

# Bulanık Adaptif PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Eviricinin Benzetimi

## Simulation of Fuzzy Adaptive PI Controlled Grid Interactive Inverter

Necmi ALTIN\*

Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, 06500, Ankara

Geliş Tarihi/Received : 27.03.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 28.08.2009

### ÖZET

Bu çalışmada gerilim kaynaklı şebeke etkileşimli evirici MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Evirici akım kontrollü olarak tasarlanmış ve evirici akımını şekillendiren anahtarlama sinyallerinin üretilmesi için bulanık-PI denetim tekniği kullanılmıştır. Şebeke etkileşimli evirici bünyesinde şebeke frekanslı transformatör ve LC çıkış filtresi bulunmaktadır. Şebeke frekanslı transformatör, şebeke ile yenilenebilir enerji kaynağı arasında elektriksel izolasyonun sağlanmasında kullanılmış ve LC filtre ile de akım dalga şeklindeki PWM anahtarlama kaynağının yüksek frekanslı bileşenler süzülmesi, çıkış akım THD'si azaltılmıştır. MATLAB/Simulink benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar evirici çıkış akımının sinüsoidal dalga şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz frekansta olduğu, akım harmoniklerinin de uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dâhilinde olduğu görülmüştür (<5%).

**Anahtar Kelimeler :** Akım kontrolü, Şebeke etkileşimli evirici, Bulanık-PI.

### ABSTRACT

In this study, a voltage source grid interactive inverter is modeled and simulated in MATLAB/Simulink. Inverter is designed as current controlled and a fuzzy-PI current controller used for the generation of switching pattern to shape the inverter output current. The grid interactive inverter consists of a line frequency transformer and a LC type filter. Galvanic isolation between the grid and renewable energy source is obtained by the line frequency transformer and LC filter is employed to filter the high frequency harmonic components in current waveform due to PWM switching and to reduce the output current THD. Results of the MATLAB/Simulink simulation show that inverter output current is in sinusoidal waveform and in phase with line voltage, and current harmonics are in the limits of international standards (<5%).

**Keywords :** Current control, Grid interactive inverter, Fuzzy-PI.

### 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte insanlarda oluşan daha fazla konfor isteği ve endüstrileşme nedeniyle dünyanın enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan fosil yakıtların sınırlı olduklarının, yakın zamanda tükeneceklerinin fark edilmesi ve bu kaynakların olumsuz çevresel etkileri yeni enerji kaynakları arayışlarına neden olmuştur. Ayrıca, ülkeler arasındaki ilişkiler ve bunun sonucunda ortaya çıkan petrol krizi gibi durumlar nedeniyle enerji fiyatlarını belirsizleştirmesi enerjinin daha düşük birim

maliyetle ve en önemlisi daha güvenli bir şekilde elde edilmesine yönelik çalışmalara verilen önemi arttırmıştır (Jain ve Agarwal, 2007; Chen ve Smedley, 2008; Sefa v.d., 2008).

Yapılan bu çalışmalar neticesinde güneş, rüzgar ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. İlk uygulamaları elektrik enerjisinin bulunmadığı bölgelerdeki ihtiyacı karşılamaya yönelik olan bu kaynaklar günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan önemli enerji kaynaklarına dönüşmektedirler (Kjaer v.d., 2005; Saha ve Sundarsingh, 1996).

\* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : necmialtin@hotmail.com (N. Altın)

Güneş pilleri ve yakıt hücreleri doğrudan DA gerilim üretirler. Şebekenin ve yüklerinin büyük kısmının AA güç talep etmesi nedeniyle üretilen gücün AA'ya dönüştürülmesi gereklidir. Bunun için eviriciler kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde AA generatörler kullanılsa da özellikle küçük ve orta güçlerde daha yüksek enerji dönüşüm verimi nedeniyle değişken hızlı çalışma tercih edilmektedir. Bu durumda da generatör çıkışındaki AA gerilimin genliği ve frekansı rüzgar hızı ile değişmektedir. Bu gerilimin şebekeye aktarılması veya yüklerin büyük bir kısmını beslemekte kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle generatör çıkışı önce doğrultulmakta, sonra eviriciler yardımıyla sabit genlik ve frekanslı AA gerilime dönüştürülmektedir (Sefa ve Altın, 2006).

Elektrik şebekesinin bulunmadığı yerleşimden uzak bölgelerdeki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılanması amacıyla ada modu eviriciler yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak ada modunda çalışan sistemde kullanılan aküler sistemin maliyetini arttırmakta ve üretimin ihtiyaçtan fazla olması durumunda fazla enerji şebekeye aktarılamadığından verimli bir şekilde yararlanılamamaktadır. Bu nedenlerden dolayı şebekeye paralel bağlanabilen ve şebekeye enerji aktarabilen şebeke etkileşimli eviriciler önem kazanmaktadır. Ayrıca fotovoltaik (FV) modüllerin fiyatlarındaki düşme eğilimi nedeniyle şebeke etkileşimli evirici maliyeti toplam sistem maliyeti üzerinde daha da etkili olmaya başlamıştır. Bu sebeple yeni, ucuz ve yaratıcı evirici çözümleri ile yeni sistem tasarımları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır (Saha ve Sundarsingh, 1996; Kjaer v.d., 2005).

Şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında farklı tipte evirici yapıları kullanılmaktadır. Pek çok uygulamada gerilim kaynaklı eviriciler (GKE) kullanılmış olsa da kısa devrelere karşı yüksek direnç göstermesi ve ters gerilimi bloke etmesi nedeniyle akım kaynaklı eviriciler üzerine çalışmalar da yoğunlaşmaktadır (Hirachi ve Tomokuni, 1997; Chen ve Smedley, 2008). Ayrıca çok seviyeli evirici yapıları da kullanılmaktadır (Baker v.d., 1997).

Şebeke etkileşimli eviriciler gerilim kontrollü veya akım kontrollü olarak tasarlanabilmektedir. Ancak gerilim kontrollü eviricide gerçekleşen küçük bir senkronizasyon hatası eviricinin önemli miktarda aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Akım kontrollü evirici ise bu duruma karşı daha az duyarlıdır ve bu nedenle şebekeye güç aktarımında önerilmektedir (Sefa ve Altın, 2008). Şebeke etkileşimli eviriciler konusunda yapılan çalışmalar güç akta-

rımında kullanılacak evirici yapısı üzerine yoğunlaşmış ve bu çalışmalarda genellikle doğrusal denetleyiciler kullanılmıştır (Baker v.d., 1997; Krampitz ve Kreutzman, 2002; Myrzik ve Calais, 2003; Li v.d., 2007; Gonzalez v.d., 2008). Ayrıca şebeke etkileşimli eviricinin bulanık mantık denetimi sunulmuştur (Sefa ve Altın, 2008). Gelişmiş denetim yöntemlerinin şebeke etkileşimli eviricilerde kullanılmasına yönelik çalışma sayısı daha sınırlıdır.

