



GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ

Alparslan TÜFEKÇİ^{1*}, Onur Özdal MENGİ², Özgür TOMAK³

¹ Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Giresun, alparslan.tufekci@giresun.edu.tr,

² Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Giresun, onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr,

³ Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Giresun, ozgur.tomak@giresun.edu.tr,

Geliş Tarihi (Received Date): 22.05.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.07.2018

ÖZ

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi ile beslenen yükler üzerindeki harmoniklerin ortadan kaldırılması konusu tartışılmaktadır. Güneş panellerine düşen güneş ışığının bir sonucu olarak enerji elde edilir. Ortaya çıkan enerji DC gerilim olduğundan, bu enerjiyi uygun şekilde AC gerilime dönüştürme ihtiyacı doğar. Özellikle alternatif akım yükleri uygun şekilde beslenmelidir. Doğrultmaç ve invertörler gibi güç elektronik düzenlemeleri harmoniklere neden olur. Bunun dışında doğrusal olmayan yükler bozulmaya neden olur. Bu nedenle güneş panellerinden üretilen enerjinin sisteme aktarılmadan önce harmoniklerin incelenmesi gerekir. Burada harmoniklerin sınıflandırılması, türünün belirlenmesi ve ortadan kaldırma yöntemleri tartışılmaktadır. Sistem şebekeden tamamen bağımsız çalıştığı için, harmonik problemlerini çözmek için tasarlanmış filtreler ve yükler önem kazanmaktadır. Bu filtrelerin doğru bir şekilde geliştirilmesi ve sisteme fazladan bir yük getirmemesi gerekmektedir. MATLAB / Simulink ortamında yapılan çalışma için tasarlanan tüm farklı filtreler denenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, hangi tip filtrenin kullanılacağı sorusuna ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Yenilenebilir enerji kaynağı, filtre, fotovoltaik, harmonikler*

THE ELIMINATION OF HARMONICS IN SOLAR ENERGY SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, we discuss the elimination of the harmonics on the loads that are fed by solar energy, which is the source of renewable energy. Solar energy is a renewable energy source. Since the resulting energy is DC voltage, it is necessary to convert this energy into AC voltage accordingly. Especially alternative current loads should be fed properly. Difficult electronic arrangements such as rectifiers and inverters cause harmonics. Otherwise, non-linear loads cause corruption. For this reason, harmonics need to be examined before the energy generated from solar panels is transferred to the system. Classification of harmonics, determination of species and methods of elimination are discussed here. Since the system works completely independent of the network, filters and loads designed to solve harmonic problems are important. These filters should be developed correctly and should not bring an extra burden to the system. All different filters designed for the work done in

MATLAB / Simulink environment have been tried and the results have been compared. The results shed light on the question of which type of filter to use.

Keywords: *Renewable energy source, filter, photovoltaic, harmonics*

1. GİRİŞ

Elektrik şebeke sistemlerinde kaliteli enerjinin tanımı, şebekeden çekilen akımın dalga şeklindeki bozulmalar ile şebekenin gerilim ve frekansındaki değişimler olarak verilebilir. Gerilim ve frekans değişse bile birçok elektrikli cihaz bunu algılayamaz ve bu konuda hassas değildirler. Buna karşın elektronik devreler tarafından kontrol edilen ve geliştirilen devre elemanları sayesinde oldukça hassas enerji kalitesini ölçebilmektedir. Son zamanlarda yaygınlaşan doğrusal olmayan (non-linear) yükler yüzünden güç kalitesi problemlerinde artış görülmektedir. Bu doğrusal olmayan yükler, şebekede nominal frekansın (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 elektrikli ekipmanlara zarar vermekte, verimi düşürmekte ayrıca ek kayıplara yol açmaktadır. Bu kayıpları en aza indirmek için devreye bağlanan harmonik filtreler sayesinde harmonik seviyeleri düşürülerek standart değerlerin altında elektrik enerjisi üretilmektedir.

Bu konuda yapılan bazı çalışmalar şunlardır;

Li ve arkadaşları, ilk olarak üç fazlı seri aktif güç filtresinin dengeleme prensibini oluşturmuştur. Sistemi analiz ederek, diferansiyel denklemlerini elde edip, transfer fonksiyonu için çıkan açık döngü kontrol stratejisinin blok diyagramını oluşturmuşlardır. Doğrusal olmayan, kendinden ayarlı bir bağıklık geribildirim kontrolörünü önermişlerdir. Yeni doğrusal olmayan kontrolör, bağıklık geri bildirim mekanizmasını geleneksel PID kontrolüyle birleştirerek tasarlanmıştır [1].

