



İki-fazlı matris çeviricinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Erkan Deniz^{1*}, Ömür Aydoğmuş²

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tek-fazlı şebekeden iki-faza doğrudan dönüşüm
- Çift yönlü güç akışı
- Düşük harmonikli dönüştürücü giriş akımı

Makale Bilgileri

Geliş: 05.06.2015

Kabul: 22.12.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300590

Anahtar Kelimeler:

İki-fazlı matris çevirici,
iki-fazlı motor,
enerji verimliliği,
cadSoft EAGLE

ÖZET

Bu çalışmada, bir veya iki-fazlı ac motorların hız kontrolü için tek-fazlı şebekeden beslenen bir matris çevirici tasarlanmıştır. Bu çevirici, tek-fazdan iki-faza dönüşümü doğrudan gerçekleştirebilmektedir. Bununla birlikte, ac-ac dönüşümü gerçekleştirmek için yeni bir anahtarlama algoritması önerilmiştir. Önerilen Matris çevirici; şebeke ve yük arasında bir doğrultucuya ve dc-hat kondansatörlerine gerek duymadan doğrudan bağlanabilir bir yapıya sahiptir. Tasarlanan çevirici iki fazlı bir RL yükü için test edilmiştir. Çeviricinin çıkış gerilimi ve yük akımına ilişkin benzetim ve deneysel sonuçlar harmonik içerikleri ile birlikte analiz edilmiştir.

Design and implementation of two-phase matrix converter

H I G H L I G H T S

- The conversion directly from single-phase to two-phase
- Bidirectional power flow
- The converter input current with low harmonic

Article Info

Received: 05.06.2015

Accepted: 22.12.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300590

Keywords:

Two-phase matrix converter,
two-phase motor,
energy efficiency,
cadSoft EAGLE professional

ABSTRACT

In this work, a matrix converter has been designed fed by single-phase for speed control of single/two-phase ac motors. This converter can achieve converting directly from single-phase to two-phase. In addition, a new switching algorithm has been proposed to perform ac-ac converting. The proposed Matrix converter can be directly connected between grid and load without using rectifier and dc-link capacitors. Designed converter has been tested for two-phase RL load. The simulation and experimental results of the converter's output voltage and load current are analyzed with the harmonic contents.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: edeniz@firat.edu.tr / Tel: +90 424 237 0000-4338

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada gün geçtikçe hızlı bir şekilde artan elektrik enerjisi talebi ve buna bağlı olarak hızlı bir şekilde azalmakta olan enerji kaynakları, tüketici tarafında daha yüksek enerji verimliliğine sahip cihazların kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Kullandığı enerjinin büyük bir kısmını yurtdışından döviz ödeyerek satın alan ülkemizde ise kamu binaları, iş merkezleri, oteller, hastaneler ve konutlarda kullanılan tek-fazlı elektrikli cihazların enerji verimliliğinin yüksek olması büyük önem arz etmektedir [1]. Bu yerlerde kullanılan elektrik enerjisinin büyük bir kısmını; içerisinde tek-fazlı motor bulunan çamaşır makinası, kurutma makinası, buzdolapları, derin dondurucular, elektrik süpürgeleri, klimalar, sirkülasyon pompaları, hidroforlar, vb. gibi elektrikli cihazlar tüketmektedir. Bu cihazlarda genellikle tek-fazlı şebekeyle doğrudan çalışabilen sincap kafesli tek-fazlı asenkron motorlar kullanılmaktadır. Bu motorların stator sargıları fiziksel olarak 90°'lik bir açı ile sarılmaktadırlar. Ayrıca bu motorlar kalkış ve daimi kondansatör olmak üzere bir veya iki adet kondansatöre ihtiyaç duymaktadır. Fiyat ve boyut olarak fazla olsa da en iyi karakteristiği çift kondansatörlü yapı sağlar. Sistemde kullanılan merkezkaç anahtarı ve kondansatörleri ortadan kaldırmak için elektronik olarak anahtarlamalı kondansatör yapısı kullanılabilir. Bu yapıyla elde edilen değişken kapasite yardımıyla motorun maksimum moment gibi bazı özellikleri kontrol edilebilmektedir [2]. Tek ve iki-fazlı asenkron motorlar uygulama alanı olarak üç-fazlı asenkron motorlar ile karşılaştırıldığında daha az bir yere sahiptir. Ancak, bazı pazar araştırmalarına göre kalkış kondansatörlü tek-fazlı asenkron motorların yıllık ticari satışları yaklaşık 4 milyon adettir. Elektrik makinalarının bu türlerinin birçoğu sabit hız uygulaması gerektiren yerlerde tercih edilmektedir. Özellikle ısıtma/soğutma fanları ve endüstriyel pompalarda güç elektroniği tabanlı ayarlanabilir-hız kontrollü sürücülerin kullanılması ile geleneksel termostatik kontrollere göre %30 daha fazla enerji tasarrufu sağlamaktadır [3]. Tek-fazlı yardımcı sargılı bir asenkron motor, asimetrik sargı yapısına sahip iki-fazlı bir motor gibi düşünülebilir. Bu motorların hız kontrolünde kullanılan eviriciden ana ve yardımcı sargı için aralarında 90° faz farkı olan gerilimler elde edildiğinden dolayı tek-fazlı bir motor yerine iki-fazlı bir motor kullanmak sistemi daha verimli hale getirecektir. Bu alanda yaygın olarak yapılan çalışmalar iki-fazlı asenkron motor ve evirici yapısı üzerine olmuştur. Evirici yapısı kullanılarak iki-fazlı asenkron motorların hız kontrolünü daha verimli hale getirmek için; model referans adaptif sisteme dayalı teknikler [4], kayma mod kontrol algoritması [5] ve uzay vektör anahtarlama tekniği [6] üzerine çalışmalar yapılmıştır. İki-fazlı motor ve evirici yapılarında, asenkron motor yerine Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) kullanmak sistemin verimini daha büyük oranda artırabilir. Çünkü bu motor; yüksek hava aralığı akı yoğunluğu, yüksek güç/ağırlık oranı, yüksek moment/atalet oranı, çok düşük hızlarda

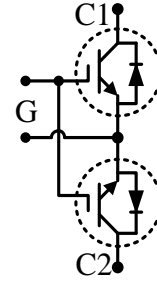
düzgün moment, sıfır hızda kontrollü moment, çok yüksek hızlarda çalışma, kısa sürede çabuk hızlanma/yavaşlama, yüksek verim ve kompakt tasarım gibi özelliklerinden dolayı daha avantajlıdır [7]. Bununla birlikte, sürücüsüz çalışmama gibi bir dezavantaja sahip olan SMSM motorların, iki-fazlı yapısı üzerinde sürücü maliyetinden dolayı son yıllara kadar durulmamıştır. Yapılan çalışmalar; iki-fazlı SMSM'nin moment salınımlarının kaynağa olan etkisi [8] ve motorun hız kontrolü için durum tahmini [9] gibi kısıtlı literatür çalışmalarıdır. Evirici beslemeli iki-fazlı SMSM ile ilgi literatürde çalışma mevcut değildir. Çünkü üç-faz bacaklı evirici yapısından dolayı sistemde iki-fazlı yerine üç-fazlı SMSM kullanmak sistemin verimi açısından daha uygundur. Ancak iki-seviyeli bir eviricinin kontrolsüz bir doğrultucu ile beslenmesinden dolayı şebekeden çekilen akımlar yüksek THD'ye sahiptir. Giriş tarafındaki bu bozulmalar ancak büyük değerli bir filtre elemanı ile azaltılabilir. Bu durum hem boyut hem de fiyat açısından büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, doğrultucu çıkışında kullanılan filtre elemanı olan kondansatör; fiyat, sınırlı çalışma ömrü ve hacim açısından bir başka dezavantajdır. İlave olarak böyle bir sistem, çift yönlü güç akışına müsaade etmemektedir [10]. Doğrudan ac-ac çeviriciler, dc-hat eviricilerine göre bazı avantajlara sahiptir. Bu tür çeviriciler, sabit frekans ve sabit genlikli bir gerilimden herhangi bir dc-hat olmaksızın frekansı ve genliği ayarlanabilir bir gerilim elde edebilmektedir. AC-AC çeviricilerin en yaygın olarak kullanılan türlerinden biri olan matris çevirici topolojisi ilk olarak Gyugyi tarafından 1976 yılında önerilmiştir [11]. 1980 yılında ise Venturini ve Alesina tarafından çift yönlü güç akışına izin veren ve giriş güç faktörünü ayarlayan bir dönüştürücü [12] ve reaktif elamanları elimine eden bu dönüştürücü devresi için anahtarlama tekniği [13]'de sunulmuştur. Matris çevirici geleneksel bir evirici ile kıyaslandığında bazı avantajlara sahiptir. En önemli avantajlarından biri ac-ac dönüşümün tek bir adımda doğrudan gerçekleştirilmesi ve büyük enerji depolama elemanlarına ihtiyaç duymamasıdır. Motor sürücü sistemlerinin ihtiyaç duyduğu regeneratif çalışma durumlarına doğal olarak müsaade etmesi bir diğer avantajıdır. Ayrıca giriş ve çıkış dalga şekillerinin sinüzoidal olması önemli bir özelliğidir. Bu özelliklerine ilave olarak matris çevirici tam kontrollü giriş yer değiştirme faktörüne sahiptir [14]. Giriş geriliminden faydalanma oranı üç-fazlı matris çeviriciler için %86,6 ve tek-fazlı matris çeviriciler için %50-60 arasında değişmesi en büyük dezavantajdır. Ancak kullanılacak motorun nominal gerilimi bu çeviricilere uygun olarak tasarlanabilir ve bu dezavantaj giderilebilir. Günümüzde doğrudan ac-ac dönüşümü hızlı ve etkin bir şekilde IGBT ve MCT gibi anahtarlama elemanlarının çift yönlü bağlantı yapısıyla elde etmek mümkündür [15]. Tek-fazlı bir asenkron motor sabit gerilim ve frekanslı bir kaynaktan beslendiği zaman sabit hızda çalışır. Bu motorlar değişken hızda çalıştırılabilmesi için genliği ve frekansı ayarlanabilen bir kaynaktan beslenmesi gerekmektedir. Böyle bir uygulama için eviriciler ilk bakışta fiyat ve kullanım kolaylığı açısından

