

## PARALEL ETKİN SÜZGEÇ İÇİN ANAHTARLAMA DALGACIK SÜZGEÇ TASARIMI

Hasan Özkaya

ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

İnönü Bulvarı 06531 Ankara

ozkaya.hasan@gmail.com

Ahmet M. Hava

ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

İnönü Bulvarı 06531 Ankara

hava@metu.edu.tr

### ÖZET

*Bu çalışmada<sup>1</sup> akım deneteci olarak doğrusal veya histeresiz akım deneteci kullanan üç-fazlı paralel etkin süzgeç için anahtarlama dalgacık süzgeç topolojileri incelenecek ve tasarlanacaktır. Tasarımlar, benzetimle doğrulanacak, başarımları çıkış gücü 10 kW olan diyotlu doğrultucunun harmonik ve tepkin güç kompanzasyonunu yapan paralel etkin süzgeç için deneysel çalışmayla gösterilecektir.*

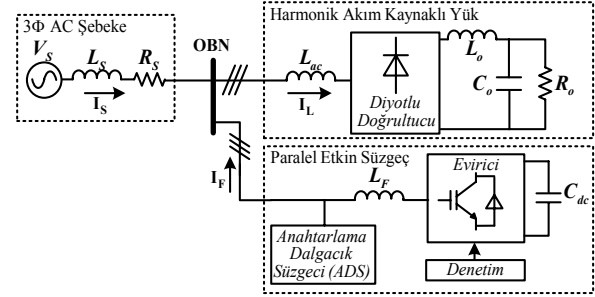
**Anahtar Kelimeler:** Paralel etkin süzgeç, anahtarlama dalgacık süzgeci, tuzak süzgeç, yüksek-geçirgen süzgeç, akım denetimi, doğrusal akım deneteci, histeresiz akım deneteci, darbe genişlik modülasyonu, harmonik

### 1.GİRİŞ

Hız ayarlı motor sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, ve çeşitli elektronik yüklerin giriş katlarındaki diyotlu/tristörlü doğrultucular harmonik akımları ve tepkin güç çeker. Ortak bağlanma noktasında (OBN) gerilim bozulması, iletim hatlarında gerilim düşümü ve enerji kayıpları yaratıp, komşu yüklerle etkileşerek kendinin ya da komşu yüklerin işlevlerini kaybettirerek güç kalitesini bozarlar. Bu sorunların en modern çözümü, harmonik akım kaynaklı yükün harmoniklerinin ve temel frekanstaki tepkin gücünün kompanzasyonunu yapan Paralel Etkin Süzgeçtir (PES) [1-4]. Şekil 1'de gösterilen PES'in güç devresinde, genellikle DC barasında kondansatör kullanılan gerilim kaynaklı evirici kullanılır. PES uygulamasında evirici, darbe genişlik modülasyonu (DGM) (PWM) uygulanarak, şebeke ve yükün OBN'si ile evirici arasına yerleştirilen üç fazlı indüktans süzgeç yardımıyla istenilen akımın elde edilmesine olanak sağlar. Uygulamada kHz ve üstü frekanslarda DGM ile anahtarlama yapan evirici, OBN ve şebekede anahtarlama gerilim ve akım dalgacıkları oluşmasına neden olup sisteme OBN'den bağlı yükler için çeşitli gürültü sorunları yaratır [1-2]. Bu sorunları çözmek için PES'in terminallerine paralel olarak pasif Anahtarlama Dalgacık Süzgeci (ADS) bağlanır. Bu çalışmada<sup>1</sup> ADS'lerin tasarımı ele alınacaktır.

### 2.ADS DEVRE TOPOLOJİLERİ

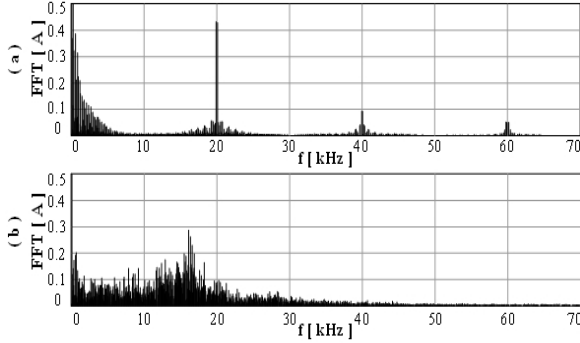
PES uygulamasında seçilecek ADS topolojisi, PES'in oluşturduğu Anahtarlama Dalgacık (AD) akımlarının frekans spektrumundaki dağılımıyla, bu da PES'in denetiminde kullanılan akım denetecinin tipiyle ilgilidir. PES uygulamasında yaygın olarak Doğrusal Akım Deneteci (DAD) ve Histeresiz Akım Deneteci (HAD) kullanılır [4]. Şekil 2, 380 V ve 50 Hz şebekeden beslenen çıkış gücü 10 kW olan diyotlu



Şekil 1 Şebeke, yük ve PES devre diyagramı.

