
Araştırma Makalesi / Research Article

Askeri Uygulamalarda Kullanılan Güç Dönüştürücüleri için Elektromanyetik Girişim Filtresi Tasarımı

Mehmet ÖZDEMİR¹ , Necmi ALTIN^{2*} 

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, Ankara, TÜRKİYE

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
mehmetozdemir6127@gmail.com, naltin@gazi.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 26.10.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 06.12.2023

Özet: Askeri uygulamalarda farklı gerilim ve güç seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar sistem içerisinde çok sayıda ve farklı topolojide AA/DA ve DA/DA dönüştürücü kullanımı gerektirmektedir. Askeri amaçlı hava/kara araçlarında kullanılan güç dönüştürücülerinin genellikle küçük hacim ve düşük ağırlık gibi özelliklere sahip olması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle güç elektroniği dönüştürücülerinin anahtarlama frekansları gittikçe yükselmektedir. Dönüştürücülerin anahtarlama frekanslarının yükselmesi elektromanyetik gürültü seviyesinin artmasına sebep olmaktadır. Gürültü seviyesinin yükselmesi aynı kaynaktan beslenen veya yakınındaki cihazların çalışmasını olumsuz etkilemektedir bu nedenle "MIL-STD-461" askeri standardı oluşturulmuştur. Herhangi bir askeri kara/hava aracı için yapılacak dönüştürücünün ilgili standarda uyması gerekmektedir. Bu çalışmada askeri bir birim için tasarlanan AA/DA dönüştürücü "MIL-STD-461F" CE102 gereksinimi karşılayabilmesi için bir filtre tasarımı ve gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Yapılan testler sonucunda tasarlanan filtrenin standartlarda belirtilen şartları karşıladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AA/DA dönüştürücü, Elektromanyetik girişim, Ortak mod gürültüsü, Fark mod gürültüsü, DA/DA dönüştürücü

Electromagnetic Interference Filter Design for Power Converts Used in Military Applications

Abstract: Different voltage and power levels are needed in military applications. These needs require the use of AC/DC and DC/DC converters in many different topologies in a system. It is generally important for the power converters used in military air/land vehicles to have features such as small volume and low weight. Therefore, the switching frequencies of power electronic converters are increasing. Increasing the switching frequencies of converters causes the electromagnetic noise level to increase. The increase in the noise level negatively affects the operation of devices supplied from the same source or nearby, so the "MIL-STD-461" military standard was created. The converter to be design for any military land/air vehicle must comply with the relevant standard. In this study, the design and implementation of a filter to meet the "MIL-STD-461F" CE102 requirement for an AA/DA converter designed for a military unit is described. Obtained test results showed that the designed filter met the conditions specified in the standards.

Keywords: AC/DC converter, Electromagnetic interference, Common mode noise, Differential mode noise, DC/DC converter

1. Giriş

Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic compatibility, EMC) güç elektroniği çalışmalarında geçmişten günümüze kadar sonucu belirsiz yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir (Tihany, 1995; Ott, 1998). Gelişen teknoloji ile birlikte Elektromanyetik girişim (Electromagnetic interference, EMI) kaynakları ve yayılımına ilişkin giderek daha fazla matematiksel modelleme ve analiz çalışması yapılmış ve EMI üretim mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına ışık tutmuştur (Çadircı vd., 2005;

Zhang vd., 2017; Nawawi vd., 2017). Herhangi bir sistem üzerinde çalışan bir güç elektroniği cihazının EMI kaynağı gibi çalışması istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle güç elektroniği tasarımı açısından iletilen EMI modelleme ve simülasyon çalışması en çok arzu edilen durumdur. Bu modelleme sadece temel elektrik devresi davranışını değil aynı zamanda güç dönüştürücü içindeki karmaşık EMI üretim mekanizmasını da ele almak zorundadır.

EMI modelleme ve benzetim çalışması son yıllarda araştırmacıların önemli ölçüde ilgisini çekmiştir. Güç elektroniği alanındaki bir dizi çalışmada üç fazlı AA/ DA dönüştürücüler DA/DA dönüştürücüler ve AA motor sürücüler için çeşitli EMI modelleri önermiştir (Lai vd., 2002; Schanen vd., 2002; Chen, 2000; Mugur vd., 2001). Bir dönüştürücünün EMI seviyelerini azaltmak için kullanılan açık döngü kontrollü frekans modülasyon tekniklerin teorisi frekans modülasyonun bir sinyalin spektrumunu nasıl etkilediğini göstermek için fark denklemleri türetilmiş ve sunulmuştur (Balthasar, 1946). Farklı modülasyon tekniklerinin dönüştürücü EMI performansına etkileri de tartışılmıştır (Balcells vd., 2005; Santolaria vd., 2002; Lorenzo, 2004). Lorenzo (2004)'da bir dönüştürücünün hem ortak mod (Common mode, CM) hem de fark mod (Differential mode, DM) gürültüleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmak için kapsamlı bir analizle modülasyon profillerinin nasıl olacağına dair araştırma yürütülmüştür. Filtre elemanlarının belirlenmesinde gürültüyü ayırma yönteminin sağladığı kolaylıklar Khun vd. (2007)'de görülmektedir. Gürültü ayırmak için literatürde genellikle gürültü ayırma cihaz kullanımı öne çıkmaktadır (Çadircı vd., 2005; Khun vd., 2007; Guo vd., 1995). Yalçın (2023)'da yapılan çalışmada gürültü ayırma için bir devre tasarımı ve üretimi yapılmış fakat ölçüm sonuçları ve devrenin parazitik etkisi gibi kavramlar incelenmemiştir. Kircher ve Pommerenke (2022)'de yapılan çalışmada ise makale kapsamında anlatılana benzer şekilde elemanların ESR ve ESL gibi ideal elemana eklenmesi gereken değerlerin ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Murugan vd. (2023)'de tasarlanan dönüştürücüde ise sadece kullanılan bileşenlerin değil aynı zamanda baskılı devre kartının ve kabloların etkileri de simülasyona eklenip ileriiki çalışmalar için referans niteliğinde bir çalışma yapılmıştır. Makale kapsamında yapılan ölçümlerde gürültüyü ayırmak için ölçüm devresinin farklı noktalarından alınan ölçümlerin matematiksel olarak ayrılması metodu kullanılmıştır.

Endüstride genel olarak kullanılan ölçüm cihazlarından alınan sonuçlarda ortaya çıkan gürültü grafiğinde ortak mod ve fark mod gürültüleri birleşik şekilde ölçülür. Bu grafik üzerinden gürültüleri kategorize etmek mümkün gözükmemektedir. Dolayısıyla elde edilen test sonuçlarına göre hangi filtre devresinde iyileştirme yapılmasının gerektiği de net değildir.

Bu çalışmada askeri taşıt uygulamaları için tasarlanan üç fazlı bir AA/ DA dönüştürücü için ortak ve fark mod filtreler tasarlanmıştır. Dönüştürücü üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucu devresi ile tam köprü DA/DA dönüştürücü devresinden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında benzetim programları kullanılarak gürültüleri ortak mod ve fark mod olarak ayrılacak ve filtreler gürültü özelinde tasarlanmıştır. Bu sayede filtre boyutu en uygun düzeyde tutulacak ve test maliyeti minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tüm filtre tasarım süresi adım adım açıklanmış ve elde edilen sonuçlara göre tasarlanan filtrenin performansı benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar hem ortak mod hem de fark mod gürültülerinin askeri uygulamalar için geliştirilmiş olan MIL-STD-461F standardında belirtilen sınırların altına indirildiği gösterilmiştir.

