KTG

enerji - elektrik - medikal

Şebeke Bağlantılı Eviriciler için LLCL Filtre Tasarımı; Detaylı Bir Performans Analizi

Murat KARABACAK[1*], Fuat KILIÇ[2], Bilal SARAÇOĞLU[3], Ali Fuat BOZ[1], Abdullah FERİKOĞLU[1]

[1]Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya

[2]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli

[3]Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81100, Düzce

(Geliş / Received : 08.08.2015 ; Kabul / Accepted : 01.10.2015)

ÖZ

Şebeke bağlantılı eviricilerde, şebekeye aktarılan akımların toplam harmonik bozunumunun %5'in altında olması gerekmektedir. Bu amaçla çıkış filtreleri kullanılmaktadır. Toplam harmonik bozunumundan başka filtrenin üzerindeki gerilim düşümü ve filtrenin reaktif güç tüketimi için de tasarım koşulları sağlanmalıdır. Bu koşulları sağlamak için çeşitli filtre tasarım yöntemleri literatürde sunulmuştur. Bu çalışmada, en önemli filtre tasarım yöntemleri ele alınmış ve L, LCL ile LLCL filtre tasarımları arasında bir performans analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, LLCL filtrenin, bazı riskli noktalar dikkate alınmak şartıyla, daha yüksek performans ve daha düşük maliyet sağladığı ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: L filtre, LCL filtre, LLCL filtre, Aktif Söndürme, Evirici

LLCL Filter Design for Grid Connected Inverters; a Detailed Performance Analysis

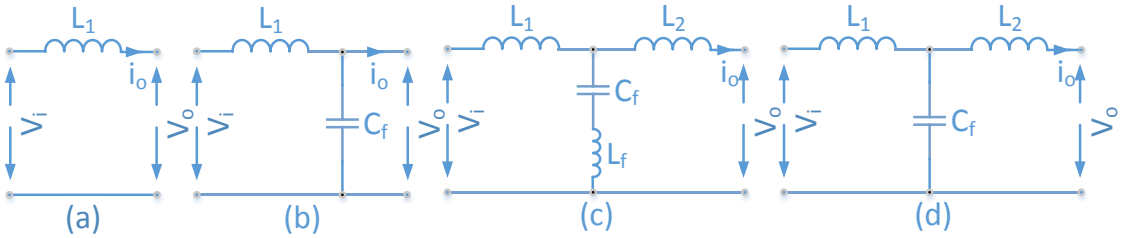
ABSTRACT

Currents injected into grid need to have a total harmonic distortion below 5% in grid connected inverters. To this aim, output filters are employed. For these filters, design conditions other than total harmonic distortion for voltage drop over the filter and reactive power consumption of the filter have to be also fulfilled. In literature, some filter schemes have been proposed to satisfy these conditions. In this study, the most important filter types are handled and a performance analysis between L, LCL and LLCL filter was implemented. Consequently, it is concluded that LLCL filter has higher performance and lower cost, on the condition that some risky points are considered.

Keywords: L filter, LCL filter, LLCL filter, Active Damping, Inverter

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şebeke bağlantılı eviriciler, kesintisiz güç kaynakları, 4 bölgeli motor sürücüler, aktif güç filtreleri, güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadır [1-12]. Çıkış filtreleri şebeke bağlantılı eviricilerin önemli ve temel bir bileşenidir. Bu filtreler olmadan şebekeye güç aktarımı yapmak mümkün değildir. Çıkış filtresi olarak L [7, 12, 17-19], LC [14-16], LCL [1-12] ve LLCL [13] filtreler, Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'de, filtrelerin girişi "i alt indisli gösterimler" eviricinin çıkışına, filtrelerin çıkışları ise "o alt indisli gösterimler" şebekeye bağlanır. Filtreleri bir transfer fonksiyonu olarak düşünürsek, giriş evirici gerilimi (V_i), çıkış ise şebeke akımı (i_o) olmaktadır. Bu filtreler arasında L filtre en basit çözümdür ve tasarımı diğer filtrelere göre daha kolaydır. Fakat aynı toplam harmonik bozunumu sağlamak üzere farklı filtre tasarımları yapıldığında, en maliyetli olan filtre L filtredir çünkü büyük endükstans değerleri gerektirmektedir [7,12].



Şekil 1. Şebeke bağlantılı eviricilerde kullanılan çıkış filtreleri (a) L filtre (b) LC filtre (c) LLCL filtre (d) LCL filtre

(Output filters used on grid connected inverters (a) L filter (b) LC filter (c) LCL filter (d) LLCL filter)

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: muratkarabacak@sakarya.edu.tr
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 251-260

Ayrıca yüksek endüktans değerleri kullanıldığında filtrede düşen gerilim artmaktadır ve gerekli enerji aktarımını yapabilmek için DC bara değerinin artırılması gerekmektedir ki bu da anahtarlama kayıplarını artırır [7,12,17-19]. Bu durum L filtrenin ikinci büyük sakıncasını oluşturmaktadır. Filtrenin boyutunu düşürmek ve böylece maliyeti azaltmak, filtre üzerinde düşen gerilimi minimize etmek ve ayrıca evirici çıkışındaki enerji kalitesini yükseltmek üzere LC veya LCL filtreler önerilmiştir [14-16,1-12]. L filtreye benzer olarak, diğer bir geleneksel çözüm LC filtredir. Fakat genellikle şebeke bağlantısız sistemlerde kullanılır, çünkü şebeke kendi endüktansına (Şekil 2'deki L_g) sahiptir ve LC filtreye seri durumdadır. Bu durum ortaya LCL filtre çıkarmaktadır, özetle LC filtreler şebeke bağlantılı olarak tasarlanmazlar [12, 14-16,20-21].

Günümüzde en yaygın kullanıma LCL filtreler sahiptir, çünkü şebeke bağlantı standartlarını oldukça küçük boyut ve düşük maliyet ile sağlamaktadır. Aynı kıstaslar altında L filtre ile karşılaştırılacak olursa, LCL filtre oldukça küçük boyutlu, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir çözümdür. Fakat tasarımları zordur ve şebeke bağlantılı kapalı çevrim sistemi kararlı halde tutmak için tam durum geri beslemeli doğrusal olmayan denetleyiciler veya karmaşık sönümleme şemaları gerekmektedir [11]. Bu şemalar kullanılsa bile, yüksek şebeke endüktansı değerleri için filtrenin performansı düşer, en kötü durumda ise kararsızlığa sürüklenir. Şekil 2'de bir LCL filtrenin şebeke ve eviriciye bağlantısı verilmektedir.

