

Yüksek Harmonik Yalıtım Başarılı Tek-Faz Seri Etkin Süzgeç

Osman Selçuk Şentürk¹

Ahmet Hava²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

¹e-posta: ossenturk@eee.metu.edu.tr

²e-posta: hava@metu.edu.tr

Özet

Seri etkin süzgeç (SES), doğrusal olmayan harmonik gerilim kaynağı türündeki RC yüklü diyotlu doğrultucu gibi yüklerin neden olduğu harmonik akımlarının önlenmesi için doğrudan kullanılabilen bir güç elektroniği devresi olup, tek-faz veya üç-faz olarak kullanılabilir. Bu çalışmada¹, çıkışında kondansatör ve yük direnci bulunan 2.5-kW tek-faz diyotlu doğrultucu yük için tasarlanan tek-faz seri etkin süzgeç (TFSES) ele alınmıştır. Güç devresi; gerilim kaynaklı evirici, anahtarlama dalgacığı süzgeci (ADS) ve seri transformatörden oluşmaktadır. Devrenin denetiminde yük harmonik gerilimini şebekeden yalıtım için şebeke akımı ve yük gerilimi ölçülmekte, bu işaretler temel ve harmonik bileşenlerine ayrıştırılmakta ve denetim algoritmalarında kullanılmaktadır. Ayrıştırma hızı ve doğruluğu TFSES başarımını önemli ölçüde etkiler. Bu çalışmada, TFSES'in harmonik yalıtım başarımını ve dinamik tepkisini geliştirmek üzere özgün bir yük gerilimi işaret ayrıştırma yöntemi olan mutlak değer yöntemi (MDY) önerilmiştir. MDY, geleneksel alçak/yüksek geçirgen süzgeç işaret ayrıştırma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. İki yöntem için yapılan benzetimler ve deneyler MDY'li TFSES'in üstün başarımını göstermiştir.

1. Giriş

Son yıllarda güç kalitesi sorunlarının önüne geçmek için artan oranda güç elektroniği çözümleri kullanılmaktadır. Bu yaygınlaşmada elektrik şebekesi otoritelerinin tepkin (reaktif) güç ve harmonik kısıtlamaları olduğu kadar elektrik tüketicilerinin şebekedeki güç kalitesi sorunlarını (çökme, harmonik vb.) kendi yüklerinden yalıtma ihtiyacı da büyük rol oynamıştır. Kesintisiz güç kaynakları, gerilim regülatörleri ve etkin süzgeçler bu çözümlerin başında gelmektedir. Etkin süzgeç türlerinden biri de seri etkin süzgeçtir (SES). SES üzerine yapılan çalışmalar, yükten kaynaklanan harmonikler yalıtma özelliği üzerine ve şebeke kaynaklı sorunları çözmeye yönelik dinamik gerilim düzeltici (dynamic voltage restorer) özelliği üzerine olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [1], [2]. Literatürde iki özelliğin birlikte kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur [3].

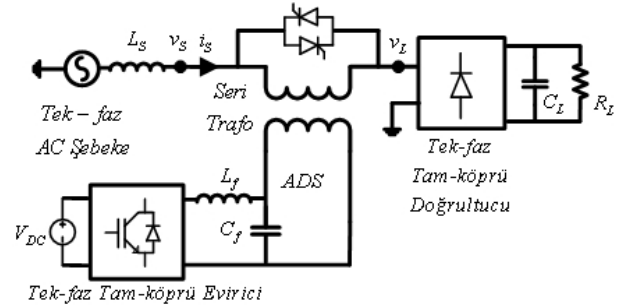
SES'i paralel etkin süzgeçten (PES) ayıran temel fark ilki yüke seri gerilim kaynağı olarak davranırken diğerinin yüke paralel akım kaynağı olarak çalışmasıdır [1]. Özellikle, DC tarafında sadece kondansatör süzgeç bulunan diyotlu doğrultucu gibi harmonik gerilim kaynağı türündeki yükleri AC ve DC indüktanslar ile harmonik akım kaynağı türüne dönüştürmeksizin bu yükleri doğrudan uygulanabilmesi ile SES, pasif ve paralel etkin süzgeçlerden ayrılmaktadır. Ayrıca, SES, şebeke kaynaklı sorunların (dengesizlik, çökme, yükselme, dalgalanma ve harmonik) yüke yansımaları

doğrudan önleyebilmektedir [2], [3]. SES, üç-faz sistemler için tasarlanıp uygulandığı gibi tek-faz sistemler için de kullanılabilir [4], [5].