Klasik PI veya PID denetleyiciler diğer güç elektroniği dönüştürücülerin denetiminde olduğu gibi şebeke etkileşimli eviricilerin denetiminde kullanılabilir. Bu denetleyicilerin kazançları tespit edilirken sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılmaktadır (Ziegler ve Nichols, 1942). Sabit kazançlı PI veya PID denetleyici ile kontrol edilen sistemler daha önceden belirlenen çalışma noktasında çalıştığında kabul edilebilir bir performans elde edilmektedir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler söz konusu olduğunda elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Şebeke etkileşimli eviricilerin çalışma noktaları güneş ışınım miktarı, rüzgar hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak şebeke parametreleri de eviricinin çalışması sırasında değişebilmektedir. Bu nedenle şebeke etkileşimli eviricinin denetiminde sabit kazançlı bir denetleyici yerine değişen şartlara göre uyarlanabilen yapıda bir denetleyici kullanılmalıdır.

Bulanık mantık denetim (BMD) teorisi belirsizlik ve değişkenlik üzerine kurulmuş matematiksel bir disiplindir. Kesin kurallara bağlı olmayan ve tam tanımlanmamış kavramların kullanılmasına izin vermektedir. BMD, doğrusal olmayan ve uyarlanabilir yapısı sayesinde yük bozukluklarının ve parametre değişimlerinin bulunduğu uygulamalarda güçlü performans göstermektedir. Mamdani tarafından basit bir dinamik sistemin denetiminde kullanılmasından günümüze kadar pek çok denetim yaklaşımı ve bulanık mantık denetim uygulaması gerçekleştirilmiştir (Mamdani, 1974). Bulanık mantık denetimin klasik denetleyicilerden en büyük üstünlüğü genel olarak bilindiği gibi sistemin matematik modeline olan bağlılığının çok sınırlı olmasıdır (Premrudeepreechacharn ve Poaporn-sawan, 2000).

Bulanık mantığın ayarlanabilir ve sistem parametrelerinden bağımsız olma özellikleri ile PI denetimin hızlı tepki özelliklerini birleştirerek Bulanık-PI

denetim elde edilebilir. Bu yaklaşım ile PI denetleyicinin oransal (KP) ve integral (KI) kazançları sabit olmayıp çalışma süresince sistemin çalışma noktasına göre belirlenen girişler için bulanık mantık tarafından eş zamanlı olarak tespit edilmektedir. Böylece denetleyicinin sistem parametrelerindeki değişimlere ve gürültü gibi dış etkenlere karşı duyarlılığı en aza indirilmiştir.

Bu çalışmada, akım kontrollü şebeke etkileşimli eviricinin MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Evirici akımının denetiminde kazanç parametreleri BMD tarafından tespit edilen bir PI denetleyici kullanılmıştır. BMD çalışma süresince evirici giriş gerilimi, referans akım değeri, şebeke empedansı gibi değişen parametreler için PI denetleyicinin KP ve KI kazanç değerlerini tespit etmektedir. Evirici çıkışında kullanılan şebeke frekanslı transformatör sayesinde şebeke ile elektriksel izolasyon sağlanmış ve DA akım enjeksiyonu problemi engellenmiştir. Evirici çıkışında yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle oluşan yüksek frekanslı bileşenlerin süzülmesinde LC çıkış filtresi kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarından değişen şartlarda dahi evirici akımının referans akımı takip ettiği, sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olduğu görülmüştür. Ayrıca evirici akım harmoniklerinin uluslararası standartları karşılayacak değerlerde olduğu görülmüştür (<5%).

Bu çalışma aşağıdaki şekilde sunulacaktır: Bölüm 2'de şebeke etkileşimli evirici ve taşıması gereken

şartlar açıklanacaktır. Bölüm 3'de bulanık mantık denetimin temelleri incelenecektir. Bölüm 4'de tasarlanan Bulanık-PI denetleyici açıklanacaktır. Bölüm 4'de benzetim sonuçları, Bölüm 5 ise çalışmada elde edilen sonuçlar sunulacaktır.

## 2. ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ

Şebeke etkileşimli eviriciler, yenilebilir enerji kaynağı tarafından üretilen elektrik enerjisinin elektrik şebekesine aktarılması için kullanılan statik güç dönüştürücüleridir. Bu eviriciler şebekeye bağlandıkları için şebeke yöneticileri tarafından belirlenen şartlara uymaları gerekmektedir. Şebek etkileşimli eviricilerin taşıması gereken özellikleri açıklayan IEC61727, IEEE1547 ve EN61000-3-2 gibi uluslararası standartlar yayınlanmıştır (Sefa ve Altın, 2006; Armstrong v.d., 2006). Tablo 1'de şebeke etkileşimli eviricilere yönelik hazırlanan belli başlı standartlar özetlenmiştir. Görüldüğü gibi şebeke etkileşimli eviricinin birim güç faktöründe çalışması gerekmektedir. Yani eviricinin şebekeye aktardığı akım şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olmalıdır. Ayrıca şebekeye aktarılan akımın sinüs şeklinde olması gerekmektedir. Evirici akımının harmonik bileşenleri ve/veya akımın toplam harmonik distorsiyonu (%THD) sınırlandırılmıştır.