LLCL filtreler anahtarlama frekansından kaynaklanan dalgalanmaları LCL filtreye göre daha iyi süzmektedir. Diğer bir deyişle, anahtarlama frekansına yaklaşık sıfır empedans göstererek, anahtarlama frekansı etrafındaki (frekans modülasyonu değerindeki "m_f" ve yan bantlarındaki) harmonikleri daha güçlü bir şekilde bastırmaktadır [13,22]. Bununla birlikte, m_f'nin katları ve yan bantlarındaki harmonikleri ise LCL filtreden daha iyi bastıramamaktadır [13].

LCL filtrede herhangi bir parametrede meydana gelebilecek %20 civarında bir değişim rezonans frekansını da yaklaşık %20 değiştirir. Fakat LLCL filtrede, rezonans endüktansında "L_3" meydana gelebilecek %20 civarında bir değişim, rezonans frekansının yaklaşık iki kat değişmesine ve LLCL filtrenin performansının LCL filtrenin altında kalmasına neden olur [13]. Bu durumda, LLCL filtrenin parametre değişimlerine LCL filtreden önemli ölçüde daha duyarlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu ve diğer sebeplerden anlaşıldığı gibi, LLCL filtreler önemli üstünlükler sağlamasına rağmen, kararlı bir performans sağlaması LCL filtrelerden daha büyük riskler içermektedir.

Bu çalışmada şebeke bağlantılı bir üç fazlı evirici için, L, LCL ve LLCL olmak üzere üç farklı filtre tasarımı ve aralarında bir performans analizi yapılmıştır. Dikkat edilmesi elzem olan yukarıda da bahsedilmiş olan sakıncalarla birlikte, en düşük boyut ve en yüksek harmonik performans LLCL filtre ile elde edilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında, sırasıyla, L, LCL ve LLCL filtre tasarımları, örnek bir durumla birlikte verilmiştir. Ardından simülasyon çalışmaları ve son olarak analiz sonuçları verilmiştir.

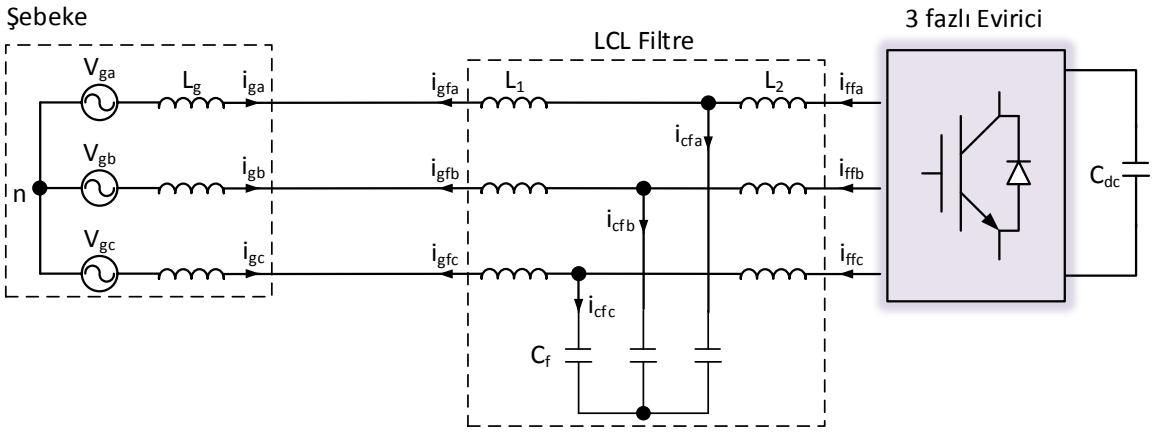
2. FİLTRE TASARIMLARI (FILTER DESIGNS)

Sırasıyla L, LCL ve LLCL filtre tasarımları aşağıda verilmektedir. Filtre tasarımlarında, literatürde kabul görmüş kıstaslar ortaktır ve aşağıdaki gibidir.

I. Filtrede düşen gerilim şebeke faz geriliminin %10.0'undan fazla olmamalıdır. Bu kıstasın amacı DC bara gerilimin çok artmamasını sağlamak ve anahtarlama kayıplarını düşük tutmaktır.

II. Güç faktörü %99.5'in üstünde olmalıdır.

III. Tablo 1'de verilen "IEEE STD 519 CURRENT HARMONIC LIMITS" standardı sağlanmalıdır. Yüksek güç değerleri için, yani $I_{SC}/I_L<20$ (maksimum kısa devre akımının (I_{SC}), maksimum yük akımı (I_L) değerinin 20 katından düşük olduğu) durumlarda, faz akımlarında oluşacak %5.0 THD bu



Şekil 2. LCL filtrenin şebeke ve eviriciye bağlantısı (LCL filter connection to grid and inverter)

standardı sağlamaktadır. Bu standardın ana ölçütü, 15 – 30 dakika boyunca Ortak Bağlantı Noktası (PCC)'ndan çekilebilecek (anlık olmayan) I_L akımının, maksimum kısa devre akımına oranıdır. Bu oran büyüdükçe ortak bağlantı noktasına bağlanan yükün güç değeri azalıyor demektir ki bu durumda yükün şebekeye zarar verme oranı da düşmektedir. Zaten tabloda da görüldüğü gibi, güç değerleri küçüldükçe akım harmonik limitleri de artmaktadır. Diğer bir ölçüt olarak, THD yerine Toplam Talep Bozunumu (TDD) seçilmesinin nedeni de budur. Böylece küçük güç değerlerine sahip müşteriler haksız cezalandırmadan korunmuş olmaktadır. THD'de harmoniklerin etkin değerlerinin karekök içinde karelerinin toplamı temel dalgaya oranlanır. TDD ise aynı toplam yukarıda bahsedilen maksimum yük akımına oranlanır.

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}}{I_1}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}}{I_L}$$

Burada, alt indisli I harfleri ilgili harmoniklerin etkin değerlerini temsil etmektedir.

Kararlı durumda I_L her zaman I_1'den büyüktür. Bu durum şunu ifade etmektedir: %5 THD oranı sağlandığında %5 TDD oranını da sağlanmış olmaktadır. Bu yüzden TDD yerine her zaman THD amaç olarak konulmaktadır [2,11]. Burada, literatürdeki örnekleri dikkate alarak [2,11], ayrıca güç kalitesini yükseltme amacını da güderek, %3.0 THD amaçlanmıştır.

