zaman veya kullanıldığı zaman mevcut EMC kurallarına uyması gerekmektedir.
- Yetkili makamlar tarafından, uyumsuzluk tespit edildiği takdirde mühendislik uygulamalarıyla birlikte gereken önlemleri almak durumundadır. [31]

Elektromanyetik girişim probleminde 3 etkene dikkat edilmektedir:

- Kaynak
- Kuplaj Yolu
- Etkilenecek olan sistem

EMC test standartlarına bakacak olursak: EN 55014-1, ev ve benzeri yerlerde kullanılan cihazlar için yayılıma ve bağışıklığa bakılmaktadır. EN 61000 / EN 60601 (Alt firmaları), yerleşim birimleri, ticari ortamlar, endüstriyel çevreler için geçerli standarttır. [31]



Şekil.16 Güç Elektroniği Açısından Temel EMC Kategorileri [32]

EMC Standartları:

Şu anda elektriksel komponentlerde oluşan EMI'lar için uluslararası standartları, Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun (IEC) alt komitesi olan Radyo Frekansı Girişimi için Uluslararası Özel Komitesi tarafından (“Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques” - CISPR) belirlenmektedir. Bu kuruluşun amacı ışına kaynaklı EMC problemleridir. Günümüzde IEC ile benzer alanlarda çalışmalar yapmaktadır. İlk kez 1946 yılında EMC ile alakalı ölçüm prosedürleri ve sınırlandırmalarını yayımlamışlardır. Bu standartlar sivil standart olarak sayılır ve iç/dış mekanlarda, evlerde, ticari, endüstriyel ve otomotiv alanlarında kullanılmaktadır. Bu standartlar haricinde Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) ve de ABD Ordusunun kullandığı (MILSTD) standartları da farklı alanlarda kullanılmaktadır. [33] Aşağıdaki Tablo.1'de de CISPR standartlarına karşılık gelen benzer FCC standartının özelliklerini verilmektedir. Ayrıca CISPR standartlarında hertzlere göre kaç dB düşüş beklendiği (limitleri) gösterilmiştir.

	Frekans Aralığı	Uzaklık
CISPR	30 MHz – 1 GHz	10 m (Class B) 30 m (Class A)
FCC	30 MHz – 40 GHz	10 m (Class B) 30 m (Class A)

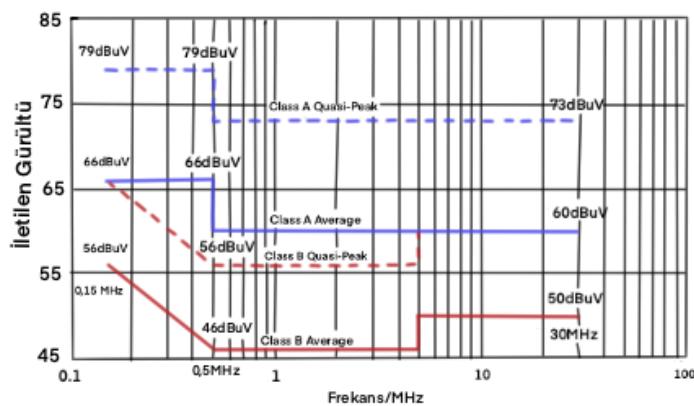
Class B: Ev Aletleri için / Class A: Sanayi Kullanımı içindir.

Tablo.1 CISPR ve FCC Standartlarının Özellikler [10]

Frekans (MHz)	μ V QP (AV)	dB μ V (AV)
0.15	1995 (631)	66 (56)
0.5	631 (199.5)	56 (46)
0.5-5	631 (199.5)	56 (46)
5-30	1000 (316)	60 (50)

Tablo.2 CISPR İletim Yoluyla Gürültü Yayılma Limitleri [10]

Herhangi bir devrede EMI gürültüsünü düzenli olarak sabit tutmak için yapılan filtrelerde, uygulması gereken standartları ve EMC gerekliliklerini temel alınırken, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) ve Uluslararası Özel Radyo Girişimi Komitesi'nin yapmış olduğu CISPR 11'den CISPR 32'ye kadar olan bir standartlar ailesi takip edilmektedir. (Bu çalışmada ise CISPR 32 Class B standardını referans alınmaktadır.) CISPR 32, Multimedya Ekipmanları (MME) için uluslararası bir radyo parazit standardıdır. Bu standart, radyo spektrumu için yeterli düzeyde koruma sağlayan gereklilikleri belirleyip ölçümün ve sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamaya yönelik prosedürleri belirlemektedir. Class B standardı 150 kHz ile 30 MHz arasında iletilen gürültü için ve konut ortamları hizmetlerine yeterli koruma sağlanması amaçlayan standarttır. B Sınıfı standartı A Sınıfı standartına göre daha katı ve limitleri daha sıkı bir standarttır. A sınıfı standartı ise genellikle B sınıfına dahil olmayan yani ticari, endüstriyel ve iş ortamında kullanılmak üzere tasarlanmış ayrıca daha esnek halde limitleri olan standarttır. Ancak her ekipman A sınıfına uygun olmalıdır. [22]



Şekil.17 CISPR/EN 55022/32 Class A ve Class B'deki iletilen EMI Limitleri (Conducted Emission Limits) [25]

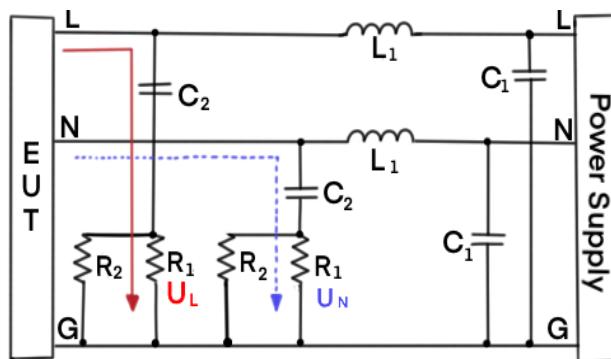
EMI ölçümleri esnasında, uygulanabilir üst frekans 108 MHz olan CISPR 25 standartı haricinde kalan CISPR standartları 30 MHz'e kadar ölçülebilen, iletilen EMI için sınır belirlenmektedir. En çok

kullanılacak olan CISPR standartları ise EN 55011, 55014-1 ve EN 55032 (Sırasıyla CISPR 11, CISPR 14-1 ve CISPR 32). Çoğunun ölçüm yöntemleri birbirlerine benzer testlerden oluşmaktadır. [25]

1.8 EMI Ölçümü ve Tespiti

1.8.1 LISN

İletilen EMI gürültüsünün frekansı, EMC standartlarına göre 150kHz ile 30MHz arasında değişmektedir. Genel EMI gürültüsünü ise spektrum analizörü ile ölçebiliyoruz. Analizörü kullanabilmemiz için ise EMC uyumluluğunu da sağlamak için Hat Empedansı Stabilizasyon Ağı'ını (LISN) kullanmamız gerekmektedir. Yapılacak olan EMI geriliminin ölçümü için, ölçümlerin sağlıklı olması ve tekrarlanabilirliği açısından ölçüm noktasının yük empedansı stabil olması gerekmektedir. Bu yüzden LISN, bize şebeke gerilimini sabit bir hale getirip, şebekeden gelebilecek herhangi bir gürültüyü veya problemi test ettiğimiz cihaza aktarmamayı sağlamaktadır. Yani aslında gürültü için stabil bir empedans sağlayıp, test edilen ekipman (EUT) için normal bir güç akışı sağlamaktadır.[15] Ayrıca, LISN pasif bir devredir. İçerisinde R-L-C komponentleri bulunmaktadır. L'ler 50uH, C_1 'in değeri 0.1 μF , C_2 'nin değeri 0.1 μF , R1'in değeri 50 Ω ve son olarak R_2 'nin değeri 1k Ω 'dur. Topolojideki R_2 , C_1 kapasitörü için deşarj yolu oluşturmaktadır. C_1 ve L_1 'in görevi ise 150 kHz ile 30 MHz arasındaki yüksek frekanslı gürültüyü filtrelerler. C_2 kapasitörü ise bu yüksek frekanslı gürültüyü devreden çıkartmaktadır. [35]



Sekil.18 LISN Detaylı İç Yapısı [35]

Çalışma mantığı olarak ise aslında iki farklı devre gibi davranarak iki farklı ölçüm almamızı sağlamaktadır. Gürültü seviyelerini hat ve nötr için ayrı ayrı ölçmememze olanak sağlar. DM gürültü akımı için topolojideki 2 adet 50 Ω direnç seri gibi davranışır ve toplam 100 Ω yük ile ölçüm alınır. CM gürültü akımı için ise dirençler paralel gibi davranışarak 25 Ω yük ile ölçüm alınır. Çünkü CM gürültüsü, topraklama kablosu ile aynı anda hem hatta hem de nötrde mevcuttur. LISN'den geçen gürültü daha sonrasında spektrum analizörüne girer ve izole edilmiş bir Radyo Frekansı sinyali çıkışı olarak gürültünün grafiğinin çizilmesini sağlar. [15]

1.8.2 Spektrum Analizörü

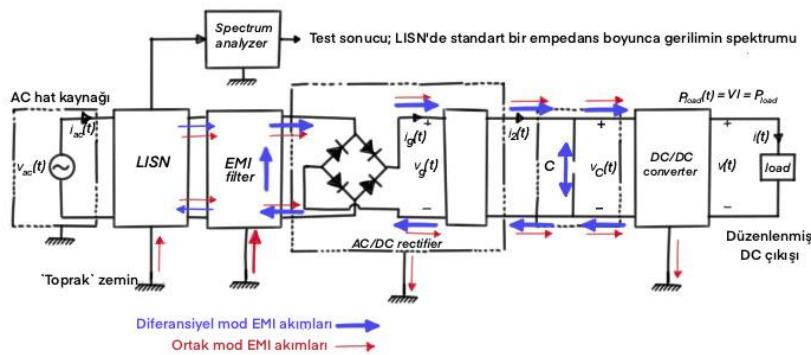
Spektrum Analizörü, ölçüm aldığımız sistemdeki sinyalin radyo frekansı aralığındaki parametrelerini test ve ölçüm amaçlı grafiksel olarak çıkartmamızı sağlar. Ayrıca sistemde oluşan EMI'ın da hangi frekans veya hangi güç düzeylerinde oluştugunun belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. İlk olarak yaptığı eylem, mevcut sinyallerin gücünü ölçmektedir. Ardından spektrum genliğini ‘y’ (dikey) ekseninde ve frekansını da ‘x’ (yatay) ekseninde olduğu bir grafiği sonuç olarak göstermektedir. Elektrik sinyallerinin spektrum analizlerinde, zaman içerisindeki kolaylıkla tespit edilemeyen sinyallerin baskın frekanslarını, güçlerini, harmoniklerini ve bant genişlikleri gibi parametreleri tespit etmek için kullanılmaktadır. [36]



Şekil.19 Spektrum Analizörü [36]

Şekil.19'da görülen spektrum analizörü cihazında, bir adet giriş konnektörü, bir adet klavye ve ekrandan oluşan, sinyalin de görünümünü ayarlayabileceğimiz kontrol tuşları bulunan bir yüzeyden oluşmaktadır. Ölçüm yapılrken ilk aşama, giriş konnektörüne ölçüm yapılacak cihazın kablosu bağlanır. Ölçüm anında ekranda ölçülen sinyalin frekans spektrumu görülür.

EMI ölçümü esnasında son sonucu elde edebilmek için tipik bir ölçüm şema diyagramı Şekil.20'de gösterilmiştir. Kaynaktaki sinyal öncelikle LISN cihazına gelmektedir. LISN cihazından ise EMI filtresine ardından başka ek sistemler var ise önce onlara, ardından da test edilecek cihaza bağlanmaktadır. Spektrum Analizörü ise LISN cihazının çıkışına bağlanarak, sistemin gürültüsünün analiz etmemizi sağlamaktadır.



Şekil.20 EMI Gürültüsünün Ölçülmesi İçin Oluşturulmuş Tipik Bir Ölçüm Şema Diyagramı [15]

Yukarıdaki Şekil.20'de gösterildiği gibi oluşturulan sistemde bağlantı sağlandıktan sonra CM ve DM gürültüler için devrede bu gürültülerin dolaştığı kısımların yolları gösterilmektedir. Bu rotalar üzerindeki oluşan gürültüler LISN cihazı ile birlikte ölçülmektedir.

1.8.3 EMC Testleri

Elektrikli cihazların EMC uygunluğunu sağlamaları için bir takım donanımsal ve tasarım teknikleri üzerine testler yapılmaktadır. EMC testinin asıl amacı, farklı cihazların herhangi bir gürültü/parazit oluşturmadan yakın mesafede çalışabildiğinin teyidini yapmaktır ayrıca CE işaretini için ana kriterlerden birisidir. Bu test ile test edilen cihazların hem emisyonlarına hem de gürültüye bağışıklığının birlikte incelenmesiyle yapılır. Ayrıca test edilen ekipmanın; üretim, paketleme ve satış süreçleri boyunca bu test yapılmaktadır.

EMC testlerini; gereken şartları ve standartları sağlayan, alıcılar, amplifikatörler gibi cihazların ve de spektrum analizörleri gibi ölçüm cihazlarının bulunduğu laboratuvarlarda yapılmalıdır. Bu laboratuvarlar, genellikle çevreden etkilenmemesi için ve yapılacak olan testlerde optimum değerleri sağlamak için izolasyonlu test odaları yani yansızsız odalardır. Ölçüm esnasında bu cihazlar ile birlikte test edilen ekipmanın yaydığı gürültünün türüyle miktarı ölçülmektedir. [37]



Sekil.21 Yansımasız Oda [38]

Yapılacak olan testler, test edilen cihazın çalışma koşullarına ve ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. Daha önceden bahsettiğimiz gibi iki gürültü için iki farklı test yapılmaktadır: Bağışıklık ve Emisyon. Bağışıklık testleri, harici kaynaklar tarafından oluşan problemlerden etkilenmeden cihaz için istenen koşullar altında düzgün çalışması için gerçekleştirilmektedir. Bu testler de kendi içerisinde, sürekli ve süreksiz olmak üzere iki farklı kategoride yapılmaktadır. Örnek verecek olursak:

- Elektrostatik Boşalma (Electrostatic Discharge (ESD)) Testi
- Ani Yükselmeler (Surge) Testi
- Işıyan, RF, Elektromanyetik Alan (Radiated Immunity) Testi
- Şebeke Frekansındaki Manyetik Bozulmalar (Magnetics) Testi

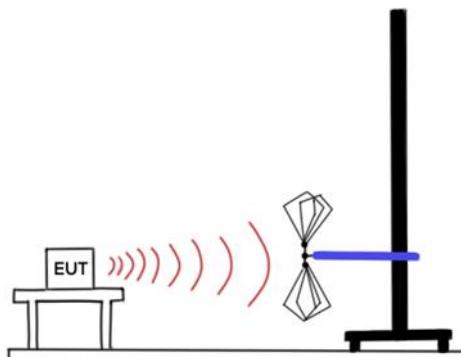
Emisyon testleri ise, test edilen ekipman veya sistemlerin ortama yaydığı gürültülerin ölçüldüğü EMC testleridir. Bu testleri de kendi içerisinde kablo ve hava yoluyla oluşan gürültü için iki farklı türde gerçekleştirilmektedir. [38] Örnek verecek olursak:

- İşnim Yoluyla Yayılım (Radiated Emission) Testi
- İletim Yoluyla Yayılım (Conducted Emission) Testi
- Harmonikler (Harmonics)
- Bozulma Gücü (Disturbance Power)

1.8.3 Yayılan Emisyon (Radiated Emission) Testi

Bu test, cihazın elektromanyetik alanlarda yayıldığı elektromanyetik enerjinin ölçülmesi için yapılmaktadır. Cihazlar arasındaki Elektromanyetik Uyumluluğun (EMC) sağlanıp sağlanmadığını belirlememize yardımcı olur. Test esnasında cihazın belirli bir frekans bandında yayıldığı elektromanyetik enerji incelenmektedir. Yapılan ölçümler, yakın alan probu veya anten gibi bu test için

özel olarak üretilmiş ekipmanlar ile yapılmaktadır. Test sonucunda, belirlenen frekans bandındaki yayılan elektromanyetik enerjinin, istenen sınırlar dahilinde bulunup bulunmadığı tespit edilir.



Sekil.22 Yayılan Emisyon Test Görüntüsü [23]

Şekil.22'de elektromanyetik gürültüyü oluşturan test edilen cihaz ve bu gürültüyü ölçen bir anten bulunmaktadır. Antenin, elektromanyetik gürültüyü doğru bir şekilde ölçebilmesi için ölçümü yapılacak olan cihazın 3,10 ya da 30 metre uzağına yerleştirilmelidir. [39]

1.8.4 İletilen Gürültü (Conducted Emission) Testi

Bir diğer gürültü ise iletilen gürültüdür. Bu gürültünün iletilmesi için bir kablo gibi maddesel bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Oluşan enerjinin bir kısmı cihazdaki kablolar vasıtasıyla güç kaynağına iletilmektedir. Yapılış amacı, testler sayesinde genellikle 150kHz ile 30 MHz arasında ölçüm alınıp, standartlardaki limitlere uygunluğu tespit edilir. Bu testi yaparken doğru bir ölçüm almak için, daha önce de bahsettiğimiz gibi LISN cihazı gerekmektedir. Ayrıca test uygulanırken test edilecek cihazın; AC, DC ve güç sinyalinin geçtiği kablolar test edilmektedir. [39]

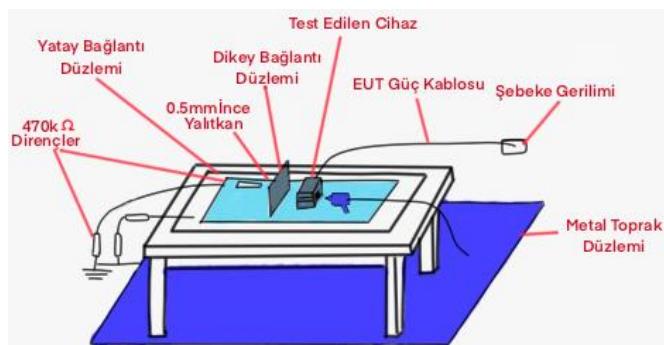


Sekil.23 İletilen Gürültü Ölçümü [40]

1.8.5 Elektrostatik Deşarj (Boşalma) Testi – ElectroStatic Discharge Testing (ESD)

Elektrostatik deşarj testi, ESD hassasiyeti bulunan tüm cihazlara uygulanması gereken bir testtir. Bu test, cihazın elektrostatik bir deşarj durumundayken performans seviyesini belirlememizi sağlar.

Test edilecek olan cihaz, ESD için özel bir masada, ESD tabancası ile test edilmektedir. Bu sırada masanın yüzeyi Yatay Bağlantı Düzlemi (Horizontal Coupling Plane (HCP)) formatında, cihazın arka tarafında ise Dikey Bağlantı Düzlemi (Vertical Coupling Plane (VCP)) formatında olmalıdır. Bu yüzeyler ise uygun dirençler ile toprağa bağlanmalıdır. [28]



Şekil.24 Elektrostatik Deşarj Test Görüntüsü [16]

2. Pasif Filtre

EMI filtreleri, elektronik cihazlarda istenmeyen elektromanyetik sinyalleri bastırmak veya azaltmak için kullanılan sistemlerdir. Bu filtreler, cihazların doğru çalışmasını engelleyebilecek ve hatta ciddi güvenlik riskleri oluşturabilecek elektromanyetik parazitlerin etkisini minimize eder. Genellikle bu sistemlerde alçak geçiren ya da bant geçiren devreler kullanılmaktadır.

2.1.1 Pasif Filtre

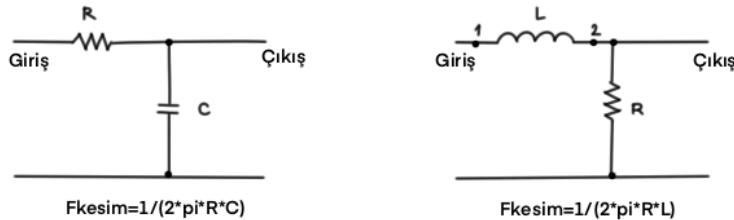
EMI filtrelerinin amacı, güç dönüştürücüsü devrelerinde oluşan elektromanyetik girişimleri engellemektir. EMI filtreler yüksek frekansa sahip olan anahtarlama bileşenlerini engellemeli ve alçak frekans çalışmasını etkilememelidir. Bu yüzden EMI filtreler düşük geçiren滤波器 yapısını temel alır. Bu filtreleme 2 şekilde yapılır: Pasif滤波器 veya aktif滤波器 kullanılarak tasarlanır. Bu bölümde pasif滤波器 yapısı incelenecaktır.

Pasif EMI filtrelerinde birinci derece滤波器 tercih edilmez. Bunun sebebi kullanılacak bobin ve kondansatörlerin çok büyük olacak olmasıdır. Birinci derece滤波器 yerine iki veya daha yüksek dereceli filtreler tercih edilir.

