

ÜÇ-SEVİYELİ H-KÖPRÜ EVİRİCİ TABANLI D-STATKOM'UN TASARIMI ve GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Erkan DENİZ*, **Resul ÇÖTELİ***, **Beşir DANDİL***, **Servet TUNCER****

* Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, ELAZIĞ.

** Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Bölümü, ELAZIĞ.

edeniz@firat.edu.tr, rcoteli@firat.edu.tr, bdandil@firat.edu.tr, stuncer@firat.edu.tr,

(Geliş/Received: 25.11.2009 ; Kabul/Accepted: 24.12.2010)

ÖZET

Dağıtım Statik Senkron Kompanzator (D-STATKOM); dağıtım sistemlerinde güç kalitesi problemlerini iyileştirmek için kullanılan evirici tabanlı bir Özel Güç aygıtıdır. Bu makalede, üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un deneysel kurulumu için gerekli olan evirici, ölçme, koruma ve ölü zaman devrelerinin tasarımı ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ayrıca, D-STATKOM'un dinamik performansını etkileyen bağlantı endüktansı ve DA-hat kondansatörü gibi pasif elamanların değerinin nasıl belirleneceğine değinilmiştir. Deneysel çalışmada D-STATKOM ile bilgisayar arasındaki veri alışverişini sağlamak için dSPACE firmasının DS1103 denetleyici kartı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen D-STATKOM'un reaktif güç sağlayabilme başarımı denetim algoritmasında akımın reaktif bileşenin referans değeri (i_{qref}) gerçek zamanlı değiştirilerek test edilmiş ve elde edilen bazı deneysel sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: D-STATKOM, deneysel kurulum, üç-seviyeli H-köprü evirici, DS1103.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THREE LEVEL H-BRIDGE INVERTER BASED D-STATCOM

ABSTRACT

Distribution Static Synchronous Compensator (D-STATCOM) is an inverter based custom power devices used to improve power quality problems in distribution systems. In this paper, design of inverter, measurement, protection and dead-time circuits needed to build experimental setup of three-level H-bridge inverter based D-STATCOM is explained in detail. In addition, selection of passive elements which are coupling inductance and dc-link capacitor being important for dynamic response of compensator is given. In experimental study, DS1103 controller card from dSPACE firm is used to transfer data between D-STATCOM and computer. D-STATCOM's ability for reactive power support is tested in experimental setup by changing of i_{qref} as on-line and some results are given.

Keywords: D-STATCOM, experimental setup, three-level H-bridge inverter, DS1103

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstriyel güç tüketiminin neden olduğu güç kalitesi sorunlarının tespiti ve çözülmesi güç sistemlerinin sağlıklı işlemesi için zorunluluk haline gelmiştir [1]. İletim ve dağıtım sistemlerinde ilgilenilen güç kalitesi sorunları farklı konuları içermekle birlikte, bu problemlerin çoğu reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme gibi uygulamalar ile çözülebilir. Son yıllarda yarı iletken ve mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler,

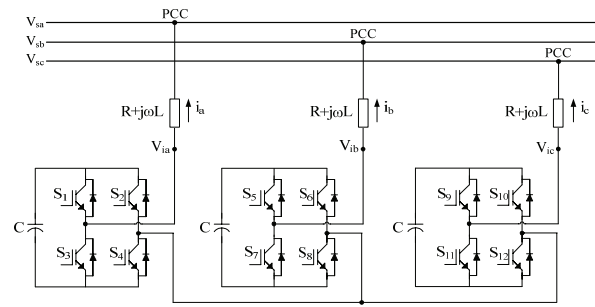
geleneksel kompanzatorlara kıyasla bu uygulamaları daha hızlı ve güvenli bir şekilde yapabilen evirici tabanlı kompanzatorların geliştirilmesine imkân sağlamıştır. Bu kompanzatorlar iletim sistemlerinde kullanıldıkları zaman Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) aygıtları, dağıtım sistemlerinde kullanıldıkları zaman ise Özel Güç (Custom Power) aygıtları olarak adlandırılmaktadırlar. Dağıtım Statik Senkron Kompanzator (D-STATKOM); şebekeye paralel bağlanan ve dağıtım sistemlerinde gerilim regülasyonu, güç faktörü düzeltme, yük dengeleme ve

harmonik kompanzasyonu için kullanılan evirici tabanlı bir Özel Güç aygıtıdır [2]. D-STATKOM; bir evirici, bu eviriciye DA gerilimi sağlayan DA-hat kondansatörleri, bir bağlantı endüktansı ve bir denetim biriminden oluşmaktadır. Şebekeye bağlı hassas yüklerin güç kalitesi sorunlarından zarar görmemesi için D-STATKOM'un sistemde meydana gelen değişimlere çok kısa sürede cevap vermesi istenir. Bu nedenle, D-STATKOM devresindeki evirici yüksek anahtarlama frekanslı Darbe Genişlik Modülasyon (PWM) yöntemleri ile denetlenmelidir. Günümüze kadar D-STATKOM'un güç devresinde çok darbeli ve iki-seviyeli PWM denetimli evirici yapıları kullanılmıştır. Ancak orta/yüksek gerilimli uygulamalarda bu eviriciler düşük verim ve büyük transformatörler kullanılması nedeni ile yüksek fiyat gibi dezavantajlara sahiptirler. Son yıllarda, geleneksel eviricilere kıyasla çıkış dalga şekillerinin harmonik içeriğinin daha iyi olması ve doğrudan dağıtım şebekesine bağlanılabilmeleri gibi üstün özelliklerinden dolayı çok seviyeli eviriciler birçok orta ve yüksek güç/gerilim uygulamalarında olduğu gibi D-STATKOM uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Çok seviyeli eviricilerin; diyot-kenetlemeli, kondansatör kenetlemeli ve kaskat evirici olmak üzere üç devre yapısı vardır [3]. Bunlar arasında kaskat evirici, D-STATKOM uygulamaları için en umut verici alternatif olarak gözükmektedir. Çünkü faz bacaklarındaki H-köprü evirici sayısı artırılarak, kaskat eviricinin çıkış güç/gerilim kapasitesi kolayca artırılabilir ve evirici bağlantı trafosu kullanılmadan orta gerilim dağıtım hattına doğrudan bağlanabilir. Kaskat eviricinin en önemli dezavantajı aktif güç uygulamaları için kullanılması durumunda her bir H-köprü için izoleli DA kaynaklara gereksinim duymasındır. Ancak D-STATKOM uygulamalarında evirici sadece reaktif güç sağladığı için izoleli DA kaynaklara ihtiyaç kalmaz. En düşük seviyeli kaskat evirici yapısı olan üç-seviyeli H-köprü evirici ise D-STATKOM uygulamalarında DA-hat gerilim dengesizlik problemi yaşanmayan tek çok seviyeli evirici yapısıdır.