Çizelge 1. IEEE STD 519 Akım harmonik limitleri, 120 V ile 69000 V arası genel dağıtım sistemleri için (IEEE STD 519 Current harmonic limits for general distribution systems, 120 V through 69000 V)

Yük akımının yüzdesi olarak maksimum akım harmonik bozunumu						
Tek sıralı harmonikler						
%*	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
I_{SC}/I_L<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20< I_{SC}/I_L <50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50< I_{SC}/I_L <100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100< I_{SC}/I_L <1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
1000< I_{SC}/I_L	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Çift sıralı harmonikler yukarıda tek eşdeğerlerinin %25'i ile sınırlandırılmıştır.						
Akımda DC seviyeye izin verilmemektedir. * Tüm güç üretim elemanları, gerçek I_{SC}/I_L değerine bakılmaksızın tabloda verilen akım bozunum oranları ile sınırlandırılmıştır.						
PCC: Ortak bağlantı noktası, I_{SC}: PCC'ndaki maksimum kısa devre akım değeri I_L: PCC'ndan 15 – 30 dakika boyunca çekilebilecek (anlık olmayan) maksimum yük akımı değeri TDD: Toplam talep bozunumu						

Filtre tasarımında kullanılan Y bağlı güç sisteminin parametreleri ise aşağıdaki tabloda verilmektedir. DC bara gerilimi pasif diyotlu doğrultmanın %30 fazlası kadar seçilmiştir

Çizelge 2.Güç sistemi parametreleri (Parameters of power system)

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Üç faz gücü (P_n)	3750 W	Şebeke frekansı (f_n)	50 Hz
Tek faz gücü (P_1)	1250 W	DC bara (V_{dc})	350 V
Şebeke faz gerilimi (V_n)	110 V	Anahtarlama frekansı (f_{sw})	10 kHz

2.1. L Filtre Tasarımı (L filter design)

L filtre tasarımında kullanılan Darbe Genişlik Ayarı (DGA) yöntemine en önemli parametredir. Referans [12]'de verildiği gibi filtre tasarımı yapılır.

$$L_1 \geq \frac{V_{h\%} \cdot V_n^2}{\omega_n \cdot m_f \cdot P_1 \cdot THD_i}$$

Burada, ω_n şebeke açısal frekansı ve m_f frekans modülasyonudur. Sinüzoidal DGA için en kötü durum senaryosu ele alındığında, m_f ve katlarının yan bantlarındaki harmoniklerin toplamının temel dalgaya oranı, $V_{h\%}$ = 0.49 olarak alınmıştır [12]. Bu durumun DC bara gerilimine de bağlı olduğu unutulmamalıdır, DC bara gerilimi arttıkça hesaplanan değer de artacaktır. Buradan L filtre değerinin alt sınırı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Ayrıntılar için referans [12]'ye de bakılabilir.

$$L_1 \geq \frac{0.49 \cdot 110^2}{2\pi \cdot 50 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot 0.03} \geq 2.5mH$$

2.2. LCL Filtre Tasarımı (LCL filter design)

LCL filtre tasarımında THD, reaktif güç ve güç faktörü değerlerinin üç faz için yaklaşık formülleri kullanılarak grafik tabanlı nümerik bir yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşım literatürde önerilmiş en son ve en gelişmiş tasarım yöntemlerinden biridir [11,25]. Bu bağlamda reaktif güç;

$$q = \frac{\left(r_q - 1\right)\left(1 + r_l\right)\left(r_f\, f_n\right)}{f_{sw}\sqrt{r_q}\sqrt{r_l}}$$

olarak verilir. Burada, r_q değişkendir ve 1 seçildiğinde, sistemde reaktif güç sıfır çıkar. r_l ise L_1 ve L_2 arasındaki orandır, yenilenebilir enerji sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda değeri optimum olarak 1 seçilir [11]. r_f'nin değeri ise optimum olarak 3.12 seçilir. Güç faktörü (PF) ise reaktif güce (q) bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$PF = 1/\sqrt{1+q^2} \qquad (1)$$

L_1 ve L_2'nin toplamı olarak, toplam endüktans değeri (L_T) ise;

$$L_T = \frac{\left(\sqrt{3}V_n\right)^2}{P_n \cdot \omega_n} \frac{r_f\, f_n \left(1 + r_l\right)}{f_{sw}\sqrt{r_l r_q}}$$

"Filtre kondansatörü akımı geri besleme" sönümleme yöntemine göre r_f = 3.12 optimum olarak seçilir [11,25,26]. Buradan uzay vektör DGA için faz akımlarının THD'si;

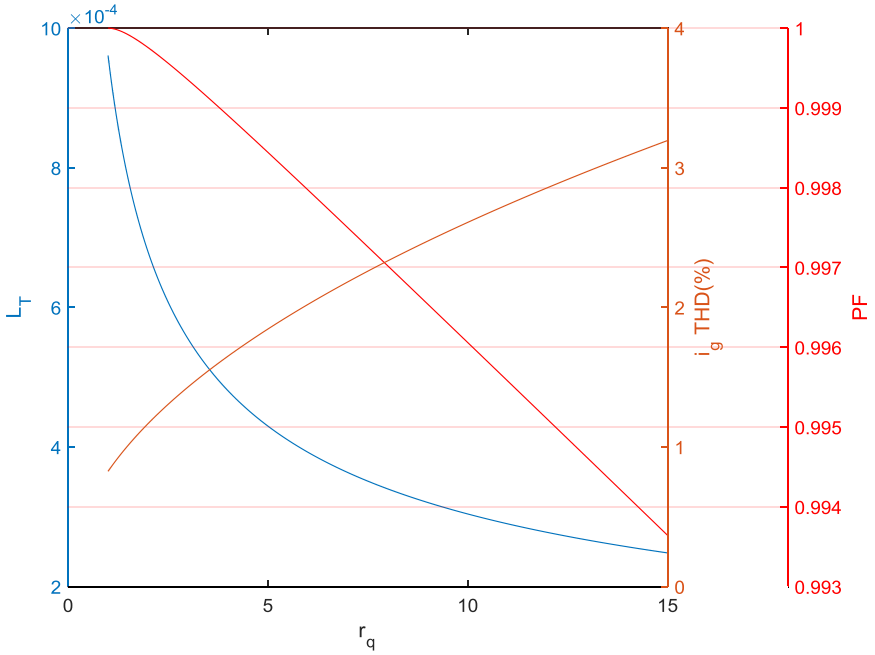
$$THD_i = \left(\frac{\pi V_{dc}\sqrt{3}}{12 I_n V_n}\right)\left(\frac{\sqrt{r_q}}{r_f^3}\right)\left(\frac{\sqrt{r_l}}{1+r_l}\right)\left(\frac{1}{\left(1-6/m_f\right)^2 - \left(1/r_f^2\right)}\right)\sqrt{\frac{3}{2}m^2 - \frac{4\sqrt{3}}{\pi}m^3 + \frac{9}{8}m^4 - \frac{9}{2} - \frac{9}{8}\frac{\sqrt{3}}{\pi}} \qquad (2)$$

olarak bulunur [11,25,26]. m, modülasyon oranıdır [25,26]. Eşitlik (5)'de bulunan L_T değerine göre, filtre kondansatörü C_f ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_f = \frac{r_f^2}{4\pi^2 L_T} \frac{\left(1 + r_l\right)^2}{f_{sw}^2 r_l}$$

Yukarıda verilen analiz temelinde, Şekil 3'teki grafik elde edilmekte ve grafik üzerinden değerler seçilerek aşağıdaki gibi tasarım tamamlanmaktadır (3)

Yukarıdaki grafikten, şebeke akımlarının THD'si %3.0 seçildiğinde, PF = %99.5 ve L_T = 0.0002644 H olarak sonuçlanır. Bu durumda, r_l = 1 seçildiği için, $L_1 = L_2 = L_T / 2$ = 0.1322 mH olarak bulunur. (7) kullanılarak C_f, 37.303 uF olarak hesaplanır. Aynı zamanda, rezonans frekansı şebeke frekansının en az on katı olmalıdır. Bu durum aşağıda verilmektedir.