Zhan ve diğerleri, destek vektör makinelerine dayanan ve üstel hesaplama karmaşıklığının zorluğunun üstesinden gelmek için tekrarlanan yeniden ağırlıklandırılmalı en küçük kareler algoritmasıyla çözülen harmonik ve ara harmonik analizine yeni bir yaklaşım önermişlerdir [2].

Qian ve arkadaşları, 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. Simülasyon sonuçları, senkronize olmayan örnek dizisi analizi için önerilen algoritmayı kullanarak, tahmini ara harmonik frekansı, genlik ve fazın oldukça doğru olduğunu göstermektedir [3].

Karuppanan ve Mahapatra, oransal integral türevi tabanlı şönt aktif güç hattı koşullandırıcıları ile anlık güç teorisinin tasarımı ve analizini araştırmışlardır. Bu yapı, güç faktörü düzeltilmesinin yanı sıra doğrusal olmayan yük tarafından oluşturulan reaktif ve harmonik akımları telafi eder. Farklı yük koşullarında mevcut harmoniklerin gerçek zamanlı telafisi için farklı kontrol stratejilerini incelemiştir [4].

Bu makalenin ikinci bölümünde kullanılan materyallerden (güneş pili, filtre, evirici) kısaca bahsedilmiş, üçüncü bölümde ise bu materyallere PID kontrolör eklenerek çıkan sonuçlar yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR

2.1. Güneş Pilleri

Fotovoltaik paneller güneşten gelen ışınları toplar ve bu ışınlardan 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.

Serbest elektronlar, P tipi yarıiletken yüzeyinde bulunan pozitif yüklü oyuklar tarafından çekilmek istenir. Meydana gelen bu elektriksel alan içerisinde, serbest elektronların akışı bir yük üzerinden tamamlandığında güneş ışınımı elektrik enerjisine dönüşmüş olur [5].

Bu fotovoltaik panelleri seri veya paralel bağlayarak akım ve gerilim değerlerini artırmış olur ve bu sayede istenilen gerilim değerlerine ulaşılır. Fotovoltaik panellerin verimi panele gelen ışık şiddetinin miktarı ile doğru orantılıdır. Güneş ışınları ne kadar dik gelirse üretilen enerji miktarı o kadar fazla olur [6].

2.2. Harmonik

Bir dalgayı ya da dalga şeklini tek bir birimle ifade etmek istenirse Toplam Harmonik Bozulması (THD) hesaplamak yeterlidir. Burada akım veya gerilimin THD değeri aşağıdaki gibi hesaplanarak bozulma miktarını belirlenebilir [7].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k_{max}} M_k^2}}{M_1} \quad (1)$$

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:

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

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.

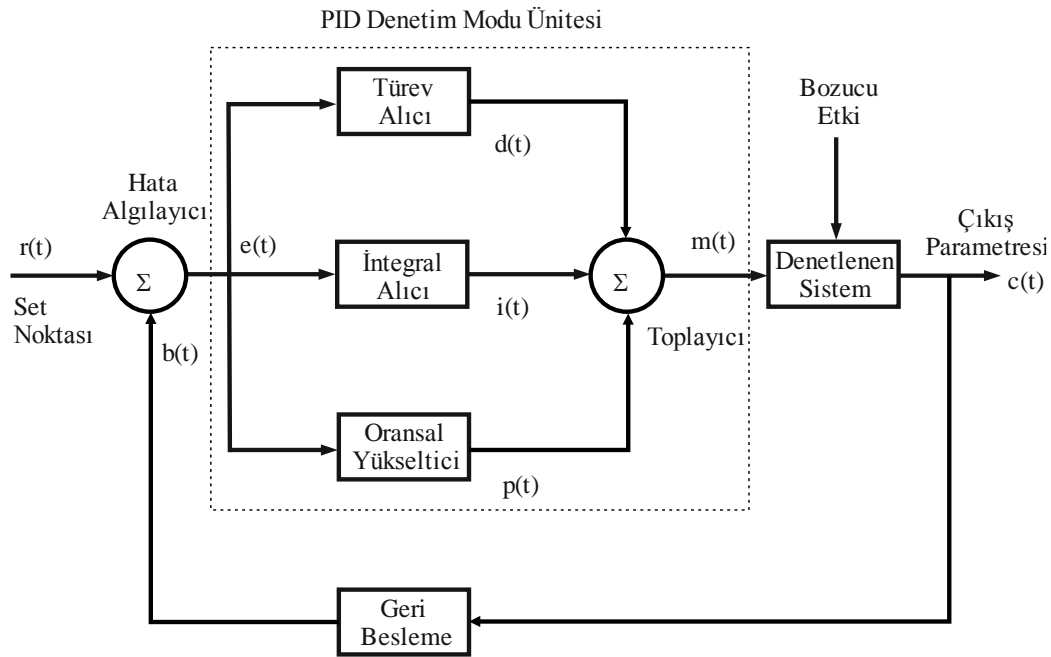
Harmonik gerilimler genelde temel bileşeni referans alarak hesaplanır. Bu için gerilimin efektif değerindeki küçük bir dalgalanma THD de büyük ölçüde değişime sebep olabilmektedir. Aynı değişimi akım için söylemek doğru değildir. Akımın değeri düşük bile olsa yüksek değerlerdeki THD değerlerinde tehlike oluşturmayacaktır [8]. Uluslararası standartlara göre (IEC 61000 2-2,4,5), gerilim için harmonik değeri % 3, akım için harmonik değeri % 5 altında olmalıdır [9].