Pasif devre elemanlarından; direnç, bobin ve kapasitörün frekansa göre davranışlarını, pasif滤波器 devreleri açısından incelenecaktır. Direnç, frekansa karşı herhangi bir tepki göstermez fakat bobin ve kapasitör yüksek veya alçak frekanslara farklı şekilde tepki verirler. Bobinin yüksek frekanslarda empedans değeri artar ve yüksek değerli bir direnç olarak tepki gösterir yani açık devre gibi davranmaya başlar. Düşük frekanslarda ise çok düşük empedans değerinde bir tepki oluştururlar yani kısa devre gibi

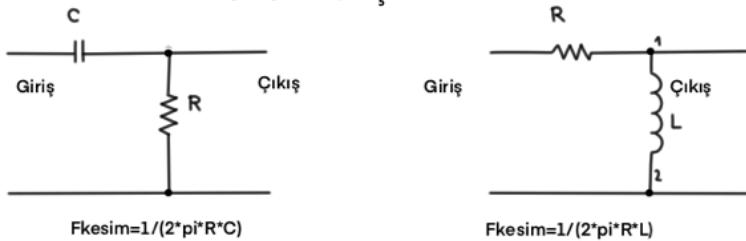
davranmaya başlar. Kapasitörler, yüksek frekanslarda çok düşük empedans değeri gösterirken kısa devre gibi davranmaya başlar. Düşük frekanslarda ise çok yüksek empedans değerine sahip olarak büyük bir direnç olarak tepki gösterirler yani açık devre gibi davranmaya başlar.

ALÇAK GEÇİRGEN FİLTRE



Sekil.25 RC ve RL Alçak Geçiren Filtresi Devre Şeması [41]

YÜKSEK GEÇİRGEN FİLTRE



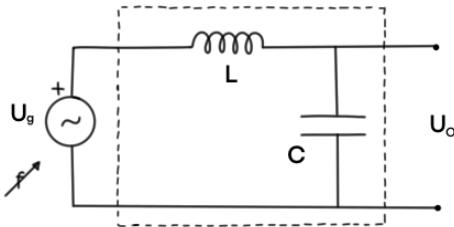
Sekil.26 RC ve RC Yüksek Geçiren Filtresi Devre Şeması [41]

R , C ve L elemanlarını kullanarak çeşitli filtre devreleri yapılabılır. Bu devrelerin davranışları R , C ve L elemanlarının bağlanışına ve çıkış ölçümünün nereden yapıldığına göre değişiklik gösterir. Şekil.25'de R ve C elemanlarıyla bir filtre devresi tasarlayıp çıkış ölçümünü kapasitör üzerinden alacak olursak, bir alçak geçiren滤器 devresi tasarlama olur. Ayrıca Şekil.26'da gösterildiği gibi $R-C$ devresinin çıkış ölçümünü direnç üzerinden alacak olursak devre, yüksek geçiren滤器 devresi özelliği gösterir. R ve C elemanlarıyla oluşturulan devrenin kesim frekansı:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C} \quad (6)$$

R ve L elemanlarıyla oluşturulan devrelerde, ölçümün alındığı yere göre devre davranışını değişiklik göstermektedir. Seri bir $R-L$ devresinde çıkış ölçümünü direnç üzerinden alırsak, alçak geçiren; bobin üzerinden alırsak, yüksek geçiren滤器 devresi olur. R ve L elemanlarıyla oluşturulan devrenin kesim frekansı:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (7)$$



Şekil.27 LC Alçak Geçiren Filtresi Devre Şeması [42]

Sadece bobin ve kapasitörlerle de bir alçak geçiren filtre devresi oluşturulabilir. EMI filtre devrelerinde RC alçak geçiren filtre yerine LC filtre devreleri tercih edilir. LC ve CL filtre devreleri de kendi aralarında empedans uyumluluğuna göre tercih edilme sebepleri vardır. Eğer filtrenin girişi yüksek empedans, çıkıştı düşük empedansa sahip ise CL filtre kullanılır. Filtrenin girişi düşük empedans, çıkıştı yüksek empedansa sahip ise LC filtre kullanılır. [43]

LC alçak geçiren filtre devresinin RC alçak filtre devresine göre daha avantajlı olmasının temel sebebi, LC devresinde direnç bulunmamasıdır. Dirence sahip filtre devreleri, direnç sebebiyle daha fazla güç tüketirler ama asıl tercih edilmeme sebebi bu değildir. RC filtre devrelerinin asıl tercih edilmeme sebebi RC devrelerinin daha fazla ısınmasıdır. LC devrelerinin bir başka avantajı ise RC devrelerinden daha fazla zayıflama sağlamasıdır. RC devreleri tek kutuplu filtre devreleri olduğu için 20 dB per/decade değerinde bir azalmaya sebep olurken, çift kutuplu LC devreleri 40 dB per/decade değerinde bir azalmaya sebep olur. LC devrelerinin sahip olduğu bu avantajlar yüksek frekanslarda daha şiddetli hissedilir. [44] LC filtresinin kesim frekansı:

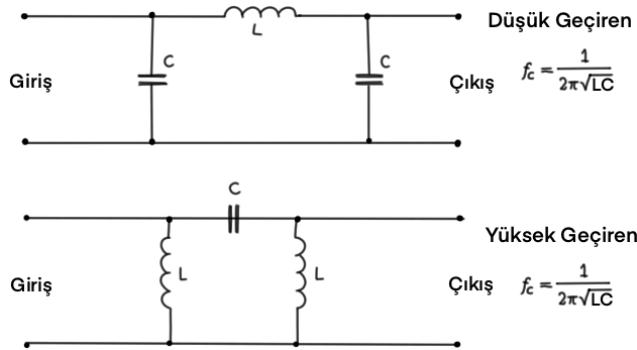
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

2.1.2 PI Filtre Devresi

Pi tipi filtreler, iki farklı tipte olabilir. İlk tip CLC tipi filtredir. Bufiltrede bobin, *Şekil.x*'deki gibi devrenin ortasında olduğundan dolayı devrenin davranışında önemli rol oynar. Bobin, yüksek frekanslarda yüksek empedansa sahip olduğu için yüksek frekansları geçirmez ve düşük geçiren filtre davranışını gösterir. Diğer filtre tipi LCL filtredir. *Şekil.28*'de görüldüğü üzere, LCL filtresinde kondansatör devrenin ortasında bulunduğuundan dolayı filtrenin çalışması üzerinde doğrudan rol oynar. Kondansatör düşük frekanslarda çok yüksek empedans, yüksek frekanslarda düşük empedans gösterir. Bundan dolayı CLC tipi filtreler yüksek geçiren filtre özelliği taşır.

Çıkışa bağlanan bobin ve kondansatörün devreye başka bir etkisi daha vardır. Eğer çıkışa kapasitör bağlanırsa bu devre gerilim dalgalanmalarını azaltır. Çıkışa bobin bağlanırsa bu devre akım dalgalanmalarını azaltır. *Şekil.28*'deki gibi CLC ve LCL devrelerinin çalışma mekanizması şu

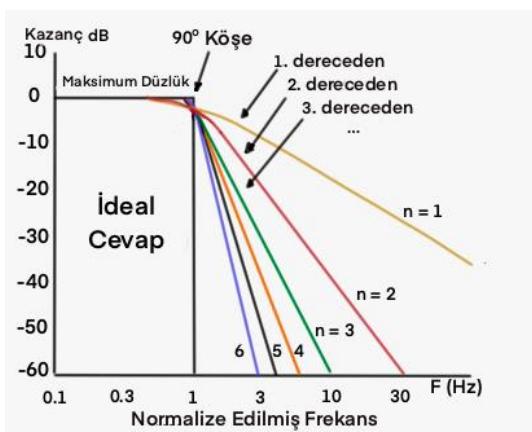
şekildedir: CLC tipi filtrelerde gelen yüksek frekanslı sinyaller bobinden geçemez ve kondansatörler üzerinden toprağa akar. LCL tipi filtrelerde ise gelen düşük frekanslı sinyaller kondansatör üzerinden geçemez ve bobinlerin üzerinden toprağa akar. [45]



Sekil. 28 CLC ve LCL Filtrelerinin Devre Şeması [46]

2.1.3 Kaskad Devreler

Pasif filtreler, istenilen filtre özelliği ve istenilen kesim frekansında bir zayıflama sağlarlar. Ancak birinci dereceden pasif filtrelerin sağladığı azalma oranı bazen yeterli olmamayabilir. Bu durumlarda devrenin istenilen kesim frekansında sert bir şekilde zayıflanması istenir. Bu zayıflamanın eğimini de artırmak için devrenin derecesini arttırmamız gereklidir. Birinci derece devreler 20 dB per/decade değerinde zayıflama sağlarken, ikinci dereceden devreler 40 dB per/decade değerinde daha sert bir azalma sağlarlar. Devrenin derecesi arttıkça Grafik.1'de görüldüğü gibi bu zayıflama $N \times 20$ dB per/decade oranında daha da keskin bir şekilde azalma sağlar. Eğer oluşturulan devrenin bileşen değerleri değişmez ise, yani bir LC alçak geçiren滤器的L ve C değerleri değişmezse yeni oluşturulan devrenin de kesim frekansı değişmez, sadece eğim oranı artarak daha keskin hale gelir ve daha hızlı bir filtreleme sağlar. [47]

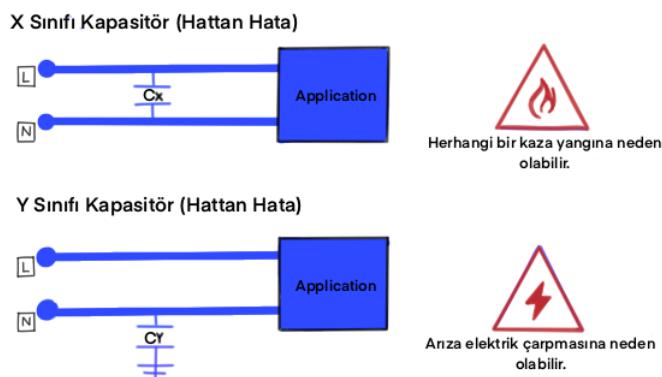


Grafik.1 Kaskad Devrelerin Derecelere Göre Eğim Oranı Grafiği [48]

2.2 Kapasitör seçimi

EMI filtre devrelerinde genellikle 2 farklı tipte kapasitör kullanılır: X ve Y kapasitörleri. X kapasitörleri, hat-hat arasına bağlanır. Herhangi bir arıza durumunda tehlikeyi önlemek için sigortayı açarlar. Y kapasitörler ise hat ile toprak arasına bağlanır. Y kapasitörleri arızalanırsa elektrik çarpması tehlikesi söz konu olabilir. Genellikle Y kapasitörleri, X kapasitörlerinden daha düşük kapasite değerlerine sahiptirler.

Güç elektroniği devrelerinde diferansiyel mod gürültüsü oluşur. Bu oluşan gürültü hat-hat arasına bağlanan kondansatörler ile engellenebilir. Fakat klasik kondansatörler herhangi bir arıza durumunda yanım riski taşırlar. Bunun sonucunda klasik kondansatörler yerine X kapasitörlerin kullanılması daha güvenli olacaktır. Ortak mod gürültüsünü filtrelemek için hat-toprak arasına kondansatörler bağlanır. Hat-toprak arasına bağlanan klasik kondansatörler kısa devre anında elektrik çarpması tehlikesi yaşatabilirler. Bu riski en aza indirebilmek için hat-toprak arasında Y kapasitörlerinin kullanılması daha güvenli olacaktır.



Şekil.29 X ve Y Kapasitörlerinin Bağlantı Şeması

Şekil.29'da X kapasitörlerinin hat-hat, Y kapasitörlerinin hat-toprak arasına bağlandığı net bir şekilde göstermektedir.

X kondansatörleri, dahilindeki iç sigorta veya bir koruma mekanizması yardımıyla oluşabilecek herhangi bir tehlike anında sigortayı açmaktadır. Bunun sonucunda akım ve gerilim geçisi engellenmiş olur ve kullanıcıyı risk teşkil eden durumlardan korumuş olur.

X kondansatörlerinin çalışma mekanizması:

X kondansatörlerinin içerisinde metal bir tabaka bulundurur. Bu metal tabakanın üzerinde bir koruma mekanizması yer alır. Bu mekanizma bir sigorta yapısı gibi davranışır. Bu koruma mekanizması, devre üzerinde belirli bir gerilim eşiği geçildiği veya belirli bir akım eşiği geçildiği anda devreye girer.

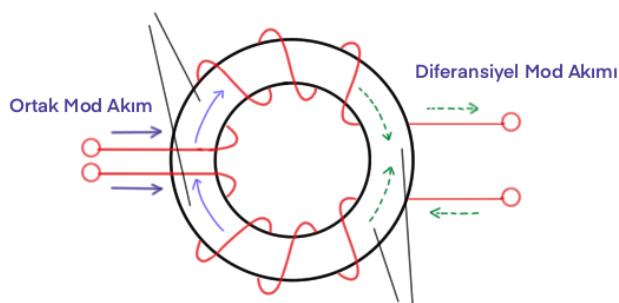
Y kondansatörlerinin çalışma mekanizması:

Y kondansatörlerinin içerisinde bir tahliye direnci bulunmaktadır. Bu direnç, kondansatörde biriken enerjiyi boşaltır. Bu durum özellikle ani yüklenmelerinde oluşan yüksek akımı tahliye etmekte etkilidir. Y kondansatörlerinin arızalanması durumunda hat-toprak arasında tehlike meydana gelebilir. Y kondansatörü bu durumda devreyi açarak tehlikeyi önler. Eğer bu koruma mekanizması beklentiği gibi çalışmazsa elektrik çarpması tehlikesi söz konusu olabilir. [50]

2.3 İndüktör Seçimi

EMI filtre tasarımda kullanılacak olan bobinlerin şu özelliklere sahip olması beklenmektedir: Hem düşük hem yüksek frekanslarda stabil bir indüktans değerine sahip olmalı ve düşük paralel kapasite değerine sahip olmalıdır.

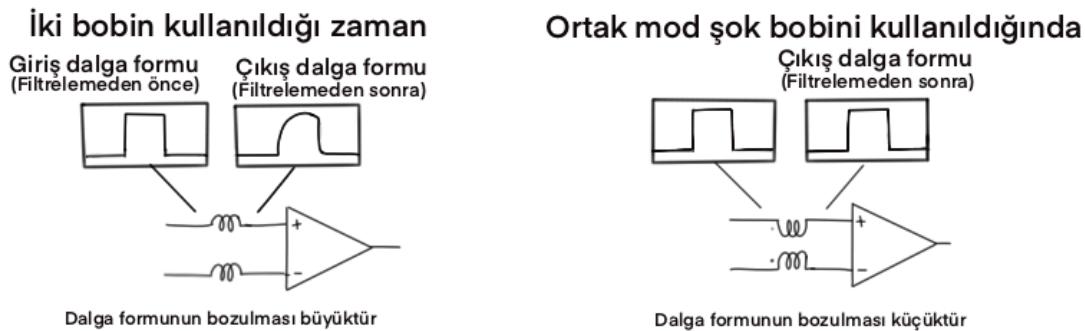
Ortak Mod Şok Bobini;



Sekil.30 Ortak Mod Bobini Akım Şeması

Sekil.30'daki sürekli çizgiler ortak mod akımını, kesikli çizgiler diferansiyel mod akımını temsil eder. Ortak mod akımları aynı yönlü aktığından dolayı bobinin içerisinde aynı yönlü manyetik akı oluşturur ve bu akılar toplanarak ortak mod akımına karşı yüksek empedans gösterir. Diferansiyel mod gürültüsü ise bobine farklı yönlerden girerek, bobinde zıt yönlü manyetik akı oluşturur. Oluşan bu akılar eşit genlikli ve zıt yönlü oldukları için toplanarak birbirlerini yok ederler. Bunun sonucunda ortak mod

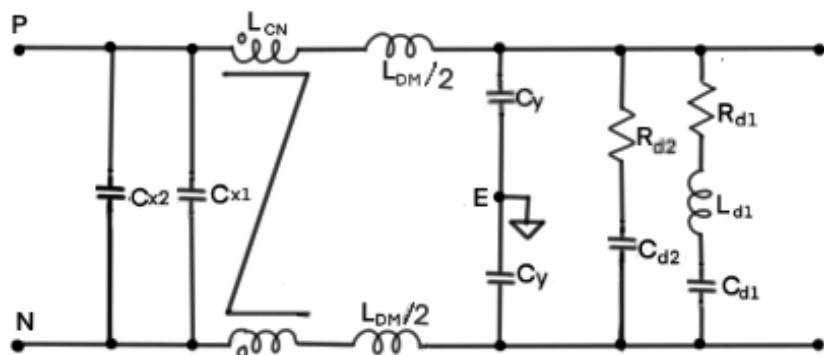
şok bobini, diferansiyel mod gürültüsüne karşı çok küçük bir empedans gösterir ve kısa devre gibi davranır.



Şekil. 31 Normal Bobin ve Ortak Mod Şok Bobini Sinyal Kalitesi Farkı

Normal bobin yerine neden ortak mod şok bobini kullanıldığıının iki nedeni vardır. Bunlardan ilki, Şekil.31'de görüldüğü üzere normal bobinler sinyali tam köşeli vermeyip kaliteyi bozarlar. Diğer neden ise normal bobinler diferansiyel mod gürültüsünü filtrelemek için kullanılmasıdır. [51]

2.1.5 Pasif Filtre Çalışma Mekanizması



Şekil.32 Diferansiyel Mod ve Ortak Mod Pasif Filtresinin Beraber Kullanım Şeması

Şekil.32'de pasif滤re devre yapısı verilmiştir. X kapasitörleri ve ortak mod şok bobini, ortak mod gürültü sinyalini filtre ederken; Y kapasitörleri ve DM bobinleri, diferansiyel mod gürültüsünü filtre eder. [20]

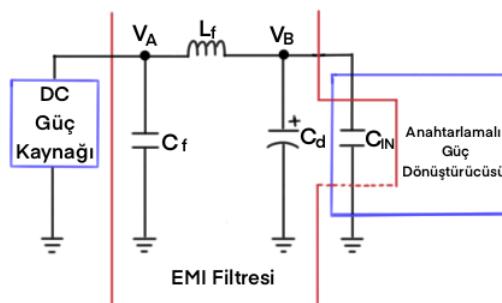
Devreye gelen diferansiyel mod gürültü sinyali, fazdan nötre doğru akar. Bu gürültüyü engelleyebilmek için faz-nötr arasına kapasitor ve kapasitöre seri bobin eklersek gürültüyü bastırabiliriz. Bobinin empedansı ‘ jwl ’ ile gösterilir ve frekans yükseldikçe bobinin empedansı artar. Artan empedans

açık devre gibi davranır ve yüksek frekanslı gürültüyü geçirmez. Kapasitörün empedansı $\frac{1}{j\omega l}$ ile gösterildiği için, yüksek frekanslı bir gürültü oluştugu zaman kapasitör kısa devre görevi görür ve gelen gürültü X kapasitörü üzerinden geri döner. Alçak frekanslı gelen sinyaller bobin üzerinden geçebilirler.

Devreye gelen ortak mod gürültü sinyali, fazdan toprağa doğru akar. Bu gürültü faz-toprak arasına bağlanan Y kapasitörleri ve ortak mod şok bobini ile engellenir. Y kapasitörüne gelen yüksek frekanslı gürültü kapasitörü kısa devre olarak görür ve bu gürültü doğrudan toprağa gider.

2.4 Pasif Filtre Tasarımı

Pasif filtre tasarılanırken izlenmesi gereken adımlar ve belirlenmesi gereken bazı parametreler vardır. Öncelikle hangi standartların karşılanması gerektiği belirlenmeli ve ardından devrenin filtre edilmeden hangi seviyelerde gürültü yaydığı tespit edilmelidir. Belirlenen bu standartlardaki uyulması gereken değer ve devrenin ürettiği gürültünün farkına göre bir pasif filtre tasarlanmalıdır. Pasif filtre tasarılanırken devre elemanları, azaltılmak istenen gürültü miktarına göre belirlenir.



Sekil.33 CLC Filtre Devre Şeması

Şekil.33'te bir DC filtre, bir LC elektromanyetik gürültüfiltreleme devresi ve anahtarlamalı güç elektroniği devresi bulunmaktadır. Normal koşullarda filtre yapısı giriş ve çıkış şeklinde olurken bu devrede giriş sağ tarafta çıkış ise sol tarafta yer almaktadır. Aynı şekildeki C_d komponenti ise sönümleme kapasitördür. L_f ve C_f komponentleri ise LC filtre devresinin elemanlarıdır. C_{IN} ise anahtarlamalı güç elektroniği devresinin giriş kapasitans değerinin eş değeridir.