2. Elektromanyetik Gürültü Tanımı

Elektrik-Elektronik ve Elektromekanik sistemlerin çalışırken ortaya çıkardıkları elektromanyetik enerji veya ortamda mevcut halde bulunan elektromanyetik enerji ile karşılıklı olarak birbirlerini etkilemeleri ve bu etkileme sonucunda sistemlerin çalışma performanslarında bozulma oluşması veya tamamen çalışamaz hale gelmeleri EMI olarak adlandırılır. Girişim, elektrik ve elektronik cihazların performansında bozulmaya, cihazların istenmeyen tepkiler vermesine veya hatalı çalışmasına yol

açan radyo frekanslarında doğal veya insan kaynaklı her türlü bozucu etki, işaret ve emisyonudur. EMI standartları oluşmasında geçmişte platform ve can kaybı oluşması en büyük etkenlerdendir örneğin: 1982 yılında Falkand savaşı sırasında İngiliz Sheffield destroyeri girişim sebebi ile Elektronik Destek tedbiri sistemini kapattı bu olay geminin atılan füzeyi algılamamasına e geminin batmasına ve mürettebattan kayıplar olmasına sebep oldu. Başka bir olayda ise 1980'li senelerde ABD ordusuna ait beş adet Black Hawk UH-60 modelli helikopter, etraftaki vericilerin uçuş kontrol sisteminde sebep olduğu girişim sonucunda farklı tarihlerde kazaya uğradı ve bu kazalarda 22 kişi hayatını kaybetmiştir.

EMI problemindeki ana sebepler basit olarak üç'e ayrılır bunlar; kaynak, kuplaj yolu ve etkilenen sistem olarak tanımlanabilir. Kaynak, elektromanyetik girişim enerjisini yayan bileşendir. Kuplaj yolu ise girişim enerjisinin iletimini açıklar. Etkilenen sistem ise bu girişim enerjisinden etkilenen sistemi tanımlar. Sistemler, girişim enerjisinden radyasyon yoluyla (Radiated emission, RE) ve elektriksel iletkenlik (Conducted emission, CE) yoluyla yayılım olmak üzere iki şekilde etkilenirler. Radyasyon yoluyla yayılım, uzak alan ve yakın alan olarak ikiye ayrılabilir ve yakın alandaki etkileşim kapasitif veya endüktif olabilir. Diğer kuplaj mekanizması olan elektriksel iletkenlik için çeşitli filtreler tasarlanarak değerinin sınırlandırılması mümkündür. Yayılım miktarı ulusal/uluslararası standartlar tarafından sınırlandırılmıştır. Bu nedenle sistemlerin tasarım aşamasında benzetim programları, uygulama aşamasında ise testler ile ilgili standartlara uygunluğu doğrulanmalıdır. Sistemleri bu standartlara uygun hale getirmek için ek önlemler ve özel filtre tasarımları gerekli olabilir. Bu filtrelerde kullanılacak devre elemanlarının bazı seçim kriterleri bu çalışmada açıklanacaktır.

2.1. Filtre Tipleri

EMI bastırmak için tasarlanan farklı filtre tipleri mevcuttur. Filtre tipi seçilirken 2 parametre göz önüne alınır:

a) Giriş-Çıkış Empedansları

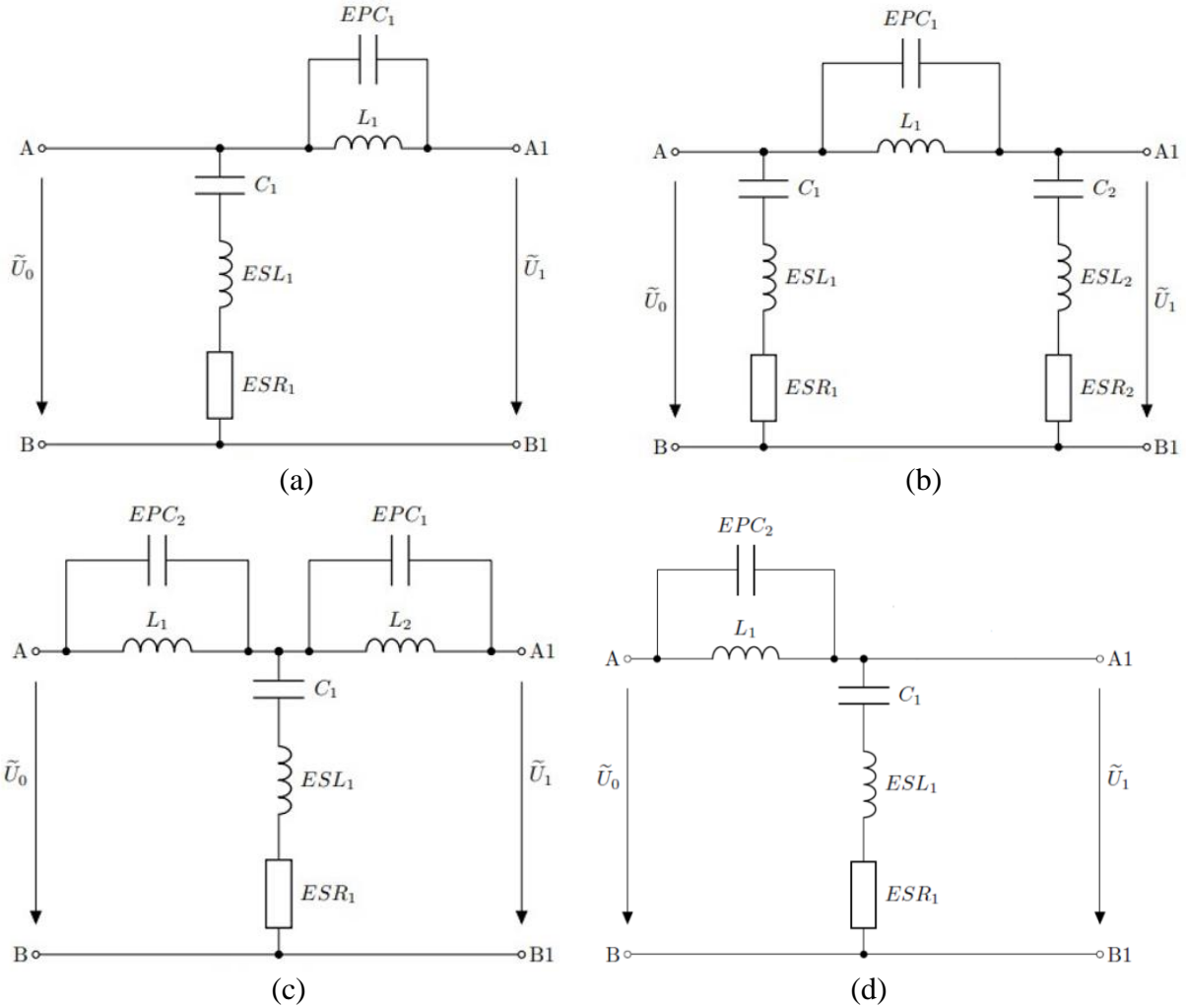
Gürültü frekansında filtre empedansı, şebeke çıkış ve devre giriş empedansı ile eşleşmelidir. Aksi takdirde hatta yansımalar meydana gelecek ve filtre istenilen bastırma etkisini gösteremeyecektir. Bu sebeple giriş ve çıkış empedansları ölçülmelidir. Filtre tipi seçilirken empedansı düşük taraf için bobin, empedansı yüksek taraf için kondansatör yerleştirilmelidir ($X < 100\Omega$ düşük empedans, $X > 100\Omega$ yüksek empedans olarak kabul edilebilir).

