

# PIC DENETİMLİ REAKTİF GÜÇ RÖLESİ TASARIMI

**Ramazan BAYINDIR ve Orhan KAPLAN**

GEMEC-Gazi Elektrik Makineleri ve Enerji Kontrol Grubu, Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Beşevler, Ankara, [bayindir@gazi.edu.tr](mailto:bayindir@gazi.edu.tr), [orhan.kaplan@mynet.com](mailto:orhan.kaplan@mynet.com)

(Geliş/Received: 11.11.2005; Kabul/Accepted: 03.04.2006)

## ÖZET

Bu çalışmada birden çok alıcının bulunduğu bir sistemin reaktif güç ihtiyacını sürekli olarak kontrol eden bir reaktif güç rölesi tasarlanarak uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sisteme ait akım ve gerilim bilgileri sürekli olarak ölçülüp PIC'e aktarılmıştır. Bu bilgiler kullanılarak, yükün ihtiyaç duyduğu reaktif güç yazılım ile hesap edilmiş ve uygun kondansatör grupları tek adımda devreye alınarak minimum anahtarlama yapılmıştır. Tasarlanan röle üç fazdan örnekleme aldığı için dengesiz yüklü sistemlerin reaktif güç kompanzasyonuna, her fazın akım, gerilim, güç katsayısı, aktif ve reaktif güçlerin izlenmesine imkan sağlamaktadır. Uygulama neticeleri tasarlanan rölenin basit yapılı ve küçük boyutlu olduğunu, sistemin güç katsayısını 0.95 ile 1.00 arasında tuttuğunu, bütün bu özellikleri nedeniyle piyasadaki rölelerden daha kullanışlı ve ekonomik olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç katsayısı, kompanzasyon, mikrodenetleyici, PIC.

## DESIGNING OF A REACTIVE POWER RELAY BASED ON A PIC

### ABSTRACT

In this study, a reactive power compensation relay continuously controlling the reactive power of the system with more than one load has been designed and implemented. The current and the voltage data are loaded into a PIC. Using the measured data, the reactive power required for compensation was calculated via the software and the capacitor groups were taken in service at a single step to achieve minimum number of switching. The relay developed takes samples from each phase, and therefore it is capable of compensation of unbalanced systems, and observing the current, the voltage, the power factor, the active power and the reactive power in each phase of unbalanced systems. Experimental results show that the developed relay is user friendly and has small dimensions. Moreover, the power factor of the system was kept between 0.95 and 1.0. Due to these features, the designed relay is more useful and economic than other relays used in market.

**Keywords:** Power factor, compensation, microcontroller, PIC.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç sistemlerinde yükler genellikle endüktif karakterde olduklarından şebekeden aktif gücün yanında geri reaktif güç de çekerler. Aktif güç yük tarafından mekanik, ısı, ışık gibi enerjilere dönüştürülerek kullanılır. Reaktif güç ise iş görmeyen güçtür, gereksiz yere santrali ve hattı yükler. Fakat motorlarda döner alanın, transformatorlerde manyetik alanın oluşturulabilmesi için reaktif güç zorunludur. İletim ve dağıtım sistemlerinden daha fazla aktif güç iletebilmek için, gerekli reaktif gücü ihtiyaç duyulan yerde elde etmek en iyi yöntemdir. Üretilen enerjinin verimli bir şekilde iletilmesi ve tüketilmesi için en uygun olanı, reaktif gücün santralde değil de, tüketildiği yerde üretilmesidir. Endüktif yüklerin şebekeden çekmiş olduğu geri reaktif gücün, be-

lirli teknikler kullanarak kapasitif özellikteki ileri reaktif güç çekilip dengelenmesine reaktif güç kompanzasyonu (RGK) denir. Böylece yükün şebekeden çekmiş olduğu reaktif güç, dolayısıyla görünür güç azalacaktır [1-4]. İleri reaktif güç ise, ya kondansatörlerden, ya da senkron makinelerden sağlanmaktadır. RGK'nun yapılabilmesi için sistemin güç katsayısının mutlaka bilinmesi ve sürekli olarak izlenmesi gereklidir. Güç katsayısının düzeltilmesi elektrik tesislerinde aşağıda belirtilen yollarla sağlanır;

- Alternatörlerin, enerji nakil hatlarının ve transformatorlerin yükleri azalır. Bu da yeni yükler için imkan sağlar.
- Hatlardaki toplam gerilim düşümü azalır.
- Tesisteki toplam kayıplar azalır.

- Kayıplar en küçük değere indirildiği için, küçük güçlü transformatörler seçilebilir, küçük akım değerli devre açıcı elemanları kullanılabilir, tesisin kablo ve iletken kesitleri daha küçük seçilerek toplam tesis maliyeti azalır.

Yapılan RGK çalışmalarında ise güvenilirliği, verimliliği ve değişik çalışma koşullarında sistemin kararlılığını sağlayabilmek için yeni kontrol teknikleri geliştirilmektedir [5-8].

Reaktif güç aşağıda belirtilen yöntemlerle üretilebilir [9]:

- Santral ünitelerinde reaktif güç üretimi; senkron generatörün uyarım akımı ayarlanarak dış devreye verdikleri reaktif güç şebeke ihtiyacına göre endüktif veya kapasitif özellikte olabilir.
- Senkron motorlarla reaktif güç üretimi; senkron motorların uyarım akımlarının ayarlanarak motorun kapasitif veya endüktif olarak çalıştırılması sağlanabilmektedir. Eğer senkron motor tesiste herhangi bir başka amaç için kullanılmıyorsa, sadece dinamik güç kompanzatorü olarak kullanılması uygun değildir.
- Kondansatörler, reaktif gücün üretildiği yerde karşılanabilmesi için kullanılan elemanlardır. Hareketli parçası olmadığı için statik kompanzasyon elemanları olarak ifade edilebilir [10]. Senkron motorlara oranla üstünlükleri çoktur. Bakım masrafları yoktur, verimleri yüksektir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan reaktif güç kompanzasyonu elemanıdır. Statik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinden bazıları şöyle sıralanabilir [11-18]:

- Tristör anahtarlama kapasitörler (TAK)
- Tristör kontrollü reaktörler (TKR)
- Tristör kontrollü transformatörler (TKT)
- Şönt kapasitörlü, tristör kontrollü reaktörler

