

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde Bessel ve Butterworth filtrelerinin güç hesabı ve analizi üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Emrullah ASLANKAYA^{1,*}, Gökay BAYRAK²

¹MSÜ Kara Astsubay Meslek Yüksekokulu, Altıeylül / Balıkesir.

²Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü 16300/Bursa.

Geliş Tarihi (Received Date): 30.09.2022

Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.06.2023

Öz

Şebeke bağlantılı fotovoltaik (FV) sistemlerde doğru akım (DA) güç çıkışının şebekeye aktarılabilmesi için güç elektroniği dönüştürücülerine ihtiyaç duyulmakta ve DA-AA (alternatif akım) güç dönüşümü sırasında harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Toplam harmonik bozulmalar güç sistemlerine olumsuz yönde etkide bulunmakta ve güç kalitesinde istenmeyen sorunlara yol açmaktadır. Harmoniklerin etkilerini azaltmak için donanımsal ve yazılımsal çözümler bulunmaktadır. Şebeke bağlantılı FV sistemde güç kalitesinin iyileştirilmesi için dönüştürücü ve inverter devrelerinin kontrol yapıları olmak üzere, referans akım ve gerilim değerlerinin yüksek doğrulukta ölçülmesi gerekmektedir. Bu devrelerin kontrol yapılarının güç hesabının yüksek doğrulukta olması, FV sistemin aktif güç, reaktif güç ve faz açısı gibi elektriksel parametrelerinin hatasız olarak elde edilmesine neden olacaktır. Bu çalışmada, FV sistemlerde güç hesabının ve analizinin yüksek doğrulukta yapılabilmesi için literatürde kullanılan geleneksel güç analizi bloğu yerine, elektriksel sinyallerdeki bozulmaları en aza indirerek güç hesabına katkı sağlamak amacıyla Butterworth ve Bessel dijital filtreleri kullanılmıştır. LabVIEW ortamında yapılan simülasyon çalışmasında, gürültülü referans sinyali iki filtre türünde de güç hesabının yüksek doğrulukta yapılmasını sağlayarak gürültüyü başarılı bir şekilde azaltılmıştır. Bu sayede, Butterworth filtresinin toplam harmonik bozulma (THB) değerleri de iyileştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Butterworth filtresi, güç hesabı ve THB konusunda Bessel filtresine göre daha başarılı olmuştur.

Anahtar kelimeler: Şebeke bağlantılı FV sistem, Güç hesabı, Bessel dijital filtre, Butterworth dijital filtre, toplam harmonik bozulma.

*Emrullah ASLANKAYA, emrullah.aslankaya@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2836-1732>
Gökay BAYRAK, gokay.bayrak@btu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-5136-0829>

Investigation of the effects of Bessel and Butterworth filters on power calculation and analysis in grid connected photovoltaic system

Abstract

In grid-connected photovoltaic (PV) systems, power electronic converters are needed to transfer direct current (DC) power output to the grid and DC-AC (alternating current) causes harmonics to occur during power conversion. Total harmonic distortions have a negative effect on power systems and cause undesirable problems in power quality. There are hardware and software solutions to reduce the effects of harmonics. In order to improve the power quality in the grid connected PV system, the reference current and voltage values, including the control structures of the converter and inverter circuits, must be measured with high accuracy. The high accuracy of the power calculation of the control structures of these circuits will cause the electrical parameters of the PV system such as active power, reactive power and phase angle to be obtained without error. In this study, Butterworth and Bessel digital filters are used in order to contribute to the power calculation by minimizing the distortions in the electrical signals, instead of the traditional power analysis block used in the literature for high accuracy power calculation and analysis in PV systems. In the simulation study performed in LabVIEW environment, the noisy reference signal has been successfully reduced by providing high accuracy power calculation in both filter types. In this way, the total harmonic distortion (THD) values of the Butterworth filter are also improved. The Butterworth filter used in the study was more successful than the Bessel filter in power calculation and THD.

Keywords: Grid connect PV system, Power calculation, Bessel digital filter, Butterworth digital filter, total harmonic distortion.

1. Giriş

Yenilenebilir enerji sistemleri, geleneksel fosil yakıtlara göre temiz ve sürdürülebilir enerji sağlamada ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır. Fotovoltaik (FV) tabanlı güneş enerjisi sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklı dağıtım üretim sistemleri, çevre dostu olduğundan dolayı son yıllarda büyük talep görmüştür. FV güç üretim sistemi şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. FV sistemler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürürken, gerilimi DA'dan AA'ya dönüştürmek için güç elektroniği cihazlarından yararlanır [1-2]. FV sistemler dağıtım sistemlerinde güç elektroniği cihazları ile birlikte yaygın olarak kullanıldığından, akım ve gerilimde harmoniklere neden olmaktadır. İnverterler şebekeye bağlı FV sistemlerin ana elemanıdır. DA'dan AA'ya dönüşüm sırasında doğrusal olmayan yüklerin varlığında sisteme harmonik verir. Harmonikler de dağıtım şebekelerin verimliliğini ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmekte ve güç sistemleri cihazlarına zarar verebilmektedir. Bu nedenle dağıtım ağı açısından aşırı harmonik akımları güç kalitesi sorunlarına sebep olmaktadır [3 - 6].