Dönüştürücü devresi için giriş elektromanyetik girişim filtresi tasarımı adımları şu şekildedir: İlk adım olarak, anahtarlama devresinin gürültü seviyesini tespit etmek olmalıdır. Ardından, devrede elde edilmesi beklenen zayıflatma derecesi belirlenmelidir. Gereken zayıflatma, standartların belirlediği seviye ile devrenin sahip olduğu gürültü seviyesi arasındaki farktır. Gürültü ölçümü, devredeki gürültü seviyesinin en yüksek değeri baz alınarak yapılır. Gürültü ölçümleri LISN cihazı ile yapılmaktadır. Alçak geçiren filtre, yüksek frekanslı anahtarlama gürültülerini bastırır ve frekans yükseldikçe

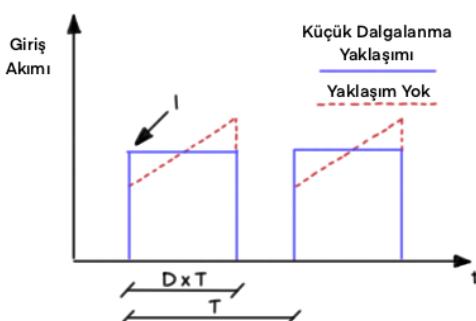
gürültülerin bastırılma gücü de artar. İkinci adım, gerekli zayıflamayı hesaplamaktır. İlk adımda bahsedildiği üzere gerekli olan zayıflama, devredeki gürültü seviyesi ile hedeflenen en yüksek gürültü seviyesi arasındaki farktır. Üçüncü adım, LC filtre devresinde kullanılacak olan L_f indüktansının değerinin hesaplanmasıdır. Dördüncü adım, LC filtre devresinde kullanılacak olan C_f kapasitansının değerinin hesaplanmasıdır. Beşinci adım, C_d sönümleme kapasitansı hesaplanmasıdır. LC filtresi tasarlanırken dikkat edilmesi gereken bir nokta, yüksek L_f ve küçük C_f değerlerinin anahtarlamalı güç elektroniği devresinin giriş kısmında kararsızlığa sebep olur ve bu kararsızlık devrede salınım oluşturur. Bu yüzden devrenin çalışmasını olumsuz etkiler. C_d kapasitansı devrede oluşan salınımı azaltmak için kullanılır. [52]

2.5 Gerekli Zayıflamanın Tespiti

LISN cihazı veya spektrum analizörü kullanmadan, gerekli olan zayıflama iki farklı şekilde tespit edilir. Birinci yöntem, devrenin giriş dalgalanması kullanılarak tespit edilmesidir. Geniş bant aralıklarında çalışabilen bir osiloskop yardımıyla girişteki dalgalanma ölçülür ve (9) numaralı denklem kullanılarak gerekli olan zayıflama miktarı dB cinsinden bulunur.

$$|Att|_{db} = 20 \times \log \frac{V_{in-ripple-p2p}}{V_{max}} \quad (9)$$

(9) numaralı denklem kullanılarak gerekli olan zayıflama, dB cinsinden bulunmuş olur. $V_{in-ripple-p2p}$, anahtarlama devresindeki dalgalanmanın tepe-tepe değerleri arasındaki volt cinsinden değeridir. V_{max} , belirlenen standartın izin verdiği en yüksek dB cinsinden gürültü değeridir. İkinci yöntem, girişte ölçülen akım dalgalanmasının kare dalga olarak modellenmesidir. Bu modelleme Şekil.34'te verilmiştir.



Şekil.34 Akım Dalgasının Kare Dalga Olarak Modellenmesi

Girişteki akımın fourier serisi açılarak sadece birinci harmonik değeri alınır ve bu değer anahtarlamalı güç elektroniği devresinin giriş empedansı ile çarpmak koşuluyla (10) numaralı formül kullanılabilir.

$$|Att|_{db} = 20 \cdot \log \frac{\frac{1}{\pi^2 f_s C_{IN}} \cdot \sin \pi D}{1 \mu V} - V_{max} \quad (10)$$

(11) numaralı formüldeki D, görev oranını; I, indüktörün DC akımını (dönüştürücü devresinin çıkış akımı); f_s , anahtarlama frekansını ve C_{IN} , anahtarlamalı güç elektroniği devresinin giriş kapasitansını temsil eder. C_{IN} , düşük ESR değerine sahip olan bir seramik kapasitör olarak seçilmelidir.

C_F Kapasitörünün Seçimi:

6 ve 7 numaralı verilen denklemler hesaplanarak, elde edilen değerler arasından en büyük olan seçilmelidir.

$$C_{fa} = \frac{C_{IN}}{C_{IN} \cdot L_f (2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 - 1} \quad (11)$$

$$C_{fb} = \frac{1}{L_f} \cdot \left(10^{\frac{|Att|_{db}}{40}} \right)^2 \quad (12)$$

(11) numaralı formül, elektromanyetik girişim filtre devresinin rezonans frekansının en az bir decade zayıflatılmasını sağlar. Formüldeki f_s frekansı ise anahtarlamalı güç elektroniği devresinin anahtarlama frekansını temsil etmektedir. (12) numaralı formül ise elektromanyetik girişim filtresinin zayıflatılmasında kullanılan başka bir yaklaşımından türetilen bir formüldür. Elektromanyetik girişim filtresinin istenilen zayıflamayı elde edebilmesi için (11) ve (12) numaralı denklemlerin her ikisini de sağlaması gereklidir. Bu yüzden bu iki denklemin sonuçları arasından büyük olan frekans değeri seçilecektir.

C_D Kapasitörünün Seçimi:

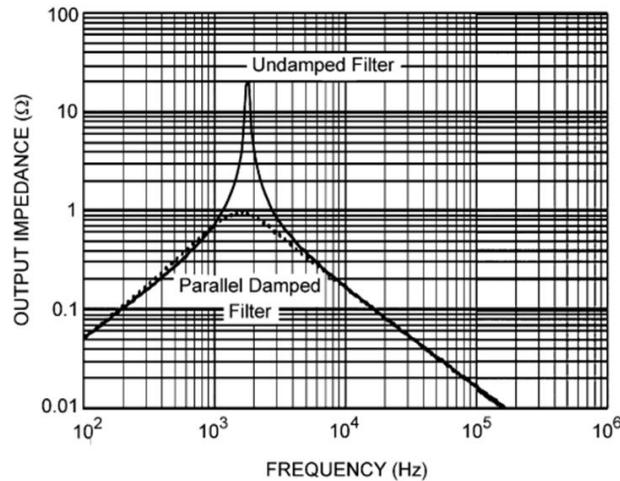
C_F kapasitörü, bir sönümleme kapasitöridür. Anahtarlamalı güç elektroniği devresine bir filtre eklendiği zaman transfer fonksiyonu değişmektedir. Şekil.33'teki filtrenin, V_B noktasının çıkış empedansı yeterince küçük olması gerekmektedir. Eğer çıkış empedansı yeterince küçük olursa, filtre devresi anahtarlamalı güç elektroniği devresinin kazancını önemsenmeyecek derecede etkileyecektir. Devrenin çıkış empedansı, filtrenin rezonans frekansında çok büyük değer gibi davranış gösterirse devreye ek sönümleme elemanı (C_{damp}) gereklidir. Elektrolitik bir kapasitör, sönümleme elemanı olarak kullanılabilir. Bu kapasitörün değeri (13) numaralı denklemle belirlenebilir.

$$C_d \geq 4 \cdot C_{IN} \quad (13)$$

Bu kapasitörün ESR değerini hesaplamak için (14) numaralı denklem kullanılabilir.

$$ESR_d = \sqrt{\left(\frac{L_f}{C_{IN}}\right)} \quad (14)$$

ESR değerinin kullanılmamasındaki amaç: filtre kesim frekansının çıkışındaki en yüksek empedans değerini azaltmaktadır. EMI Filtrede kullanılan C_d kondansatörü, kendi üzerinden geçen giriş geriliminin gerilimin DC bileşenini geçirmez ve aşırı güç dağılımının da oluşmasını engeller. Ayrıca bu kondansatörün kapasitans değeri filtre devresindeki kesim frekansının değişmemesi için iki koşul vardır. Bunlar: ESR değerinden düşük olmalı ve C_{IN} değerinden büyük olmalıdır. Grafik.2'de sökümeleme kapasitansının etkileri verilmiştir.



Grafik.2 Bir Sistemde Sönümeleme Devresinin Kullanılmış ve Kullanılmamış Haldeki Çıkış Empeedansları Grafiği

Grafik.2'de sökümeleme kapasitansının devrede kullanılmış ve kullanılmamış tepkisinin karşılaştırılması verilmiştir. Sönümeleme kapasitansı kullanılan devrenin, çıkış empedansı kesikli çizgi ile sökümeleme kapasitansı kullanılmayan devrenin çıkış empedansı, düz çizgi ile temsil edilmiştir. Grafik.2'de de görüldüğü üzere sökümeleme kapasitansı eklenen devrede tepe empedans değeri çok büyük oranda azalmıştır. [52]

2.6 İndüktör Tasarımı

İndüktörler; elektrik devrelerinde enerji depolamak, sinyali filtrelemek ve elektromanyetik parazitleri azaltmak için kullanılan kritik komponentlerdir. Bir indüktör, içinden geçen elektrik akımının etrafında manyetik alan oluşturmakta ve bu alan, akım değişikliklerine karşı direnç göstermektedir.

İndüktör tasarımda dikkate alınması gereken temel parametreler arasında: İndüktans değeri (L), Çekirdek malzemesinin özelliği, Sargı sayısı (N) ve tel kalınlığı bulunmaktadır. İndüktans değeri; sargı sayısına, çekirdek alanına (A) ve çekirdek uzunluğuna (I) bağlı olarak şu formülle hesaplanır:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{I} \quad (15)$$

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad (16)$$

Denklem (16)'deki μ , çekirdek malzemesinin manyetik geçirgenliğidir. Uygun çekirdek malzemesi seçimi, indüktörün performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Ferrit, demir tozu veya hava çekirdeklər, farklı frekans ve uygulama gereksinimlerine göre tercih edilen malzemelerdir.

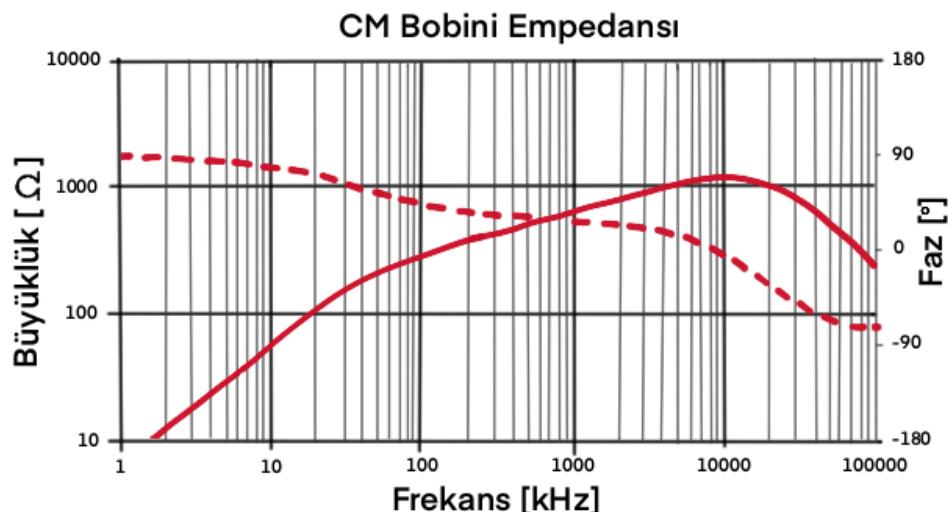
Ayrıca indüktörlerin tasarımda, çalışma frekansı, doygunluk akımı ve DC direnci gibi parametreler de göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek frekanslı uygulamalarda çekirdek kayıpları ve deri etkisi gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Doygunluk akımı, indüktörün manyetik çekirdeğinin doygunluğa ulaşlığı akım seviyesidir ve bu seviyenin aşılması durumunda indüktans değeri dramatik bir şekilde düşer. İndüktörün DC direnci (R), sargı telinin direncidir ve enerji kayıplarını azaltmak için düşük olmalıdır. Kalite faktörü (Q) ise indüktörün verimliliğini gösterir ve yüksek Q faktörü, düşük enerji kaybı anlamına gelir:

$$Q = \frac{2\pi f L}{R} \quad (17)$$

Denklem (17)'deki f , indüktörün çalıştığı frekanstır.

Ortak mod bobini, ortak mod gürültüsünü bastırmak için tasarlanmış özel indüktörlerdir. Bu indüktörler, iki sargıya sahiptir ve bu sargılar aynı çekirdek etrafına sarılır. Ortak mod indüktörlerinin tasarımda, iki sargının indüktanslarının da birbirleri ile dengeli olması ve manyetik alanlarının birbirini iptal etmesi sağlanmalıdır. Bu indüktörler, özellikle güç hatlarında ve veri iletim hatlarında ortak mod gürültüsünü azaltmak için kullanılır. Ortak mod indüktörlerinin indüktans değeri yine b_1 formülü ile hesaplanabilir

(15) numaralı formülde, her iki sargının da aynı indüktans değerine sahip olması ve çekirdek malzemesinin manyetik geçirgenliği μ önemlidir. İyi tasarlanmış bir ortak mod indüktör, devredeki gürültüyü etkin bir şekilde bastırarak, elektronik sistemlerin performansını ve güvenilirliğini artırır.



Grafik.3 CM Bobini için Frekansa göre Büyüklük / Faz Grafiği

Bu çalışmada kullanılan 1mH bobin için, Grafik.3'de frekansa göre Büyüklük/Genlik Grafiği verilmiştir ayrıca Tablo.3'de de freksnlara göre değerleri kaydedilmiştir.

Şebeke Tarafı CM Bobini		Güç Dönüştürücüsü Tarafı CM Bobini		
Frekans [Hz]	Z_{CM1} Büyüklüğü [Ω]	Z_{CM1} Fazı [$^{\circ}$]	Z_{CM2} Büyüklüğü [Ω]	Z_{CM2} Fazı [$^{\circ}$]
1000	5.88946247100999	87.7038955687999	5.88946247100999	87.7038955687999
9942.60073953	54.5118904114	77.9614181519	54.5118904114	77.9614181519
100577.3063	272.983459472999	42.566734314	272.983459472999	42.566734314
1000000	594.884094237999	27.0433521271	594.884094237999	27.0433521271
10115794.5425999	1126.24719237999	-7.72926044464	1126.24719237999	-7.72926044464

Tablo.3 Ortak Mod Bobini Büyüklük / Faz Tablosu

Tablo.3'te görüleceği üzere frekans arttıkça bobinimizin empedans değeri artmaka ve frekans arttıkça açık devre gibi davranışmaktadır bu sayede de yüksek frekanstaki gürültü genlikleri filtrelenemektedir.

3. EMI Filtre

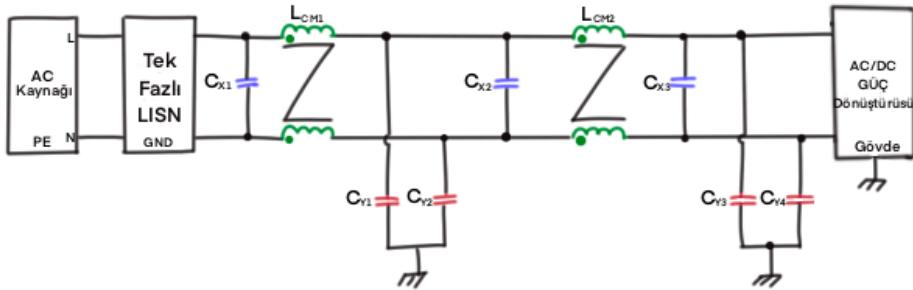
3.1 Pasif EMI Filtre

Pasif elektromanyetik girişim (EMI) filtreleri, anahtarlamalı regülatörlerin oluşturduğu iletlen emisyonları kontrol altında tutmak için kullanılan temel bir yaklaşımındır. Bu filtreler konum olarak güç elektronigi devreleri ile devrenin ana giriş kaynağı arasına yerleştirilerek, düzenlemelere ve standartlara uyum sağlanması için alçak geçiş özelliğiyle çalışmaktadır. Filtre terminolojisindeki L, N ve PE sırasıyla: Canlı hat (faz), Nötr ve Koruyucu topraklama anlamına gelir.

Geleneksel pasif EMI filtreleri, genellikle çok kademeli bir yapıda tasarılmaktadır. Tasarlanan bu yapı, devrede daha keskin bir frekans kesme eğimi sağlar ve özellikle güçlü AC hat uygulamalarında karşılaşılan yüksek seviyeli Ortak Mod (CM) Gürültüsünü azaltmada etkilidir. Genellikle bu tarz uygulamalarda, Ortak Mod Gürültüsünü bastırmak Diferansiyel Mod Gürültüsünü bastırmaktan daha zordur.

Pasif EMI Filtreleri, basit ve geleneksel bir yaklaşımı temsil etmektedir ancak bazı belirgin sınırlamaları da vardır. Öncelikle, pasif bileşenlerin boyutu, ağırlığı ve maliyeti; özellikle sınırlı alanlarda veya taşınabilir uygulamalarda çok büyük bir zorluklar yaratabilmektedir. Genel anlamda baktığımız zaman bu tür filtrelerin çalışma prensibi, devredeki EMI akımının yayılmasını engellemek için yüksek empedanslı seri bileşenlerin (örneğin, DM induktörleri, CM bobinleri) ve düşük empedanslı şönt bileşenlerin (X- ve Y-kapasitörleri) kullanılması üzerine kurulmuştur.

Filtre tasarımindan düşük dereceli anahtarlama harmonikleri, köşe frekansını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Birçok pasif filtre tasarımindan, köşe frekansının elde edilmesi için büyük reaktif bileşenler gerekebilir, bu da filtrelerin hacmini ve ağırlığını artırmaktadır. Çok kademeli tasarımlar, birden fazla köşe frekansıyla farklı frekans aralıklarında etkili olma avantajı sunar ancak çok kademeli oldukları için tasarım karmaşıklığını da artırırlar. Bu nedenle, pasif EMI filtreleri pratik (kurulumu olarak kolay) ve sezgisel olsa da, özellikle kompakt ve hafif tasarım gerektiren uygulamalar için çeşitli zorluklar oluşturabilmektedir.



Şekil.35 Tek Faz Çift Katmanlı Pasif EMI Filtre Şeması

Tek fazlı güç elektroniği devresi için tipik bir EMIfiltre şemasını Şekil 35'deki gibi düşündüğümüzde, ortak mod gürültüsünü bastırmak için birkaç bileşen kullanılır. Bu şemada, CM bobinleri (L_{CM1} ve L_{CM2}) ile Y sınıfı kapasitörler (C_{Y1} 'den C_{Y4} 'e kadar) CM gürültüsünü kontrol altına almaktadır. Y-kapasitörleri, AC hatları ile toprak arasında yerleştirilir ve gürültüyü bastırma görevini üstlenir. CM akımları, anahtarlamalı regülatörden başlayarak Y-kapasitörleri aracılığıyla dolaşır ve ardından CM bobinleri aracılığıyla diğer Y-kapasitörlerine geri döner. Bu devrede kalan herhangi bir CM akımı, LISN ile ölçülen empedans üzerinden dolaşır. Ancak bu, EMI performansı açısından dezavantajlı bir durum oluşturmaktadır. [10]

EMI滤resi tasarımda, güvenlik düzenlemeleri toplam Y-kapasitesinin nispeten düşük tutulmasını gerektirir. Bu değer genellikle $10nF$ 'ın altında olmalıdır çünkü yüksek Y-kapasiteleri, dokunma akımı güvenliğini tehlkiye atabilir. Ticari uygulamalarda genellikle $2nF$ 'ın altında olmasına dikkat edilir. Dolayısıyla, CM zayıflamasını sağlamak için gereken CM bobinlerinin endüktansı, birkaç mH gibi oldukça yüksek bir seviyede olmalıdır. Bu yüksek endüktans, bobinlerin büyük, ağır ve pahalı olmasına neden olur, ki bu da滤re tasarımda bir zorluktur.

Filtrede kullanılan X-Sınıfı kapasitörler, devrede oluşan Diferansiyel Mod gürültüsünün zayıflaması için kullanılmaktadır. Bu kapasitörler (C_{X1} 'den C_{X3} 'e kadar olan bu kapasitörler) $2.2\mu F$ gibi büyük değerlere sahiptir. X- kapasitörlerinin yüksek değerlere sahip olması, diferansiyel mod endüktansının daha da düşük tutulmasını sağlamaktadır. Bu durumda CM bobinlerinin sızdırma endüktansından yararlanılmaktadır. Bu sayede DM akımlarını azaltmak için daha az hacim kaplayan komponentler kullanılabilir. Lakin bu X- kapasitörlerinin de yüksek değerleri titizlikle seçilmeli ve tasarlanan devreye yerleştirilmelidir. Çünkü bu komponentler yüksek akımları yönlendirebilmekte ve de güvenlik riski oluşturabilmektedirler. [10]

3.2 Aktif EMI Filtre

Elektronik cihazlarda kullanılan pasif filtrelerin, elektromanyetik girişim (EMI) sorununu çözerken ortak mod EMI sorununa karşı etkili bir çözüm sağlayabilmesi için滤rede Y-kapasitörleri kullanılmaktadır. Lakin kullanılan bu kapasitörün devredeki değerinin bir sınırı bulunmaktadır. Bu

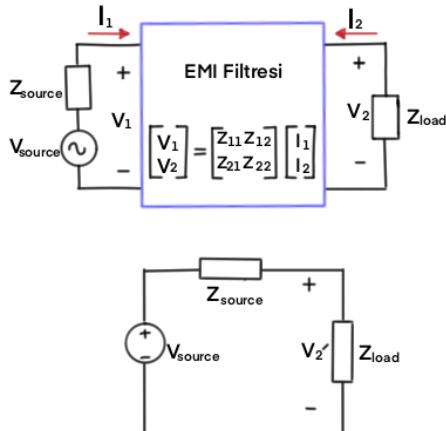
sınırlamanın amacı, güvenlik standartlarındaki uygun dokunma akımı seviyelerini korumak için yapılmaktadır. Ancak Y-Kapasitelerinin sınırlanması yüzünden belirli bir köşe frekansı veya filtre zayıflamasını elde edebilmek için büyük boyutlu olmasını ve ağır ortak mod bobinlerinin kullanılmasını zorunlu kılar. Sonuç olarak Y-kapasitörlerinin kullanılması ile bobinlerin de devrede bulunması, hacimce büyük, ağır, maliyeti yüksek ve tüm filtrenin genel boyutunda büyük bir kısmı kaplamasına neden olur. Aktif EMI filtreler ise bu sorumlulara modern ve pratik çözümler getirebilmektedir. Aktif EMI filtre devreleri, geleneksel pasif filtrelerin hantallık probleminden kurtarak daha kompakt ve hafif filtre tasarımları sunmaktadır. Özellikle alan ve hacimsel sınırlamaları olan cihazlarda aktif filtre entegre devreleri (I_C 'ler), manyetik komponentlerin değerlerini ve filtrenin boyutunu önemli ölçüde azaltmaktadır.