Bu çalışmada birden çok alıcının bulunduğu bir sistemin reaktif güç ihtiyacını sürekli olarak kontrol eden PIC 16F877 denetleyicili bir reaktif güç rölesi tasarlanmıştır. Tasarlanan röle ile sistemin güç katsayısını 1'e yaklaştırmak için gerekli ileri reaktif güç ihtiyacı tespit edilmiştir. Deneysel neticeler gerçekleştirilen sistemin çok basit, kullanışlı, daha hassas, güvenli ve değişik uygulamalara hemen uyarlanabilir olduğunu göstermiştir. Çalışmada kompanzasyon sisteminin denetleyici tabanlı olarak yapılabilmesi için, sisteme ait akım ve gerilim seviyeleri denetleyici girişlerine uygulanacak hale getirilmiştir. Daha sonraki aşamada, PIC 16F877 denetleyicisi ile anahtarlama sinyalleri elde edilerek, reaktif güç ihtiyacı kondansatörler tarafından karşılanmıştır. Geliştirilen rölenin piyasadaki rölelere göre en büyük üstünlüklerinden birisi, sistemi kompanze etme hızıdır. Piyasada kullanılan reaktif güç röleleri kademeli olarak çalışmaktadırlar, yani istenilen kondansatör gruplarını adım adım devreye almak suretiyle sistemi kompanze ederler. Tasarlanan röle ise, bu işlemi gerekli hesaplamaları yaparak tek adımda gerçekleştirir. Yapılan çalışmada motorların yol alma süreleri dikkate alınarak adım süresi 10 s seçilmiştir.

Yapılan deneylerde sürenin daha da kısa tutulması, tasarlanan reaktif güç rölesinin geçici durumlara da tepki göstermesine, dolayısıyla anahtarlama sayısının artmasına ve titreşime neden olmuştur. Gecikme süresi istenildiğinde şebekeye bağlı endüktif yük alıcısının çeşidine göre ayarlanabilir. Tasarlanan rölenin piyasadaki rölelere göre bir diğer üstünlüğü ise, donanımda hiçbir değişiklik yapmadan, sadece mikrodenetleyicinin program algoritması değiştirilmek suretiyle kapasitif reaktif güç, görünür güç, fazlar arası gerilim, toplam reaktif güç, toplam görünür güç gibi sisteme ait değerlerin izlenebilmesi röleyi çok amaçlı hale getirmektedir. Diğer bir üstünlüğü ise, üç fazdan örnekleme alınarak her bir fazın akım, gerilim ve güç katsayısı değerlerini sürekli olarak izlenebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu sayede sistemin dengesi kullanıcı tarafından kolaylıkla gözlemlenebilir. Gerektiğinde yazılımda çok küçük değişiklikler yapılarak fazlar arasındaki aşırı dengesizliklerde kullanıcı bilgilendirilebilir veya koruma amaçlı olarak sistem devreden çıkarılabilir. Bu açıdan bakıldığında, tasarlanan reaktif güç rölesi geliştirmeye açık ve oldukça güvenilirdir.

Tüm bu üstünlüklere ilave olarak, klasik reaktif güç rölelerinde bulunan; akım yönünün otomatik olarak algılanması, kullanıcıyı ikaz eden uyarıların bulunması, menüsünün basit olması ve boyutlarının küçük olması gibi temel özellikler tasarlanan rölede de bulunmaktadır.

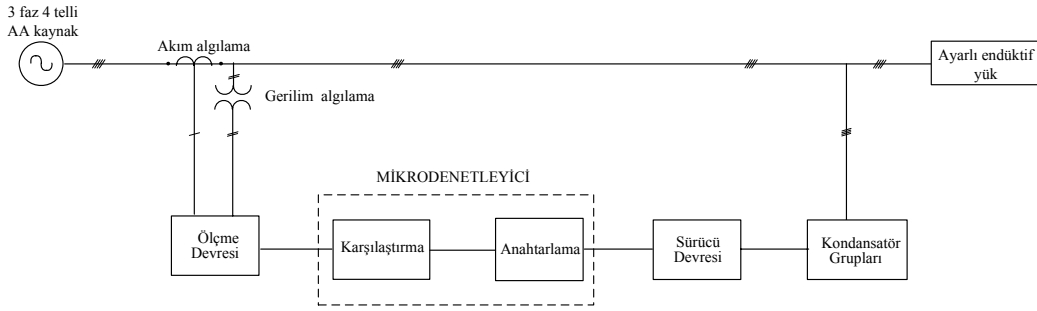
## 2. KONTROL SİSTEMİ VE ÖLÇMELER (CONTROL SYSTEM AND MEASUREMENTS)

Bu çalışmada birden çok alıcının bulunduğu bir sistemin reaktif güç ihtiyacını sürekli olarak kontrol eden yeni bir reaktif güç rölesi tasarlanarak uygulaması gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de kontrol sistemine ait blok diyagramı görülmektedir. Kontrol sistemi blok diyagramı; PIC 16F877 mikrodenetleyici, ölçme devresi, sürücü devre, kondansatör grupları ve ayarlı endüktif yüklerden oluşmaktadır.

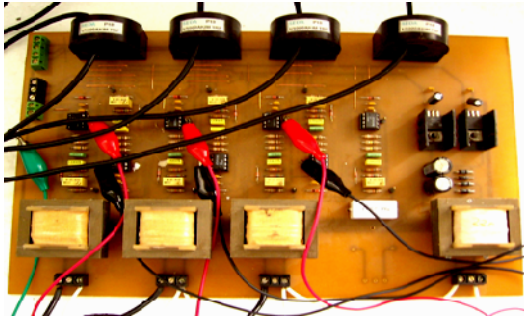
### 2.1. Mikrodenetleyiciler (Microcontrollers)

Bir bilgisayar içerisinde bulunması gereken temel bileşenlerden CPU, RAM, ROM ve I/O ünitesinin tek bir entegre içerisinde üretilmesiyle elde edilen yapıya mikrodenetleyici denir. Bilgisayar teknolojisi gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmış olan mikrodenetleyiciler, mikroişlemcilerle göre çok daha basit ve ucuzdur.