FV sistemler çoğunlukla güneş ışınım miktarının yüksek olduğu yerlerde kullanılır. Fakat güneş ışınımındaki ani değişimler, kısmi gölgelenme vb. hava koşulları sebebiyle FV

sistemlerin çalışma noktası değişebilir. Güneş ışınımındaki değişikliklerden dolayı FV sistemlerin gücü kesintili özelliğe sahiptir. FV sistemler tarafından üretilen harmonikler güneş ışınımı durumundaki değişikliklerde de etkilenir [7].

Harmonikler ana frekansın tam sayı katı olan bir frekansa sahip bir dalga veya sinyal olarak ifade edilebilir. Çıkış sinyalinde ana frekans taşımasının yanı sıra, 2f, 3f, 4f gibi frekanslarda harmonikler içerebilir. Bu sebepten sinyal saf sinüsoidal dalga biçiminde olamaz ve sinyali bozuk olarak veya üçgen, testere dişi gibi çeşitli biçimlerde görünür [8]. Toplam harmonik bozulma (THB) gerilim sinyalinin bozulma miktarını gösterir ve harmoniklerin içerdiği gerilimin ana sinyal gerilimine oranıdır. FV sistemlerde THB'nin azaltılmasında aktif ve pasif filtrelerin kullanılması çok yaygın bir yoldur. Pasif filtreler güç sistemlerinde lineer olmayan yüklerin artmasından dolayı harmoniklerin azaltılması için yaygın olarak kullanılır. Kurulum kolaylığı ve düşük maliyetleri ile avantajlı olsalar da, farklı harmonik dereceleri için büyük ve farklı filtre dereceleri gerektiğinden maliyetli olabilir. Daha fazla bobin ve kondansatör kullanılması devreyi hacimli hale getirir. Bu durumda sistemi düzenlemek için esnek ve otomatik bir kontrol gerekir. Pasif olanlara kıyasla daha dinamik olan aktif güç filtreleri, ilişkili harmonikleri azaltmak için yaygın olarak kullanılır. Aktif güç filtresinin amacı doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik bileşenleri azaltarak THB'nin düşük kalmasını sağlamaktır [9].

Dijital filtreler ile farklı araştırmacılar çalışmış ve birçok yöntem önermişlerdir. Bu çalışmalardan birinde, cascade integrator comb ve dijital IIR (sonsuz dürtü yanıtı) filtresi aktif güç ölçüm hatalarının düşürülmesi için kullanılmış ve önerilen yöntemin simülasyon sonuçlarına göre ölçüm hatasını en aza düşürdüğünü göstermişlerdir [10]. Tek fazlı aktif güç filtre uygulaması için yapılan bir çalışmada [11] referans akımını çıkarmak için adaptif transversal filtre önerilmiştir. Matlab yazılımında genetik algoritma ile adaptif filtre tasarlanmış ve önerilen filtrenin çok küçük hata ile başarılı algılamayı sağladığını göstermişlerdir. Başka bir çalışmada [12], adaptif tahmin filtresi aktif güç filtrelerinde referans sinyali oluşturmak amacıyla önerilmiştir. Matlab ortamında yapılan simülasyon ve aktif güç filtresi prototipi ile deneysel sonuçlarına göre aktif güç filtreleri için önerilen referans sinyal üreticinin başarılı şekilde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Bir başka çalışmada [13], FV sistem ile şebeke-yük arasında aktif güç aktarımı için kontrol uygulamasını güç kalitesini iyileştirmek için önermiştir. Gerilim tarafı dönüştürücünün (VSC) daha verimli anahtarlama yapması için referans şebeke akımı üretimini sağlamış ve deneysel sonuçlara göre şebeke akımını IEEE-519 standardına göre THB değerini %5'in altında tutulduğunu ifade etmiştir. Diğer bir çalışmada [14], analog ölçüm aletlerinde güç hattından çekilen akım seviyesinin ölçümünde harmonik, girişim gibi istenmeyen bileşenler sebebiyle oluşan ölçüm hatalarının engellenmesi için dijital filtreler önermişlerdir. Dijital filtrelerin farklı parametrelerine göre Matlab ortamında yaptıkları simülasyon sonuçlarına göre uygun parametreler sonucunda dijital filtrenin başarılı performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Kademeli entegre özyinelemeli filtrenin önerildiği bir çalışmada [15] ise VSC yapısı anahtar sinyallerini kontrol etmek için önerilmiştir. Önerilen kontrol yaklaşımı deneysel sonuçlar ile test edilmiş ve şebeke güç kalitesinin IEEE-519 standartlarına uygun olduğu ifade edilmiştir.

Bu çalışmada, literatürdeki geleneksel güç hesaplama tekniklerinden farklı olarak, yazılımsal olarak geliştirilen Bessel ve Butterworth dijital filtreleri kullanılarak şebeke bağlantılı FV sistemde güç hesabının yüksek doğrulukta yapılması hedeflenmiştir. Güç hesabı yöntemlerinde kullanılan referans gerilim ve akım değerlerinin yanı sıra reaktif ve aktif gücün doğru bir şekilde ölçülmesi ve dolayısıyla güç kalitesinin iyileştirilmesine

çalışılmıştır. İnverter anahtarlama kontrolünde önem arz etmesi sebebiyle, ilgili dijital filtreler LabVIEW ortamında tasarlanıp, geliştirilerek, FV sistemde referans akım ve gerilim üzerindeki güç hesabının yüksek doğrulukla yapılması ve bunun sayesinde de harmonik bozulmaların azaltılmasına yardımcı olunması amaçlanmıştır. Geliştirilen filtrelerin güç hesabı üzerindeki etkileri ve ilgili dijital filtrelerin güç kalitesini iyileştirmedeki performansları çalışma kapsamında incelenmiştir.

