

Doğrultucularda ve Eviricilerde Kullanılan Pasif Filtre Türlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

Mehmet Oğuz Özcan¹

Ezgi Ünverdi Ağlar²

Ali Bekir Yıldız³

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

¹ mhmtogzocn@gmail.com

² ezgi.unverdi@kocaeli.edu.tr

³ abyildiz@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, doğrultucu ve evirici devrelerinin çıkışlarına uygulanan pasif filtre türlerinin etkileri incelenmiştir. Pasif devre elemanlarının belirlenmesinde Fourier seri açılımı kullanılmıştır. Doğrultucularda kullanılan alçak geçiren filtre ve eviricilerde kullanılan bant geçiren filtrelerin çeşitleri ve frekans cevapları verilmiştir. Uygulama devrelerine ilişkin benzetim sonuçları da çalışmaya dahil edilmiştir.

Anahtar kelimeler : Pasif filtre, doğrultucu, evirici

1. Giriş

Güç dönüştürücüleri, alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) türündeki elektrik enerjisini birbirlerine veya kendi içinde farklı şekillere ve seviyelere sahip bir yapıya dönüştürme işlemini gerçekleştirirler [1,2]. Dönüştürücülerin çıkış gerilim/akım değişimlerinin istenen şekillerde olması için filtreleme teknikleri kullanılır.

AA/DA dönüştürücüleri (doğrultucular), belirli genliğe, frekansa ve faz sayısına sahip bir AA gerilimi, belirli bir genlikteki DA gerilime dönüştürmektedir. Doğal komütasyonlu olan bu dönüştürücü devreleri, tristör ve/veya diyotlarla gerçekleştirilirler. Doğrultucular, faz sayısına, doğrultulan dalga sayısına ve kontrol şekline göre sınıflandırılırlar. Uygulama alanları, DA motor kontrolü, akümülatör şarjı, elektrolizle kaplama, DA güç kaynakları, DA kıyıcı ile eviricilerin beslenmesi vb. olarak sıralanabilir. Doğrultucuların çıkış gerilimlerinin, dönüştürücünün tipinden ve yükten bağımsız olarak sabit değerde olması istenir. Sakui vd. [3], DA filtreli üç fazlı kontrolsüz bir doğrultucunun harmonik akımlarının hesaplanması için bir yöntem ileri sürmüştür. Yöntem, frekans domeni analizine ve doğrultucuya ait anahtarlama fonksiyonlarına dayanmaktadır. Darwish and Mehta [4], değişken karakteristikli filtreler kullanarak doğrultucuların çıkış gerilimini düzeltmeye ilişkin bir teknik kullanmışlardır. Burada, anahtarlanmış kapasitör devreleri kullanılarak, harmonikler elimine edilmiştir. Kapasitif filtreli yarım dalga rezonans doğrultucunun topolojik incelemesi [5]'te yapılmıştır. Yüksek anahtarlama frekansları kullanılarak yüksek güç faktörlü doğrultuculara ilişkin çalışmalar [6-9]'da verilmiştir.

DA/AA dönüştürücüler (eviriciler), belirli değerdeki bir DA gerilimi, belirli genliğe, frekansa ve faz sayısına sahip bir AA gerilime dönüştürürler. Zorlamalı komütasyonlu olan bu devreler, bipolar

jonksiyon transistör (BJT), metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), izole kapılı bipolar transistör (IGBT) gibi tam kontrollü yarı iletken elemanlarla gerçekleştirilirler. Uygulama alanları, AA motor kontrolü, endüksiyonla ısıtma, elektronik balastlar, kesintisiz güç kaynakları, AA güç kaynakları vb. olarak sıralanabilir. Eviricilerin çıkış gerilimlerinin, düzgün sinüs formunda olması istenir. Tek fazlı PWM eviricilere ait çıkış LC filtrelerinin analiz ve tasarımına ilişkin yöntemler [10,11]'de, verilmiştir. Aktif filtreli üç fazlı kontrollü doğrultucuların çıkış gerilimlerinin düzeltilmesine ilişkin teknikler [12]'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, öncelikle doğrultucu ve eviricilerde kullanılan pasif filtre devre yapıları incelenmiştir. Daha sonra, farklı filtre devre yapılarının dönüştürücülerin çıkış gerilimlerine etkileri gösterilmiştir.