doğrultucu yükün harmonik ve tepkin güç kompanzasyonunu yapan ve parametreleri Çizelge 1'de verilen PES sisteminin DAD ve HAD için şebeke akımı harmonik spektrumunu (FFT'sini) göstermektedir. DAD'ların oluşturduğu AD akımları (Şekil 2.a) en baskını anahtarlama frekansında ( $f_{sw}$ ) olmak üzere  $f_{sw}$ 'de ve katlarında ( $2f_{sw}, 3f_{sw}, \dots$ ) oluşurken, HAD'ların oluşturduğu AD akımları (Şekil 2.b) PES'in akım denetim bantgenişliğini ( $f_{bw}$ ) tanımlayan frekanstan başlamak üzere geniş bir frekans aralığına yayılır. Bu nedenle DAD'lı PES'lerde ADS topolojisinin AD akımlarını süzmesi için, tuzak süzgeç yapısı kullanılır ve süzgeç  $f_{sw}$ 'ye ayarlanır. HAD'lı PES'lerde ise AD akımları geniş bir frekans aralığına yayıldığından yüksek-geçirgen süzgeç yapısı kullanılır. Şekil 3, PES uygulamasında kullanılan çeşitli ADS topolojilerini göstermektedir [2]. Bu topolojilerden (a) ve (b) tuzak süzgeç karakteristiği göstererek DAD'lar için, (c) ve (e) yüksek-geçirgen süzgeç karakteristiği göstererek HAD'lar için, (d) ise devre elemanlarının tasarımına bağlı olarak yüksek-geçirgen ya da tuzak süzgeç özelliği gösterdiğinden, her iki akım deneteci için de kullanılabilir. Bu çalışmada, bu topolojiler incelenerek, Çizelge 1'de parametreleri verilen PES sistemi için süzgeçler tasarlanacak ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Seçilen topolojilerin başarımlı bilgisayarla benzetim ve deneyle doğrulanacaktır.

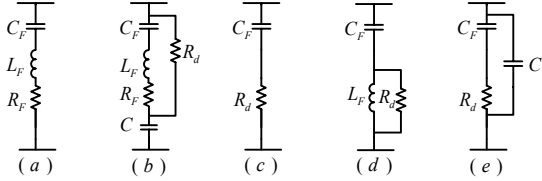
<sup>1</sup> Bu çalışma TÜBİTAK EEE Araştırma Grubu tarafından 104E141 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Şekil 2 Şebeke akım harmonik spektrumu; a) DAD b) HAD.

Çizelge 1. Şebeke, yük, PES ve ADS parametreleri

	Parametre	Değer
ŞEBEKE	$L_S$ (Şebeke indüktansı)	100 $\mu$ H
	$R_S$ (Şebeke direnci)	50 m $\Omega$
	$V_S$ (Şebeke gerilimi)	380 V
	$f_e$ (Şebeke frekansı)	50 Hz
	$P_o$ (Yük gücü)	10 kW
YÜK	$R_o$ (Yük direnci)	25 $\Omega$
	$L_o$ (DC indüktans)	1.46 mH
	$C_o$ (Yük DC bara kondansatörü)	1 mF
	$L_{ac}$ (AC indüktans)	1.43 mH
	$L_F$ (Süzgeç indüktansı)	2 mH
PES	$C_{dc}$ (PES DC bara kondansatörü)	2.35 mF
	$V_{dc}$ (PES DC bara gerilimi)	700 V
	$f_{max}$ (Enyüksek anahtarlama frekansı)	20 kHz

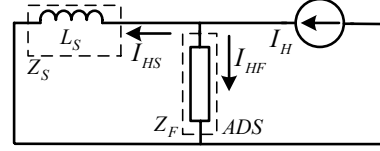


Şekil 3 PES uygulamasında kullanılan ADS topolojileri.

### 3. ADS TASARIMI

ADS topolojileri, Şekil 1'deki sistemin harmonik frekanslarında basit eşdeğer devresini gösteren Şekil 4 incelenerek anlatılacaktır. Şekilde, yük ve PES harmonik frekanslarında akım kaynağı  $I_H$  ile modellenmiştir. Bu akım kaynağı, PES'in bant genişliğinde olmakla beraber yokedilemeyen harmonikleri, PES'in bantgenişliği üstündeki yük akımı harmoniklerini ve akım denetecinin ürettiği AD akımlarını modeller. Şebeke, harmonik frekanslarında şebeke indüktansı  $L_S$  ile modellenmiştir. ADS'nin temel işlevine uygun olarak, ADS akımı  $I_{HF}$ 'nin akım kaynağı  $I_H$ 'nin bileşeni olan AD akımları olması ve şebeke akımı  $I_{HS}$ 'nin ise PES'in bant genişliğinde olmakla beraber yokedilemeyen harmonik ve PES'in bantgenişliği üstündeki yük akımı harmonik akımları toplamı olması istenir. Buna göre  $I_{HS}$ 'nin akım kaynağı  $I_H$ 'ye oranı olan ve (1)'de tanımlanan T(s) transfer fonksiyonu süzgeç impedansı  $Z_F(s)$  ve şebeke impedansı  $Z_S(s)$  kullanılarak yazılırsa, Şekil 3'teki topolojiler için ADS'nin süzme karakteristiği bulunur. İdeal olarak T(s) AD akımı frekansları için '0', diğer frekanslar için ise '1' olmalıdır. Bu da tasarlanan ADS'nin AD akımlarını süzdüğünün bir göstergesidir.

$$T(s) = I_{HS}(s)/I_H(s) = Z_F(s)/(Z_F(s) + Z_S(s)) \quad (1)$$



Şekil 4 Sistemin harmonik eşdeğer devresi.