Aktif EMI filtreleri daha küçük ebatlarda olmalarının yanı sıra, ek birçok avantaj da sağlamaktadırlar. Bunlar: daha iyi termal yönetimi, daha düşük güç kayipları sayesinde daha yüksek güvenilirlik, kullanılan komponentlerin kompak yerleşim özelliği ile daha kolay mekanik ve tasarım paketleri, kısıtlı alanlarda komponentler arasında oluşan daha az elektromanyetik etkileşim ve daha düşük maliyet söylenebilir. Genel olarak bu avantajlar sayesinde elektronik cihazların üretim maliyetlerini ve tasarım karmaşıklığını giderilebilmektedir. [10]

Ek Ekleme Kaybı

Elektromanyetik filtre tasarımı yaparken, dikkat edilmesi gereken konulardan birisi de ek ekleme kaybıdır. Filtrenin performansı arttırmak isteniyorsa ek ekleme kaybı dikkatlice ayarlanmalıdır.

Ek ekleme kaybı, istenilen frekansta devreden ne kadar gürültünün geçeceğini belirlemektedir. Filtrede kullanılan zayıflatma oranının formül ile ifade edilmiş halidir. Insertion loss, devreye giren sinyalin çıkış sinyaline oranını vermektedir. Frekansa bağlıdır ve birimi desibel'dir, ‘dB’ ile ifade edilir. Özellikle yüksek frekanslı devreler için oldukça önemli bir parametredir ve ne kadar yüksekse o kadar yüksek oranda gürültü bastırma özelliği taşıdığı anlamına gelir. [54]



Şekil.36 Devrenin EMI Filtre Eklenmiş ve Eklenmemiş Halinin Eşdeğer Devresi

Şekil.36'da ' V_1 ' giriş geriliminin ve ' V_2' çıkış gerilimini temsil etmektedir. ' I_1 ' giriş gerilimini ve ' I_2 ' çıkış gerilimini temsil etmektedir. Şekil.36'da verilen devrede elektromanyetik girişim filtresi olmadığı için burada ek ekleme kaybı olmamaktadır.

$$I_L = 20 \times \log \left(\frac{V_2'}{V_2} \right) \quad (19)$$

Ek ekleme kaybı (19) numaralı denklem ile temsil edilir. Ve Şekil.36'daki ikinci devrenin yük üzerindeki gerilimin Şekil.36'daki birinci devreden gerilimine oranını temsil eder.

$$V_2' = \frac{V_{source} \times V_{load}}{Z_{source} + Z_{load}} \quad (20)$$

Şekil.36'da verilen ikinci devreden V_2' için yazılan eşitlik (20) numaralı denklemde verilmiştir.

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} \quad Z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} \quad Z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} \quad Z_{22} = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} \quad (21)$$

(21) numaralı denklem Şekil.36'da verilen ilk devre için, ' I_1 ' ve ' I_2 ' akımlarının '0' olması durumunda empedans değerlerinin hangi denklemlerle belirlenebileceğini gösterir.

$$V_1 = Z_{11} \times I_1 + Z_{12} \times I_2 \quad (22)$$

$$V_2 = Z_{21} \times I_1 + Z_{22} \times I_2 \quad (23)$$

(22) ve (23) numaralı denklemler, Şekil.36'da verilen birinci devreden giriş ve çıkış gerilimlerinin eşitlik ifadesidir.

$$I_1 = \frac{V_{source} - V_1}{Z_{source}} \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{-V_2}{Z_{load}} \quad (25)$$

(24) ve (25) numaralı denklemler, şekil.36'daki birinci devreden elde edilir.

$$V_1 = Z_{11} \left(\frac{V_{source} - V_1}{Z_{source}} \right) + Z_{12} \left(\frac{-V_2}{Z_{load}} \right) \quad (26)$$

$$V_2 = Z_{21} \left(\frac{V_{source} - V_1}{Z_{source}} \right) + Z_{12} \left(\frac{-V_2}{Z_{load}} \right) \quad (27)$$

(24) ve (25) numaralı denklemlerde elde ettiğimiz I_1 ve I_2 değerini (26) ve (27) numaralı denklemde yerine yazarsak (28) ve (29) numaralı denklemleri elde ederiz.

$$\left(1 + \frac{Z_{11}}{Z_{source}} \right) \times V_1 + \frac{Z_{12}}{Z_{load}} \times V_2 = \frac{Z_{11}}{Z_{source}} \times V_{source} \quad (28)$$

$$\frac{Z_{21}}{Z_{source}} \times V_1 + \left(1 + \frac{Z_{12}}{Z_{load}} \right) \times V_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{source}} \times V_{source} \quad (29)$$

(28) ve (29) numaralı denklemi V_1 ve V_2 için yeniden düzenlersek, (30) numaralı denklemi elde ederiz.

$$V_2 = \frac{Z_{21} \times Z_{load}}{-Z_{12} \times Z_{21} + (Z_{source} + Z_{11}) \times (Z_{load} + Z_{22})} \times V_{source} \quad (30)$$

(28) ve (29) numaralı denklemleri V_2 için çözecek olursak (30) numaralı denklemi elde ederiz.

$$I_L = 20 \times \log \frac{\frac{Z_{load}}{Z_{load} + Z_{source}} \times V_{source}}{\frac{Z_{21} \times Z_{load}}{-Z_{12} \times Z_{21} + (Z_{source} + Z_{11}) \times (Z_{load} + Z_{22})} \times V_{source}} \quad (31)$$

Elde ettiğimiz V_2 ve V_2 , değerlerini ek ekleme kaybı denkleminde yerine yazacak olursak (31) numaralı denklemi elde ederiz.

$$I_L = 20 \times \log \frac{(Z_{source} + Z_{11}) \times (Z_{load} + Z_{22}) - Z_{12} \times Z_{21}}{Z_{21} \times (Z_{load} + Z_{source})} \quad (32)$$

Ek ekleme kaybı denklemi üzerinde gerekli düzenlemeler yapılrsa (32) numaralı denklem elde edilmiş olur. Bu elde ettiğimiz denklem, ek ekleme kaybı için empedanslar cinsinden bulunmuş olur.[54]

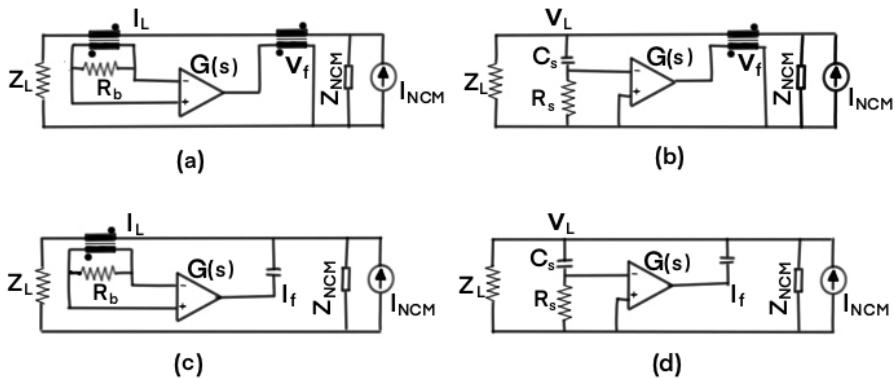
AEF Topology		Control (FB/FF)	Sensing (VS/CS)	Injection (VI/CI)	Insertion Loss (IL)
a	FB-CSVI	Feedback	Current	Voltage	$\left 1 + \frac{G}{Z_s + Z_L}\right $
b	FB-CSCI	Feedback	Current	Current	$\left 1 + \frac{Z_s}{Z_s + Z_L} \times G\right $
c	FB-VSVI	Feedback	Voltage	Voltage	$\left 1 + \frac{Z_L}{Z_s + Z_L} \times G\right $
d	FB-VSCI	Feedback	Voltage	Current	$\left 1 + \frac{G}{Y_s + Y_L}\right $
e	FF-VSVI	Feedforward	Voltage	Voltage	$\left \frac{1}{1 - G} \times \left(1 - \frac{Z_s}{Z_s + Z_L} \times G\right)\right $
f	FF-CSCI	Feedforward	Current	Current	$\left \frac{1}{1 - G} \times \left(1 - \frac{Z_L}{Z_s + Z_L} \times G\right)\right $

Grafik.4 Topolojilere Göre Kategorileştirilmiş AEF Grafiği

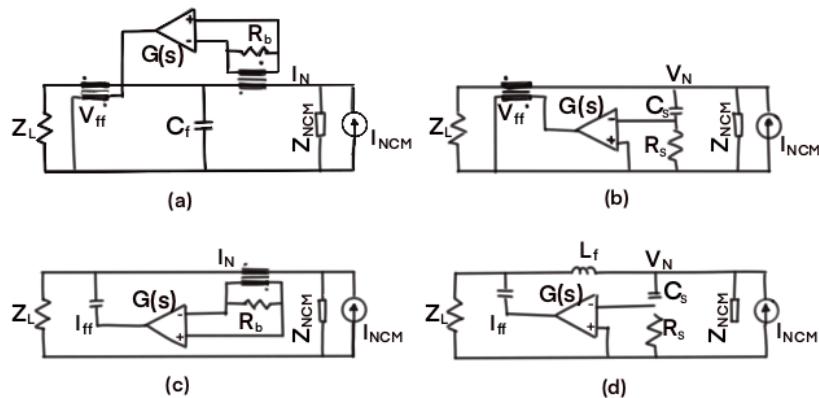
Farklı AEF Topolojileri için hesaplanmış ek ekleme kaybı değerleri Grafik.4'te verildiği gibi bulunmuştur. Bu çalışmada FB VSCI topolojisi seçilmiş, ileride anlatılacak olan faydalardan dolayı kullanılmıştır. [10]

3.3 AEF Topolojisinin Seçilmesi

Aktif EMI filtrenin asıl amacı, kullanıldığı devredeki gürültüyü algılamak ve mümkünse yok etmek eğer değilse de zayıflatmaktır. EMI filtrenin tasarıımı esnasında filtre topolojisini seçerken dikkat edilecek 3 tane husus bulunmaktadır. Bunlar: filtrenin besleme, algılama ve iptal tipidir. Bu üç başlığın alt başlıklarları da şu şekilde olacaktır: İleri beslemeli gerilim algılama gerilim iptali, İleri beslemeli akım algılama akım iptali, Geri beslemeli gerilim algılama gerilim iptali, Geri beslemeli gerilim algılama akım iptali, Geri beslemeli akım algılama akım iptali, Geri beslemeli akım algılama gerilim iptalidir. Şekil.37'de geri besleme için 4 farklı topoloji, Şekil.38'de ise ileri besleme için 4 farklı topoloji şeması gösterilmektedir.



Şekil.37 Aktif EMI Filtre Topolojileri (a) Geri Beslemeli Akım Algılama Gerilim İptali, (b) Geri Beslemeli Gerilim Algılama Gerilim İptali, (c) Geri Beslemeli Akım Algılama Akım İptali, (d) Geri Beslemeli Gerilim Algılama Akım İptali [20]



Şekil.38 Aktif EMI Filtre Topolojileri (a) İleri Besleme Akım Algılama Gerilim İptali, (b) İleri Beslemeli Gerilim Algılama Gerilim İptali, (c) İleri Beslemeli Akım Algılama Akım İptali, (d) İleri Besleme Gerilim Algılama Akım İptali [20]

AEMF topolojisini seçerken öncelikle besleme tipine bakılacaktır. İleri besleme topolojisi seçilirse, Amplifikatörün birim kazançta olması gerekmektedir. Ancak Amplifikatörün kazancı birim kazanç olursa, devrede oluşan parazitler nedeniyle birim kazanç bozulacaktır. Bu sebepten dolayı ileri besleme topolojisi tercih edilmemiştir. Geri besleme topolojisinde ise Amplifikatörün yüksek kazançta olması gereklidir. Yüksek kazanç sahip olması demek, oluşturulan AEMF'in daha iyi filtrelemesine imkân sunmaktadır. Yüksek kazanç yüzünden devredeki parazitlerin artması beklenen bir sonuctur ancak bu problem küçük bir pasif filtre ile çözüme kavuşturulabilir.

Algılama tipi topolojisini seçiminde ise akım algılama topolojisini inceleyecek olursak, bu topolojide çok büyük bir transformatöre ihtiyaç olacaktır. Bu yüzden devrenin hacmini artıracığı için akım algılama topolojisinin seçilmesi uygun olmayacağıdır. Gerilim algılama topolojisi ise, devredeki

gürültüyü küçük bir kapasitör yardımı ile algılamaktadır, bu yüzden devrenin hacmi artmayacağı için gerilim algılama topolojisi tercih edilmiştir.

İptal tipi topolojisi seçiminde ise, gerilim iptali topolojisi daha önce bahsedilen akım algılama topolojisi gibi büyük bir transformatöre ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden tercih edilmemiştir. Akım algılama topolojisi, akımı küçük bir kapasitör yardımı ile devreye geri sağladığı için akım iptali topolojisi tercih edilmiştir.

Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda en uygun topoloji olarak geri beslemeli gerilim algılama akım iptali topolojisi seçilmiştir. Şekil.37(d)'de seçilen topolojinin devre şeması verilmiştir.

Algılama ve İptal İşlemi (Sensing and Cancelling):

Elektromanyetik girişim filtreleme devrelerinde gürültüyü algılamak ve yok etmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Algılama ve iptal işlemleri, bobin veya kapasitörler ile yapılmaktadır. Algılama ve iptal işlemleri: Gerilim algılama ve Gerilim iptali veya Akım algılama ve Akım iptali şeklinde olabilmektedir. [50]

	Algılama	Enjeksiyon
Gerilim		V.T.
Akım	C.T.	

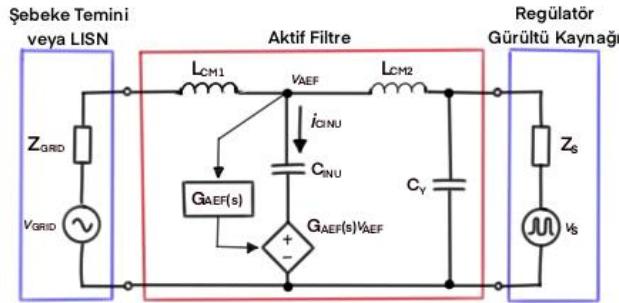
Tablo.4 Algılama ve İptal Şemaları [52]

Tablo.4'te bobin ve kapasitör için algılama ve iptal metotları gösterilmiştir. Bu metotlar: bobin ile akım algılama, bobin ile gerilim iptali, kapasitör ile gerilim algılama, kapasitör ile akım iptali şeklindedir.

Tablo.4'teki gerilim algılama kapasitörü, yüksek frekanslı gerilim sinyallerine düşük direnç gösterdiği için yüksek frekanslı gerilim sinyallerini geçirerek direnç üzerinden gerilimi algılamaktadır. Ayrıca filtre devresinde meydana gelen yüksek frekanslı gerilim sinyallerinin değişimini algılar. Gerilim enjekte etme işlemi ise bobin ile yapılmaktadır. Bobin, akım değişimine karşı direnç oluşturmaktır ve akım değişimi bobin üzerinde manyetik alan oluşturmaktadır. Bobinin oluşturduğu bu manyetik alan istenilen noktada gerilim oluşturur. Bobin ile akım algılama, bobinden alternatif akım geçtiği zaman kendisinin üzerinde manyetik alan oluşur ve oluşan bu manyetik alan bobin üzerindeki akım değişikliklerinden etkilenmemektedir ve bobin üzerinde bir gerilim oluşmaktadır. Lenz yasası, bobin üzerinde zıt yönde bir akım oluşacağını söylemektedir. Kapasitör ile akım enjekte etme, kondansatöre

gerilim uygulandığı zaman plakaları arasında bir gerilim depolar. Daha sonra depoladığı bu gerilimi hedef bölgeye akım olarak enjekte eder.

VSCI topolojisinin uygulaması, algılama ve enjeksiyon için düşük gerilim aktif devrelerle birleştirilmiş kapasitörlerden yararlanır ve bu şekilde daha küçük bir boyuta ulaşılır.



Şekil.39 CM Filtre ve Enjekte Kapasitörünün Birleştirilmiş Halinin Basitleştirilmiş Şematiği

Şekil.39'da filtremizde kullandığımız topoloji olan FB-VSCI devresinin temel prensibini anlatmak için tek fazlı şematik çizimi gösterilmektedir. Bu topolojide, daha önce de bahsedildiği gibi pasif filtredeki Y-kapasitörünün boyutunu düşürmek için Y-kapasitörüne benzer bir C_{INJ} kapasitörü kullanılmaktadır. Z_{GRID} ana hat empedansı tipik olarak endüktiftir. L_{CM1} ve L_{CM2} olarak belirtilen CM induktörleri, aynı zamanda yüksek kaynak ve yüksek empedanslara ulaşmak için bağlantı elemanları olarak da işlev görür.

Devre tasarımlarında, AC hatlarına bağlı Y-sınıfı algılama ve enjeksiyon kapasitörleri, filtre hacmini azaltma aşamasında düşük frekanstaki toprak kaçak akımlarını kontrol etmeye yardımcı olur. Bu kapasitörler, toplam filtre boyutunu azaltmak için geliştirilmiş aktif bir devreyle birlikte çalışmaktadır. Aktif devre, enjeksiyon kapasitörünün frekans tepkisini şekillendirmek için kullanılır ve böylece düşük frekanslardaki toprak kaçak akımlarını düşük tutarken, yüksek frekanslardaki kapasitor değerini etkili bir şekilde artırır. Bu yaklaşım, özellikle EMIfiltresi tasarımda verimlilik ve kompaktlık sağlamaktadır. Yüksek frekanslardaki enjeksiyon kapasitörünün etkin kapasitesini artırarak, devre daha geniş bir frekans aralığında etkili olabilir. Sonuç olarak, benzer zayıflama seviyelerine sahip pasif bir filtrelerle göre elde etmiş olduğumuz frekans aralığındaki güçlendirilmiş enjeksiyon kapasitansı ile birlikte daha düşük endüktans değerleri kullanarak CM bobinleri tasarlayabiliriz. Bu, kullandığımız pasif filtrelerle göre önemli bir avantaj sunmaktadır çünkü geleneksel pasif filtrelerde, düşük frekanslarda etkili olabilmek için yüksek endüktans değerlerine sahip, büyük ve ağır CM bobinleri gerekmektedir. Aktif devreler ve doğru bir şekilde yerleştirilmiş enjeksiyon kapasitörleri ile bu hacimli bobinlerin ihtiyacı ortadan kaldırılmaktadır. Sonuç olarak filtre tasarımını daha kompakt ve hafif hale getirirken, topraktaki kaçak akım riskini de en aza indirmektedir.

Bu özellikler, EMI kontrolünde aktif devrelerin ne kadar esnek ve etkili olabileceğini gösterir. Frekans tepkisini optimize ederek, aktif EMI filtreleri; kompakt tasarım, daha düşük maliyet ve artan performans gibi birçok etkili faydayı sağlayabilmektedir. Bu durum da aktif EMI filtrelerini, sınırlı alan ve ağırlık sınırlamaları olan modern elektronik cihazlar için ideal ve kullanışlı hale getirmektedir.