Şekil 3. Grafik tabanlı LCL filtre tasarımı (Graphic based LCL filter design)

$$f_{resLCL} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (8)$$

Burada yapılan LCL tasarımı referans [11] temel alınarak yapılmıştır.

2.3. LLCL Filtre Tasarımı (LLCL filter design)

LLCL filtre tasarımında, LCL filtreye ek olarak L_f endüktansının tasarlanması gereklidir. Bu noktada LCL filtredeki tasarım aynen yukarıdaki gibi tamamlanır. Eşitlik Rezonans endüktsansı L_f ise [13];

$$L_f = \frac{1}{C_f \omega_{sw}^2} \quad (9)$$

6.7904 uH olarak bulunur. Bu durumda, LLCL filtrenin rezonans frekansının, LCL filtrede olduğu gibi anahtarlama frekansının yarısından az olması gereklidir. LLCL filtrenin rezonans frekansı ise [13];

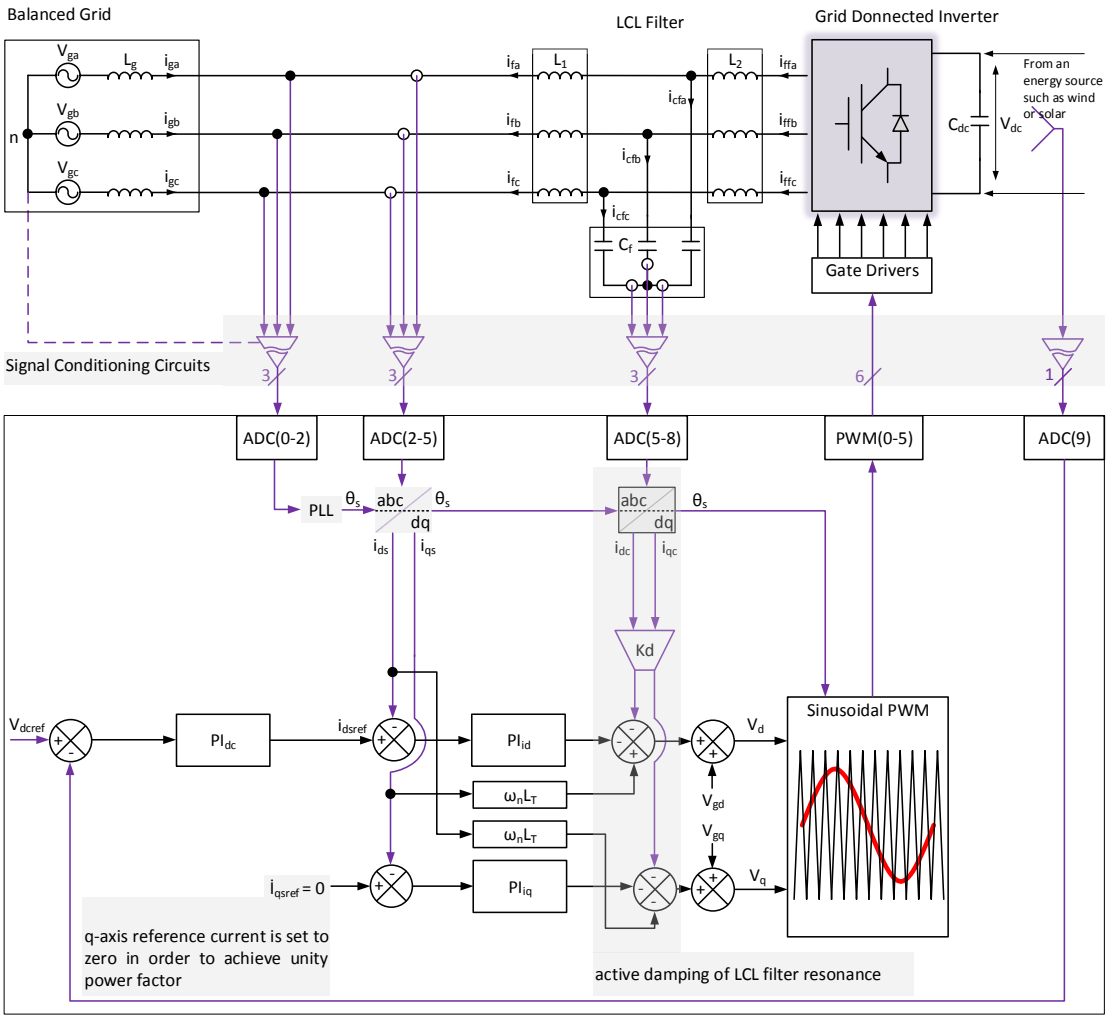
$$f_{resLLCL} = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{\left[\left(L_1 L_2\right)/\left(L_1 + L_2\right) + L_f\right] C_f}} \quad (10)$$

3052.2 Hz olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda ilgili koşul sağlanmaktadır. Aktif sönümleme sistemi LLCL filtrede, aynı LCL filtrede olduğu gibidir, ek bir ölçüm veya geri besleme gerekmemektedir. Ayrıca, LCL ve LLCL filtrelerde kullanılan aktif sönümleme filtrenin boyutunu artırmamaktadır. Fakat pasif sönümlemede direnç kondansatörlere seri direnç kullanıldığı için filtrenin boyutu artmaktadır.

3. DENETİM SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN TASARIMI (DESIGN OF CONTROL SYSTEM PARAMETERS)

Simülasyon çalışmalarında kullanılan kapalı çevrim denetim sistemi, Şekil 4'te verilmektedir. LLCL filtre durumunda, C_f kondansatörüne seri olarak, Şekil 1'de görüldüğü gibi L_f endüktansları bağlanır. Kondansatör akımı geri besleme söndürme şeması LLCL filtre için, tıpkı LCL filtrede olduğu gibi uygulanmaktadır. L filtre durumunda söndürme şemasının kaldırılması ve Şekil 4'te verilen LCL filtre yerine sadece L filtrenin konulması gereklidir.

Bu çalışmada kullanılan PI denetleyicilerde, eşitlik (11)'de görüldüğü gibi tek kazançlı şema kullanılmıştır.