akla gelebilir. Ancak ac-dc-ac dönüşümü doğrultucu ve büyük dc-hat kondansatörleri kullanarak gerçekleştirdiğinden dolayı matris çeviricilerden daha fazla yer kaplarlar. Ayrıca diyotlu doğrultucudan dolayı şebekenin güç kalitesini de önemli ölçüde bozmaktadır. Tek-fazlı ac-ac matris çevirici tek-fazlı asenkron motorlar ve diğer ev uygulamalarının hız kontrolünde kullanılabilme potansiyeline sahiptir [16]. Sinüzoidal PWM anahtarlama tekniği kullanılarak giriş kaynak frekansının katlarında değişken çıkış frekansı sağlanabilmektedir [17]. Sinüs PWM anahtarlama ile matris çeviriciden harmonik içeriği düşük çıkış elde edilse de giriş gerilim seviyesini kullanım oranı maalesef düşüktür [18]. Tek-fazlı matris çevirici için kare dalga anahtarlama tekniği kullanılarak, sinüs anahtarlama tekniğine göre daha yüksek bir çıkış gerilim elde edilebilir [16]. Bununla birlikte, iki-faz bacağına sahip tek-fazlı matris çeviricinin çıkış kalitesini artırmak için dc-hat kullanan üçüncü veya dördüncü faz bacağı eklenebilir [19]. Ancak bu durumda dc-hat kondansatörlerinden dolayı boyut ve kontrol karmaşıklığı oluşmaktadır. Tek-fazlı matris çeviriciye sadece üçüncü bir faz bacağı eklenerek iki-fazlı bir çıkış geriliminin elde edilebileceği [20]'de gösterilse de, burada tek-fazlı asenkron motorun açık çevirim kontrolü sabit bir modülasyon indeksi için yapılabilmektedir. Bu çalışmada, şebekeden doğrudan veya bir çeviriciden beslenebilen tek/iki-fazlı asenkron/senkron ac motorların hız kontrolünde kullanılacak, güç dönüşümünü doğrudan gerçekleştirebilen ve güç/hacim oranı yüksek olan kompakt bir yapıya sahip çevirici tasarlanmıştır. Çevirici güç devresinde düşük harmonik içeriğine sahip çıkış sinyalleri elde etmek için daha önce yazarlar tarafından önerilen yeni bir anahtarlama algoritması, bu çalışmada deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tek fazlı sabit genlik ve frekansa sahip şebekeden beslenen çeviricinin bir RL yükünü beslemesi durumunda farklı çıkış frekanslarında çalıştırılarak elde edilen akım, gerilim ve harmonik içeriklerine ilişkin benzetim ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

2. İKİ-FAZLI MATRİS ÇEVİRİCİ (TWO-PHASE MATRIX CONVERTER)

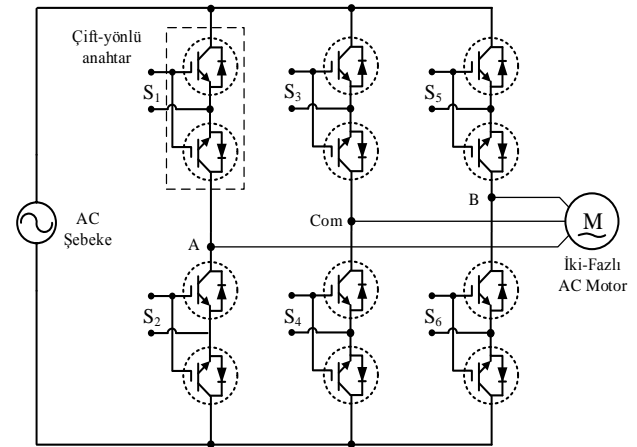
AC-AC dönüşüm yapabilen çeviriciler sayesinde girişte sabit frekans ve genlikli bir ac kaynak kullanılarak çıkışta ayarlanabilir frekans ve genlikli gerilimler doğrudan üretilebilir. AC-AC dönüşümü doğrudan yapabilen çeviriciler dc-hat ihtiyacının olmamasından dolayı kondansatör gibi depolama elemanlarına ihtiyaç duymazlar. Ayrıca çift-yönlü anahtar yapısından dolayı çift-yönlü güç akışına sahiptir. Bu çalışmada, kapı sinyallerinin dengeli beslenebilmesi için Şekil 1'de gösterildiği gibi anti-paralel diyotlu ortak-emiterli çift yönlü IGBT yapısı kullanılmıştır. Tek-faz girişli ve tek-faz çıkışlı doğrudan ac-ac dönüşümü yapan matris çevirici genellikle dört çift yönlü anahtar olduğu iki bacaklı yapı olarak literatürde bulunmaktadır [16]. Bu çalışmada, geleneksel matris çevirici yapısına ek olarak tek fazlı şebekeden iki faz elde edilemek için ekstra bir bacak daha eklenerek yeni bir matris çevirici yapısı önerilmiştir. Önerilen matris çevirici yapısı tek-fazlı

şebekeyi kullanarak çıkışında aralarında 90 derecelik iki-fazlı gerilim üretebilmektedir. Ayrıca çevirici ürettiği sinyalin frekans ve genlik değerini ayarlayabilme kabiliyetine sahiptir. Böylece iki-fazlı AC motorlar için ayarlanabilir hız sürücüsü olarak kullanılabilir. Ancak önerilen matris çevirici yapısının en büyük dezavantajı gerilim dönüştürme oranının 0,54 civarında olmasıdır. Bundan dolayı standart bir motor ile çalıştırılması mümkün değildir. Bundan dolayı çevirici çıkışına uygun nominal gerilim seviyesine sahip iki-fazlı bir ac motor tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 1. Ortak-emiterli çift yönlü IGBT yapısı (Structure of bidirectional common-emitter IGBT)

Tek-fazdan beslenen ve iki fazlı çıkışa sahip matris çevirici yapısı Şekil 2'de gösterildiği gibi 6 adet çift-yönlü anahtar ile oluşturulmuştur. Çevirici çıkışında ortak uca göre iki adet 90 derece faz farklı gerilim üretilmiştir.