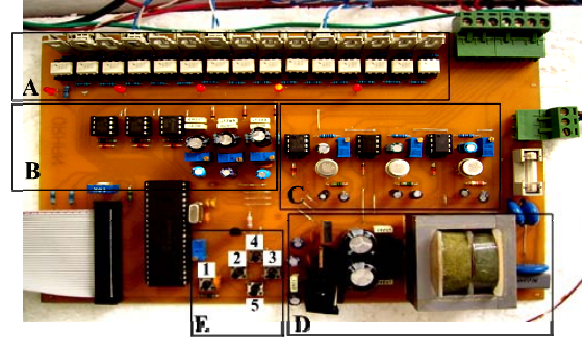
Mikrodenetleyiciler, mikroişlemcilerle çok benzemektedirler. Mikroişlemcili bir sistem işlemci dışında program saklamak için bellek elemanları ve dış dünyayla bağlantı kurmak için giriş/çıkış arabirim devrelerine gereksinim duyar. Mikroişlemci yalnız başına kullanılamaz. Bu çalışmada denetleyici olarak Microchip'in PIC serisi 16F877 denetleyicisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyicilerde çevresel arabirimler, bir tümleşik aygıt içinde birleştirildiğinden sistem hızı ve güvenilirliği artmıştır, maliyet azalmıştır. Kullanım kolaylığı sağlanmakla birlikte karmaşık yapı ortadan kaldırılmıştır [19]. PIC



Şekil 1. Kontrol sistemi blok diyagramı (Block diagram of the control system)



Şekil 2. Sistem akım ve gerilim bilgilerini örnekleyen kart (Sampling card)



Şekil 3. Reaktif güç rölesi olarak hazırlanan kart (Measurement card as a reactive power relay)

16F877 mikrodenetleyici 40 pinlidir. Bunlardan 33 pin giriş/çıkış, diğer 7 pin PIC'in çalıştırılması için kullanılmaktadır. PIC 16F877 üzerinde 368 byte'lık RAM ve 256 byte EEPROM veri belleği vardır. 3 adet zamanlayıcı/sayıcı, 2 adet algılama/karşılaştırma/DGM, 2 adet seri ve 8 adet 10 bitlik A/D konvertör modülüne sahiptir. Bir komutun işleme hızı 200 ns'dir. 8 kbyte flash belleği 1 milyon kez programlanabilir [20].

## 2.2. Donanım ve Deneysel Düzenek (Hardware and Experimental Test Setup)

Öncelikle sisteme ait akım ve gerilim bilgileri ölçülüp mikrodenetleyici girişlerine uygun hale getirilmiştir. Akım bilgisini okumak için her bir faza dönüştürme oranı 1:1000 olan akım transformatörleri bağlanmıştır. Gerilim bilgisini okumak için de benzer bir yol izlenmiş, her bir faza dönüştürme oranı 220/5 olan gerilim transformatörleri bağlanmıştır. Şekil 2'de sistem akım ve gerilim bilgilerini örnekleyen kart görülmektedir. Bu kart ile sistemin akım ve gerilim bilgileri dönüştürme oranlarına uygun alınabilmektedir. Kart üzerinde kullanılan opamp'lar ve potansiyometreler yardımıyla her bir fazın akım ve gerilim seviyeleri değiştirilebilmektedir.

## 2.3. Reaktif Güç Rölesi Kartı (Reactive Power Relay Card)

Sistemden alınan 3 adet akım bilgisi ve 3 adet gerilim bilgisi, Şekil 3'te verilen reaktif güç rölesi kartının girişlerine uygulanır. Kart A, B, C, D ve E olmak üzere 5 ana

kısımdan oluşmaktadır. A çıkış katıdır. Bu katta, mikrodenetleyicinin ürettiği uygun sinyaller kondansatörleri devreye alacak anahtarların sürme devresine aktarılır. B gerilim bilgisi için sıfır geçiş dedektörü, C akım bilgisi için sıfır geçiş dedektörüdür. Sıfır geçiş dedektörlerinin buradaki görevleri; girişlerine uygulanan alternatif gerilimlerin sıfırdan geçtiği anda çıkışta lojik 1 sinyali vermeleridir [21, 22]. Elde edilen bu sinyaller denetleyici girişlerinde kullanılacaktır. D besleme ünitesidir; kart üzerinde kullanılan mikrodenetleyicinin ihtiyaç duyduğu gerilimi sağlamaktadır. E ise tuş takımıdır; bu kısımda 5 adet buton bulunmaktadır. 1 nolu buton reset butonudur, kullanıcı yaptığı ayarları bu buton ile sıfırlayabilir. 2 ve 3 nolu butonlar yukarı/aşağı butonlarıdır, kullanıcı bu butonlar sayesinde değer değişikliklerinde artırıp-azaltma, alt menülerde dolaşma yapabilir. 4 nolu buton ise set butonudur. Kullanıcı yeni değer atama ve bir sonraki menüye geçmeyi bu butondan yapabilir. 5 nolu buton geri butonudur, kullanıcı bir önceki menüye bu buton sayesinde dönebilir. Ayrıca kart üzerinde LCD ekran için bir çıkış bulunmaktadır. Deneysel sistemin reaktif güç çekebilmesi için Tablo 1'de etiket değerleri verilen asenkron motorlar yük olarak çalıştırılmıştır.

## 2.4. Sürücü Devresi ve Motorların Çalıştırılması (Driving Circuit and Operation of the Motors)

Asenkron motorların ilk kalkınma anında çok yüksek akım çekmesi göz önünde bulundurularak, deneyde motorlar ilk kalkınma anında yıldız daha sonra ise üçgen

Tablo 1. Motorların etiket değerleri (Motor labels)

Yük adı	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (kW)	Güç katsayısı	Frekans (Hz)	Devir sayısı (d/d)	Üretici Firma
M1	380 Δ	6.4	3.0	0.86	50	1420	AEG
M2	380 Δ	7.5	3.3	0.83	50	2850	Ftromberg
M3	380 Δ	7.1	3.0	0.80	50	1420	Siemens
M4	380 Δ	7.5	3.3	0.83	50	2850	Ftromberg

çalıştırılmıştır. Bunun için Şekil 4'deki pano kullanılarak motorların yıldız/üçgen yol verme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılayacak kondansatör grupları 1-2.5-5-10 kVAr güçlerinde seçilmiştir. Bu gruplardan her biri tasarlanan röle sayesinde ihtiyaca göre devreye alınıp çıkarılırlar.

Şekil 5'te kondansatör gruplarını kontrol eden kontaktör panosuna ait bir fotoğraf verilmiştir. Kondansatör gruplarını devreye alıp çıkarmak için kontak akımları 25 A, güçleri 15 kVAr olan kompanzasyon kontaktörleri kullanılmıştır. Kompanzasyon kontaktörünün özelliği, üzerinde bulunan dirençler sayesinde kapama anında başgösteren akım darbelerini en aza indirmesidir. Kontak çıkışları uygun değerdeki sigortalar üzerinden sisteme bağlanarak kondansatörler kısa devreye karşı korunmaktadır. Şekil 6'da ise kompanzasyon kontaktörlerini anahtarlama için kullanılan sürme devresi görülmektedir. Sürücü devrede kullanılan triyaklar 16 A, 600 V değerlere sahiptir. Şekil 7'de sisteme ait bir fotoğraf verilmiştir. Fotoğraf üzerinden deneyde kullanılan motorlar, motor sürme devresi, kapasitör grupları, kompanzasyon kontaktörleri, tasarlanan reaktif güç rölesi ve diğer ölçü aletleri görülmektedir.

