

## DSP ile Kontrol Edilen Üç Seviyeli Interleaved NPC Dönüştürücüsünün Tasarım ve Uygulaması

Cem KÖSEOĞLU<sup>1</sup>, Fevzi ZENGİN<sup>1</sup>, İbrahim SEFA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Inform Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş., AR-GE Merkezi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Ankara, Türkiye  
cem.koseoglu@inform.com.tr

*Bu yayının Tübitak Tevdeb tarafından desteklenen 3161102 proje numaralı "Interleaved Dönüştürücülü Yüksek Güçlü Kesintisiz Güç Kaynağı Tasarımı" projesi kapsamında üretilmiştir.*

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

### Özet

Geleneksel olarak yüksek güçlü güç çeviricilerinin tasarım ve üretimi ancak yarı iletken güç anahtarlarının yeterli sayıda paralel bağlanmaları ile mümkün olabilmektedir. Alışıl gelmiş bu metot ile güç anahtarları birbirine doğrudan paralel bağlanarak çalıştırılmaktadır. Bu teknik ile anahtarların eşzamanlı sürülmesi ve akım paylaşımının eşit bir şekilde gerçekleştirilmesinde uygulamada zorluklar bulunmaktadır. Yapılan çalışma ile ideal olmayan anahtar davranışlarının etkilerini azaltmak ve güvenilirliklerini artırmak amacıyla interleaved çevirici yapısı önerilmektedir. Burada, yüksek güçlü tasarımlar için uygun olan üç seviyeli bir diyot kenetlemeli çevirici, DSP ile üretilen faz kaydırılmış DGM anahtarlama tekniği ile kontrol edilmektedir. Anahtarların doğrudan paralel bağlanarak güç artırımı yapılması yerine çevirici kollarının paralel bağlanarak güç artırımının sağlanması amaçlanmıştır. Öngörülen anahtarlama yaklaşımı, benzetim ortamında modellendikten sonra 30kVA gücündeki bir prototip eviriciye uygulanmış ve doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Kollar arasındaki yük paylaşımı çeviricinin kararlı hal, kısa devre durumu ve doğrusal olmayan yüklerle ilişkin geçici hallerinin incelenmesi yapılmış ve sonuçları rapor edilmiştir. Üç fazlı ve üç seviyeli interleaved bir çeviricinin son nesil DSP ile kontrol edilebildiği ve interleaved anahtarlama tekniğinin yüksek güçlü çeviricilerin üretilmesine olanak sağladığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Interleaved Güç Dönüştürücülere, Interleaved Evirici, Faz Kaydırmalı DGM, Çok Seviyeli Güç Dönüştürücülere, NPC Dönüştürücü

## Design and Implementation of A DSP Controlled Three Level Interleaved NPC Converter

### Abstract

Traditionally the design and production of high power converters were only possible with sufficient number of parallel connections of the semiconductor power switches. By this conventional method, the power switches are operated by directly connecting them in parallel. There are difficulties at implementing the simultaneous driving of the switches and the equalization of the current using this technique. Interleaved converter structure is proposed to reduce the effects of non-ideal switching behaviors and increase their reliability. Here, a three-level neutral point diode clamping converter which is suitable for high-power designs is controlled by the phase shifted PWM switching technique generated by the DSP. It is aimed to increase the power by connecting the legs of the inverter in parallel instead of power increase by directly connecting the switches in parallel. After the foreseen switching approach is modeled in the simulation environment, verification tests are performed by applying a 30kVA prototype inverter and rectifier. The load sharing between the legs at steady state, transient states such as short-circuit and non-linear load switching have been investigated and the results have been reported. It has been seen that a three-phase three-level interleaved converter can be controlled by the new generation DSP and interleaved switching technique allows high-power converters to be produced.