Kurulan Devrenin Avantajları:

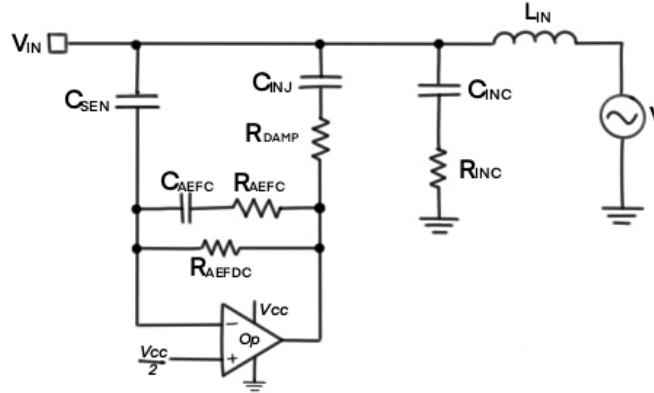
1. **Basit ve Etkili Filtre Yapısı:** Geniş bir frekans aralığında istikrarlı ve güvenilir performans sunan, basit ve kompakt bir filtrə yapısına sahiptir. Bu, devreyi karmaşık hale getirmeden farklı çeşitlerdeki uygulamalarla daha etkin hale getirmektedir.
2. **Küçük ve Hafif:** Devre, Ortak Mod Bobinin azaltılmış boyutları sayesinde daha küçük hacme ve ağırlığa sahip olmasını sağlar. Bu, düşük güç kaybı ve maliyet avantajını da yanında getirmektedir. Aynı zamanda da daha küçük bobinler, kendi kendine parazitik etkilerini azaltarak ve daha yüksek rezonans frekanslarına (f_{SRF}) izin vererek, yüksek frekanslarda daha iyi performans sunmaktadır.
3. **Ek Manyetik Bileşenler Gerekmez:** Kurulan bu devre yapısı, yalnızca Y-sınıfı algılama ve enjeksiyon kapasitörlerini kullanır, bu da ekstra manyetik bileşenlere ihtiyaç duymadan çalıştığı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, IEC 60990'da belirtilen tepe dokunma akımı gereksinimlerini karşılamak için mükemmel bir durum oluşturmaktadır.
4. **Yerleşim Esnekliği:** Tasarlanan cihazda bağımsız bir AEF IC kullanılması, filtrə bileşenlerinin yakınında komponentler için esnek yerleşim yeri imkânı sağlamaktadır. Bu, devre tasarımını kolaylaştırır ve özellikle yer kısıtlaması olan uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar.

Devrenin Kapasitif Olarak Kullanılması Konsepti

Aktif EMI filtrelerinde (AEF) kapasitif güçlendirme konsepti, ortak mod (CM) gürültüsünü azaltmanın en etkili yollarından birini sunmaktadır. AEF devresi, ilgilenilen frekans aralığında, CM bobinlerinin görünen endüktansını veya Y-kapasitörlerinin görünen kapasitansını artırarak çalışır. CM gürültüsünün zayıflaması için tasarlanmış bir AEF devresinde, enjeksiyon kapasitörü (C_{INJ}) üzerindeki kapasitansı artırmak için devrede bir amplifikatör devresi kullanılır. Bu durum, CM bobinlerinin sistemdeki gürültüyü istenilen zayıflama seviyelerine ulaştırırken, CM bobinin daha düşük değerlere sahip olmasını sağlamaktadır.

Yüksek frekans istenmeyen sinyalleri filtrelemek için Alçak Geçiren Filtre kullanılabilir. Bu filtreler, yazıda daha öncesinde detaylıca açıklanmıştır. C_f kapasitörünün büyülüklüğü hem boyut hem

de kaçak akım testi gereği toplamda $2nF$ 'ın üstüne çıkması istenmemektedir. C_f 'nin boyutunu büyütmedigimizde L_{IN} , CM bobini boyutu büyümesi gerekmektedir. Bu da hem hacim hem de maliyet açısından istenmeyen bir durumdur.



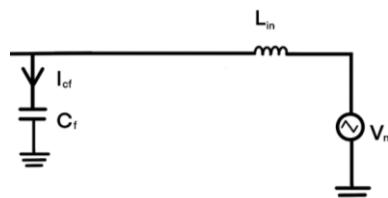
Şekil.40 Tasarlanan Aktif EMI Filtre Topolojisi

Buradaki Z_L hat empedansı, stabilite ağlarının ve güç kaynaklarının empedansını temsil eder. C_{IN} , güç dönüştürücülerinin giriş kapasitesini temsil eder ve L_{IN} diferansiyel mod indüktörüdür. C_{SEN} ve C_{inj} , algılama ve enjeksiyon kapasitörleridir ve amplifikatör devresini güç kaynağından izole etmektedirler.

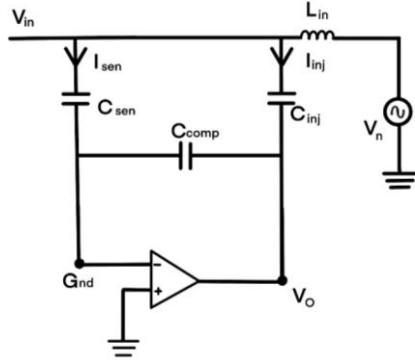
Stabilite ağının tasarımasına daha derinlemesine bakacak olursak, R_{AEFC} ve C_{AEFC} komponentleri sistemin düşük frekanslardaki stabilitesini sağlamaktadır. Yüksek frekanslarda ise, C_{INC} ve R_{INC} komponentleri devreye girer ve sistemin stabilitesini korumaktadır. Buna ek olarak, küçük bir direnç ile paralel bir kapasitörden oluşan Z_{DAMP} , AEF ile arasındaki rezonansı sönmlemek için kullanılan bir sönmleme ağıdır. Bu sönmleme ağı, rezonans durumlarında oluşabilecek olası genlik artışlarını engelleyerek sistemin kararlı çalışmasını sağlar. [55]

$$I_{cf} = C_f \cdot \frac{dV_{in}}{dt} \quad (33)$$

C_f kapasitörü (33) denklemindeki kadar akım geçirmekte bu kapasitesi aktif olarak tasarlanacaktır. Bu sayede boyutu büyütülebilecektir.



Şekil.41 LC Filtresi Yapısı



Şekil.42 Algılama ve Enjekte Kısımlı

$$I_{sen} = \frac{V_{in}}{\frac{1}{sC_{sen}}} = s \cdot V_{in} C_{sen} \quad (34)$$

(34) denkleminde bulunan akım C_{comp} üzerinden akacak akım olacaktır.

$$V_0 = -I_{sen} \cdot \frac{1}{sC_{comp}} = -V_{in} \cdot \frac{C_{sen}}{C_{comp}} \quad (35)$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{C_{sen}}{C_{comp}} = G \quad (36)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \frac{dV_{inj}}{dt} = C_{inj} \frac{d(V_{in} - (-V_{in} \cdot \frac{C_{sen}}{C_{comp}}))}{dt} \quad (37)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \cdot \frac{d(V_{in}(1 + \frac{C_{sen}}{C_{comp}}))}{dt} \quad (38)$$

$$I_{C_{inj}} = C_{inj} \cdot (1 + G_{op}) \frac{dV_{in}}{dt} \quad (39)$$

$$C_F = C_{inj} \cdot (1 + G_{op}) + C_{sen} \quad (40)$$

C_{sen} , büyüklüğü $C_{inj} \cdot (1 + G_{op})$ 'e göre çok küçüktür ve $1 + G_{op} \approx G_{op}$ olarak varsayılabılır.

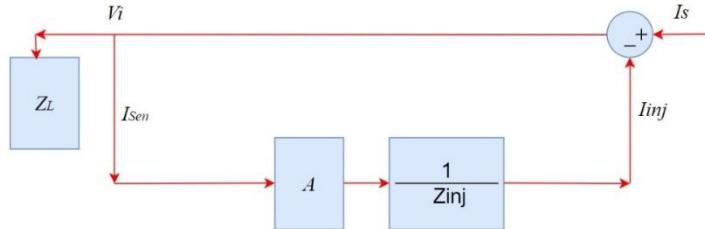
$$C_F = C_{inj} \cdot G_{op} \quad (41)$$

Bu şekilde C_F kapasitörünü aktif olarak gerçeklemeş olmaktadır.

CM gürültüsünü azaltmak için kullanılan kapasitif güçlendirme konseptinde, yüksek değerli kapasitif enjeksiyon, amplifikatör aşamasıyla sağlanır. Bu, hedeflenen zayıflamayı sağlamak için geleneksel pasif bileşenlere kıyasla daha küçük CM bobinleri kullanılmasına olanak verir. Şekil.41'e

göre, (41) numaralı denklem enjeksiyon kapasitörünün (C_{INJ}) etkin kapasitansının, amplifikatör çıkışının CM gerilim kazancı (G_{AEF}) ile etkili bir şekilde çarpıldığını gösterir.

3.3 AEF Tasarımı



Şekil.43 Blok Diyagram

Sistem Tasarımı

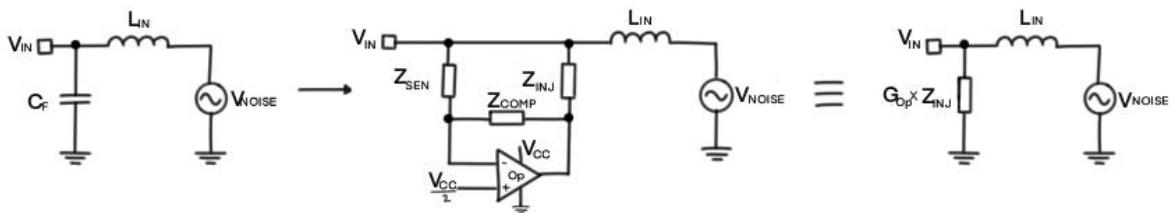
Şekil.43’de görülen blok diyagram, sistemin çalışma prensiplerini ve bileşenlerinin etkileşimini göstermektedir. Bu devrede, C_{sen} kapasitörü DC voltajını engellemekte ve istenmeyen yüksek frekanslı gürültüleri bastırarak algılama sürecini daha güvenilir hale getirmektedir. Devredeki Amplifikatör, kazancı artırmakta ve 180 derece faz kayması sağlayarak çıkış sinyalini uygun şekilde işleyip C_{inj} kapasitörüne enjekte etmektedir.



Şekil.44 Tasarım Prosedürü

Kapasitör ve Direnç Seçimi : Tasarım sürecinde, Sensing kapasitörleri olan Csen ve Caefc dikkatle seçilmiştir. Öncelikle, Sensing kapasitörlerinin Cv kapasitörlerinden büyük olması gerekmektedir. Bu, istenen kazancın elde edilmesi ve yüksek frekanslı sinyallerin doğru bir şekilde algılanması için kritik öneme sahiptir. İstenen kazancı elde etmek için Caefc kapasitörü ile Rdamp direnci arasında belirli bir oran sağlanmalıdır. Bu oran, stabilite kontrolünden önce dikkatle incelenmiştir.

Stabilite Kontrolü ve Kararlılık : Stabilite kontrolü, tasarım sürecinin kritik bir aşamasıdır. Şekil.40'daki devrede görülen R_{damp} direnci, sistemin kalite faktörü değerini 0.7-1 aralığında tutmak için ayarlanmıştır. Bu ayarlama, sistemin istenmeyen osilasyonlara karşı dayanıklı olmasını ve kararlı çalışmasını sağlar. MATLAB kullanılarak gerçekleştirilen kutup-sıfır grafiği ve root-locus grafiği ile analizi yapılmış ve sistemin kararlı olduğunu doğrulamıştır. Bu analizde, sistemin transfer fonksiyonu ve bileşenlerinin etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil.45 Aktif EMI Filtre Şeması

Şekil.40'daki şemada gösterilen devrede R_{AEFDC} , C_{AEFC} düşük frekanslı geçiş noktalarını ayarlayan elemanlardır. C_{sen} , gerilim algılama kapasitördür. C_{inj} , akımın enjekte edilmesi görevini sağlayan kapasitördür.

Alçak $F_{SW} < 1\text{MHz}$ altı için ve Yüksek $F_{SW} > 1\text{MHz}$ üstü için aşağıdaki tablo kullanılabilir.

	Alçak	Yüksek
C_{sen}	0.1 μF	0.1 μF
R_{AEFC}	1k Ω	200 Ω
C_{AEFC}	1nF	5 nF

Tablo.5 Alçak ve Yüksek Frekans İçin Komponent Değerleri

Devre tasarıminda iki şartın sağlanması beklenmektedir:

$$R_{AEFDC} \gg R_{AEFC} + \frac{1}{sC_{AEFC}} \quad (42)$$

$$\frac{1}{sC_{AEFC}} \gg R_{AEFDC} \quad (43)$$

43 numaralı denklemde Z_{AEFC} den büyük olması gereği için $R_{AEFDC} = 100k\Omega$ gibi yüksek bir değer seçilmelidir.

$$Z_{comp} = (R_{AEFC} + \frac{1}{sC_{AEFC}}) // R_{AEFDC} \quad (44)$$

$$Z_{sen} = \frac{1}{sC_{sen}} \quad (45)$$

$$G = \frac{Z_{con}}{Z_{sen}} = \frac{C_{sen}}{C_{AEFC}} \quad (46)$$

Dolayısıyla devremiz bu şartlar altında kapasitör gibi modellenmiştir.[59]

Sönümleme:

Filtre devrelerinde sökümleme işlemi, devrenin performansını iyileştirmek veya istenmeyen rezonansları kontrol altına almak için önemlidir. Bu çalışmada olduğu gibi, yüksek frekanslı uygulamalarda da rezonans yüzünden belli frekanslarda aşırı genlikli salınımlar oluşabilmektedir. Bu salınımlar, istenmeyen bozulmalara ve gürültülere yol açabilir. Sistemin kararlılığı da bu sebepten dolayı etkilenebilmektedir. Bu yüzden, tasarlanan devrede sökümleme metotları kullanılması önemlidir.

2 çeşit metot vardır:

a) *Seri Sönümleme Metodu:*

Şekil.40'daki şemada gösterilen devrede verilmiştir.

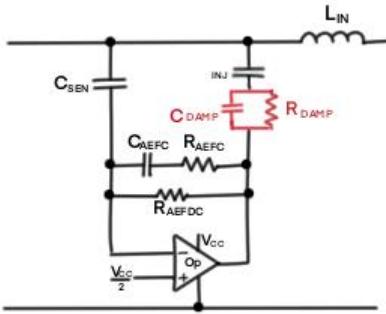
$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (47)$$

Kalite Faktörü (Quality Factor) 0,7 ile 1 arasında olmalı ki, aşırı sökümlü bir alçak geçiren devresi olamasın. $Q = 1$ olarak alırsak:

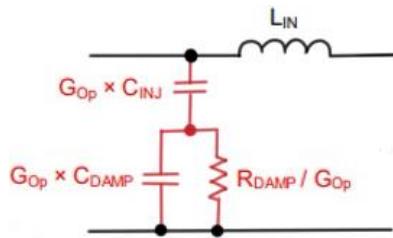
$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow \frac{R_{damp}}{G_{op}} = \sqrt{\frac{L_{in}}{G_{op} \cdot C_{inj}}} \quad (48)$$

Bu şekilde seri sökümleme yapılmaktadır.

b) Paralel Söñümleme:



Şekil.46 Paralel Söñümleme Devresi Şeması



Şekil.47 Paralel Söñümleme Devresi İçin Basitleştirilmiş Hali

$$Z_{damp} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_d}\right)^2 + (2\pi f_{SW} C_d)^2}} \quad (49)$$

$$Z_{damp} = \sqrt{\frac{L_{in}}{G \cdot C_{inj}}} \quad (50)$$

$$R_{damp} = G_{op} \sqrt{\frac{L_{in}}{G_{op} \cdot C_{inj} - (2\pi f_{SW} \cdot C_{damp})^2}} \quad (51)$$

$$R_{damp} \approx \sqrt{\frac{C_{sen}}{C_{AEFC}} \cdot \frac{L_{in}}{C_{inj}}}, C_{damp} = \frac{1}{2} C_{inj} \quad (52)$$

C_{inj} değerinin hesaplanması:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{in} \cdot C}} \quad (53)$$

$$L_{in} \cdot C_f = \frac{1}{(2\pi f_c)^2} \quad (54)$$

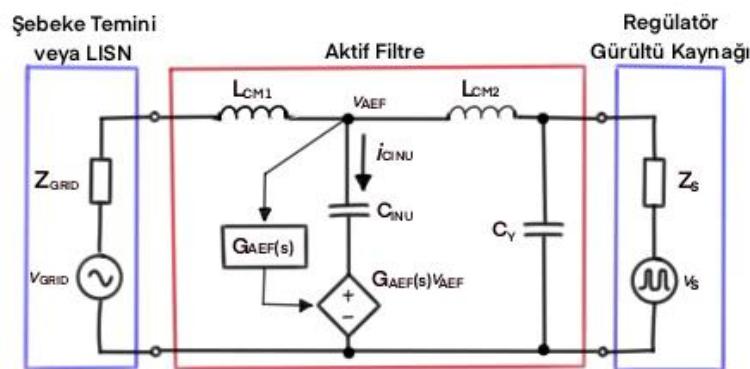
$$C_F = C_{inj} \cdot G_{op} \quad (55)$$

$$L_{in} \cdot C_{inj} = \frac{1}{G_{op} \cdot (2\pi f_c)^2} \quad (56) [9]$$

Seçilen AEF'nin çalışma prensibi: Pasif EMI filtrede olduğu gibi AEF devresi'de, EMI kaynağı ile EMI'den etkilenen devre arasındaki bağlantı hatlarına yerleştirilmektedir. Ancak çalışma prensibi tamamen farklıdır. Pasif filtreler, EMI'yi baskılamak için reaktif bileşenler kullanırken; AEF devreleri, aktif bileşenler ve kontrol sistemleri aracılığıyla çalışır. Şekil 40'da gösterildiği gibi, AEF, hatlardaki artık gerilim ve akım bozulmasını algılar ve bu gürültüyü ortadan kaldırmak veya azaltmak için sisteme karşıt bir sinyal enjekte eder. Bu yaklaşım, süperpozisyon teoremine dayanmaktadır. Enjekte edilen sinyal, gürültüye zıt fazda ve eşit genlikte olduğundan, iki sinyal bir araya geldiğinde birbirlerini yok ederler. Buradaki yıkıcı girişim etkisi, EMI'yi nötralize eder veya büyük ölçüde azaltır, böylece EMI'nin zararlı etkileri en aza indirilir.

Akustikte yaygın olarak kullanılan bu teknik, özellikle aktif gürültü iptali gibi uygulamalarda başarılı olmuştur ve EMI kontrolü için de oldukça etkili bir strateji sunar. AEF'nin bu şekilde çalışması, filtre tasarımda esneklik ve verimlilik sağlar. Geleneksel pasif filtrelerin hantal ve ağır bileşenlerinin yerini alarak, daha kompakt ve hafif bir tasarımın yolunu açar. Buda, sınırlı alanlar ve hafiflik gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunar.

Gürültü kaynakları ve elektrik şebekesi empedansları bizler için kullanmış olduğumuz elektronik devrelerde istikrarsızlık yaratabilen temel faktörlerdir. Elektrik şebekesindeki bu parametreler genellikle öngörülemezdir ve kontrol edilmesi zordur. Şebekeye bağlı elektronik sistemlerin kararlılığı açısından bu unsurlar dikkate alınmalıdır. Özellikle akım transformatörleri ve hat akımı tabanlı geri besleme kullanan devrelerde, şebeke empedansı ve gürültü kaynakları doğrudan devrenin performansını etkilemektedir. Akım transformatörleri, geniş bir bant genişliğine ihtiyaç duyar ve seri bağlandıklarında, yüksek frekanslarda istenmeyen rezonanslar veya kapasitif etkiler görülebilir. Aynı zamanda geleneksel CM indüktörlerine ek sargılar eklenmeside, üretim güvenliği ve malzeme sınırlamaları nedeniyle yüksek frekanslarda performans sorunlarına yol açabilir.



Şekil.48 CM Filtreme Devresinin Tek Fazlı Bir Sistemde Şeması

Bütün bu zorlukların üstesinden gelebilmek için, hat geriliminde istenen kapasitif değerleri sağlayan ve kapasitör tabanlı bir amplifier içeren topolojiler, alternatif ve daha istikrarlı bir yaklaşım sunar. Bu türdeki bir topoloji, aktif filtreleme için sağlam ve uygun maliyetli bir çözüm olabilir. Çalışmada incelenen aktif filtre topolojisi, Şekil.46'da basitleştirilmiş haliyle sunulmuş ve AC hatlara bağlılı olarak çalışan bir yapı tasarımları gösterilmiştir.