Bu makalede, üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un deneysel kurulumu gerçekleştirilerek, kurulumla ilişkili olarak evirici, ölü-zaman, akım ve gerilim ölçümü, koruma ve tampon devrelerinin tasarımı ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, güç devresinde kullanılan pasif elemanların değerinin nasıl belirleneceği anlatılmıştır. Ek olarak, denetim algoritmasının gerçekleştirilmesi ve ölçülen akım gerilim işaretlerinin bu algorithmada değerlendirilmesi için kullanılan DS1103 denetleyici kartı ve yazılımları hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak oluşturulan deneysel kurulumdan elde edilen bazı sonuçlar sunulmuştur.

2.ÜÇ-SEVİYELİ H-KÖPRÜ EVİRİCİ TABANLI D-STATKOM'UN ÇALIŞMA PRENSİBİ (OPERATION PRINCIPLE OF THREE-LEVEL H-BRIDGE INVERTER BASED D-STATCOM)

D-STATKOM şebeke frekansında, $\pm QVAr$ aralığında reaktif güç çeken/veren ve dağıtım şebekesine ortak bağlantı noktasında (PCC) bir bağlantı endüktansı yardımıyla paralel bağlanan bir Özel Güç aygıtıdır. Şekil 1'de üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un devre şeması gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, D-STATKOM devresi her fazda bir H-köprü evirici, şebeke ile evirici arasındaki reaktif güç alış verişini sağlamak için bir bağlantı endüktansı ($R+j\omega L$) ve eviriciye DA gerilim sağlayan DA-hat kondansatörlerinden (C) oluşmaktadır.



Şekil 1. Üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM devresi (Circuit of three-level H-bridge inverter based D-STATCOM)

Şekil 1'de, V_s şebeke geriliminin temel bileşeninin genliği ve V_i evirici geriliminin temel bileşeninin genliği olmak üzere; D-STATKOM ile dağıtım sistemi arasındaki reaktif güç alışverişi, ortak bağlantı noktasına göre V_i 'nin denetimi yapılarak gerçekleştirilir. Bu durumda, $V_i > V_s$ ise akım eviriciden şebekeye doğru akar ve evirici kapasitif bir eleman gibi davranarak kapasitif reaktif güç verir. Tam tersi durumda ise akım şebekeden eviriciye doğru akar ve evirici endüktif bir eleman gibi davranarak endüktif reaktif güç çeker. Eğer $V_i = V_s$ ise şebeke ile evirici arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz. D-STATKOM'un çektiği/verdiği reaktif güç miktarı;

$$Q = \frac{V_s}{X} (V_s - V_i \cos \delta) \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada; X bağlantı endüktansının reaktansı, δ ise V_i ve V_s arasındaki faz farkıdır. Şekil 1'de D-STATKOM ile dağıtım sistemi arasındaki aktif güç alışverişi ise, δ açısı denetlenerek sağlanmaktadır. İdeal durumda ($\delta = 0$), D-STATKOM ile şebeke arasında herhangi bir aktif güç akışı olmaz. Ancak gerçek uygulamalarda D-STATKOM'un güç devresindeki evirici, bağlantı endüktansı ve DA-hattında aktif güç kayıpları meydana gelmektedir. D-STATKOM'un DA-hattı kondansatör ile sonlandırıldığı için bu elemanlarda depolanan enerji

sınırlıdır. Kondansatörlerin dolu tutulabilmesi için meydana gelen kayıpların şebekeden karşılanması gerekir. Aksi halde bu kayıplar kondansatör tarafından karşılanacağı için kondansatörler boşalacaktır. Sürekli durumda D-STATKOM'un ürettiği gerilimin temel bileşeninin genliği şebeke geriliminin genliğinden δ açısı kadar geri fazda tutularak kayıpların şebekeden karşılanması sağlanır. D-STATKOM'un verdiği/çektığı aktif güç miktarı Denklem (2) bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$P = \frac{V_s V_i}{X} \sin \delta \quad (2)$$

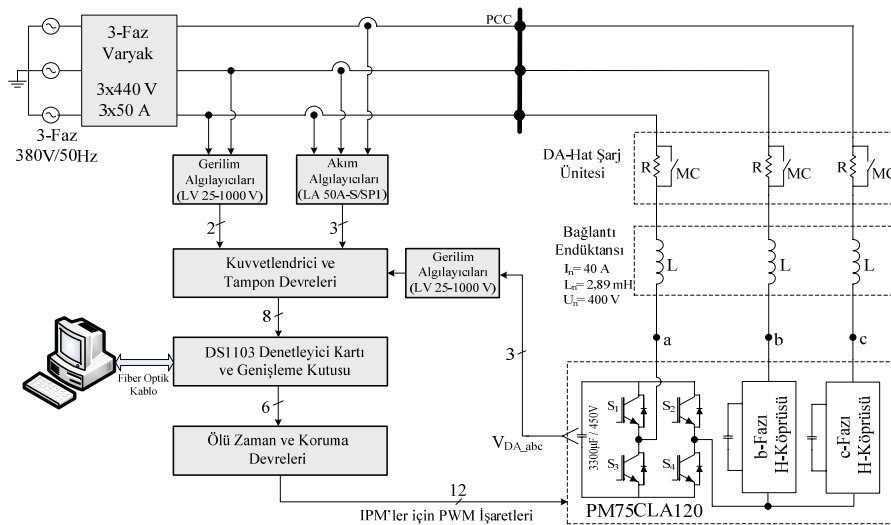
3. ÜÇ-SEVİYELİ H-KÖPRÜ EVİRİCİ TABANLI 380V/±25kVAr D-STATKOM'UN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THREE-LEVEL H-BRIDGE INVERTER BASED 380V/±25kVAr D-STATKOM)

D-STATKOM; bekleme, kapasitif ve endüktif olmak üzere üç farklı çalışma durumuna sahiptir. Bu makalede deneysel kurulum; Sinüzoidal PWM (SPWM) anahtarlama tekniği kullanılması durumunda $M_{a0}=0.83$ modülasyon indeksi değeri için bekleme konumunda ($Q=0$ kVAr), modülasyon indeksinin maksimum değeri $M_{a_{max}}=0.96$ için $Q=-25$ kVAr kapasitif güç verecek ve modülasyon indeksinin minimum değeri $M_{a_{min}}=0.68$ için $Q=+25$ kVAr endüktif reaktif güç çekecek şekilde tasarlanmıştır. Üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un deneysel kurulumunun genel devre şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü gibi deneysel kurulum iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım; H-köprü evirici, eviricinin DA-hat kondansatörleri, DA-hat şarj ünitesi ve bağlantı endüktansından oluşan D-STATKOM'un güç devresidir. İkinci kısım ise, gerilim ve akım ölçümleri, kuvvetlendirme ve tampon devresi, DS1103 denetleyici kartı, ölü zaman ve koruma devreleri, DS1103 denetleyici kartı, ölü zaman ve koruma devrelerinden oluşan ölçme ve kontrol

devreleridir. Bu birimlerin tasarımı aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