## 2.5. Geliştirilen Yazılım (Software)

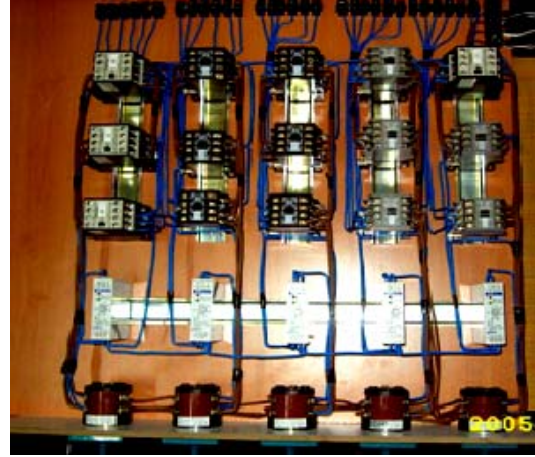
Sisteme ait akım, gerilim, aktif güç, ve güç katsayıları sürekli olarak PIC ile ölçülmüş, yükün ihtiyaç duyduğu kondansatör gücü ( $Q_c$ ) hesap edilerek uygun kapasite grupları devreye alınmıştır. Ayrıca kapasite gruplarını devreye alıp çıkarmalarda minimum anahtarlama sağlanmıştır. Bu da kullanılan anahtarlama elemanlarının ve kondansatörlerin daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla ekonomik bir şekilde kompanzasyon yapmak mümkün olmaktadır. Böylece sistemin güç katsayısı kabul edilebilir değerler olan 0.95 ile 1.0 arasında tutulmuştur.

Mikrodenetleyiciye yüklenen programın algoritması Şekil 8'de görülmektedir. Programda ilk olarak sisteme ait akım ve gerilim bilgileri ölçülerek PIC'e aktırılır, akım ve gerilim arasındaki fark  $\mu s$  cinsinden hesaplanır. Bu değere karşılık gelen açı değeri ( $\cos\phi_1$ ) programda hazırlanan tablodan seçilir. Kullanılan tablo 90 satırdır ve 1 derece hassasiyete sahiptir. Daha sonra kullanıcıdan hedeflenen güç katsayısı değeri ( $\cos\phi_2$ ) istenir ve manuel olarak girilen bu değer referans olarak kabul edilir. Gerekli kondansatör gücünün PIC tarafından hesaplanması iki adımda gerçekleştirilir. İlk olarak referans değer ile sistemin mevcut reaktif güç katsayısı arasında Eşitlik 1'den faydalanarak "k" ifadesi bulunur.

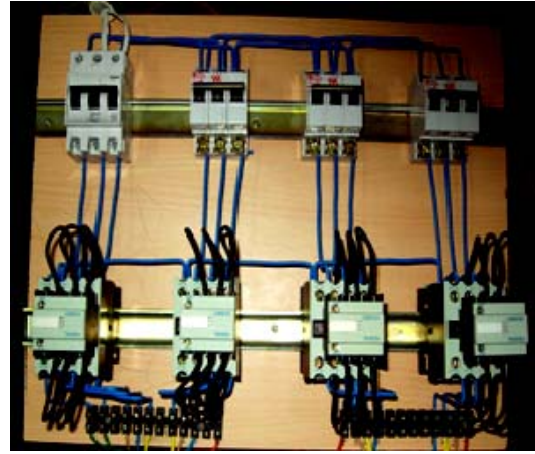
$$k = \tan\phi_1 - \tan\phi_2 \quad (1)$$

Bu bağıntı Eşitlik.2, 3 ve 4 kullanılarak elde edilmiştir. Kompanzasyon yapılmadan önceki şebekenin reaktif gücü;

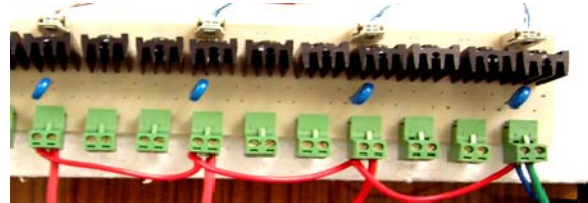
$$Q_1 = P \cdot \tan\phi_1 \quad (2)$$



Şekil 4. Motor yıldız-üçgen yol verme panosu (Wye-triangle starting panel of the motor)



Şekil 5. Kondansatör grupları kontaktör panosu (Contactor panel of the capacitor groups)



Şekil 6. Kompanzasyon kontaktörü bobinlerini anahtarlama sürücü devresi (Driving circuit of the compensation contactor)



Şekil 7. Deney düzeneği (Experimental test setup)



**Tablo 3.** Deneyden alınan değerler (Experimental results)

Yük adı	$I_{faz}(A)$	$V_{faz}(V)$	$\cos\phi$	P (W)	S (VA)	Q (VAr)	Gerekli Kondansatör güçleri (kVAr)
M1	3.00	227	0.173	353.40	2043.00	2010.30	1.80
M2	4.10	227	0.207	577.90	2792.10	2731.60	2.40
M3	6.00	226	0.173	703.70	4068.00	4006.10	3.60
M4	4.20	227	0.241	689.30	2860.20	2775.80	2.40
M1, M2	7.10	227	0.173	836.40	4835.10	4762.10	4.40
M1, M2, M3	13.1	226	0.207	1838.5	8881.80	8689.30	7.70
M1, M2, M3, M4	17.3	227	0.207	2438.7	11781.3	11525.9	10.3

ve sinyal vermek suretiyle kullanıcıyı ikaz ederek programı sonlandırır. Eğer bulunan kondansatör gücü, 0'dan büyükse, hedef değeri sağlayan en uygun kapasite grubunu devreye alır. Kondansatör gruplarının devreye alınmasıyla oluşan yeni gerilim, akım ve güç katsayısı değerleri tekrar LCD ekrana yazdırılır. Bu değerler 10 s ekranda kalır. Program son olarak hedef değer test edildiği satıra gelir, hedef değer sağlandıysa değerler ekrana yenilenerek yazdırılır, aksi durumda program kondansatör gücünün hesaplandığı satıra tekrar dönerek kullanıcının istediği değer sağlanana kadar bu akışta devam eder. Gerçekleştirilen yazılım toplam 4 kbyte yer kaplamaktadır. Toplam hafıza ise 8 kbyte'tır. Bu nedenle hesaplamalarda herhangi bir hafıza yetersizliği ile karşılaşılmamıştır.