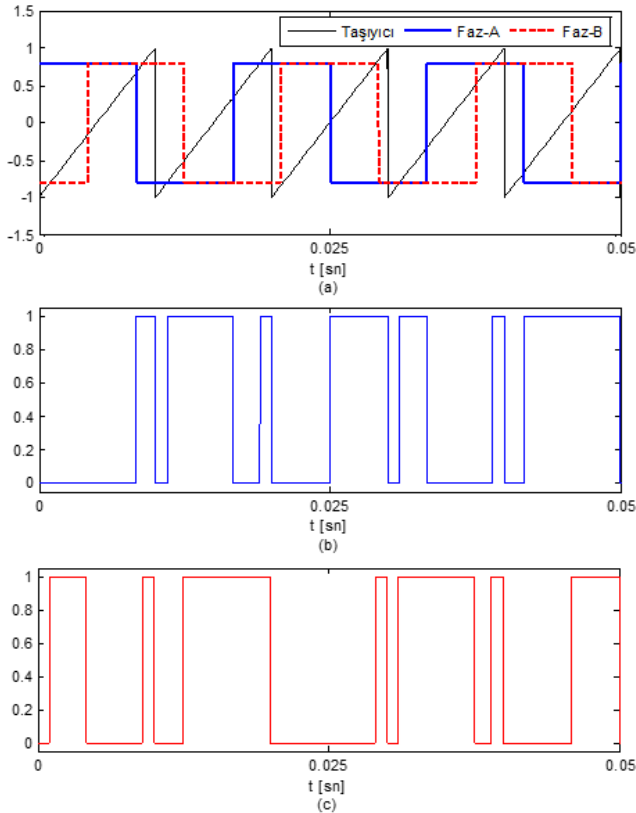


Şekil 2. Tek-faz girişli iki-faz çıkışlı matris çevirici yapısı (Structure of single-phase input and two-phase matrix converter)

3. ANAHTARLAMA ALGORİTMASI (SWITCHING ALGORITHM)

Literatürde tek fazdan tek faza dönüşüm için anahtarlama algoritmaları üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Tek fazlı indüksiyon motorlarının kontrolü için ilk olarak Khoei tarafından tek fazlı matris çevirici yapısı önerilmiştir. Tek fazlı doğrudan matris çeviricinin basitleştirilmiş şematik diyagramı [18]'de sunulmuştur. Daha önceki bu çalışmalarda, ayarlanabilir tek faz çıkışı üretmek için

sadece iki bacaklı yapı kullanılmıştır [16]. Bu çalışmalara ek olarak tek fazlı şebekeden iki faz elde edebilmek için ekstra bir bacak daha eklenmiş ve yeni bir anahtarlama algoritması benzetim sonuçları ile test edilmiştir [21]. Bu makalede, [21]'de yazarlar tarafından önerilen anahtarlama algoritması ilk olarak deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir. Anahtarlama algoritması üç sinyalden oluşmaktadır. Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi taşıyıcı üçgen sinyal ve 90 derece faz farklı iki referans sinyalden oluşmaktadır. S_1 ve S_5 anahtarları için üretilen PWM sinyalleri Şekil 3(b) ve 3(c)'de gösterilmiştir. S_3 anahtarı sabit %50 görev periyoduna sahip olup 2,5kHz anahtarlama frekansında çalışmaktadır. Referans A ve B sinyalleri Eş. 1 ve Eş. 2'de verildiği gibi giriş ve çıkış çevirici frekansının toplamı ile ilişkilidir [21].



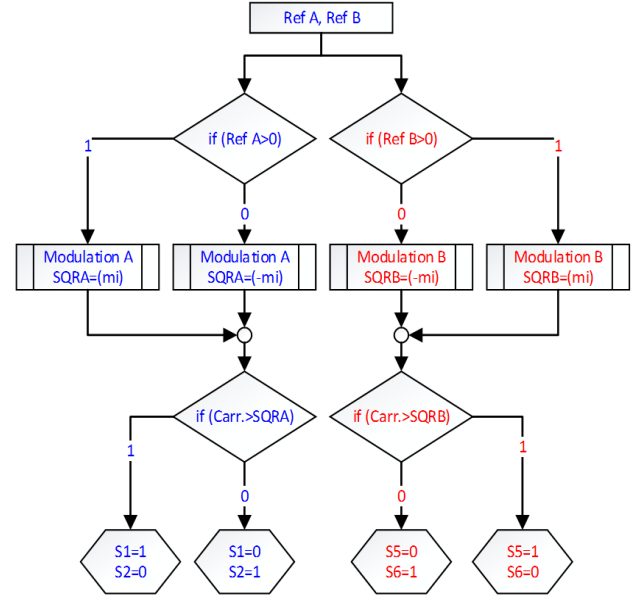
Şekil 3. a) A ve B referans sinyalleri ile taşıyıcı sinyal b) S_1 anahtarı için PWM c) S_5 anahtarı için PWM
(a)A and B reference signals with carrier signal b) PWM for S_1 switch c) PWM for S_5 switch)

$$Ref(A) = m_i * \sin(2\pi(f_i + f_0)t) \quad (1)$$

$$Ref(B) = m_i * \sin(2\pi(f_i + f_0)t - \pi/2) \quad (2)$$

Burada f_i şebeke frekansı ve f_0 evirici çıkış frekansı, m_i çevirici çıkış geriliminin genliğini ayarlayan modülasyon indeksidir. S_1 ve S_5 çift yönlü anahtarların PWM sinyalleri Şekil 4'te gösterilen modülasyon algoritması ile hesaplanmaktadır. S_2 ve S_6 anahtarları, S_1 ve S_5 anahtarlama sinyallerinin tersi ile anahtarlanır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, üst ve alt çift

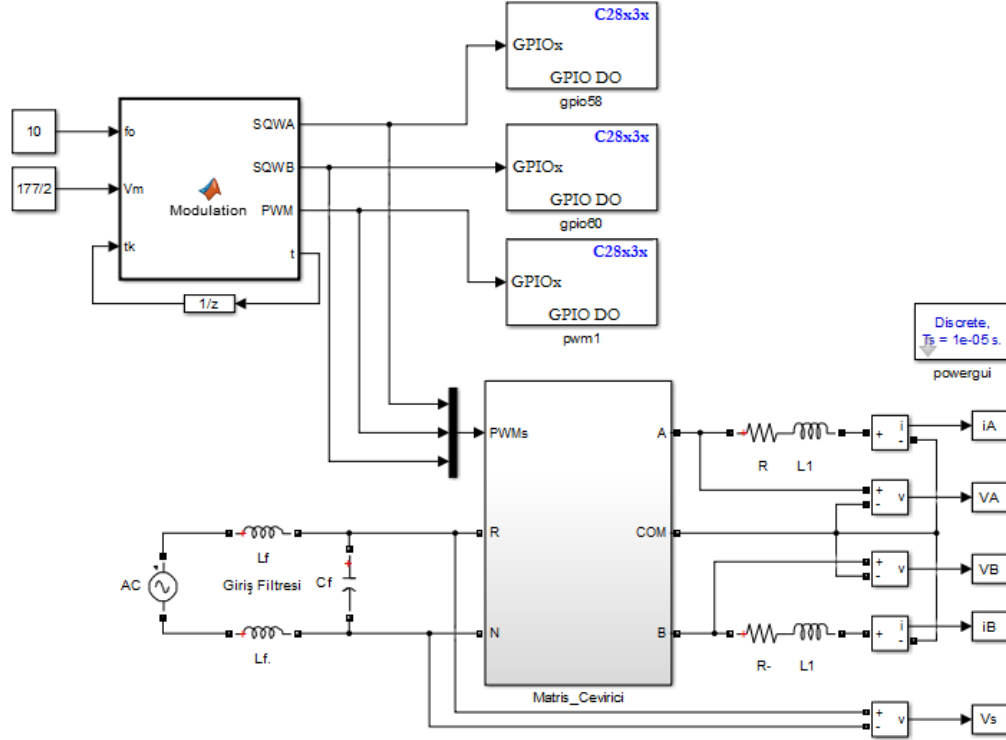
yönlü anahtarların anahtarlama sinyallerini ölü zaman eklenmesi gerekmektedir. Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak hesaplanan referans A ve B sinyalleri taşıyıcı sinyal ile karşılaştırıldıktan sonraki elde edilen A ve B modülasyon sinyalleri akış diyagramında verilmiştir. Bu modülasyon algoritması mikro denetleyiciler için oldukça basit bir yapıya sahiptir.



