

Kesir Dereceli PID Kontrolör İle Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Harmonik Analizi

Alparslan TÜFEKÇİ^{1*}, Onur Özdal MENGİ²

¹Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü

²Giresun Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

08.05.2018 Geliş/Received, 05.11.2018 Kabul/Accepted

Özet

Harmoniğin ortaya çıkmasının başlıca sebebi elektrik ve manyetik devrelerdeki lineersizliktir. Elektrik enerjisi üretimini ve dağıtımında enerji kalitesi tüketiciler açısından son derece önemli bir unsurdur. Bu sebeple harmoniksiz enerji üretimi yapmak veya tasarlamak yeni ve gelişen teknoloji ile mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynakları ile yapılan enerji üretiminde bazı sıkıntılar yaşanabilmektedir (Güneş enerji sistemlerinde güneş ışınlarının sürekli olmayışı ve ortam sıcaklığı vs.). Yenilenebilir enerji sistemlerinde denetim sisteminin cevabının gecikmesi, bozuk ve harmonikli enerji üretimi gibi sorunlar bu çalışmada giderilmeye çalışılmıştır. Öncelikle güneş enerji sisteminden elektrik enerjisi üretilmiş ve bu enerjinin şebeke gerilimine cevap süresi minimize edilmiştir. Üretilen bu enerji filtreler yardımıyla harmonik seviyeleri düşürülmüş kabul edilebilir seviyelerde (<%3) tutulmuştur. Ayrıca sistemin çıkışından yaklaşık 50kW seviyesinde enerji çekilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: harmonik, güç kalitesi, kesirli PID ve filtre

Harmonic Analysis In Renewable Energy Systems With Fractional PID Controllers

Abstract

The main reason for the appearance of harmonics is the lack of linearity in electric and magnetic circuits. The quality of energy in the production and distribution of electricity is a crucial factor regarding consumers. For this reason, it is possible to do energy production without harmonics or to design with new and developing technology. Some problems can be experienced in energy production made with renewable energy sources (The lack of continuous solar radiation in solar energy systems and ambient temperature, etc.). Problems such as delayed response of the control system in the renewable energy systems, distorted and harmonic energy production have been tried to be solved in this work. First, electricity from the solar energy system is generated and the response time of this energy to the grid voltage is minimized. With the help of these filters produced, the harmonic levels of the energy

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Alparslan Tüfekçi

(e-posta: alparslan.tufekci@giresun.edu.tr

Bu çalışma Giresun Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. Proje numarası: FEN-BAP-C-200515-16

produced, are reduced to acceptable levels ($<3\%$). Also, about 50kW of energy can be drawn from the output of the system.

Keywords: harmonic , power quality, fractional PID and filter

1. Giriş

Elektrik şebeke sistemlerinde kaliteli enerjinin tanımı, şebekeden çekilen akımdaki dalga şeklindeki bozulmalar ile şebekenin gerilim ve frekansındaki değişimler olarak verilebilir. Son zamanlarda yaygınlaşan doğrusal olmayan (non-linear) yükler yüzünden güç kalitesi problemleri de artmıştır. Bu doğrusal olmayan yükler, şebekede nominal frekansın (örneğin 50 Hz) dışında frekanslarda akım veya gerilim bileşenlerinde harmoniklerin oluşmasına yol açmaktadır. Harmonikler, standartların belirlediği değerlerin üstüne çıkması durumunda nominal frekansa göre tasarlanmış devre elemanlarına ve elektriksel ekipmanlara zarar vermekte, verimi düşürmekte ayrıca ek kayıplara yol açmaktadır. Besleme gerilimindeki kesinti ya da değişimler kısa veya uzun süreli olması durumunda tüketici açısından sıkıntı oluşturacağından enerji üreten firma ya da kişilerin sürekli ve kesintisiz enerji üretimine, üretilen enerjinin de harmoniksiz bir enerji olmasına dikkat etmeleri gerekmektedir.

Bu konuda yapılan araştırmalardan bazıları şunlardır: Wen ve arkadaşları (1994), yeni bir güç harmoniği ölçümü önermiştir. 4-aşamalı Blackman Harris penceresi, örnek verilerinin pencerelenmesi için kullanılır. Böylece spektral sızıntı hataları büyük ölçüde azalır ve daha sonra, harmonik parametreleri elde etmek için ikili enterpolasyonlar kullanılır.

Lin ve Lee (2001), çevrimiçi harmonik analiz için uygun ve kısa verilerle iyi performans gösteren geliştirilmiş bir parametrik algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma, diğer Hızlı Fourier dönüşümü ve Kalman filtre tabanlı algoritmalarından farklıdır, tam sayı ve tamsayı olmayan (alt) harmonikler arasındaki eş varyasyonların az sayıda yineleme adımında eşzamanlı olarak izlenmesini sağlamaktadır.

Huang ve arkadaşları (2005), Dikdörtgen Kendiliğinden Evrimleşme Penceresi (RSCW) olarak adlandırılan yeni bir pencere kullanmışlardır. M-sıralı RSCW, m dikdörtgen sekansları ve genlik-frekans karakteristiğinin sıfır noktasında yer değiştirerek geliştirilmiştir, m-1 mertebeden türevlerin değeri sıfırdır. Bu karakterin bir sonucu olarak, spektrum kaçağı nedeniyle harmonikler arasındaki etkileşimler, RSCW uygulanarak en az seviyeye indirilebilir, dolayısıyla harmonik kestiriminin kesinliği artmaktadır.

Qian ve arkadaşları (2007), interpolasyon FFT algoritmasına dayanan bir ara harmonik tahmin metodu önermişlerdir. Blackman – Harris penceresi, Rife – Vincent penceresi ve Rife – Vincent penceresine dayalı ara harmonik parametrelerini tahmin etmek için bir algoritma verilmiştir. Benzetim sonuçları, senkronize olmayan örnek dizisi analizi için önerilen algoritmayı kullanarak, tahmini ara harmonik frekansı, genlik ve fazın oldukça doğru olduğunu göstermektedir.

Jiang ve arkadaşları (2010), frekans kaçağından doğan sorunları azaltmak ve ara harmonik analizinin doğruluğunu geliştirmek için poli-kosinüs penceresi ve çift enterpolasyonlu Fourier dönüşümü algoritmasını sundu. Pencere Fourier dönüşümü, uygun bir pencere işlevini seçerek örnekleme sinyaline uygulanır. Ardından çift enterpolasyon algoritması kullanılarak harmonik analiz sonuçlarında bir geliştirme yapılmıştır.