2.3. PID Kontrolör

Şekil 1’de görülen PID kontrolör hatayı oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) işlemlerinden geçirilerek çıkışa aktaran blok diyagramlarından oluşmaktadır. Burada kısaca P, I ve D olarak adlandırılan parametreler İngilizce karşılıkları olan (P)roportional, (I)ntegral ve (D)erivative kelimelerinin baş harflerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu blok diyagramları tek başına uygulandığında şu etkileri vermektedir.

Devrede oransal etki var ise; P diğer adıyla oransal band parametresi kontrol cihazının içinde yer alan denetim mekanizmasının kazanç miktarı ile ters orantılı olan değeridir ve kontrol çıkışına hatanın belirli bir “Kazanç” değeri ile çarpımı kadar etki gösterir. Devrede İntegral etkisi varsa kontrol çıkışını integral işleminden geçirilerek sönümlemeyi azaltarak band genişliğini daraltır. Bu sayede frekans cevabı kısa sürede oturur. Devrede Türevsel etki varsa kontrol çıkışını türev işleminden geçirerek hataya da doğru oranda etki göstererek yükselme zamanını ve oturma zamanını azaltır [10].

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$



Şekil 1. PID kontrolör.

2.4. Filtreler

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için filtre tasarımı yapmak veya filtre koymak yeterli olmayabilir. Filtre tasarımı haricinde harmonik akımlarını da engellemek gerekmektedir. Bunun için sisteme ilave edilmesi gereken R-L-C elemanlarıyla seri ya da paralel bağlayarak da harmonik akımlarını en aza indirmek mümkündür [11]. Seri LC filtrenin yanı sıra devreye bağlanan paralel harmonik filtreler sayesinde harmonik akımlarının önemli derecede azaltılmak mümkündür. Bunun için devreye bağlanacak harmonik filtreleri şunlardır;

- 1) C tipi yüksek geçiren filtre
- 2) Çift ayarlı harmonik filtre
- 3) Yüksek geçiren harmonik filtre
- 4) Tek ayarlı harmonik filtreler

2.5. Eviriciler

Eviricinin temel görevi, bir DC gerilimi AC gerilime çevirmektir. Bu dönüşümü yaparken simetrik bir sinüs dalga, eşit genlik ve frekans ile bozulmadan yapmasıdır. Ayrıca çıkış geriliminin düşük bir harmonik ile elde edilmesi istenir. Çıkış gerilimi ayarlı olabileceği gibi sabitte olabilmektedir. Yalnız sabit ya da değişken olması değişik harmonik üretilmesine yol açmaktadır. Bunu gidermek 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 [11].

2.6. Modülasyon İndeksi

Genlik modülasyonunda, bilginin taşıyıcıyı ne oranda değiştirip düzenlediği modülasyon açısından önemlidir. Bu değişim oranına modülasyon oranı veya modülasyon indeksi denir ve % cinsinden ifade edilir. Başka bir ifade ile bilgi sinyali maksimum genliğinin sabit genlikli sinyale olan oranıdır. Bu oran üzerinden devrenin çalışıp çalışmadığı, aşırı modülasyona girip girmediği belirlenebilir. Bu oran PID denetleyicilerde % 100 den fazla bir değere sahip olamaz. Bu oran aşırı yükseldikçe sinyalin bozulmasına sebep olur [12].