Bu çalışmada tek-faz seri etkin süzgeç (TFSES), çıkışında kondansatör süzgeç ve ona paralel yük direnci bulunan tek-faz diyotlu doğrultucu yük için tasarlanmıştır. TFSES'in güç devresi; gerilim kaynaklı tam-köprü IGBT evirici, anahtarlama dalgacığı süzgeci (ADS) ve seri transformatör ile kurulmuştur. Denetim algoritmaları tek-faz işaretler kullanılıp harmonik ve temel bileşen ayrıştırması yapılarak şebeke frekansına senkron koordinatlarda gerçekleştirilmiştir. Yük gerilimi dalga şeklinin özelliklerini kullanarak yük gerilimi temel bileşen ve harmonik işaretlerinin ayrıştırılması için özgün bir yöntem olan mutlak değer yöntemi (MDY) önerilmiştir. Bu yöntem, senkron koordinatlarda alçak veya yüksek geçirgen süzgeçler kullanarak yük gerilimi işaretini ayrıştıran geleneksel yöntem (GY) ile karşılaştırılmış ve MDY'nin TFSES'in başarımını yükselttiği gösterilmiştir. MDY'nin etkinliği, benzetimle doğrulanmış ve deneysel olarak ispatlanmıştır.

2. TFSES ve Yük Devresi

TFSES'in uygulama devresi Şekil 1'de verilmiştir. Devrede yük olarak DC barasında kondansatör süzgeç ve direnç bulunan tam-köprü diyotlu doğrultucu bulunmaktadır. TFSES'in güç devresi ise üç temel elemandan oluşmaktadır. Bunlar; tek-faz gerilim kaynaklı tam-köprü IGBT evirici, ADS ve seri transformatördür. Evirici, çıkışında kHz mertebesindeki frekansta dikkörtgen darbelerden oluşan bir AC gerilimi darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile üretir. Alçak geçirgen süzgeç özellikli kondansatör-indüktans devresinden oluşan ADS, eviricinin çıkışındaki gerilim darbelerinin yüksek frekanslı bileşenlerini süzer. Böylece, bu bileşenlerin şebeke ve yüke yaratacağı gürültüyü engeller. Seri transformatör, evirici tarafından oluşturulup ADS ile süzölmüş gerilimlerin şebeke ile yük arasında seri olarak yalıtımlı bir şekilde uygulanmasını sağlar.



Şekil 1: TFSES devresi.

¹ TÜBİTAK EEE Araştırma Grubu tarafından 104E141 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

3. TFSES'in Denetimi

TFSES'in denetimi üç kısımda yapılır; harmonik yalıtım denetimi (HYD), temel bileşen denetimi (TBD) ve ADS rezonansı bastırma denetimi (RBD). HYD, şebeke ile yük arasındaki harmonik akımı engellemeyi amaçlar. TBD, şebeke gerilimindeki temel bileşen bozulmalarının (çökme, yükselme vb.) yüke yansımaları engeller. RBD ise ADS rezonans frekansının uyarılmasını engelleyecek etkin sönümlemeyi yapmaktan sorumludur [5].

HYD için üretilen gerilimin (v_h^*) denklemi (1)'de verilmiştir. Denetim, şebeke akım harmoniği geribeslemesi ve yük gerilimi doğrudan beslemesine dayanır. Akım geribeslemesi, geribesleme kazancına bağlı olarak harmonik frekanslarda sanal bir direnç gibi davranarak harmonik yalıtımını sağlar. Doğrudan besleme ise harmonik yalıtım başarımını artırır. TBD, oransal-integral (PI) denetecinin yük gerilimi temel bileşeni büyüklüğündeki (V_{L1}) hataya etkimesi ile (2)'ye göre yapılır. Düzeltme gerilimi büyüklüğü V_f^* den devreye uygulanacak sinüs gerilim dalgası v_f^* faz açısı bilgisi (θ) ile üretilir. RBD ise ADS kondansatörü akımının (i_C) oransal kazanç (K_d) ile yükseltgenip (3) geribeslemesi ile yapılır. Sonuç olarak elde edilen TFSES referans gerilimi (4)'te verilmiştir.

$$v_h^* = K_h \cdot \hat{i}_{Sh} - \hat{v}_{Lh} \quad (1)$$

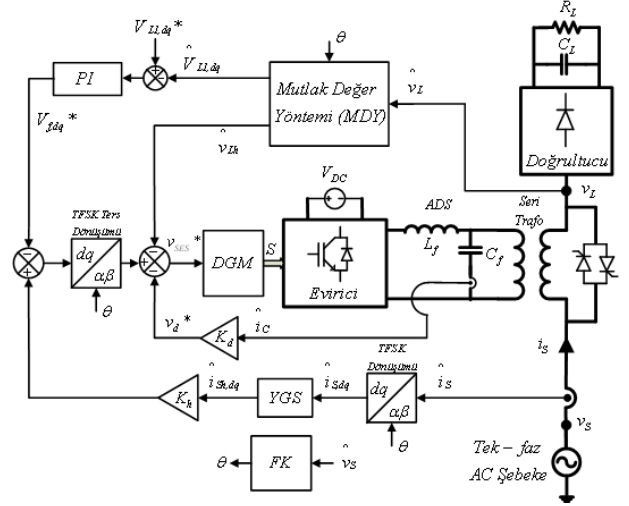
$$V_f^* = \left(K_{p-vf} + \frac{K_{i-vf}}{s} \right) \left(V_{L1}^* - \hat{V}_{L1} \right) \quad (2)$$

$$v_d^* = K_d \cdot i_C \quad (3)$$

$$v_{SES}^* = v_h^* - v_f^* - v_d^* \quad (4)$$

Anlatılan denetimin TFSES devresinde uygulanması Şekil 2'de görülmektedir. İşaret ayrıştırma yöntemleri ve deneteciler ile üretilen v_{SES}^* 'ten evirici anahtarları için aç-kapa işaretleri (S), tek-kutuplu DGM kullanılarak elde edilir [6]. İşaret ayrıştırma için gerekli şebeke gerilimi faz açısı bilgisini (θ) faz kilidi (FK) üretir [7].