3.4 Aktif EMI Filtresi Kullanılma Sebepleri

Pasif EMI filtreler, büyük boyutlara sahip ve yüksek frekanslı gürültüler için çözüm olurken, çok aşamalı LC devrelerine ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden yüksek maliyetli ve katmanlı devrelere sahip olacağı için daha büyük boyutlara sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklerinden dolayı ağır ve hantaldırlar. Manyetik malzemeler yüzünden induktörlerin hacimleri de istenildiği gibi azaltılamamaktadır. Ayrıca sistemin endüktansını da düşürmek istediğimiz zaman kapasitörlerin hacimlerini artırmak gerekmektedir lakin burada da sınırlandırmalar (kısıtlamalar) vardır. Yani sonuç olarak Pasif EMI Filtreler güç ve planlanan performansın elde edilememesi gibi problemlerden dolayı hacimli kalmakta ve çözümü de kolay olmamaktadır. [17]

Pasif filtrede: harmonik akımların kontrolü için her frekansa özel bir filtre kullanılmak zorundadır. Empedans modifikasyonunun etkisi olarak da rezonans riski içermektedir. Sisteme herhangi bir yük eklendiği takdirde filtre tekrardan değiştirilmesi gerekebilir. Sistemde oluşan harmoniklerin sırası ile kontrolü oldukça zor olup daha önce bahsettiğimiz gibi harmonik derecesine göre boyut ve ağırlık olarak çok değişkenlik göstermektedir.[49]

Aktif EMI Filtreler ise düşük frekans zayıflamalarını iyileştirmek için pasif komponentlerin yanında aktif bileşenler de içermektedir. Çalışma mantığı hemen hemen pasif EMI filtre ile benzerdir. Ana konsepti, Amplifikatörü da devreye dahil edip işlevini yerine getirmesidir. Pasif filtreye göre daha küçük alan kapları (yaklaşık %30) ve ayrıca daha yüksek performanslarda çalışırlar. Güç açısından da daha iyi sonuç vermekle beraber, kurulan sistem istenildiği şekilde daha rahat değiştirilebilmektedir. [17]

Aktif filtrede: harmonik akımların kontrolü için aynı anda bir çok harmonik akımın kontrolü yapılmamaktadır. Empedans modifikasyonun herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Sisteme herhangi bir yük eklendiği takdirde ise filtre üzerinde bu durum herhangi bir etki yaratmamakta olup değişim yapmadan filtre tekrardan devre üzerinde kullanılabilmektedir. Sistemde oluşan harmoniklerin sırası ile kontrolü de, yapılacak olan ayarlar ile mümkündür. Filtreye genel boyut ve ağırlık için kompakt çözümler sunulabilmektedir. Her türlü yük (tek faz ve üç faz) için uyumlu çalışabildiği gibi, ölçüm alınacak olan sisteme bağlantısı kolaydır. [49]

3.5 EMI İçin Dizayn Çözümleri

Güç elektroniğindeki elektromanyetik gürültü problemini belirlenen standartlara göre çözebilmek için iki ana çözüm bulunmaktadır: EMI Filtresi kullanmak veya muhafaza kullanmak. Lakin oluşan bu EMI, cihazın her aşamasında bulunduğu için, EMI filtre veya muhafazayı belirlemeden önce her adımda EMI’ı kontrol altında tutmamız gerekmektedir. Aksi taktirde son duruma gelmeden EMI sürekli göz ardı edilirse, oluşan gürültüyü engellemek için masraflı ve zor bir EMI filtersi tasarıımı gerekebilir.

Öncelikle yapacağımız cihazda PCB çiziminde dikkatli olmalıyız. Her bir komponent bir gürültü üretebileceği için, her birinin konumlandırılması ve yerleştirilmesi bizim için çok önemlidir. Zaten biz bu işlemi yaparken, devredeki komponentlerden geçen akımı ve gerilimi, taşınacak sinyalin ne olduğunu ve frekansını biliyoruz ve de buna göre PCB tasarıımızı yapıyoruz. Bir başka önemli olan konu ise doğru topraklamadır. Devredeki Ortak Mod ve Diferansiyel Mod Gürültüleri için topraklama oldukça önemlidir. Tek bir noktadan topraklama yapılması, birçok noktadan topraklama yapılmasından daha iyidir. Devre topolojisine göre de topraklananın doğru konumlandırılması gerekmektedir.

Korumalı Kablolar (Shield Cables)

Koaksiyel kabloların iç yüzeyinde, akımın dolaşmasını sağlayan ve karakteristik empedansın kontrolünü yapmamızı sağlayan pürüzsüz bir şekil bulunmaktadır. Çünkü pürüzsüz şekil, yüzey yansımalarını önemli derecede önlemektedir.

Yayılan EMI’ı azaltmak için kullanılan kablolar genellikle alüminyum folyodan veya kalaylı bakır örgüden oluşan kablo korumaları bulunmaktadır. Kablonun içerisindeki folyo, katlanmış bir dikiş sahip olarak üretilmektedir. Bu dikiş, akan akımın kablo etrafında serbestçe akmasına izin vermeyip direkt olarak içerisinde akmasını sağlamaktadır. Folyonun korozyona karşı bağışıklığı olması için folyo anodize edilmektedir. (Anodizasyon(Eloksal): Alüminyum ve alaşımının korozyona karşı direncini arttırarak, boyanın yüzeye tutunmasına katkı sağlamak için uygulanan kimyasal yolla bir film tabakası oluşturma işlemidir.) Kullanılan kabloların içindeki folyonun, kablo ucunda folyonun sonlandırma işlemi oldukça zordur. Bu yüzden kablo folyosunun dışarısında bir boşaltma teli bulunmaktadır. Bu topraklama teli, tüm kablo boyunca folyo ile temas eden çok telli kalaylı bakır tellerden oluşmaktadır. Eğer ki kablonun herhangi bir yerinde kırılma yaşanırsa bu tel ayrık olan yerleri birbirine bağlamaktadır.

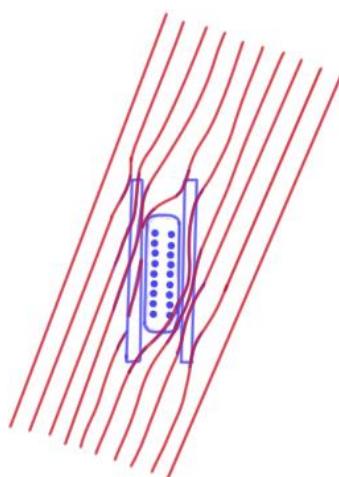
İletken tellerin üzerindeki alüminyum folyo, düşük frekanslardaki çalışmalar için oldukça iyi bir elektrostatik koruma sağlamaktadır. Bu koruma telinin bir ucu referans iletkenine bağlanması gerekip diğer ucu iletken telin toprağa bağlılığı yere bağlanmalıdır. Eğer ki boşaltım kablosunun (Drenaj kablosu) her iki ucu da topraklanan komponente bağlanırsa parazit meydana gelebilir.

İletken Muhafazalar (Conductive Enclosures)

Devrede kullanılan muhafazanın elektromanyetik enerjiyle nasıl bir ilişki içerisinde olduğunu bahsedelim biraz da. Bu muhafaza kutu şeklinde bir metaldır aslında. Bizim için, birazdan da bahsedeceğimiz gibi, bu metal kutunun şekli, nasıl tasarlandığı, içerisinde herhangi bir delik olup olmadığı gibi etkenler çok önemlidir. Muhafazalar asıl çözüm olarak yayılan EMI sorunu için kullanılmaktadır.

Enerji, kablo bağlantılarının içerisinde, çevresinden, devredeki açıklıklardan ve hatta muhafaza üzerinden geçerek birleşebilir ve iletilabilir. Ancak iletken bir muhafaza, alandan nüfuz eden sinyale etkisiz bir kalkan olabilir. Eğer ki devrede EMI için kullanılan filtre işe yarıyor yani etkiliyse muhafaza koruması gereksiz olabilmektedir. Bir muhafazanın içerisinde oluşan yayılma enerjisi, muhafazanın dışarısına yayılabilir. Eğer ki yayılımı yapan komponentin dalga empedansı düşükse, yansımı kaybı az olabilir. Böyle olursa eğer muhafaza, alan enerjisini azaltmada pek de etkili olamayabilir.

Devrede kullanılacak olan muhafaza, devrenin topolojisine uygun olarak yerleştirilmelidir. Yani Şekil.47'de de görüldüğü üzere devredeki mevcut manyetik alana göre ters bir konumda muhafazanın kullanılması, tasarımda istenen korumayı yerine getirememesiyle sonuçlanabilir. Bu yüzden bu durum asla göz ardı edilmemelidir. Bir örnek verecek olursak referans aldığımız bu çalışmada 1.5 cm'lik bir açıklık, yaklaşık olarak $\frac{0.2V}{m}$ 'lik bir alan kuvvetine sebebiyet verdiği ortaya çıkmıştır.



Şekil.49 Manyetik Alanın Muhafaza ile Yönlendirilmesi

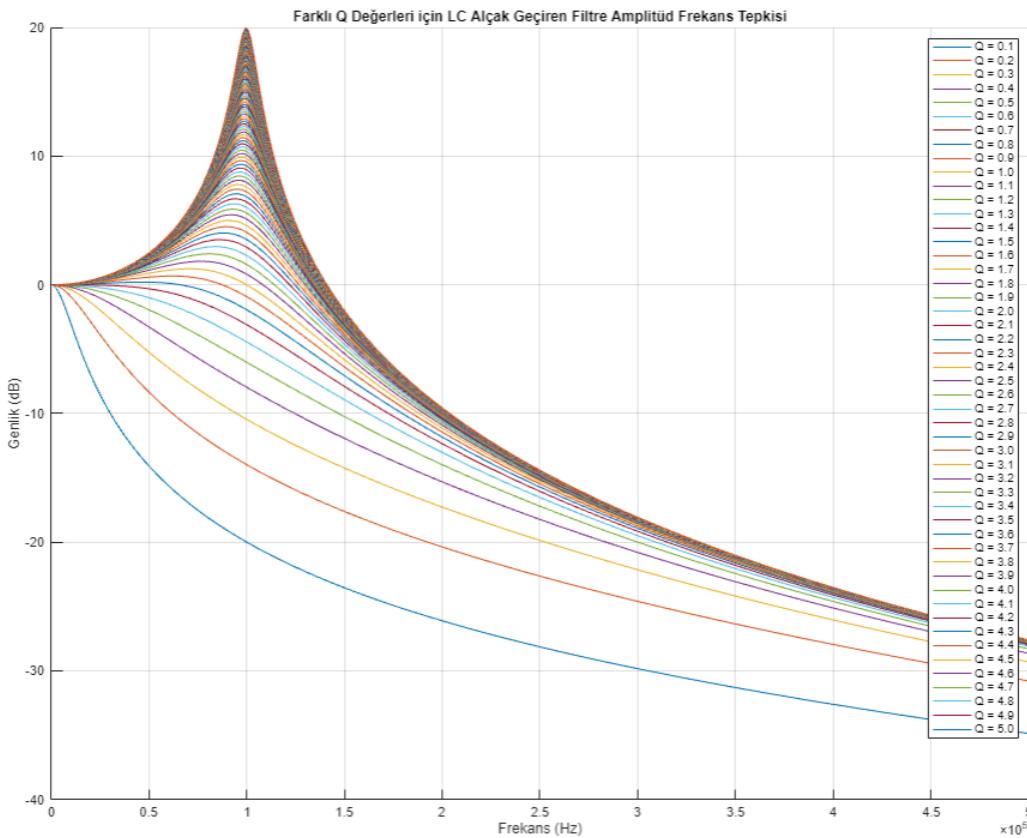
Elektromanyetik alan iletken bir yüzeye geldiği zaman 2 olay gerçekleşmektedir: Gelen enerjinin bir kısmı yansıtılır ve yansıtılmayan enerji ise iletkenin içerisinde girip kablonun özelliği ile zayıflar. Birkaç milimetreden daha kalın olan iletkenlerde bu enerji ışıya dönüşmektedir. Ayrıca yayılan

alan enerjisi, iletkende bulunan muhafazaya eğer herhangi bir açıklık varsa da girebilir. İçeriye giren bu dalganın şekli; iç kısımdaki komponente, açıklığın şekline, alan yalitimına ve muhafazanın boyutu ile yerleştirme yönüne göre çok değişkenlik göstermektedir. [16]

3.6 Stabilite Analizi

Stabilite analizi, bir sistemin belirli girişlere verdiği tepkilerin zamanla sökümlenip sökümlenmediğini ve dolayısıyla sistemin kararlı olup olmadığını belirlemek için yapılan bir incelemedir. Bu analiz, özellikle kontrol sistemlerinde büyük önem taşır çünkü kararsız sistemler istenmeyen salınımlar veya büyüyen tepkiler sergileyebilir.

LC filtreler, elektronik devrelerde sinyallerin frekansını belli bir aralıktan geçiren veya engelleyen önemli bileşenlerdir. Bu filtrelerin performansı, Q değeri olarak adlandırılan kalite faktörüyle yakından ilişkilidir. Q değeri, filtre tarafından belirli bir frekansı ne kadar iyi ayırt edebildiğini gösterir.



Şekil.50 Alçak Geçiren Filtre Quality Factor Grafiği

Şekil 50'de görülen genlik logaritmik frekans grafiği, farklı Q değerleri için LC filtresinin davranışını göstermektedir. Q değeri arttıkça, filtre frekansları daha keskin bir şekilde ayırt eder. Bu, yüksek Q değerlerinin daha dar bir bant genişliği ve daha belirgin bir kesme frekansı sağladığını anlamına gelir. Ancak, yüksek Q değerleriyle birlikte bazı dezavantajlar da gelir. Filtrenin bant genişliği

daraldıkça, faz kaybı artar ve geçiş bölgesindeki sinyal kaybı artabilir. Bu nedenle, Q değeri seçilirken dikkatli olunmalıdır.

Bu çalışmada, LC filtresinin Q değeri 0.75 olarak seçilmiştir. Bu değer, filtre performansını iyileştirirken, aynı zamanda geçiş bölgesindeki faz kaybını da kabul edilebilir düzeyde tutar. Sonuç olarak, filtre istenilen frekansları etkili bir şekilde geçirecek ve istenmeyen frekansları engelleyecektir.

Transfer fonksiyonumuz hesaplandı ve sistemimizin stabilitesini değerlendirmek için kök pole eğrisine ve root locus grafiğine bakacağız. Ayrıca, sistemin kutup ve sıfırlarını kontrol ederek stabilitesini analiz edeceğiz. Bu amaçla, aşağıdaki MATLAB kodunu kullanacağız:

```
Csen = 100e-9; % 100 nF kapasitans
```

```
Caefc = 1e-9; % 1 nF kapasitans
```

```
Raefc = 1e3; % 1 kOhm direnç
```

```
Raefdc = 100e3; % 100 kOhm direnç
```

```
numerator = [Raefdc * Raefc * Caefc, 0, Raefdc];
```

```
denominator = [Raefc * Caefc, Raefc + Raefdc, 0];
```

```
H1_s = tf(numerator, denominator);
```

```
H_s = feedback(H1_s, Csen);
```

```
disp('Transfer Fonksiyonu:');
```

```
H_s
```

```
poles = pole(H_s);
```

```
zeros = zero(H_s);
```

```
disp('Transfer Fonksiyonunun Kutupları:');
```

```
disp(poles);
```

```
disp('Transfer Fonksiyonunun Sıfırları:');
```

```
disp(zeros);
```

```
figure;
```

```
bode(H_s);
```

```
title('Bode Grafiği');
```

```
grid on;
```

```
figure;
```

```
nyquist(H_s);
```

```

title('Nyquist Grafiği');
grid on;

figure;
nichols(H_s);
title('Nichols Grafiği');
grid on;

figure;
pzmap(H_s);
title('Kutup-Sıfır Haritası');
hold on;
scatter(real(poles), imag(poles), 100, 'ro', 'filled', 'DisplayName', 'Kutuplar');
scatter(real(zeros), imag(zeros), 100, 'bx', 'DisplayName', 'Sifirlar');
legend('show');
grid on;
xlabel('Gerçek Kısım');
ylabel('İmajiner Kısım');

figure;
rlocus(H_s);
title('Root Locus Diagramı');
grid on;

[gm, pm, Wcg, Wcp] = margin(H_s);
fprintf('Faz Marjı: %2.2f derece\n', pm);
fprintf('Kazanç Marjı: %2.2f dB\n', 20*log10(gm));

if isstable(H_s)
    fprintf('Sistem kararlıdır.\n');
else
    fprintf('Sistem kararlı değildir.\n');
end

figure;
step(H_s);

```

```
title('Adım Cevabı');
```

```
grid on;
```

```
figure;
```

```
impulse(H_s);
```

```
title('Dürtü Cevabı');
```

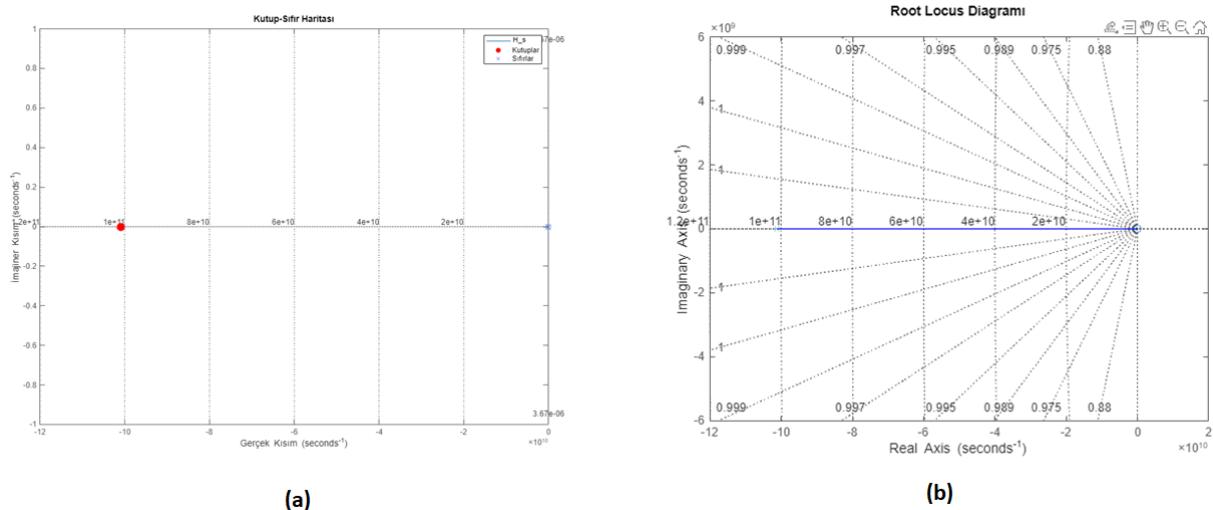
```
grid on;
```

```
figure;
```

```
freqresp(H_s);
```

```
title('Frekans Tepkisi');
```

```
grid on;
```

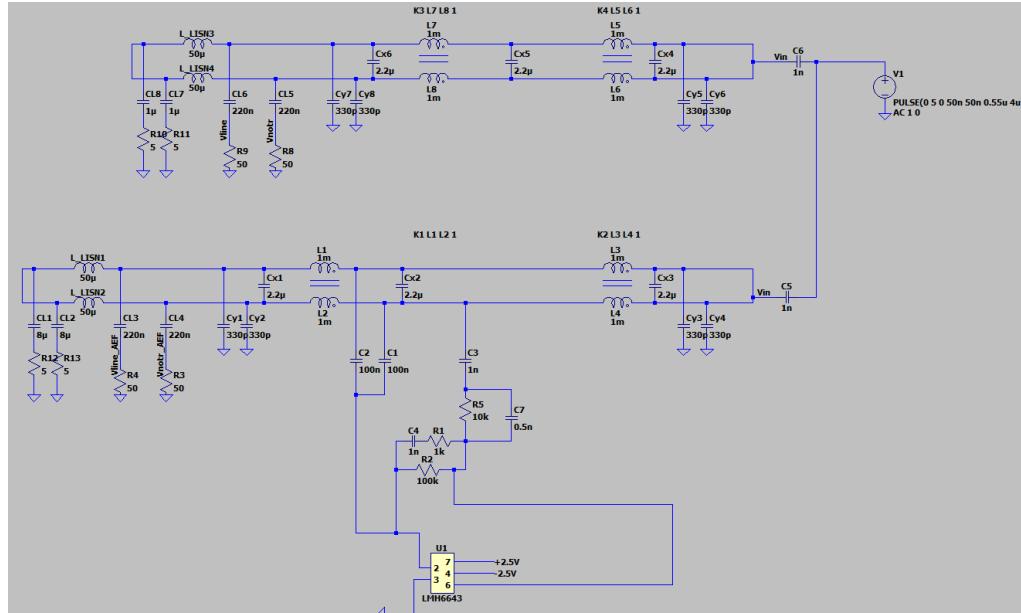


Sekil.51 (a) Sistemin Kutup Sıfır Grafiği, (b) Sistemin Root Locus Grafiği

Şekil.51 (a) kutup-sıfır haritasında, kutupların gerçek kısmının sol tarafında kalması sistemin kararlı olduğunu gösterir. Şekil.51 (b) Root-Locus diyagramı ise değişen kazanç değerleri için sistemin kararlılığını sürdürdüğünü ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, MATLAB kodumuzun çıktısından da görülebileceği Şekil.49 görüldüğü üzere sistemimiz kararlıdır. Gerçek hayatta yapılan testlerde de sistemin kararlı olduğu görülmüştür. Bu, tasarladığımız sistemin güvenilir ve doğru çalıştığını doğrular.