Şekil 4. Anahtarlama algoritmasına ait akış diyagramı
(Flow-chart of switching algorithm)

4. MATRİS ÇEVİRİCİNİN RL YÜKÜ İÇİN MATLAB BENZETİMİ (MATLAB SIMULATION OF MATRIX CONVERTER FOR RL LOAD)

Çeviricinin güç ve sürme devreleri deneysel oluşturulmadan önce önerilen algoritmanın doğruluğu MATLAB ortamında Simulink ve SimPower Systems blokları kullanılarak test edilmiştir. Ayrıca çeviricinin gerilim dönüştürme oranını 0,54 olarak belirlemiştir. Tek-fazlı şebekeden beslenen ve iki-fazlı bir çıkış gerilimi üreten çeviricinin bir RL ($R=1\Omega$, $L=0.5H$) yükünü beslemesi durumu için MATLAB ortamında oluşturulan benzetim devresi Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'te tepe değeri 50V olan 50Hz'lik bir kaynak, matris çeviriciye giriş olarak verilmiş ve çıkışta 10Hz'lik iki-fazlı gerilimler elde edilecek şekilde IGBT anahtarları yukarıda bahsedilen anahtarlama tekniği ile 2,5kHz anahtarlama frekansında anahtarlama yapılmıştır. 10Hz için matris çeviricinin V_A ve V_B çıkış gerilim sinyalleri Şekil 6'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekilde çevirici çıkış gerilimi (kırmızı ve mavi), giriş şebeke sinyali (siyah) ile birlikte çizilmiş ve giriş gerilim sinyalinin nasıl sentezlendiği açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 6(a) ve (b)'den görüldüğü gibi 50Hz'lik sinyalden 10Hz sinyalini elde edebilmek için, matris çevirici giriş gerilimini 5 parçaya bölerek ilk yarısını pozitif ve diğer yarısını negatif olacak şekilde sentezlemiştir. Böylece periyot 5 kat artırılarak frekans 5 kat azaltılmış ve 10 Hz'lik çıkış sinyali elde edilmiştir. Bir



Şekil 5. MATLAB ortamında anahtarlama algoritmasının ve çevirici yapısının RL yük ile test edilmesi
(The test of switching algorithm and converter for RL load at MATLAB environment)

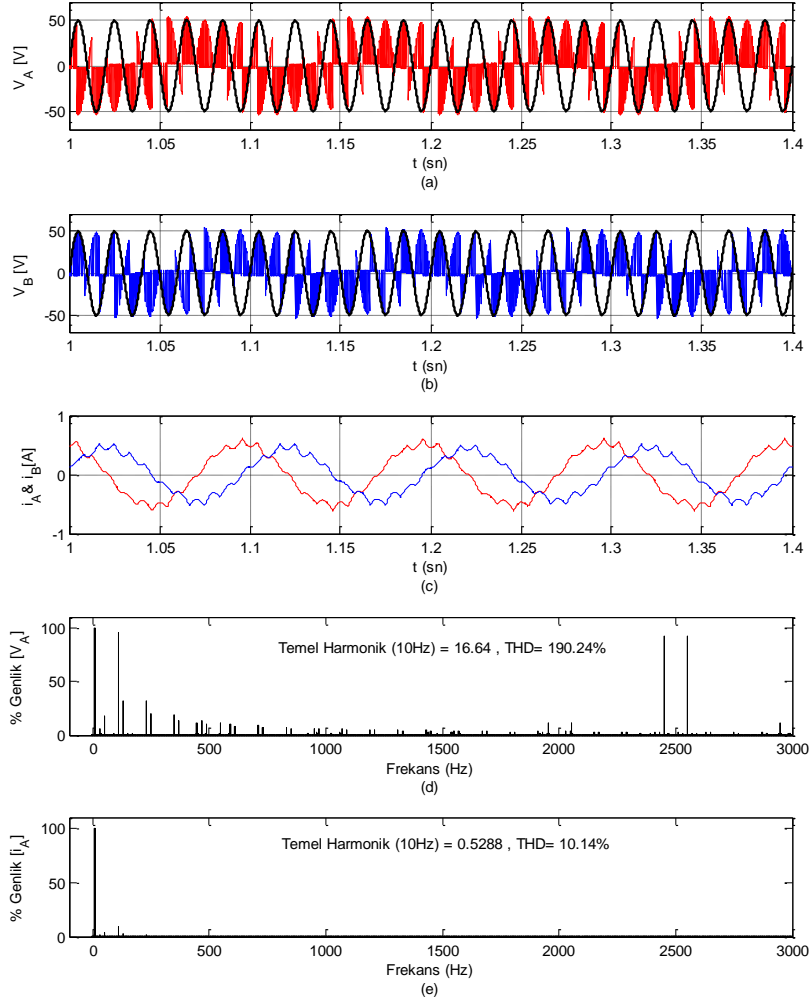
diğer önemli olan nokta iki çıkış gerilimi arasında 90 derecenin doğru bir şekilde sağlanıp sağlanmadığını incelemektir. Ayrıca çıkış gerilimi frekansının doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Ancak gerilim sinyallerinden 90 derece faz farkı tam olarak anlayamayacağı için yük akımları üst üste çizilerek gerekli faz farkı ve frekans hesapları yapılmış ve algoritmanın doğru bir şekilde çalıştığı Şekil 6(c)'de gösterilmiştir. Bununla birlikte çıkış gerilimi ve yük akımına ilişkin harmonik analizi yapılmıştır. Şekil 6(d)'de çıkış gerilimi (V_A) için FFT analizi gösterilmiştir. Şekil 6(d) ve Şekil 6(e)'de verilen harmonik spektrumu için detaylı sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. V_A ve i_A için FFT tablosu
(The table of FFT for V_A and i_A)

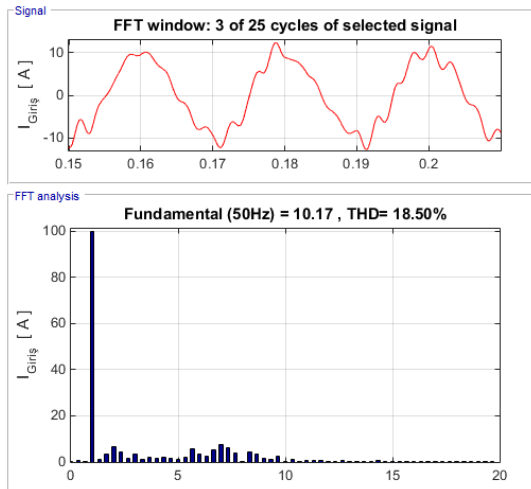
Frekans (Hz)	Harmonik	V_A Değer %	i_A Değer %
10	h1.	100	100
30	h3.	5,6	1,99
50	h5.	17,49	3,5
110	h11.	95,66	8,71
130	h13.	31,40	2,42
230	h23.	31,79	1,38
250	h25.	19,56	0,78
350	h35.	19,21	0,55
370	h37.	13,44	0,36
470	h47.	13,23	0,28
2450	h245.	92,57	0,36

2550	h255.	92,23	0,34
------	-------	-------	------

Çıkış gerilimi 10Hz olduğu için ana (temel) harmonik 10Hz'de oluşmuştur. Önemli baskın harmonik 11. Harmonik olarak görülmüştür. Ayrıca 2,5kHz anahtarlama frekansı yan bantlarında baskın harmonikler oluşmuştur. Gerilim sinyalindeki baskın harmonikler akım üzerinde gözlemlenmemiştir. Özellikler tek fazlı matris çeviricilerde oluşan 11. Harmonik değeri akım üzerinde büyük ölçüde sönümlenmiştir. Böylece akım harmoniği yaklaşık %10 THD ile ölçülmüştür. Ayrıca gerilim için 13. ve 23. harmoniklerde ana harmoniğin %31'i kadar hesaplanmıştır. Ancak gerilim harmoniklerinin fazla olması yükün motor olmasından dolayı problem oluşturmamaktadır. Motor sargılarının indüktans değerine bağlı olarak THD değeri önemli ölçüde azalmaktadır. Matris çeviriciler genel olarak diğer güç dönüştürücülerden kıyasla şebekeden daha az harmonik içerikli giriş akımı çekmektedirler. Bu makalede kullanılan tek-faz girişli matris çevirici, üç-fazlı matris çeviriciler ile kıyaslandığında şebekeye olan bozucu etkisi daha yüksektir. Tek-faz girişli matris çeviricinin şebekeden çektiği akım ve onun harmonik analizi benzetim ortamında elde edilerek, Şekil 7'de verilmiştir. Burada $L=1\text{mH}$ ve $C=100\mu\text{F}$ parametrelerine sahip bir şebeke filtresi kullanılmıştır. Şekil 7'den görüldüğü gibi giriş akımının THD değeri %18,50 olarak ölçülmüştür. Bu değer; doğrultuculu sürücü sistemlerinin %90 civarındaki THD si ile kıyaslandığında düşük seviyededir. THD' nin %5 seviyesine düşürülmesi giriş harmonik filtresinin kullanılması ile mümkündür. Bu durumda önerilen matris çevirici için kullanılacak harmonik filtre boyutu mevcut sistemlerle kıyaslandığında çok küçük olacaktır.