Abdelsalam ve arkadaşları (2017), voltaj stabilizasyonu, güç faktörü düzeltilmesi ve harmonik bozulmaların azaltılması için yeni bir düşük maliyetli güç filtresi / kompensatör cihazı geliştirmişlerdir. Darbe genişlik modülasyonunu modüle etmek için kullanılan PID kontrol cihazı, bir çift döngü geleneksel kontrolörden üretilen bir hata sinyali tarafından yönlendirilir. Sonuçlar, güç filtresi / kompensatör cihazının güç faktörünü geliştirdiğini ve voltaj profilini geliştirdiğini göstermektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Güneş Pilleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisini diğer enerji türlerine göre doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebildikleri için fotovoltaik güneş pilleri alternatif bir elektrik üretim metodu olarak gittikçe yaygınlaşmakta ve daha da önem kazanmaktadır.

Güneş pilleri genel yapı itibarıyla yüzeylerine belli bir açı ile gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzey yapıları şekil olarak daire, dikdörtgen, kare şeklinde olup ortalama alanları 100 cm² civarında, kalınlıkları ise 0.2 – 0.4 mm arasındadır.

Güneş pillerinin çalışma ilkesi fotovoltaik ilkesine dayanır, yani panelin üzerine ışık düştüğü zaman panelin uçlarında elektrik enerjisi meydana gelir. Pillerin verdiği elektrik enerjisinin miktarı, yüzeyine gelen güneş enerjisine bağlıdır. Deniz seviyesinde, parlak bulutsuz bir havadaki ışığın şiddeti m² başına yaklaşık 1kW/m² civarındadır. Bölgeye ve hava koşullarına bağlı olarak 1m²'ye düşen güneş enerjisi miktarı yılda yaklaşık 800-2600 kWh arasında olabilmektedir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına da bağlı olarak değişir ve yüksek bir verimle (%5 - %40) elektrik enerjisine çevrilebilir (Uyarel ve Öz, 1987).

Fotovoltaik paneller güneşten gelen ışınları toplar ve bu ışınları elektrik enerjisine dönüştürür. Panelin üzerine gelen fotonlar, N tipi silisyum yarı iletkenlerin yüzeyinden elektron koparır. Yörüngeden kopan bu serbest elektronlar her panelde yaklaşık 0,5V civarında elektriksel bir alan oluşturmaktadır (Dugan ve ark., 1996).

2.2. Harmonik

Alternatif akım tesislerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılmasında gerilimin ve akımın 50 Hz'de tam dalga sinüs şeklinde olması istenir. Fakat bazı yan etkiler ve bozucu olaylar yüzünden gerilimin ve akımın dalga şekli bozulur ve sinüs şekline ayrılır veya farklı şekillere dönüşür. Gerilim ve akımın sinüs şeklinde olmaması birçok zararlı etkilere yol açar (Arillaga ve ark., 1985).

Genel olarak bilindiği gibi, sinüs şeklinde olmayan herhangi periyodik bir fonksiyon, Fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Buna göre sinüs şeklinde olmayan periyodik bir gerilim

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

veya

$$u(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos(k\omega t) \quad (2)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Eşitlik (2)'de k harmonik mertebesidir. U_k ve φ_k ise, sırasıyla k'nci harmonik geriliminin tepe değeri ve faz açılan olup;

$$U_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (3)$$

ve

$$\tan\varphi_k = \frac{B_k}{A_k} \quad (4)$$

dir. Sinüsoidal olmayan periyodik bir akım da yine aynı şekilde bir Fourier serisi ile gösterilebilir, k = 1 için temel gerilim dalga değeri elde edilir. ω temel dalganın açısal frekansı olup, f şebeke frekansı ve T periyot olmak üzere

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

dir. Harmoniğin mertebesi yükseldikçe genellikle harmoniğin tepe değeri de küçülür. Eşitlik (2) deki katsayılar

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (6a)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt \quad (6b)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt \quad (6c)$$

ile hesaplanır. Eşitlik (1) de ki U_0 ve Eşitlik (2) de ki A_0 , gerilimin doğru bileşenidir. Çoğunlukla rastlanan periyodik alternatif akım büyüklüklerinde pozitif ve negatif yarı dalganın yüzeyleri birbirine eşit olduğundan, doğru gerilim bileşeni bu gibi hallerde sıfıra eşittir.

Eğer Eşitlik (2) deki fonksiyonda $u(t) = u(-t)$ ise buna çift simetrik fonksiyon denir, ve bu durumda $A_k = 0$ dır ve fonksiyon sadece cosinüslü terimlerden oluşur. Eğer $u(t) = -u(-t)$ ise buna tek simetrik fonksiyon denir ve bu takdirde $B_k = 0$ ve fonksiyon sadece sinüslü terimlerden oluşur. $u(t) = -u(t+\pi)$ ise, yani fonksiyon 0 - noktasına göre simetrik ise, bu durumda A_k ve B_k 'nin yalnız tek sayılı terimleri mevcuttur, yani harmonik mertebesi k = 1, 3, 5, 7, 9... gibi sayılar alır. Eğer aynı zamanda $u(t) = -u(\pi-t)$ ise, yani eğrinin bir yan periyottaki bölümü, π kadar kaydırıldığında ikinci yan periyottaki bölümüne t eksenine göre simetrik ve eşit ise, bu durumda tek mertebeli sinüs fonksiyonlarından oluşur.

Elektrik enerji sistemlerinde gerilimin ve akımın mümkün olduğu kadar sinüs şeklinde olması istenir. Alman yönetmeliği VDE 0104' e göre sinüs şeklinin bozulması bakımından kabul edilen tolerans; sinüs şekline herhangi bir andaki $u(t)$ değeri ile aynı anda temel harmoniğin $U_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ değeri arasındaki farkın, temel dalganın U_1 tepe değeri ile oranı %5' den küçük, yani Eşitlik (7)' e göre

$$\frac{u(t) - U_1 \cos(\omega t + \varphi_1)}{U_1} 100 \leq \%5 \quad (7)$$

ise bu gerilimin (veya akımın) pratik olarak sinüsoidal olduğu kabul edilir.

Bir dalgayı yada dalga şeklini tek bir birimle ifade etmek istenirse Toplam Harmonik Bozulması (THD) hesaplamak yeterlidir. Burada dalganın akım veya gerilim THD değerini aşağıdaki gibi hesaplayarak bozulma miktarını belirlemiş oluruz (Ferrero ve ark., 1990).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k_{\max}} M_k^2}}{M_1} \quad (11)$$

Burada M_k , efektif değeri M olan bir birimin k . harmonik bileşenini göstermektedir. M_1 ise temel bileşenin efektif değeridir.

Efektif değer aşağıdaki formülde THD' e bağlı olarak hesaplanabilir:

$$\text{Efektif Değer} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\max}} M_k^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (12)$$

Toplam Harmonik Bozulması (THD) elektrik devreleri için çok önemli bir parametre olup sonuçlarına göre kayıp gücü belirlemek ve önlemek için fayda sağlayacaktır. Omik bir yükün üzerine uygulanan bozulmuş bir gerilim dalgasının, yükte ne kadar ısınma yaratacağını hesaplarken THD, olumlu bir sonuç verebilir.