Ölçülen akım ve gerilim büyüklüklerinin senkron koordinatlarda yüksek geçiren süzgeç (YGS) ya da alçak geçiren süzgeç (AGS) kullanılarak harmonik ve temel bileşen işaretlerine ayrıştırılması yaklaşımı uygulamada yaygın olarak kullanılmakta olup geleneksel yöntem (GY) olarak adlandırılacaktır. Bu çalışmada, şebeke akım harmoniğinin eldesi için GY tek faza uyarlanmış senkron koordinatlar kullanılarak uygulanmıştır [8]. Yük gerilimi işaret ayrıştırması için ise GY veya önerilen mutlak değer yöntemi (MDY) kullanılabilir. GY'de kullanılan süzgeçlerin kesme frekansları düştükçe üretilen işaretlerin doğruluğu artmakta fakat bu işaretler hızlı elde edilememektedir. Örneğin, tek-faz yük durumunda kesme frekansının 10 Hz'in üstüne çıkması, işaretlerin doğruluğunu uygulamada yetersiz hale getirebilmektedir. MDY ile yük gerilimi harmonik işaretinin doğru ve hızlı bir şekilde elde edilmesi sayesinde harmonik yalıtım başarımı GY'ye göre önemli ölçüde arttırılır. Aynı şekilde yük gerilimi temel bileşen işaretinin hızlı eldesi, TFSES'in dinamik tepkime hızını artırır [9].



Şekil 2: TFSES'in denetimi.

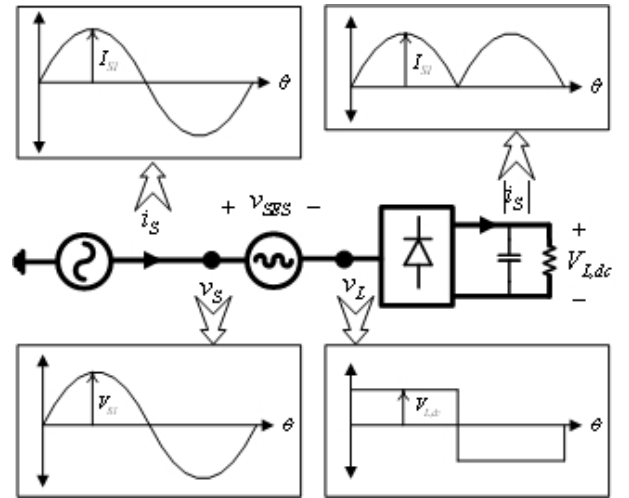
4. Mutlak Değer Yöntemi (MDY)

İdeal şartlarda TFSES harmonik gerilimi yalıtımı yaparken şebeke akımı sinüs ve yük gerilimi kare dalga olur (Şekil 3). Bu durumda etkin (ortalama) güç akışı, şebeke ve yük arasında olup TFSES sadece tepkin harmonik güç ile ilgilidir. Yarım şebeke gerilimi periyodundaki toplam etkin güç akışının şebeke ve yük arasında eşitlenmesi (5) ile şebeke gerilimi temel bileşeni ile yük gerilimi arasındaki ilişki (6) bulunur. Bu oran, yük geriliminin mutlak değeri ve faz açısı bilgisi kullanılarak yük gerilimi temel ve harmonik bileşenleri doğrudan elde edilebilir [9].

$$\int_0^{\pi} P_S(\theta) d\theta = \int_0^{\pi} P_L(\theta) d\theta$$

$$\int_0^{\pi} V_{S1} \sin \theta \cdot I_{S1} \sin \theta d\theta = \int_0^{\pi} V_{L,dc} \cdot I_{S1} \sin \theta d\theta \quad (5)$$

$$V_{S1} = \frac{4}{\pi} V_{L,dc} \quad (6)$$



Şekil 3: TFSES devresinde ideal dalga şekilleri.

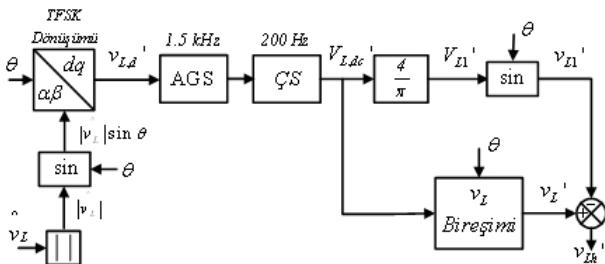
Pratikte yük gerilimi üzerinde tek-faz güç akışından dolayı 100 Hz'lik dalgalanma vardır ve tamamen harmonik yalıtımı yapılamayacağı için yük geriliminin sıfır kesme noktalarında dv/dt 'ler sınırlıdır. Bu nedenle, yük geriliminin mutlak değerinin alınması ile tamamen saf bir DC işaret elde edilememektedir ve bu işaretin işlenmesi gerekir.