**Keywords:** Interleaved Power Converter, Interleaved Inverter, Phase Shift PWM, Multilevel Power Converters, NPC Converter

## 1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte yüksek güçlü dönüştürücülere olan ihtiyacın artması, güç elektroniği çeviricilerinin kullanım alanını daha da yaygınlaştırarak, yenilenebilir enerji kaynakları ve HVDC gibi alanlarda daha yüksek güçlü güç çeviricilerinin tasarlanması ihtiyacını doğurmuştur. Bununla birlikte IGBT, MOSFET gibi güç anahtarları belirli bir akım ve gerilim değerlerinde üretilebilmektedirler. Daha yüksek güçlü çeviriciler üretilmek istendiğinde bu anahtarlar seri ya da paralel bağlanarak daha yüksek akım/gerilim dayanımına uygun değerlerde anahtar grupları oluşturulmaktadır. Alçak gerilim şebekelerinde çalışacak güç elektroniği çeviricileri tasarlanmak istenildiğinde, seri üretimde bulunan ve ticari olarak temin edilebilen güç anahtarlarının gerilim seviyeleri yeterli olmaktadır. Örneğin günümüzdeki mevcut teknoloji ile 600V, 1200V gibi gerilim dayanımlarına sahip IGBT modülleri monoblok olarak üretilebilmekte, böylece bu tip anahtarlar 220V/240V şebekelerde faz-nötr ve fazlar-arası gerilimlerde doğrudan kullanılabilirler.

Ancak akım taşıma kapasitesi açısından incelendiğinde durum böyle değildir. Özellikle günümüzdeki en yaygın kullanılan güç anahtarı olan IGBT'lerin ticari sınırı üç seviyeli modüller için 400A civarındadır. Daha yüksek akımlı anahtarlar ise IGBT'lerin paralel bağlamaları yoluyla elde edilmektedir.

Anahtarların doğrudan paralel bağlanarak çalıştırılması tekniği ise sürme ve çalışma esnasında bir takım problemlere sebep olmaktadır. Paralel anahtar sayısı arttıkça bu problemlerin çözümü daha da zorlaşmakta bazen çözüm için gereğinden fazla akım taşıma kapasitesine sahip IGBT'ler kullanılmaktadır. Bu seçeneğin sonucunda ise, maliyetler önemli oranda artmakta ve cihazın boyutları büyümektedir.

Anahtarların paralel çalıştırılması ile ilgili problemlerin en önemlileri IGBT'lerin aynı anda iletim/kesim durumuna geçirilememesi, sürekli iletim durumunda ise anahtarların akımı eşit paylaşamaması olarak gösterilebilir. Özellikle kısa devre gibi geçici durumlarda paralel kollarındaki herhangi bir anahtardan kısa süreli de olsa aşırı akım geçmesi anahtarın tahrip olmasına, dolayısıyla sistemin çalışmamasına sebep

olabilecektir. Ayrıca sürme sinyallerinin anahtarlara eş zamanlı olarak uygulanmadığı durumda, bir anahtarın diğerinden önce ya da sonra iletime geçmesi de benzer bir sonuç oluşturabilecek ya da kayıpların artmasına sebep olabilecektir. Yarı iletken anahtarların karakteristikleri arasındaki ideal olmayan farklılıklar, sürücü devrelerdeki ideal olmayan durumlar, sürücü ve anahtarların fiziksel bağlantı şekilleri ve empedans farklılığı, anahtarların jonksiyon sıcaklıklarının farklı olması burada bahsedilen akım dengesizliklerinin sebeplerindendir.

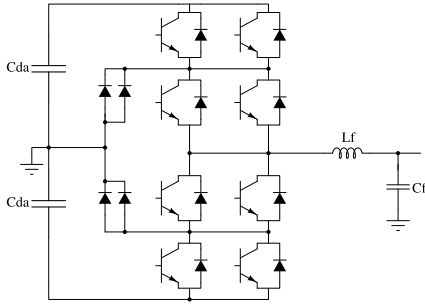
Bu çalışmada anahtarların doğrudan paralellenerek güç artırımı yapılması yerine çevirici kollarının paralel çalıştırılması yaklaşımı kullanılarak güç artırımının yapılması hedeflenmektedir.