2. Dijital filtreler

Filtreler, gürültüyü ve istenmeyen sinyalleri ortadan kaldırmak için kullanılır. Bir elektrik filtresinin tasarımı, bir elektrik sinyalinin tüm istenmeyen sinyallerini veya frekanslarını yeniden değiştirmenin, şekillendirmenin veya ortadan kaldırmanın ve sadece istenen sinyalleri geçirmenin bir yoludur. Kısaca şu şekilde de tanımlanabilir: Filtre belirlenen frekans bandı içerisinde bulunan sinyalleri geçiren, belirlenen frekans bandının dışında kalan sinyalleri ise ortadan kaldıran bir frekans seçici ağıdır [16].

Dijital filtre, yazılımda ve/veya donanımda uygulanan, dijital giriş sinyali üzerinde filtreleme işlemi yapıp dijital bir çıkış sinyali üretmek için çalışan matematiksel bir algoritmadır. Bu sebeple dijital filtre terimi, filtreleme algoritmasını gerçekleştiren belirli program veya donanım kaynakları ile ilgilidir [17].

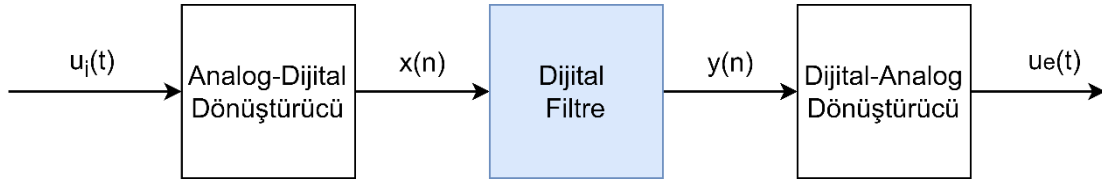
Dijital filtre, klasik analog filtrelerde olan bir takım problemleri ortadan kaldırır ve bu sebeple analog filtrelerin yerine tercih edilir [17].

Dijital filtrelerin önemini artıran, dijital filtrelerin analog filtrelere göre bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir [18];

- Dijital filtrenin çalışması işlemcinin belleğinde bulunan bir program tarafından yapılır. Bu sebeple dijital filtrenin değiştirilmesi için filtrenin donanımı değiştirilmeden kolayca değiştirilmesi sağlanır.
- Dijital filtreler iş istasyonunda veya bir bilgisayar ile kolayca tasarlanır, test edilir ve uygulanır.
- Dijital filtreler analog muadillerinden farklı olarak düşük frekanslı sinyalleri doğru bir şekilde işleyebilir. Digital Signal Processing (DSP) teknolojisinin hızı zamanla artmaya devam ederken, geçmişte analog filtre teknolojisine özel olan radyo frekansı (RF) alanındaki yüksek frekanstaki sinyallere dijital filtreler uygulanmaktadır.

Dijital filtreler IIR ve FIR (sonlu dürtü yanıtı) olarak sınıflandırılabilir. FIR filtresi yinelenmeli olmayan filtre olarak bilinir ve bu filtrede akım çıkışı sadece bir önceki giriş değerlerinden hesaplanır. IIR filtresi ise giriş değerlerine ek olarak çıkış değerlerini de kullanan filtredir. IIR filtreleri belirli bir filtre derecesinde daha yüksek seçicilik sağlama avantajına sahiptir. IIR filtreleri daha az katsayı ile FIR filtreleri ile aynı düzeyde zayıflama sağlayabilir. Bu sebeple IIR filtresi FIR filtresine göre daha hızlı ve verimli şekilde filtreleme işlemi yapılabilir [19].

Dijital filtrenin genel prensip şeması Şekil 1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Dijital filtrenin genel prensip şeması

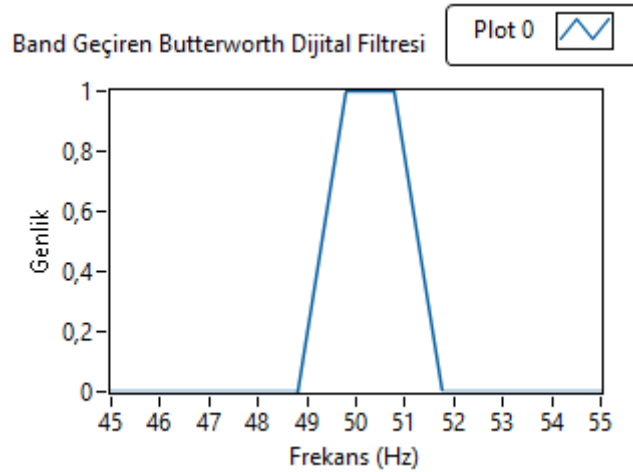
Dijital filtrenin çalışmasının altında yatan ilke, analogtan dijitale dönüştürücü işlemi ile giriş sinyalini örnekleme, giriş sinyalini istenilen algoritmaya göre işlemek ve çıkış sinyalini dijitalden analoğa dönüştürücü ile üretmekten oluşur [17].