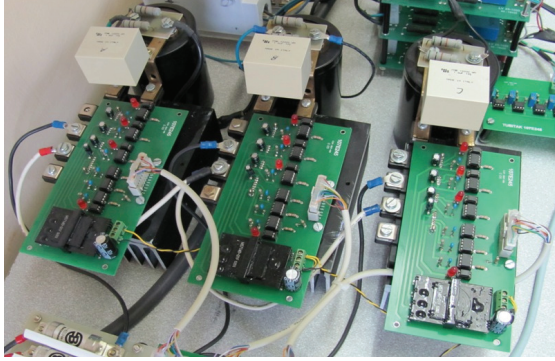
3.1. ÜÇ-SEVİYELİ H-KÖPRÜ EVİRİCİNİN TASARIMI (DESIGN OF THREE-LEVEL H-BRIDGE INVERTER)

Deneysel kurulumda, üç-seviyeli H-köprü eviricinin referans DA-hat gerilimi; bekleme durumunda eviricinin çıkış gerilim değerinin (380V) şebekenin gerilim değerine eşit olduğu durum için 375V olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte 380V faz-faz gerilimi ve 25kVAr reaktif güç göz önüne alındığında, eviricinin güç devresi için 75A-1200V akım-gerilim değerlerine sahip PM75CLA120 IPM'ler kullanılmıştır. Bu modüllerden, her fazda bir adet olmak üzere toplam 3 adet bulunmaktadır. Modüllerin her birinin içerisinde sürme devreleri ile birlikte köprü şeklinde bağlanmış 6 adet IGBT güç anahtarı mevcuttur. Ayrıca; kısa devre, aşırı akım ve aşırı sıcaklık durumlarına karşı korumayı sağlayan hata kod çıkışlarına sahiptir. Bu modüllerin her biri tek-fazlı H-köprü evirici yapısı olarak kullanılmıştır. Dolayısı ile her modüldeki 6 güç anahtarın sadece 4 tanesi kullanılmıştır. Diğer iki güç anahtarı ise yedek durumdadır. Eğer modül içerisinde herhangi bir koldaki anahtarlarda arıza oluşursa, devre kartları bu yedek anahtarların kullanılması düşünülerek tasarlanmıştır. Güç devresi ile denetleyici kart ve bu kartla beraber kullanılan diğer devreler arasında elektriksel yalıtımı HCPL-4506 ve PC817 optik izolatör entegreleri sağlamaktadır. HCPL-4506 entegresi yüksek hızlı olmasının yanı sıra, IPM'in sürme devrelerini doğrudan sürebilme yeteneğine sahiptir. PC817 entegresi ile de modüldeki hata durum bilgileri (kısa devre, aşırı akım ve aşırı sıcaklık gibi) değerlendirilerek kapı işaretlerinin denetimi yapılmaktadır. Ayrıca, IPM'ler içerisindeki sürme devrelerini beslemek için izolasyonlu DA besleme kaynakları gerekmektedir. Bu amaç için M57140-01F



Şekil 2. D-STATKOM'un deneysel kurulumunun şematik gösterimi (Schematic representation of D-STATKOM's experimental setup)

hibrid entegrasyonu kullanılarak 4 adet 15V'luk izolasyonlu DA besleme kaynakları oluşturulmuştur. Şekil 3'de tasarımı yapılan üç-seviyeli H-köprü evirici gösterilmiştir.

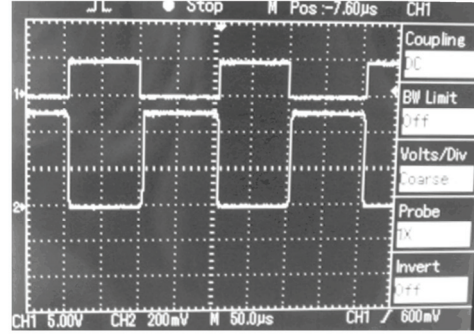


Şekil 3. Tasarlanan üç-seviyeli H-köprü evirici
(Designed three-level H-bridge inverter)

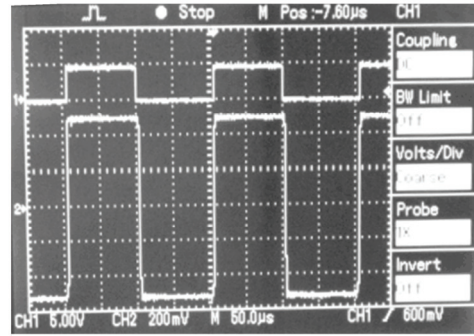
Gerçekleştirilen üç-seviyeli H-köprü eviricinin a-fazı H-köprüsü için $1k\Omega/100W$ 'lık bir direnç yükü kullanılarak elde edilen bazı test sonuçları Şekil 4'de, verilmiştir. Burada; DA-hat gerilimi 50V, anahtarlama frekansı $f_s=5kHz$ ve IGBT anahtarları süren kapı işaretleri %50 görev-periyot oranına sahiptir. Şekil 4'de CH2 olarak belirtilen işaret bir diferansiyel prob kullanılarak 1/100 kademesinden alınmıştır.

3.2. DA-HAT KONDANSATÖR DEĞERİNİN BELİRLENMESİ VE ŞARJ ÜNİTESİ (CHARGING UNIT AND DETERMINATION OF DC-LINK CAPACITOR VALUE)

D-STATKOM devresinde kullanılan DA-hat kondansatörü, üzerinden enerji dolaştırılan bir elemandır. Bu elemanın değeri eviricinin DA-hat geriliminde meydana gelen dalgalanma ve kapasitif çalışmaya geçişlerde ortaya çıkan DA-hat aşma miktarlarını belirlemektedir. Eğer DA-hat geriliminde meydana gelen dalgalanma fazla ise eviricinin çıkış dalga şekillerinin harmonik içeriği kötüleşecek ve D-STATKOM'un verdiği/çektığı reaktif güç miktarı sürekli değişecektir. Bu nedenle DA-hatta kullanılacak kondansatörlerin değerinin maliyet ve eviricinin çıkış dalga şekillerinin harmonik içeriği göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Ayrıca, eviricide anahtarlar üzerinde meydana gelebilecek gerilim sıçramalarını (voltage spike) azaltmak için DA-hattın toplam endüktans değerinin mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Bunun için düşük eşdeğer seri direnç ve endüktans (ESR-ESL) değerlerine sahip kondansatörlerin kullanılmalıdır. Üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un DA-hattında kullanılacak kondansatörün minimum değeri Denklem (3) yardımı ile hesaplanabilir [4].