Devrenin Simülasyon Sonuçları ve Gerçek Sonuçlar



Şekil.52 Tasarlanan Filtrenin LTspice Uygulamasındaki Çizimi

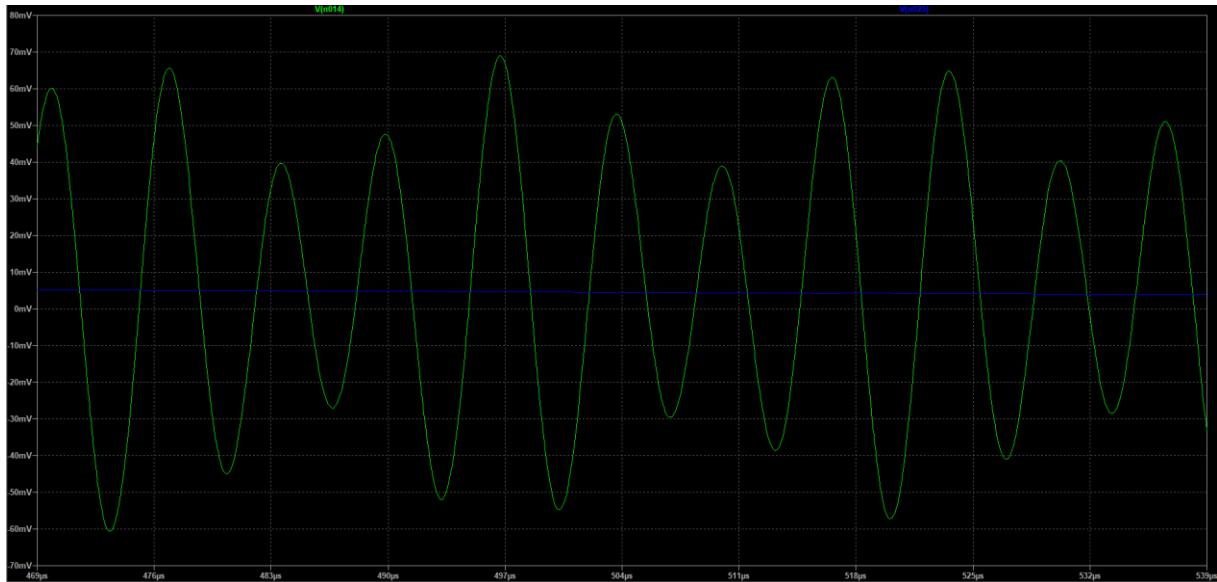
Şekil.52'de, tasarlanan filtrenin simülasyon çizimi gösterilmektedir. Bu simülasyonda, 3V ve 150 kHz frekansında 0.22 Duty Cycle'lık (Görev Döngüsü) sinüs dalga verilerek güç dönüştürücüsü modellenmiştir. Şekil a'da gösterilen devre, güç dönüştürücünün temel yapı taşlarını içermektedir ve çalışmadaki simülasyonlar bu filtre tasarımlı üzerinde gerçekleştirilmiştir.



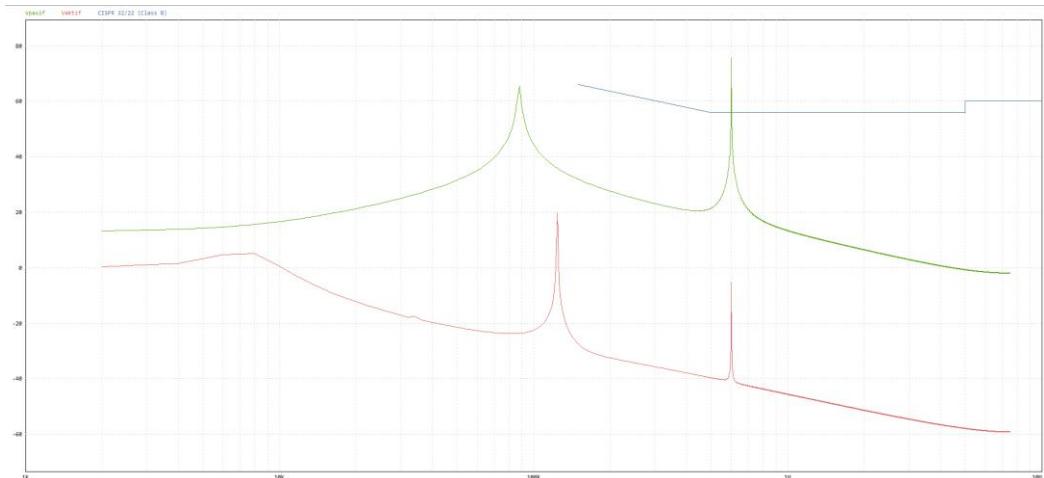
Grafik.5 Yapılan Sistemin Bode Diyagramı

Grafik.5'te , tasarılanen filtrenin Bode grafiği çizilmiştir. Yeşil renkteki çıktı, AEF devresinin

devre dışı bırakıldığındaki durumdaki çıkışını temsil ederken, kırmızı renkteki grafik AEF'in etkinleştirildiği zamanki çıktıyı göstermektedir. Bu çıktılar arasındaki yaklaşık 60 dB'lik fark, AEF'in etkinleştirilmesinden sonraki filtreleme performansını belirgin bir şekilde artırdığını göstermektedir. (artırdığını göstermektedir yerine başka bir fiil çekimi olmalı burada)

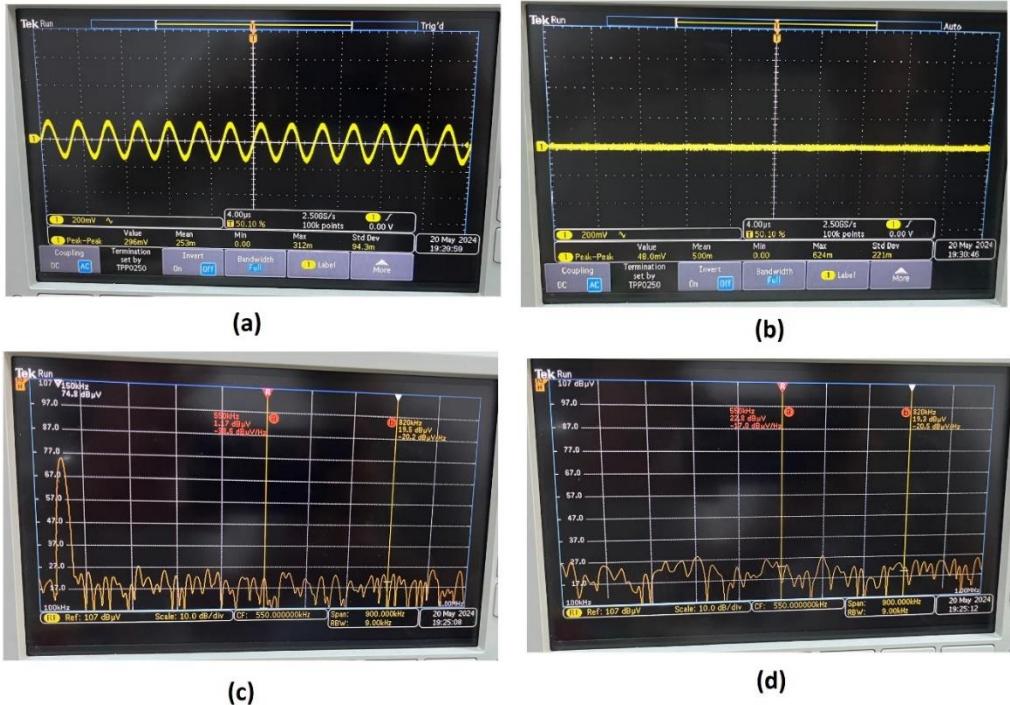


Grafik.6 Tasarlanan Devrenin Giriş ve Çıkış Sinyalinin Ölçülmesi



Grafik.7 Aktif ve Pasif Devrenin Sonucunda Elde Edilen Gürültü Azaltımı Grafiği

Grafik.6'da zaman alanında alınan ölçümleri göstermektedir. LISN üzerinden alınan bu ölçümlerde, aktif filtre devresinin devre dışı bırakıldığı durum ile (yeşil renk) devreye alındığı duruma (mavi renk) kıyasla bariz bir zayıflama görülmektedir. FFT sonuçları da incelediğinde, sistemin performansı arasında 57 dB'lik bir fark olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil.53 Gerçeklenen Devrenin Sonuçları

AEF'nin aktif hale getirilmesiyle CISPR 32 Class B standartlarına uygunluğunun sağlandığı uygulama üzerinde de gözlemlenmiştir. Grafik.7'de mavi ile çizilen düz çizgi, CISPR 32 Class B standartı için gereken maksimum gürültü seviyesidir.

Bu çalışmada, geleneksel pasif EMI filtrelerinin yerini alabilecek alternatif EMI filtreleri (AEF) üzerine yoğunlaşmış ve AEF'lerin performansı çeşitli simülasyon ve ölçüm yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, AEF'in etkinleştirilmesinin filtreleme performansını belirgin şekilde artırdığını ve elektronik cihazların EMC gereksinimlerine de uygunluğunu sağladığını göstermektedir. Yapılan çalışma sayesinde elde edilen AEF, elektronik cihazların daha güvenli ve güvenilir hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

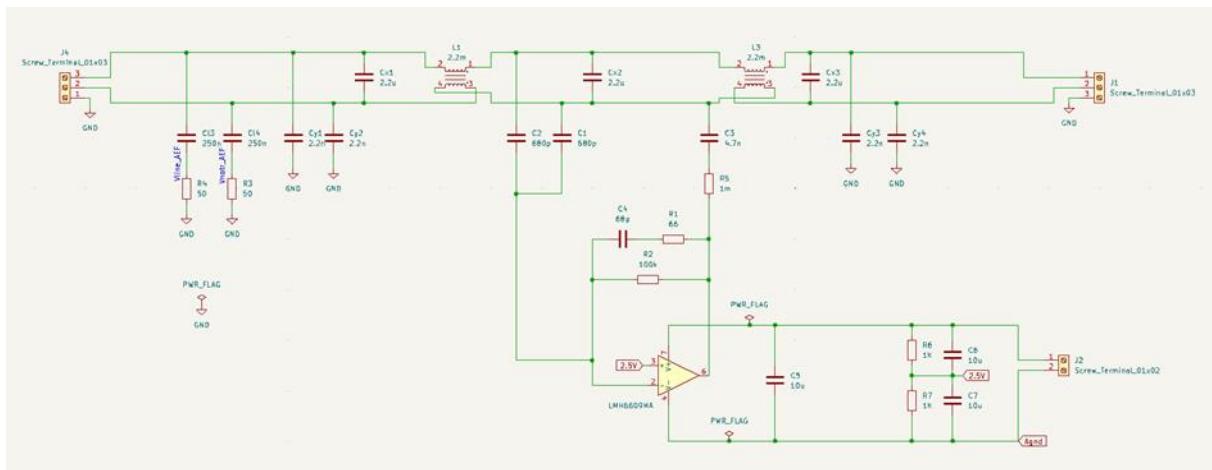
EK-1

PCB tasarım:

Projenin tasarım aşaması başarıyla sonuçlandırıldıktan sonra simülasyon aşamasına geçilmiştir ve simülasyon aşamasında da beklenen sonuçlar alındıktan sonra PCB tasarım aşamasına geçilmiştir. PCB tasarımı dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar: Şematik çizim, Komponentlerin ayak izi çizimi, Ayak izi atamasının yapılması ve PCB yollarının çizilmesidir.

Şematik çizim:

PCB tasarımının ilk aşaması şematik çizim aşamasıdır. Simülasyonlarda başarılı sonuçlar elde edilen devrenin şematik çizimi yapılır. KiCad uygulaması üzerinden yapılan şematik çizim tamamlandıktan sonra çizimde elektriksel hata kontrolü yapılmıştır. Elektriksel hata kontrolünün yapılması önemlidir. Çünkü elektriksel hata kontrolünün yapılmadığı durumlarda devrenin güvenilirliği tehlikeye atılmış olacaktır.

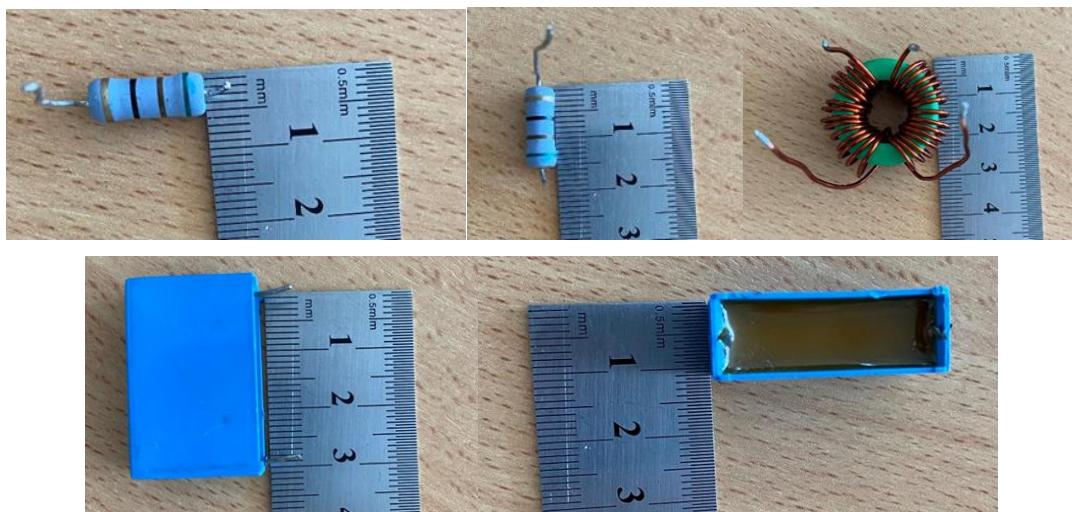


Sekil.54 KiCad Uygulamasında Devrenin Şematik Çizimi

PCB kartında pasif filtre komponentleri üst kısma, aktif filtre komponentleri alt kısma yerleştirilmesi uygun görüldüğü için şematik çizimi de buna göre yapılmıştır. Pasif filtre ve aktif filtre komponentlerinin birbirinden uzak konumlarda çizilmesinin sebebi, yüksek akım geçen elemanlarla düşük akım geçen elemanları farklı yerlerde konumlandırmaktır. Şekil.54'de görüldüğü üzere pasif filtre komponentleri kartın üst kısmına konumlandırılmış ve aktif filtre komponentleri kartın alt kısmına konumlandırılmıştır.

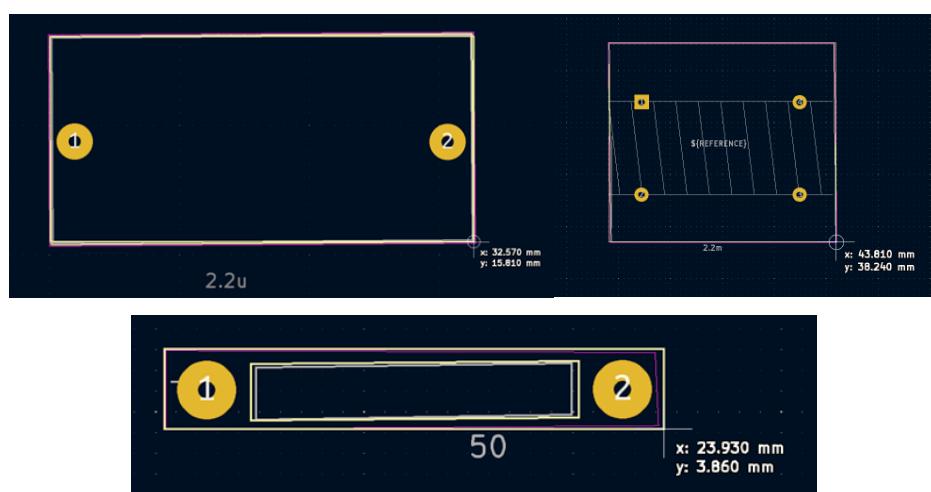
Ayak izi çizimi:

Devrede kullanılacak komponentlerin bazlarının ayak izleri KiCad kütüphanesinde bulunmamaktadır. Bu yüzden bazı komponentlerin ayak izi çizimleri bizim tarafımızdan çizilerek kütüphaneye eklenmiştir. Bu çizimleri yapabilmek için Şekil.55'de görüldüğü üzere önce komponentlerin en ve boy ölçülerini alınmıştır.



Şekil.55 Komponentlerin Ebatlarının Ölçülmesi

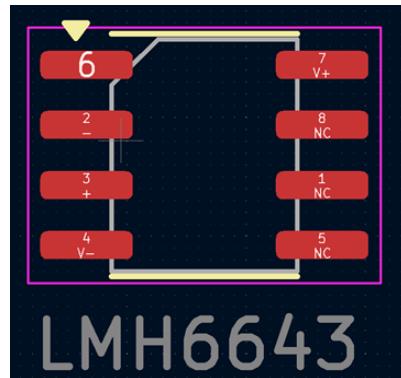
Şekil.55'deki gibi komponentlerin en ve boy ebatları ölçüldükten sonra PCB yerleşiminde problem olmaması için iki bacak arası mesafeyi 1:1 ölçülerde çizilmiştir. En ve boy ölçülerini, PCB'ye rahat yerleşebilmesi için 0 ile 1mm arasında pay bırakılarak çizimi yapılmıştır.



Şekil 56 Komponentlerin Ayak Izı Çizimleri

Şekil.56'da kapasitör, bobin ve direnç için ayak izi çizimleri gösterilmektedir. Direncin PCB

üzerine daha rahat yerleştirilebilmesi için kapasitör ve bobine göre daha fazla pay verilerek çizilmiştir. Bunun sebebi, direncin yatay uzunluğuna kablo payı bırakılmasıdır.



Şekil.57 Amplifikatör İçin Ayak İzi Çizimi

Kullanılacak Amplifikatör olan LMH6643 için kütüphanede ayak izi çizimi bulunmamaktadır. Bu yüzden aynı pakete sahip fakat bacaklarının yerleri farklı olan bir prototip, kütüphaneden alınıp sadece bacaklarının yerleri LMH6643'ün bacaklarına göre ayarlanıp kütüphaneye eklenmiştir.

Ayak izi atamalarının yapılması:

Ayak izi ataması, devrede kullanılacak komponentlerin PCB üzerinde uygun bir şekilde yerleşebilmesi için yapılır.

```

1      C1 -          680p : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
2      C2 -          680p : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
3      C3 -          4.7n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
4      C4 -          68p : Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.33x1.80mm_HandSolder
5      C5 -          10u : Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.33x1.80mm_HandSolder
6      C6 -          10u : Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.33x1.80mm_HandSolder
7      C7 -          10u : Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.33x1.80mm_HandSolder
8      C13 -         250n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
9      C14 -         250n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
10     Cx1 -          2.2u : Capacitor_THT:C_Rect_L31.5mm_W20.0mm_P27.50mm_MKS4
11     Cx2 -          2.2u : Capacitor_THT:C_Rect_L41.5mm_W20.0mm_P37.50mm_MKS4
12     Cx3 -          2.2u : Capacitor_THT:C_Rect_L41.5mm_W20.0mm_P37.50mm_MKS4
13     Cy1 -          2.2n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
14     Cy2 -          2.2n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
15     Cy3 -          2.2n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
16     Cy4 -          2.2n : Capacitor_THT:C_Disc_D16.0mm_W5.0mm_P10.00mm
17     J1 - Screw_Terminal_01x03 : TerminalBlock_Bornier=3_P5.08mm
18     J2 - Screw_Terminal_01x02 : TerminalBlock_Bornier=2_P5.08mm
19     J4 - Screw_Terminal_01x03 : TerminalBlock_Bornier=3_P5.08mm
20     L1 -          2.2n : Inductor_THT:L_CommonMode_Toroid_Vertical_L43.2mm_W22.9mm_Px17.78mm_Py30.48mm_Bourns_8100
21     L3 -          2.2m : Inductor_THT:L_CommonMode_Toroid_Vertical_L43.2mm_W22.9mm_Px17.78mm_Py30.48mm_Bourns_8100
22     R1 -          66 : Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder
23     R2 -          100k : Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder
24     R3 -          50 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P10.16mm_Horizontal
25     R4 -          50 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P10.16mm_Horizontal
26     R5 -          1m : Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder
27     R6 -          1K : Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder
28     R7 -          1K : Resistor_SMD:R_1206_3216Metric_Pad1.30x1.75mm_HandSolder
29     U2 -          LMH6609MA : aktifemi:LMH6643

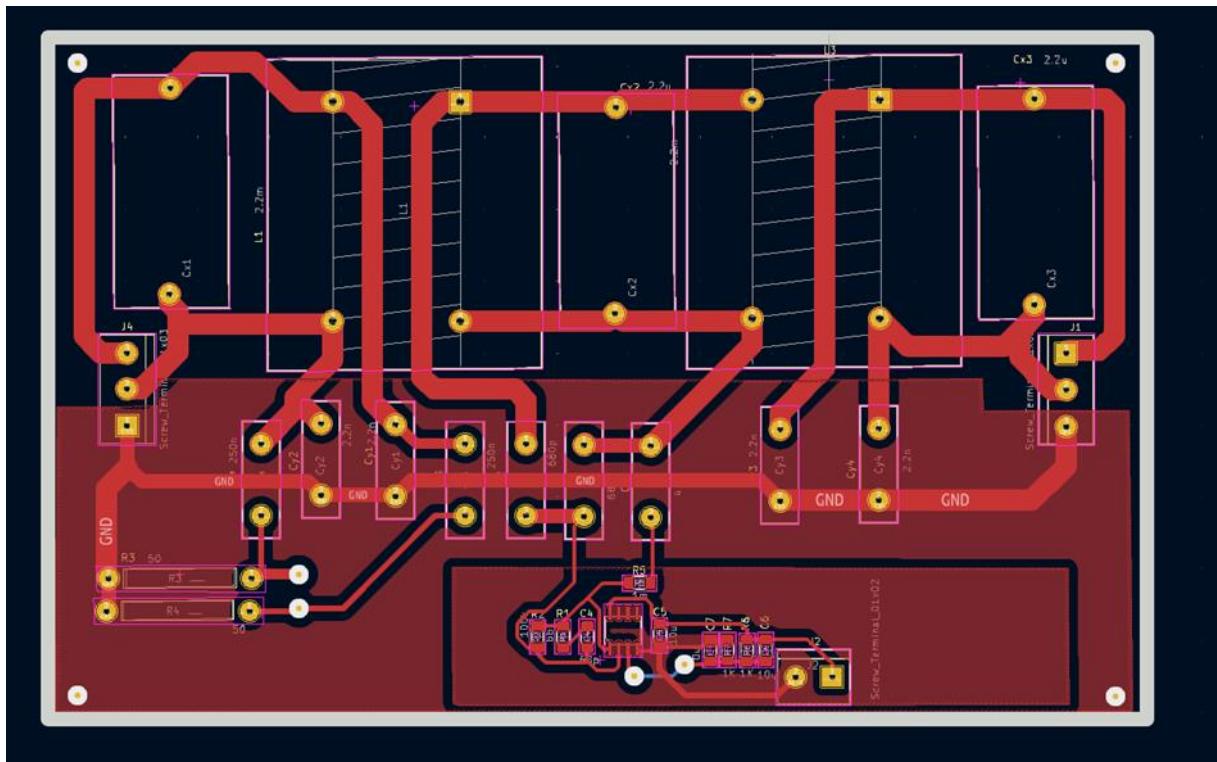
```

Şekil.58 Ayak İzi Atamaları

Şekil.58'de oluşturulan yeni kütüphaneler dahil, kütüphanede bulunan diğer komponentlerin ayak izleri belirlenen komponentlere atanmasını göstermektedir.