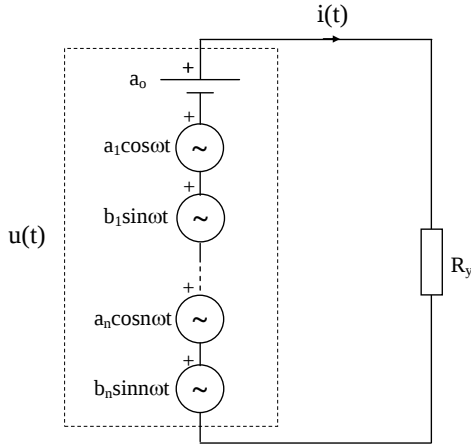
2. Filtreleme Teknikleri

Doğrultucu ve evirici devrelerinin çıkış gerilim/akım dalga şekilleri her zaman istenilen forma sahip olmayabilir. Bu amaçla, çeşitli filtreleme teknikleri geliştirilmiştir. Filtre devrelerinin tasarım ve analizinde, dönüştürücülerin çıkış dalga şekillerinin Fourier seri açılımları (denk.(1)) büyük önem taşır.

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (1)$$

Bir dönüştürücünün çıkış gerilimine, $u(t)$, ait Fourier seri açılımı denk.(1)'de verilmiştir. Bu seri açılımındaki her bir terim, Süperpozisyon teoremine göre, Şekil 1'deki gibi tek bir kaynak ile gösterilebilir. Dalga şekillerinin seri açılımındaki istenmeyen bileşenler/harmonikler dikkate alınarak filtre devrelerinin eleman değerleri belirlenir.

Filtre devreleri, girişlerindeki belli frekanslı büyüklükleri çıkışlarına aktaran veya girişlerindeki belli frekanslı büyüklükleri çıkışlarına aktarmayan dolayısıyla frekans seçiciliği yapan devrelerdir [13]. Bu devreler, endüktans ve kapasite elemanlarının frekansa bağlı olarak reaktanslarının değişmesi ve rezonans olayının birlikte ele alınmasıyla tasarlanırlar.

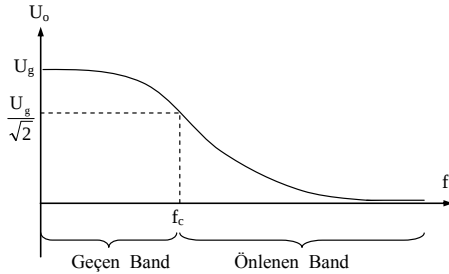


Şekil 1: Fourier seri açılımına ilişkin eşdeğer devre

AA/DA dönüştürücünün çıkış geriliminin sabit değerde olması istendiğinden (Şekil 1'deki a_0 sabit bileşeni), doğrultucunun çıkışına Alçak geçiren filtre devresi bağlanmalıdır. DA/AA dönüştürücünün çıkış geriliminin temel frekanslı sinüs şeklinde olması istendiğinden (Şekil 1'deki $b_1 \sin \omega t$ bileşeni), eviricinin çıkışına Bant geçiren filtre devresi bağlanmalıdır. Bu amaçla sırasıyla, bu filtre devrelerinin yapıları ve uygulamaları verilecektir.

2.1. Alçak geçiren filtre

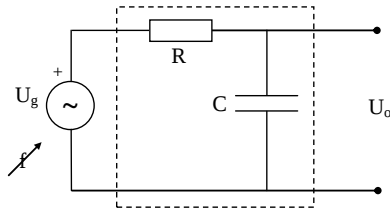
Bu filtreler girişlerindeki küçük frekanslı sinyalleri çıkışlarına aktaran, büyük frekanslı sinyalleri ise aktarmayan (minimum seviyeye düşüren) devrelerdir. Şekil 2'de alçak geçiren filtre devresine ait frekans cevabı verilmiştir. Burada, U_g = giriş gerilimini, U_o = çıkış gerilimini, f_c = köşe frekansını ifade etmektedir.



Şekil 2: Alçak geçiren filtre devresi frekans cevabı

Şekil 2'deki frekans cevabını sağlayan üç farklı pasif filtre devresi sırasıyla aşağıda verilmiştir.

