

SERİ AKTİF GÜÇ FİLTRESİ için GELİŞTİRİLEN KASKAT BAĞLI ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ ve KONTROL ALGORİTMASI

^{1,2,3,4} Korhan KARAARSLAN, Birol ARİFOĞLU, Ersoy BEŞER, Sabri ÇAMUR

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
^{1,2,3,4} korhan.karaarslan@kocaeli.edu.tr, barif@kocaeli.edu.tr, ebeser@kocaeli.edu.tr, scamur@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Aktif güç filtresi (AGF) çalışma prensibi, örneklenen yük akım ve/veya gerilim dalga şekillerine belirli algoritmalar uygulayarak referans akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin elde edilmesine dayanmaktadır. Filtre çıkış gerilimi dalga şekli, bu referans sinyale göre kontrollü yarı-iletken güç anahtarları yardımı ile üretilmektedir. Bahsedilen çalışma prensibine göre önerilen seri AGF'nin harmonik belirleme, kontrol ve evirici birimi olmak üzere üç ana bölümden oluştuğu söylenebilir. Bu makalede, seri AGF evirici birimi için geliştirilen kaskat bağlı çok seviyeli evirici yapısına yer verilmiştir. Evirici çıkışında, belirlenen harmonik bileşenlere sahip bir gerilim elde etmek amacıyla uygun anahtarlama gerçekleştirecek kontrol algoritması ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında farklı çıkış gerilimi seviyesine sahip çok seviyeli evirici birimleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ise simülasyon çalışmalarını doğrulamıştır. Sonuç olarak, geliştirilen evirici topolojisi ve kontrol stratejisinin seri AGF uygulamaları için uygun olduğu görülmektedir.

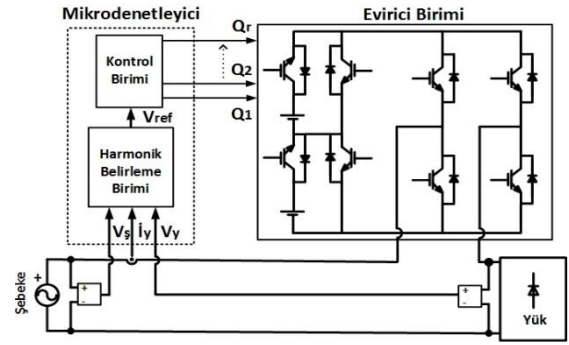
Anahtar kelimeler: Seri aktif güç filtresi, çok seviyeli evirici, kontrol algoritması, THB.

1. Giriş

Güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler doğrusal olmayan yüklerin kullanımını arttırmıştır. Bu yüklerin kullanımındaki artış, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin düşmesine ve bundan kaynaklı problemlerin artmasına neden olmaktadır. Pasif harmonik filtrelerin olumsuz özellikleri ve modern hassas yüklerin üretim süreçlerindeki kullanımının artışı, bir güç kalitesi problemi olan akım ve gerilim harmoniklerinin giderilmesinde aktif güç filtrelerini önemli bir ilgi alanı haline getirmiştir.

Harmoniklerin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, rezonansların bastırılması ve gerilim regülasyonu gibi birçok problemin çözümünde uygulama imkanı bulan AGF, esas olarak sisteme bağlantı şekline göre paralel ve seri olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Paralel

AGF, harmonik akım kaynağı gibi davranan doğrusal olmayan yüklerin yarattığı problemlerin giderilmesinde kullanılmaktadır. Genellikle, bir transformatör üzerinden sisteme bağlanan seri AGF ise gerilim harmoniklerini elimine ederek gerilim regülasyonu sağlamaktadır.



Şekil 1: Önerilen seri aktif güç filtresi prensip şeması

AGF, örneklenen yük akım/gerilim dalga şekillerine belirli algoritmalar uygulayarak referans akım/gerilim dalga şeklinin elde edilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Elde edilen referans sinyal, kontrollü yarı-iletken güç anahtarları yardımı ile üretilerek sisteme enjekte edilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, önerilen seri AGF harmonik belirleme, kontrol ve evirici birimi olmak üzere üç bloktan oluştuğu görülmektedir [1].