Şekil 6. Benzetim sonuçları; a) Şebeke gerilimi ve V_A çıkış gerilimi b) Şebeke gerilimi ve V_B çıkış gerilimi c) i_A ve i_B yük akımları d) V_A gerilimine ait Harmonik Spektrumu e) i_A akımına ait Harmonik Spektrumu
(The result of simulations; a) Grid voltage and V_A output voltage b) Grid voltage and V_B output voltage c) i_A and i_B load current d) The harmonic spectrum of V_A voltage e) The harmonic spectrum of i_A current)

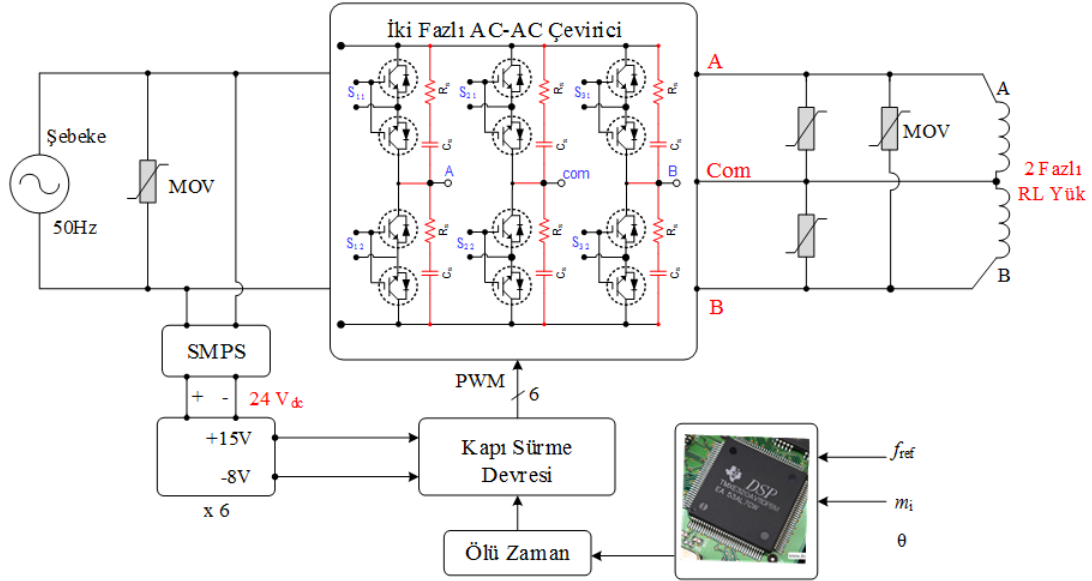


Şekil 7. Matris çeviricinin giriş akım dalga şekli ve onun harmonik analizi
(The input current waveform of matrix converter and its harmonic analysis)

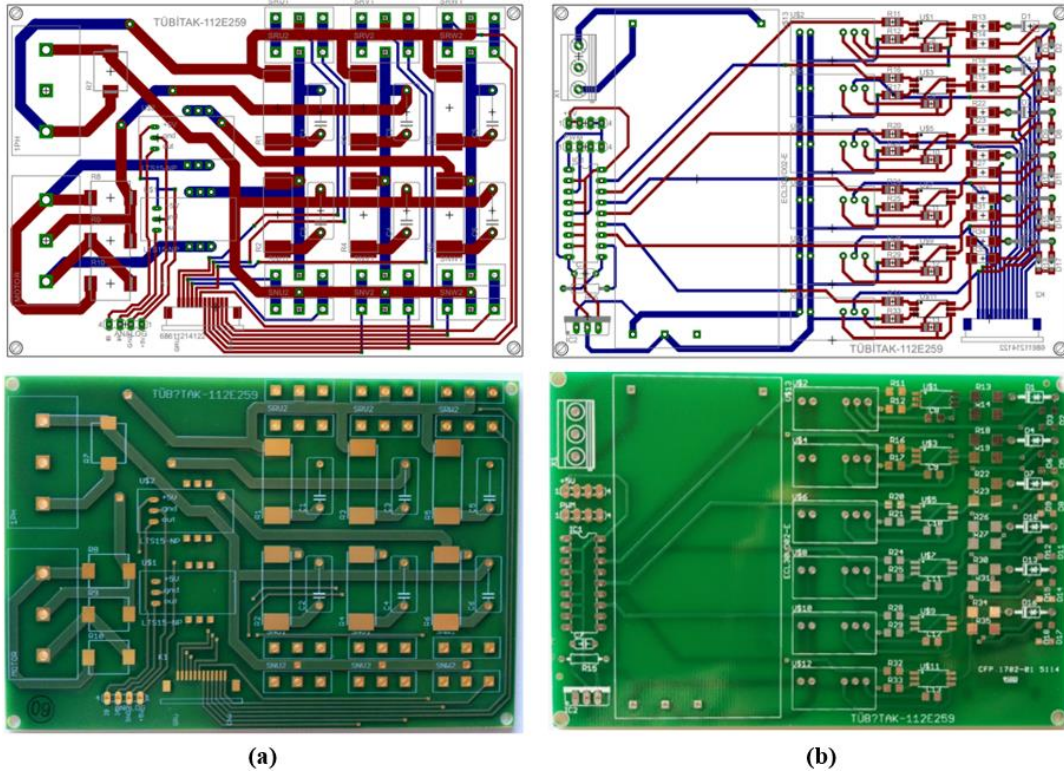
5. MATRİS ÇEVİRİCİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ (DESIGN OF MATRIS CONVERTER AND REALIZATION)

5.1. Matris Çevirici Tasarımı (Design of Matris Converter)

Tasarlanan tek-faz girişli ve iki-faz çıkışlı matris çeviriciye ait deneysel kurulumunun genel devre şeması Şekil 8'de gösterilmiştir. Sistemde anahtarlama sinyallerini üretmek için TMS320F28335 mikrodeneleyici (DSP) kullanılmıştır. Şekil 8'deki iki-fazlı matris çeviricinin güç devresi kartında 12 adet International Rectifier firmasına ait IRG650B120KDP model IGBT, 4 adet metal oksit varistör (MOV), 6 adet RC snubber devresi, iki faz akımını ölçmek için 2 adet PCB akım sensörü ve giriş/çıkış klemensleri bulunmaktadır. Sürme devresinde ölü zaman, IXYS firmasının ürettiği IXDP630PI entegresi kullanılarak 1µs olarak ayarlanmıştır. Sürücüde kullanılan IGBT 1200V kolektör-emiter anma gerilimine ve 25°C jonksiyon sıcaklığında 60A kolektör akımına dayanabilmektedir.



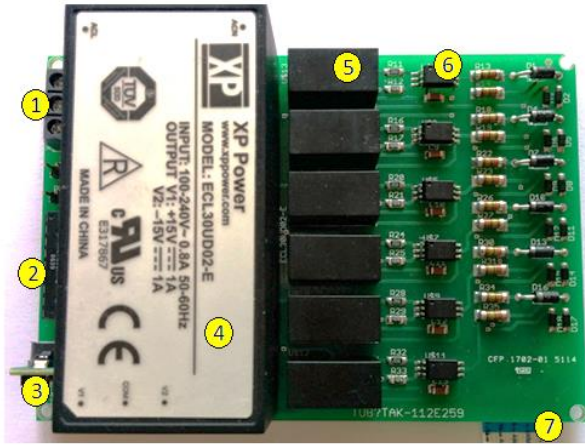
Şekil 8. Deneysel kurulumunun genel devre şeması (The general circuit diagram of experimental setup)



Şekil 9. a) Tasarlanan güç devresi ve ölçüm kartı b) Tasarlanan gate sürücü kartı
(a) The PCB of designed power circuit and measurement, b) The PCB of designed gate drive circuit)

Matris çeviricinin beslemesi doğrudan şebeke ile bağlantılıdır. İndüktif özellikten dolayı gerilim sıçramalarının belirli bir seviyenin altında tutabilmek için motor uçları ile çevirici arasına MOV kullanılmıştır. Ayrıca motor stator akımlarının ölçümü için iki adet PCB akım sensörü kullanılmıştır. AC-AC dönüşümün en büyük dezavantajlarından biri akım için boşluk çalışma yolu bulunmamasıdır. Bundan dolayı çift-yönlü anahtarlara turn-

off snubber devresi bağlanmıştır. Snubber elemanları $R=22\Omega$ ve $C=22nF$ olarak belirlenmiştir. Matris çevirici güç, ölçüm ve gate sürücü devresine ait PCB tasarımları CadSoft EAGLE Professional programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Şekil 9'da verilmiştir. Tasarlanan matris sürücü iki kattan oluşmaktadır. Üst katta; Şekil 10'da görüldüğü gibi besleme, izolasyon ve Gate sürücü kartı bulunmaktadır.