**3.1 Tuzak LCR ADS:** Şekil 3.a'daki tuzak LCR tipi ADS'nin T(s)'si sönüm direnci  $R_F$  ihmal edilerek (2)'deki gibi elde edilir. T(s), (3)'de tanımlanan seri rezonans frekansı  $f_s$ 'de '0', (4)'de tanımlanan paralel rezonans frekansı  $f_p$ 'de sonsuzdur. Süzgeç parametreleri, süzgecin  $f_s$ 'si, DAD'nin oluşturduğu en baskın AD akımlarını süzmesi için  $f_{SW}$ 'ye ve  $f_p$ 'si ise  $I_H$ 'nin düşük frekans bileşenleri tarafından uyarılmayacak bir frekansa yerleştirilerek belirlenir.

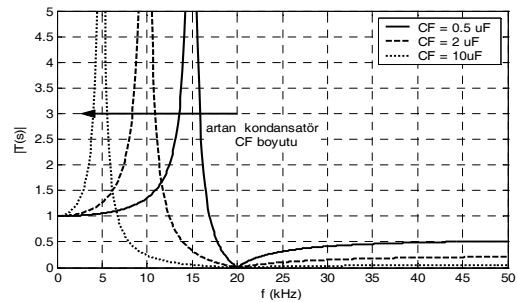
$$|T(s)| = ((2\pi f)^2 L_F C_F - 1) / ((2\pi f)^2 (L_F + L_S) C_F - 1) \quad (2)$$

$$f_s = 1 / (2\pi \sqrt{L_F C_F}) \quad (3)$$

$$f_p = f_s = 1 / (2\pi \sqrt{(L_S + L_F) C_F}) \quad (4)$$

Şekil 5,  $f_s$ 'si 20 kHz'e ayarlanmış tuzak LCR süzgecin T(s)'sini çeşitli  $C_F$ 'ler için göstermektedir. T(s),  $C_F$  arttıkça yüksek frekanslar için azalmakta, bu da süzgecin DAD için  $2f_{SW}$ 'deki ikinci baskın ve üstü frekanslardaki DA'ları daha iyi süzmesi demektir. Fakat,  $C_F$  arttıkça,  $f_p$  değeri düşmekte ve paralel rezonansın düşük frekanstaki akım kaynağı  $I_H$ 'de mevcut olan harmonikler tarafından uyarılma ve salınım olasılığını arttırmaktadır. Buna göre tuzak LCR tipi ADS'de  $C_F$  değeri, paralel rezonans düşük frekanstaki harmonikler tarafından uyarılmayacak şekilde seçilmelidir. Süzgecin  $f_s$ 'deki impedansının düşük olması için,  $R_F$ 'nin değeri küçük olmalıdır. Dolayısıyla  $R_F$  süzgeç yapısındaki  $L_F$ 'nin iç direncinden ibarettir. Paralel rezonans tepelerinin büyüklüğünü azaltmak için  $R_F$  değeri harici bir direçle artırılabilir [4]. Tuzak LCR tipi ADS topolojisinin verimliliği yüksek, boyutu küçük ve maliyeti azdır.

Şekil 2.a'daki, DAD için şebeke akımı FFT'si incelendiğinde 10 kHz'nin altındaki frekanslarda AD akımları haricinde de harmonikler görülmektedir. 10 kHz ve 15 kHz frekans aralığında ise harmonik akımları yoktur. Bundan dolayı,  $f_p$ , (4)'e göre  $C_F$ 'yi büyük tutmak için yaklaşık olarak 10 kHz olarak seçilir. (3)'de  $f_s$  20 kHz, (4)'te  $f_p$ 'de 10 kHz olarak seçildiğinde,  $L_S=100 \mu$ H için  $L_F$  ve  $C_F$ 'nin boyutları sırasıyla 33.3  $\mu$ H ve 1.9  $\mu$ F olarak bulunur. Devreye  $R_F$  eklenmemiştir.


 Şekil 5 Tuzak LCR süzgecin çeşitli  $C_F$ 'ler için T(s)'si.

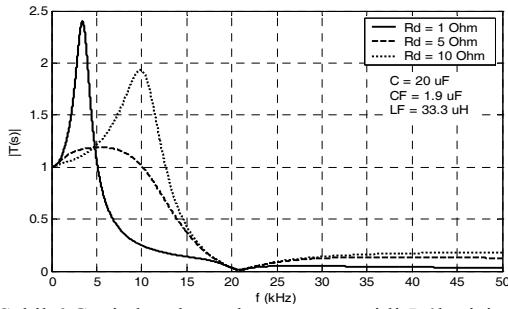
**3.2 Geniş-bant Tuzak ADS:** DAD'ın oluşturduğu AD akımlarını süzmesi ve paralel rezonansın kısmen

bastırılması, sönümlenmesi, geniş-bant tuzak süzgeçle (Şekil 1.b) olanaklıdır. Tasarım kolaylığı açısından (5)'te verilen süzgecin  $f_s$ 'sinin sadece  $L_F$  ve  $C_F$ 'ye bağlı olması için  $C_F \ll C$  olmalıdır. Böylelikle, süzgecin  $L_F$ - $C_F$  kolunun  $f_s$ 'si tuzak LCR süzgeçte olduğu gibi  $f_{SW}$ 'deki AD akımlarını süzmesi için  $f_{SW}$ 'ye ayarlanır.  $R_d$  ise  $C$  ile birlikte geniş bir frekans aralığında sönümlenme yapacak şekilde seçilir.