**Tablo 1. Şebeke etkileşimli PV sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti.**

KONU	IEC61727	IEEE1547	EN61000-3-2
Anma gücü	10 kW	30 kW	16A X 230V = 3,7 kW
Harmonik akım (sıra - h) limitleri	(3-9) %4,0	(2-10) %4,0	(3) 2,30 A
	(11-15) %2,0	(11-16) %2,0	(5) 1,14 A
	(17-21) %1,5	(17-22) %1,5	(7) 0,77 A
	(23-33) %0,6	(23-34) %0,6	(9) 0,40 A
		(>35) %0,3	(11) 0,33 A
			(13) 0,21 A
			(15-39) 2,25/h
	Bu aralıktaki çift sıralı harmonikler listelenen tek sıralı harmoniklerden % 25 daha az olmalıdır.		Tek sıralı harmoniklerin yaklaşık %30'u kadar
Maksimum akım THD'si	5,00 %	5,00 %	-
Anma gücünün % 50'sinde güç faktörü	0,9	-	-
DA akım enjeksiyonu	Anma çıkış akımının % 1,0'inden az	Anma çıkış akımının % 0,5'inden az	<0,22 A - 50W yarım dalga doğrultucuya uyan
Normal çalışma için gerilim aralığı	% 85 - %110	% 88 - %110	-
	(196V - 253V)	(97V-121V)	
Normal çalışma için frekans aralığı	50±1 Hz	59,3 Hz - 60,5 Hz	-

Şebeke geriliminin kesildiğinde, eviricilerin çalışmalarına devam etmeleri durumunda evirici tarafından beslenen bölgede bir elektrik adası oluşmaktadır. Bu sebeple durumdan habersiz bakım personelinin korumak amacıyla elektrik adalarının oluşumunu engellenmesi eviricinin şebeke-den ayrılması ile ilgili hükümlerde yine standartlarda bulunmaktadır (Cramer ve Grebe, 1992; Calais v.d., 2000).

Şebeke etkileşimli evirici tarafından şebekeye aktarılan akımın, şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olması yani birim güç faktöründe çalışma gerektiği için şebeke geriliminin algılanması önemlidir. Bu amaçla faz kilitleme devreleri (FKD) kullanılmaktadır. FKD devrelerinden elde edilen şebeke gerilim örneği referans akımın üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu özellikleri ile FKD için şebeke etkileşimli eviricinin en önemli kısımlarından birisi olarak belirtilebilir (Chung, 2000).

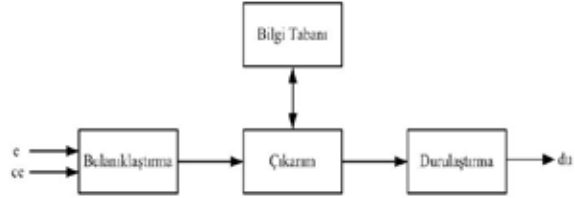
Bazı şebeke etkileşimli eviriciler, DA-DA dönüştürücü veya DA-AA evirici bünyesinde yüksek frekanslı transformatörler içerirlerken bazıları şebekeye şebeke frekanslı transformatörler üzerinden bağlanırlar. Bazı eviriciler de transformatör içermezler. Şebeke frekanslı transformatörler topraklamayı kolaylaştırır ve şebeke ile DA kaynak arasında elektrikli izolasyon sağlarlar. Bu transformatörler ağırlık, boyut ve maliyet gibi olumsuz yönleri bulunsun da şebekeye DA akım enjeksiyonunu engelleyen yegâne çözümdür (Kjaer v.d., 2005).

### 3. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

Zadeh tarafından 1965'de tanımlanan bulanık grupların en başarılı uygulamalarından birisi olan BMD'nin başlıca özelliği sayısal değişkenler yerine dilsel değişkenler kullanılmasıdır (Zadeh, 1965). BMD, kesin kurallara bağlı olmayan ve tam tanımlanmamış kavramların kullanılmasına izin veren belirsizlik ve değişkenlik üzerine kurulmuş matematiksel bir disiplindir. BMD, doğrusal olmayan ve uyarlanabilir yapısı sayesinde yük bozukluklarının ve parametre değişimlerinin bulunduğu uygulamalarda güçlü performans göstermektedir. BMD'nin genel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'den görüldüğü gibi BMD dört temel bölüme ayrılmaktadır.

Bulanıklaştırma ünitesi, sayısal giriş verilerini bulanık kümeler kullanarak dilsel değişkenlere dönüştürmektedir. Bulanık kümeler üçgen, yamuk, gibi üyelik fonksiyonları ile ifade edilmektedir.

Bilgi tabanı ünitesi gerekli olan dilsel değişkenlerin bulunduğu veri tabanı ve kontrol için kullanılacak kuralların bulunduğu kural tabanından oluşmaktadır. Kural tabanı giriş ile çıkış arasındaki ilişkiyi belirleyen bazı bulanık kurallardan oluşmaktadır.



Şekil 1. BMD'nin genel yapısı.

Genellikle bulanık kurallar EĞER – O HALDE (IF THEN) şart cümlelerinden oluşmaktadır:

$$R^i: \text{IF } u_m = A_m^n \text{ and } u_{m-1} = A_{m-1}^n \text{ THEN } v = B_i \quad (1)$$

burada  $u_m$ , m. giriş değişkeni,  $v$  çıkış değişkeni,  $A_m^n$  n. üyelik fonksiyonu ve  $B_i$ 'de i. kurala ait çıkış üyelik fonksiyonudur.

Çıkarım ünitesi insanın karar verme sürecini taklit etmektedir. Bulanıklaştırılarak dilsel değişkenlere dönüştürülen girişleri, kural tabanındaki kurallara uygulanmakta ve bulanık muhakeme işlemi yapmaktadır. Görüldüğü gibi bilgi tabanı ile çıkarım ünitesi sürekli olarak iletişim içerisinde. Bulanıklaştırılan giriş değerleri kural tabanında yerine konularak ilk önce aktif kurallar tespit edilmekte, daha sonra kurallar bulanık muhakeme yöntemlerinden birisi ile birleştirilmektedir. Max-Min ve Max-Product, en çok kullanılan bulanık muhakeme yöntemlerindedir.

Durulaştırma ünitesi çıkarım ünitesi tarafından elde edilen bulanık kontrol değerini sisteme uygulanabilecek sayısal değer biçimine dönüştürmektedir. Durulaştırma işleminde ağırlık merkezi yöntemi, maksimum üyelik yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemi ve mean-max üyelik yöntemi gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Eş. 2 ile verilen ağırlık merkezi yöntemi en yaygın kullanılan durulaştırma yöntemidir:

$$z^* = \frac{\sum \mu(z) \cdot z}{\sum \mu(z)} \quad (2)$$

burada  $\mu(z)$  çıkarım ünitesi tarafından elde edilen üyelik derecesi,  $z$  her kuralın çıkış değeri,  $z^*$  durulaştırılmış çıkış değeridir (Atacak ve Bay, 2004).