CH1: Kapı işareti, CH2: S_1 üzerindeki gerilim
CH1: PWM signal, CH2: Voltage across S_1
(a)



CH1: Kapı işareti, CH2: Yük üzerindeki gerilim
CH1: PWM signal, CH2: Voltage across load
(b)

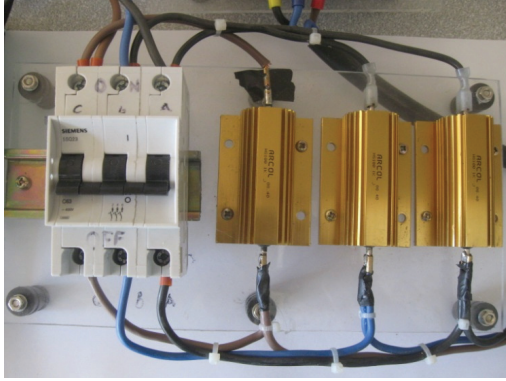
Şekil 4. Üç-seviyeli H-köprü eviricinin a-fazı için bazı test sonuçları. (a) S_1 anahtarını süren kapı işaretleri ve anahtar üzerindeki gerilimin dalga şekli, (b) H-köprü çıkış gerilimi (Some test results for phase-a of three-level H-bridge inverter, (a) Gate signal for S_1 and voltage waveform across S_1 , (b) H-bridge output voltage)

$$C = \frac{I_{Lrms}}{\sqrt{2} \pi f \Delta V_{DA}} \left(1 - \sin(\cos^{-1} \frac{\pi M_{a,max}}{4}) \right) \quad (3)$$

Denklem (3)'te, I_{Lrms} yük akımının efektif değeri, ΔV_{DA} DA-hat gerilimindeki dalgalanma miktarı, f şebeke frekansıdır. Ayrıca çalışmanın bütününde gereksinimi karşılamak için maksimum modülasyon indeksi kullanılmıştır. Oluşturulan D-STATKOM deneysel kurulumda kullanılacak DA-hat kondansatörünün minimum değeri; 38A'lık (25kVar) yük akımı, DA-hat gerilimindeki dalgalanma %7 (D-STATKOM uygulamalarında DA-hat gerilimindeki maksimum dalgalanma %10 ile sınırlıdır) için Denklem (3) yardımı ile 2,30mF olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte deneysel kurulumda, 3,3mF/450V'luk düşük ESR ve ESL'ye sahip kondansatörler kullanılmıştır.

Deneysel kurulumda eviricinin DA-hattı ile ilgili diğer bir önemli konu, D-STATKOM devreye alınmadan önce DA-hattaki aşırı akımları önlemek için DA kondansatörlerinin şarj edilmiş olmasıdır. Bu amaç için, Şekil 5'te belirtilen DA-hat şarj ünitesi

oluşturularak, kondansatörler IPM'lerin boşluk diyotları üzerinden şarj edilmiştir. Burada kondansatörlerin şarj akımlarını sınırlamak için $1k\Omega/100W$ alüminyum dirençler kullanılmıştır. Kondansatörlerin şarj işlemi bittikten sonra Şekil 2'de "MC" ile gösterilen anahtar yardımı ile bu şarj dirençleri kısa devre edilmektedir.



Şekil 5. DA-hat şarj ünitesi (DC-link charging unit)

3.3. BAĞLANTI ENDÜKTANS DEĞERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF COUPLING INDUCTANCE VALUE)

D-STATKOM uygulamalarında eviricinin görevini yerine getirebilmesi için, eviricinin bir bağlantı trafosu veya bağlantı endüktansı gibi bir bağlaştırıcı üzerinden şebekeye bağlanması gerekir. Çünkü şebeke ve D-STATKOM arasında alıp verilen reaktif akım miktarı bu bağlaştırıcının endüktansı üzerindeki gerilim düşümü ile denetlenmektedir. Oluşturulan D-STATKOM deneysel kurulumunda evirici bir bağlantı endüktansı üzerinden dağıtım şebekesine bağlı durumdadır. D-STATKOM'un DA-hat gerilim değeri 375V olarak hesaplanmış ve D-STATKOM'un güç devresinde kullanılacak IPM modüllerin (1200V-75A) güvenli çalışma bölgesi yaklaşık 800V (katalogunda tavsiye edilen kullanım değeri) olduğundan bağlantı transformatörü kullanılmasına gerek kalmamıştır. Bağlantı transformatörünün yerine aynı görevi yerine getirecek bir bağlantı endüktansı kullanılmıştır. Bağlantı endüktansı hem şebeke ile D-STATKOM arasındaki reaktif güç alış verişini sağlayacak hem de filtre görevi yapacaktır. Bununla birlikte bağlantı endüktansının değeri D-STATKOM performansı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü DA-hat geriliminin sabit tutulduğu D-STATKOM uygulamalarında bağlantı endüktansı üzerinde uygun bir gerilim düşümü sağlamak için, eviricinin çıkış gerilimi M_a ile denetlenir. D-STATKOM endüktif ve kapasitif çalışma durumunda, $M_{a_{min}}$ ile $M_{a_{max}}$ arasında bir çalışma aralığına sahiptir ve lineer bölgede $M_{a_{max}}$ 1 ile sınırlıdır. Bu yüzden bağlantı endüktansının değeri eviricinin çalışma aralığı sınırlamaktadır. Başka bir deyişle, maksimum endüktans değeri eviricinin

çalışma aralığı ve maliyet tarafından sınırlanır. [5-7] nolu çalışmalarda bağlantı endüktans değerinin; sistem empedansının 0,1-0,2 birim değeri (pu) arasında alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Bununla birlikte modülasyon indeksinin maksimum değeri yeterince büyük seçilerek, endüktansın reaktans değerinin; akımın Toplam Talep Bozulmasını (Total Demand Distortion) kabul edilebilir bir seviyeye düşürebilecek bir değerde olması sağlanır. Bağlantı endüktansının reaktans değeri modülasyon indeksine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [5].

$$X_{ac_pu} = \frac{M_{a_{max}} - M_{a_0}}{M_{a_0}} \quad (4)$$

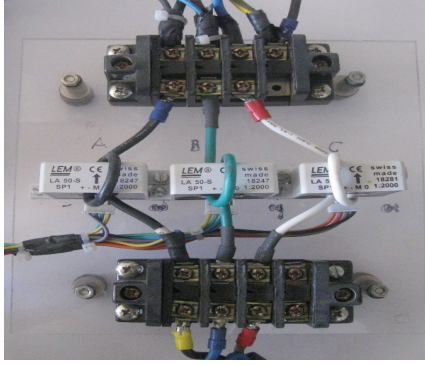
Denklem (4)'te $M_{a_0} = 0,83$ ve $M_{a_{max}} = 0,96$ alınarak bağlantı endüktansının bir fazının değeri 2,89mH olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da D-STATKOM deneysel kurulumu için kullanılan üç fazlı bağlantı endüktası gösterilmiştir.