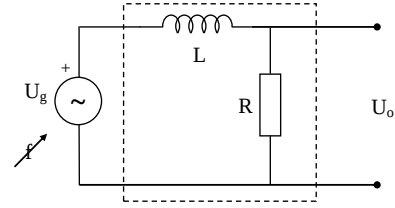
(a) RC alçak geçiren filtre devresi



Şekil 3: RC alçak geçiren filtre devresi

Devrenin köşe frekansı; $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ (2)

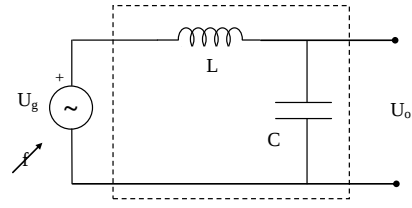
(b) RL alçak geçiren filtre devresi



Şekil 4: RL alçak geçiren filtre devresi

Devrenin köşe frekansı; $f_c = \frac{R}{2\pi L}$ (3)

(c) LC alçak geçiren filtre devresi

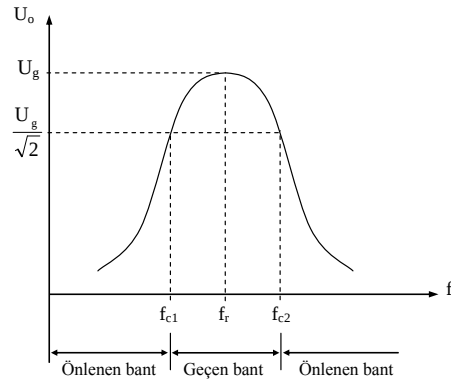


Şekil 5: LC alçak geçiren filtre devresi

Devrenin köşe frekansı; $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (4)

2.2. Bant geçiren filtre

Bu filtreler, belli bir frekans aralığındaki giriş sinyallerini çıkışlarına aktaran, bu aralığın altındaki ve üstündeki frekans sinyallerini ise çıkışına aktarmayan (minimum seviyeye düşürün) devrelerdir. Şekil 6'da bant geçiren filtre devresine ait frekans cevabı verilmiştir. Burada, U_g : giriş gerilimini, U_o : çıkış gerilimini, f_r : merkez (rezonans) frekansını, f_{c1} , f_{c2} : alt, üst kesim frekanslarını ifade etmektedir.

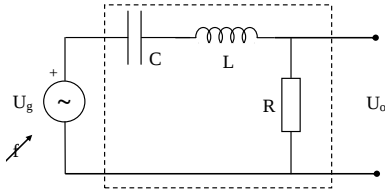


Şekil 6: Bant geçiren filtre devresi frekans cevabı

Şekil 6'daki frekans cevabını sağlayan üç farklı pasif filtre devresi aşağıda sırasıyla verilmiştir.

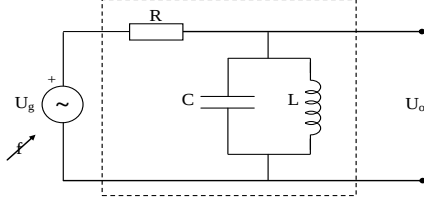
(a) Seri rezonans devreli bant geçiren filtre devresi

Devrenin merkez/rezonans frekansı; $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (5)



Şekil 7: Seri rezonans devreli bant geçiren filtre devresi

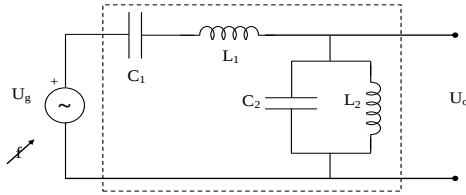
(b) Paralel rezonans devreli bant geçiren filtre devresi



Şekil 8: Paralel rezonans devreli bant geçiren filtre devresi

Devrenin merkez/rezonans frekansı; $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (6)

(c) Seri-paralel rezonans devreli bant geçiren filtre devresi

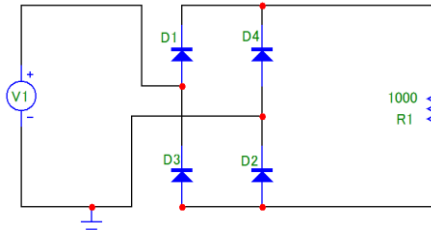


Şekil 9: Seri-paralel rezonans devreli bant geçiren filtre devresi ($L_1=L_2=L$, $C_1=C_2=C$)