Harmonik belirleme biriminde, örneklenen sinyallerdeki harmonikleri tespit eden frekans veya zaman domeni tabanlı bir algoritma yürütülmektedir. Ayrık Fourier (DFT), Hızlı Fourier (FFT) ve Kayan Ayrık Fourier (S-DFT) dönüşümleri frekans domeni tabanlı yöntemler olarak AGF uygulamalarında kullanılmaktadır. Zaman domeni yöntemleri ise sabit referans ($\alpha\beta$ -dönüşümü), senkron referans (dq-dönüşümü) ve hibrid ($\alpha\beta/dq$) referans dönüşümleri ile anlık güç teorisi (p-q teorisi) ve yapay sinir ağları tabanlı tekniklerdir [2,3]. Bu birimin çıkışında referans sinyal belirlenmiş olmaktadır.

Kontrol biriminin girişinde, harmonik belirleme biriminde belirlenmiş referans sinyal ve çıkışında ise evirici biriminde kullanılan kontrollü yarı-iletken güç anahtarlarına ait anahtarlama sinyalleri bulunmaktadır. Bu amaçla, Darbe Genişlik Ayarı (DGA), Sinüzoidal DGA, histerezis kontrol ve son zamanlarda dijital sinyal işleme uygulamalarında

sıkça kullanılan “dead-beat” adı verilen kontrol tekniklerinin kullanıldığı görülmektedir.

Evirici birimi, belirlenen referans sinyale göre filtre çıkış geriliminin üretildiği kısımdır. Kontrol biriminden gelen anahtarlama sinyalleri, filtre çıkış gerilimini üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde, yarı-iletken güç anahtarları sayısı azaltılarak uygulanan kontrol yönteminin karmaşıklığını ortadan kaldırmaya yönelik farklı evirici birimlerine sahip birçok çalışma yapılmıştır [4]. Anahtarlama frekansı, yarı-iletken güç anahtarları üzerindeki dv/dt gerilim stresi, verim, elektromanyetik etkileşim, harmonik bozunum ve çıkış filtresi gerekliliği gibi birçok özellik de dikkate alındığında çok seviyeli evirici topolojilerinin AGF uygulamalarında sıklıkla tercih edildiği görülmüştür [5-7]. Ayrıca, çok seviyeli eviriciler sinüs formunda çıkış gerilimi üretebilmenin yanında istenilen harmoniklere sahip çıkış gerilimi üretebilmektedir. Literatürde diyot kenetlemeli ve flying-kapasitörlü çok seviyeli evirici tabanlı aktif güç filtrelerini konu alan çalışmaların bulunmasına karşın, AGF uygulamalarında en sık karşılaşılan topolojinin kaskat bağlı çok seviyeli H-köprü evirici olduğu belirlenmiştir. Bu evirici topolojisinin AGF çalışmalarında tercih edilmesinin nedenleri arasında yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalara elverişli olması, anahtarlama elemanı üzerindeki dv/dt gerilim stresinin az olması ve çıkış gerilimi toplam harmonik bozunum değerinin düşük olması gösterilebilir [8-10].

Bu çalışmada, seri AGF evirici birimi olarak kullanılan kaskat bağlı çok seviyeli eviricinin tanıtımı ve geliştirilen kontrol algoritması ele alınmıştır. Farklı seviye modülü sayısına sahip evirici birimleri ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarına ait sonuçlara göre, elde edilen tetikleme sinyalleri ve çıkış gerilimi geliştirilen stratejinin düzgün şekilde çalıştığını doğrulamaktadır. Ayrıca, deneysel ortamda, bir seri AGF uygulaması da yapılarak simülasyon çalışmaları doğrulanmıştır.