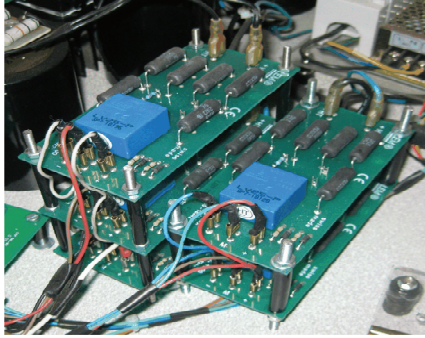
Şekil 6. D-STATKOM deneysel kurulumunda kullanılan üç fazlı bağlantı endüktası (Three-phase coupling inductance used for D-STATCOM experimental setup)

3.4. GERİLİM VE AKIM ALGILAYICILARI (VOLTAGE AND CURRENT TRANSDUCERS)

D-STATKOM için oluşturulan güç devresinin akım ve gerilim bilgileri; denetim algoritması ve koruma amaçları için gereklidir. Akım ve gerilim bilgileri yüksek doğruluk ve geniş frekans band aralığı ile ölçülüp değerlendirilmelidir. Tasarlanan deneysel ortamda gerçek-zamandaki akım ve gerilim işaretlerini ölçmek için LEM firmasının Hall etkili elemanları kullanılmıştır. Akım işaretlerini ölçmek için 1:2000 dönüşüm oranı ve nominal efektif akımı 50A olan LA 50-S/SP1 akım algılayıcı kullanılmıştır. Gerilim işaretlerini ölçmek için ise yine LEM firmasının 1000V/25mA dönüşüm oranı ve 0-1500V arasındaki gerilim değerlerini ölçebilen LV 25-1000 gerilim algılayıcısı kullanılmıştır. Toplam üç adet akım algılayıcısı ve beş adet gerilim algılayıcısı (AA gerilim için iki, DA gerilim için üç adet) kullanılmıştır. Deneysel kurulumda akım ve gerilim ölçümleri için oluşturulan devreler Şekil 7'de gösterilmiştir.



(a)

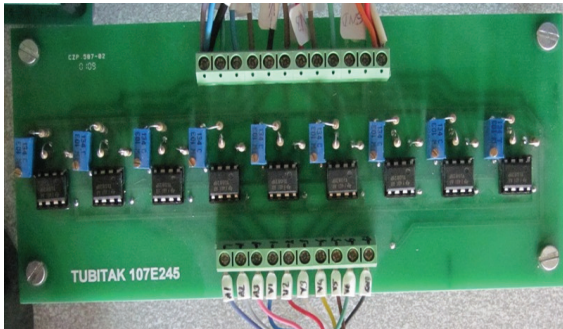


(b)

Şekil 7.(a) Akım algılayıcıları (Current transducers)
(b) Gerilim algılayıcıları (Voltage transducers)

3.5. KUVVETLENDİRİCİ VE TAMPON DEVRELERİ (AMPLIFIER AND BUFFER CIRCUITS)

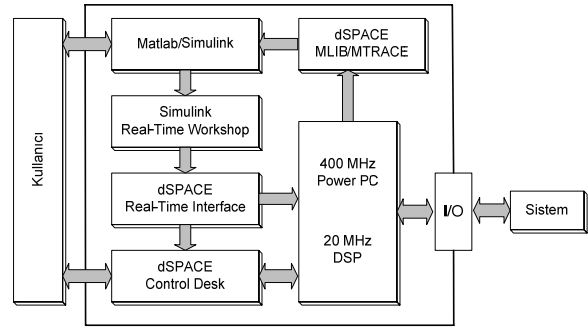
Akım ve gerilim algılayıcılarının her birinin ölçüm uçlarına kataloglarında belirtilen değerler dikkate alınarak 150Ω'lık dirençler bağlanmıştır. Bu dirençler içerisinde geçen akıma bağlı olarak üzerindeki gerilim değerleri akım ve gerilim bilgisi olarak değerlendirilmektedir. Bu dirençler üzerindeki gerilimler düşük değerlere sahip olduklarından kullanılabilir seviyelere yükseltmeleri gerekmektedir. Bu amaç için tasarlanan opamp'lı kuvvetlendirici ve tampon devrelerini içeren kart Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu kart üzerinden alınan gerilim işaretleri akım ve gerilim bilgileri olarak DS1103 denetleyici kartının ADC'lerine giriş olarak verilmiştir.



Şekil 8. Tasarlanan opamp'lı kuvvetlendirici ve tampon devre kartı (Designed board for amplifier with opamp and buffer circuit)

3.6. DS1103 DENETLEYİCİ KARTI VE YAZILIMLARI (DS1103 CONTROLLER BOARD AND ITS SOFTWARE)

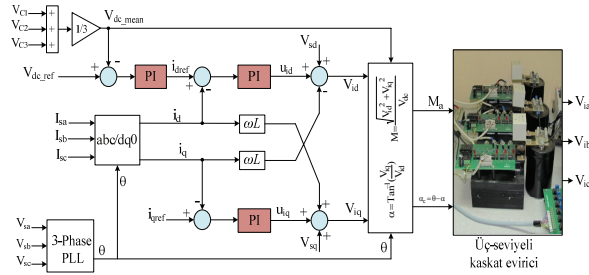
D-STATKOM'un deneysel kurulumunda, denetleyici olarak dSPACE firmasının DS1103 (Gelişmiş Kontrol Eğitim Kiti ve Genişleme Kutusu, ACE1103PX4) denetleyici kartı kullanılmıştır. Bu kart üzerinde ana işlemci PowerPC PPC750GX/1GHz ve Texas Instruments TMS320F240/20MHz uydu işlemci bulunmaktadır. Deneysel kurulumda kullanılan yazılımlar ise MatWorks ve dSPACE tarafından geliştirilen yazılım paketleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 9'da, kullanıcı tarafından Matlab/Simulink ortamında bir model oluşturulduktan sonra gerçek-zamanlı sisteme PWM işaret üretimi için kullanılan yazılımların işleyiş diyagramı bloklar halinde verilmiştir.