Şekil 4. LCL filtreli kapalı çevrim denetim sisteminin şeması (Closed loop control system with LCL filter)

Bu PI denetleyiciye ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_{PI}(s) = k\frac{sT_i + 1}{sT_i} \tag{11}$$

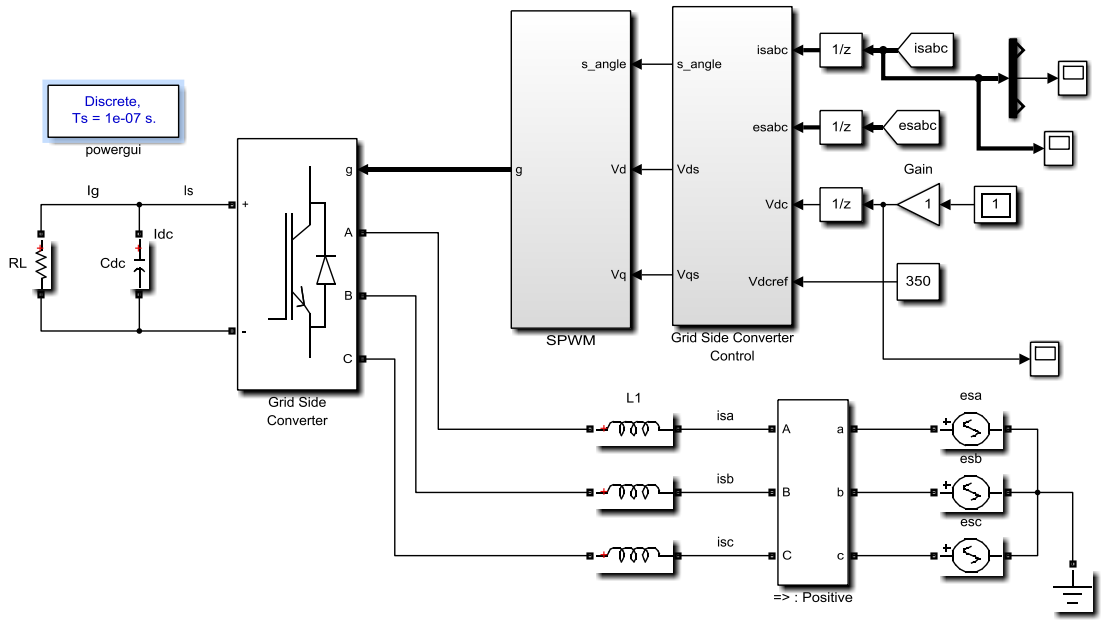
DC bara gerilim PI denetleyicisinin katsayılarının tasarımında simetrik optimum [23-24] yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre, DC bara geriliminin sabit bir referansa yerleştiğini kabul ederek, katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_{dc} = \frac{2 \cdot V_{dc} C_{dc}}{3 \cdot a_{dc} T_{in} V_{gd}} \quad T_{dc} = a_{dc}^2 T_{in} \quad a_{dc} = 3$$

d ve q eksenleri için akım denetleyicilerinin kazançları aynıdır. Bu kazançlar simetrik optimum [23-24] yaklaşımı ile;

$$k = L_T / (2T_{sw}) \quad T = a^2 T_{sw} \quad a = 3$$

olarak verilmektedir. L filtre durumunda, L_T yerine L değeri yazılmalıdır. LLCL filtre için ise katsayılar LCL ile aynıdır. LCL ve LLCL filtrelerde işletilen kondansatör geri besleme söndürme şemasında, K_d kazancının en düşük ve en yüksek değerleri ise aşağıdaki gibi verilmektedir [26].

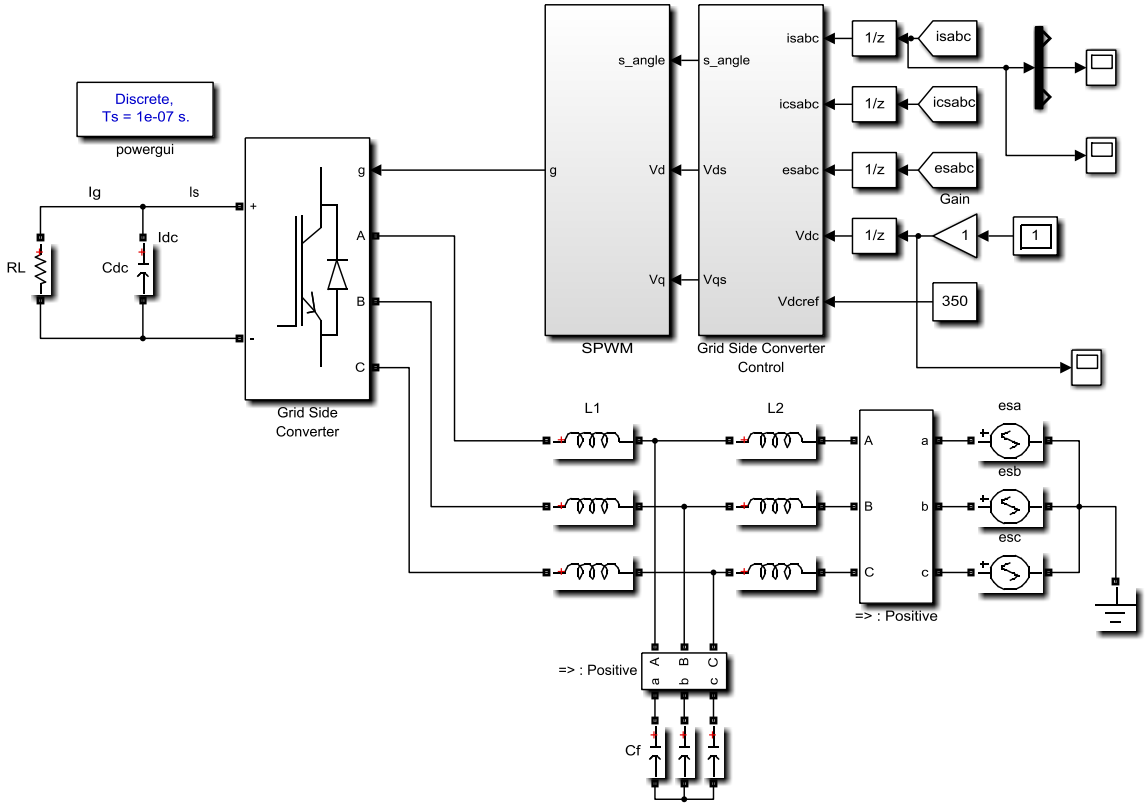


Şekil 5. L filtre simülasyon şeması (L filter simulation scheme)