b) Bastırma seviyesi

Çok katlı/dereceli filtre tasarımları ile daha yüksek oranda bastırma sağlanabilir. Hedeflenen frekanstaki gürültüye göre filtre kat sayısı belirlenmelidir. İki katlı bir filtre ile 10/15 dBuV, 3 katlı bir filtre ile 20/25dBuV bastırma sağlanabilir.

Klasik devre teorisine göre dört farklı EMI filtresi topolojisi mevcuttur. Diğer tüm türler, bu temel topolojilerin kombinasyonlarını temsil eder. Topolojiler tipik olarak kapasite ve indikatörlerden oluşur, Yüksek güç kayıpları nedeniyle dirençler diğer elemanlara görece nadir kullanılır. Şekil 1'de görülen T filtre ve π filtre 60dB, Γ filtre ve L filtre ise 40dB zayıflatma etkisine sahiptir. Çok katlı filtrelerin zayıflatma değeri fazla olmasına karşın eleman sayısının daha fazla olması, özellikle 3 fazlı askeri sistemlerde sistemin hacimsel olarak büyümesine ve güç yoğunluğunun düşmesine sebep olduğu için daha çok boyut problemi olmayan endüstriyel tasarımlarda kullanımı yaygındır, bu ve benzeri sistemlerde sistemler de kullanılacak filtrenin yüksek zayıflatma etkisi genellikle iki katlı bir filtre olması istenir. Herhangi bir elektriksel sistemin EMI performansı genelde bilinemediği için iki katlı filtre yetebilecek çoğu uygulama yeterli benzetim çalışması yapılmadığı için güvenli bölgede kalmak amacıyla çok katlı filtre kullanımı yaygındır, Makale kapsamında yapılacak olan çalışmada

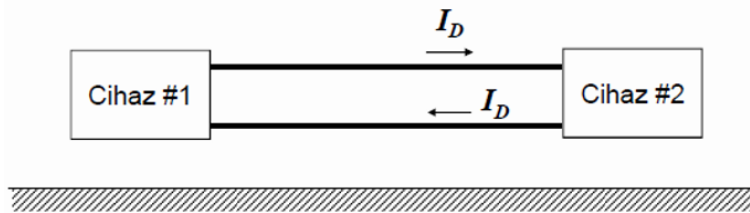
dönüştürücü devresinin gürültü grafiğine göre yerleştirilecek iki katlı filtrenin doğru hesaplanmasının çok katlı filtre kullanımına gerek bırakmadığını gösterebilmek amacıyla Şekil 1’de gösterilen L tipi filtrenin kullanımı uygun görülmüştür.



Şekil 1. Filtre tipleri a) Γ filtre, b) T filtre c) π filtre d) L filtre (elemanların parasitik bileşenleri de gösterilmiştir.)

3. Seçilen Filtre Tipleri ile Ortak Mod ve Fark Mod Gürültülerin Filtrenmesi

Elektriksel iletkenlik yoluyla iletilen gürültü fark ve ortak mod gürültüsü olarak ikiye ayrılır. Şekil 2 'de gösterildiği gibi, iki güç kaynağı hattında birbirine zıt yönlere fark mod gürültüsü iletilir. Ortak mod gürültüsü, ise tüm hatlarda aynı yönde iletilir.



(a)

$$L = 1 / (2 \times \pi \times F_c \times \sqrt{C}) \quad (2)$$

L ve C değerleri hem ortak hem fark mod gürültüleri için aynı yolla belirlenebilir. Köşe frekansı belirlendikten sonra L ve C değerleri seçebilmek için birinin değerinin baştan seçilmesi gerekir. Bu seçimleri yapabilmek için dikkate almamız gereken bazı limitler ve eleman durumları vardır.

4.1. Bileşen Seçim Kriterleri

4.1.1. Bileşenin Maksimum Değeri

İki filtre için de temel amaç yüksek frekanslı akımlara karşı devre girişinde alternatif bir yol oluşturmaktır. Bu sayede devrenin şebekeden ve şebekenin devreden korunması sağlanır. Bu yüksek frekanslı akımlara karşı koyabilmek için olabildiğince büyük değerlerde ve olabildiğince ideal bobin ve kondansatörlere ihtiyaç duyulur. Ancak bobinlerin parazitik kapasitansları, kondansatörlerin ise parazitik endüktans değerleri filtrenin yüksek frekansta farklı ve istenmeyen empedansa sahip olmasına sebep olacağından filtrelemeyi olumsuz etkiler. Filtre yüksek frekanslı akımlara karşı koyamaz ve filtreleme başarısız olur.

Bu nedenle filtre devre elemanları seçilirken aşırı yüksek değerlerin seçilmemesine dikkat edilmesi gerektiği söylenebilir. Çünkü endüktans ve kapasitans büyüdükçe parazitik bileşenlerin değerleri de büyür. Parazitik bileşenler büyüdükçe öz-rezonans frekansı daha düşük frekanslara iner. Kısaca yüksek frekanslara çıktıkça istenen filtre empedansı elde edilemez.

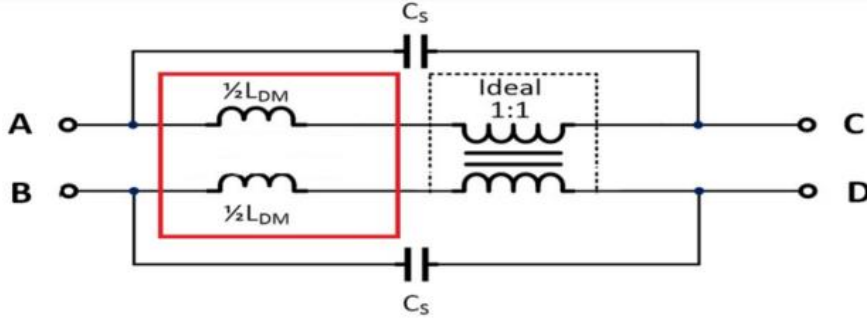
4.1.2. Bileşenin Minimum Değeri

Aynı filtre için bir elemanın değeri sabitken diğer eleman değeri azaldıkça, o frekanstaki bastırma değeri de azalır. Bu yüzden minimum bastırma ihtiyacı için minimum eleman değerleri ortaya çıkar. Filtrede kullanılacak kondansatörler, doğrudan şebekeye bağlı çalışacağından hasar görmeleri ve bozulmaları durumunda istenmeyen kötü sonuçlar meydana gelebilir. Bu sebeple bu kondansatörler sıradan kondansatörlere göre farklı standartlarla üretilir ve özel olarak isimlendirilirler. Fark mod filtre içerisinde kullanılan kondansatörler türlerine X1-X2 (Faz-Faz, Faz-Nötr bağlantı) kondansatörü, ortak mod filtre içerisinde kullanılan kondansatör türlerine ise Y1-Y2 (Faz-Toprak, Nötr-Toprak bağlantı) kapasite değeri denir.