Tuzak LCR süzgeç için bulunan  $L_F$  ve  $C_F$  değerlerini kullanan geniş-bant tuzak tipi süzgeçte  $C_F \ll C$  eşitsizliğinin sağlanması için  $C=20 \mu F$  seçilmiştir. Daha büyük  $C$ 'ler sistemin tepkin gücünü arttıracığı için tercih edilmez. Süzgecin (6)'daki  $T(s)$ 'si çeşitli  $R_d$ 'ler için Şekil 6'da gösterilmiştir. Küçük  $R_d$ 'ler için süzgeç düşük frekanslarda, büyük  $R_d$ 'ler için yüksek frekanslarda rezonans yaratmaktadır.  $R_d=5 \Omega$  için iki rezonans da sönümlenmiş,  $T(s)$ 'nin değeri  $f_{SW}$ 'nin altı frekanslar için '1' e yakın,  $f_{SW}$ 'de AD akımları için ise '0'dır. Topoloji, tuzak LCR'ye göre AD akımlarını aynı oranda süzmekte, yapısındaki  $C$  ve  $R_d$ 'den dolayı geniş bir frekans aralığında sönümlenme yapmaktadır. Fakat topoloji, tuzak LCR'ye göre büyük boyutlu, maliyeti fazla ve  $R_d$ 'den dolayı kayıpları yüksektir.

$$f_s = 1/(2\pi\sqrt{L_F C_F C / (C_F + C)}) \quad (5)$$

$$T(s) = \frac{s^3 L_F C_F C R_d + s^2 L_F C_F + s(C_F + C)R_d + 1}{s^4 L_S L_F C_F C + s^3 (L_F + L_S) C_F C R_d + s^2 (L_F C_F + L_S C) R_d + s(C_F + C)R_d + 1} \quad (6)$$

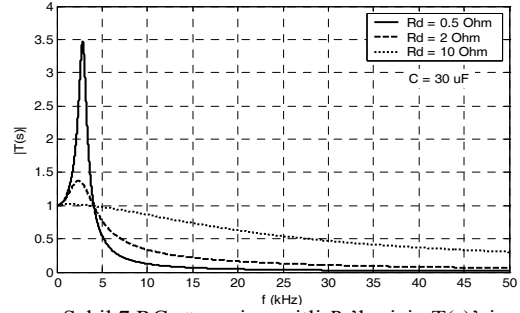


Şekil 6 Geniş-bantlı tuzak süzgeçte çeşitli  $R_d$ 'ler için  $T(s)$ .

**3.3 Yüksek-geçirgen RC ADS:** HAD kullanılan uygulamalarda, denetecin  $f_{bw}$ 'sinden başlamak üzere geniş frekans aralığına yayılan AD akımlarını süzmek için genel olarak Şekil 1.c'deki yüksek-geçirgen RC süzgeç kullanılır. Süzgecin impedansı,  $f_{bw}$ 'nin çok altında  $1/\omega C_F$  iken, çok üstünde  $R_d$ 'dir.  $R_d$ , şebeke ve yük tarafından olası rezonansları bastırır. Süzgecin  $T(s)$ 'si (7)'deki gibidir. Tasarım, süzgeç kesme frekansını  $f_{bw}$ 'nin az üzerine, (8)'deki paralel rezonans frekansını da paralel rezonansı bastırmak için  $f_{bw}$ 'nin az altına yerleştirerek yapılır. Bu çalışmada HAD kullanan PES'in  $f_{bw}$ 'si benzetim ve deney sonuçlarına göre yaklaşık olarak 2.5-3 kHz'dir [3-4].  $C_F$ 'yi küçük tutmak için  $f_p$  3 kHz alınır ve  $C_F$ ,  $L_S=100 \mu H$  için (8)'den yaklaşık olarak  $30 \mu F$  belirlenir. Süzgecin  $T(s)$ 'si  $C_F=30 \mu F$  ve çeşitli  $R_d$ 'ler için Şekil 7'de gösterilmiştir. Küçük  $R_d$  paralel rezonans problemi yaratmakta, büyük  $R_d$  ise AD akımlarını az süzmekte ve şebeke frekansında kayıpları arttırmakta, ara değer olan  $R_d=2 \Omega$  ise en iyi çözümü oluşturmaktadır.

$$T(s) = (sC_F R_d + 1)/(s^2 L_S C_F R_d + sC_F R_d + 1) \quad (7)$$

$$f_p = 1/(2\pi\sqrt{L_S C_F}) \quad (8)$$



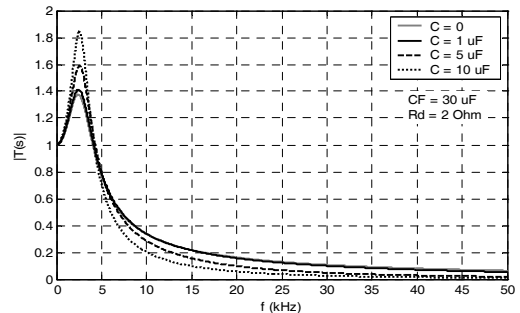
Şekil 7 RC süzgecin çeşitli  $R_d$ 'ler için  $T(s)$ 'si.