Bu amaçla interleaved çevirici mantığı, faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu kullanılarak üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici topolojisine uygulanmıştır. Interleaved yapılar geçmişte en çok DA/DA dönüştürücülere uygulanmış ve güvenilirliğini ispatlamıştır [1]. Ancak literatürde interleaved anahtarlama tekniklerinin üç fazlı ve üç seviyeli eviricilere uygulanması konusunda literatürde çok az sayıda yayın bulunmaktadır. Interleaved çevirici yaklaşımının evirici topolojilerine uygulanmasıyla, DGM doğrultucu, motor sürücü, kesintisiz güç kaynağı, HVDC iletim, yenilenebilir enerji sistemleri gibi uygulamalarda güç artışı interleaved çalışma ile gerçekleştirilebilecektir. Neticede güç elektroniği devresinin topolojisi aynı kalmakla beraber devre değişik şekillerde kontrol edilerek farklı işlevleri yerine getiren cihazlar üretilebilmektedir. Anahtarlama tekniğinin interleaved olarak uygulanması kontrol kurallarını değiştirmemektedir. Burada incelenen yaklaşım iki seviyeli, üç seviyeli diyot kenetlemeli, üç seviyeli T tipi çevirici gibi farklı topolojilere uygulanabilmektedir.

Interleaved anahtarlama yaklaşımı, 2. bölümde benzetim ortamında modellendikten sonra, 3. bölümde 30kVA gücündeki prototip bir eviriciye uygulanarak doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

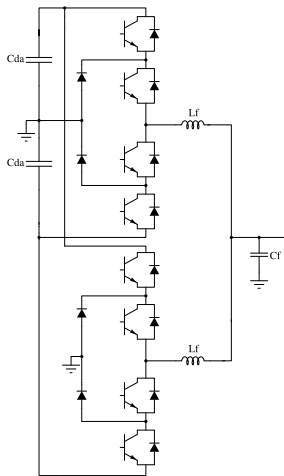
## 2. Interleaved Güç Dönüştürücü Yapısı

Şekil 1’de anahtarların paralel bağlanması yoluyla güç artışı sağlanan diyot kenetlemeli üç seviyeli çevirici yapısı görülmektedir. Şekil 2’de ise faz kaydırmalı DGM ile kontrol edilen üç seviyeli diyot kenetlemeli interleaved çevirici yapısı görülmektedir. Burada sadelik açısından bir faz devresi gösterilmektedir.



**Şekil 1.** Paralel anahtarlar kullanılarak oluşturulan diyot kenetlemeli üç seviyeli çevirici yapısı

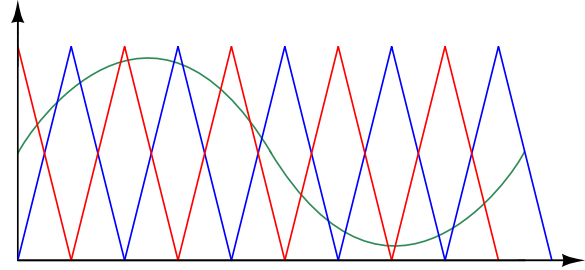
Görüldüğü üzere Şekil 2’deki bağlantı ile anahtarlar doğrudan paralel bağlanmadan güç artışı gerçekleştirilmiştir. Interleaved topolojide bir adet filtre indüktörü yerine iki adet filtre indüktörü kullanılmaktadır. Burada indüktör sayısı artmasına rağmen, akımlar paralel kollar arasında paylaşıldığı için indüktör boyutları küçülmektedir. Ayrıca interleaved çeviricilerde kullanılan faz kaydırmalı DGM anahtarlama tekniği ile paralel kolların toplamı üzerindeki akım dalgacık genliği azaltılabilmektedir [2].