2.1. Butterworth dijital filtresi

Butterworth filtresinin tasarımı, geçiş bandında maksimum düz frekans cevaplarına sahip olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Butterworth filtresi hem durdurma hem de geçiş bandında monoton bir tepkiye sahiptir [16]. Bu filtre türü n derecesine ve ω_c kesme frekansına göre tanımlanır. Böyle bir filtrenin frekans yanıtı Denklem 1’de görüldüğü gibidir [17].

$$[H(j\omega)]^2 = \frac{1}{1 + \left[\frac{\omega}{\omega_c}\right]^{2N}} \quad (1)$$

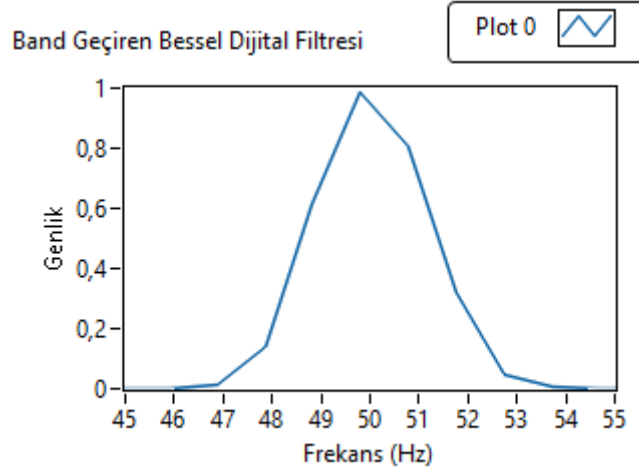
Butterworth filtresinin genlik-frekans grafiği Şekil 2’de gösterilmiştir. Grafik 49 Hz ile 51 Hz arasındaki frekans değerlerinin geçişine izin veren bir band geçiren filtredir. Belirtilen kesme frekanslarında monoton şekilde düşüş, tüm frekanslarda sorunsuz yanıt, durdurma bandında maksimum düzlük ve geçiş bandında ideal birim basamak cevabı Butterworth filtresinin özelliklerindedir [18].



Şekil 2. Butterworth band geçiren filtresi genlik-frekans grafiği

2.2. Bessel dijital filtresi

Bessel filtresi hem durdurma hem de geçirme bandında dalgalanmaya sahip değildir [20]. Şekil 3’te Bessel filtresinin genlik-frekans grafiği gösterilmiştir. Grafik 49 Hz ile 51 Hz arasındaki frekans değerlerinin geçişine izin veren bir band geçiren filtredir.



Şekil 3. Bessel band geçiren filtresi genlik-frekans grafiği

IIR filtreleri doğrusal olmayan faz bozulmasına sahiptir. Bessel filtreleri tüm IIR filtrelerinde mevcut olan doğrusal olmayan faz bozulmalarını azaltmak için kullanılır [21].

2.3. Toplam harmonik bozulma

Toplam harmonik bozulma (THB) gerilim sinyalinin bozulma miktarını gösterir ve harmoniklerin içerdiği gerilimin ana sinyal gerilimine oranıdır. Denklem 2’de görüldüğü gibi hesaplanır [9].

$$THB (\%) = 100 * \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} \quad (2)$$

Burada n harmonik sayısını temsil eder.

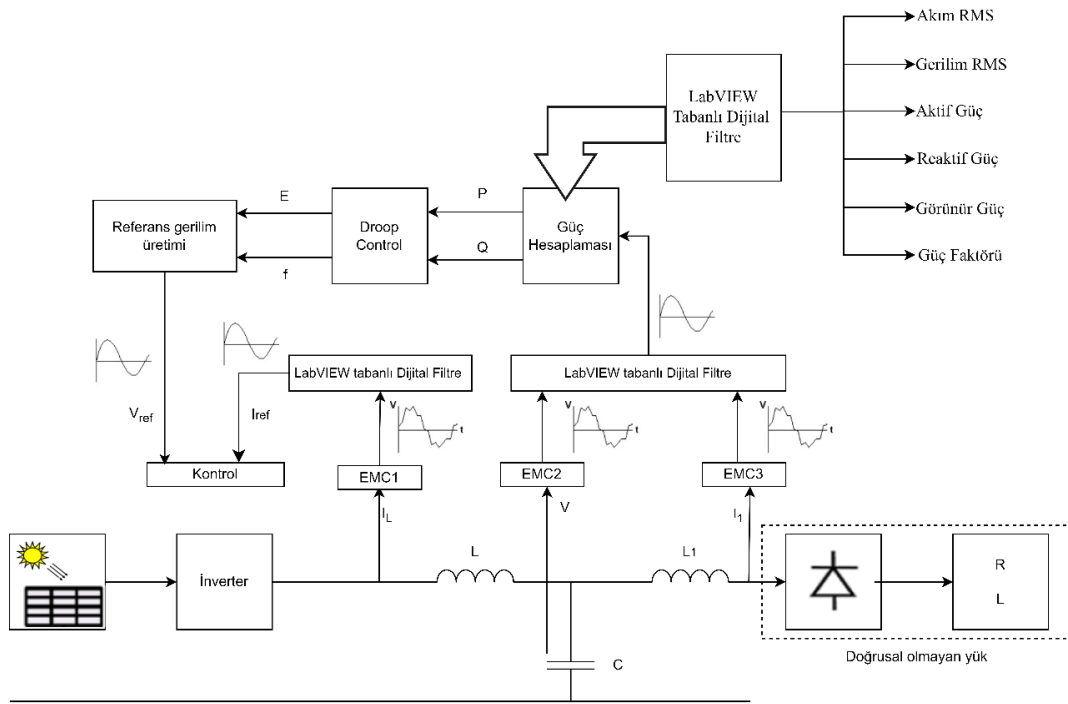
Toplam harmonik bozulma değerleri uluslararası IEC 519-1992 standardına göre gerilim için $U_{THB} < \%3$ ve akım için $I_{THB} < \%5$ olarak belirlenmiştir. Şebekede ise gerilim toplam harmonik bozulması $U_{THB} < \%3-5$ ve akım toplam harmonik bozulması $I_{THB} < \%15-20$ olmalıdır. Harmonik oranları belirlenen limit değerlerinin üzerinde olması durumunda elektrik sistemleri veya devreleri için tehlike oluşturabilir ve büyük zararlar verebilir [22]. Tablo 1’de THB limitlerinin akım ve gerilim için limitleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Toplam harmonik bozulma (THB) limitleri