MDY'nin yük gerilimi için uygulanması Şekil 4'te görülmektedir. MDY'nin işaret işleme adımları, bir sonraki bölümde ayrıntısı açıklanacak olan Şekil 5'teki benzetim dalga şekilleri yardımı ile anlatılacaktır. Öncelikle, harmonik yalıtımın yapılması ile kare dalgaya yaklaşan yük geriliminin (a) mutlak değeri alınır (b). Bu işaret ve FK'de elde edilen şebeke frekansında sinüs işaretin ($\sin\theta$) çarpılması sonucunda yük geriliminin temel bileşen frekansındaki bileşenin $\pi/4$ katı (c) bir sinüs dalga elde edilir (c). Ayrıca, bu çarpım sıfır kesme noktalarındaki sınırlı dv/dt 'lerden kaynaklı bozulmaları büyük ölçüde eler. Bu sinüs işaret, tek fazda senkron koordinat (TFSK) dönüşümünden geçirilerek DC büyüklüğe çevrilir (d). Yük DC gerilimini temsil eden bu büyüklük üzerindeki dv/dt kaynaklı ve diğer yüksek frekanslı bozulmaları süzmek üzere birkaç kHz mertebesinde AGS ve 200 Hz'lik dalgalanmayı süzmek üzere bir çentik süzgeç (ÇS) kullanılır (e). 200 Hz'lik dalgalanmanın nedeni 100 Hz'de dalgalanma bileşeni bulunan yük geriliminin $\sin\theta$ ile çarpılması ve ardından da TFSK dönüşümünden geçmesidir.

Elde edilen DC bileşen (V_{Ldc}) yük gerilimi düzeltimi için TBD'ye gönderilir. Ayrıca $\sin\theta$ ile yük gerilimi temel bileşen sinüs işareti (v_L) elde edilir (f). V_{Ldc} ve θ kullanılarak yük geriliminin bireşimi 100 Hz'lik dalgalanma olmaksızın kare dalga olarak yapılır (g). Bireşimde, yük geriliminin sıfır kesme noktalarındaki dv/dt değeri güç devresinde elektriksel gerilmeler yaratmayacak şekilde seçilmelidir. Yük gerilimi bireşimi, (7)'de tanımlanan yük gerilimi yükselme zamanı T_r 'nin hesaba katılması ile (8)'de verilmiştir. Üretilen yük gerilimi işaretinden (v_L), v_{Ll} 'in çıkarılması ile yük gerilimi harmonik işareti (v_{Lh}) elde edilir (h).

$$\frac{dv_L'}{dt} = \frac{V_{L,dc}}{T_r} \quad (7)$$

$$v_L'(\theta) = V_{L,dc} \begin{cases} \frac{\theta}{\omega_e T_r} & ; 0 \leq \theta < \omega_e T_r \\ 1 & ; \omega_e T_r \leq \theta < \pi - \omega_e T_r \\ \frac{\pi - \theta}{\omega_e T_r} & ; \pi - \omega_e T_r \leq \theta < \pi + \omega_e T_r \\ -1 & ; \pi + \omega_e T_r \leq \theta < 2\pi - \omega_e T_r \\ \frac{\theta - 2\pi}{\omega_e T_r} & ; 2\pi - \omega_e T_r \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

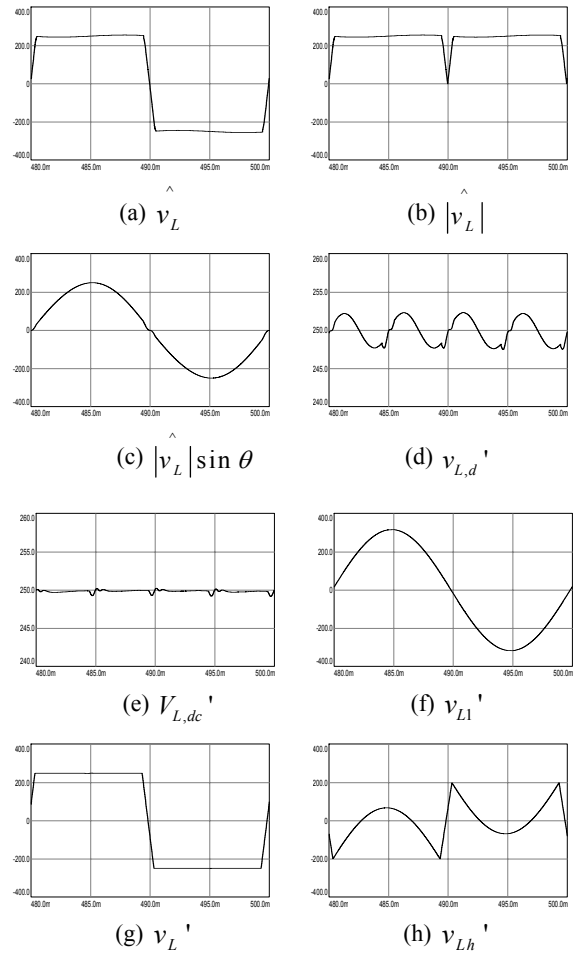


Şekil 4: Mutlak değer yöntemi.