PCB yollarının çizilmesi

Elektromanyetik girişim filtreleme devresi için PCB yollarının çizimi çok önemli bir aşamadır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır: Yolların yakınlığı, Delik çapları, Pad çapları, Komponent yerleşimleri, Aktif filtre yollarının uzunluğu ve Dönme derecesi.



Sekil.59 PCB Yollarının Çizimi

Sekil.59'da PCB üzerinde yolların çizimi ve komponent yerleşimi gösterilmiştir. PCB'nin üzerine komponentleri yerleştirirken bazı hususlara dikkat edilmiştir. Bunlardan ilki, ortak mod şok bobinleri ve büyük X-kapasitörlerinin PCB'nin üst kısımlarına konumlandırılmasıdır. Bunun sebebi, yüksek akım geçen elemanlarla düşük akım geçen elemanları farklı yerlerde konumlandırmaktır. Aktif filtre devresi ile ortak mod şok bobini ve X-kapasitörlerinin arasına Y-kapasitörleri yerleştirilmiştir. Aktif filtre devresi, ayrı bir toprak hattına sahiptir. Bunun sebebi aktif filtre devresinin gürültülerden daha az etkilenmesi için pasif filtre devresinden izole etmektir. Aktif filtre devresinden pasif filtre devresine göre daha az akım geçeceğiinden dolayı aktif filtre devresinin yolları daha ince çizilmiştir. Çizilen yollar anten etkisi gösterip ışırma yapmamaları için dönüşler 90° ile değil 45° ile çizilmelidir.

Kaynakça

- [1] O. R.L. ve P. T. M., EMI Filter Design, New York: CRC Press, 2012.
- [2] A. Bendicks, T. Dörlemann, T. Osterburg ve S. Frei, «Active cancellation of periodic EMI of power electronic systems by injecting artificially synthesized signals,» *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, cilt 3, no. 9, pp. 63-72, 2020.
- [3] B. Narayanasamy, «Conducted EMI Mitigation in Power Converters using Active EMI Filters,» %1 içinde *PhD Thesis*, University of Arkansas, 2020.
- [4] B. Narayanasamy, H. Peng, Z. Yuan, A. I. Emon ve F. Luo, «Modeling and Analysis of a Differential Mode Active EMI Filter With an Analog Twin Circuit,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, cilt 62, no. 4, pp. 1591-1600, Aug. 2020.
- [5] S. L., K. Dong-Wook ve Y. Ji-Yoon, «Design and Optimization of EMI Filters for Power Electronics Systems,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, no. 4, pp. 1816-1823, 2012.
- [6] L. KH, K. BG, C. Y, C. SK, W. JS, K. HS ve K. Lee, «Design and Implementation of an Active EMI Filter for Common-Mode Noise Reduction,» *Journal of Power Electronics*, cilt 3, no. 3, May 2016.
- [7] H. M.L., E. H. , B. J. ve K. J.W., «Implementation of a Transformerless Common-Mode Active Filter for Offline Converter Systems,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 57, no. 5, pp. 1772-1786, May 2010.
- [8] T. Instruments, «LM5149-Q1 80-V Automotive, Synchronous, Buck, DC/DC Controller with Ultra-Low IQ and Integrated Active EMI Filter,» December 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5149-q1.pdf>. [Erişildi: 24 Mar 2024].
- [9] T. Instruments, «Using an Active EMI Filter in Power Converters to Reduce EMI Filter Size and Cost,» Application Report SLVAE25, Apr 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slvae25/slvae25.pdf>.
- [10] T. Instruments, «How Active EMI Filter ICs Mitigate Common-Mode Emissions and Increase Power Density in Single- and Three-Phase Power Systems,» SLVAFJ9, Mar. 2023. [Çevrimiçi].
- [11] A. Akses, «Gündelik Yaşamda Elektromanyetik Uyumluluk (EMC),» *Kaynak Elektrik Dergisi*, no. 277, Haziran 2012.
- [12] W. katılımcıları, «Elektromanyetik Girişim,» Wikipedia, Özgür Ansiklopedi, 2009. [Çevrimiçi]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_giri%C5%9Fim. [Erişildi: 9 Nisan 2024].
- [13] DTA, «Fourier Dönüşümü Nedir?,» [Çevrimiçi]. Available: [https://blog.dta.com.tr/fourier-donusumu-nedir/..](https://blog.dta.com.tr/fourier-donusumu-nedir/) [Erişildi: 12 May 2024].
- [14] C. R., «Integrated EMI Filters for Switch Mode Power Supplies,» Springer, New York, NY, USA, 2014.
- [15] K. Manjula ve S. Bhuvaneswari, «A Review of Analysis and Design of EMI Filters for Power Electronic Converters,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, cilt 2, no. 8, 2015.
- [16] Newhaven Display, «EMI (Electromagnetic Interference),» [Çevrimiçi]. Available: <https://newhavendisplay.com/blog/emi-electromagnetic-interference/>. [Erişildi: 25 Apr 2024].
- [17] K. Zhang, «Active EMI Filtering Technology for Power Electronic Systems,» Springer, Singapore, 2018.
- [18] M. Arvas, «Temel Elektromanyetik Girişim Filtreleri ve Güç Hattı Filtreleri,» 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://www.researchgate.net/publication/369124825_Temel_Elektromanyetik_Girisim_Filtreleri_ve_Guc_Hatti_Filtreleri. [Erişildi: 09 Apr 2024].
- [19] M. R. Razman, M. H. Jabar, M. F. A. Malek ve S. S. Yang, «Review of Modeling and

- Suppression Techniques for Electromagnetic Interference in Power Conversion Systems,» *IEEE Access*, cilt 7, pp. 101985-102000, 2019.
- [20] K. Mainali, «ANALYSIS AND MITIGATION OF CONDUCTED EMI IN SWITCHED-MODE POWER SUPPLIES,» 2011.
- [21] YouTube, «EMC Testing - Basics and Standards,» Electromagnetic Engineerin, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=YNNU3MRQoac>. [Erişildi: 23 Mar 2024].
- [22] R. Koteswar, «How to Meet CISPR 32 Radiated Emissions Limits With ISOW7741,» May 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ti.com/>. [Erişildi: 09 Apr 2024].
- [23] Ş. Önder, «Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi,» İstanbul, 2003.
- [24] ANFR, «ANFR-What is the frequency spectrum?,» ANFR, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.anfr.fr/en/a-propos-de-lanfr/what-is-the-frequency-spectrum>. [Erişildi: 12 Feb 2024].
- [25] Academy of EMC, «EMC Standards,» Academy of EMC, [Çevrimiçi]. Available: https://www.academyofemc.com/emc-standards#google_vignette. [Erişildi: 2 Feb 2024].
- [26] L. Yuan, J. Zhang, Z. Liang, M. Hu, G. Chen ve W. Lu, «EMI challenges in modern power electronic-based converters: recent advances and mitigation techniques». *Front. Electron.*
- [27] S. Maniktala, «Switching Power Supplies A to Z,» *Elsevier*, pp. 359-362, 2006.
- [28] SL Power, «Common Mode Noise,» [Çevrimiçi]. Available: https://slpower.com/App-slpower/images/whitepapers/SLPower_CommonModeNoiseArticle.pdf. [Erişildi: 18 Mar 2024].
- [29] Denk Otomasyon, «EMI/EMC Filtreler,» [Çevrimiçi]. Available: <https://m.denkotomasyon.com/blog/emi-emc-filtreler>. [Erişildi: 15 Jan 2024].
- [30] EMC Testleri, «EMC Nedir?,» EMC Testleri, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.emctestleri.com/emc-nedir>. [Erişildi: 15 Jan 2024].
- [31] CED Danışmanı, «EMC Testi Nedir?,» CED Danışmanı, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.cedanismani.com/emc-testi-nedir/>. [Erişildi: 15 Jan 2024].
- [32] R. Redl, «Power electronics and electromagnetic compatibility,» %1 içinde *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, İtalya, 1996.
- [33] Wikipedia Contributors, «Electromagnetic interference,» 6 Nov 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electromagnetic_interference&oldid=1183736426. [Erişildi: 21 Apr 2024].
- [34] T. Instruments, «How Active EMI Filter ICs Mitigate Common-Mode Emissions and Increase Power Density in Single- and Three-Phase Power Systems,» Texas Instruments, 2023.
- [35] Z. Zhu, Y. Zhao, W. Yan, X. Liu ve M. Ju, «Modeling of line impedance stabilization network impedance characteristic based on genetic algorithm,» *Microelectronics Journal*, cilt 113, 2021.
- [36] Wikipedia contributors, «Spectrum analyzer,» Wikipedia, 19 Jan 2024. [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer. [Erişildi: 21 Apr 2024].
- [37] Aydınlatma, «EMC Testi Nedir? Nasıl ve Nerede Yapılır?,» [Çevrimiçi]. Available: <https://aydinlatma.org/emc-testi-nedir-nasil-ve-nerede-yapilir.html>. [Erişildi: 25 Apr 2024].
- [38] LVT, «EMC Testi Nedir? Nasıl Yapılır?,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.lvt.com.tr/tr/makale/emc-testi-nedir-nasil-yapilir>. [Erişildi: 25 Apr 2024].
- [39] EMC FastPass, «EMC Testing Beginner's Guide: Emissions,» [Çevrimiçi]. Available: <https://emcfastpass.com/emc-testing-beginners-guide/emissions/>. [Erişildi: 29 Apr 2024].
- [40] Koralp, «Bağlantı ucu bozulma gerilimi Conducted Emission Testi | CGS Test Merkezi blog,» 12 Feb 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://cgstestmerkezi.com/baglanti-ucu-bozulma-gerilimi-nedir/>. [Erişildi: 11 Mar 2024].
- [41] Admin, «Filtreler – 2,» diyot.net, 17 Mar 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://diyot.net/filtreler-2/>. [Erişildi: 16 Feb 2024].
- [42] M. O. Özcan, E. Ü. Ağlar ve A. B. Yıldız, «Doğrultucularda ve Eviricilerde Kullanılan Pasif

Filtre Türlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması,» 2015.

- [43] K. V. Slattery, «Electromagnetic Compatibility Handbook,» *CRC Press*, pp. 7-16, 2001.
- [44] Electrical Engineering Stack Exchange, «Using LC filter instead of RC filter in mains powered circuits,» [Çevrimiçi]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/234695/using-lc-filter-instead-of-rc-filter-in-mains-powered-circuits>. [Erişildi: 16 Feb 2024].
- [45] ELEKTRİK DERSLERİ, «ELEKTRİK ELEKTRONİK VE ÖLÇME / Filtre devreleri,» YouTube, 22 Jun 2020. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=GkOuh2vzHto>. [Erişildi: 17 Feb 2024].
- [46] Cadence, «Passive PI filter design and simulation,» Advanced PCB Design Blog, 17 Mar 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://resourcespcb.cadence.com/blog/2020-passive-pi-filter-design-and-simulation>. [Erişildi: 28 Feb 2024].
- [47] K. Webb, «Second-Order Filters,» %1 içinde *ENGR 202 – Electrical Fundamentals II*, 2021.
- [48] C. Wells, «Butterworth Filter Design,» May 2024. [Çevrimiçi]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_8.html. [Erişildi: 19 Feb 2024].
- [49] Polen, «Polen: Elektromanyetik Uyumluluk Yönetmeliği (EMC) Testleri ve AB Belgelendirme Prosedürleri».
- [50] All About Circuits, «Safety Capacitor (Class X and Class Y Capacitors),» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/safety-capacitor-class-x-and-class-y-capacitors/>. [Erişildi: 19 Mar 2024].
- [51] caginturkoglu.blogspot.com, «Differential ve Common Mode Gürültü,» [Çevrimiçi]. Available: <https://caginturkoglu.blogspot.com/2021/05/differential-ve-common-mode-gurultu.html>. [Erişildi: 16 Mar 2024].
- [52] A. Martin, «AN-2162 Simple Success With Conducted EMI From DC-DC Converters,» Texas Instruments, 2011.
- [53] Astrodyne TDI, «Guide to insertion loss in EMI Filters | Astrodyne TDI,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.astrodynetdi.com/blog/insertion-loss-in-emi-filters>. [Erişildi: 11 May 2024].
- [54] NPTEL IIT Guwahati, «LEC 60: EMI Filter - II,» YouTube, 01 Apr 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=p21H6dNFGWo>. [Erişildi: 15 Mar 2024].
- [55] J. Hertz, «TI's Active EMI Filters to Slash Size of Power Supply Designs,» All About Circuits, 22 Mar 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/news/tis-active-emi-filters-to-slash-size-of-power-supply-designs/>. [Erişildi: 12 May 2024].

1. Projeniz tasarım boyutu nedir (prototip gerçekleştirmeye, benzetim veya analiz)?

Projemizin tasarımını aktif ve pasif komponentlerden oluşturmaktadır. Daha öncesinde yapılmış AEF topolojileri incelenerek, Gerilim Algılamalı Akım Enjekteli topoloji kullanılmıştır. Ayrıca projemiz tamamen simülasyon ağırlıklıdır. PSIM ve LTSpice uygulamaları ile devrenin prototipi hazırlanıp, standartları sağlayacak devre tasarlanmıştır.

2. Kullandığınız tasarım yöntemini/yöntemlerini açıklayınız.

Projemizde geri beslemeli, gerilim algılamalı, akım iptali topolojisi seçilmiştir. Bu topolojinin seçilme nedeni: proje hedefimizde belirttiğimiz gibi devrenin hacmini azaltmaktadır. Akım algılama ve gerilim enjeksiyonu topolojisi, algılama ve enjeksiyon işlemlerini yüksek hacimli transformatör ile yapar. Bu işlemler, gerilim algılama ve akım enjeksiyonu işleminde küçük hacimli kapasitörler ile yapılır. Bunun sonucunda devre hacminde yaklaşık %30'luk hacim azalması sağlanmış olur.

2. Kullandığınız veya dikkate aldığınız mühendislik standartları nelerdir?

Tasarlanmış olduğumuz devre, elektrikli ve elektronik her cihazda kullanılabilirliktedir. Bu yüzden EN 55032 standartı olan, bir diğer ismi CISPR 32 Class B olan EMC standartı şartları yerine getirilmiştir. Devremiz, güvenlik standartları olan EN 60990 ve VDE 106 bölüm 102'deki göre kısa devre akım testine uygun tasarlanmıştır. Hat gerilim dalgalanmalarına karşı ise IEC 61000-4-5 standartı referans alınarak tasarım gereklilikleri yerine getirilmiştir.

4. Kullandığınız veya dikkate aldığınız gerçekçi kısıtlar nelerdir? (Maliyet analizi zorunlu olmak üzere diğerlerinden en az iki tanesi seçilmelidir. Proje kapsamında olmayan kısıtlar silinmelidir.)

a) *Ekonomi: Devrede kullanılan komponentler, standartların ve test edilecek olan cihazların gereksinimleri göz önüne alınarak seçilmiştir. Özellikle EMI Filtrelerde pahalı olan bobini kendimiz tasarlayarak, devrede planan sonuç çıktısını elde edebildik. Ayrıca pahalı olan X ve Y kapasitörleri ise standartları sağlayacak şekilde en düşük değerlerde seçilerek maliyet azaltılmıştır.*

b) *Maliyet analizi: Projemizde ilk başlarda kullanılması planan Amplifikatörler ve devre komponentlerini, maliyet açısından muadillerini seçerek daha ucuz getirdik. Şuanda elde ettiğimiz sonuçlar piyasada bulunan diğer EMI Filtrelere göre benzer kazancı elde ettiğimizi gösterirken, çok daha uyguna mal ettiğimizi de görebiliyoruz. Bobini ve PCB kartımızı da kendimiz yaptıgımız için de maliyetimiz düşmüştür. PCB kart tasarımda da küçük tasarlanmış olması ve devremizin de kompakt yapıda olması gene maliyette kazanç elde etmemizi sağlamıştır.*

c) *Çevre sorunları: Tasarladığımız EMI filtresi cihazlarda kullanıldığı takdirde, hem cihazın kendisi için hem de çevresi için problem yaratılan Elektromanyetik Gürültüyü engelleyecektir. Bu sayede cihazlar, uzun ömøre sahip olurken işleyişlerinde de herhangi bir problem oluşmayacağından emin olabiliriz.*

d) *Etik: Devremizin tasarımında EMC standartları referans alındığı için ayrıca filtre standartları da göz önünde bulundurularak tasarım yapıldığı için, mühendislik kurallarına ve disiplineline uyulmuştur. Herhangi bir etik ilkeyi ihlal etmemektedir.*

e) *Güvenlik: Devremizde bulunan X ve Y kapasitörleri herhangi bir gerilim*

probleminde kesicilerini attırrarak hem filtre için hem de kullanıldığı cihaz için güvenlik sağlamaktadır. Ayrıca tasarımımız güvenlik standartları baz alınarak, kısa devreye ve hat geriliminin dalgalanmalarına dayanıklı halde yapılmıştır. Böylelikle olası elektrik çarpmalarına karşı önlem alınmıştır.

5. Proje yönetimi nasıl gerçekleştirdiğinizi açıklayınız. Her öğrencinin sorumlu olduğu görevleri iş yükü (görev tanımı ve yüzde olarak) ve zaman süreleri ile beraber belirtiniz.

Emrullah GÜNEY: Literatür taramasının yapılması, devre topolojisinin seçimi ve tasarımını, genel devre komponentlerinin hesaplanması, tasarımın simülasyon üzerinde denemelerin yapılması, tasarlanan PCB kartının lehimlenmesi gibi görevlerde bulunmuştur. Projenin %34'lik kısmında görev almıştır.

Turan DEMİR: Literatür taramasının yapılması, tasarımın simülasyon üzerinde denemelerin yapılması, raporların hazırlanması, projenin komponent ve gereksinimlerinin tedarigi, maliyet analizinin yapılması, hataların tespiti ve giderilmesi gibi görevlerde bulunmuştur. Projenin %33'lik kısmında görev almıştır.

Görkem TANIR: Literatür taramasının yapılması, tasarımın simülasyon üzerinde denemelerin yapılması, devre komponentlerinin hesaplanması, PCB kartın tasarımını gibi görevlerde bulunmuştur. Projenin %33'lik kısmında görev almıştır.

6. Öneri raporunda yapılan takvime ve/veya konuya göre değişiklik/sapma oldu mu? Evet ise nedenini açıklayınız.

Evet. Belli bir süre standartları sağlayacak şekilde filtrenin sonucuna ulaşamadığımız için bir süre kaybı yaşadık. Ardından bize sağlanan destek bütçelerinin elimize ulaşamaması yüzünden tedarik kısmında da bir gecikme yaşandı. Bu yüzden simülasyon sonuçları ile gerçek hayatı ölçümler karşılaşırılamadı. Ayrıca elde edilen sonuçların gecikmesinden dolayı da verilerin raporlanması da sekteye uğradı.

7. Proje çalışması sırasında ne tür problemler ve sorunlarla karşılaşınız? Bu problemlere ve sorunlara ne tür çözümler getirdiniz.

Farklı topolojilerin birleştirilmesi nedeniyle, literatürlerdeki çıktılar elde edilememiş olup ardından hesaplamalar sayesinde bu problem ortadan kalkmıştır. Lakin her ne kadar simülasyon ortamında bu problem çözülsse de ilk PCB baskılarımızda, simülasyonlardaki sonuçları elde edemedik. Bu yüzden gereken hesaplamalar tekrardan yapıldı ve simülasyonlarda ölçümleri alındı. Ardından PCB kart tekrardan tasarlandı ve güncel sonuca ulaşıldı. Devrede kullanılacak komponentlerin tedarigi kısmında, simülasyon ortamında kullanılan komponentler Türkiye'de bulunmadığı için muadillerinin özelliklerini ile tekrardan devre hesaplamaları yapıldı ve tedarigi edildi.