#### 4. BULANIK PI DENETİMLİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ

Güç elektroniği dönüştürücülerin denetiminde sıklıkla kullanılan klasik PI veya PID denetleyiciler, şebeke etkileşimli eviricilerin denetiminde de kullanılabilir. Bu denetleyicilerin kazançları tespit edilirken sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılmaktadır (Ziegler ve Nichols, 1942). Ayrıca bu klasik denetleyicilerin performansları sistem parametrelerindeki değişimlere ve gürültü gibi dış etkenlere karşı çok duyarlıdır. Şebeke etkileşimli eviricinin parametreleri doğal koşullar (güneş ışınım miktarı, rüzgar hızı vb.) veya şebekedeki değişimler nedeniyle değişmektedir. Sistem parametrelerindeki değişimler eviricinin çalışma noktasının da değişmesini gerektirecektir. Sabit kazançlı bir PI veya PID denetleyici kullanıldığında, çalışma noktası değişen eviricinin geçici tepkisi yeterince hızlı olmamakta ve evirici akım kalitesi bekleneni sağlayamamaktadır. Bu nedenle kullanılan denetleyicinin sabit parametrelili değil değişen şartlara göre uyarlanabilir olması gereklidir.

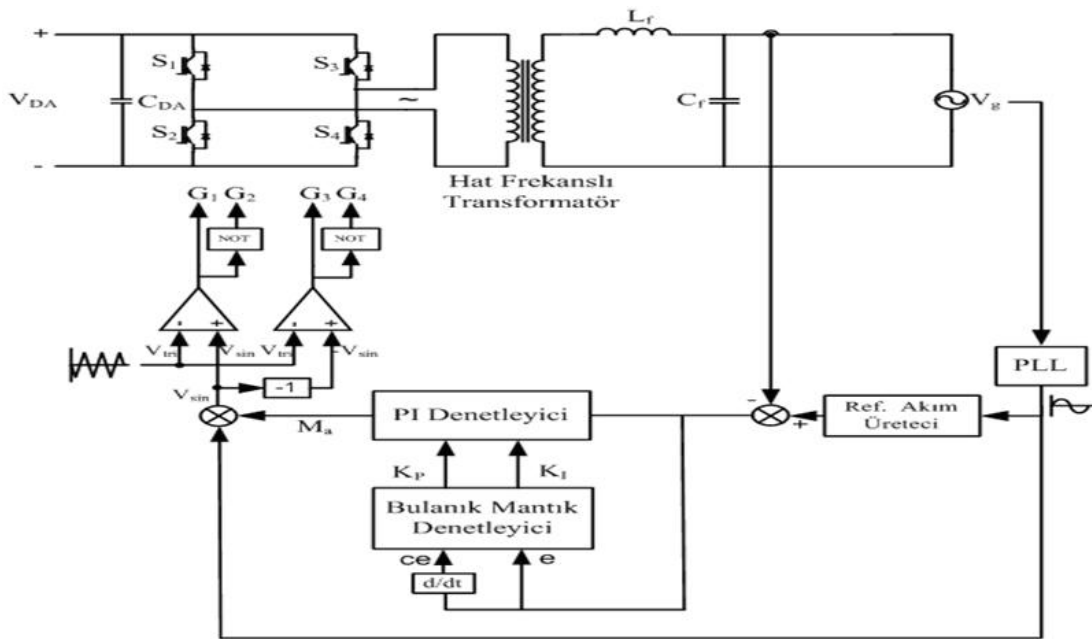
Bulanık mantığın ayarlanabilir, sistem parametrelerinden bağımsız olma ve PI denetimin hızlı tepki özelliklerini birleştirerek Bulanık-PI denetim elde edilebilir. Bu yaklaşım ile PI denetleyicinin oransal (KP) ve integral (KI) kazançları sabit olmayıp çalışma süresince sistemin çalışma noktasına göre belirlenen girişler için bulanık man-

tık tarafından tespit edilmektedir. Şebeke etkileşimli eviricinin Bulanık-PI denetimine ait blok diyagram Şekil 2'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi değişen şartlara göre eş zamanlı olarak sistemin Kp ve Ki kazançlarını tespit edecek iki giriş-iki çıkışlı bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyici tasarımının en önemli adımlarından birisi giriş ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesidir. Şebeke etkileşimli evirici akım kontrollü olarak tasarlandığından tasarlanılacak olan bulanık mantık denetleyici için çıkış akım hatası (e) ve akım hatasının türevi (değişim miktarı) (ce) giriş değişkeni olarak belirlenmiştir. Giriş değişkenlerinin her biri beş üçgen üyelik fonksiyonu ile gösterilmiştir. Girişler e ve ce için belirlenen üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 3 ve 4'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi giriş bilgileri "Negatif Büyük (NB)", "Negatif Küçük (NK)", "Sıfır (S)", "Pozitif Küçük (PK)", "Pozitif Büyük (PB)" gibi dilsel etiketler ile temsil edilmektedir. Hem giriş, hem de çıkış bulanık değişkenler için (-1, +1) birime indirgenmiş Değer Değişim Aralığı kullanılmıştır. Bu nedenle giriş ve çıkış değişkenleri uygun ölçeklendirme katsayıları ile çarpılmıştır.

Bu durum kontrol değişkenleri üzerinde yapılacak ayarlamaları, her bir değişken için sadece tek bir kazanç parametresine indirgemektedir. ie akım hata değişkeni,

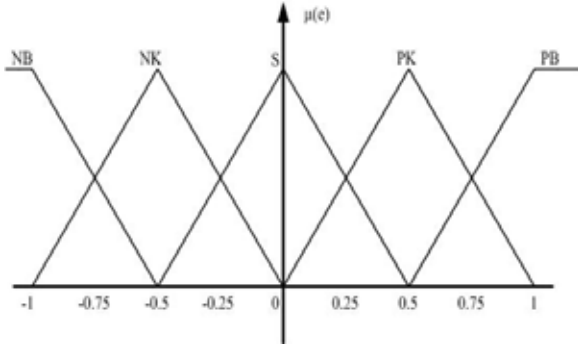
$$i_e = i_{ref} - i \quad (3)$$

$i_{ce}$  akım hatasının değişimi ise,

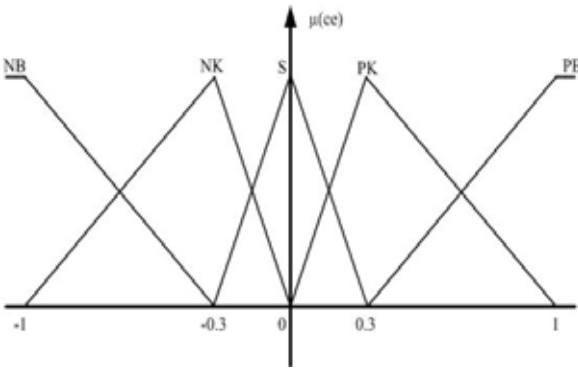


Şekil 2. Sunulan bulanık-PI denetimli şebeke etkileşimli evirici.