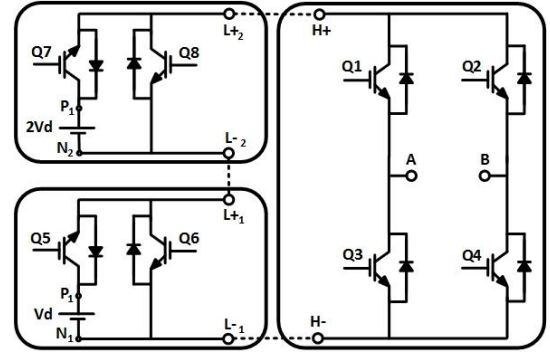
2. Kaskat Bağlı Çok Seviyeli Evirici

Seri AGF gerilim harmonikleri, gerilim çökmeleri ve gerilim dalgalanmaları gibi güç kalitesi problemlerinin giderilmesi için kullanılmaktadır.

Filtre çıkış dalga şeklinin üretilebilmesi için, kaynak gerilimi ile yük akımı ölçümleri anlık olarak kullanılmaktadır. Belirlenen referans sinyal, kontrol biriminde işlenerek evirici tetikleme sinyalleri oluşturulmaktadır.

Şekil 2’de AGF uygulaması için kullanılacak kaskat bağlı çok seviyeli eviricinin prensip şeması

verilmiştir. Evirici, temel olarak seviye modülü ve H-köprü modülü olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır [11].



Şekil 2: 7 seviyeli evirici için verilen prensip şeması

Çıkış gerilimi seviye sayısı (n), seviye modülü sayısı (m) ve anahtarlama elemanı sayısı (r) olmak üzere; önerilen çok seviyeli eviricide elde edilebilecek en yüksek seviye sayısı,

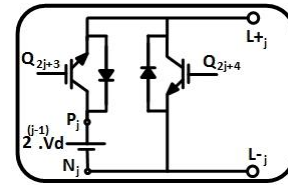
$$n = 2^{(m+1)} - 1 \quad (1)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Seviye modülü sayısına bağlı olarak devrede kullanılan anahtarlama elemanı sayısı ise,

$$r = 2m + 4 \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici yapısını oluşturan modüllerden biri olan seviye modülünün prensip şeması Şekil 3’te görülmektedir. Seviye modülü, 2 anahtarlama elemanı ve 1 kaynaktan meydana gelmektedir.



Şekil 3: Seviye modülü prensip şeması

Birinci seviye modülünde kullanılacak kaynağın gerilimi (V_d), çıkış geriliminde istenilen seviye sayısı ve maksimum gerilim değerine göre (3) denklemi kullanılarak bulunmaktadır. V_d gerilimine, birinci seviye modülü gerilimi veya temel seviye gerilimi adı verilmektedir. Kaskat bağlanacak diğer seviye modüllerindeki gerilim kaynaklarının değeri, temel seviye geriliminin $2^{(j-1)}$ katı olmaktadır.

$$V_d = \frac{2 \cdot V_{\max}}{n - 1} \quad (3)$$

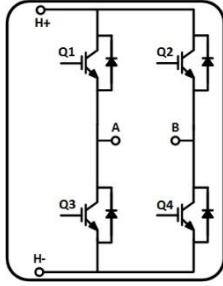
Seviye sayısına bağılı olarak kullanılacak seviye modülü sayısı (m) ise (1) denkleminden çekilerek,

$$m = \lceil \log_2(n+1) \rceil - 1 \quad (4)$$

şeklinde bulunabilmektedir. Her bir seviye modülünde bulunan kaynağın gerilimi ise $2^{(j-1)}V_d$ olarak ifade edilmektedir. Burada j, seviye modülü sayısı olmak üzere;

$j = 1, 2, 3, \dots, m$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Şekil 4'te H-köprü modülünün prensip şeması görülmektedir. H-köprü modülünün yapısı geleneksel H-köprü evirici yapısındadır. H-köprü modülü, çok seviyeli eviricinin sabit olan kısmıdır. Seviye sayısını arttırmak amacıyla geleneksel H-köprü yapıya birbirine seri bağılı seviye modülleri Şekil 2'de görüldüğü gibi bağlanmaktadır.