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

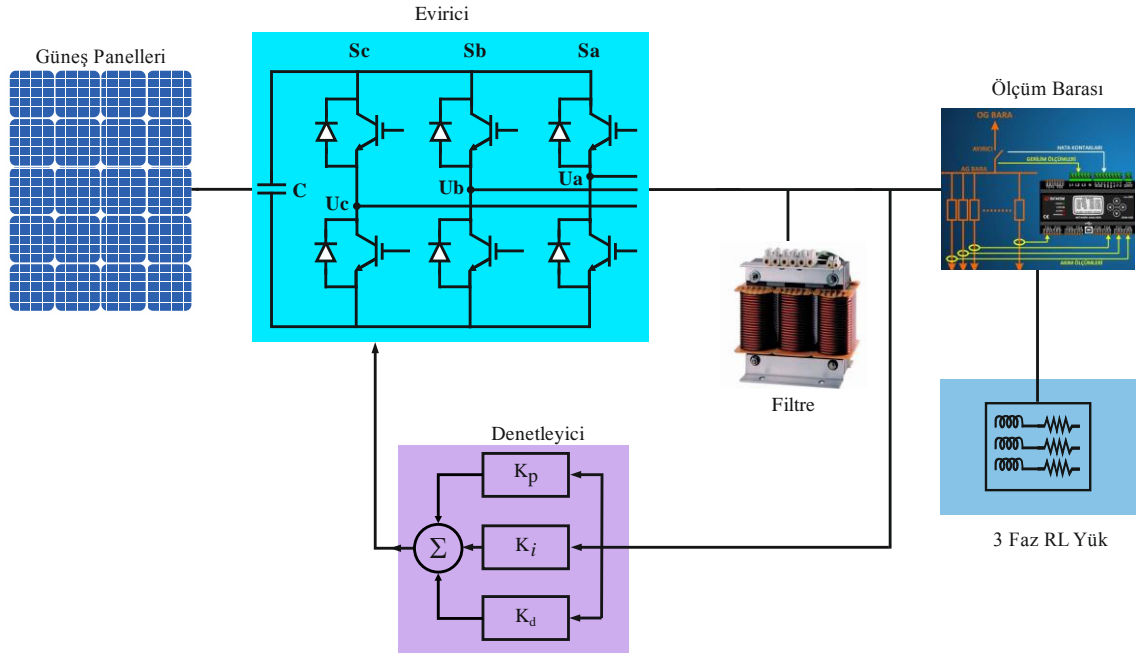
Sistem; güneş enerjisinden akım, gerilim ve güç değerlerini kullanarak 30°C ve 1000W/m² ışık şiddetinin olduğu bir ortamda test edilmiştir. Çalışmada Soltech 1STH-215-P model güneş panelleri kullanılmıştır. Her bir kolda 40 güneş paneli seri, 20 si paralel bağlanmıştır. Toplamda 800 adet güneş paneli kullanılmıştır. Çizelge 1’de kullanılan güneş panellerinin teknik özellikleri görülmektedir.

Şekil 2’de kurulan sistemin tek hat diyagramı görülmektedir. Güneş panellerinden elde edilen doğru gerilim bir evirici vasıtasıyla alternatif akıma çevrilmektedir. Kontrolör sayesinde çıkış değerleri 380V/50Hz’de sabit tutulmaktadır. Kullanılan evirici 2 seviyeli 6 IGBT’den oluşan standart bir eviricidir. Bu evirici için klasik PID kontrolör kullanılmıştır. Burada yük üzerindeki gerilim ölçülürken, daha sonra abc-dq0 dönüşümü kullanılarak d ve q bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu yapı Şekil 3’de görülmektedir. Bu bileşenler ayrı ayrı kontrol edilmektedir. d bileşen 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 giriş işaretini olarak kullanılmaktadır. PWM sinyaller IGBT’lere gönderilerek 6 adet IGBT sürülmektedir. Kontrolör ayrıca sistemden aldığı frekans değerini PLL (faz kilitlemeli çevrim) kullanarak 50Hz’de tutmaya çalışılmaktadır. Burada d ve q bileşenler PID kontrolör kullanılarak denetlenmiştir. Klasik PID de $K_p=0.1$, $K_i=40$ $K_d=0.05$ seçilmiştir. Filtre devrelerinde ise bobin değeri 1mH, kondansatör değeri 22µF dır. Harmonik filtrelerinde ise $Q_c=20$ kVar seçilmiştir. Yapılan tüm benzetim çalışmalarında değerler sabit alınmıştır. Sistemde RL yükü kullanılarak harmonik oluşturulmaya çalışılmıştır. Birinci Yük 45kW/20kVAr ‘lık,