Şekil 3. Hata girişi (e) için üyelik fonksiyonları.



Şekil 4. Hatanın değişimi (ce) girişi için üyelik fonksiyonları.

$$i_{ce} = i_e - i_{eo} \quad (4)$$

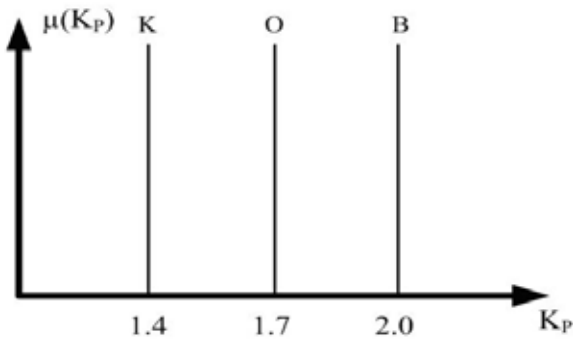
şeklinde hesaplanmaktadır. Bulanık çıkarım yöntemi olarak min-max, durulama yöntemi olarak ise en yaygın kullanılan durulama yöntemlerinden olan ve Eş. 2 ile ifade edilen ağırlık merkezi (center of gravity) yöntemi kullanılmıştır.

Bulanık mantık denetleyicinin çıkışları ise  $K_p$  ve  $K_I$  kazançlarıdır. Çıkışlar  $K_p$  ve  $K_I$  için sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilen "Küçük (K)", "Orta (O)" ve "Büyük (B)" şeklinde dilsel etiketler ile temsil edilen 3 adet bulanık teklik (singletone) tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir.

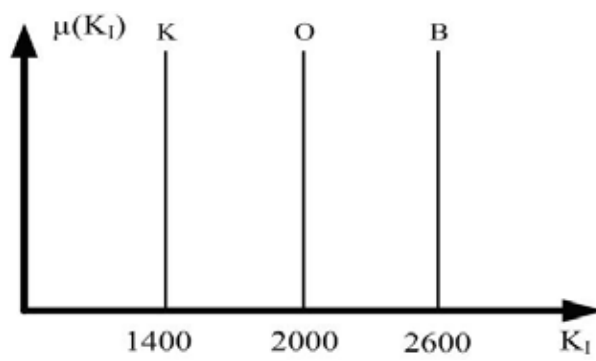
Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin  $K_p$  ve  $K_I$  kazançlarının tespiti için kullanılacak iki ayrı kural tabanı bulunmaktadır.  $K_p$  ve  $K_I$  kazançları için kullanılan kural tabanları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'de gösterilmiştir.

## 5. BENZETİM SONUÇLARI

Bulanık PI denetimli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici benzetimi çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir (Mathworks 2004).



Şekil 5. BMD'nin  $K_p$  çıkışı için belirlenen üyelik fonksiyonları.



Şekil 6. BMD'nin  $K_I$  çıkışı için belirlenen üyelik fonksiyonları.

Tablo 2. KP kazancı için kullanılan kural tablosu.

		Hata (e)				
		NB	NK	S	PK	PB
Hatanın değişimi (de)	NB	B	B	O	O	K
	NK	B	B	O	K	K
	S	O	O	O	O	O
	PK	K	O	O	O	B
	PB	K	K	O	B	B

Tablo 3. KI kazancı için kullanılan kural tablosu.

		Hata (e)				
		NB	NK	S	PK	PB
Hatanın değişimi (de)	NB	K	K	O	B	B
	NK	K	K	O	B	B
	S	O	O	O	O	O
	PK	B	B	O	K	K
	PB	B	B	O	K	K

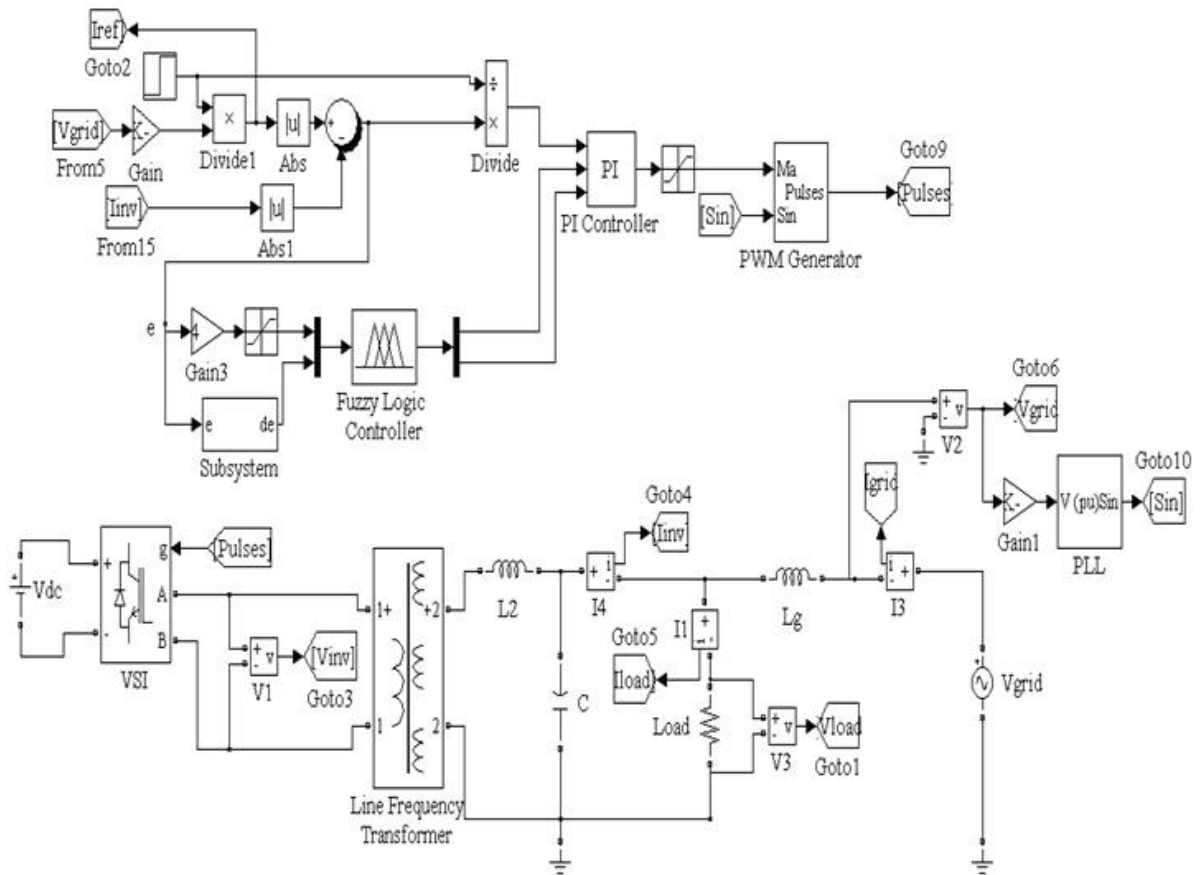
Şebeke geriliminin faz ve frekans bilgisinin algılanmasında FKD devresi kullanılmıştır. FKD ile algılanan şebeke gerilimi örneği şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta akım referansının üretilmesinde kullanılmaktadır.