5. Bilgisayarla Benzetim Sonuçları

TFSES'in öngörülen başarımının doğrulanması için Şekil 1'deki uygulama devresi benzetim ortamında modellenmiştir. Yük olarak 2.5-kW'lık diyotlu doğrultucu kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları Ansoft-Simplorer'da yapılmıştır ve benzetimlerde kullanılan parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Önce MDY ile üretilen yük gerilimi benzetim dalga şekillerine yer verilmiştir. Sonrasında TFSES'in harmonik yalıtım başarımı ve dinamik tepkisi incelenmiştir. Yük geriliminin ayrıştırılmasında GY ve MDY kullanıldığı durumlar ayrı ayrı incelenmiştir. MDY ile elde edilen dalga şekilleri Şekil 5'te işlem sırasıyla verilmiştir. Yük gerilimi bireşimi ile elde edilen v_L' ile ölçülen (gerçek) v_L işaretlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5: MDY dalga şekilleri.

TFSES devreye girmeden önce şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi dalgaları Şekil 6'da görüldüğü gibi diyotlu doğrultucu tarafından bozulmuştur. Bu koşullarda şebeke akımı, %97.01 ve şebeke gerilimi, %2.42 toplam harmonik bozulma (THB) değerine sahiptir. Denetim algoritmasında GY'nin kullanıldığı TFSES devreye girdiğinde elde edilen dalga şekilleri Şekil 7'de verilmiştir. Şebeke akımı ve gerilimi dalgaları sinüs dalgaya yaklaşırken yük gerilimi dalgasının kare dalgaya yaklaştığı görülmektedir. Bu durumda THB değerleri sırasıyla %12.27 ve %0.79

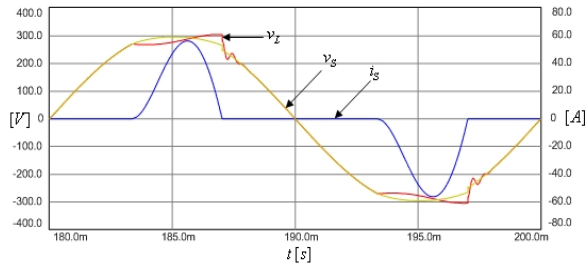
olmaktadır. MDY'nin kullanılması ile elde edilen şebeke akımı ve gerilimi dalga şekilleri (Şekil 8) harmoniklerden daha arınmış olup THB'leri ise sırasıyla %6.53 ve %0.73 olmaktadır. Her iki yöntemle de güç katsayısı (PF) 0.70'den 0.95'in üzerine çekilmektedir. Böylece güç kalitesi önemli ölçüde iyileşmektedir.

TFSES'in dinamik tepkisi ise yükün ani olarak anma değerinden %120'ye çıkması (%20 artırılması) durumu için değerlendirilmiştir. GY ve MDY ile elde edilen şebeke akımı ve yük DC bara gerilimi dinamik tepkileri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. MDY'nin çok daha hızlı tepkideği şekillerde görülmektedir.

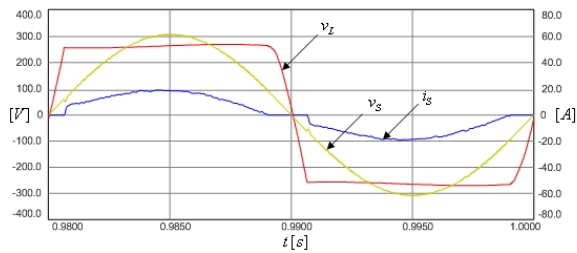
Benzetim ile elde edilen TFSES devreye girmeden önce ve girdikten sonraki şebeke akım ve gerilim THB'leri, şebekeye bağlanma noktasındaki güç katsayıları, yaklaşık tepkime zamanları (ΔT) ve en fazla yük gerilimi çökmeleri (ΔV) Çizelge 2'de sıralanmıştır. Çizelgede görüldüğü gibi TFSES'in harmonik bileşen yalıtımı başarımı ve dinamik başarımı MDY kullanımı ile iyileştirilmiştir.