**Şekil 2.** Diyot kenetlemeli interleaved üç seviyeli çevirici yapısı

### 2.1. Faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu

Interleaved çeviricide anahtarlama sinyalleri faz kaydırmalı DGM yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntemde Şekil 3’de görüldüğü üzere referans ve taşıyıcı sinyallerin karşılaştırılması sonucu anahtarlama işaretleri üretilmektedir. Taşıyıcı üçgen dalgalardan biri 180 derece kaydırılarak paralel çalışan çevirici koluna ilişkin anahtarlama işaretleri üretilmektedir. Böylece paralel çalışan çeviricilerin çıkış akımları üzerindeki anahtarlama dalgacıklığı arasında da 180 derece faz farkı elde edilir. Akım dalgacıklıkları arasında faz farkının oluşturulması, paralel kolların akım dalgacıklarının birbirini sönmülmesini sağlar. Modülatöre giren referans işaret ayarlanarak, çıkış dalga şekli kontrol edilebilir.

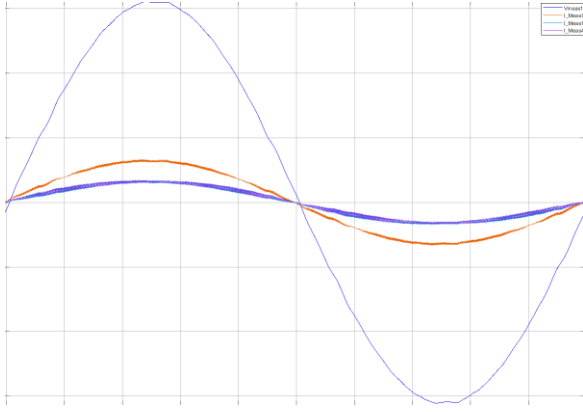


**Şekil 3.** Interleaved darbe genişlik modülasyonu, Yeşil: Referans işaret, Mavi: 1. Kol taşıyıcı işareti, Kırmızı: 2. Kol taşıyıcı işareti

### 2.2. Benzetim sonuçları

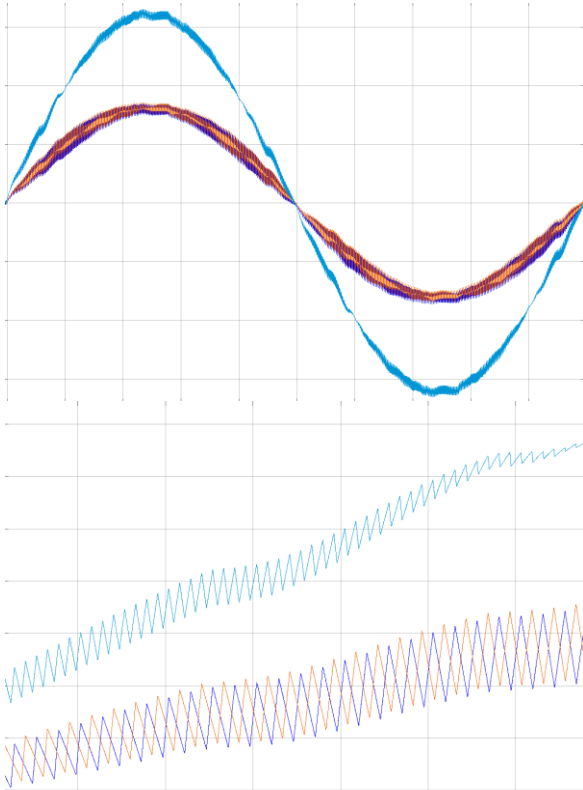
Interleaved çalışma şeklini benzetim ortamında test edebilmek amacıyla üç seviyeli diyot kenetlemeli çevirici Matlab/Simulink ortamında modellenerek, faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu ile uyarılmış ve kontrol edilmiştir.

Anahtarlama işaretlerinin üretilmesinde çok seviyeli çeviricilerin tetiklenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan üç seviyeli sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu kullanılmıştır. Paralel çalışan çevirici koluna ilişkin anahtarlama işaretleri ise bölüm 2.1’de anlatıldığı şekilde taşıyıcı üçgen dalga sinyalinin fazı 180° kaydırılarak elde edilmiştir.