Evirici çıkışında DA akım enjeksiyonunu engelleyen şebeke frekanslı transformatör kullanılmıştır. Ayrıca şebeke frekanslı transformatör evirici geriliminin şebeke gerilimine yükseltmekte ve şebeke ile yenilenebilir enerji kaynağı arasında elektriksel izolasyon sağlamaktadır. Yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle oluşan harmonik bileşenleri süzmek için bir LC filtre kullanılmıştır. Evirici klasik yarı iletken anahtar olarak IGBT'lerin kullanıldığı tam köprü gerilim kaynaklı eviricidir.

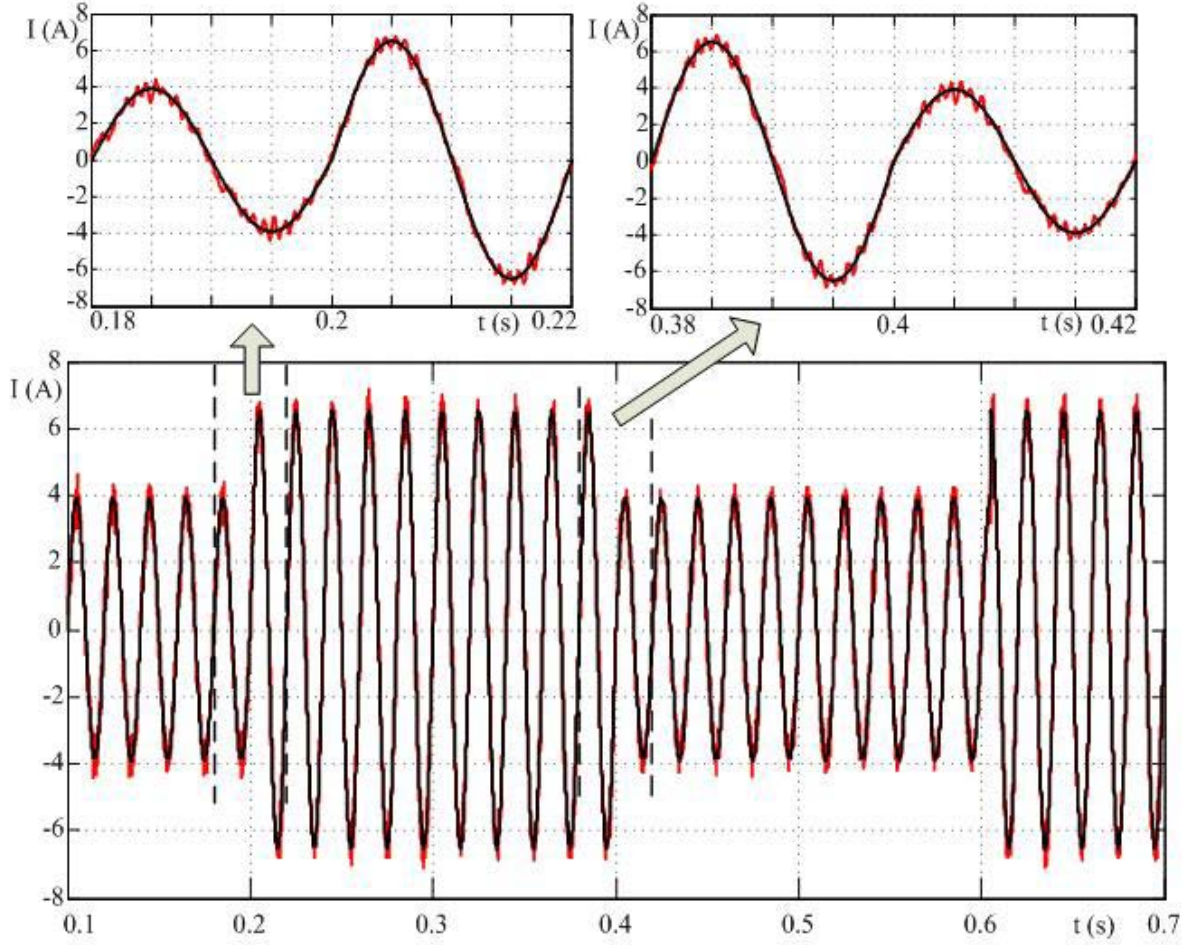
Şekil 8'de evirici çıkış akımı ile akım referansı görülmektedir. Şebeke etkileşimli eviric-

inin akım referansı  $t=0,2s$ 'de % 60 oranında arttırılmış,  $t=0.4s$ 'de ise aynı oranda azaltılmıştır.  $t=0.605s$ 'de ise akım referansı tepe değerinde iken tekrar % 60 oranında arttırılmıştır. Şekil 9'da evirici çıkış akımı ile akım referansı büyütülerek verilmiştir. Şekil 10'da ise akım referansı akımın tepe değerinde iken % 60 oranında arttırıldığında akım referansı ve evirici akımının değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi Bulanık-PI denetimli evirici akımı akım referansını büyük bir başarı ile takip etmektedir.