Çizelge 1: Benzetim parametreleri

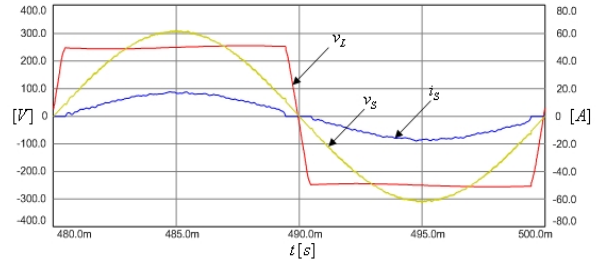
Parametre	Değer
V_S (Şebeke gerilimi)	220 Vrms
L_S (Şebeke kaçak indüktansı)	200 μ H
R_S (Şebeke direnci)	200 m Ω
V_{DC} (Evirici DC bara gerilimi)	400 V
C_{DC} (Evirici DC bara kondansatörü)	2.35 mF
L_F (ADS indüktansı)	2 mH
C_F (ADS kondansatörü)	2.35 μ F
N_1/N_2 (Seri transformatör sarım oranı)	2
R_L (Diyotlu doğrultucu direnci)	24 Ω
C_L (Diyotlu doğrultucu kondansatörü)	2.2 mF
f_c (YGS kesme frekansı)	5 Hz
f_s (Anahtarlama frekansı)	20 kHz



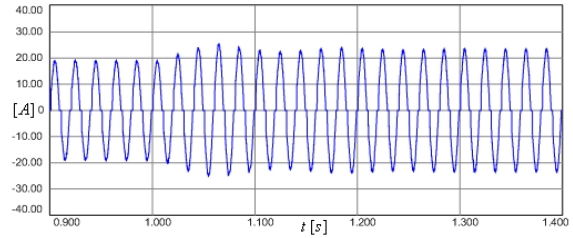
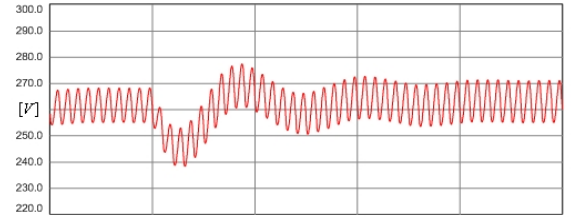
Şekil 6: TFSES'siz şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



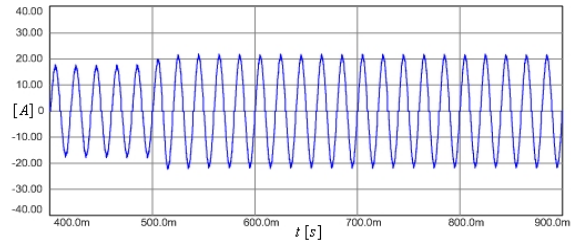
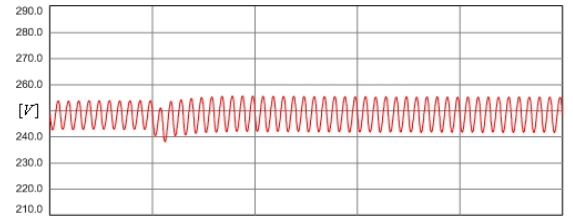
Şekil 7: GY'li şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



Şekil 8: MDY'li şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



Şekil 9: GY'li yük DC bara gerilimi (üst) ve şebeke akımı (alt).



Şekil 10: MDY'li yük DC bara gerilimi (üst) ve şebeke akımı (alt).

Çizelge 2: TFSES başarımı

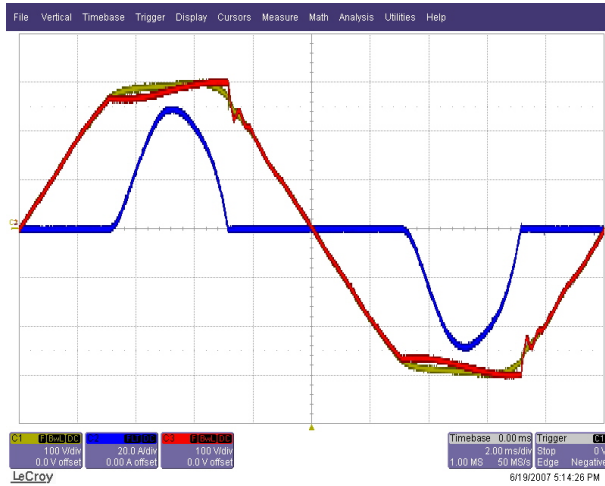
		THB _i (%)	THB _v (%)	PF	ΔT (ms)	ΔV (%)
BENZETİM	-	97.01	2.42	0.700	-	-
	GY	12.27	0.79	0.983	250	5.8
	MDY	6.53	0.73	0.997	50	2.1
DENEY	-	92.4	4.3	0.706	-	-
	GY	20.6	3.2	0.945	250	6.5
	MDY	7.4	2.6	0.996	50	2.0