**Şekil 4.** Açık Mavi: Evirici çıkış gerilimi, Açık Mavi/Mor: Kol indüktör akımları, Turuncu: Toplam indüktör akımı

Şekil 4’de evirici çıkış gerilimi, her bir kola ait indüktör akımı ile kol akımlarının toplamı görülmektedir.



**Şekil 5.** Koyu Mavi: 1. Kol indüktör akımı, Turuncu: 2. Kol indüktör akımı, Açık Mavi: Toplam indüktör akımı.

Şekil 5’de görüldüğü üzere paralel kollarındaki akım dalgalılıkları arasında faz farkı mevcuttur. Bu faz farkı sayesinde toplam akım dalgalılığının

yarı değerine kadar azaldığı benzetim sonuçlarından görülmektedir.

Ayrıca görüldüğü üzere paralel kollar akımı eşit paylaşmaktadır. Benzetim sonuçları, ideal koşullarda interleaved çalışma yönteminin paralel çalışan çevirici kolları arasında eşit bir yük paylaşımı sağladığını göstermektedir.

### 3. Üç Fazlı Interleaved Çeviricinin Uygulaması

Üç fazlı üç seviyeli interleaved evirici yapısı şebeke etkileşimli evirici ve motor sürücülere uygulanmasına ilişkin az sayıda örnek bulunmakta olup fpga gibi çevre birimlerle birlikte kullanılabilmiştir [3,4]. Bu çalışmada ise faz kaydırmalı DGM anahtarlama işaretleri, sadece TMS320F28377D DSP’si kullanılarak üretilmiştir. Sistem tamamen sayısal olarak kontrol edilmektedir. Uygulaması gerçekleştirilen çeviriciye ilişkin donanımsal parametreler Tablo 3.1’de görülmektedir. Kapalı çevrim kontrol sayesinde evirici uygulamasında sabit çıkış gerilimi elde edilmektedir. Paralel çalışan kollar arasında akım paylaşımı için herhangi bir kapalı çevrim kontrol uygulanmamaktadır. DGM işaretleri arasındaki faz farkı sistemin çalışması süresince sabit tutulmaktadır.

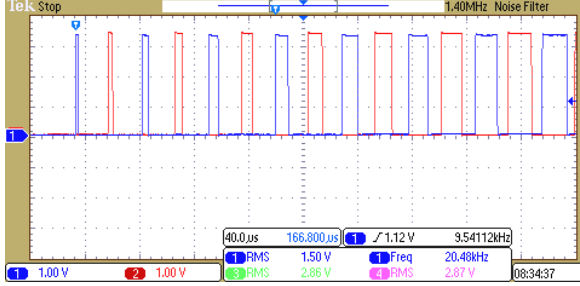
**Tablo 1.** Uygulamada kullanılan interleaved çeviriciye ilişkin parametreler

Parametre	Değer	Yorum
Topoloji	-	Diyot kenetlemeli 3 seviyeli çevirici
Güç	30kVA	3 Faz toplam güç
$F_a$	20kHz	Anahtarlama frekansı
$L_f$	550 $\mu$ H	Paralel kol başına endüktans
$C_f$	40 $\mu$ F	Faz başına çıkış filtre kapasitesi
$C_{DA}$	4x6800 $\mu$ F	DA bara kondansatörü
$V_{DA}$	$\pm$ 360V	DA bara gerilimi
DGM Faz Farkı	180°	DGM’ler arasındaki faz farkı sabit

#### 3.1. Interleaved evirici için DGM sinyallerinin üretilmesi ve evirici çıkış büyüklükleri

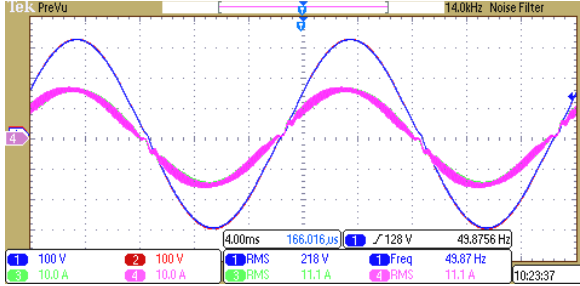
DSP kullanılarak üretilen anahtarlama işaretleri Şekil 6’da görülmektedir. Referans işaret olarak sinüzoidal işaret kullanılmaktadır. Mavi renkli DGM işareti 1. Kola, kırmızı renkli DGM işareti ise 2. kola uygulanmaktadır.