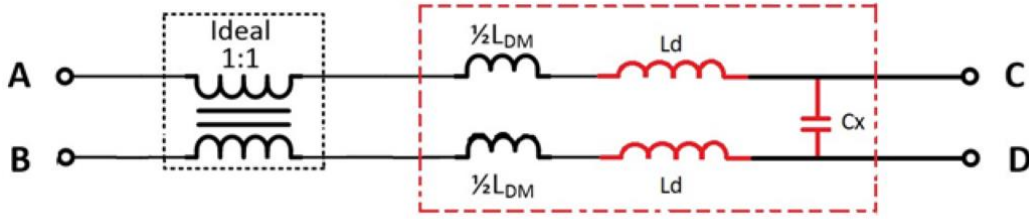
X1-X2 kondansatörleri, yüksek frekanslı fark akımları sağlamakla sorumlu olduğundan olabildiğince yüksek değerlerde olması daha iyi filtreleme sağlarken değeri büyüdükçe öz rezonans frekansı düşer. Bu sebeple, maksimum ve minimum değerler arasında seçim yapılmalıdır. Bir X kapasite değeri seçildikten sonra köşe frekansı üzerinden gerekli endüktans değeri fark mod filtre için hesaplanabilir. X1-X2 kapasiteleri için üretilen ve sık kullanılan değerler $22\text{nF} < C_x < 4.7\mu\text{F}$ aralığında iken fark mod filtre için sık kullanılan endüktans değerleri $1\ \mu\text{H} < L_{dif} < 1\text{mH}$.

Fark mod filtre indüktörü için 2 farklı tercih yapılabilir. Birinci yol, ortak mod filtresindeki şok bobinini kullanmaktır. Bu bobin, kuplajının ideal olmamasından kaynaklı Şekil 4'te gösterildiği gibi (genel olarak %1-5 oranında) bir kaçak endüktansa sahiptir. Bu kaçak endüktans bir fark filtre indüktansı gibi davranabilir. Bu sebeple eğer yüksek değerlerde bir ortak mod bobini kullanılıyor ise kaçak endüktansını ölçerek bu değere göre bir kondansatör seçilir ve fark mod filtre oluşturulabilir.

İkinci yol ise bu ortak mod kaçak endüktansının istenen seviyede olmaması durumunda, Şekil 5'te görüldüğü gibi ona seri bir endüktans bağlanacak şekilde, istenen endüktans değerine gelecek bir değer hesaplamak ve buna göre bir bobin seçmektir.



Şekil 4. İdeal olmayan bir ortak mod filtrenin kaçak endüktansı



Şekil 5. Ortak mod kaçak endüktans değerine bobin ilave edilerek fark mod filtre oluşturulması

Ortak mod filtre için bileşen değerleri belirlenirken fark mod ile yine aynı yöntem izlenir. Ortak mod gürültü grafiği elde edilir, filtreleme frekansı ve bastırma oranı hesaplanır. Filtre köşe frekansı da hesaplandıktan sonra yine L ya da C değerinin başlangıçta seçilmesi gerekmektedir. Bu noktada yine kondansatör değeri seçilerek filtre tasarımına başlanabilir. Kondansatör değeri seçmek için 2 koşul vardır. Birincisi ve en önemlisi, güvenlik standartları gereği (EN 60950-1 Bilgi teknolojileri ekipmanı, IEC60601 Sağlık ekipmanlar ve EN 55014 Cihazlar) toprağa bağlı kondansatörlerin değerinde bir sınır mevcuttur. Bu sınırlar ürün kullanıcısının sağlığı açısından tehlike yaratmayacak bir akım değeri için kapasitansı limitler. Sınır limit akım değerini biliniyorsa, kullanılacak maksimum kapasite değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$L_{I-leakage} = 2 \times \pi \times f \times V \times C_y \quad (3)$$

burada f şebeke frekansı, V , şebekenin faz-nötr gerilimi, C_y kondansatör kapasitesidir. İkinci koşul ise minimum kapasite değeridir. Daha düşük frekanslarda bastırma yapabilmek için daha yüksek kapasite değerine ihtiyaç duyulur. Bu sebeple gereken minimum kapasite değeri sağlanmadığı takdirde istenen frekansın filtrelenmesi başarısız olabilir.

Bu iki koşul göz önünde bulundurularak bir kondansatör ardından o kondansatöre göre bir endüktans değeri köşe frekansı üzerinden hesaplanır. Sık kullanılan Y1-Y2 kondansatör değerleri $100\text{pF} < C_y < 47\text{nF}$ aralığında iken sık kullanılan ortak mod endüktans değerleri $1\text{mH} < L_y < 40\text{mH}$ aralığındadır. Hesaplanan değerlerin ardından uygun malzemeler seçilerek test edilir.

4.1.3. Elemanların Seçiminde Dikkat Edilmesi Gerekenler

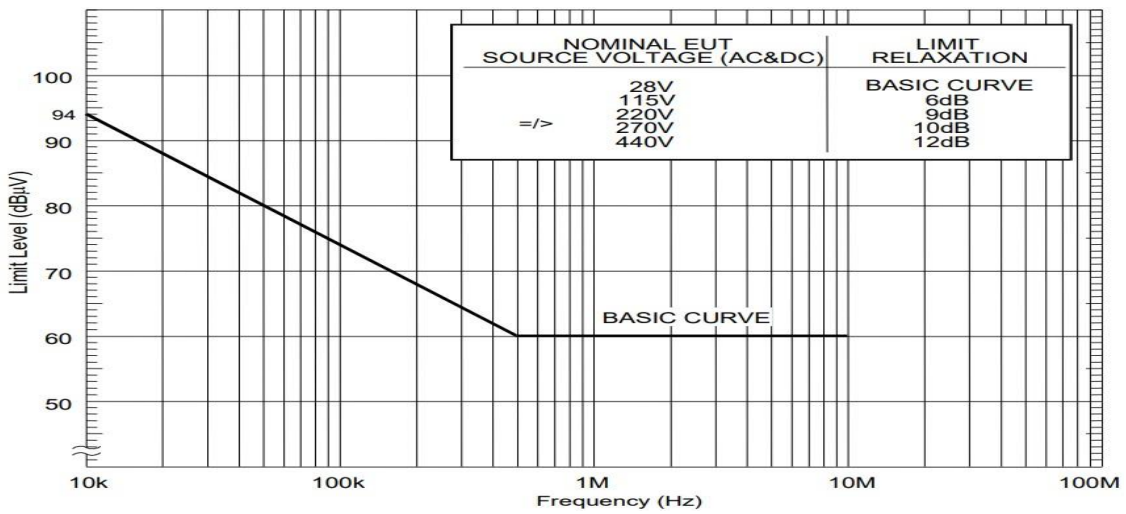
Filtre elemanları seçilirken dikkat edilmesi gereken parametreler aşağıda sıralanmıştır:

- Dağılıma faktörü (Dissipation factor)
- Anma gerilim değeri
- Anma akım değeri
- Sıcaklık

- Öz-rezonans (SRF) frekansı
- Nüve (Core) (I) Ferrite , II) Amorphous, III) Nanocrystalline)
- Sarım şekli
- Tel kalınlığı
- DCR- Parasitic DA direnç değeri

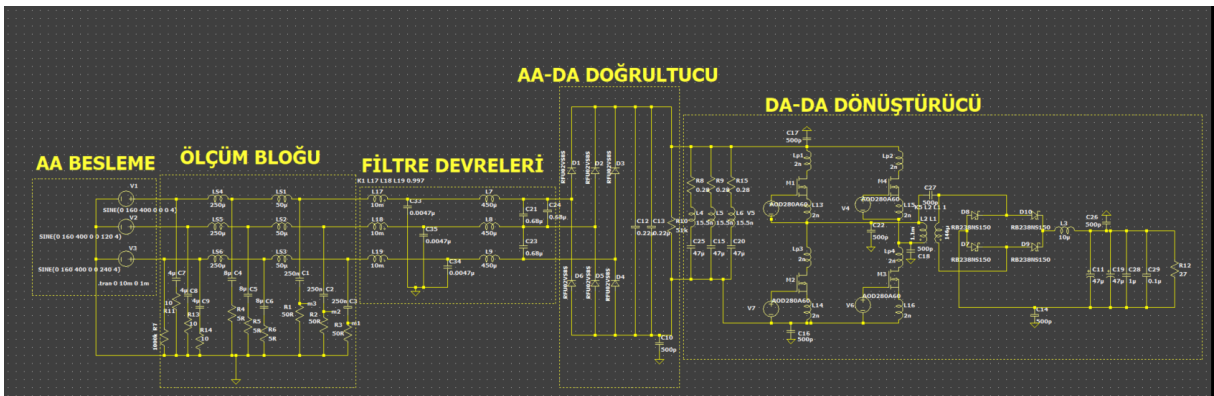
5. Örnek Filtrenin Tasarım ve Benzetimi

Askeri elektromanyetik uyumluluk standardı olan “MIL-STD-461F” standardına uygun bir AA/DA dönüştürücü yapılmak istenildiğinde ilk aşama olarak ilgili devrenin herhangi bir filtre devresi olmadan oluşturduğu gürültü grafiği ortak mod ve fark mod olarak ayrı ayrı çıkarılır yukarıda açıklanan tasarım adımları kullanılarak tasarlanan filtreler yardımı ile Şekil 6’da gösterilen limit değerlerinin altına inmesi makale kapsamında tasarlanacak olan filtreler ile sağlanır.



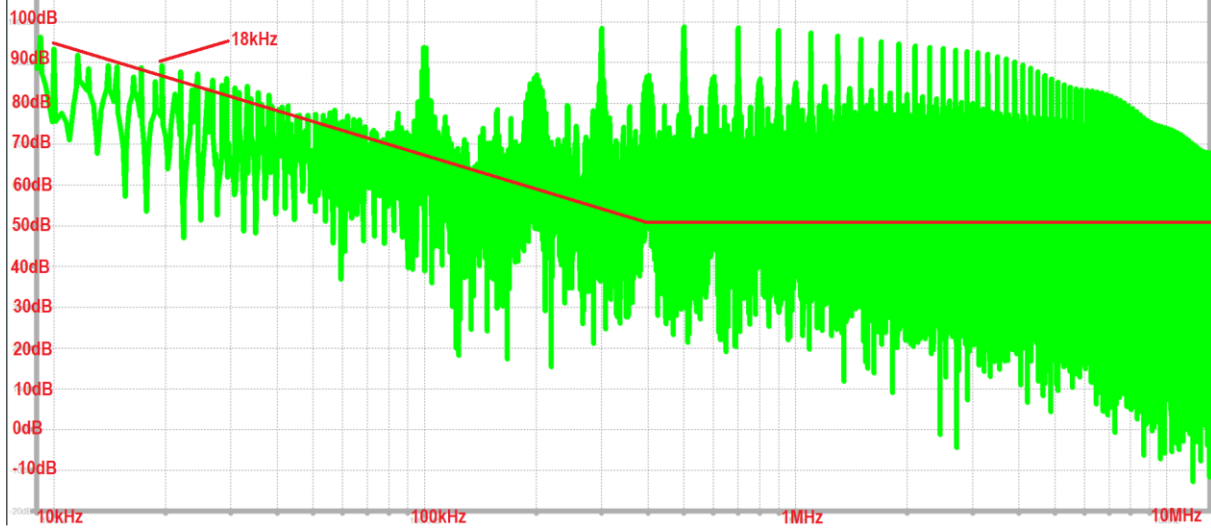
Şekil 6. “MIL-STD-461F” standardının CE102 maddesinde belirtilen iletilen gürültü için limit değerler

AA/DA dönüştürücü devresinin gürültü modellemesi yapılabilmesi için devre elemanların parazitik bileşenleri de eklenerek gerçek modele en yakın olduğu düşünülen modeli elde edilmelidir. Bu çalışmada, 3 faz şebeke gerilimi üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucu ile doğrultulduktan sonra üretilen DA gerilimin tam köprü DA/DA dönüştürücü devresi regüle edilerek AA/DA dönüşümün elde edildiği iki aşamalı bir dönüştürücü yapısı ele alınmıştır. Bu dönüştürücü devresi gerçek sisteme en yakın biçimde LtSpice programında Şekil 7’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 7. 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli

Şekil 7’de verilen 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda devrenin fark mod gürültüsü Şekil 8’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 6’da verilen “MIL-STD-461F” standardının CE102 maddesinde belirtilen iletilen gürültü için limit değer gürültü grafiği üzerinde kırmızı renk ile gösterilmiştir.



Şekil 8. AA/DA dönüştürücü devresinin filtre kullanılmadığı durumda fark mod gürültü grafiği

Testin 10 kHz-10 MHz aralığında yapılacağı dikkate alınarak limit değerler incelendiğinde çift harmoniklerde (2., 4., 6., ...) limit değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Filtre tasarımı için başlangıç frekansı 10 kHz değerine yakın bir frekans seçilmelidir. 18 kHz seçimi iyi bir başlangıç olacaktır. Şimdi bu frekanstaki gürültünün, limit değerinin altına inebilmesi için gereken bastırma miktarı (dBuV) hesaplanmalıdır.