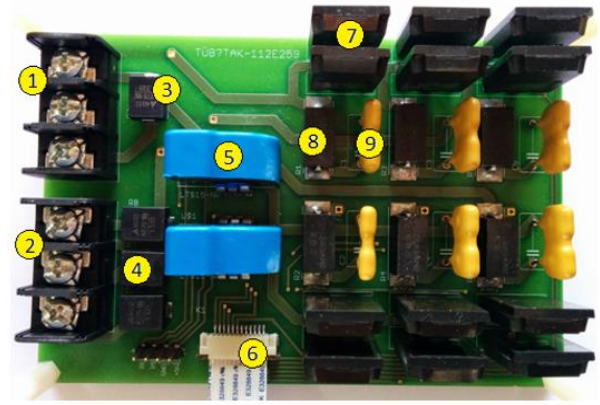


Şekil 10. Üretilen gate sürücü ve izolasyon kartı
(Produced gate and isolation card)

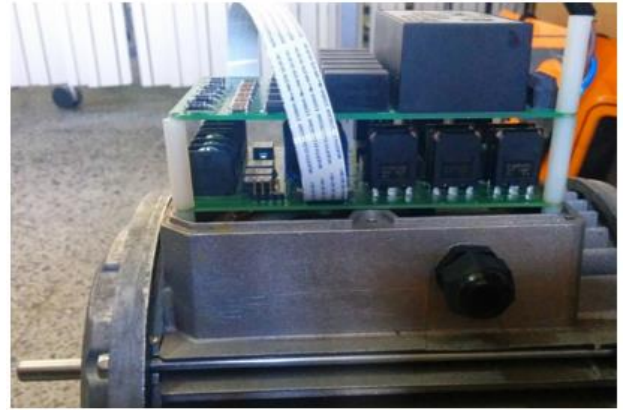
Şekil 10'daki sarı renk ile etiketlenen cihazların açıklamaları kısaca şu şekildedir; (1) 220Vac besleme girişi; SMPS' beslemek için kullanılmıştır. (2) Ölü zaman entegresi; Üst ve alt anahtarlar arasındaki gecikmeyi sağlamak için kullanılmıştır. (3) 5V dc regülatör; Akım sensörleri ve DSP besleme için kullanılmıştır. (4) 220Vac girişli 24Vdc çıkışa sahip SMPS; DC/DC çeviricileri beslemek için kullanılmıştır. (5) DC/DC çevirici; 1500Vdc izolasyon sağlayabilen +15V/-8V Gate besleme için kullanılmıştır. (6) IGBT Gate sürücü entegresi; çift-yönlü IGBT anahtarları sürmek için kullanılmıştır. (7) Flex kablo; Güç kartı ile bağlantının sağlanması. Güç devresindeki IGBT anahtarlar için 6 adet gate sürücü ve izolasyonlu gerilim kaynağı ihtiyacı bulunmaktadır. Her bir çift-yönlü anahtar için bir adet kullanılmıştır. Çift yönlü anahtarlar ortak-emiterli olduğu için iki IGBT tek gate sürücü ile sürülebilmektedir. Üretilen gate sinyali iletim için +15Vdc, kesim için -8Vdc üretmektedir. Böylece parazit etkilerden dolayı IGBT'lerin iletime girme riski ortadan kaldırılmıştır [22]. Tasarlanan matris sürücünün alt katında ise; 12 adet IGBT ve 6 adet RC snubber devresi bulunmaktadır. Bu çalışmada çeviri güç devresinde nominal değerinin çok üstünde yüzey montajlı olmayan IGBT anahtarlar kullanılmış. Deneysel sonuçlar alınırken de sürücü çok kısa sürelerde çalıştırıldığı için bu IGBT anahtarlar için soğutucu kullanmaya gerek duyulmamıştır. Ticari bir ürün söz konusu olduğunda anahtarların SMD seçilmesi ve anahtarlar için mutlaka soğutucu kullanılması gerekmektedir. Ayrıca iki faz akımını ölçmek için PCB akım sensörü yerleştirilmiştir.

Şekil 11'de gösterilen motor sürücü kartı üzerinde sarı renk ile etiketlenen cihazların açıklamaları kısaca şu şekildedir; (1) 1220Vac besleme girişi (2) Motor bağlantı klemensi (3) Giriş varistörü (4) Çıkış varistörleri (5) Akım sensörü (6) Gate sinyal kartı ile bağlantı (7) Ortak emiter bağlantılı IGBT (8) Turn-off snubber R direnci (9) Turn-off snubber C kondansatörü.

Tasarlanan kartların boyutları Şekil 12'de gösterildiği gibi 1kW'lık bir motorun klemens kutusuna sığacak şekilde 120x82 mm boyutunda tasarlanmıştır.



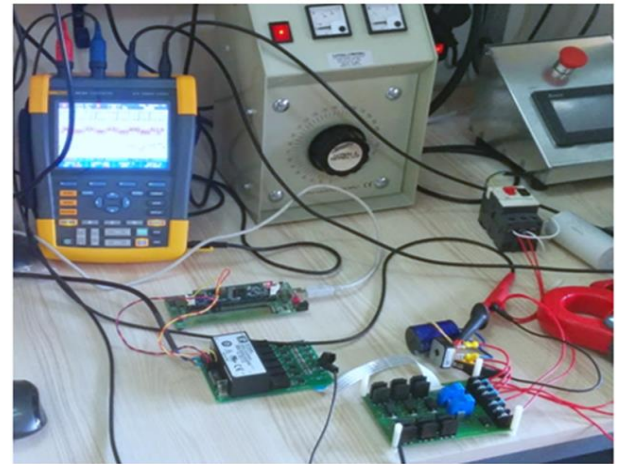
Şekil 11. Üretilen matris çevirici güç devresi kartı
(Produced matrix converter power circuit card)



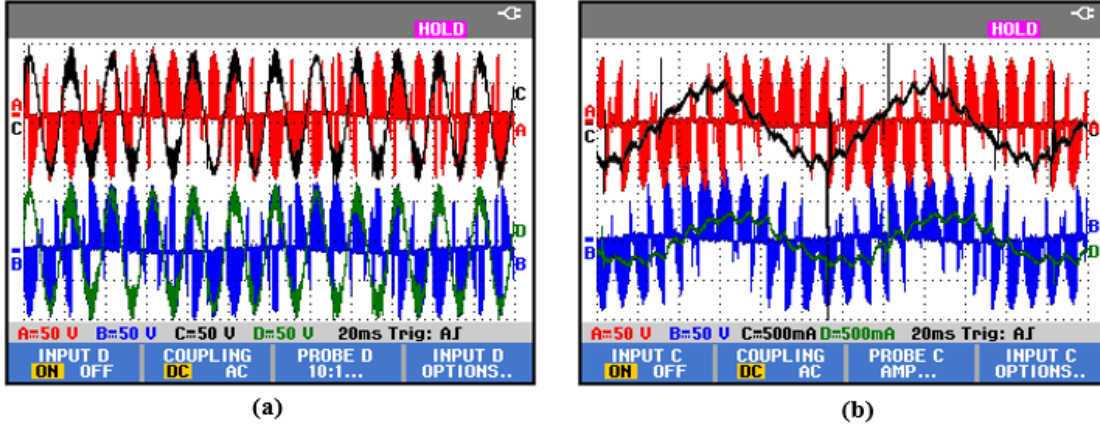
Şekil 12. Matris Sürücünün motor klemens kutusuna yerleştirilmiş durumu
(Matrix drive mounted on the motor terminal box)