Görüldüğü üzere DGM işaretleri arasında sabit  $180^\circ$  faz farkı bulunmaktadır.



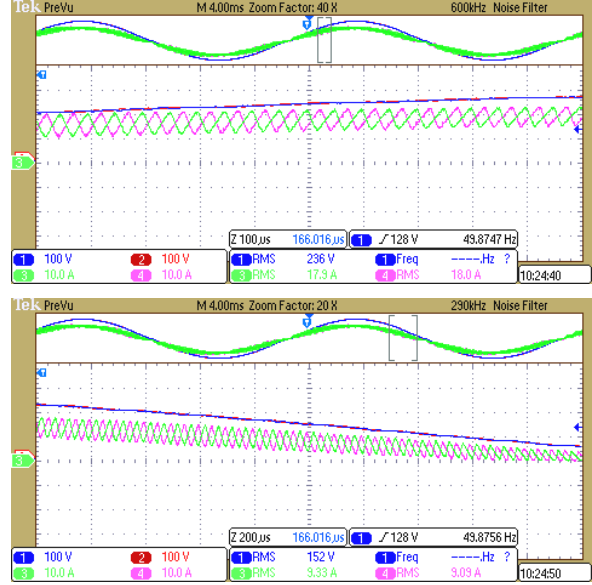
Şekil 6. Faz kaydırmalı DGM anahtarlama işaretleri;  
Mavi:1.Kol, Kırmızı:2.Kol

Şekil 7’de interleaved çalışan eviricinin her bir indüktörünün akımı sırasıyla görülmektedir. Burada paralel kol çıkışları birbirine bağlanmış ve sistem 5kW civarında lineer yük ile yüklenmiştir. Görüldüğü üzere paralel kolların indüktör akımları düzgün bir şekilde üst üste çakışmakta ve yük akımı kollar arasında eşit bir şekilde paylaşılmaktadır.



Şekil 7. Mavi: Evirici çıkış gerilimi,  
Pembe: 1. İndüktörün akımı, Yeşil: 2. İndüktörün akımı

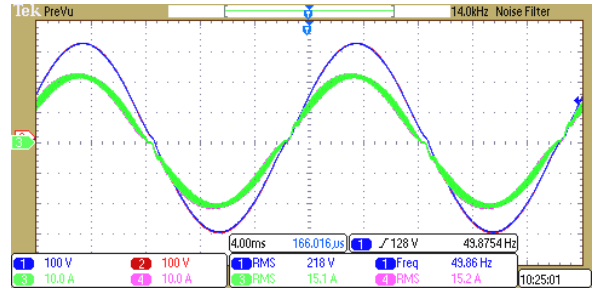
Şekil 8’de evirici çıkış gerilimi ve indüktör akımları daha yakından görülmektedir. Akım dalga şekilleri incelendiğinde 1. paralel kol akımının tepe noktasında 2. kol akımı minimum değerdedir. Dalga şekillerinden görüleceği üzere indüktör akımı dalgalılıkları birbirlerini sönmülemekte, çıkışta her iki indüktör akımı toplandığı için çıkış akımı dalgalılığı azalmaktadır. Bu özellik sayesinde interleaved çevirici çıkışını filtre etmek kolaylaşmakta ve böylece indüktör boyutları küçülmektedir.