Devrenin merkez/rezonans frekansı; $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (7)

3. AA/DA Dönüştürücü Uygulama Devreleri

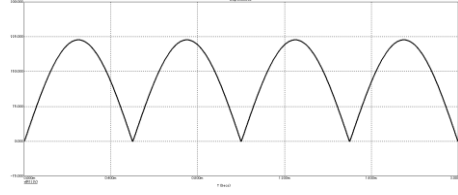
Şekil 10'daki bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresini ele alalım. Burada, $v_1(t)=220\sin\omega t$, $f=1000\text{Hz}$. Diyotlar ideal kabul edilmiştir. Devrenin çıkış gerilimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10: Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Şekil 11'deki çıkış dalga şeklinin Fourier seri açılımı denk.(8)'de verilmiştir.

$$u(t) = \frac{2U_m}{\pi} - \frac{4U_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[\frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega_0 t) \right] \quad (8)$$



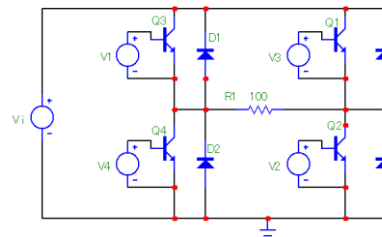
Şekil 11: Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu çıkış gerilimi

Denk.(8)'e göre, tam dalga doğrultucuya ait çıkış geriliminin Fourier seri açılımında bir sabit terim ve buna ilave olan çift kosinüslü terimler bulunmaktadır. Çıkışta düzgün bir doğru gerilim elde etmek için, kosinüslü terimlerin elimine edilmesi, dolayısıyla Alçak geçiren filtre devreleri kullanılmalıdır. Tablo 1'de doğrultucu devresinin çıkışına bağlanan Alçak geçiren filtre devrelerine ait sonuçlar görülmektedir. Köşe frekansı $f_c=100\text{ Hz}$ için eleman değerleri belirlenmiştir.

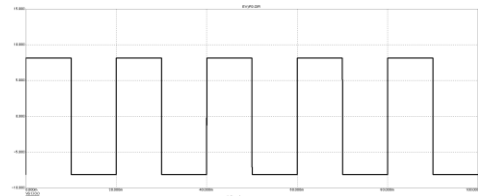
RC ve RL alçak geçiren filtre devreleri, kayıplı pasif eleman olan direnç içermektedir. Direnç elemanındaki gerilim düşümü etkisinden dolayı, çıkış geriliminde azalma meydana gelmektedir. Alçak geçiren filtre etkisiyle, doğrultucu devresine ait Şekil 11'deki dalga şeklinin Fourier seri açılımındaki doğru bileşen (denk.8'deki sabit bileşen) etkili olur. Dolayısıyla, Tablo 1'deki RC ve RL alçak geçiren filtre devresinin sürekli haldeki değerleri, bu sabit bileşene göre belirlenmektedir. LC alçak geçiren filtre devresi ise, kayıpsız pasif elemanlardan oluşmaktadır. Endüktansta biriken enerjinin de giriş gerilimine eklenmesiyle, Tablo 1'den görüleceği gibi, çıkış gerilimi daha büyük bir değer almaktadır.

4. DA/AA Dönüştürücü Uygulama Devreleri

Şekil 12'deki tek fazlı köprü tipi evirici devresini ele alalım. Burada, $v_i = 10\text{V}$, anahtarlama periyodu = 20ms, iletim oranı $D=0.5$. Devrenin çıkış gerilimi Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 12: Tek fazlı köprü evirici devresi