Şekil 9. Deneysel kurulumda kullanılan yazılımların işleyiş diyagramı (Flowchart for software used in experimental setup)

Şekil 10'da D-STATKOM deneysel kurulumunun denetimi için kullanılan "Dolaylı Akım Denetim" şeması gösterilmiştir [2]. Şekil 10'dan görüldüğü gibi, DA-hat gerilimi, akımın aktif bileşeni i_d ve reaktif bileşeni i_q 'nin denetimi için toplam üç adet Oransal+Integral (PI) denetleyici kullanılmıştır. DA-hat gerilim denetleyicisinin çıkışından d-ekseni için referans akım değeri i_{dref} elde edilir. q-ekseni için referans akım değeri i_{qref} gerçek zamanlı olarak belirlenmektedir. Ölçülen üç fazlı gerilimleri Faz Kilitleme Devresine (PLL) girilerek şebekenin açılmalık frekans bilgisi θ elde edilir. Bu bilgi hem evirici ile şebeke arasındaki senkronizasyonun sağlanması hem de ölçülen üç-faz akımlarının dq-eksen bileşenlerine dönüştürülmesi için kullanılır. dq-eksen bileşenlerine dönüştürülen akımlar referans değerleri ile karşılaştırılır. Her bir bileşen için elde edilen hata bilgisi PI denetleyicilere giriş olarak uygulanır. d ve q-ekseni akımlarının denetiminde kullanılan PI denetleyicilerin çıkışında eviricinin üretmesi gereken gerilimlerin (referans gerilimler) d ve q bileşenleri (V_{id} - V_{iq}) elde edilmektedir. Bu bileşenler üç faza çevrilerek PWM işaretlerinin üretilmesi için gerekli olan üç faz modülasyon dalgaları üretilmektedir [8]. Bu modülasyon dalgaları, üç-seviyeli Sinüzoidal

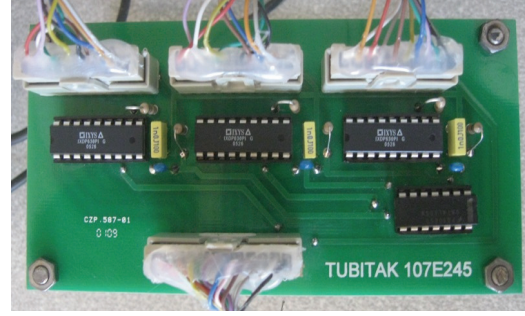
PWM (SPWM) tekniği ile 6 adet PWM işareti elde etmek için kullanılır. Ayrıca, d ve q-eksenin kenetleme etkisini azaltmak için kenetleme terimleri PI denetleyicilerin ileri yoluna eklenmiştir.



Şekil 10. D-STATKOM'un denetim şeması (Control schema of D-STATCOM)

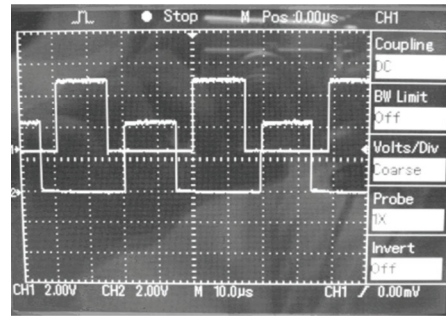
3.7. ÖLÜ-ZAMAN VE KORUMA DEVRELERİ (DEAD-TIME AND PROTECTION CIRCUITS)

Deneyel kurulumda üç-seviyeli eviricinin her bir H-köprüsünde aynı kol üzerinde bulunan güç anahtarlarının kısa devre olmasını önlemek için gerekli olan ölü-zaman, IXDP630PI sayısal ölü-zaman entegresi ile sağlanmıştır. Bu entegrelerden her H-köprü için bir adet kullanılmıştır. Entegre, harici olarak bağlanan R ve C değerlerine bağlı olarak denetleyici kartından gelen 6 tane PWM işaretine 8 clock'luk ölü-zaman süresi ekleyerek ve bu PWM işaretlerinin terslenmiş durumlarını da alarak çıkışa aktarmaktadır. Ayrıca, bu entegre sayesinde, H-köprülerde oluşabilecek hata durumlarına karşı evirici devresinin korunması da yapılmaktadır. Bunun için tüm IPM'lerin hata bilgi çıkışları "VE" kaplarından geçirilerek IXDP630PI entegresinin çıkış uçlarını kontrol eden 7 nolu girişine verilmiş ve herhangi bir hata durumunda tüm kapı işaretlerinin kesilmesi sağlanmıştır [9]. Şekil 11'de işaret tersleme, ölü-zaman ekleme ve IPM modüllerde oluşacak hatalara karşı koruma işlemlerini yerine getirmesi için tasarlanmış kart görülmektedir.



Şekil 11. Ölü-zaman için tasarlanan kart (Designed board for dead-time)

Deneyel kurulumda $4,5\mu s$ 'lik bir ölü-zaman süresi $R=560\Omega$ ve $C=1nF$ değerleri ile sağlanmıştır [9]. Şekil 12'de eviricinin aynı kolu üzerindeki anahtarlara gelen ve $4,5\mu s$ 'lik bir ölü-zaman süresine sahip PWM işaretleri için bir örnek dalga şekli verilmiştir. Burada %50 görev-periyot oranına sahip PWM işaretlerindeki ölü zaman süresinin rahatlıkla görülebilmesi için anahtarlama frekansı 25kHz alınmıştır.



Şekil 12. Evirici devresinin aynı kolu üzerinde bulunan anahtarlar için PWM işaretleri (PWM signals for switches on same leg of inverter)

Yukarıda açıklanan birimlerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan D-STATKOM deneyel kurulumu Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. D-STATKOM deneyel kurulumu (Experimental setup of D-STATCOM)

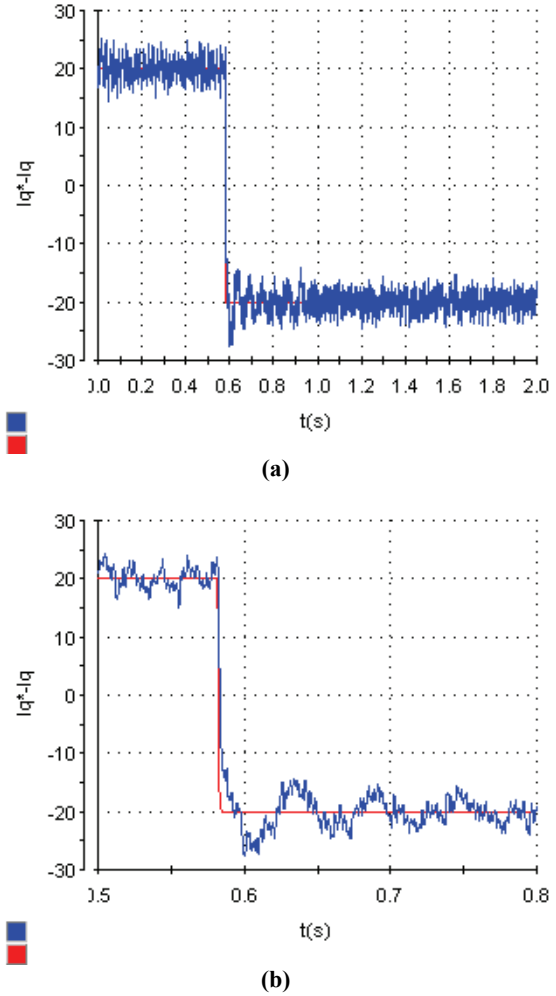
4. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