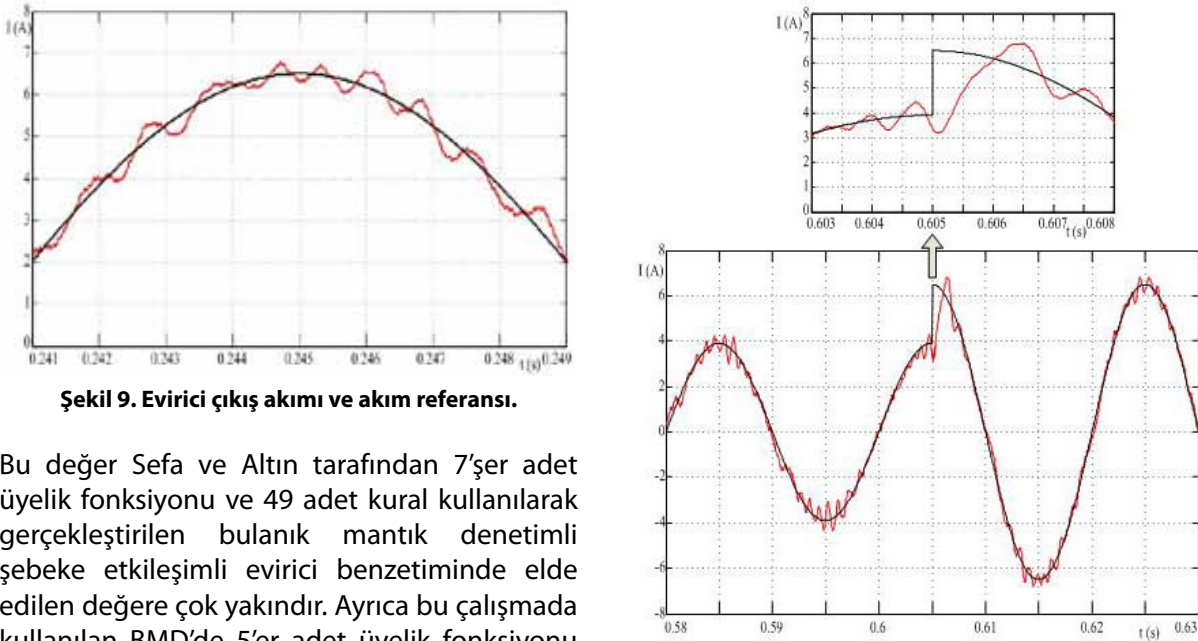
Evirici çıkış akımı ve şebeke gerilimi Şekil 11'de, evirici akımı harmonikleri ise Şekil 12'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi evirici akımı sinüs şeklindedir ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Evirici çıkış akımı THD'si uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dâhilindedir ( $3,85 < 5$ ).



Şekil 7. Bulanık-PI denetimli şebeke etkileşimli evirici simülasyon modeli.



Şekil 8. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.

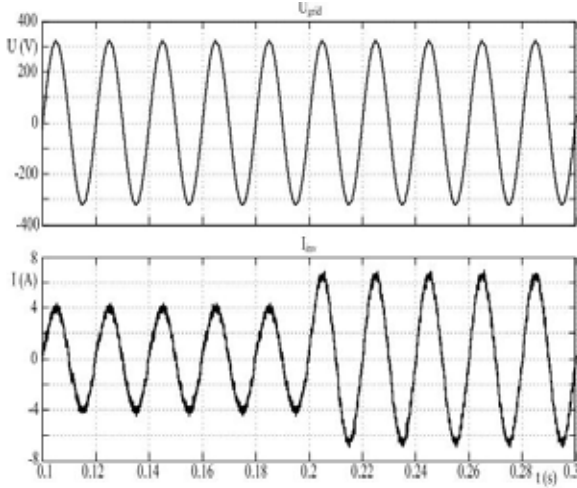


Şekil 9. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.

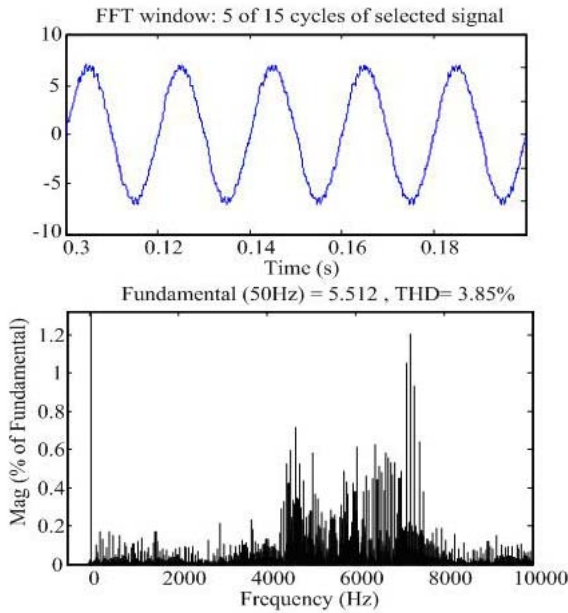
Bu değer Sefa ve Altın tarafından 7'şer adet üyelik fonksiyonu ve 49 adet kural kullanılarak gerçekleştirilen bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici benzetiminde elde edilen değere çok yakındır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan BMD'de 5'er adet üyelik fonksiyonu 25 adet kural kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu ve kural sayısının artırılması durumunda daha iyi değerler elde edilebilecektir.

Şekil 10. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.





Şekil 11. Şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı.



Şekil 12. Evirici çıkış akımı harmonikleri.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Bulanık-PI denetimli şebeke etkileşimli evirici MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Modellenen evirici, gerilim kaynaklı evirici yapısı, şebeke frekanslı transformatör, FKD, LC çıkış filtresi, PI denetleyici ve BMD'den oluşmaktadır. PI denetleyicinin KP ve KI parametreleri sabit olmayıp değişen şartlara göre BMD tarafından belirlenmektedir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar bulanık adaptif PI denetim ile elde edilen denetlene şebeke etkileşimli evirici çıkış akımının sinüs şeklinde olduğunu ve harmoniklerinin de uluslararası standartlara uygun olduğunu göstermiştir. Evirici akımı şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Böylece birim güç faktöründe çalışma elde edilmiştir. Ayrıca evirici akımı, referans akımı büyük bir başarı ile takip etmiştir.