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için filtre tasarımı yapmak veya filtre koymak yeterli olmayabilir. Filtre tasarımı haricinde harmonik akımlarını da engellemek başka bir çözüm yoludur. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken R-L-C elemanlarıyla seri ya da paralel bağlayarak da harmonik akımlarını en aza indirmek mümkündür. Harmonik filtrelerinin amacı çift yada tek mertebeden harmoniklerin seviyesini indirgeyerek etkisini azaltmaktır (Ferrero ve ark., 1990).

2.3. Kesir Dereceli Sistemler

Kesirli Matematik üzerine yapılan araştırmalar son yüzyılda oldukça artmıştır ve popülerliği daha da artmaktadır. Matematiksel tarihi eski yalnız uygulama alanı yeni olan bu çalışmalar, türev ve integral kavramlarının tam sayı olmayan kompleks, irrasyonel ve reel sayılarda işlem yapılabilme olanağı sağlamasıdır. Bu sayede doğadaki sistemleri daha gerçekçi bir modelleme olanağı sağlamasıdır (Das ve ark., 2008). Literatürde bu sistemlerin hesaplanması için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları Riemann- Liouville,

Grünwald-Letnikov ve Caputo tanımlarıdır (Monje ve ark., 2010).

2.3.1. Riemann-Liouville tanımı

Riemann-Liouville tanımına göre integral ifadesi Eşitlik (13)'de ifade edilmektedir.

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{-\alpha} \int_a^x (x - \tau)^{-\alpha-1} f(\tau) d(\tau), \quad \alpha < 0 \quad (13)$$

${}_a D_x^\alpha$: Kesir Dereceli PID Operatörü, τ : zaman sabiti; α : Kesir derecesi
($n - 1 \leq \alpha < n$ olmak kaydıyla Eşitlik (14) nin n . dereceden türevi alınırsa;

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dx^n} \int_a^x (x - \tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau, \quad n > 0 \quad (14)$$

elde edilmiş olur. Eşitlik (14) ile $f(x)$ fonksiyonunun ($n - \alpha$)'ncü dereceden kesir dereceli türevi ifade edilmektedir.

2.3.2. Grünwald-Letnikov tanımı

Grünwald-Letnikov tanımında ise, α reel sayı dereceli sistemi (15) Eşitliğinde vermektedir.

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\frac{(x-\alpha)}{h}} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(x - jh) \quad (15)$$

Eşitlik (16)'de h adım sayısını göstermektedir. Eşitlik (15)'de yer alan toplam ifadesi ise

$$\sum_{j=0}^r (-1)^j \binom{\alpha}{j} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{\Gamma(r+1-\alpha)}{\Gamma(r+1)} \quad (16)$$

olarak verilmektedir.

Eşitlik (16)'te kullanılan ve $\Gamma(x)$ ile ifade edilen Euler-Gama fonksiyonu

$$x^\alpha = \underbrace{x \cdot x \cdot x \cdot x \cdot x \dots \dots \dots x}_\alpha, \quad \alpha \text{ Tamsayı} \quad (17)$$

$$x^\alpha = e^{\alpha \ln x} \quad (18)$$

$$\alpha! = 1.2.3. \dots (\alpha - 1). \alpha, \quad \alpha \text{ Tamsayı} \quad (19)$$

$$\alpha! = \Gamma(\alpha + 1), \quad \alpha \text{ Reel Sayı} \quad (20)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt \quad (21)$$

Γ : Euler Gama Fonksiyonu

formülasyonu ile elde edilir. Eşitlik (22)'de, $x \geq 0$ olup bir tamsayıdır. Eşitlik (22)'de, $\binom{\alpha}{j}$ binom katsayısını göstermektedir. Binom katsayısı

$$\binom{\alpha}{j} = \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-j+1)}{j!} \quad (22)$$

ile ifade edilir.

2.3.3. Caputo Tanımı

Caputo tanımı Eşitlik (23) ile ifade edilir. Bu eşitlikte, n tamsayı, α ise reel sayı olarak verilmiştir.

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^x \frac{f^n(\tau)}{(x-\tau)^{\alpha+1-n}} d\tau, \quad (n-1) \leq \alpha < n \quad (23)$$

www.fomcon.net adresinden indirilebilen Fractional Order Modeling and Control (FOMCON) arayüzüdür. MATLAB tabanlı arayüz ile kesir dereceli sistemler için PID kontrolör tasarlamak mümkündür.

2.4. Filtreler

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için filtre tasarımı yapmak veya filtre koymak yeterli olmayabilir. Filtre tasarımı haricinde harmonik akımlarını da engellemek başka bir çözüm yoludur. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken R-L-C elemanlarıyla seri ya da paralel bağlayarak da harmonik akımlarını en aza indirmek mümkündür (Ay,1996).

2.4.1. Paralel (Şönt) Pasif Filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, kaynak ile yük arasına direnç (R), bobin (L) ve kondansatörün (C) paralel olarak bağlanmasıyla oluşturulan devrelerdir.

Paralel pasif filtrelerde amaç, düşük bir şönt empedans üzerinden akım geçişini filtre üzerinden yapmaktır. Sönümlenmek istediğimiz harmonik frekansını rezonans frekansına eşit şekilde getirmek için L ve C değerlerini ayarlayarak devreye bağlamaktır. Bunun için ayrı ayrı rezonans kolları oluşturup güç devresine bağlayarak genlik değeri en yüksek olan harmonik frekanslarına uygulayarak daha etkin bir çözüm yolu elde edilmiş olunur (Argın, 2000).

Bu filtrenin tek dezavantajı bobin ve kondansatör kullanıldığından güç sistemiyle paralel rezonansa girmesidir. Bu nedenden dolayı paralel filtre tasarımı yapılırken birçok değer yanında sistemin rezonans frekansı iyi hesaplanmalı ve ayrıntılı analizler yapılmalıdır. Şönt filtreler kendi arasında da dört kısımda incelenir.

- 1) Bant geçiren filtreler,
- 2) Çift ayarlı filtreler,
- 3) Otomatik ayarlı filtreler,
- 4) Yüksek geçiren sönümlü filtreler.

2.4.1.1. Bant Geçiren Filtreler

Bant geçiren filtreler, kısa devre veya düşük empedans oluşturularak ayarlanan frekansın harmonik akımlarının bastırılmasını sağlar (Argın, 2000). Tek ayarlı filtreler seri *Direnç-*

Bobin-Kondansatör devresinden meydana gelir.

2.4.1.2. Çift Ayarlı Filtreler

İki adet bant geçiren filtrenin eşdeğer empedansının toplamı çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansına eşittir. Birden fazla harmonik bulunana devrelerde çift ayarlı filtre kullanarak harmoniği yok edilebilir. Bant geçiren filtreden en büyük farkı temel frekanstaki güç kaybının az olmasıdır. Bu filtreler iki farklı harmoniği elimine ettiğinden iki farklı rezonans frekansı meydana gelmektedir (Argın, 2000).