**3.4 Yüksek-geçirgen LCR ADS:** Şekil 3.d'de gösterilen ve (9)'da  $T(s)$ 'si verilen topoloji,  $L_F$  ve  $C_F$ 'nin  $f_s$ 'si  $f_{SW}$ 'ye ayarlanarak tuzak süzgeç karakteristiği gösterirken,  $L_F$ 'ye paralel bağlı  $R_d$  üzerinden yüksek geçirgen karakteristiği gösterir. DAD uygulamasında, küçük  $R_d$ 'de tuzak özelliği kaybolup, büyük  $R_d$ 'de paralel rezonans sorunu olmakta, bu nedenle tasarımı zor olup tercih edilmez. HAD uygulamasında işlevi RC süzgeçle aynı olup,  $L_F$ 'nin görevi rezonans oluşturmaktan öte düşük frekansta  $R_d$  üzerindeki kayıpları azaltmaktır. Ancak bu da büyük  $L_F$  gerektirdiği için tercih edilmez [4].

$$T(s) = \frac{s^2 L_F C_F R_d + sL_F + R_d}{s^3 L_S L_F C_F + s^2 (L_F + L_S) C_F R_d + sL_F + R_d} \quad (9)$$

**3.5 Yüksek-geçirgen RCC ADS:** RC tipi süzgeçte sönümlenme için gerekli  $R_d$  arttırıldıkça AD akımlarının süzgeç tarafından süzülmesi zorlaşmaktadır. Şekil 1.e'de görülen ve (10)'da  $T(s)$  verilen yüksek-geçirgen RCC süzgeç, RC süzgeçteki  $C_F$ 'ye göre küçük boyutta bir  $C$  kondansatörü paralel bağlanarak yüksek frekanstaki AD akımlarının süzgeç tarafından daha iyi süzülmesini sağlar. RCC tipi süzgeçteki  $C$  etkisi, RC tipi için belirlenen  $C_F=30 \mu F$  ve  $R_d=2 \Omega$  değerleri kullanılarak gözlemlenebilir. Şekil 9, RCC süzgecin  $T(s)$ 'sini, çeşitli  $C$ 'ler için göstermektedir. Büyük  $C$ 'ler için süzüm yüksektir. Artan  $C$ , paralel rezonans tepesini arttırmaktadır ( $C=0$  durumuna göre). RC süzgece eklenen  $C$  ile süzgecin başarımı az gelişip, paralel rezonans sorunu doğmakta, ek olarak maliyet ve boyut artmakta, dolayısıyla bu yapı pratik uygulamada tercih edilmemektedir.

$$T(s) = \frac{sC_F R_d + 1}{s^3 L_S C_F C R_d + s^2 L_S (C_F + C) + sC_F R_d + 1} \quad (10)$$



Şekil 8 RCC tipi süzgecin çeşitli  $C$ 'ler için  $T(s)$ 'si.

#### 4. BİLGİSAYARLA BENZETİM

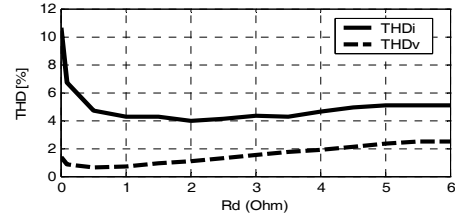
Teorik incelemeler doğrultusunda, DAD için tuzak LCR süzgeç, HAD için ise yüksek-geçirgen RC süzgeç kullanılacaktır. Çizelge 1'de parametreleri verilen sistem için yapılan benzetimde kullanılan ADS'lerin parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Teoride  $C_F=1.9 \mu\text{H}$  ve  $L_F=33.3 \mu\text{H}$  olarak tasarlanan LCR süzgeç parametreleri, benzetimde pratikte var olan  $C_F=2.2 \mu\text{F}$ 'ye göre ayarlanmıştır. Süzgecin  $f_p$ 'si  $C_F=2.2 \mu\text{F}$  için 9.5 kHz olup tasarımdaki 10 kHz'ye oldukça yakındır. Süzgecin  $f_s$ 'si yine 20 kHz'dir. Ayrıca rezonanstan dolayı oluşabilecek salınımları bastırmak için süzgeç yapısına  $f_{\text{SW}}$ 'deki AD akımları süzümünü etkilemeyecek şekilde  $R_F=0.66 \Omega$ 'luk direnç eklenmiştir. Şekil 9, benzetimde elde edilen ADS'siz ve tuzak LCR süzgeç ADS'li DAD için şebeke akımı ve FFT'sini, OBN gerilimi ve FFT'sini göstermektedir. Şekil 1.a ve 1.c'ye göre ADS'siz durumda şebeke akımı ve gerilimi üzerinde 20 kHz'de AD akımı ve gerilimi mevcuttur. ADS'li durumda, süzgecin 20 kHz ve katlarındaki AD akımlarını süzdüğü açıktır. ADS'nin başarımı, Çizelge 3'de DAD için şebeke akımı toplam harmonik bozulması  $\text{THD}_I$  ve şebeke gerilimi toplam harmonik bozulması  $\text{THD}_V$  değerleri üzerinde de görülebilir. ADS'siz durumdaki %5.5 olan  $\text{THD}_I$ , ADS'nin eklenmesiyle %4.1'e indirilmiştir. Aynı şekilde ADS'siz durumdaki %3.8 olan  $\text{THD}_V$ , ADS ile %0.8'e indirilmiştir. ADS'nin etkisinin sistemin  $\text{THD}_V$ 'si üzerinde daha fazla görülmesinin nedeni yüksek frekanslarda impedansı fazla olan şebeke indüktansdır. Şebekeye giden yüksek frekanstaki AD akımları  $L_S$  üzerinde AD gerilimine dönüşür ve yüksek frekansta gerilim bozulmasına neden olur. Fakat ADS ile şebeke gerilimi AD gerilimlerinden arındırılır.