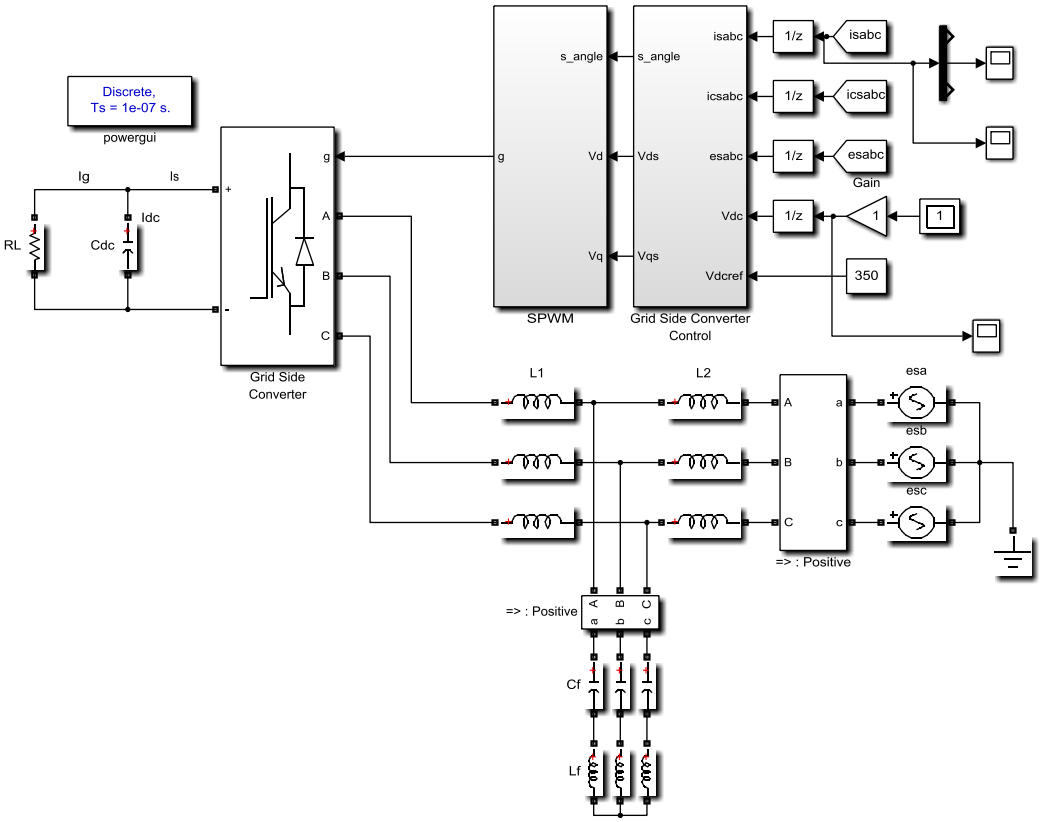
$$K_{d\min} = \frac{1}{3} L_1 f_{sw}$$
$$K_{d\max} = \frac{2}{3}\frac{\pi}{\sqrt{3}} L_2 f_{sw} \tag{12}$$

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS) (13)

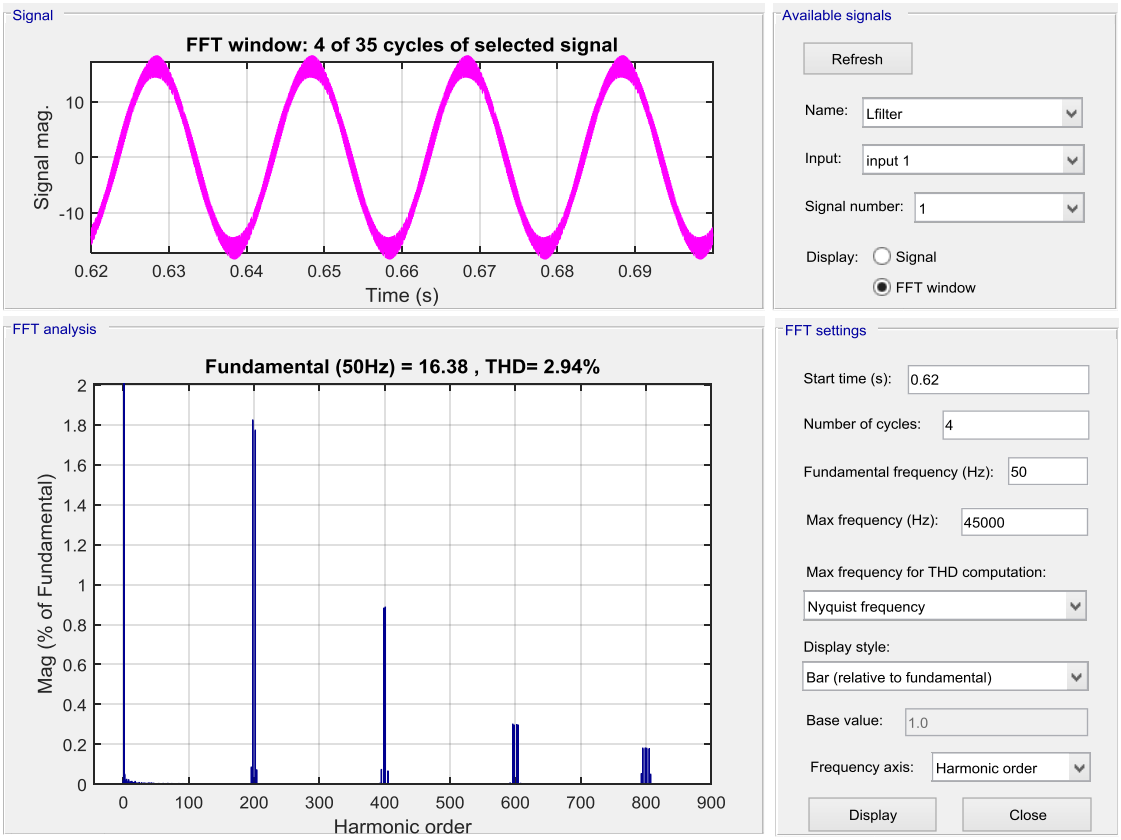
Verilen güç ile frekans değerleri ve her üç filtre tasarımı için simülasyon çalışmaları yapılmış ve faz akımlarının THD'leri ile harmonik dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5'de L filtre simülasyon şeması, Şekil 6'da LCL filtre şeması ve Şekil 7'de ise LLCL filtre şeması verilmiştir. Şekil 8'de L filtre, Şekil 9'da LCL filtre ve son olarak Şekil 10'dA LLCL filtre sonuçları verilmiştir.