2.4.1.3. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Yüksek mertebeli harmoniklerin süzülmesinde ve belirli frekanstan sonra düşük empedans değeri gösteren filtrelerdir. Bu filtreleri bant geçiren filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Bunun sebebi bant geçiren filtreler yüksek genlik değerine sahiptir ve düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerler. Yüksek geçiren filtrelerin ise genlik değeri oldukça düşüktür. Bu sebepten yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; kondansatör değerinin büyük olması gerekir ve bu sebeple temel frekansta aşırı kayıplara sebep olur. Bu nedenle çok yaygın olarak kullanılmazlar.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; filtreleme performansı en iyi olan filtredir. Yalnız üçüncü derece ile karşılaştırıldığında zaman performansı çok iyi değildir. Bunun sebebi ise yüksek temel frekanslar kayıpları gösterir.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; devrede bulunan C_2 kondansatörü sayesinde temel frekansta empedansının artmasından dolayı temel frekans kayıplarına neden olur. Bu özelliğinden dolayı ikinci derece filtreye göre daha avantajlıdır.

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre; bu filtre ikinci filtreden daha iyi üçüncü filtreden daha kötü performansa sahip filtredir. Temel avantajı, C_2 ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Ayrıca bu filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır.

2.5. Eviriciler

Eviricinin temel görevi, bir DC gerilimi AC gerilime çevirmektir. Bu dönüşümü yaparken simetrik bir sinüs dalga, eşit genlik ve frekans ile dönüştürmelidir. Ayrıca çıkış geriliminin düşük bir harmonik ile elde edilmesi istenir. Çıkış gerilimi ayarlı olabileceği gibi sabit bir değerde de olabilir. Bunun için frekans değerleri sabit veya değişken seçilmektedir. Değişken bir çıkış gerilimi elde etmek için değişken bir de DC giriş gerilimi kullanılır. Bunun için evirici kazancının sabit tutulması gerekmektedir. Diğer bir yol ise eğer DC giriş gerilimi sabit ve ayarlanamazsa değişken bir çıkış gerilimi evirici kazancını değiştirerek elde edilebilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan evirici modelleri ise anahtarlama stratejisi olarak ise temel frekansta anahtarlama yapan sistemler ya da PWM (Pulse Width Modulation) yani darbe genişlik modülasyonu teknikleri kullanılmaktadır.

İdeal bir eviricinin çıkış geriliminin dalga şekli sinüsoidal olmalıdır. Bu sinüsoidal dalgada harmonik seviyesinin en alt düzeyde bulunması istenilen bir durumdur. Uygulamalarda

harmoniksiz sinüs elde etmek oldukça zordur. Bu harmoniklerin ana sebebi akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı harmonikler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yüksek hızlı yarı iletken güç elemanları kullanılması durumunda harmonik bileşenleri azaltabilir ya da anahtarlama teknikleri uygulayarak düşürebilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Sistem; güneş enerjisinden akım, gerilim ve güç değerlerini kullanarak 30°C ve $1000\text{W}/\text{m}^2$ ışık şiddetinin olduğu bir ortamda test edilmiştir. Çalışmada Soltech 1STH-215-P model güneş panelleri kullanılmıştır. Her bir kolda 40 güneş paneli seri bağlanmıştır ve 20 paralel kol bulunmaktadır. Toplam 800 adet güneş paneli kullanılmıştır. Çizelge 3.1.'de kullanılan güneş panellerinin teknik özellikleri görülmektedir. Bu çalışma MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır.

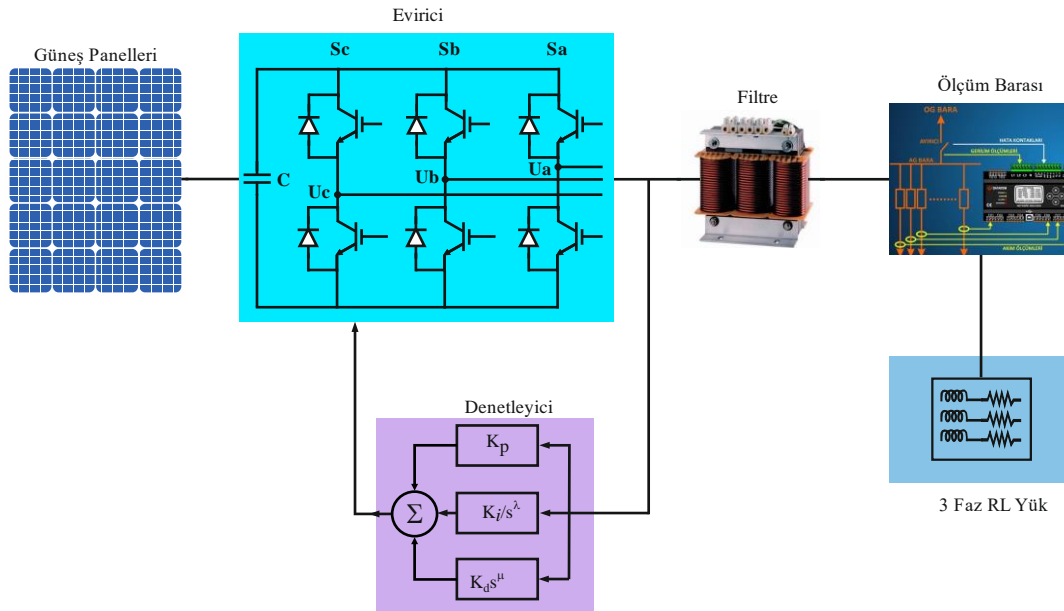
Çizelge 3.1. Soltech 1STH-215-P Elektriksel Teknik Özellikleri

Elektriksel Büyüklük	Değer
Modüldeki Hücre Sayısı (Adet)	60
Güç (W)	215
Maksimum Güçteki Gerilim Değeri (V)	29
Maksimum Güçteki Akım Değeri (A)	7.35
Açık Devre Gerilimi (V)	36.3
Kısa Devre Akımı (A)	7.84
Diyot Sızıntı Akımı (A)	$2.9259e^{-10}$
Diyot İdealleştirme Katsayısı	0.98117
Seri Direnç (Ω)	0.39383
Paralel Direnç (Ω)	313.3991
Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	47.4
Açık Devre Gerilimindeki Sıcaklık Etkinlik Değeri ($\%/^{\circ}\text{C}$)	-0.36099
Kısa Devre Akımındaki Sıcaklık Etkinlik Değeri ($\%/^{\circ}\text{C}$)	0.102