Standart	Akım THB	Gerilim THB
Uluslararası IEC 519-1992	$I_{THB} < \%5$	$U_{THB} < \%3$
Şebeke	$I_{THB} < \%15-20$	$U_{THB} < \%3-5$

3. Butterworth ve Bessel filtrelerin LabVIEW ile gerçekleştirilmesi

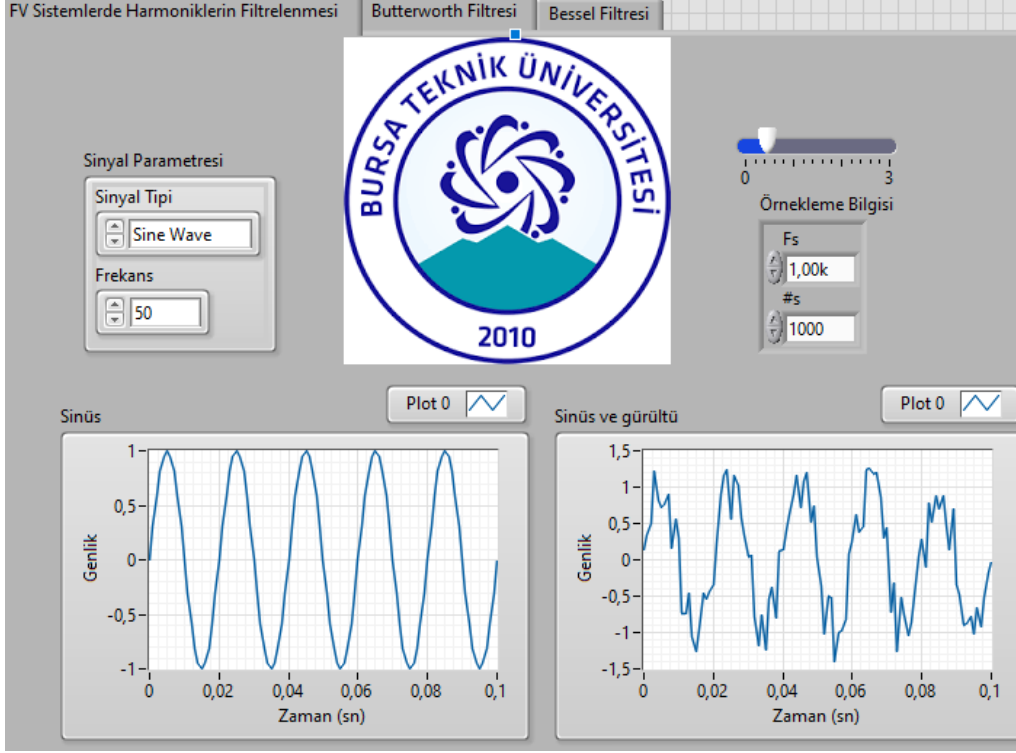
Bu bölümde, şebeke bağlantılı FV sistemde güç kalitesini iyileştirmek için referans gerilim ve akım değerlerinin ve güç hesaplama yöntemlerinde kullanılan reaktif ve aktif gücün doğru ölçülebilmesi için dijital filtrelerin kullanımı önerilmiştir. FV sistemlerde darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyalleri inverter kontrolünde kullanılır. İnverter kontrol yapısı ile anahtarlama durumunu, inverter çıkış akımı ve referans akım farkı ile kontrol edilir [23]. Referans akımının daha az harmoniğe sahip olması için inverter anahtarlama dijital filtrelerin kullanımı önemlidir. Kontrol uygulamalarının yanı sıra dağıtık üretim sistemlerinde beklenmeyen talep artışlarının frekans ve gerilim değerlerinin düşmesine neden olması da önemli bir sorundur. Bu sorunun çözümü genellikle aktif ve reaktif güç kontrolü ile sağlanır [24-26]. Aktif veya reaktif güç kontrolünün yapılmasında bu değerlerin yüksek doğrulukta ölçülmesi gerekmektedir. Bu sinyallerin gürültülü olması ölçümlerde hatalara sebep olmaktadır. Bu durumlar inverter anahtarlama hatalı olmasına ve THB değerinin standartlarının dışında kalmasına sebep olmaktadır. Şekil 4'te şebeke bağlantılı bir FV sistem için önerilen LabVIEW tabanlı dijital filtre geliştirme sistemi gösterilmiştir. Filtreleme işlemi tek fazlı inverterin çıkış gerilimine uygulanmaktadır.