Differential mod filtre için hesaplama yaparken 18kHz ve 22kHz’deki limit tepe değerleri sırasıyla 94 dBuV ve 88 dBuV olarak tespit edilmiştir. Güvenlik payı 5dBuV alındığında

$$A_{Bastırma} = 94 - 88 + 5 = 11 \text{ dBuV} \quad (4)$$

$$A = 11 \text{ dBuV} \quad (5)$$

olarak elde edilir. Gereken bastırma değeri referans alınarak köşe frekansı, Eş. 1 kullanılarak hesaplanabilir:

$$f_{corner} = 18 \text{ kHz} \times 10^{\frac{-11}{40}} = 9,55 \text{ kHz} \quad (6)$$

$$f = 9,55 \text{ kHz} \quad (7)$$

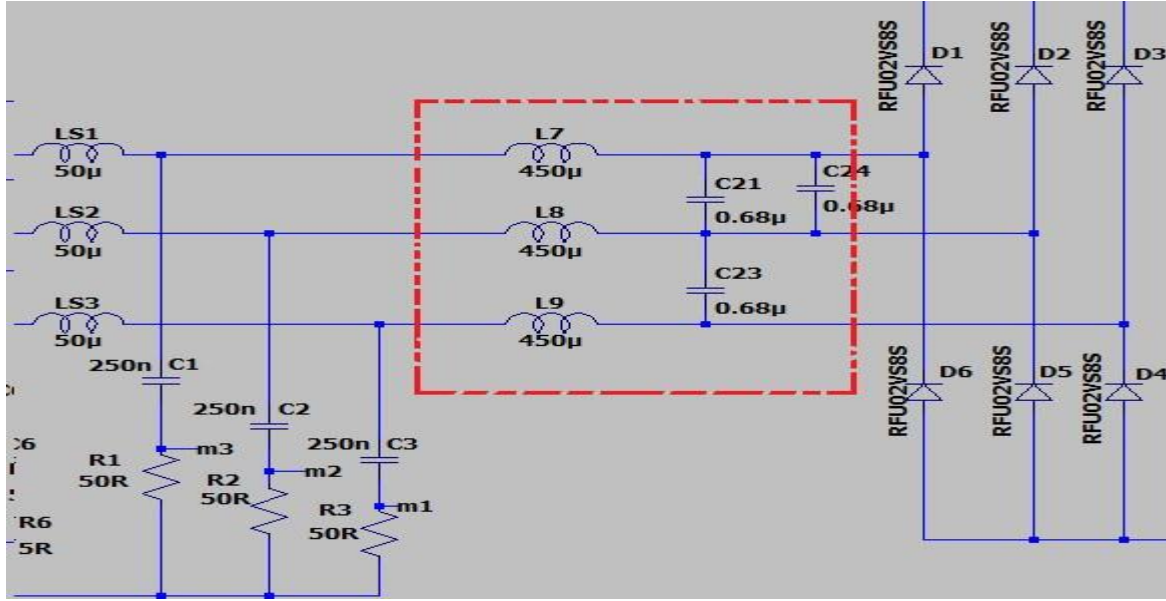
İki kademeli (ikinci dereceden) bir L tipi filtre ile bu bastırma değeri sağlanabilir. Gereken bastırma değerinin yüksek olması sebebiyle kapasite, sınır değerleri aralığında üst sınırlardan başlanarak aşağıya doğru seçilebilir. Test aralığı için kapasite empedansının 10MHz e kadar lineer değişmesi gerekir. Bu sebeple mümkün olan maksimum değeri belirlerken bilgi sayfalarındaki empedans/frekans tablosuna bakılmalıdır. Bu aralıktan 0.68 μF değeri C_x için uygun görülmüştür.

Hesaplana köşe frekansı ve C_x değeri kullanılarak fark mod filtre bobini için endüktans değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

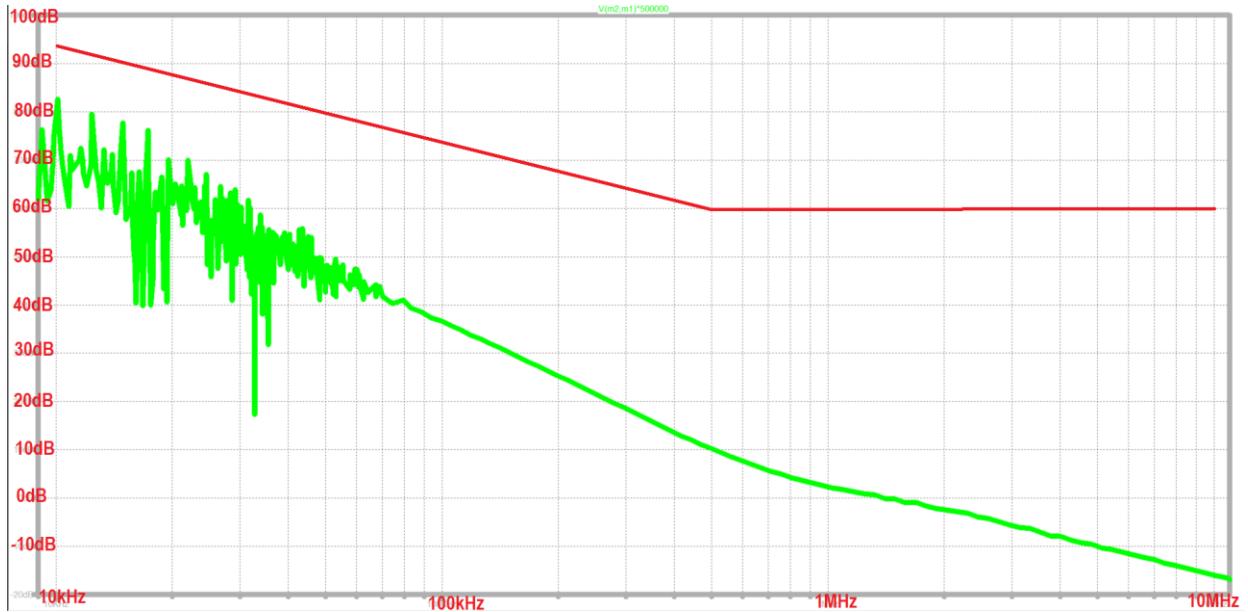
$$9,55kHz = \frac{1}{2} \times \pi \times \text{sqrt}(L \times 0,68\mu F) \quad (8)$$

$$L = 407 \mu H \quad (9)$$

Filtre bobini için satın alınabilecek yaygın bir değer olan $450\mu H$ değeri kullanılacaktır. Hesaplanan filtre değerlerine göre filtre modeli 3üç fazlı doğrultucunun LtSpice modeline Şekil 9'da gösterildiği gibi eklenmiştir. Filtre devresinin eklenmesi ile oluşan fark mod gürültü grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Hesaplanan ve beklenen bastırma etkisi, filtre köşe frekansı etrafında görülebilmektedir. Bu aşamada benzetim sonuçlarından tasarlanan fark mod filtrenin uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Hesaplanan fark mod filtrenin LTSpice modeline yerleştirilmesi