DeneySEL sonuçlar alınmadan önce, şebeke faz-nötr gerilimi 440V/50A bir varyak yardımı ile 200V'a ayarlanmıştır. Bu gerilim değerine bağlı olarak deneySEL kurulumu gerçekleştirilen üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM, $M_{a0}=0,83$ bekleme durumu için için $Q=0\text{kVAr}$, $M_{a_max}=0,9$ için $Q=-8,5\text{kVAr}$ kapasitif reaktif güç verecek ve $M_{a_min}=0,74$ için $Q=+8,5\text{kVAr}$ endüktif reaktif güç çekecek şekilde çalıştırılmıştır. Varyak, oluşturulan deneySEL kurulumun ilk testlerinin daha düşük gerilimlerde yapılabilmesi için kullanılmıştır. DA-hat geriliminin referans değeri; 200V faz-nötr gerilimi ve $M_{a0}=0,83$ modülasyon indeksi için 340,8V olarak hesaplanmıştır. D-STATKOM devreye alınmadan önce (H-Köprü eviricideki anahtarlara kapı işareti uygulanmadan), eviricinin DA-hat kondansatörleri, IGBT güç anahtarlarının boşluk diyotları üzerinden şarj edilmiştir. Şarj işlemi tamamlandıktan sonra şarj dirençleri kısa devre edilmiştir. DeneySEL kurulumun çalışma şartlarına ilişkin parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. DeneySEL kurulumla ilişkin devre parametreleri
(Circuit parameters related to experimental setup)

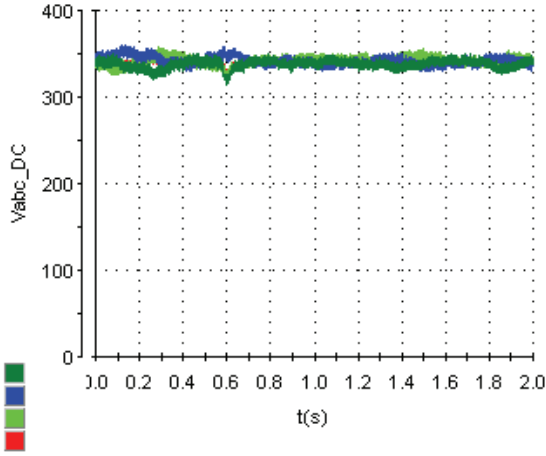
Reaktif güç	: $\pm 8,5\text{kVAr}$
Faz-nötr gerilimi	: 200V/50Hz
Bağlantı endüktansı	: 2,89mH
Şarj direnci	: $1\text{k}\Omega/100\text{W}$
DA-hat kondansatörü	: 3,3 mF/450V
Deşarj direnci	: $23,5\text{k}\Omega/5\text{W}$
Anahtarlama frekansı	: 2.5kHz
Ölü zaman	: 4,5 μs
Referans DA gerilim	: 340,8V

DeneySEL kurulumda akım yönü şebekeden D-STATKOM'a doğru alınmıştır. D-STATKOM'un istenilen reaktif gücü verebilme/çekebilme başarımı, Matlab/Simulink'te oluşturulan denetim algoritmasında i_{qref} gerçek zamanlı değiştirilerek gözlemlenmiştir. Başlangıçta $i_{qref}=+20\text{A}$ girilerek D-STATKOM $Q=-8,5\text{kVAr}$ kapasitif güç verecek şekilde daha sonra $t=0,585\text{s}$ 'de $i_{qref}=-20\text{A}$ girilerek D-STATKOM $Q=+8,5\text{kVAr}$ endüktif güç çekecek şekilde çalıştırılmıştır. Şekil 14(a)'da referans reaktif akımın +20A'dan -20A'ya değişimine ilişkin deneySEL sonuç verilmiştir. Bu durum Şekil 14(b)'de genişletilmiş olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi D-STATKOM'un ürettiği reaktif akım, referans reaktif akımı çok hızlı bir şekilde izleyerek istenilen reaktif akım değerini kısa sürede sağlamıştır.



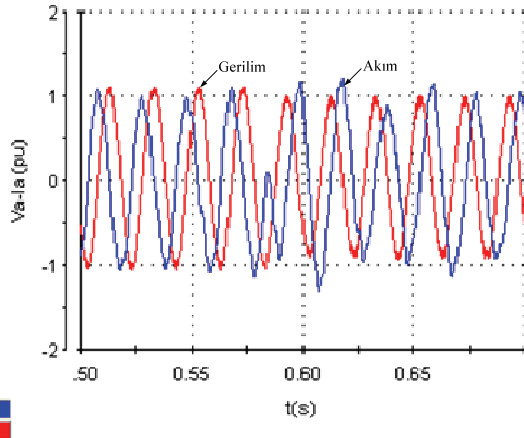
Şekil 14. i_q 'nın i_{qref} 'i izleme başarımı (Tracking performance of i_q to i_{qref})

D-STATKOM'un kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya geçişi esnasında eviricinin her fazına ait DA-hat kondansatörlerinin gerilim değişimleri ve bunların ortalama değeri Şekil 15'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi DA-hat gerilim denetleyicisi kondansatör gerilimlerini referans değerde tutmayı başarmıştır. Her iki çalışma durumunda da DA-hat gerilimlerinin değişimi incelendiğinde kapasitif çalışmada DA-hat gerilimlerde meydana gelen dalgalanmaların daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, kapasitif çalışmada her H-köprüdeki anahtarların çapraz olarak iletimde kaldığı sürenin, dolayısı ile kondansatörlerin şebeke ile bağlı olduğu zamanın endüktif çalışmaya göre daha fazla olması ve bu yüzden kondansatörlerden daha fazla ikinci harmonik akımının çekilmesidir [10].



Şekil 15. DA-hat gerilimlerinin değişimi (Changing of dc-link voltages)

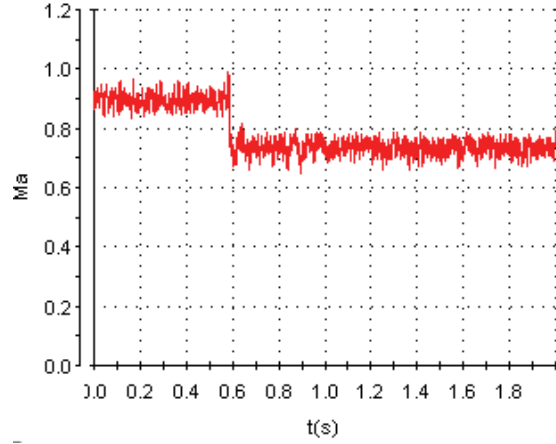
D-STATKOM'un kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya geçişinde bir fazına ilişkin birim değer cinsinden akım ve geriliminin dalga şekli Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, başlangıçta D-STATKOM kapasitif bir akım vermekte iken $t=0.585s$ 'de i_{qref} komutu değiştirildikten sonra endüktif bir akım çekmeye başlamıştır.