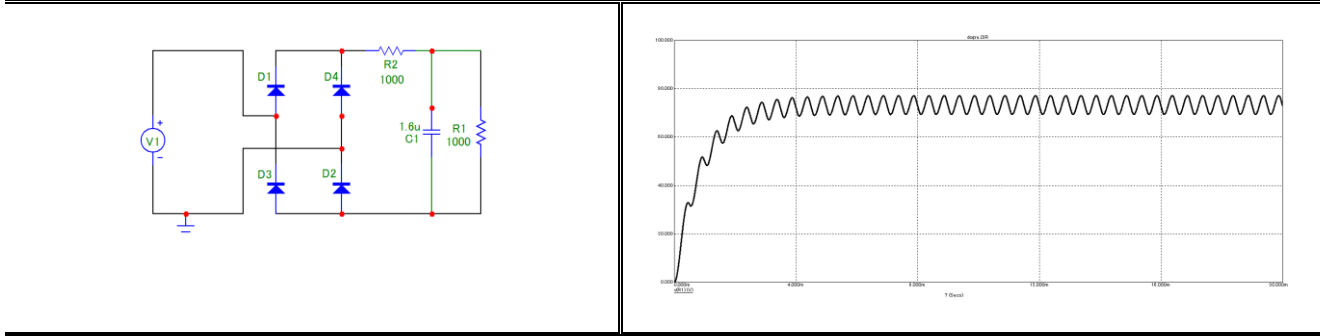


Şekil 13: Tek fazlı köprü evirici çıkış gerilimi

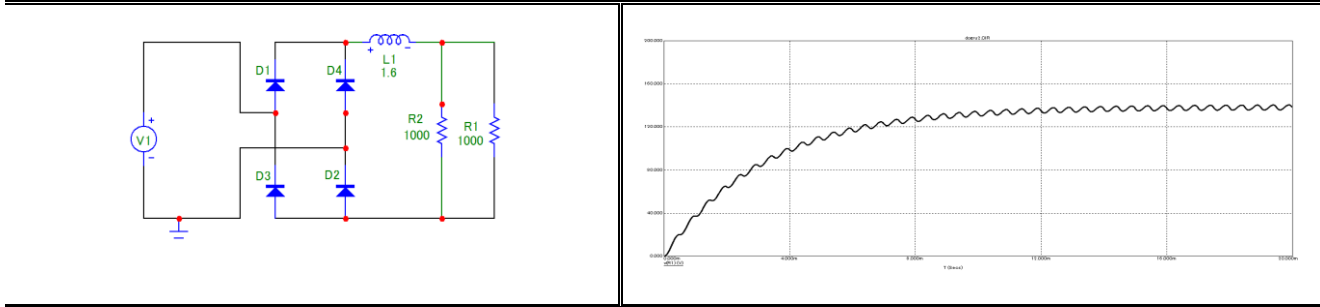
Şekil 12'deki çıkış dalga şeklinin Fourier seri açılımı denk.(9)'da verilmiştir.

Tablo 1: Alçak geçiren filtre uygulama devreleri ve benzetim sonuçları

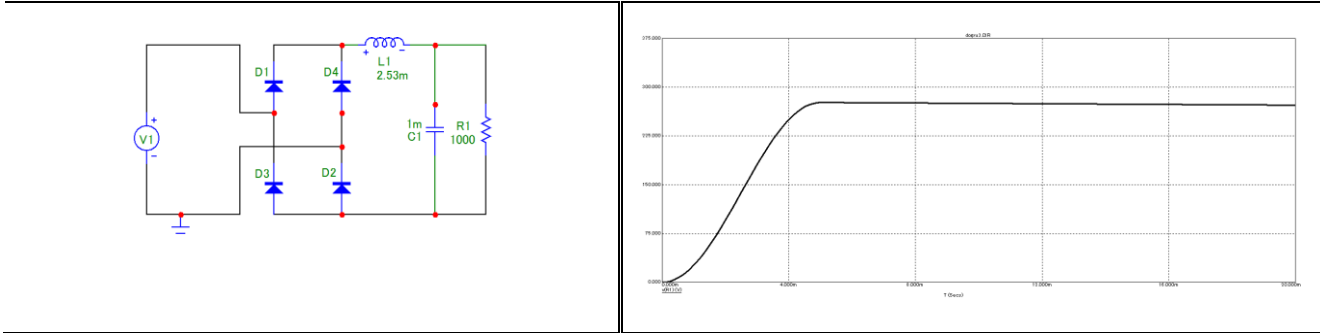
RC Alçak Geçiren Filtre Devresi :



RL Alçak Geçiren Filtre Devresi :



LC Alçak Geçiren Filtre Devresi :



$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} \right] \quad (9)$$

Denk.(9)'a göre, tek fazlı köprü eviriciye ait çıkış geriliminin Fourier seri açılımında sadece tek bileşenli sinüslü terimler bulunmaktadır. Çıkışta saf bir sinüs eğrisi elde edebilmek için, temel bileşen dışındaki terimlerin elimine edilmesi, dolayısıyla Bant geçiren filtre devreleri kullanılmalıdır. Tablo 2'de evirici devresinin çıkışına bağlanan Bant geçiren filtre devrelerine ait sonuçlar görülmektedir. Merkez frekansı $f_r=50$ Hz için eleman değerleri belirlenmiştir.