### 3. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneye farklı endüktif yük alıcısı olarak kullanılan dört asenkron motorun sıra ile devreye alınmasıyla başlanmış, daha sonra sırasıyla birinci motor devrede iken ikincisi, sonra üçüncüsü, en son olarak da dördüncü motor devreye alınmıştır. Bu kombinasyonların her biri için akım, gerilim ve  $\cos\phi$  değerleri ölçülüp Tablo 3'e kaydedilmiştir. Alınan değerlerden bütün motorların aktif, reaktif, görünür güç ve kompanzasyon için gerekli kondansatör gücü değerleri hesaplanmıştır.

Mikrodenetleyici kontrollü kart sisteme bağlandığında, Şekil 9'da display de her bir fazın güç katsayısının gösterildiği bir menü (PF\_R; PF\_S; PF\_T) ekrana gelir. Ayrıca güç katsayısının hedeflenen değeri de ekranda PF SET olarak görünür. Kullanıcı yön tuşları vasıtasıyla istediği seçeneklerden birini onaylayabilir. Referans değerleri 0.90-0.92-0.95 ve 0.97 olmak üzere 4 ayrı değere set edilebilir.

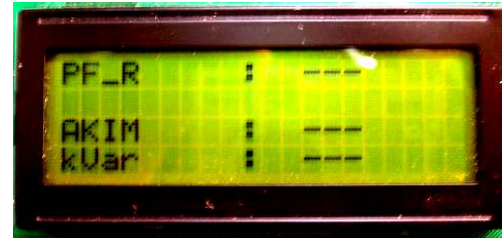
Devrede herhangi bir alıcı yoksa Şekil 10'da verilen ekran görülür. Böylece kullanıcı sistem üzerinde ölçüm yapılabilecek herhangi bir alıcı olmadığını (akım ve gerilim sıfır) anlayabilir. Eğer şebekeye bir endüktif yük alıcısı bağlıysa röle, sistemin güç katsayısını Şekil 11'de verildiği gibi tespit ederek hedef değerin girilmesi için bekler. Bu değer (0.97) kullanıcı tarafından ayarlandıktan sonra Şekil 12'de verilen sistemin üç fazına ait akım ve gerilim bilgileri ile kompanzasyon için gerekli kondansatör gücü ekrana yazdırılır ve uygun anahtarlama sinyalleri üreterek sistemi kompanze eder.

Sisteme bir osiloskop bağlanarak akım ve gerilim dalga şekilleri farklı alıcılar devrede iken kaydedilmiştir.

Bu tasarımda şebeke akımı sinüsoidal olarak kabul edilmiştir. Fakat alıcı olarak kullanılan motorlar şebekeden tam sinüsoidal bir akım çekmemişlerdir. Sistem kompanze edilmeden önce, özellikle 5. harmoniğin şebeke akımını olumsuz etkilediği Şekiller 13a, 14a, 15a, 16a, 17a ve 18a'da verilmiştir. Kondansatörler harmonik üreten eleman olmamakla birlikte, mevcut harmonik seviyelerinin etkin bir biçimde artmasına neden olurlar [23]. Bu durum açılmal frekansı  $\omega$  olan ve harmonik içermeyen bir devrede, kondansatörün



Şekil 9. Reaktif güç rölesi menüsü (Menu of reactive power relay)



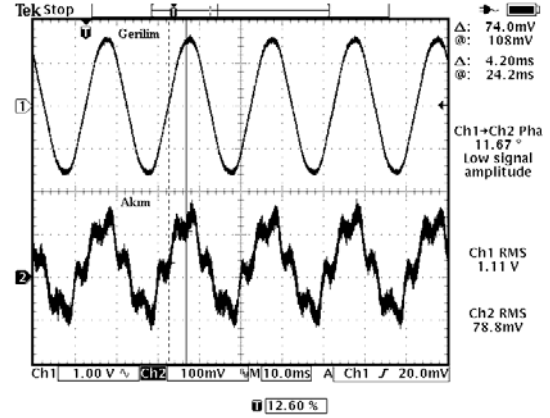
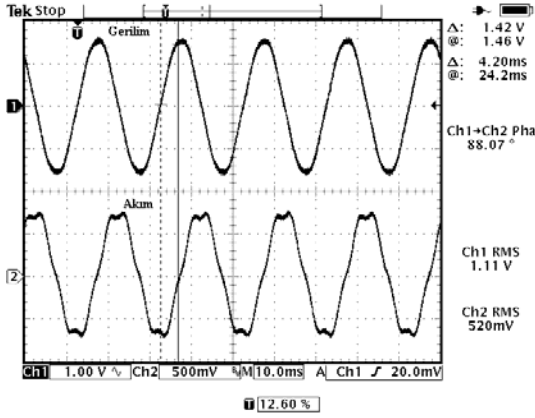
Şekil 10. Devrede alıcı yok iken röle ekranı (Screen of relay during unloaded system)



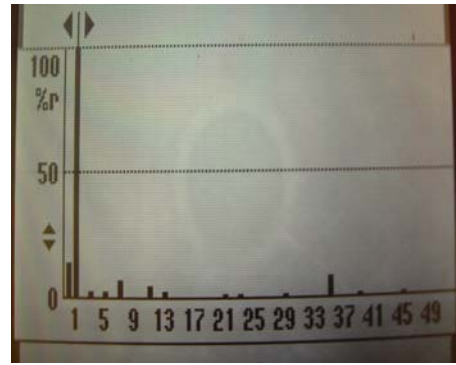
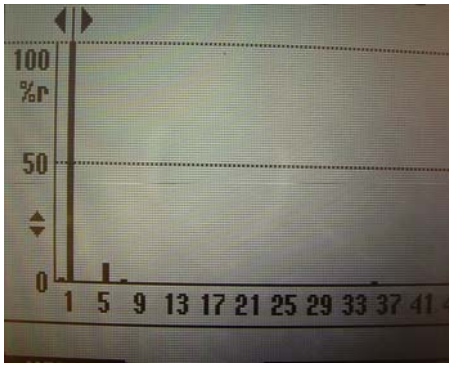
Şekil 11. Sistemin güç katsayısı (Power factor of the system)