Tablo 4'de farklı parametreler için geleneksel PI denetim ve bulanık adaptif PI denetim ile gerçekleştirilen şebeke etkileşimli evirici benzetimlerinden elde edilen %THD ve güç faktörü (PF) değerleri ve benzetim çalışmalarından alınan değerler ile hesaplanan ortalama bağıl hata (OBH), mutlak hata ile zaman çarpımının integrali (ITAE) ve hatanın karesi ile zaman çarpımının integrali (ITSE) gibi başarımlar ölçütleri verilmiştir. Görüldüğü gibi güç faktörü bütün yöntemler için 0,999 olarak gerçekleşmiştir. Bunun haricinde diğer tüm performans ölçütleri için bulanık adaptif PI denetleyicinin farklı değerlerdeki parametrelerinin kullanıldığı geleneksel PI denetleyicilerden daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Elde edilen benzetim sonuçları ve denetim yöntemlerinin başarımlar ölçütleri.

Denetim Yöntemi	% THD	PF	OBH	ITSE	ITAE
Bulanık Adaptif PI	3,85	0,999	0,02969	0,0231	0,0572
PI ( $K_p=1,4$ $K_I=1400$ )	4,77	0,999	0,03384	0,0264	0,0618
PI ( $K_p=1,4$ $K_I=2000$ )	4,46	0,999	0,0315	0,0254	0,0611
PI ( $K_p=1,4$ $K_I=2600$ )	4,92	0,999	0,03479	0,0262	0,0627
PI ( $K_p=1,7$ $K_I=1400$ )	4,57	0,999	0,03276	0,0260	0,0612
PI ( $K_p=1,7$ $K_I=2000$ )	4,57	0,999	0,03239	0,0254	0,0611
PI ( $K_p=1,7$ $K_I=2600$ )	4,78	0,999	0,03268	0,0248	0,0615
PI ( $K_p=2,0$ $K_I=1400$ )	4,41	0,999	0,03376	0,0262	0,0613
PI ( $K_p=2,0$ $K_I=2000$ )	4,37	0,999	0,03293	0,0256	0,0613
PI ( $K_p=2,0$ $K_I=2600$ )	4,68	0,999	0,02593	0,0265	0,0617

## KAYNAKLAR

- Armstrong, M., Atkinson, D. J., Johnson, C. M., Abeyasekera, T. D. 2006. "Auto-Calibrating DC link current sensing technique for transformerless, grid connected, H-Bridge inverter systems", IEEE Transactions on Power Electronics. 21 (5), 1385-1393.
- Atacak, İ. and Bay, Ö. F. 2004. "Bulanık mantık denetimli seri aktif güç filtresi kullanarak harmonik gerilimlerin bastırılması". Gazi Üniv., Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 19 (2), 205-215.
- Baker D.M., Agelidis V.G. and Nayer C.V. 1997. "A comparison of tri-level and bi-level current controlled grid-connected single-phase full-inverters", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '97., 7-11 July 1997, Guimariies, Portugal. Vol. 2, 463-468.
- Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T. and Agelidis, V. G. 2002. "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview" IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 23-27 June 2002, Queensland Australia. Vol. 2, 1995-2000.
- Chen, Y., Smedley, K. 2008. "Three-phase boost-type grid-connected inverter", IEEE Transactions on Power Electronics. 23 (5) 2301 – 2309.
- Chung S. K. 2000. "Phase-Locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems", IEE Proceedings on Electric Power Applications. 147 (3), 213-219.
- Cramer, G. and Grebe R. 1992. "Grid connection of PV plants in the power range from 2 kW to 1 MWp". Proceedings of the 11th. E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 12-16 October, 1992, Montreux, Switzerland. 1151-1154.
- Gonzalez, R., Gubia, E., Lopez, J., Marroyo, L. 2008. "Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics. 55 (7) 2694 – 2702.
- Hirachi K. and Tomokuni Y. 1997. "Improved control strategy to eliminate the harmonic current components for single phase pwm current source inverter". 19th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97, 19-23 Oct. 1997, Melbourne, Australia. 189-194.
- Jain, S., Agarwal, V. 2007. "A single-stage grid connected inverter topology for solar pv systems with maximum power point tracking", IEEE Transactions on Power Electronics. 22 (5), 1928-1940.
- Kjaer, S. B., Pederson, J. K. and Blaabjerg, F. 2005. "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules". IEEE Transactions on Industry Applications. 41 (5), 1292-1306.
- Krampitz, I., Kreutzman, A. 2002. "From masterpiece to team work, inverter market survey: sma's new circuit concept promises higher yields", Photon. (3), 56-67.
- Li, H., Wang, K., Zhang, D., Ren, W. 2007. "Improved performance and control of hybrid cascaded h-bridge inverter for utility interactive renewable energy applications", IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC 2007, Orlando, Florida. 2465-2471.
- Mamdani, E.H. 1974. "Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant". IEEE Proc. D. (121), 1585-1588.
- Mathworks, 2004. "MATLAB/SIMULINK Release Notes for Release 14 with Service Pack 3", the Mathworks Inc.
- Mathworks, 2005. "Fuzzy Logic Toolbox 2 User Guide", The Mathworks, Inc., 2005.
- Myrzik, J. M. A., Calais, M. 2003. "String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - A Review" IEEE Power Tech Conference, Bologna. Italy. (2): 1-8.
- Premrudeepreechacharn, S., Poapornsawan, T. 2000. "Fuzzy logic control of predictive current control for grid-connected single phase inverter". Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 15-22 September 2000, Anchorage, Alaska. 1715-1718.
- Saha, S. and Sundarsingh, V.P. 1996. "Novel grid-connected photovoltaic inverter". IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution. 143 (2), 219-224.
- Sefa İ. and Altın N. 2006. "Simulation of current controlled grid interactive inverter" TPE-2006 3rd Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, 29-31 May 2006, Ankara Turkey. 964-968.
- Sefa İ., Altın N., Ozdemir S., Demirtas M. 2008. "dSPACE based control of voltage source utility interactive inverter", IEEE 19th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 11-13. June, 2008. Ischia. Italy, 662-666.

Sefa, İ. and Altın, N. 2008. "Simulation of fuzzy logic controlled grid interactive inverter". TPE-2008 4th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering. 4-6 September 2008, Pitesti, Romania. (III), 90.

Zadeh, L. A. 1965. "Fuzzy sets," Information and Control. (8), 338-352.

Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. 1942. "Optimum settings for automatic controllers", Transactions of ASME. (64), 759-768.