Teoride  $C_F$ 'si 30  $\mu\text{F}$  olarak belirlenen RC süzgecin  $R_d$  değeri,  $\text{THD}_I$  ve  $\text{THD}_V$ 'nin ADS'li durumdaki iyileşmesine ve yüksek frekanstaki AD akımlarının süzümüne göre belirlenecektir. Şekil 10,  $\text{THD}_I$  ve  $\text{THD}_V$ 'nin  $R_d$ 'ye göre değişimini göstermektedir. Küçük  $R_d$ 'ler için paralel rezonanstan dolayı  $\text{THD}_I$  ADS'siz durumdaki %7.6'lık değeri aşmaktadır. Büyük  $R_d$ 'ler için ise her ne kadar  $\text{THD}_I$  %7.6'nın altında ise de süzgeç AD akımlarını daha az süzeceği için  $\text{THD}_V$  artmaktadır. Fakat şekildeki  $\text{THD}_V$  değerleri, ADS'siz durumdaki  $\text{THD}_V$  değerinin (%5.1) oldukça altındadır. Şekle göre sistem için en uygun  $R_d$  değeri 1  $\Omega$  ile 4  $\Omega$  arasındadır. Küçük  $R_d$ , daha az güç kaybı nedeniyle tercih sebebidir. Fakat küçük  $R_d$ 'ler düşük  $\text{THD}_I$  ve  $\text{THD}_V$  değerleri vermekle beraber rezonanstan dolayı salınımlar yaratır [4]. Bu yüzden  $R_d$  değeri düşük frekansları yeterince bastırarak şekilde ve pratik var olan 2.8  $\Omega$  olarak seçilmiştir.  $C_F=30 \mu\text{F}$  ve  $R_d=2.8 \Omega$  için  $\text{THD}_I$  değeri %7.6'dan %4.2'ye,  $\text{THD}_V$  değeri ise %5.1'den %1.5'e düşürülmüştür (Çizelge 3). Şekil 11, HAD için sistemin ADS'siz ve ADS'li şebeke akımı ve FFT'sini ve şebeke gerilimi ve FFT'sini benzetim sonuçlarını göstermektedir. ADS'siz durumda şebeke akımı ve

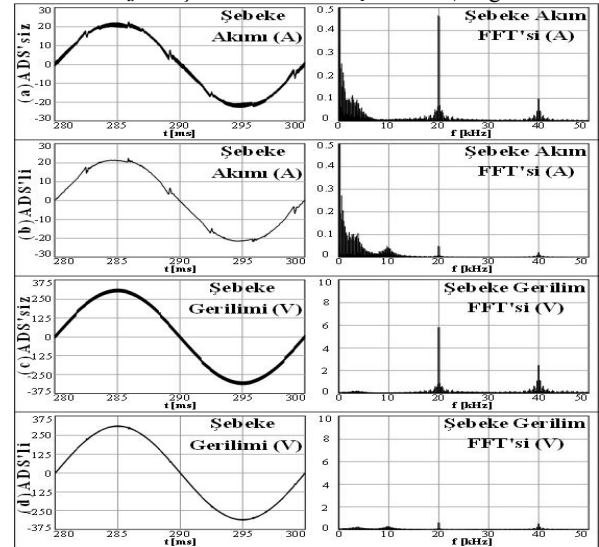
gerilimi üzerinde bulunan geniş bir frekans aralığında yer alan ve 15 kHz'de yoğunlaşan AD akım ve gerilimleri tasarlanan RC süzgeçle büyük ölçüde bastırılmıştır. Tasarlanan RC süzgecin  $\text{THD}_I$ ,  $\text{THD}_V$  ve benzetim dalga şekilleri, süzgecin AD akımlarını süzümündeki başarımı göstermektedir.