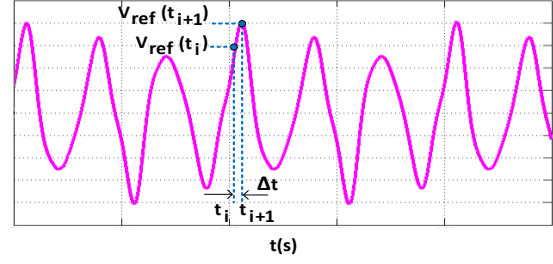
Şekil 4: H-köprü modülü prensip şeması

3. Geliştirilen Kontrol Algoritması

Bölüm 2'de bahsedilen evirici yapısı ile seviye sayısı kolaylıkla arttırılabilmekte ve bu sayede düşük toplam harmonik bozunum (THB) değerine sahip çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Aynı zamanda, bu topoloji ile çıkışta istenilen harmonik bileşenlere sahip gerilim dalga şekli de üretilebilmektedir. Tetikleme sinyallerinin elde edilmesi amacıyla geliştirilen kontrol algoritması ile istenen çıkış gerilimi kolaylıkla oluşturulmaktadır. Bu amaçla, öncelikle istenilen harmonik bileşenleri içinde barındıran referans gerilim sinyalinin tanımlanması gerekmektedir [12]. Tüm harmonik bileşenlerin olduğu referans gerilim (5) denklemindeki gibi tanımlanmaktadır;

$$V_{ref} = \frac{V_{dc}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (5)$$

Geliştirilen kontrol algoritmasını açıklamak amacıyla örnek bir referans gerilim sinyali seçilmiştir. Seçilen örnek referans gerilim sinyalinin zamana göre değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: Örnek referans gerilim sinyalinin zamana göre değişimi

Şekil 5'te görülen Δt , anahtarlama sinyallerinin örnekleme zamanını tanımlamaktadır. Örnekleme zamanı ne kadar küçük seçilirse elde edilen çıkış gerilimi, referans gerilim sinyaline o kadar çok benzemektedir. Örnekleme zamanı, çıkış gerilimi temel harmoniğinin frekansı ve seviye modül sayısına bağılı olarak değişmektedir. (6) denklemdeki eşitlik kullanılarak temel harmoniğinin frekansı ve seviye modülü sayısına bağılı olarak örnekleme zamanının maksimum değeri (t_{max}) bulunabilmektedir. Evirici çıkış geriliminin referans gerilim sinyaline yakın çıkmasının istenildiği durumlarda örnekleme zamanı, t_{max} değerine göre oldukça küçük seçilmelidir [12].

$$t_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2^{(m+1)} - 2}\right) \cdot (2\pi \cdot f_f)^{-1} \quad (6)$$

$$t_{sample} = \Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (7)$$

$$t_{sample} \ll t_{max} \quad (8)$$

Referans gerilim sinyalinin (V_{ref}) anlık değerleri için anahtarlama elemanlarının tetikleme sinyalleri üretilmektedir. Sistemde kullanılan kontrollü yarı-iletken güç anahtarlarının tetikleme sinyallerine ait eşitlikler denklem (9) ve (10)'da verilmiştir.

$$Q_0(t) = V_{ref}(t) \mod 2 \quad (9)$$

$$Q_1(t) = \left(\frac{V_{ref}(t) - (V_{ref}(t) \mod 2)}{2} \right) \mod 2 \quad (10)$$

Bu denklemler, seviye modülü numarasına bağılı olarak genelleştirilebilir. Tetikleme sinyali denkleminin genelleştirilmiş hali (11) denkleminde verilmiştir.