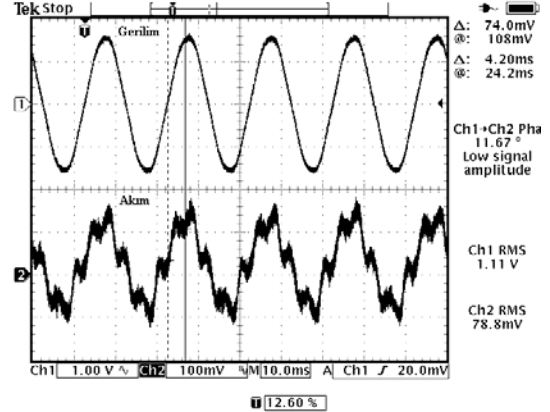
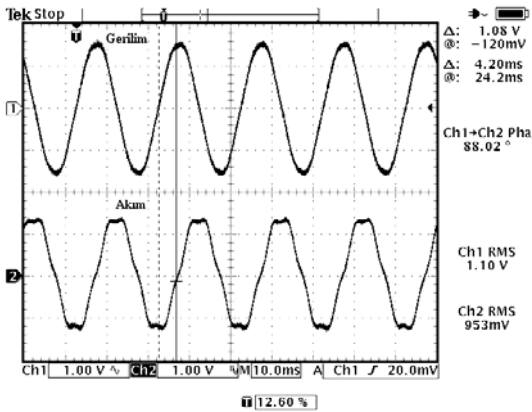
Şekil 12. Ölçüm anında röle ekranı (Screen of relay during loaded system)



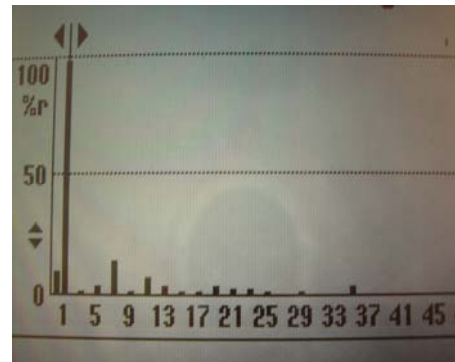
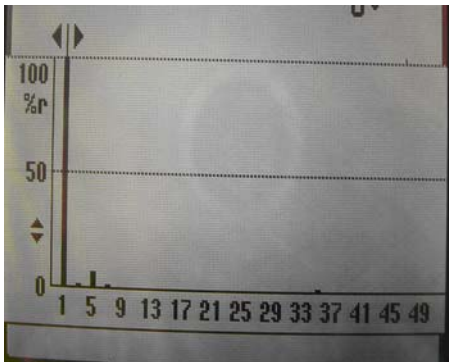
(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (5 kVAR) (After compensation)  
Şekil 13. M1, M2 motorları devrede iken gerilim, akım eğrileri (Current and voltage waveforms when M1 and M2 in operation)



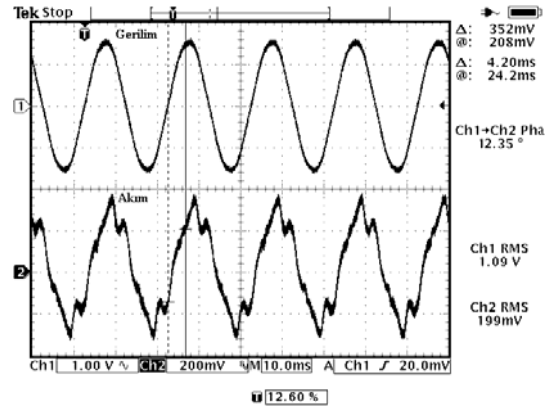
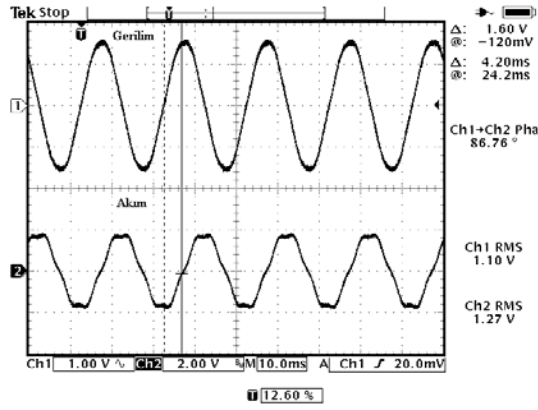
(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (THD=8,3) (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (THD=37,5) (After compensation)  
Şekil 14. M1, M2 motorları devrede iken akımdaki harmonikler (Current harmonic waveforms when M1 and M2 in operation)



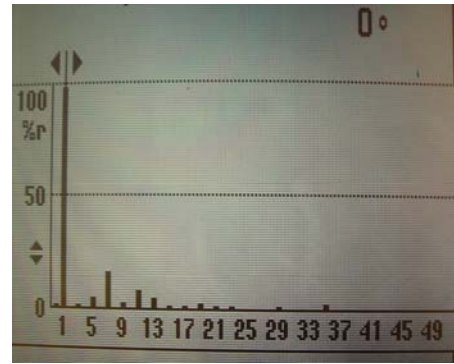
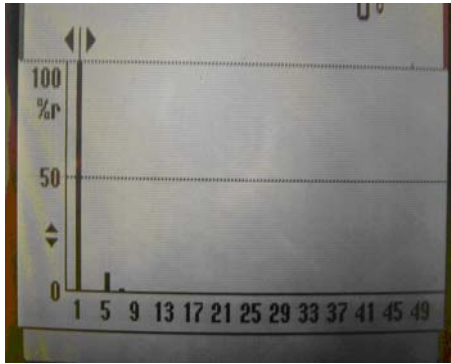
(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (7.5 kVAR) (After compensation)  
Şekil 15. M1, M2, M3 motorları devrede gerilim, akım eğrileri (Current and voltage waveforms when M1, M2, M3 in operation)



(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (THD=8,3) (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (THD=48,8) (After compensation)  
Şekil 16. M1, M2, M3 motorları devrede iken akımdaki harmonikler (Current harmonic waveforms when M1, M2, M3 in operation)



(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (11 kVAr) (After compensation)  
**Şekil 17.** M1, M2, M3, M4 motorları devrede iken gerilim, akım eğrileri (Current and voltage waveforms when M1, M2, M3, M4 in operation)



(a) Kompanzasyon yapılmadan önce (THD=7.5) (Before compensation) (b) Kompanzasyon yapıldıktan sonra (THD=43.9) (After compensation)  
**Şekil 18.** M1, M2, M3, M4 motorları devrede iken akımdaki harmonikler (Current harmonic waveforms when M1, M2, M3, M4 in operation)

reaktansı  $X_c$  olmak üzere harmonik mertebesi  $n$  olan harmonik bileşen için aynı kondansatörün reaktansı;

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n} = \frac{1}{n\omega C} \quad (6)$$

olarak bulunur.