Güneş panellerinden elde edilen doğru gerilim bir evirici vasıtasıyla alternatif akıma çevrilmektedir. Çıkışı $380\text{V}/50\text{Hz}$ 'de sabit tutmaktadır. Kullanılan evirici 2 seviyeli 6 IGBT'den (Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör)) oluşan standart bir eviricidir. Bu evirici için kesir dereceli PID((P)roportional, (I)ntegral ve (D)erivative) kontrolör kullanılmıştır. Burada yük üzerindeki gerilim ölçülmekte, daha sonra abc-dq0 dönüşümü kullanılarak d ve q bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu bileşenler ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Bileşenlerden d bileşeni 1 değerine q bileşen ise 0 değerine ayarlanmaya çalışılmaktadır. Kontrolörlerin çıkışında elde edilen sinyaller tekrar dq0-abc dönüşümü ile sinüs dalga şekline çevrilerek PWM'in (Darbe genişlik Modülasyonu) giriş işareti olarak kullanılmaktadır. Darbe Genişlik Modülasyonundaki sinyaller IGBT'lere gönderilerek 6 adet

IGBT sürülmektedir. Kontrolör ayrıca sistemden aldığı frekans değerini faz kilitlemeli çevrim kullanarak 50Hz'de tutmaya çalışmaktadır. Burada d ve q bileşenler kesir dereceli PID kontrolör kullanılarak denetlenmiştir. Ayrıca denetleyicide $K_p=0.2$, $K_i=150$, $K_D=1.2$, $\lambda=0.3$, $\mu=0.4$ seçilerek kesir dereceli PID tasarlanmıştır. Bu değerler MATLAB/Simulink programında deneme yöntemiyle seçilmiştir. Sistem üzerindeki LC filtrelerinde $L=1\text{mH}$, $C=22\mu\text{F}$ alınmıştır. Harmonik filtrelerinde ise $Q_c=20\text{kVar}$ seçilmiştir. Yapılan tüm benzetim çalışmalarında değerler sabit alınmıştır. Sistemde RL yükü kullanılarak harmonik oluşturulmaya çalışılmıştır. Birinci Yük $45\text{kW}/20\text{kVAr}$ 'lık, ikincisi ise 15kW 'lık bir değere sahiptir. Aşağıdaki grafiklerde örnekleme zamanı $2\ \mu\text{s}$ için yapılmıştır (Tüfekçi, 2018).

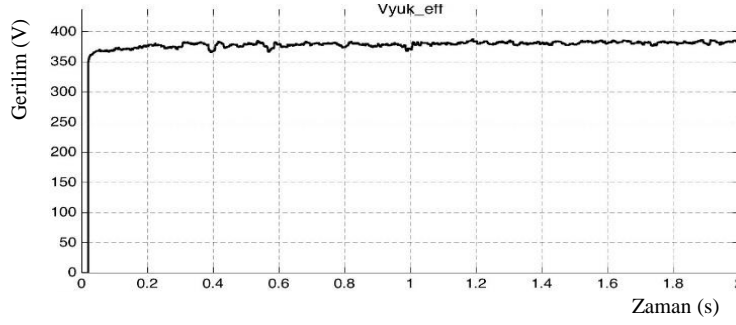
K_p : Oransal Katsayı, K_i : İntegral Katsayı, K_D : Türev Katsayı, λ : Integral Derecesi,
 μ : Türev derecesi



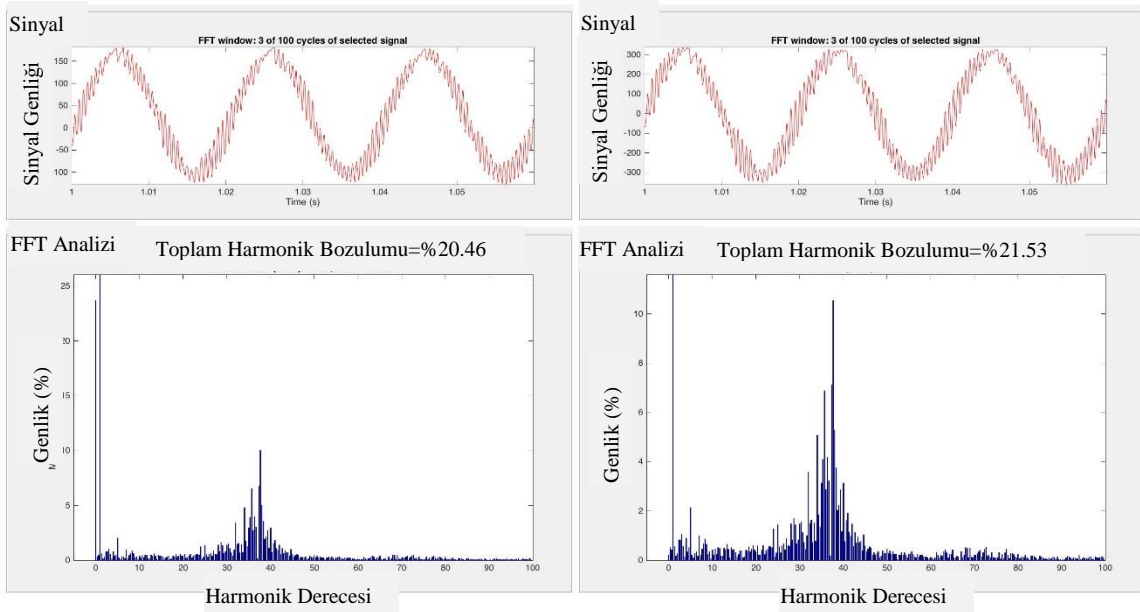
Şekil 3.1. Tek hat diyagramı

3.1. Kesir Dereceli PID Kontrolörün LC Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Kesir dereceli PID'nin LC filtreleriyle yapılan çalışmasında yük gerilimlerinin incelenmesinde kesir dereceli PID de $V_{yük}$ geriliminin çok kısa sürede 380V seviyesine oturduğu yalnız gerilimde çok fazla dalgalanma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıntılı FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi yapıldığında akım için THD (Total Harmonic Distortion – Toplam Harmonik Bozulumu) değeri %20,46, gerilim için bu değer %21,53 ile standart değerlerin oldukça üzerindedir. Standart değerler gerilim için %3, akım için %5 olarak alındığında eviricinin kesir dereceli PID kontrolör ile denetlendiğinde ve LC filtre bulunan devrede enerji üretilmesine rağmen harmonik çok yüksek seviyededir. Bu verilere ait grafikler Şekil 3.2 de ve Şekil 3.3 te sırasıyla verilmiştir.