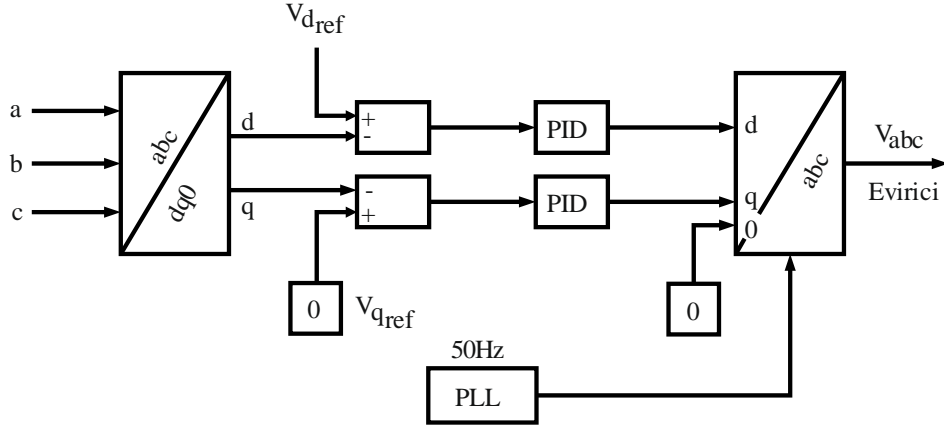
ikincisi ise 15kW'lık bir değere sahiptir. Ayrıca grafiklerde örnekleme zamanı 2 µsn için yapılmıştır. Şekil 3'te ise abc-dq0 dönüşümünü gösteren blok diyagramı verilmiştir.

Çizelge 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 ($^{\circ}C$)	47.4
Açık Devre Gerilimindeki Sıcaklık Etkinlik Değeri ($\%/^{\circ}C$)	-0.36099
Kısa Devre Akımındaki Sıcaklık Etkinlik Değeri ($\%/^{\circ}C$)	0.102



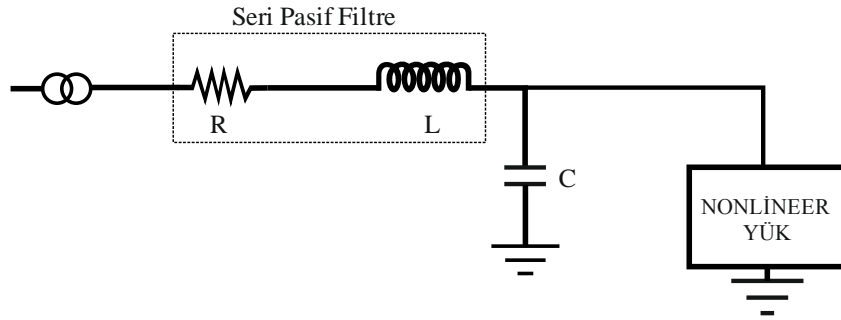
Şekil 2. Tek Hat Diyagramı.