Bant geçiren filtre etkisiyle, evirici devresine ait Şekil 13'deki dalga şeklinin Fourier seri açılımındaki birinci (temel) bileşen (denk.9'daki $\sin\omega t$ bileşeni) etkili olur. Tablo 2'den görüleceği gibi, evirici çıkışında temel frekans, $f=50$ Hz, değerinde sinüs dalga şekli elde edilmektedir.

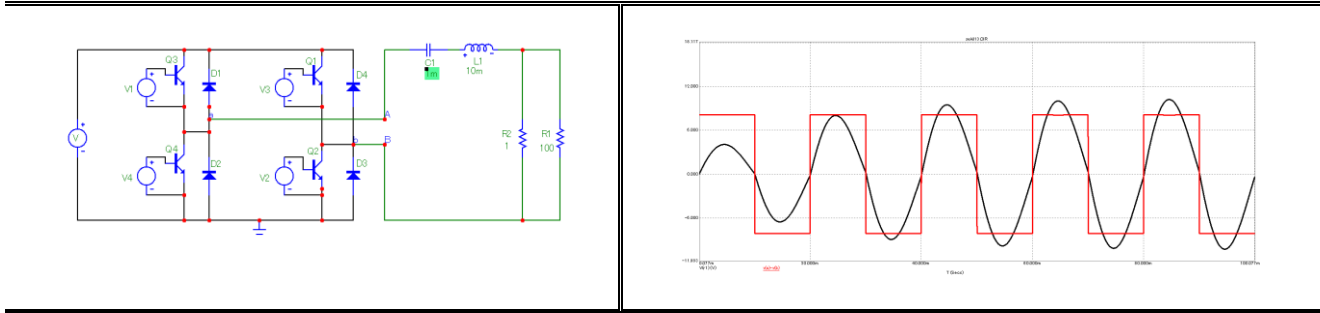
5. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi ve bir fazlı köprü tipi evirici devresinin çıkışlarına bağlanan bazı pasif filtre türlerinin çıkış gerilim dalga şekline olan etkisi zaman domeninde incelenmiştir. Filtre yapıları karşılaştırılmış, istenen dalga şekillerinin elde edilmesi için hangi tür pasif filtre devresinin kullanılması gerektiği açıklanmıştır.

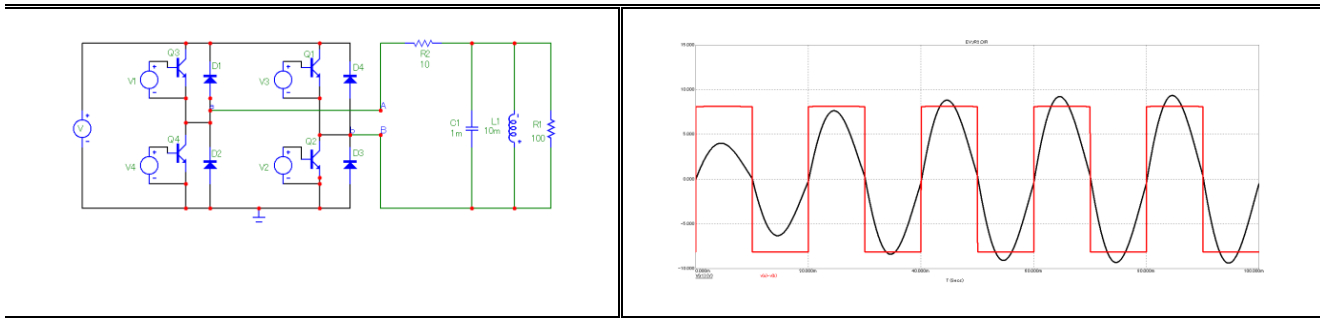
Doğrultucunun çıkış geriliminin sabit (DC) olması amacıyla Alçak geçiren filtre devresi, eviricinin çıkış geriliminin temel frekanslı sinüs şeklinde olması amacıyla Bant geçiren devresi uygulamaları yapılmıştır. Özellikle doğrultucu devre uygulamalarında, kayıpsız LC filtrenin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tablo 2: Bant geçiren filtre uygulama devreleri ve benzetim sonuçları