Çizelge 2. Tuzak LCR ve yüksek-geçirgen RC parametreleri

ADS	Tuzak LCR	$C_F$ (Süzgeç kondansatörü)	2.2 $\mu\text{F}$
			$L_F$ (Süzgeç indüktörü)
	Yüksek-geç. RC	$R_F$ (Süzgeç direnci)	0.66 $\Omega$
		$C$ (Süzgeç kondansatörü)	30 $\mu\text{F}$
		$R_d$ (Süzgeç direnci)	2.8 $\Omega$



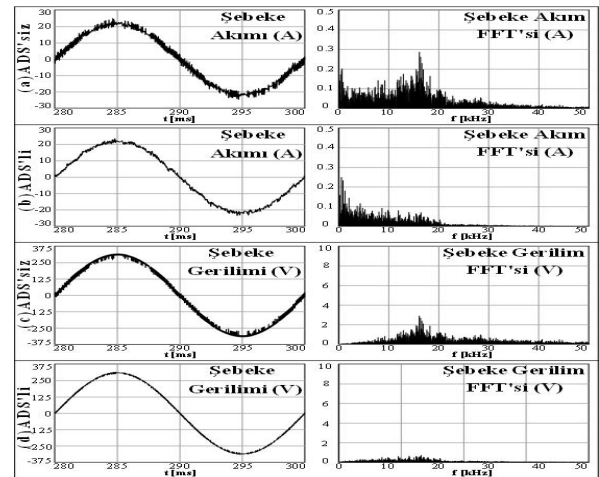
Şekil 10 Yüksek-geçirgen RC ADS'li sistemin  $C_F=30 \mu\text{F}$  ve farklı  $R_d$ 'ler için benzetim  $\text{THD}_I$  ve  $\text{THD}_V$  değerleri.



Şekil 9 ADS'siz ve LCR ADS'li PES'in benzetim sonuçları.

Çizelge 3. ADS'nin benzetim başarımları

	ADS'siz		ADS'li	
	$\text{THD}_I(\%)$	$\text{THD}_V(\%)$	$\text{THD}_I(\%)$	$\text{THD}_V(\%)$
DAD	5.1	3.8	4.1	0.8
HAD	7.6	5.1	4.2	1.5



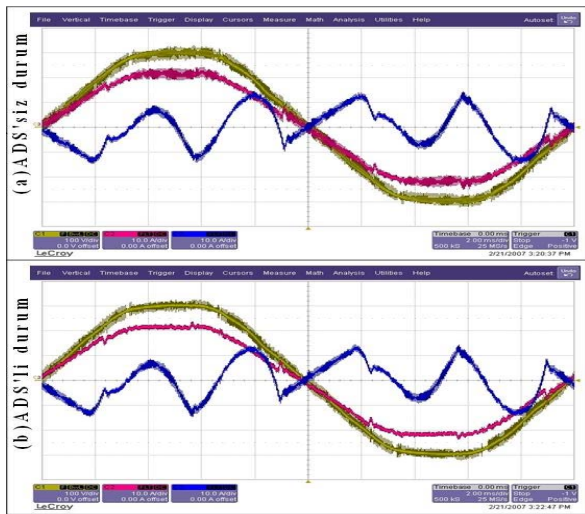
Şekil 11 ADS'siz ve RC ADS'li PES'in benzetim sonuçları.

## 5. DENEY SONUÇLARI

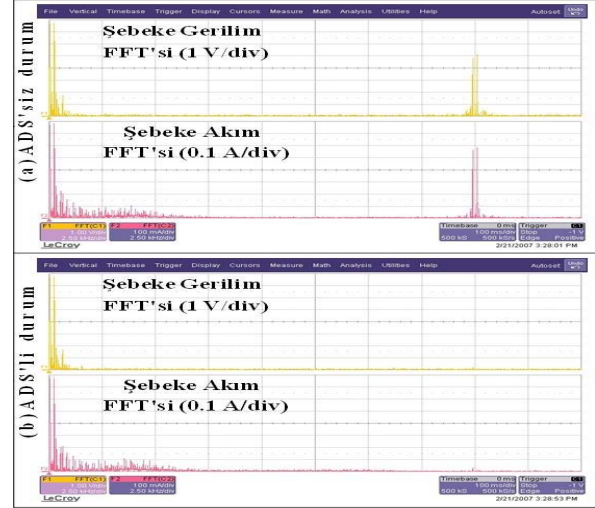
Bu bölümde, Çizelge 1'de ve 2'de parameterleri verilen şebeke, yük, PES ve ADS sisteminin deneysel başarımı gösterilecektir.

DAD'lı PES sisteminin, ADS'siz ve tuzak LCR ADS'li şebeke akımı, gerilimi ve PES akımı Şekil 13, şebeke gerilimi ve akımı FFT'leri ise Şekil 14'te verilmiştir. ADS'siz durumda, şebekede gözlemlenen 20 kHz'de AD akım ve gerilim bileşenleri, ADS ile süzölmüştür. Süzgecin  $THD_I$  ve  $THD_V$  başarımı Çizelge 4'de verilmiştir. ADS'li ve ADS'siz  $THD_I$  ve  $THD_V$  değerleri aynıdır çünkü benzetimden farklı olarak harmonik analizörü anahtarlama frekansı gerilim harmoniklerini görmemektedir. Aynı nedenle ADS'siz benzetim ve deney çalışmalarında elde edilen  $THD_I$  değerleri farklıdır. ADS'li durum için benzetim  $THD_I$  değerleri ve dalga şekilleri deneysel çalışmalarla paralellik göstermekte, DAD için LCR ADS'nin başarımını kanıtlamaktadır.