Şekil 8. Evirici indüktör akımları,  
Pembe: 1. İndüktör akımı,  
Yeşil: 2. İndüktör akımı

Şekil 8’de akım dalga şekli periyodun çıkış geriliminin bir periyodu süresince incelenmiş ve akım paylaşımının periyodun tamamında eşit ve düzgün bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 9’da evirici çıkış gerilimi ve her bir paralel kolun akımı üst üste görülmektedir. Görüldüğü üzere evirici yükü artırıldığı halde akım paylaşım oranı değişmemektedir. Sistemde yapılan testler sonucunda akım paylaşımının yükte beraber değişmediği doğrulanmıştır.



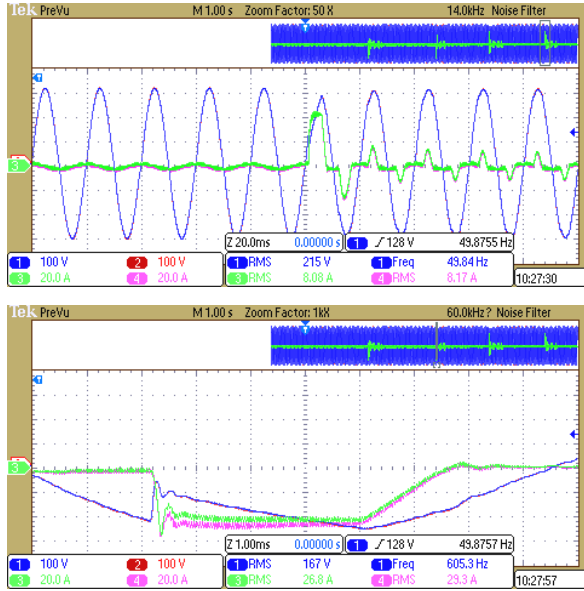
Şekil 9. Evirici çıkış gerilimi ve indüktör akımları

### 3.2. Interleaved üç seviyeli diyot kenetlemeli çeviricide geçici halde akım paylaşımı

Akım paylaşımında incelenmesi gereken bir diğer önemli nokta da geçici durumlardır. Bu amaçla sistem lineer olmayan yüklerle yüklenerek test edilmiştir. Lineer olmayan yük bir kontrolsüz köprü doğrultucu ve çıkışında paralel RC devresinden oluşmaktadır.

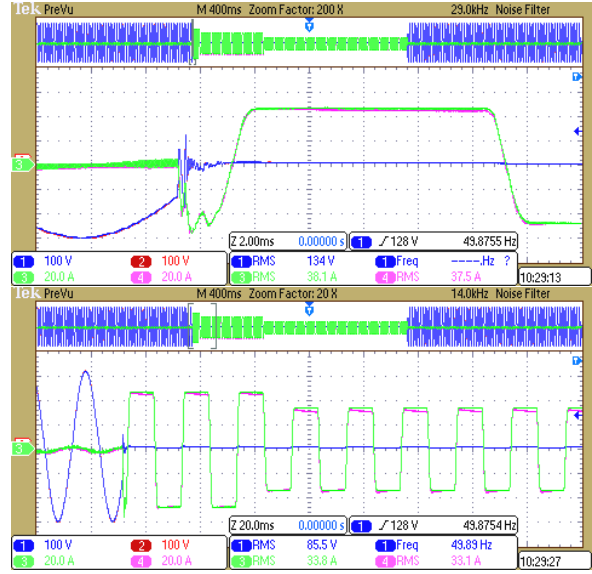
Özellikle lineer olmayan yükün anahtarlendiği ilk ana dikkat edilmelidir. Yük içerisindeki kondansatör ilk anda boş olduğu için, evirici çıkışı ilk anda kısa devre olmaktadır. Lineer olmayan yükün kondansatörü dolup devre sürekli hale gelene kadar evirici çıkışında bir geçici hal davranışı görülmektedir.

Sistemde kısa devre ve lineer olmayan yük anahtarlama durumları gibi geçici haller için bir algoritma kullanılarak, sistem belirli bir akım sınırında çalıştırılmaktadır. Bu tür durumlarda evirici çıkışı bir sabit akım kaynağı gibi davranmakta ve anahtarlama elemanlarının zarar görmesini engellemektedir. Akım değeri sınır değerinin altına indiğinde ise tekrardan gerilim modunda çalışmaya devam edilmektedir.