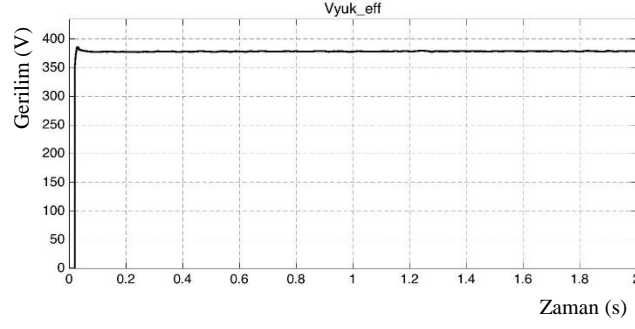
Şekil 3.2. Kesir dereceli PID kontrolörün ve LC filtrenin bulunduğu devrede çıkış yükü



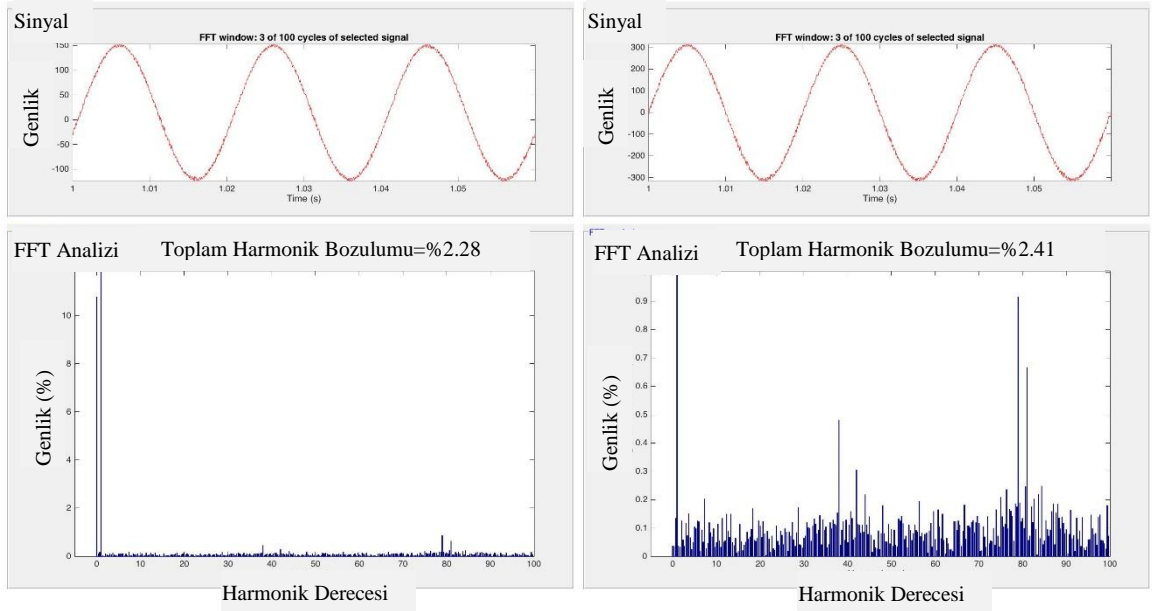
Şekil 3.3. Kesir dereceli PID kontrolörün ve LC filtrenin bulunduğu devrede Akım ve Gerilim için Toplam Harmonik Bozulması

3.2. Kesir Dereceli PID Kontrolörün C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Kesir dereceli PID'nin C tipi yüksek geçiren harmonik filtreleriyle yapılan çalışmasında, yük geriliminin grafiği incelendiğinde $V_{yük}$ değerinin çok kısa sürede 380V seviyesine oturduğu yalnız kısa süreli pik yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıntılı FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi yapıldığında klasik PID nin THD (Total Harmonic Distortion – Toplam Harmonik Bozulumu) oranının akım için %2.28, gerilim için %2.41 olduğu ve standart değerlerin altında olduğu gözlemlenmiştir. Standart değerlerin altında üretim yapan bu devrede grafikler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



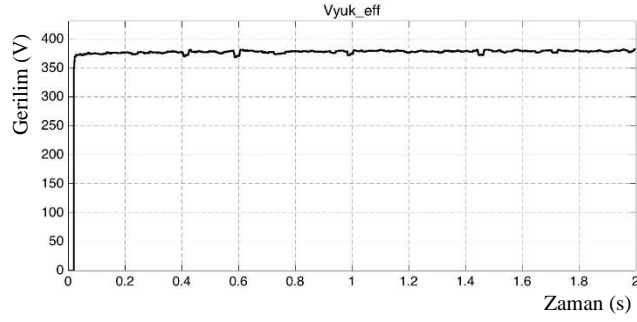
Şekil 3.4. Kesir dereceli PID ve C tipi yüksek geçiren filtre bulunan devrede çıkış yükü grafiği



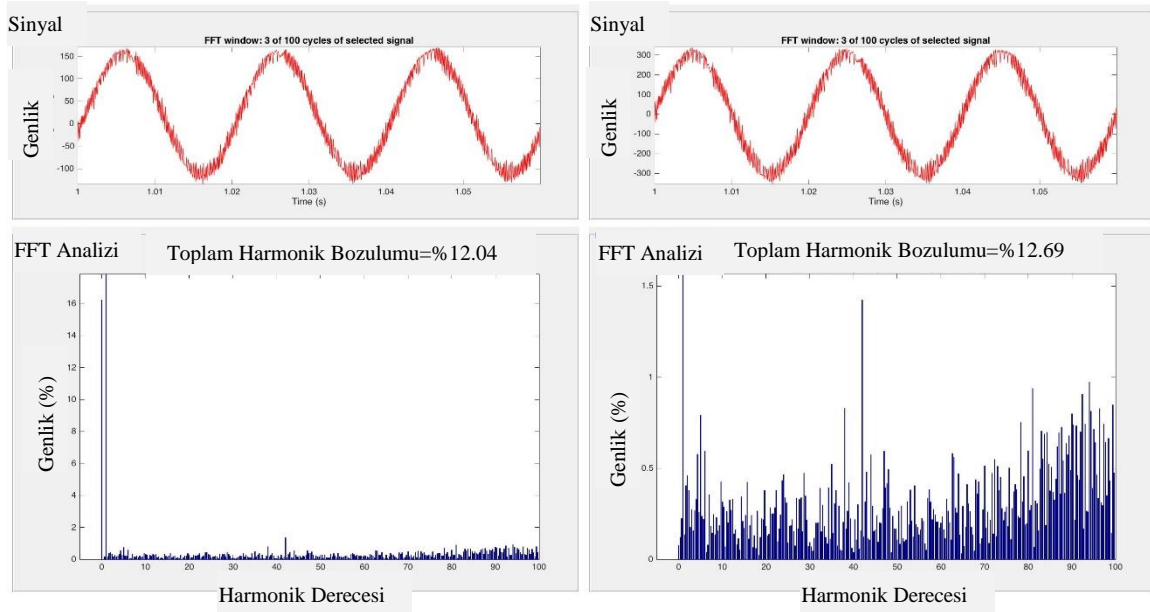
Şekil 3.5. Kesir dereceli PID kontrolörün ve C tipi yüksek geçiren harmonik filtrenin bulunduğu devrede yük akımının ve geriliminin Toplam Harmonik Bozulması

3.3. Kesir Dereceli PID Kontrolörün Çift Ayarlı Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Kesir dereceli PID'nin çift ayarlı harmonik filtreleriyle yapılan çalışmasında yük gerilimi incelendiğinde, kesir dereceli PID de $V_{yük}$ çok kısa sürede 380V seviyesine oturduğu yalnız gerilimde çok fazla dalgalanma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıntılı FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi yapıldığında akım için THD (Total Harmonic Distortion – Toplam Harmonik Bozulumu) değeri %12.04, gerilim için bu değer %12.69 ile standart değerlerin oldukça üzerindedir. Standart değerler gerilim için %3, akım için %5 olarak alındığında eviricinin kesir dereceli PID kontrolör ile denetlendiğinde ve çift ayarlı harmonik filtre bulunan devrede enerji üretilmesine rağmen harmonik çok yüksek seviyededir. Bu verilere ait grafikler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir.