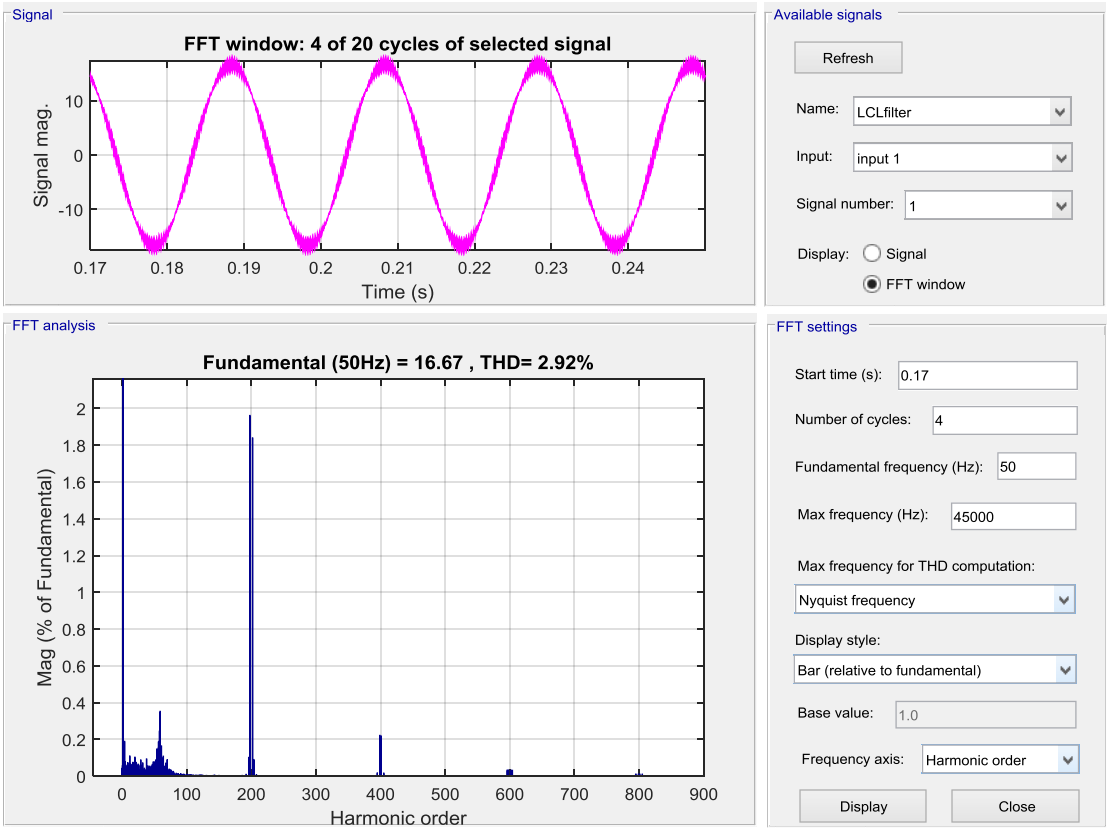
Şekil 6. LCL filtre simülasyon şeması (LCL filter simulation scheme)



Şekil 7. LLCL filtre simülasyon şeması (LLCL filter simulation scheme)

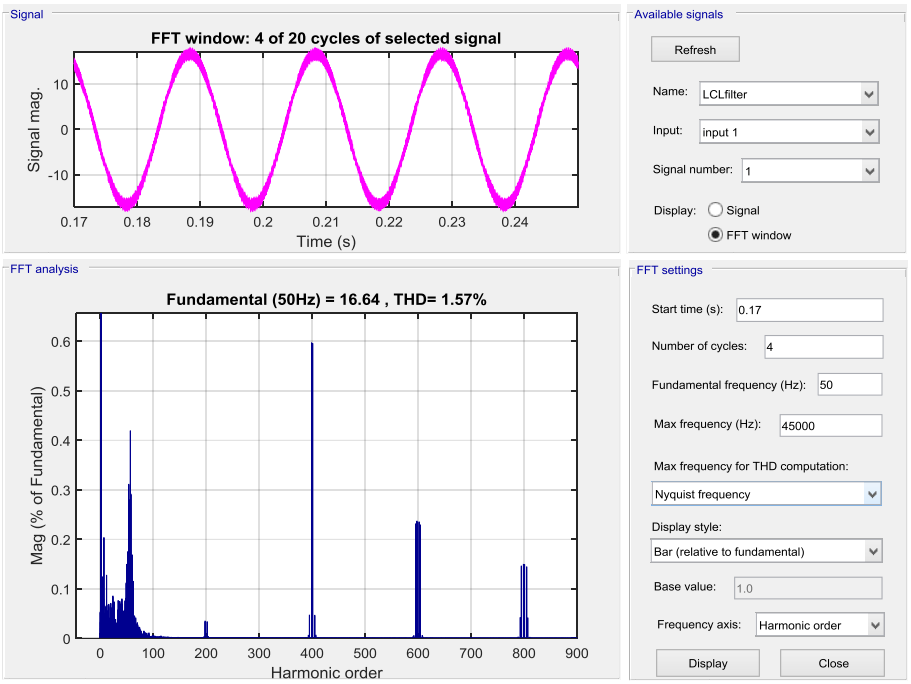


Şekil 8. L filtre için harmonik dağılımı ve THD (THD and harmonic distribution for L filter)



Şekil 9. LCL filtre için harmonik dağılımı ve THD(THD and harmonic distribution for LCL filter)

duymaktadır. L ve LCL filtre için tasarlanacak olan Bu



Şekil 10. LLCL filtre için harmonik dağılımı ve THD (THD and harmonic distribution for LLCL filter)

Simülasyon çalışmaları şebekeye güç aktararak değil şebekeden güç çekerek yapılmıştır. Bu durumun filtrelerin çalışması üzerinde bir etkisi yoktur, filtreler her iki durumda da aynı şekilde çalışmaktadır, sadece güç akışının yönü bu iki durum için farklıdır. L filtre ile %2.93 THD, LCL filtre ile %2.92 THD ve son olarak LLCL filtre ile %1.57 THD elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

L filtre için amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %2.93, LCL filtre için amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %2.92, LLCL filtre için ise amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %1.57 olmuştur. LCL filtrenin endüktans boyutu, L filtreden yaklaşık olarak 9.45 kat daha düşüktür. Buna rağmen LCL filtrenin harmonik performansı L filtre ile hemen hemen aynıdır. Bu durum LCL filtrenin L rakibine göre daha üstün olduğunu göstermektedir. LLCL filtre ile LCL filtre çok yaklaşık olarak aynı boyutlarda olmasına rağmen LLCL filtrenin THD'u LCL filtrenin neredeyse yarısına eşittir. Bu bakış açısı altından en yüksek performansın LLCL filtre ile elde edildiği rahatça ifade edilebilir.