Şekil 10. Lineer olmayan yük girişi anındaki geçici durum,  
Pembe: 1. İndüktör akımı,  
Yeşil: 2. İndüktör akımı

Şekil 10'da lineer olmayan yükün ilk devreye girdiği an görülmektedir. Bu anda kol akımları 60A tepe değerine kadar birlikte yükselmekte ve çok yakın değerlerde hareket etmektedirler. Geçici hal süresinde oluşan birkaç amperlik fark kabul edilebilir görülmüştür. Ayrıca bu fark birkaç milisaniye sonra kapanmakta ve akım paylaşımı düzgün bir şekilde sağlanmaktadır.



Şekil 11. Kısa devre durumunda çıkış gerilimi ve indüktör akımları

Evirici çıkışı kısa devre edildiğinde elde edilen dalga şekilleri Şekil 11'de görülmektedir. Burada da lineer olmayan yüklerde olduğu gibi akım paylaşımı başarılı bir şekilde gerçekleşmektedir. Sistemde paralel çalışan kollar arasında herhangi bir kapalı çevrim akım kontrolü çalıştırılmamasına rağmen, kullanılan anahtarlama tekniği ile akım paylaşımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada özellikle yüksek güçlü güç dönüştürücü uygulamalarında ortaya çıkan yarı iletken güç anahtarlarının paralellenmesi gereksinimine alternatif bir metod ele alınmıştır. Anahtarların doğrudan paralellenmesi sonucu oluşan problemlerden kaçınılmak amacıyla interleaved dönüştürücü yaklaşımı üç seviyeli diyot kenetlemeli çeviriciye uygulanarak, çevirici uygulaması gerçekleştirilmiştir. 30kVA prototip evirici ile yapılan testlerde akım paylaşımının paralel çalışan interleaved çevirici kolları arasında başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca kısa devre ve lineer olmayan yükün ilk giriş anı gibi geçici durumlar da detaylı olarak incelenerek bu durumlarda dahi yük paylaşımının başarılı bir şekilde gerçekleştiği, yarı iletken anahtarların zarar görmeden çalıştığı tesbit edilmiştir.

Faz kaydırmalı DGM anahtarlama tekniği sayesinde paralel çalışan çevirici kollarındaki

indüktör akımlarının dalgacıklarının birbirini sönmülediği benzetim ortamında ve uygulamada gözlenmiştir. Interleaved çevirici topolojisinde kullanılan indüktör sayısı iki katına çıkmasına rağmen akım yarı değerine düştüğünden kullanılan indüktörlerin boyutları küçülmektedir. Neticede her kol yükü eşit paylaştığı için indüktör boyutları da buna bağlı olarak küçülmektedir.

Bu çalışmada iki kol paralel bağlandığından faz kaydırmalı DGM işaretleri arasında  $180^\circ$  sabit faz farkı kullanılmıştır. Interleaved çalışan çevirici kollarında manyetik bağ bulunmayan iki adet indüktör kullanılması yerine, kuplajlı indüktör kullanımı üzerine araştırma yapılması önerilebilecektir.

## 5. Kaynakça

1. İbrahim Sefa; Şaban Özdemir, “Experimental study of interleaved MPPT converter for PV systems” IECON 2009, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics’ Portugal.
2. Thiemo KleeB, “Samuel Araújo, Peter Zacharias’ ”Size and performance optimization of filter inductors for highly efficient and compact power conversion circuits”, 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France.
3. Eddy Aeloiza, Yu Du “Multilevel Multichannel Interleaved AC-DC Converter for High Current Applications”, 14-18 September 2014’ IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) Pittsburgh, USA.
4. Subhadeep Bhattacharya; Diego Mascarella; Géza Joós; Jean-Marc Cyr; Jianhong Xu “A Dual Three-Level T-NPC Inverter for High-Power Traction Applications”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, Volume: 4, Issue: 2