Eşitlik 6'da görüldüğü gibi harmonik seviyesi arttıkça kapasitif reaktans azalacaktır. Buradan  $n$ . harmoniğe ait akım bileşeni

$$I_n = \frac{V_n}{X_{cn}} = n\omega C V_n \quad (7)$$

olacaktır.

Harmonik bileşenler, kondansatör ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemde rezonansa neden olabilirler.  $Q_s$  sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü,  $Q_c$  ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi,

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (8)$$

bağıntısı ile bulunur.

Harmonik kondansatörlerde hem aşırı reaktif yüklemeye hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucunda ısı artışına neden olurlar. Harmoniklerin yol açtığı ısı artışı ve aşırı yüklenme sonucu, kondansatörlerin ömrü kısalmır. Nominal olarak  $Q$  reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan harmonikli gerilim durumunda reaktif güç,

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n C V_n^2 \quad (9)$$

ile belirlenir. Kondansatörlerin ideal olmadığını, kayıp gücünün olduğunu ve eşdeğer devresinde paralel omik direncin bulunduğu kabul edilirse bu durumda kondansatörün aktif güç kaybı,

$$P_K = \sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (10)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada,

$$\tan \delta = R(1/\omega C) \quad (11)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür.  $\omega_n = 2\pi f n$ ,  $n$ . Harmonik için açısal frekans olup  $V_n$   $n$ . harmonik geriliminin etkin değeridir. IEEE Std. 18-1992 standartları, kondansatör grupları için gerilim, akım ve reaktif güç ile ilgili sınırlamaları getirmektedir. Bu standartlar kullanılarak müsaade edilebilir maksimum harmonik seviyeleri belirlenebilir.



Eşitlik 7'den de anlaşılacağı üzere harmoniğin bozucu etkisi kondansatör akımında kondansatör geriliminden daha fazla olacaktır. Bu durumda kondansatörler çok yüksek harmonik akımları çekerek harmonik seviyelerini artırır. Kompanzasyondan sonra 3., 5., 7., 9., 11., 15., 17., 19., 21., 23., 25., 29., 35. harmoniklerin akım eğrilerini bozduğu Şekiller 13b, 14b, 15b, 16b, 17b ve 18b'de gösterilmiştir. Deneyde şebeke akımı için toplam harmonik distorsiyonu (THD) incelenmiştir. Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akım için sırasıyla;

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad \text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (12)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Şekil 13a'da M1, M2 motorları devrede iken kompanzasyon yapılmadan önce şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi verilmiştir. Şekil 13a'dan akım ile gerilim arasındaki faz farkının  $88.07^\circ$  olduğu görülmektedir. Aradaki faz farkı otomatik olarak röle tarafından algılandıktan 10 s sonra, gerekli kapasitör grubu (5 kVAr) devreye alınarak kompanzasyon işlemi yapılmaktadır. Burada rölenin 10 s içerisinde işlem yapması, sistem bilgilerinin 10 s'de bir örnekleme anılamını taşımaktadır. Kart üzerindeki yazılımı yaparken bu süreyi değiştirmek programlayıcının inisiyatifindedir. Ancak bu süre çok kısa seçilirse, kapasitör grupları sistemin kararsız durumları içinde sürekli olarak devreye alınıp çıkarılacaktır. Eğer kondansatörler deşarj olmadan devreye alınıp çıkarılırsa, bunları kumanda eden kontaktörlerin kontakları kısa zamanda bozulabilir. Kompanzasyon işlemi yapıldıktan sonra akım ile gerilim arasındaki açı  $11.67^\circ$ , güç katsayısı da 0.97 olmuştur. M1 ve M2 motorları devrede iken, kompanzasyon yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki durumlarda motorların çektikleri akımların harmonik dağılımları Şekil 14a ve b'de sırasıyla verilmiştir. Şekil 15a'da M1, M2, M3 motorları devrede iken kompanzasyon yapılmadan önce şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi verilmiştir.

Şekilden de görüleceği üzere akım ile gerilim arasındaki faz farkının  $88.02^\circ$  olduğu görülmektedir. Aradaki faz farkı otomatik olarak röle tarafından algılandıktan 10 s sonra, gerekli kapasitör grubu (7.5 kVAr) devreye alınarak kompanzasyon işlemi yapılmaktadır. Kompanzasyon işlemi yapıldıktan sonra, akım ile gerilim arasındaki açı  $11.67^\circ$ , güç katsayısı da 0.97 olmuştur. M1, M2 ve M3 motorları devrede iken, kompanzasyon yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki durumlarda motorların çektikleri akımların harmonik dağılımları Şekil 16a ve b'de sırasıyla verilmiştir.

Şekil 17a'da M1, M2, M3, M4 motorları devrede iken kompanzasyon yapılmadan önce şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi verilmiştir. Şekil 17'den akım ile gerilim arasındaki faz farkının  $86.76^\circ$  olduğu görülmektedir. Aradaki faz farkı otomatik olarak röle tarafından algılandıktan 10 s sonra, gerekli kapasitör grubu (11 kVAr) devreye alınarak kompanzasyon işlemi yapılmaktadır. Kompanzasyon işlemi yapıldıktan sonra, akım ile gerilim arasındaki açı  $12.35^\circ$ , güç katsayısı da 0.97 olmuştur. M1, M2, M3 ve M4 motorları devrede iken, kompanzasyon yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki durumlarda motorların çektikleri akımların harmonik dağılımları Şekil 18a ve b'de sırasıyla verilmiştir.

Şekiller 13a, 15a, 17a'da verilen dalga şekillerine bakıldığında güç katsayısının sırası 0.03, 0.03, 0.05 olduğu görülmektedir. Gerekli ölçümler yapıldıktan sonra reaktif güç rölesinin devreye aldığı kapasitör grupları ile güç katsayıları istenilen referans değerlerine getirilmiştir. Dalga şekilleri kompanzasyondan önceki durumla karşılaştırıldığında, denetleyicinin ne kadar hassas bir kompanzasyon yaptığı açık olarak görülmüştür. Ayrıca Şekil 14, 16, 18 incelendiğinde, kompanzasyon ile oldukça önemli bir miktarda sistemin harmonikleri artmış ve DA bileşeni meydana gelmiştir. Kompanzasyondan önce şebeke akımındaki toplam harmonik distorsiyonu %7-8'lerde iken kompanzasyondan sonra % 40-50 civarındadır. Bu durum sistemin akım dalgasını belirgin bir şekilde bozmaktadır.