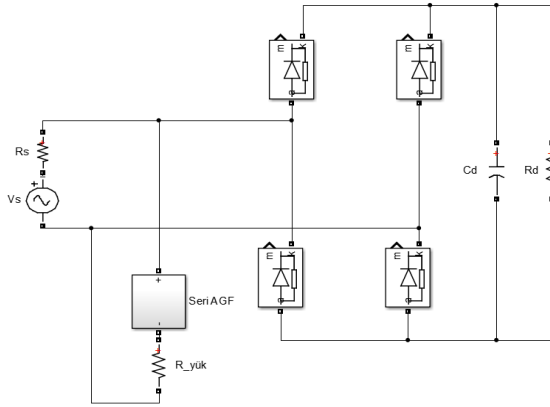
$$Q_{(k-1)}(t) = \left(\frac{V_{ref}(t) - (V_{ref}(t) \mod 2^{(k-1)})}{2^{(k-1)}} \right) \mod 2 \quad (11)$$

(11) denklemi kullanılarak, eviricinin seviye modüllerinde kullanılan kontrollü yarı-iletken güç anahtarlarının tetikleme sinyalleri kolaylıkla elde edilmektedir.

Elde edilen tetikleme sinyalleri ile Şekil 5'te görülen referans gerilim sinyaline benzer bir çıkış gerilimi üretilebilmektedir. (11) denklemi kullanılarak oluşturulan tetikleme sinyallerinin anahtarlama elemanlarına uygulanması sonucunda üretilen çıkış geriliminin, belirlenen referans sinyale istenildiği kadar yakınsaması, seviye modülü sayısı artırılarak kolaylıkla sağlanabilmektedir.

4. Simülasyon Çalışması

Şekil 6'da, Matlab Simulink'de yapılan simülasyon çalışmasına ait devre şeması görülmektedir. Doğrusal yükü besleyen harmonikli gerilim, doğrultucunun kaynaktan çektiği harmonikli akımın kaynak empedansı üzerinde yarattığı gerilim düşümü ile sağlanmıştır.



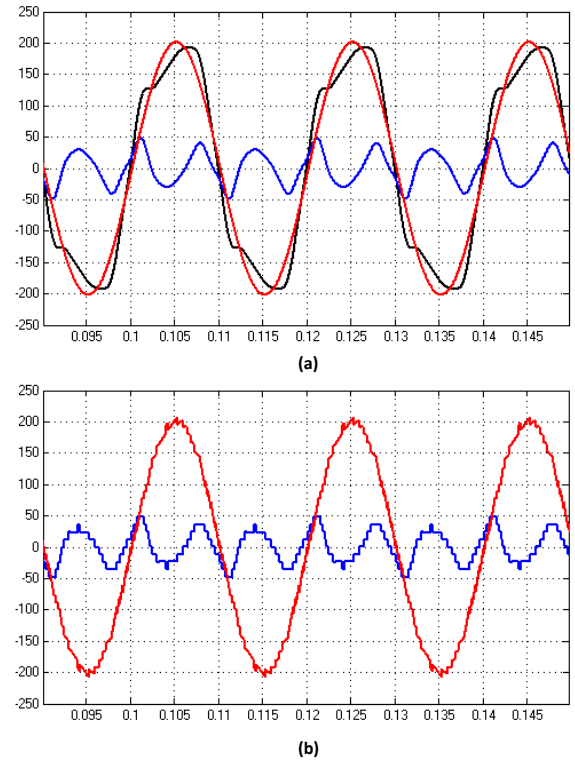
Şekil 6: Seri AGF uygulamasına ait simülasyon çalışmasının devre şeması

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici tabanlı seri AGF için geliştirilen kontrol algoritması, seviye modülü sayısı farklı olan iki evirici bloğuna uygulanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında, harmonikli bir gerilim ile beslenen doğrusal yüke seri bağlanan AGF ile yük geriliminin sinüzoidal hale getirilmesi amaçlanmıştır. 3 seviye modülü ile yapılan uygulamada harmonikli sistem gerilimi, temel bileşeni ve diğer harmonik bileşenlerinin toplam dalga şekli Şekil 7.a'da ve harmonik eliminasyonu yapıldıktan sonraki yük gerilimi ile evirici çıkış gerilimi Şekil 7.b'de görülmektedir. Aynı yük durumu için 5 seviye modülüne sahip evirici birimi kullanılarak elde edilmiş sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, geliştirilen kontrol algoritması ile elde edilen evirici çıkış geriliminin, referans sinyale benzediği ve yük geriliminin sinüzoidal hale geldiği görülmektedir.