Şekil 4. Şebeke bağlantılı bir FV sistemde güç hesabı ve analizinin iyileştirilmesi için önerilen LabVIEW tabanlı dijital filtre geliştirilmesi yöntemi

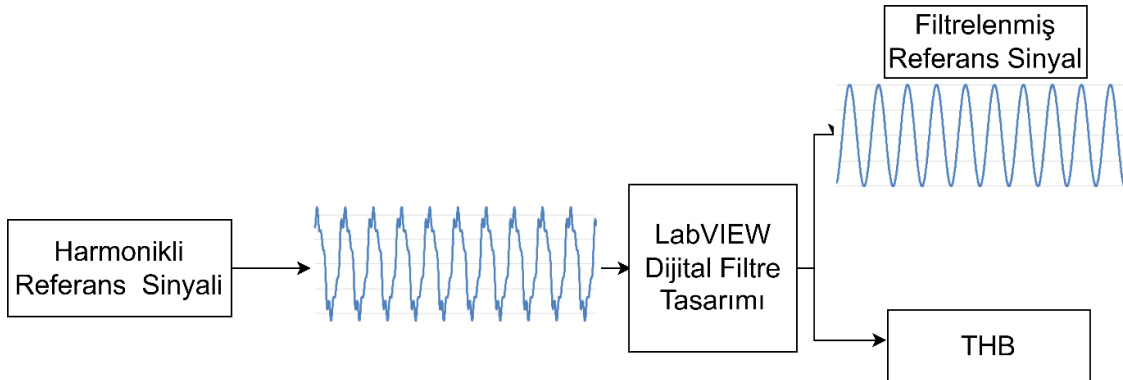
Önerilen yöntemde, güneş panelinde oluşan gerilim ve akım şarj regülatörü tarafından düzenlenerek gerilimi sabit tutulur. DA gerilimin şebekeye entegre edilmesi için inverterde DA'dan AA'ya dönüşüm yapılır ve dönüşüm aşamasında harmonikli bir sinyal meydana gelir. İnverter referans gerilim ve akım değerlerinin yanlış ölçümünün önüne geçmek ve harmonikli sinyalleri düzeltmek, sistemin güç ölçümünü ve analizini daha kararlı hale getirmek güç kalitesini iyileştirecektir. Bu amaçla inverter çıkışındaki

referans akım ve gerilim sinyallerine LabVIEW ile geliştirilen dijital filtre uygulanır ve referans sinyalinin harmoniklerin giderilmesi ile THB değerinin azaltılması sağlanır. Şekil 5'te sinyal parametrelerinin ve gürültü seviyesinin ayarlandığı, 50 Hz saf sinüs ve harmonikli sinyalin görüntülerinin olduğu, LabVIEW simülasyonu ara yüzü sunulmuştur.



Şekil 5. Dijital filtrelerin LabVIEW ile geliştirildiği ara yüz

Bu çalışma LabVIEW ortamında gerçekleştirilmiş ve arzu edilen referans akım ve gerilim sinyali, saf sinüs sinyaline beyaz gürültü eklenerek gürültülü referans akım-gerilim sinyali oluşturulmuş ve bu sinyaller Butterworth ve Bessel dijital IIR filtreleri yardımı ile güç hesabının yüksek doğrulukta yapılarak harmoniklerin azaltılması hedeflenmiştir. Şekil 6'da harmonikli referans akım-gerilim sinüs sinyalinin dijital filtre ile harmoniklerin azaltılması işleminin modeli verilmiştir.

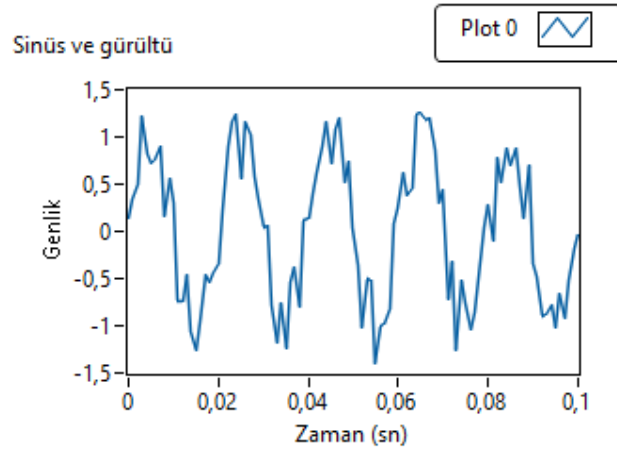


Şekil 6. Harmonikli referans akım-gerilim sinüs sinyalini temizleyen önerilen dijital filtre modeli

4. Sonuçlar

LabVIEW, yüksek verimliliğe sahip yüksek frekanslı filtrelerin uygulanması ve yüksek seviyeli sinyal işleme konularında önemli araçlara sahiptir. Ayrıca kontrol teknolojisi açısından da veri toplama kartları ile uygun çözümler sunmaktadır. Güç sisteminde sinyal işlemenin yanı sıra, farklı gürültülü sinyaller için de LabVIEW dijital filtrelerin geliştirilmesinde iyi bir çözüm sağlamaktadır. Bu sebeple yüksek verimlilik ve sağlamlığı ile çeşitli sinyal işleme uygulamalarına sahiptir [27].

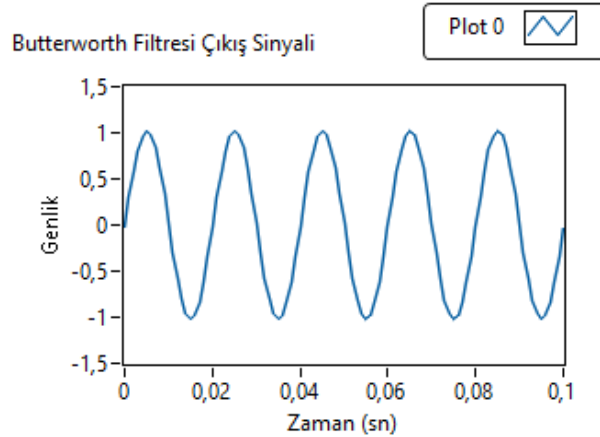
Şekil 7’de 50 Hz saf sinüs sinyaline beyaz gürültü eklenmiş harmonikli sinyal görünmektedir.