Şekil 3. abc-dq0 dönüşümü

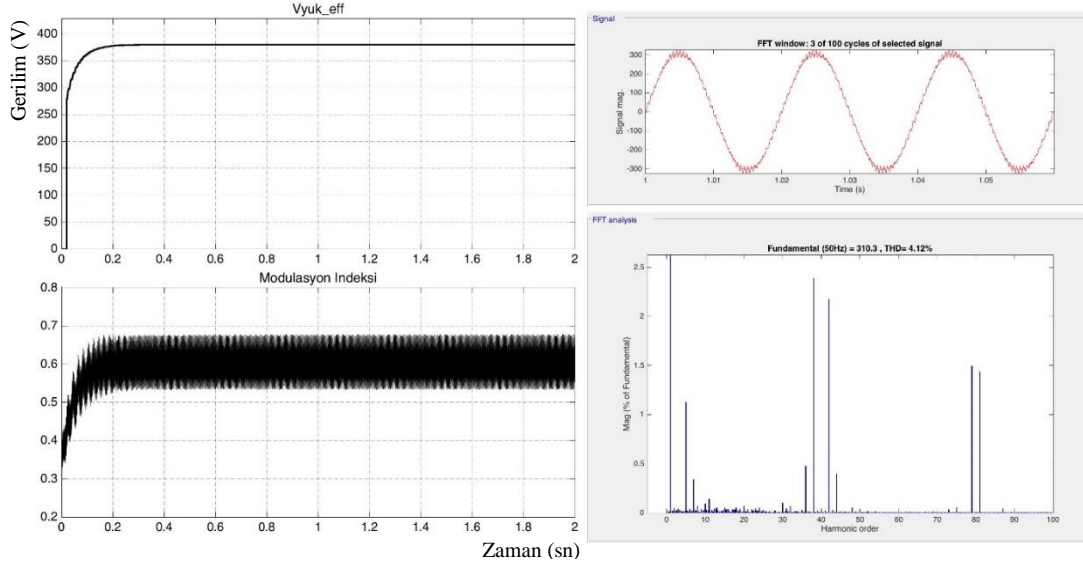
3.1. PID Kontrolörün LC Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Şekil 4’de seri LC filtrenin yapısı görülmektedir.



Şekil 4. Seri LC filtre.

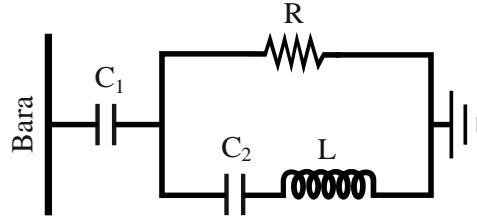
Klasik PID’nin ve LC filtrelerin kullanıldığı çalışmada yük geriliminin değişimi incelendiğinde; 380V gerilimi 0,2 sn de ulaşmış olup dalgalanma daha azdır. Buna bağlı olarak d-q eksen takımı akım dalgalanması daha azdır. Ayrıntılı FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) analizi yapıldığında klasik PID’nin THD oranının %4,12 oranında olup standart değerlerin üzerindedir. Devrenin modülasyon indeksi 0,6 civarında olup devre sürekli enerji üretmektedir. Bu durum Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. LC filtre bulunan devrede çıkış yükü, modülasyon indeksi ve THD grafiği.

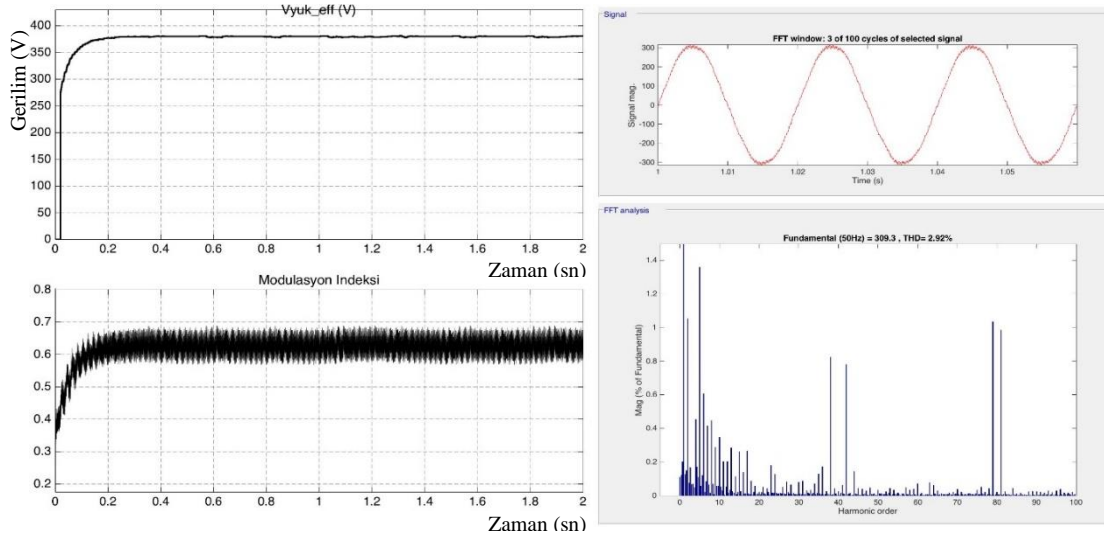
3.2. PID Kontrolörün C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Şekil 6'da C tipi yüksek geçiren harmonik filtresinin yapısı görülmektedir.