Sonuçlarda dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da, giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, LLCL filtrenin m_f civarındaki harmonikleri LCL filtreye göre daha çok bastırması fakat m_f'nin katlarını civarındaki harmonikleri ise LCL filtreye göre daha az bastırmasıdır. Bu durumda L filtre, m_f = 200 ve m_f = 400 için, LCL filtre sadece m_f = 200 için, ve son olarak LLCL filtre $m_f \cong 65$ ve m_f = 400 için EMI (Elektromanyetik Karışım/Girişim) filtresine ihtiyaç açıdan ise LCL filtre en üstün filtre olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat, L_f endüktansında meydana gelebilecek %20 değişimin, harmonik bastırma oranını yaklaşık olarak %20 azaltacağı unutulmamalıdır. Bu durum ise LLCL filtrenin L_f ve C_f ikilisinin oluşturduğu resonans frekansına veya diğer bir deyişle L_f ve C_f parametrelerine çok duyarlı olduğunu göster-mektedir [13]. LCL filtre şebeke endüktansına bu kadar duyarlı değildir. İleri seviye bilgiler için ilgili kaynak incelenebilir [13].

Bu çalışmada LLCL filtre tasarımı yapılmış ve sonuçlar L ve LCL filtreler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak en yüksek performans THD ve boyut açısından LLCL filtre ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, yapılan filtre tasarımlarında performans hedeflerine bütün filtreler ile ulaşıldığını doğrulamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 114E159).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Liserre M., Blaabjerg F. and Hansen S.,"Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier", ***Industry Applications, IEEE Transactions on,*** 41(5):1281-1291, (2005).

[2] Reznik A., Simoes, M. G., Al-Durra, A. and Muyeen S. M., "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems",***IEEE Transaction on Industry Applications***, 50(2): 1225-1232, (2014).

[3] Wang T. C., Ye Z., Sinha G. and Yuan X., "Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter", ***In Proceeding of IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC 03),*** Acapulco, 779-784, (2003).

[4] Terzić B., Majić G.and Slutej A.,"Stability analysis of three-phase PWM converter with LCL filter by means of nonlinear model", ***Automatika,*** 51(3): 221-232, (2010).

[5] Renzhong X., Lie X., Junjun Z. and Jie D., "Design and research on the LCL filter in three-phase PV grid-connected inverters", ***International Journal of Computer and Electrical Engineering***, 5(3): 322-325, (2013).

[6] Muhlethaler J., Schweizer M., Blattmann R., Kolar J. W. and Ecklebe A., "Optimal design of LCL harmonic filters for three-phase PFC rectifiers", ***Power Electronics, IEEE Transactions on,*** 28(7): 3114-3125, (2013).

[7] Rockhill A. A., Liserre M., Teodorescu R. and Rodriguez, P., "Grid-filter design for a multimegawatt medium-voltage voltage-source inverter", ***IEEE Transactions on Industrial Electronics,*** 58(4): 1205-1217, (2011).

[8] Koutroulis E. and Blaabjerg F.,"Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters", ***IET Power Electronics,*** 5(8): 1491-1499, (2012).

[9] Araújo S. V., Engler A., Sahan B.and Antunes F. L. M.,"LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines", ***ICPE (ISPE),*** Daegu, 1133-1138, (2007).

[10] Wei L., Lukaszewski R. A.,"Optimization of the main inductor in a LCL filter for three phase active rectifier", **In** ***Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE***, New Orleans, 1816-1822, (2007).

[11] Pena-Alzola R., Liserre M., Blaabjerg F., Ordonez M. andYongheng Y.,"LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters", ***IEEE Transactions on Industrial Informatics***, 10(4): 2192-2203, (2014).

[12] Husev O., Chub A., Romero-Cadaval E., Roncero-Clemente C.and Vinnikov D.,"Voltage Distortion Approach for Output Filter Design for Off-Grid and Grid-Connected PWM Inverters", ***Journal of Power Electronics***,15(1): 278-287, (2015).

[13] Wu W., He Y.and Blaabjerg F., "An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter", ***IEEE Transactions on Power Electronics,*** 27(2): 782-789, (2012).

[14] Loh P. C., Lim S. W., Gao F. and Blaabjerg F., "Three-level Z-source inverters using a single LC impedance network", ***IEEE Transactions onPower Electronics,*** 22(2): 706-711, (2007).

[15] Habetler T. G., Naik R. and Nondahl T. A.,"Design and implementation of an inverter output LC filter used for dv/dt reduction", ***IEEE Transactions onPower Electronics***, 17(3): 327-331, (2002).

[16] Golubev V., "Calculation and optimization of the LC-filter of the pulse converter of an AC voltage", ***Tekhnichna Elektrodynamika***, 1:33-37, (2012).

[17] Gonzalez-Castrillo P., Romero-Cadaval E., Milanés-Montero M. I., Barrero-González F. and Guerrero-Martínez M. A.,"A new criterion for selecting the inductors of an Active Power Line Conditioner", ***2011 7th International Conference-Workshop, In Compatibility and Power Electronics (CPE),*** Tallinn, 167-172, (2011).

[18] Channegowda P. and John V.,"Filter optimization for grid interactive voltage source inverters", ***IEEE Transactions onIndustrial Electronics***, 57(12): 4106-4114, (2010).

[19] Cadaval E. R., Montero M. I. M. and González F. B.,"A modified switching signal generation technique to minimize the RMS tracking error in active filters", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 20(5): 1118-1124, (2005).

[20] Kim, H.and Sul S. K.,"A novel filter design for output LC filters of PWM inverters", ***Journal of Power Electronics***, 11(1), 74-81, (2011).

[21] Sozer Y., Torrey D. A. and Reva S.,"New inverter output filter topology for PWM motor drives", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 15(6): 1007-1017, (2000).

[22] Huang M., Blaabjerg F., Loh P. C. and Wu W.,"Stability analysis and active damping for LLCL-filter based grid-connected inverters", ***2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA),*** Hiroshima, 2610-2617, (2014, May).

[23] Dannehl J., Wessels C.and Fuchs F. W. "Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with filters", ***IEEE Transactions on, Industrial Electronics***, 56(2): 380-388, (2009).

[24] SchröderD.,"Elektrische Antriebe",2, ***Springer-Verlag in Regelung von Antriebssystemen***, Berlin, Germany, (2001).

[25] C. Zhang, T. Dragicevic, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, "Resonance damping techniques for grid-connected voltage source converters with LCL filters —Areview", **IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)**, Dubrovnik, 169 -176, (2014).

[26] Pena-Alzola R., Liserre M., Blaabjerg F. and Yang Y.,"Robust design of LCL-filters for active damping in grid converters", ***Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE***, Vienna, 1248-1253, (2013).

PILLER Power Systems

IME

MIRO®

AKTİF Group of Companies

T4E Technology for Efficiency

ABB

legrand®

socomec Innovative Power Solutions

uludağ klima®

inavitas

ELECTRONICON always in charge

YUASA

Microelettrica Scientifica

BLACK LIGHT

Endoks

KTG

enerji - elektrik - medikal

+90 533 965 4133
info@ktgenerji.com
www.ktgenerji.com
ktgenerji