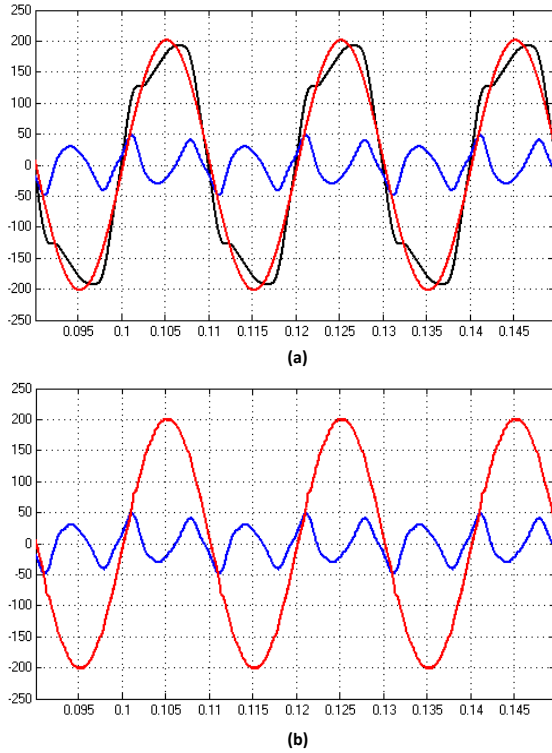
Yapılan simülasyon çalışmasında, tetikleme sinyallerinin elde edilmesinde kullanılan kontrol algoritması ile gerilim dalga şeklindeki %18,47'lik THB değeri üç seviye modülü kullanılarak 2.69'a, beş seviye modülü kullanılarak %1.27'ye kadar düşürülmüştür.

5. Deneysel Çalışma

Şekil 6'da görülen üç seviye modülüne sahip eviricinin kullanıldığı seri AGF uygulamasına ait simülasyon çalışması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, gerilim dalga şekli değişimleri, Fluke 225C ScopeMeter kullanılarak gözlemlenmiş ve THB değerleri ölçülmüştür.

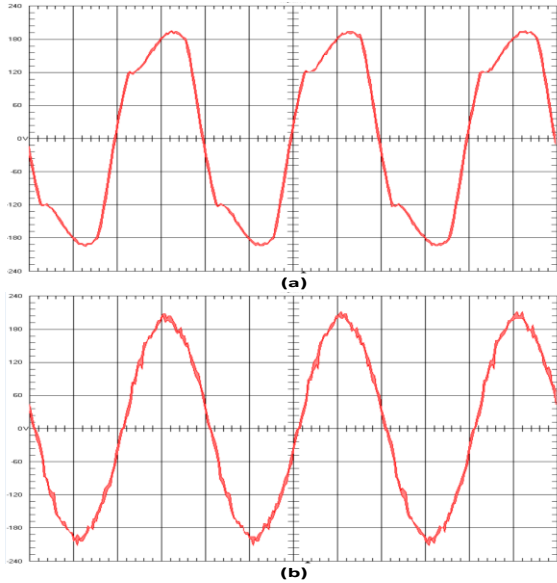


Şekil 7: Üç seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen seri AGF uygulaması



Şekil 8: Beş seviye modülüne sahip evirici ile gerçekleştirilen seri AGF uygulaması

Doğrusal yükü besleyen gerilimin değişimi Şekil 9.a’da verilmiştir. Bu gerilimin THB değeri %18,47 olarak ölçülmüştür. Evirici biriminde üç seviye modülü kullanılarak gerçekleştirilen seri AGF uygulamasında, doğrusal yüke uygulanan gerilim Şekil 9.b’deki gibi düzeltilmiştir. Filtrelenmiş gerilimin THB değerinin %3,51’e düşürüldüğü kullanılan taşınabilir osiloskop ile gözlemlenmiştir.