Şekil 6. C tipi yüksek geçiren harmonik filtresi.

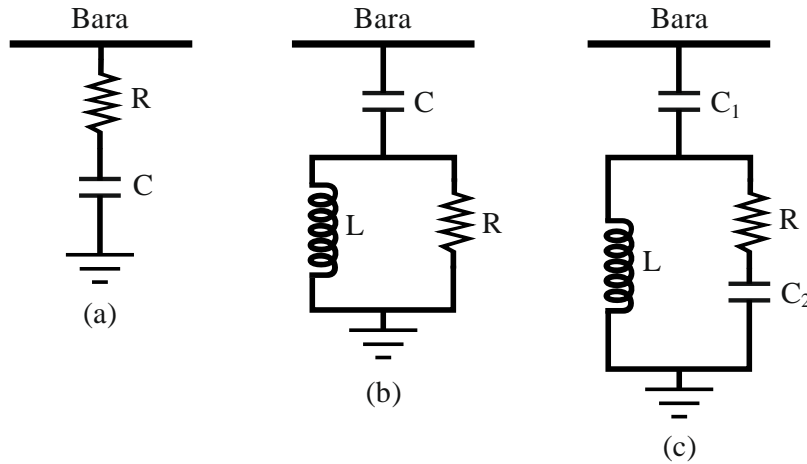
Klasik PID ve C tipi yüksek geçiren filtrelerle kullanılarak yapılan benzetim çalışmasında yük geriliminin değişimi incelendiğinde; 380V gerilimi 0,2 sn de ulaşıp dalgalanma çok azdır. Ayrıntılı FFT analizi yapıldığında klasik PID nin THD oranının %2,92 oranında olup standart değerlerin altındadır. Devrenin modülasyon indeksi 0,6 civarında olup devre sürekli enerji üretmektedir. Bu durum Şekil 7'de görülmektedir.



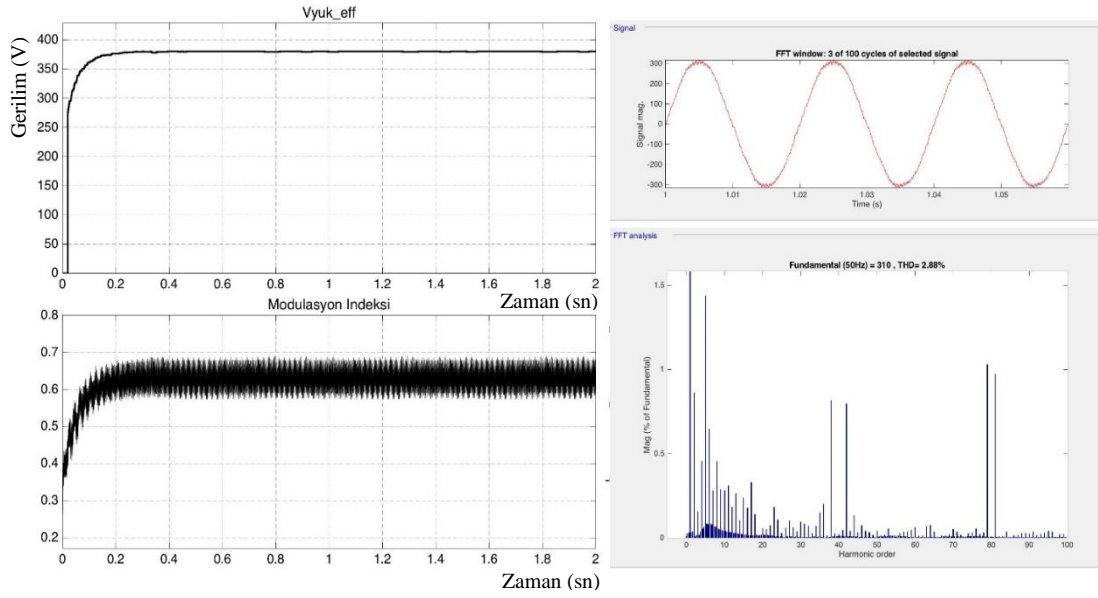
Şekil 7. C tipi yüksek geçiren filtre bulunan devrede çıkış yükü, modülasyon indeksi ve THD grafiği.