5.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

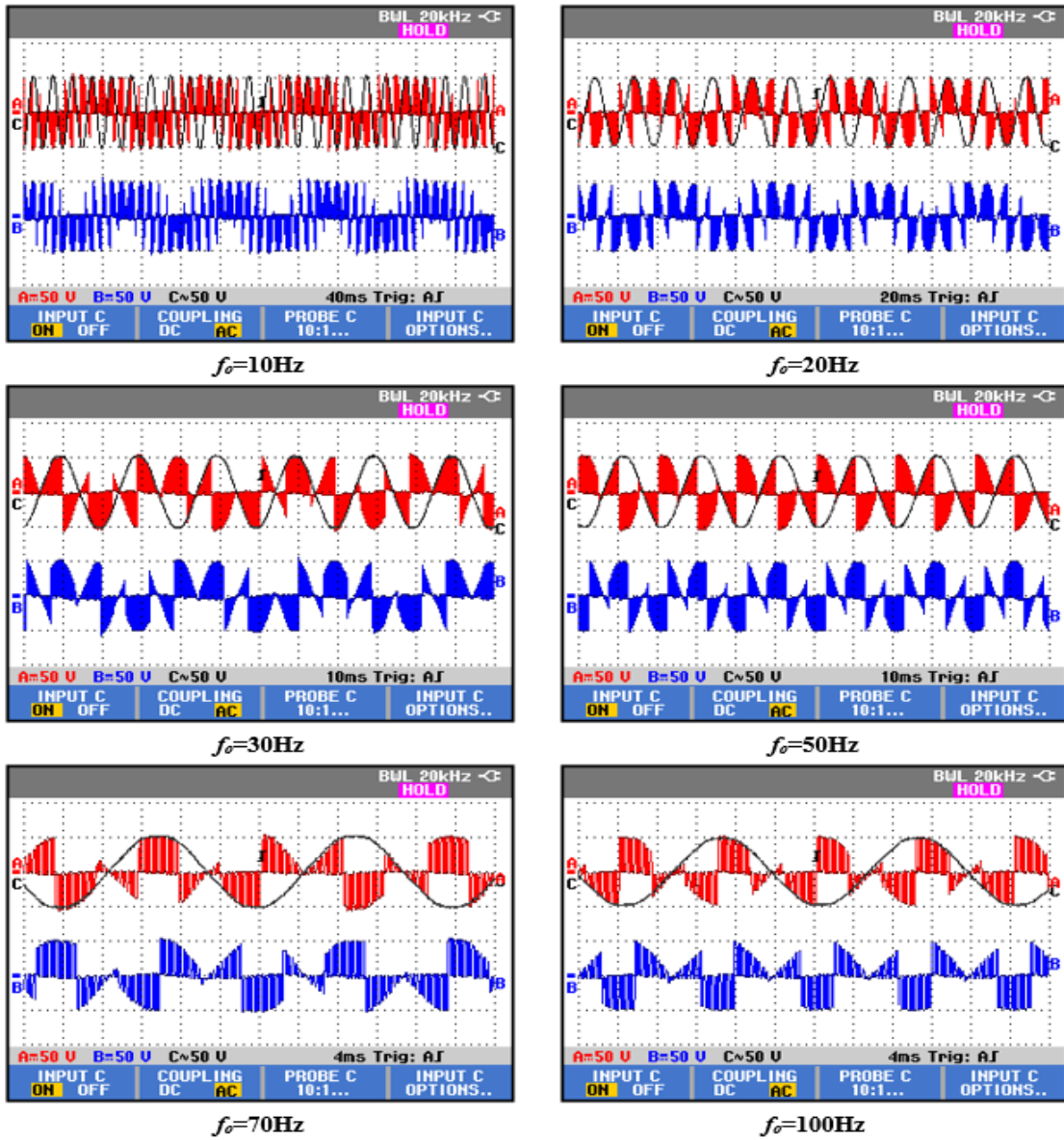
Tasarlanan iki-fazlı çıkış gerilimine sahip matris çeviricinin iki-fazlı bir RL yükü ile test edilmesi için oluşturulan deneysel kurulum Şekil 13'de gösterilmiştir.



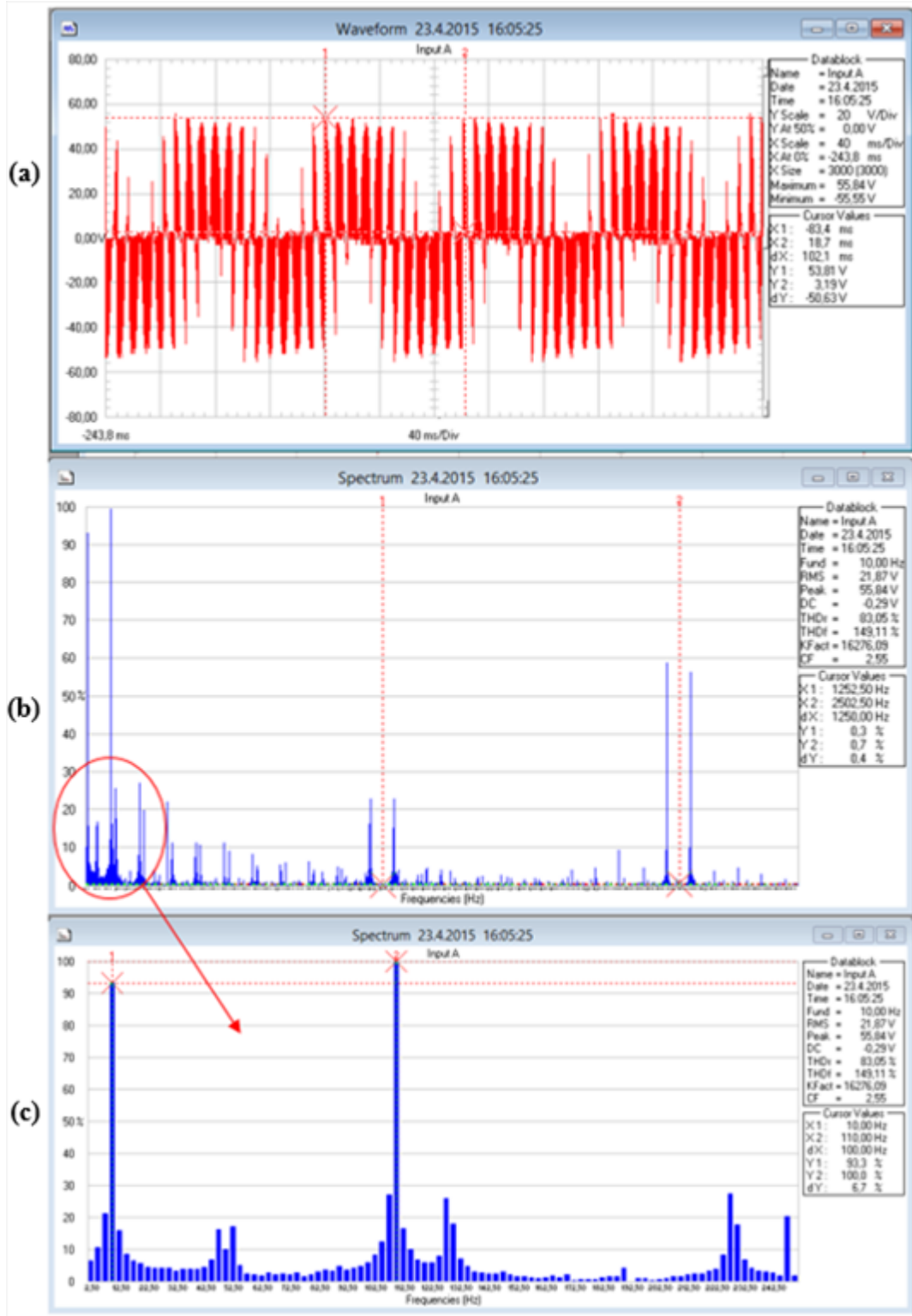
Şekil 13. Matris çeviricinin test edilmesi için deney düzeneği
(The experimental setup for testing the matrix converter)



Şekil 14. 10Hz çıkış frekansı için a) Giriş ve çıkış gerilimleri b) Çıkış gerilimleri ve yük akımları
(For 10Hz output frequency a)The voltages of the input and output b) The output voltages and load currents)



Şekil 15. Matris çeviricinin farklı çıkış frekansları için deneysel sonuçları (Siyah: Şebeke Gerilimi, Kırmızı: A-fazı çıkış gerilimi Mavi: B-fazı çıkış gerilimi)
(The experimental results for matrix converter's different output frequency Black: the grid voltage Red: the output voltage-A, Blue: the output voltage-B)



Şekil 16. Matris çeviricinin 10Hz çıkış frekansı için deneysel sonuçlar a) V_A gerilim sinyali b) 0-3000Hz arası Harmonik spektrumu c) 0-250Hz arası detaylı Harmonik Spektrumu
(The experimental results for 10Hz matrix converter's output frequency a) V_A voltage signal b) The harmonic spectrum of 0 between 3000Hz c) The detailed harmonic spectrum of 0 between 250Hz)