#### 4. SONUÇ (RESULT)

Bu çalışmada, basit, kullanışlı, hassas, güvenli ve değişik uygulamalara hemen uyarlanabilir mikrodenetleyicili reaktif güç rölesi tasarlanmıştır. Geliştirilen rölenin piyasadaki rölelere göre en önemli üstünlüklerinden birisi, sistemi kompanze etme hızıdır. Piyasada kullanılan reaktif güç röleleri kademeli olarak çalışmaktadırlar, yani istenilen kondansatör gruplarını adım adım devreye alarak sistemi kompanze ederler. Bu da anahtarlama sayısını artırır ve yüksek akım altında çalışan kontaktörlerin ömrünü azaltır. Tasarlanan röle ise, yükün ihtiyaç duyduğu kondansatör gücünü (Qc) hesap ederek, uygun kapasite grubunu tek adımda devreye alır. Böylece kapasite gruplarını devreye alıp çıkarmalarda minimum anahtarlama sağlar. Bu da kullanılan anahtarlama elemanlarının ve kondansatörlerin ömürlerini uzatır ve daha ekonomik bir kompanzasyonu mümkün kılar.

Diğer önemli bir üstünlüğü ise, donanımda hiçbir değişiklik yapmadan, sadece mikrodenetleyicinin program algoritması değiştirilmek suretiyle kapasitif reaktif güç, görünür güç, fazlar arası gerilim, toplam reaktif güç, toplam görünür güç gibi sisteme ait değerlerin izlenmesi röleyi çok amaçlı hale getirmesidir.

Son olarak, üç fazdan örnekleme alınarak her bir fazın akım, gerilim ve güç katsayısı değerlerinin ölçülüyor olması dengesiz yüklerin izlenmesine olanak sağlamıştır.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)**

Yazarlar, bu çalışmayı 07/2005-30 kodlu Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür eder.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Richard, E., Frederick, P.C.H., Jayanta, K.P., "Optimal Reactive Power Control for Industrial Power Networks", **IEEE Transaction on Industry Applications**, 35 (3), 506-514, 1999.
- Jin, K., Ortmeier, T.H., "Application of Static Compensators in Small AC Systems", **Electric Power Components and Systems**, 30 (9), 967-980, 2002.
- Mekhamer, S.F. El-Hawary, M.E., Mansour, M.M., Moustafa, M.A., Soliman, S.A., "State of the Art in Optimal Capacitor Allocation for Reactive Power Compensation in Distribution Feeders", **IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering**, LESCOPE'02, 61-75, 2002.
- Bayram, M., **Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu**, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- Çolak, İ., Bayındır R. and Bay, Ö.F., "Reactive Power Compensation Using a Fuzzy Logic Controlled Synchronous Motor", **Energy Conversion and Management**, 44 (13), 2059-2215, 2003.
- Çolak, İ., Bayındır, R. and Sefa, İ., "Experimental Study on Reactive Power Compensation Using a Fuzzy Logic Controlled Synchronous Motor", **Energy Conversion and Management**, 45 (15-16), 2371-2391, 2004.
- Çolak, İ., Bayındır, R., "A Novel Dynamic Reactive Power Compensator Based on PIC", **Electric Power Components & Systems**, 33 (8), 861-876, 2005.
- Sagiroglu, S., Çolak, İ., Bayındır, R., "Power Factor Correction Technique Based on Artificial Neural Networks", **Energy Conversion and Management**, available online, 2006.
- Bulut, A., **Reaktif Güç Kompanzasyonu**, T.E.K Keban Hidroelektrik Santrali İşletme Müdürlüğü, 1991.
- Miller, T.J.E., **Reactive Power Control in Electric Systems**, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1982.
- Fedyczak, Z., Strzelecki, R., Kasperek, R., Skorski, K., "Three-Phase Self-Commutated Static Var Compensator Based on Cuk Converter Topology", **IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference**, Galway, Ireland, PESC'00 (1), 494-499, 2000.
- Gutierrez, J., Montano, J.C., Castilla, M., Lopez, A., "Power-Quality Improvement in Reactive Power Control using FC-TCR Circuits", **IECON 02 Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference**, Sevilla, Spain, (2), 880-885, 2002.
- Zhang, L., Li, Q.Z., "Application of TSC in Reactive Compensation in Traction Substations", **Proceedings, International Workshop on Autonomous Decentralized Systems**, Chengdu, China, 149-153, 2000.
- Nunes, J.V.R., Braga, R.A.M., Libano, F.B., Muller, S.L., "A Linear Displacement Power Factor Compensator", **IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference**, Aachen, Germany, PESC'04 (2), 951-957, 2004.
- Ortega, J.M.M., Payan, M.B., Mitchell, C.I., "Power Factor Correction and Harmonic Mitigation in Industry", **IEEE Industry Applications Conference**, Rome, Italy, (5), 3127-3134, 2000.
- de Assis, T.M.L., Watanabe, E.H., Pilotto, L.A.S., Sollero, R.B., "A New Technique to Control Reactive Power Oscillations Using STATCOM", **10th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, Rio de Janeiro, Brazil, (2), 607-613, 2002.
- De Oliveira, A., Martins, R.M., Goncalves, W.K.A., "Expert System for Power Quality Improvement", **Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power**, Orlando, Florida, USA, (2), 504-509, 2000.
- Bal, G., Çolak, İ., "Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör Tipi Reaktif Güç Kompansatörü", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 8 (2), 9-15, 1995.
- Moore, C., Murray I., "An Electronic Design of a Low Cost Braille Typewriter", **Intelligent Information Systems Conference**, The Seventh Australian and New Zealand, 153-157, 2001.
- Microchip, **PIC 16F877 Data Sheet**, USA, 2001.
- National Semiconductor, **LM 358 Data Sheet**, August, USA, 2000.
- Çolak, İ., Bayındır, R., "Güç Katsayısının Bir Mikrodenetleyici Kullanarak Ölçümü", **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 19 (1-2), 50-58, 2005.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, M., Karakaş, A., Arıkan, O., **Elektrik Tesislerinde Harmonikler**, Birsen Yayınevi, Ankara, 2003.