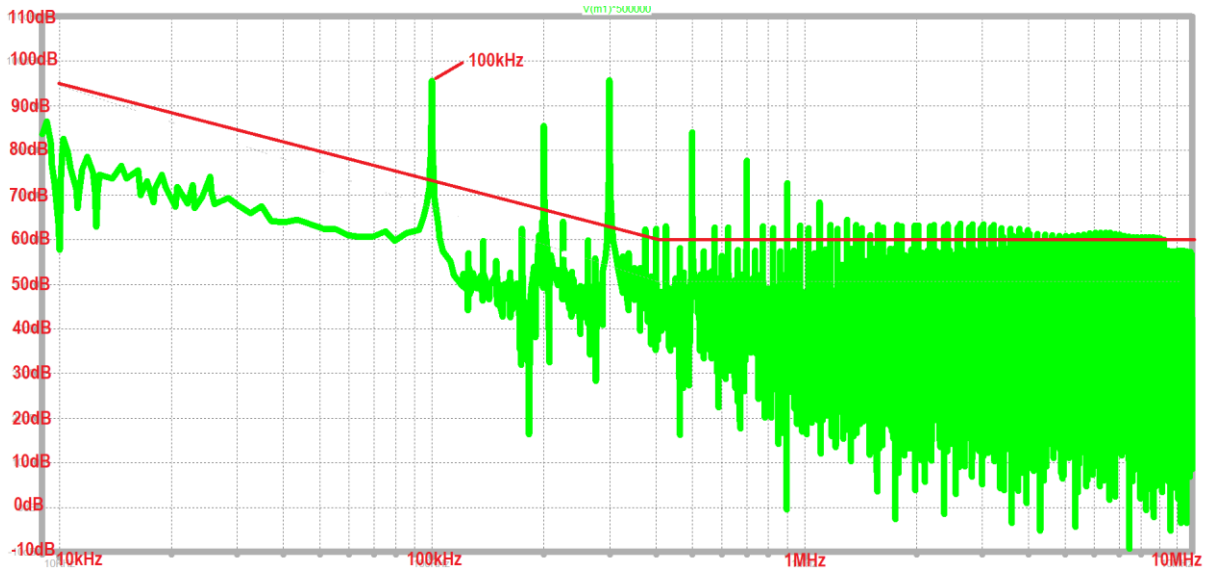
Şekil 10. Filtre eklenmesi sonucu oluşan fark mod gürültüsü

Şekil 7'de verilen 3 faz AA/DA dönüştürücü LTSpice modeli ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda devre için elde edilen ortak mod gürültüsü fark mod filtre kullanılmadığı ve kullanıldığı

durumlar için sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Gürültü grafikleri üzerinde Şekil 6’da verilen limit grafiği kırmızı renk ile işlenmiştir.



Şekil 11. AA/DA dönüştürücü devresinin fark mod filtre olmadan ortak mod gürültü grafiği



Şekil 12. AA/DA dönüştürücü devresinin fark mod filtre eklendikten sonraki ortak mod gürültü grafiği

Fark mod filtre eklenmiş devre grafiği referans alınarak önce kapasite sonrasında ise ortak mod şok bobini için indüktans hesaplanabilir. İlk limit aşımının meydana geldiği 100kHz frekansı ortak mod filtre tasarımı için uygun görülmüştür. Öncelikle bu frekans için gerekli bastırma miktarı hesaplanmalıdır. Gürültü sinyalinin 100kHz tepe değeri: 98dBuV iken MIL-STD-461F'e göre 300kHz'deki limit değeri 75dBuV 'dir. 5dBuV güvenlik payı dikkate alınarak gerekli bastırma değeri hesaplanabilir:

$$A_{\text{Attenuation, Bastırma}} = 98 - 75 + 5 = 28\text{ dBuV} \quad (10)$$

$$A = 28\text{ dBuV} \quad (11)$$

Gerekli bastırma değeri 28 $dBuV$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer ve filtreleme frekansı kullanılarak köşe frekansı hesaplanabilir:

$$f_c = 100kHz \times 10^{\frac{-28}{40}} = 20kHz \quad (12)$$

$$f = 20kHz \quad (13)$$

olarak köşe frekansı hesaplanmıştır. Kondansatör kapasite değeri seçildikten sonra bobin endüktans değeri köşe frekansı formülü üzerinden hesaplanabilir.

Kondansatör değeri seçilirken yine öz-rezonans frekansı ve standartlar gereği toprak kondansatör akım limiti değerleri dikkate alınmalıdır. Standartlar, toprağa bağlı kondansatörün akım değerini 5 mA ile limitler. Bu akım değerine göre maksimum kapasite değeri aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$I_{leakage} = 2 \times \pi \times f \times V_{max,p-n} \times C_y \quad (14)$$

$$5mA = 2 \times \pi \times 400Hz \times 115 \times 1.1 \times C_y$$
$$C_y = 15.7 \text{ nF} \quad (15)$$

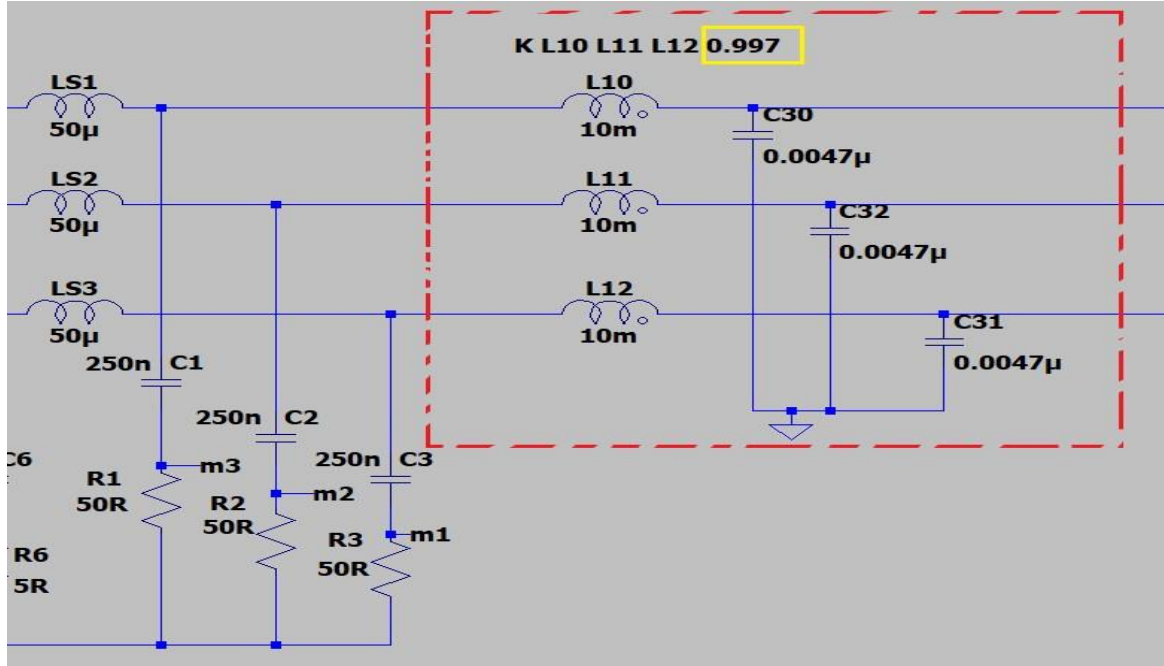
Bu limit değeri, kullanıcının toprağa bağlı kondansatörler üzerinden deşarj riski sebebiyle standartlar gereği 5mA değerine limitlenmiştir. Bu akım değerini aşmamak için en fazla 15.7nF kullanılabilir. Limit değerinden uzaklaşmak için 4.7nF Y2 kapasite değeri daha uygun görülmüştür. Seçilen bu Y2 kondansatör değeri ve köşe frekansı kullanılarak ortak mod filtre için bobin endüktans değeri hesaplanabilir:

$$20 \text{ kHz} = \frac{1}{2 \times \pi \times \text{sqrt}(L \times 4.7 \text{ nF})} \quad (16)$$

$$L = 13.5 \text{ mH} \quad (17)$$

Hesaplama sonuçlarına göre satın alınabilecek yaygın bir değer olan 10mH değeri kullanılacaktır.