3.3. PID Kontrolörün Yüksek Geçiren Harmonik Filtre Bulunan Devreye Uygulanması

Klasik PID ve C tipi yüksek geçiren filtre kullanılan çalışmada yük geriliminin değişimi incelendiğinde; 380V gerilimine 0,2 sn'de ulaşmış olup dalgalanma çok azdır. Ayrıntılı FFT analizi yapıldığında klasik PID nin THD oranının %2,88 oranında olup standart değerlerin altındadır. Devrenin modülasyon indeksi 0,6 civarında olup devre sürekli enerji üretmektedir. Şekil 8'de değişik yüksek geçiren sönümlü filtre yapıları görülmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 9'daki gibidir.



Şekil 8. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler (a) Birinci Derece, (b) İkinci Derece, (c) Üçüncü Derece.



Şekil 9. Yüksek geçiren harmonik filtre bulunan devrede çıkış yükü, modülasyon indeksi ve THD grafiği.

4. SONUÇ

Elektrik enerjisi üretiminde en çok karşılaşılan sorunların başında harmonikler gelmektedir. Harmonik akımlarını azaltmak yada seviyelerini düşürmek için harmonik filtreleri kullanmak en kolay çözümdür. Bu sebeple bir LC filtre ve iki adet harmonik filtre uygulaması yapılmış olup TDH değerleri sınır değerler içerisinde olan filtre belirlenmeye çalışılmıştır. Aşağıdaki tabloda yapılan çalışmaların sonuçları verilmiştir.

Çizelge 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 (%)
PID Denetleyici LC filtre	379	550-560	3,91	4,12
PID Denetleyici C Tipi Yüksek Geçiren Harmonik Filtre	380,7	560-564	2,78	2,92
PID Denetleyici Yüksek Geçiren Harmonik Filtre	380,9	550-565	2,74	2,88

Çizelge 2’de görüldüğü üzere evirici çıkışı PID kontrolör tarafından denetlendiğinde ve devreye paralel yüksek geçiren harmonik filtre uygulandığında ve $V_{ryük}$ çıkışı incelendiğinde faz –faz arası en düşük gerilim 550V, en yüksek gerilim 565V olarak ölçülmüştür. Ayrıntılı FFT analizi yapıldığında THD değeri %2.88 ile yüksek geçiren harmonik filtre ile elde edilmiştir. Hem akım hem gerilim değerlerinin THD değerleri incelendiğinde yüksek geçiren harmonik filtre bulunan devrede çıkış gerilimi ve akımının grafiği oldukça düzgün, az harmonikli ve standart değerler içinde en düşük olanıdır.

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

- [1] Li, J., Yan, H., Tang, G., Jiang, P., Bo, B., (2004), Simulation study of the series active power filter based on nonlinear immune control theory. In Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference, 2, 758-762.
- [2] Zhan, Y., Ding, Y. F., Cheng, H. Z., Zeng, D. J., (2004), A robust support vector algorithm for harmonics analysis of electric power system [J], Proceedings of the Csee, 12, 009.
- [3] Qian, H., Zhao, R., Chen, T., (2007), Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(2), 1064-1069.
- [4] Karuppanan, P., Mahapatra, K. K., (2010), Shunt Active Power Line Conditioners for compensating harmonics and reactive power. In Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 9th International Conference, 277-280.
- [5] Uyarel, A. Y., Öz, E. S., (1987), Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi,
- [6] Mengi, O.Ö., (2018), A Five-Level H-Bridge STATCOM for an Off-Grid PV Solar Farm under Two Controllers PI and PI^λ-MPC Hybrid, International Journal of Photoenergy, 2018, 14.
- [7] Tadros, Y., Salama, S. and Höf, R., (1992), “Three level IGBT Inverter”. 23rd Ann. Power Electron. Specialists Conf.,
- [8] Arillaga, J., Bradley, D. A. and Bodger, P. S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley & Sons Ltd., Norwich.
- [9] IEEE 519, (1992), Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standards Department, New Jersey.
- [10] Benjamin, C.K., (1991), Automatic Control System, Sixth Edition Prentice Hall International Editions, Englewood Cliffs,

- [11] Ay, S., (1996), “Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri Ve Filtre Tasarımı”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 95.
- [12] Tüfekçi, A. (2018).“Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Harmonik Analizi”, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,