6. Deneysel Sonuçları

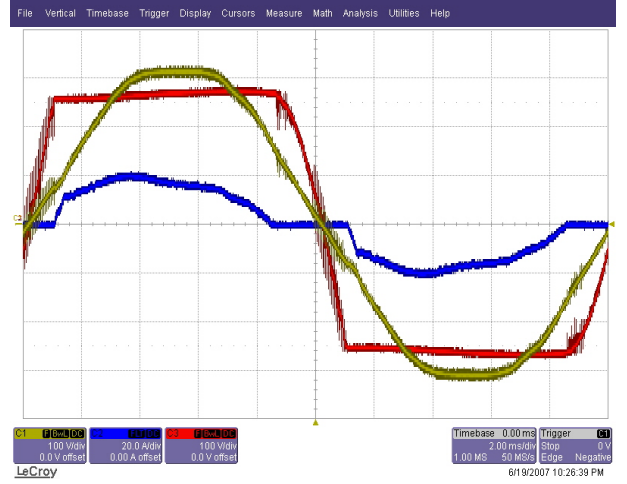
TFSES'in eviricisi Mitsubishi PM75DSA120 akıllı güç modülleri (IPM) kullanılarak üretilmiştir. Eviricinin DC bara gerilimi, üç-faz diyotlu doğrultucu ile sağlanmıştır. Devrenin denetimi, ayrı zamanlı olarak TMS320C2808 sayısal işaret işleyici (DSP) ile yapılmıştır. Deneysel parametreleri Çizelge 1'de verilen benzetim parametreleri ile aynıdır. Dalga şekilleri LeCroy Waverunner 6050A osiloskop ile alınmıştır. Harmonik analizi ise Fluke-43B güç kalitesi analizörü ile yapılmıştır.

TFSES devreye girmeden önce şebeke akım ve gerilim dalgaları Şekil 11'de görülmektedir. Bu koşullarda şebeke akımı, %92.4 ve şebeke gerilimi, %4.3 THB değerine sahiptir. Şebeke gerilimi THB'sinin benzetime göre yüksek olmasının nedeni, şebekeye bağlı diğer yüklerden ve laboratuvar güç sisteminde hattın akım kapasitesinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Şebeke geriliminde çoğu beşinci harmonik olmak üzere %2.6'lık bozulma vardır. Yük gerilimi işaret ayrıştırması için GY kullanılan TFSES'in devreye girmesi ile Şekil 12'de görüldüğü gibi dalgalarındaki bozulmalar azaltılmıştır ve THB'ler %20.6 ve %3.2 olmuştur. Akım THB'sinin benzetim sonuçlarından yüksek olmasının temel nedeni şebeke gerilimindeki beşinci harmonik bozulmasıdır. MDY'nin uygulanması ile elde edilen şebeke gerilimi ve akımı dalga şekilleri Şekil 13'te olup GY'den daha iyi sonuç vermiştir ve THB'ler %7.4 ve %2.6'dır. Çizelge 2'de deneysel olarak bulunan THB_I, THB_V ve güç katsayıları mevcuttur.

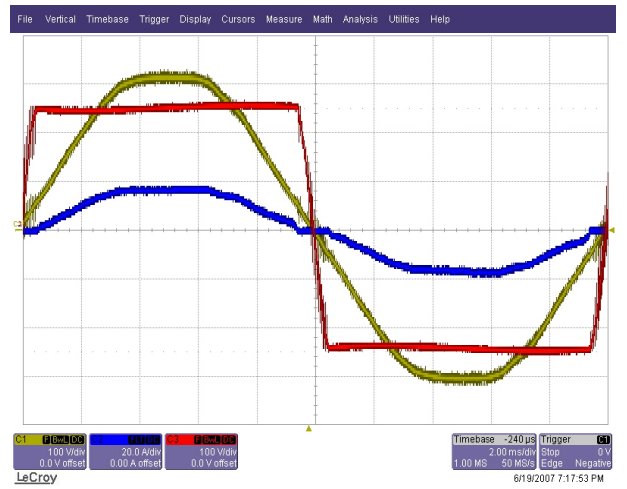
TFSES'in dinamik tepkisini gözlemlemek üzere yük gücü direnç yük bankası ayarları ile anma değerinin yaklaşık %120'sine yükseltilmiştir. GY ve MDY durumları için yük DC bara gerilimi ve şebeke akımı dalga şekilleri Şekil 14 ve 15'te verilmiştir. Çizelge 2'de sıralanan ΔT ve ΔV değerleri MDY'li TFSES'in GY'leden üstün dinamik başarımını göstermektedir. Tepkime hızı beş kat artmış, salınım şiddeti ise yarıya inmiştir. Bu sonuçlar benzetimle elde edilen sonuçlara oldukça yakındır.



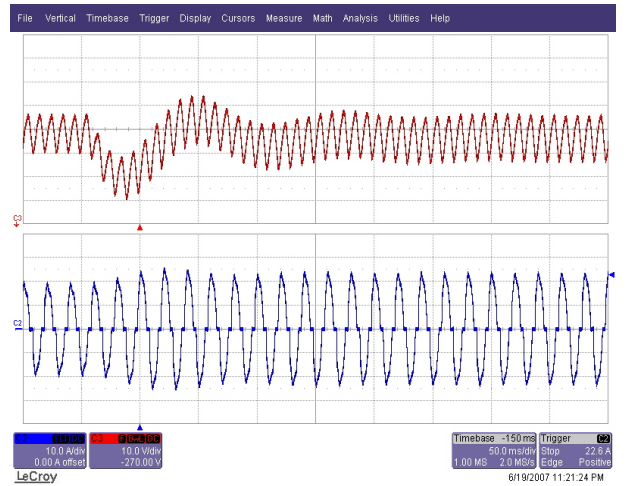
Şekil 11: TFSES'siz şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