Şekil 16. D-STATKOM'un bir fazının akım ve geriliminin dalga şekli (D-STATCOM's voltage and current waveform for phase-a)

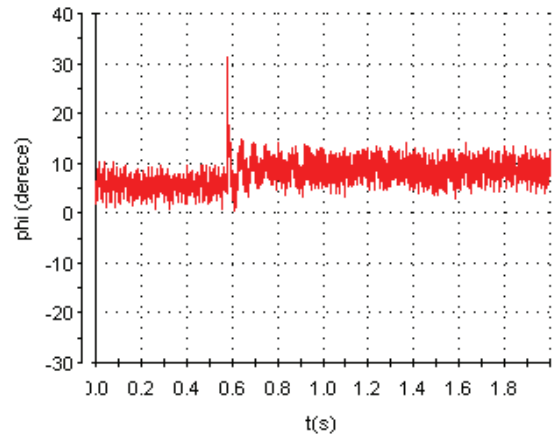
Dolaylı akım denetim yönteminde DA-hat gerilimi sabit olduğu için eviricinin çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği modülasyon indeksi ile ayarlanmaktadır. D-STATKOM'un kapasitif bir akım verebilmesi için modülasyon indeksinin bekleme konumuna göre daha büyük ve endüktif bir akım çekmesi için bekleme konumuna göre daha küçük olması gerekmektedir. Modülasyon indeksinin değişimine ilişkin deneysel sonuç Şekil 17'de verilmiştir. D-STATKOM kapasitif çalışmada yaklaşık 0,9 modülasyon indeksi ile çalışırken endüktif çalışmada modülasyon indeksi yaklaşık 0,74'e düşmektedir. Böylece D-STATKOM'un çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği kapasitif

çalışmada şebeke geriliminin temel bileşeninin genliğinden büyük, endüktif durumda ise daha küçük olmaktadır.



Şekil 17. Modülasyon indeksinin değişimi (Changing of modulation index)

D-STATKOM'un çalışma durumu değiştiği zaman DA gerilimlerin sabit kalması için, şebekeden eviriciye doğru akan aktif gücün de sabit kalması gerekir. Denklem (2) göz önüne alındığında, şebekeden eviriciye doğru akan aktif gücün şebeke gerilimi, evirici gerilimi ve δ faz açısı ile doğru orantılı olduğu görülür. Eğer şebeke ile evirici arasındaki faz farkının denetimi yapılmaz ise D-STATKOM'un çalışma konumunun değişmesi durumunda evirici çıkış gerilimi değiştiği için çekilen aktif güç miktarı da değişecektir. Bu durumda, kapasitif çalışmada akım denetleyicilerinin çıkışından belirlenen faz açısı azaltılarak, endüktif çalışmada ise artırılarak eviriciye doğru akan aktif gücün ve buna bağlı olarak DA-hat gerilimlerinin sabit kalması sağlanmaktadır. Kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya geçişte faz farkının değişimine ilişkin deneysel sonuç Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Faz açısının değişimi (Changing of phase angle)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede, üç-seviyeli H-köprü evirici tabanlı D-STATKOM'un deneysel kurulumunun tasarım aşamaları anlatılmış ve bu kurulumdan elde edilen bazı deneysel sonuçlar verilmiştir. Tasarlanan D-STATKOM'un $\pm 8,5$ kVAr reaktif gücü verebilmesi /çekebilmesi için denetim algoritmasında i_{qref} gerçek zamanlı olarak ± 20 A aralığında değiştirilerek sonuçlar alınmıştır. D-STATKOM'un istenilen reaktif akımı çok kısa sürede sağlayabildiği deneysel sonuçlardan görülmektedir. D-STATKOM'un talep edilen reaktif gücü çok hızlı bir şekilde sağlayabilmesi, geleneksel kompanzasyon yöntemlerinin dezavantajlarını giderecek yeni nesil reaktif güç kompanzatorü olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte D-STATKOM'un akım denetiminde, referans değişimlerine ve bozucu girişlere karşı dayanıklı bir denetleyici kullanılması durumunda ya da farklı reaktif güç denetim yöntemleri kullanılarak D-STATKOM'un dinamik kompanzasyon performansı iyileştirilebilir.

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makalede sunulan çalışmalar, TÜBİTAK-107E245 No.lu "Dağıtım Sistemlerinin Dinamik Kompanzasyonu için 3-Seviyeli Kaskat İnverter Tabanlı Dağıtım Statik Senkron Kompanzator'ün (D-STATCOM) Gerçekleştirilmesi" isimli proje kapsamında yürütülmüştür. Yazarlar, sağlanan destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ö. Salor, D. Küçük, M. Güder, T. Demirci, Y. Akkaya, I. Çadircı, M. Ermiş, "Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Harmonik Bozulma ve Kırpışma Parametrelerinin Oluşturulan Güç Kalitesi Veritabanı Yapısıyla Değerlendirilmesi", **3. EMO Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli, 21-22 Mayıs, 2009.
2. Çetin, A., "Design and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic

Filtering", Phd. Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, METU, 2007.

3. Deniz, E., Çöteli, R., Tuncer, S. ve Dandıl, B., "Üç Seviyeli Kaskat Evirici Kullanan D-STATCOM ile Gerilim Regülasyonu", **e-Journal of New World Sciences Academy**, Cilt: 4, No: 1, 88-105, 2009.
4. Sirisukprasert S., "The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based STATCOM", Phd. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, State University of Virginia, 2004.
5. Chong, H., "Power System Dynamic Voltage Management with Advanced STATCOM and Energy Storage System", Phd. Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, 2006.
6. Xianglian, X., Zou, Y., Ding K., and Liu, F., "Cascade Multilevel Inverter With Phase-Shift SPWM and Its Application in STATCOM", **Industrial Electronics Society, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE**, Busan, South Korea, 1139-1143, 2-6 November, 2004.
7. Akagi, H., Inoue, S., and Yoshii, T., "Control and Performance of a Transformerless Cascade PWM STATCOM with Star Configuration", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Tokyo Inst. of Technol, Tokyo, 1041-1049, July/August 2007.
8. Deniz, E., Tuncer, S., Gençoğlu, M.T., "Voltage Regulation in a Distribution Systems by Using STATCOM with Three-level Diode Clamped Inverter", **5th International Advanced Technologies Symposium**, Karabuk University, KARABUK, 1036-1042, 13-15 May., 2009.
9. Tuncer, S. ve Tatar, Y., "Üç-fazlı 5-Seviyeli Kaskad İnverter Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi", **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt: 16, No: 4, 702-717, 2004.
10. Gerçek, C. Ö., Gültekin, B., Deniz, M. ve Atalık, T., "7-seviyeli STATCOM Prototipi için Yapılan Tasarım ve Modelleme Çalışmaları", **EMO 2. Enerji Verimliliği Sempozyumu**, Kocaeli, 17-18 Mayıs, 2007.