Şekil 7. Sinüs sinyaline beyaz gürültü eklenmiş harmonikli sinyal

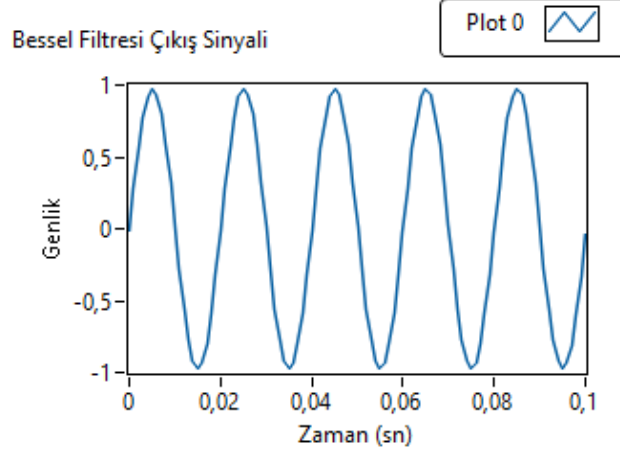
Gürültülü referans akım-gerilim sinyali saf sinüs sinyal haline getirmek için LabVIEW programının “digital filter design toolkit” aracı kullanılmıştır. Bu çalışmada 8. dereceden band geçiren Butterworth ve Bessel filtrelerinin filtrelenmiş çıkış sinyallerinin grafikleri ve filtrelenen çıkış referans sinyallerinin THB değerleri sunulmuştur.

Şekil 8’de Butterworth filtresi ile filtrelenen sinyalin çıkış referans sinyali verilmiştir. Sinyalin saf sinüs sinyaline yakın olduğu grafikten görülmektedir. Ayrıca referans sinyali, THB değeri harmonikli sinyalde %6,39 iken filtreleme işlemi yapıldıktan sonra %1,31’e düşürülmüştür.



Şekil 8. Butterworth filtresi ile filtrelenmiş sinyal çıkışı

Şekil 9’da Bessel filtresi ile filtrelenen referans sinyalinin çıkış sinyali verilmiştir. Sinyalin saf sinüs sinyaline yakın olduğu grafikten görülmektedir. Ayrıca THB değeri harmonikli sinyalde %6,39 iken filtreleme işlemi yapıldıktan sonra %1,48’e düşürülmüştür.



Şekil 9. Bessel filtresi ile filtrelenmiş sinyal çıkışı

Tablo 2’de harmonikli referans sinyal ve bu sinyalin Butterworth ve Bessel filtreleri ile filtreledikten sonra THB değerleri verilmiştir. Harmonikli referans sinyalin THB değeri %6,39 iken Butterworth filtresi ile filtreledikten sonra %1,31’e; Bessel filtresi ile filtreledikten sonra ise %1,48’e düşmüştür. Butterworth, Bessel filtresine göre daha fazla harmonik temizleyerek daha düşük THB değeri vermiştir.

Tablo 2. Referans sinyalinin filtrelenmiş ve filtresiz THB değeri

Filtre Tipi	THB-Filtresiz	THB-Filtreli
Butterworth	%6,39	%1,31
Bessel	%6,39	%1,48

5. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada şebeke bağlantılı FV sistemlerde inverter gerilim ve akım sinyallerinin yüksek doğrulukla ölçülmesi için Butterworth ve Bessel dijital filtreleri kullanılmıştır. Çalışmada; anahtarlama elemanlarındaki kayıplar, doğrusal olmayan yükler gibi çeşitli sebeplerden dolayı inverter çıkışındaki gerilim ve akım sinyallerindeki bozulmalar sebebiyle oluşan ölçüm hatalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Özellikle büyük güçlü sistemler için ölçülen değerlerin çok büyük hatalara sebep olması nedeniyle, ölçülen referans değerlerinin doğru bir şekilde ölçülerek, inverter çıkış akım ve gerilim değerlerinin şebeke standartları ile belirlenen değerlere göre daha düşük bir THB değeri elde edilmesine çalışılmıştır. İki farklı dijital IIR filtresinin LabVIEW ortamında gerçekleştirilen uygulamasında, harmonikli referans sinyalin %6,39 olan THB değeri Bessel filtresi ile %1,48’e, Butterworth filtresi ise de %1,31’e düşürülmüştür. İki filtre türü de referans sinyalinin harmoniklerin azaltılmasında başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bessel ve Butterworth filtresinin karşılaştırmalı analizinden 8. Derece Butterworth filtresi harmonik azaltılmasında daha başarılı olmuştur.