Şekil 9: Seri AGF uygulamasından önce ve sonra doğrusal yüke ait gerilimin değişimi

5. Sonuçlar

Aktif güç filtreleri, doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artmasına paralel olarak güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kaskat bağlı çok seviyeli evirici tabanlı seri AGF için geliştirilen kontrol algoritması tanıtılmıştır. Simülasyon çalışmasında, tetikleme sinyallerinin elde edilmesinde kullanılan kontrol algoritması ile gerilim dalga şeklindeki %18,47’lik THB değeri üç seviye modülü kullanılarak 2.69’a, beş seviye modülü kullanılarak %1.27’ye kadar düşürülmüştür. Deneysel çalışmada ise üç seviye modülü kullanıldığı durumda %18,47’lik THB değeri %3.51’e düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarının sonuçları, kontrol algoritmasının geçerliliğini ve kullanılan evirici topolojisindeki seviye modülü sayısının önemini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] İ. Kocabaş, O. Uçak ve A. Terciyanlı, “DSP Tabanlı Gerilim Kaynaklı Şönt Aktif Güç Filtresi Uygulaması”, ELECO 2006, Bursa, Türkiye, s:171-175, 2006.
- [2] Y.F. Wang ve Y.W. Li, "Three-Phase Cascaded Delayed Signal Cancellation PLL for Fast Selective Harmonic Detection", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Cilt: 60, No: 4, s:1452-1463, 2013.
- [3] Y.F. Wang ve Y.W. Li, "A Fundamental and Harmonic Component Detection Method for Single-Phase Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Cilt: 28, No: 5, s:2204-2213, 2013.
- [4] V. Khadkikar, "Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview", IEEE Trans. on Power Electronics, Cilt: 27, No: 5, s:2284-2297, 2012.
- [5] F. S. Kang, S. J. Park, S. E. Cho, C. U. Kim ve T. Ise, "Multilevel PWM Inverters Suitable for the Use of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Cilt: 20, No: 4, s:906-915, 2005.
- [6] M. Ortuzar, R. Carmi, J. Dixon ve L. Moran, "Voltage Source Active Power Filter, Based on Multi-Stage Converter and Ultra Capacitor DC-Link", The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2003), s:2300-2305, 2003.
- [7] C. Junling, L. Yaohua, W. Ping, Y. Zhizhu ve Zuyi, D. "A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation with Capacitor Voltage Balancing Control of Cascaded Multilevel Inverter for High Power Active Power Filters", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008), s:569-573, 2008.

- [8] W. Madhukar ve P. Agarwal, "Comparison of Control Strategies for Multilevel Inverter based Active Power Filter used in High Voltage Systems", Power Electronics Drives and Energy Systems, s:1-6, 2010.
- [9] Valdez-Fernandez, A.A., Martinez-Rodriguez, P.R., Escobar, G., Limones-Pozos, C.A. ve Sosa, J.M., "A Model-Based Controller for the Cascade H-Bridge Multilevel Converter Used as a Shunt Active Filter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Cilt: 60, No: 11, s:5019-5028, 2013.
- [10] Beşer, E., Arifoğlu, B., Çamur, S. ve Kandemir Beşer, E., "A Novel Design and Application of A Single Phase Multilevel Inverter", International Review of Electrical Engineering, Cilt: 4, No: 1, s:7-13, 2009.
- [11] E. Beşer, Anahtarlama Elemanı Sayısı ve Harmonik Optimizasyonu ile Bir Fazlı Çok Seviyeli Evirici Tasarımı, Kocaeli Üniversitesi FBE, Doktora Tezi, Kocaeli, 2009.
- [12] E. Beşer, B. Arifoğlu, S. Çamur ve E. Kandemir Beşer, "Design and Application of a Single Phase Multilevel Inverter Suitable for Using as a Voltage Harmonic Source", Journal of Power Electronics, Cilt: 10, No: 2, s:138-145, 2010.