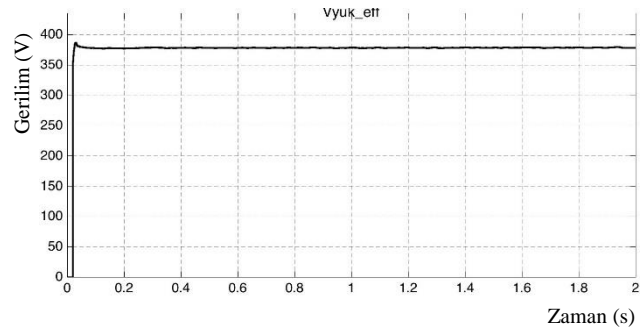
Şekil 3.6. Kesir dereceli PID ve çift ayarlı harmonik filtre bulunan devrede çıkış yükü grafiği



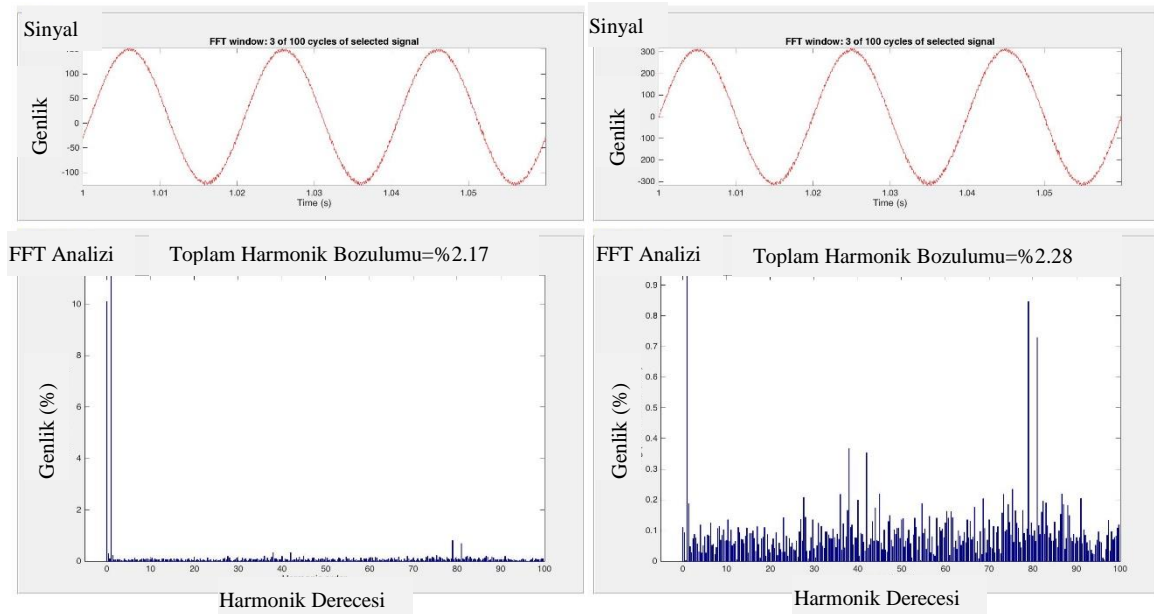
Şekil 3.7. Kesir dereceli PID ve çift ayarlı harmonik filtre bulunan devrede yük akımının ve geriliminin Toplam Harmonik Bozulması

3.4. Kesir Dereceli PID Kontrolörün Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Kesir dereceli PID kontrolörün yüksek geçiren harmonik filtreleriyle yapılan çalışmada, yük gerilimde meydana gelen değişim incelendiği zaman $V_{yük}$ geriliminin çok kısa sürede 380V seviyesine pik yaparak oturduğu ve sonra değişim yapmadan devam ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıntılı FFT analizi yapılarak THD değerlerine bakıldığında akım için %2.17, gerilim için %2.28 seviyelerindedir. Hem gerilim hem de akım için yapılan FFT analizinde THD değerlerinin standart değerlerin çok altında yer aldığı hem akım hem de gerilim için uygun değerler olduğu saptanmıştır. Bu verilere ait grafikler Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



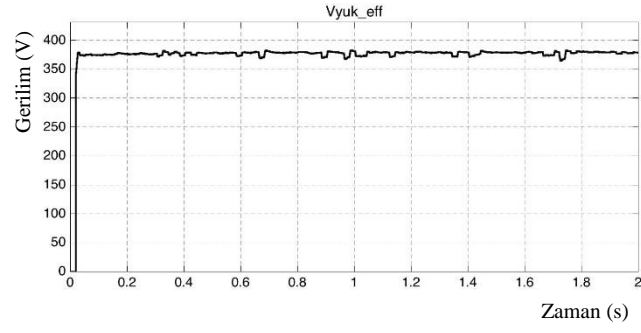
Şekil 3.8. Kesir dereceli PID ve yüksek geçiren harmonik filtre bulunan devrede çıkış yükü grafiği



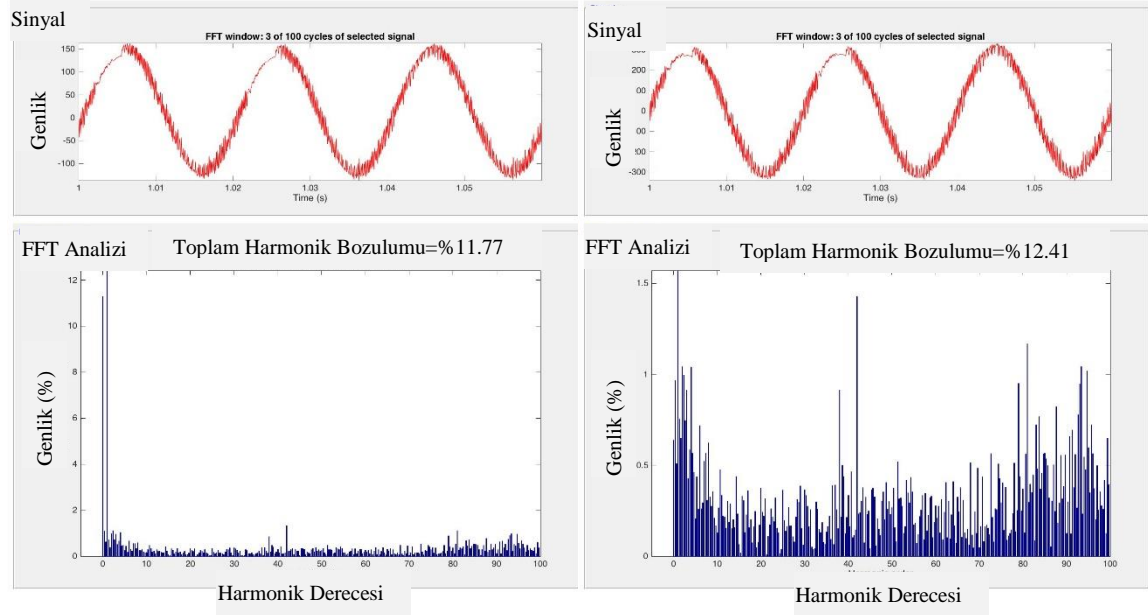
Şekil 3.9. Kesir dereceli PID ve yüksek geçiren harmonik filtre bulunan devrede yük akımının ve geriliminin Toplam Harmonik Bozulması