Kullanılan devre parametrelerine uygun olarak bulunabilecek bobinler incelendiğinde kaçak endüktans değerinin ortalama %0.3 civarında olduğu görülebilir. Bu sebeple benzetim çalışmalarında kuplaj oranı 0.997 olarak güncellenmiştir. Tasarımı tamamlanan ortak mod filtre devresinin Şekil 12'deki gibi LtSpice modeline eklenmiş ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'te AA/DA dönüştürücü devresinde filtre devreleri eklendikten sonra oluşan gürültü grafiği Şekil 14'te gösterilmiştir. Yine MIL-STD-461F'de tanımlanan sınır değer eğri üzerinde işaretlenmiştir. Gürültü grafiği tasarlanan filtrenin yeterli olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 13. Hesaplanan ortak mod filtrenin LTSpice modeline eklenmesi



Şekil 14. Ortak mod filtre eklendikten sonra ortak mod gürültüsü

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada askeri hava/kara araçlarında kullanılmak üzere tasarlanan AA/DA dönüştürücülerin "MIL-STD-461F-CE102"de tanımlanan iletkenlik yoluyla yayılım gereksinimine uygun hale getirilmesi amacıyla elektromanyetik girişim filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sistemin filtre olmadan gürültü grafiği benzetim programı kullanılarak çıkarılmıştır. Çıkarılan gürültü grafiği analiz edilerek adım adım fark mod ve ortak mod filtre tasarımı gerçekleştirilmiş ve filtre bileşenlerinin değerleri hesaplanmıştır. Fark mod filtre eklendikten sonra ortak mod gürültü grafiğinde de iyileştirme görüldüğü gösterilmiştir, fakat limit değerinin altına inilememiştir. Tasarlanan ortak mod filtrenin de sisteme eklenmesiyle eklenen ölçüm devreleri aracılığıyla benzetim programında yapılan çalışmalar hem ortak mod ve hem de fark mod gürültülerinin standart da belirtilen limitin yaklaşık 10 dBuV güvenlik marjı bırakılarak altına indiği görülmüştür. Benzer filtreleme metodu kullanan Heller vd. (2022)'de yapılan çalışmada ise güvenlik marjı yaklaşık dBuV

hatta tam yük değerinde standart eğrisinin üstünde kalan noktalar bulunmaktadır. Tasarım yapılırken limitler ile güvenlik payı bulunduracak şekilde tasarım yapılması ile devrenin imalatında ve/veya baskı devre tasarımı sırasında öngörülemeyen parazitik etkilerden dolayı oluşacak limit üstü değerlerin önüne geçilmesi sağlanmıştır. Örneğin Ma vd. (2023)'de yapılan çalışmada 6dBuV güvenlik marjı bırakılmış ve baskılı devre kartından oluşabilecek etkenler benzetim çalışmasına eklenmiştir. Böylece muhtemel iyileştirme nedeniyle ortaya çıkabilecek maliyet artışı ve görece yüksek maliyeti bulunan test ve ölçümlerin tekrar edilmesi gereksinimleri ortadan kaldırıldığından tasarım maliyeti iyileştirme elde edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- Tihanyi, L. (1995). *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics* Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Ott, H.W. (1998). *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Wiley, Second Edition. New York, ABD.
- Çadırcı, I., Saka, B. & Eriştiren, Y. (2005). Practical EMI-Filterdesign Procedure for High-Power High-Frequency SMPS According to MIL-STD 461. *IEE Proc.Electr.Power Appl.*,152(4), 775-782.
- Zhang, H., Yang, L., Wang, S. & Puukko, J. (2017). Common-Mode EMI Noise Modeling and Reduction with Balance Technique for Three-level Neutral Point Clamped Topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 7563-7573.
- Nawawi, A., Tong, C.F., Sakanova, A. & Liu, Y. (2017). Design and Demonstration of High Power Density Inverter for Aircraft Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 53, 1168-1176.
- Lai, J. S., Huang, X., Chen, S. & Nehl, T. (2002). EMI Characterization and Simulation with Parasitic Models for a Low-Voltage High Current AC Motor Drive. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference*, 13-18 October 2002, Pittsburgh, ABD.
- Schanen, J.L., Jourdan, L. & Roudet, J. (2002). Layout Optimization to Reduce EMI of a Switched Mode Power Supply. *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 23-27 June 2002, Cairns, QLD, Australia.
- Chen, C. (2000). Novel EMC Debugging Methodologies for High-power Inverters. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 21-25 August 2000, Washington, DC, USA.
- Mugur, P.R., & Roudet, J. & Crebier, J.C. (2001). Power Electronic Converter EMC Analysis through State Variable Approach Techniques. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, 43(2), 229–238.
- Balthasar V.D.P. (1946). The Fundamental Principles of Frequency Modulation. *J. Inst. Elect. Eng. Part III Radio Commun. Eng.*, 93(23), 153–158.
- Balcells, J., Santolaria, A., Orlandi, A., Gonzalez, D. & Gago, J. (2005). EMI Reduction in Switched Power Converters Using Frequency Modulation Techniques. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, 47(3), 569–576.
- Santolaria, A., Balcells, J. & Gonzalez, D. (2002). Theoretical & Experimental Results of Power Converter Frequency Modulation. *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 05-08 November 2002, Seville, Spain.

- Lorenzo, J.A.S. (2004). SSCG Methods of EMI Emissions Reduction Applied to Switching Power Converters. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 20-25 June 2004, Aachen, Germany.
- Khun, C., Khan-ngern, W. & Kando, M. (2007). Passive EMI Filter Performance Improvements with Common Mode Voltage Cancellation Technique for PWM Inverter. *7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 27-30 November 2007, Bangkok, Thailand.
- Guo, T., Chen, D.Y. & Lee, F.C. (1995). Diagnosis of Power Supply Conducted EMI Using a Noise Separator. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 05-09 March 1995, Dallas, USA.
- Yalçın, S. (2023). Güç Elektroniklerinde EMI. *Doğa Bilimleri ve Matematikte Yenilikçi Çalışmalar*, ISBN: 978-625-6507-38-8, 76-95.
- Kircher, D. & Pommerenke, D.J. (2022). EMC Analysis of the Inverting Boost/Buck Converter Topology. *Electronics*, 11(20), 3388.
- Murugan, R., Chen, J., Tripathi, A., Nayak, B.P., Muniganti, H. & Gope, D. (2023). Multiscale EMC Modeling, Simulation, and Validation of a Synchronous Step-Down DC-DC Converter. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 8, 269-280.
- Heller, M.J., Krismer, F. & Kolar, J.W. (2022). EMI Filter Design for the Integrated Dual Three-Phase Active Bridge (D3AB) PFC Rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(12), 14527-14546.
- Ma, Z., Wang, S., Sheng, H. & Lakshmikanthan, S. (2023). Modeling, Analysis and Mitigation of Radiated EMI Due to PCB Ground Impedance in a 65W High-Density Active-Clamp Flyback Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(12), 12267-12277.