İlgili filtrelerin tasarımı yazılımsal olduğu için filtre parametreleri yazılımsal değişiklikler yapılarak kolayca geliştirilebilmektedir. Şebeke bağlantılı FV sistemlerde referans akım-gerilim sinyalinde oluşan harmoniğin filtrelenmesi, referans değerlerinin doğru ölçülmesi ile inverter ve dönüştürücü devrelerinin kontrol yapılarının daha kararlı olabilmesi için dijital IIR filtreleri alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

Kaynaklar

- [1] Baharudin, N.H., Mansur, T.M.N.T., Hamid, F.A., Ali, R. ve Misrun, M.I., Topologies of DC-DC converter in solar PV application, **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, 8, 368-374, (2017).
- [2] Ghaderi, D., Bayrak, G., Guerrero, J.M., Grid code compatibility and real-time performance analysis of an efficient inverter topology for PV-based microgrid applications, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 128, (2021).
- [3] Barutcu, I.C., Karatepe, E., Boztepe, M., Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty, **International Journal of Electrical Power & Energy System**, 118, (2020).
- [4] Bayrak, G., Yılmaz, A., Çakmak, R., A new Fuzzy & Wavelet –based adaptive thresholding method for detecting PQDs in a hydrogen and solar-energy powered EV charging station, **International Journal of Hydrogen Energy**, 48, 18, (2023).
- [5] Sreedevi, J., Ashwin, N. and Raju, M.N., A study on grid connected PV system, **2016 National Power Systems Conference /NPSC**, 1-6, (2016).
- [6] Ertekin, D., Bayrak, G., Subramaniam, U., A Demand Side Management Controller Configuration for Interleaved DC-DC Converters Applicable for Renewable Energy Sources, **Electrical and Electronic Devices, Circuit and Materials**, pp. 493-516, (2021).
- [7] Chidurala, A., Saha, T.K., Mithulananthan, N., Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks – learning from an urban photovoltaic network, **IET Renewable Power Generation**, 10,4, 485-494, (2016).
- [8] Alhafadli, L., Total harmonic distortion reduction using adaptive, weiner and kalman filters, Msc thesis, Western Michigan University, Electrical and Computer Engineering, Michigan, (2016).
- [9] Alhafadli, L. and The, J., Advanced in reduction of total harmonic distortion in solar photovoltaic system: A literature review, **Internation Journal of Energy Research**, (2019).
- [10] A. N. Serov, N. A. Serov and A. A. Lupachev, "The Application of Digital Filtration for the Active Power Measurement," **2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)**, St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 88-92
- [11] A. A. S. Mohamed, A. Berzoy and O. A. Mohammed, "Adaptive Transversal digital Filter for reference current detection in shunt active power filter," **2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5.
- [12] Byung-Moon Han, Byong-Yeul Bae and S. J. Ovaska, "Reference signal generator for active power filters using improved adaptive predictive filter," in

- IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 52, no. 2, pp. 576-584, April 2005.
- [13] P. Shukl and B. Singh, "Recursive Digital Filter Based Control for Power Quality Improvement of Grid Tied Solar PV System," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 56, no. 4, pp. 3412-3421, July-Aug. 2020.
- [14] Yıldırım, F., Kaya, İ., Yüngül, E.O., Kahveci, S., "Reaktif güç ölçümü için bir sayısal filtre tasarımı," **2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO)**, Bursa, Türkiye, 2022.
- [15] G. Chaithanya, L. S. Rao, K. P. Priya, C. S. N. Polepalli and A. Vikash, "Power Quality Enhancement Based on a Recursive Digital Filter by Using Cascaded Distributed Grid-Solar PV System," **2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSPP)**, Hyderabad, India, 2022, pp. 1-6
- [16] Thakur, R., Pandey, M.K. and Gupta, N., Filtering of noise in audio/voice signal, **2018 3rd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)**, 119-123, (2018).
- [17] Bogdan, M. and Panu, M., LabVIEW modelling and simulation, of the digital filters, **2015 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)**, 1-4, (2015).
- [18] Singh, Y., Tripathi, S., Pandey, M., Analysis of digital IIR filter with LabVIEW, **International Journal of Computer Applications**, 10, 6, (2010).
- [19] Jiang, A. and Kwan, H.K., IIR digital filter design with novel stability criterion based on argument principle, **2007 IEEE International Symposium on Circuit and Systems**, 2339-2342, (2007).
- [20] Hamamcı, S.E., Elektrik filtreleri tasarım programı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (1997).
- [21] Tanyıldız, T., Akıllı yöntemlerle sayısal filtre tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2012).
- [22] Kürker, F., Taşaltın, R., Elektrik tesislerinde harmoniklerin meydana getirdiği kayıpların analizi, **ADYU Mühendislik Dergisi**, 5, 21-38, (2016).
- [23] A. Ullah, I. U. H. Sheikh, S. Arshad, and F. Saleem, "Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System," **2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)**, Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 384-388.
- [24] M. R. Miveh, M. F. Rahmat, A. A. Ghadimi, and M. W. Mustafa, "Power Quality Improvement in Autonomous Microgrids Using Multi-functional Voltage Source Inverters: A Comprehensive Review," **Journal of Power Electronics**, vol. 15, no. 4, pp. 1054–1065, Jul. 2015.
- [25] Bayrak G. Ertekin D, Haes Alhelou H, Siano P. "A Real-Time Energy Management System Design for a Developed PV-Based Distributed Generator Considering the Grid Code Requirements in Turkey." **Energies**, 2021; 14(20):6684.
- [26] Yılmaz A., Bayrak G. "A new signal processing-based islanding detection method using pyramidal algorithm with undecimated wavelet transform for distributed generators of hydrogen energy." **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 47, iss 45, 2022.
- [27] Ali B., Alam, M.U., Khan, Z.H., Wagar, A. and Ahmad, J., Comparison of high frequency filters for power system regulation, **2018 International Conference on Computing Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)**, 1-7, (2018).