Tasarlanan matris çeviricinin bir RL yükünü ($R=7,9\Omega$, $L=360mH$) beslemesi durumunda, ölçüm filtresi kullanılmadan 10Hz çıkış frekansı için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 14'te gösterilmiştir. Çeviricinin modülasyon değeri 0,8 ve anahtarlama frekansı 2,5kHz olarak ayarlanmıştır. 50V, 50Hz şebeke gerilimini (kanal C ve D) kullanarak elde edilen 10Hz'lik iki-fazlı çıkış gerilimi (kanal A ve B) Şekil 14(a)'da gösterilmiştir. Şekil 14(b)'de ise iki çıkış fazının gerilim ve akımları üst üste gösterilmiştir. Matris çevirici sabit giriş gerilimini farklı açılarda sentezleyerek 90 derece faz farkı olan iki fazlı çıkış gerilimini başarılı bir şekilde elde etmiştir. Tasarlanan Matris çevirici için 20kHz ölçüm filtresi kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar ise Şekil 15'de verilmiştir. Bu deneysel sonuçlar, matris çevirici farklı çıkış frekansları için çalıştırılarak elde edilmiştir. Sırası ile 10Hz, 20Hz, 30Hz, 50Hz, 70Hz ve 100Hz olarak testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 15'de verilen deneysel sonuçlarda Siyah olan sinyal 50Hz'lik çevirici giriş gerilim sinyali, kırmızı sinyal A çıkış fazı ve mavi sinyal B çıkış fazı olarak görülmektedir. Şekil 15'den görüldüğü gibi bütün çıkış frekanslarında çevirici çıkış gerilim sinyalleri öngörüldüğü şekilde elde edilebilmiştir. Gerçekleştirilen çeviricinin 10Hz çıkış frekansı için ayrıntılı harmonik analizi deneysel olarak Şekil 16'da verilmiştir. Şekilde A-fazına ait çıkış gerilim sinyali (V_A), bu gerilime ilişkin harmonik spektrumları geniş halde 0-3000Hz arasında ve ayrıntılı olarak 0-250Hz arasında verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ana harmoniğe en yakın baskın harmonik beklenildiği gibi 11. Harmonik olarak oluşmuştur. Bununla birlikte anahtarlama frekansının (2,5kHz) yan bantlarında da öngörülen harmonikler oluşmuştur.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede sabit tek-fazlı gerilim kaynağından iki-fazlı ayarlanabilir gerilim kaynağı elde etmek için doğrudan ac-ac dönüşüm yapabilen bir güç dönüşüm topolojisi gerçekleştirilmiştir. Bu dönüşüm topolojisinde 6 adet çift yönlü anahtar kullanılarak matris çevirici yapısı elde edilmiştir. Tasarlanan matris çevirici bir doğrultucuya ve dc-hat depoma elemanı olarak kondansatörlere ihtiyaç duymamasından dolayı geleneksel eviricilere göre daha kompakt bir yapıda oluşturulmuştur. Tasarlanan matris çevirici tek-fazlı veya iki-fazlı bir AC motorun hız kontrolünde kullanılabilir. Çevirici ekstra donanıma ihtiyaç duymadan güç akışına çift yönlü sağlayabilme gibi doğal bir özelliği vardır. Sonuç olarak, tasarlanan çevirici şu avantajlara sahiptir; Sürücü sisteminin motorun klemens kutusuna sığacak boyutta yapılabilmesi, çift yönlü güç akışına müsaade etmesi depolama elemanına ihtiyaç duymaması, sistem verimini artırması, herhangi bir ac-motor için sürücü olarak kullanılabilmesi, mikroişlemciler için basit anahtarlama algoritmasına sahip olması.

Önerilen çevirici güç devresinde daha düşük harmonik içeriğine sahip giriş ve çıkış sinyalleri elde etmek için yazarlar tarafından [23]'de teorik olarak geliştirilen yeni bir

anahtarlama algoritması, bu makalede deneysel olarak ispatlanarak literatüre bir katkı sağlanmıştır. Böylece hız kontrolü gerektiren sirkülasyon pompaları, hidroforlar, klimalar, çamaşır makinaları, kurutma makinaları, buzdolapları, derin dondurucular vb. gibi tek-fazlı sistemlerde kullanılmak üzere ticari olarak mevcut doğrultucu girişine sahip sürücü sistemleri ile kıyaslandığında şebekeye bozucu etkisi daha az, daha verimli ve kompakt bir ürün geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makalede sunulan çalışmalar, TÜBİTAK-112E259 Numaralı "Tek-Fazlı Matris Çevirici Beslemeli İki-Fazlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor ve Sürücü Tasarımı" isimli proje kapsamında yürütülmüştür. Yazarlar, sağlanan destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kama Ö., Kaplan Z., Türkiye'de enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik bir öneri: beyaz eşya teşvik uygulamaları, *Hukuk ve İktisat Araştırmaları Dergisi*, 4 (1), 201-211, 2012.
2. Ghial V.K., Saini L.M., Saini J.S., Parameter estimation of permanent-split capacitor-run single-phase induction motor using computed complex voltage ratio, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 61 (2), 682-692, 2014.
3. Bose B.K., Power electronics and motor drives recent progress and perspective, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 56 (2), 581-588, 2009.
4. Azza H.B., Jemli M., Boussak M., Gossa M., Implementation of sensorless speed control for two-phase induction motor drive using ISFOC strategy, *IJST Transactions of Electrical Engineering*, 35 (E1), 63-74, 2011.
5. Guerreiro M., Foito D., Cordeiro A., A speed controller for a two-winding induction motor based on diametrical inversion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (1), 449-456, 2010.
6. Jabbar M.A., Khambadkone A.M., Yanfeng Z., Space-vector modulation in a two-phase induction motor drive for constant-power operation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51 (5), 1081-1088, 2004.
7. Aydogmus O., Deniz E., Kayisli K., PMSM drive fed by sliding mode controlled PFC boost converter, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (6), 4765-4773, 2014.
8. Pavel Z., Maria Z., Torque ripple calculation of the two-phase permanent magnet synchronous motor supplied by a triac converter, *Acta Polytechnica Hungarica*, 3 (2), 17-26, 2006.
9. Hamidi A., Oglu A., Ibrahim Y., State estimation of two-phase permanent magnet synchronous motor, *Eng. & Tech. Journal*, 27 (7), 1435-1443, 2009.
10. Aydoğmuş O., Sünter S., Matris Çevirici ve Gerilim Beslemeli Evirici İle Beslenen Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Sürücülerinin Karşılaştırılması, 6th

- International Advanced Technologies Symposium IATS'11, Elazığ, Turkey, 169-174, 16-18 May, 2011.
11. Gyugyi L., Pelly BR., Static power chargers theory, performance and application, John Wiley&Son Inc., New York, A.B.D., 1976.
 12. Venturini M., Alesina A., The Generalized Transformer: A New Bi-Directional Waveform Frequency Converter with Continuously Adjustable Input Power Factor, IEEE Power Electronics Specialists Conference, USA, 242-252, 16-20 June, 1980.
 13. Venturini M., A New Sine Wave in sine Wave Out Conversion Technique Eliminates Reactive Elements, Proceeding of Solid State Power Conversion Conference (Powercon7), E3-1, E3-15, 1980.
 14. Li X., Su M., Sun Y., et al., Modulation strategies based on mathematical construction method for matrix converter under unbalanced input voltages, IET Power Electronics, 6 (3), 434-445, 2013.
 15. Podlesak T.F., Katsis D.C., Wheeler P.W., Clare J.C. Empringham L., Bland M., A 150-kVA vector controlled matrix converter induction motor drive, IEEE Transaction on Industry Application, 41 (1), 841-847, 2005.
 16. Sünter S., Aydogmus O., Implementation of a single-phase matrix converter induction motor drive, Electrical Engineering-Springer, 90 (6), 425-433, 2008.
 17. Idris Z., Hamzah M.K., Implementation of a New Single-Phase Cycloconverter Based on Single-Phase Matrix Converter Topology Using Sinusoidal Pulse Width Modulation with Passive Load Condition, IEEE Conference on Industrial Electronic and Application, Singapore, 1-6, 24-26 May, 2006.
 18. Khoei A., Yuvarajan S., Single-phase ac-ac converters using power MOSFET's, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 35 (1), 442-443, 1998.
 19. Jacobina C.B., Oliveira T.M., Cabral da Silva E.R., Control of the single-phase three-leg ac/ac converter, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 53 (1), 467-476, 2006.
 20. Aydogmus, O., Boztas, G., Sunter, S., Design of a novel single-phase in two-phase out matrix converter driving an induction motor, IET Power Electronics, 9 (7), 1391-1397, 2016.
 21. Aydogmus O., Deniz E., Design of a Two-Phase PMSM Fed by an AC-AC Converter, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2015), Seville, Spain, 690-695, 17-19 March, 2015.
 22. Deniz E., Coteli R., Dandil B., Tuncer S., Design and implementation of three level H-bridge inverter based D-STATCOM, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (2), 289-298, 2011.