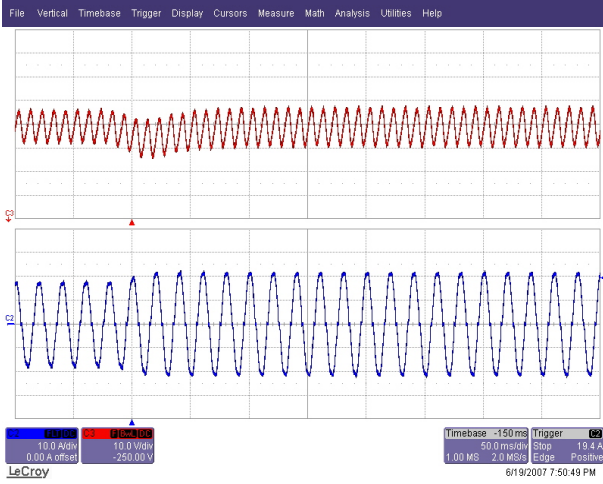
Şekil 12: GY'li şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



Şekil 13: MDY'li şebeke akımı, gerilimi ve yük gerilimi.



Şekil 14: GY'li yük DC bara gerilimi (üst) ve şebeke akımı (alt).



Şekil 15: MDY'li yük DC bara gerilimi (üst) ve şebeke akımı (alt).

7. Sonuçlar

Doğrusal olmayan harmonik gerilim kaynağı türü yükler için doğrudan uygulanabilir etkin süzgeç SES, tek-faz olarak gerçekleştirilmiştir. Yük gerilim harmoniklerini şebekeden yalıtacak şekilde geliştirilen denetimin etkinliğini arttırmak üzere mutlak değer yöntemi (MDY) önerilmiştir. Bu yöntem, geleneksel yöntemle göre yük gerilimi harmonik ve temel bileşen ayrıştırmasını daha hızlı ve doğru yapabilmektedir. Böylece, önerilen yöntem ile hem harmonik yalıtım başarımının hem de TFSES'in dinamik başarımının daha iyileştirilmesi öngörülmüştür. Benzetimler ve deneyler ile TFSES'in başarımı MDY'nin ve GY'nin kullanıldığı durumlar için karşılaştırılmış ve MDY'nin üstünlüğü kanıtlanmıştır. Ek olarak, bu çalışmada TFSES için önerilen denetim ve işaret ayrıştırma yaklaşımları üç-faz SES'e de uygulanabilir niteliktedir [9].

8. Kaynakça

- [1] F.Z. Peng, "Application issues of active power filters," *IEEE Industry Application Magazine*, pp. 21-30, September/October 1998.
- [2] T. Jimichi, H. Fujita, H. Akagi, "Design and experimentation of a dynamic voltage restorer capable of significantly reducing an energy-storage element," *Industry Applications Conference IAS*, Vol. 2, pp. 896-903, October 2005.
- [3] A.D. le Roux, H. T. Mouton, H. Akagi, "Digital control of an integrated series active filter and diode rectifier with voltage regulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 6, pp. 1814-1820, November/December 2003.
- [4] J. Perez, V. Cardenas, V. Pazos, S. Ramirez, "Voltage harmonic cancellation in single-phase systems using a series active filter with a low-order controller," *Power Electronics Congress CIEP*, pp. 270-274, October 2002.
- [5] O.S. Şentürk, A.M. Hava, "Tek-faz seri etkin süzgeç ile yük harmonik gerilimi yalıtımı ve şebeke gerilimi Çökmesi Düzeltimi," *EVK 2007, II. Enerji Verimliliği ve*

Kalitesi Sempozyumu, sayfa 52-56, 17-18 Mayıs 2007, Kocaeli.

- [6] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, Wiley-Hill, 3rd Edition, 2003.
- [7] M.S. Silva, B. M. Lopes, B. J. C. Filho, R. P. Campana, W.C. Boaventura, "Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems," *Industry Applications Conference. IAS*, Vol. 4, pp. 2259-2263, October 2004.
- [8] M. Gonzalez, V. Cardenas, F. Pazos, "DQ transformation development for single-phase systems to compensate harmonic distortion and reactive power," *Power Electronics Congress CIEP*, pp. 177-182, 2004.
- [9] Şentürk, Osman Selçuk, "Series active filter design, control, and implementation with a novel load voltage harmonic isolation method," M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, September, 2007.
- [10] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power systems – a combined system of shunt passive and series active filters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, No.6, pp. 983-990, November/December 1990.
- [11] Z. Pan, F. Z. Peng, S. Wang, "Power factor correction using a series active filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 1, pp. 148-153, January 2005.
- [12] M. Saitou, N. Matsui, T. Shimizu, "A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation," *Industry Applications Conference*, Vol. 2, pp. 1222-1227, October 2003.
- [13] S. Srianthumrong, H. Fujita, H. Akagi, "A DC model for transient analysis of a series active filter integrated with a double-series diode rectifier," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 864-872, May/June 2003.
- [14] S. Srianthumrong, H. Fujita, H. Akagi, "Stability analysis of a series active filter integrated with a double-series diode rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 117-124, January 2002.