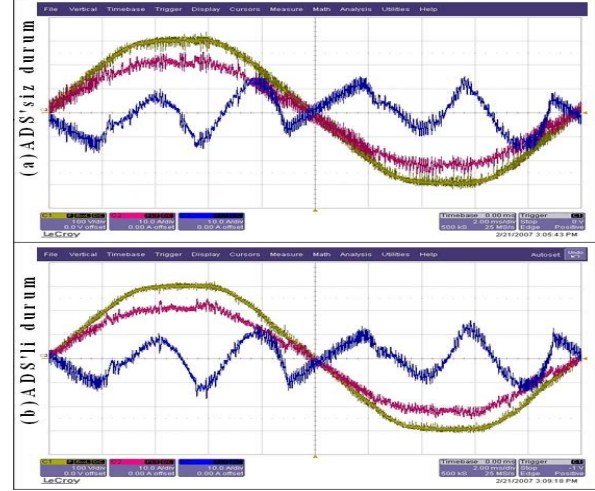
ADS'siz ve yüksek-geçirgen RC ADS'li HAD kullanılan PES sisteminin deneysel şebeke akımı, şebeke gerilimi ve PES akımı Şekil 15'te, şebeke gerilimi ve akımı FFT'leri ise Şekil 16'da gösterilmiştir. ADS'siz şebeke akımı, gerilimi ve FFT'leri üzerindeki, 15 kHz'de yoğunlaşan HAD AD akım ve gerilim bileşenleri, ADS ile süzölmüştür. RC süzgecin deneysel  $THD_I$  ve  $THD_V$  başarımı Çizelge 4'de verilmiştir. ADS'li ve ADS'siz  $THD_V$  aynıken, ADS'siz durumda %3.7 olan  $THD_I$  ADS'li durumda %4.1 olmuştur. Bunun nedeni ise RC süzgecin düşük frekanslarda (3 kHz ve civarı) yarattığı paralel rezonansın  $THD_I$  değerini ADS'siz duruma göre biraz arttırmasıdır. ADS'li durum için, benzetim  $THD_I$  değerleri ve dalga şekilleri deneysel çalışmalarla paralellik göstermekte, HAD için tasarlanan yüksek-geçirgen RC ADS'nin deneysel başarım kanıtıdır.



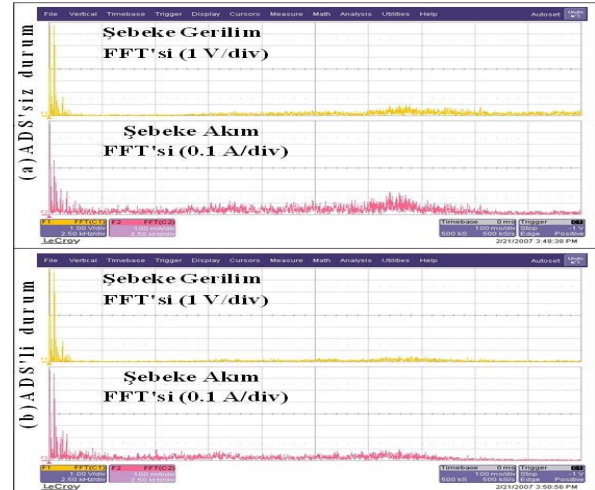
Şekil 13 ADS'siz ve tuzak LCR ADS'li PES'in deneysel şebeke gerilimi (100V/div,sarı) ve akımı (10A/div,kırmızı), süzgeç akımı (10A/div,mavi).



Şekil 14 ADS'siz ve tuzak LCR ADS'li PES'in deneysel şebeke gerilim ve akım FFT'leri (yatay eksen: 2.5 kHz/div)



Şekil 15 ADS'siz ve yüksek-geçirgen RC ADS'li PES'in deneysel şebeke gerilimi (100V/div,sarı) ve akımı (10A/div,kırmızı), süzgeç akımı (10A/div,mavi).



Şekil 16 ADS'siz ve RC ADS'li PES'in deneysel şebeke gerilim ve akım FFT'leri (yatay eksen 2.5 kHz/div).

Çizelge 3. ADS'nin deneysel başarım sonuçları

	ADS'siz		ADS'li	
	$THD_I$ (%)	$THD_V$ (%)	$THD_I$ (%)	$THD_V$ (%)
DAD	4.0	2.4	4.0	2.4
HAD	3.7	2.4	4.1	2.4

## 6. SONUÇ

Paralel etkin süzgecin, evirici anahtarlama frekansı dalgacıklarının şebekede gürültü yaratmasını engelleyen pasif anahtarlama dalgacık süzgeçleri incelenmiş ve tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Doğrusal akım deneteçli PES için LCR süzgecin ve histerezis akım deneteçli PES için RC süzgecin üstünlüğü teori, benzetim ve deneylerle ispatlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] H. Akagi, "Active Harmonic Filters," *Proc. of the IEEE*, Vol. 93, Issue 12, pp 2128 – 2141, Dec. 2005.
- [2] S. Bhattacharya, "High Power Active Filter Systems," *Ph. D. Dissertation*, UW-Madison, 2003.
- [3] H. Özkaya, O. S. Şentürk, A. M. Hava, "Üç Fazlı Paralel Etkin Süzgecin Akım Denetim Yöntemleri," *ELECO 2006, Bursa*, Aralık 2006, Sayfa: 121-125.
- [4] H. Özkaya, "Paralel Etkin Süzgecin Tasarımı, Denetimi ve Gerçekleştirilmesi," *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2007.