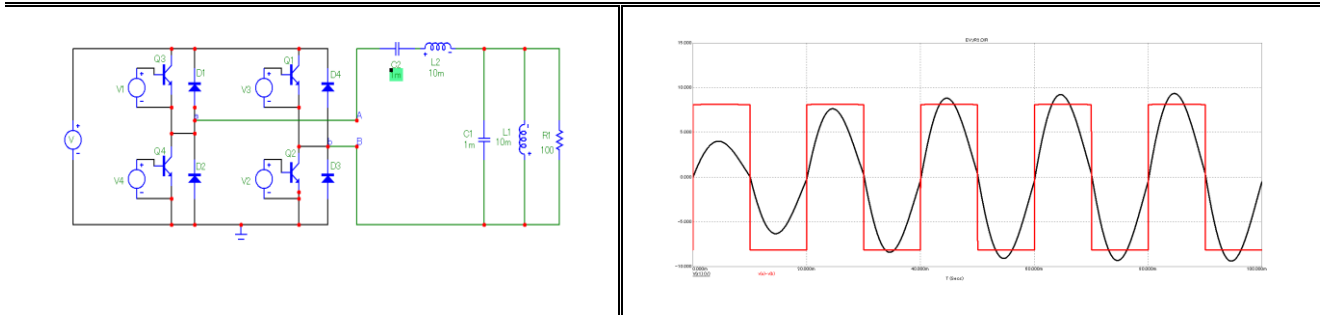
Seri Rezonans Devreli Bant Geçiren Filtre Devresi :



Paralel Rezonans Devreli Bant Geçiren Filtre Devre :



Seri-Paralel Rezonans Devreli Bant Geçiren Filtre Devre :



Kaynaklar

- [1] Bodur, H., Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamaları, Birsan yayınevi, İstanbul, 2010.
- [2] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., Güç Elektroniği, Literatür yayınları, İstanbul, 2010.
- [3] Sakui.M., Fujita, H., Shioya M., "A method for calculating harmonic currents of a three-phase bridge uncontrolled rectifier with DC filter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.3, pp.434-440, 1989.
- [4] Darwish, M. and Mehta, P., "Variable capacitor filter for smoothing rectifier output", *IEEE 22nd Power Electronics Specialists Conference, PESC'91*, pp.91-95, 1991.
- [5] Theodoridis, M.P., "Analysis of a capacitive-filter, half-wave rectifier fed by a parallel-load resonant tank", *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, Vol.152, pp.878-884, 2005.
- [6] Ando, S., Ueda, A., Tori, A., "Characteristics of three phase boost type rectifier with LC filter in AC side", *Power Conversion Conf.*, Vol.3, pp.1211-1216, 2002.
- [7] Kataoka, T., Kishimoto, N., Inagaki, M., "Transient performance analysis of a single-phase voltage-type PWM rectifier with active filtering function", *Power Electronics Specialists Conference*, Vol.5, pp.3707-3712, 2004.
- [8] Liserre, M., Blaabjerg, F., Hansen, S., "Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.41, pp.1281-1291, 2005.
- [9] Shi, X., et al., "Modeling and control of an LCL filter based three-phase active rectifier in grid emulator", *IEEE 28th Applied Power Ele. Conf. and Exp.(APEC)*, 2013.
- [10] Dahono, P.A., Purwadi, A., "An LC filter design method for single-phase PWM inverters", *IEEE Int. Conference on Power Elec. and Drive Systems*, Vol.2, 1995.
- [11] Kim, H. and Sul S.K., "Analysis on output LC filters for PWM inverters", *IEEE 6th Int. Power Electronics and Motion Control Conf.*, pp.384-389, 2009.
- [12] Koezara, W. and Biloskorski, P., "Analysis of three phase controlled rectifier with current active filter", *IEEE Int. Sym. on Industrial Electronics*, pp.630-635, 1996.
- [13] Yıldız, A.B., "Elektrik Devreleri Teori ve Çözümlü Örnekler, Kısım II", Kocaeli Üniv. Yay., No.234, 2006.