3.5. Kesir Dereceli PID Kontrolörün Tek Ayarlı Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Kesir dereceli PID kontrolör ile tek ayarlı harmonik filtreleriyle yapılan çalışmada, yük gerilimindeki değişim incelendiği zaman $V_{yük}$ geriliminin çok kısa sürede 380V seviyesine oturduğu yalnız gerilimde çok fazla dalgalanma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıntılı FFT analizi yapıldığında akım için THD değeri %11.77, gerilim için THD değeri %12.41 seviyelerindedir. Bu değerler standart değerlerin oldukça üzerinde olup harmonikli bir gerilim üretimi söz konusudur. Bu verilere ilişkin grafikler aşağıda sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.10. Kesir dereceli PID ve tek ayarlı harmonik filtre bulunan devrede çıkış yükü grafiği



Şekil 3.11. Kesir dereceli PID ve tek ayarlı harmonik filtre bulunan devrede yük akımının ve geriliminin Toplam Harmonik Bozulması

Çizelge 3.2. Filtreler ve denetleyiciler devrede iken FFT analiz sonuçları

Denetleyici ve Filtre Türleri	$V_{yük-efektif}$ (V)	$V_{yük}$ faz-faz (V) En düşük-En yüksek gerilim	I_r yük için THD değeri (%)	V_r yük için THD değeri (%)
Kesir Dereceli PID LC Filtre	383,6	540-545	20,46	21,53
Kesir Dereceli PID C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre	378,5	540-550	2,28	2,41
Kesir Dereceli PID Çift Ayarlı Hrm. Filtre	382,3	540-580	12,04	12,69
Kesir Dereceli PID Yüksek Geçiren Harmonik Filtre	380	540-547	2,17	2,28
Kesir Dereceli PID Tek Ayarlı Hrm. Filtre	379	540-580	11,77	12,41

4. Sonuç

Elektrik enerjisinin üretimi iletimi ve dağıtımında karşılaşılan başlıca problemler harmoniklerdir. Harmoniklere bağlı olarak artan kayıplar sistemin yapısına zarar vermekte birlikte hattın güvenliğini de tehlikeye sokmaktadır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin harmonik seviyesinin düşürülmesi, kullanılan kontrolör sayesinde sisteme cevabı incelenmiştir. Harmonik seviyesini düşürmek için bir adet LC filtre ve dört adet harmonik filtre olmak üzere toplam 5 adet filtre devreye uygulanmış olup bu filtreler arasında en iyi sonuç veren filtre bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca eviriciye bağlanan kesir dereceli PID kontrolör ile yük üzerinden alınan gerilimin oturma zamanı ve gerilimin sürekliliği kontrol edilmiştir. Aşağıdaki çizelgede her bir filtrenin THD (Toplam Harmonik Bozulumu), sinüs dalga şekli, oturma zamanı, v.b. gibi değerler karşılaştırılarak en ideal filtre ve kontrolör devre elemanları belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken tüm filtre ve kontrolör değerleri eşit alınmış kıyaslama bu şekilde yapılmıştır.

Çizelge 3.2 deki verilerden de görüldüğü üzere Kesir dereceli PID kontrolör ile yapılan ve yüksek geçiren harmonik filtrenin bulunduğu devrede gerilim 0,05s gibi kısa bir sürede 380V gerilim değerine ulaşmaktadır. $V_{yük}$ değerinin dalgalanma değerlerine bakıldığında en düşük tepe değeri 540V, en yüksek tepe değeri 547V seviyelerindedir. Harmonik analizi incelendiğinde FFT analiz sonuçlarına göre en düşük THD değeri %2,17 ile yüksek geçiren harmonik filtre ile gerçekleştirilmiştir. Bu sonuç çıkış akımı üzerinden değerlendirilmiştir. Çıkış gerilimi üzerinden yapılan FFT analizinde THD değeri %2,28 ile yine en düşük seviyededir. Harmonik standardının gerilim için %3, akım için %5 olduğu durumda bu değerler standardın çok altında olup en az harmonikli gerilim üretimi gerçekleştirilmiştir.

Teşekkür

2015 yılında başlayan “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Harmoniklerin İncelenmesi” isimli ve FEN-BAP-C-200515-16 numaralı projeye desteklerinden dolayı Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Abdelsalam A.A., Abdelaziz A.Y., Gabbar H.A., Gamaa S.N., 2017. Distribution System Performance Enhancement Using Power Filter/Compensator Device, 5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering.
- Argın M., 2000. Güç Sistem Harmonik Filtreleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, TÜRKİYE.
- Arillaga J., Bradley D.A., Bodger P. S. 1985. Power System Harmonics, John Wiley & Sons Ltd., NORWICH.
- Ay S., 1996. Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri Ve Filtre Tasarımı, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 95.
- Das S., 2008, Functional fractional calculus for system identification and controls, Springer, Springer Berlin Heidelberg New York
- Dugan R. C., McGranaghan M.F., Beaty H.W., 1996. Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill Companies, USA
- Ferrero A., Superti-Furga G., 1990. A New Approach to the Definition of Power Components in Three Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 40, No. 3, June, 568-577.
- Huang C., Jiang Y. Q., 2005. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics. In Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao (Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.) (Vol. 25, No. 15, pp. 26-32)
- Jiang C. F., Liu M., 2010. Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm [J]. Power System Protection and Control, 3.
- Lin H.C., Lee C.S., 2001. Enhanced FFT-based parametric algorithm for simultaneous multiple harmonics analysis. IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 148(3), 209-214.
- Monje C., Chen Y.Q., Vinagre B.M., Xue D., Feliu V., 2010. Fractional order systems and controls: fundamentals and applications (advances in industrial control). London: Springer-Verlag.
- Qian H., Zhao R., Chen, T., 2007. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(2), 1064-1069.
- Tüfekçi A., 2018. Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Harmonik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun, TÜRKİYE
- Uyarel A.Y., Öz E.S., 1987. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, ANKARA.
- Wen P., Yushou Q., Zhou E., 1994. Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT (I) Study of Windows [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1.